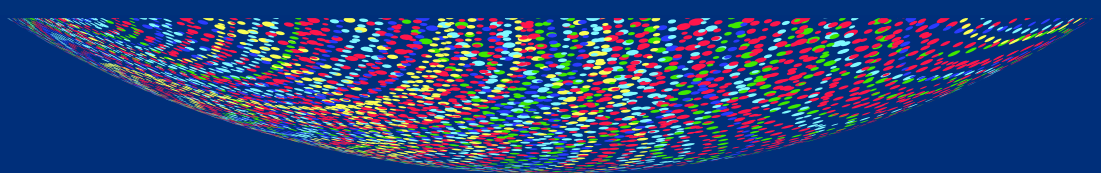
Energy Technology Perspectives 2020

能源技术展望

清洁能源创新特别报告

加速技术进步，迈向可持续未来



iea

Energy Technology Perspectives 2020

能源技术展望

清洁能源创新特别报告

加速技术进步，迈向可持续未来

IEA

前言

毫无疑问，只有全球协调一致大力推动加速创新，能源行业才能实现净零排放。同样明显的是，虽然政府和企业各自设定了气候目标，但在开发更好、更便宜的技术以实现目标方面，所做的努力与目标并不相称。虽然我们已经见证了太阳能光伏、风力涡轮机和锂离子电池等技术的长足进展，但我们所需的技术进步还要求在创新速度和新技术部署规模两方面都取得跨越式发展。而上述进步必须通过增强能源系统安全和韧性的方式来实现。

世界面临的能源创新挑战波及到数十年来没有重大变化的行业，而且这些行业没有商业上可用的低碳选择。上述进步还要求多种技术快速发展，特别是在刚刚走上脱碳道路的一些新兴经济体中。在当今关于能源的辩论中，这些紧迫挑战未得到应有的重视，着实令人担忧。然而，这份*《能源技术展望清洁能源创新特别报告》*提出了让我们抱有希望的理由。它精准指出了最迫切需要创新的领域，并且，十分关键的是，向政府建议将清洁能源创新纳入其能源政策制定的核心。

本报告是国际能源署（IEA）在“能源技术展望”（ETP）主题下工作的新篇章。自国际能源署发布上一份 ETP 报告以来，已有三年时间；在这段时间里，我们思考了长途运输和重工业等经常被忽视的行业需要应对的关键技术挑战。我们还利用这三年开发出了更加完善的建模工具；借助这些工具，我们现在拥有比以往更加强大的能力，能够更为详细地回答关键技术问题。

ETP 主题的回归以本份特别报告为起始，继而将在 2020 年晚些时候发布旗舰报告 ETP 2020，回归正值新冠疫情使加速清洁能源转型工作更为复杂之际，恰逢最为关键之时。自新冠疫情爆发以来，国际能源署调动资源，支持各国政府和其他能源利益攸关方，其中特别值得一提的是在《世界能源展望》（WEO）系列下，发布了《可持续复苏计划》。该计划说明了未来三年的具体政策和针对性投资将如何能够在促进经济增长的同时，创造数百万个就业机会，并使未来全球温室气体排放量保持在 2019 年水平以下。在此基础上，本份 ETP 特别报告提出了支持创新的关键优先事项，以不断推动排放量从 2019 年的峰值下降到净零。

ETP 和 WEO 两份报告将共同为国际能源署清洁能源转型峰会奠定基础，该峰会将汇集数十位部长和首席执行官，以及投资界和民间社会领袖，旨在通过加速向清洁、韧性、包容的能源系统转型来驱动经济发展。我坚信，我们正在付出的努力，包括改版 ETP 系列，有力推动了我于 2015 年启动的国际能源署现代化议程，带动了国际能源署走在全球可持续和安全清洁能源转型的前沿。

法提赫·比罗尔博士

国际能源署 署长

国际能源署。保留所有权利。

致谢

本报告由国际能源署可持续发展、技术与展望司（STO）下设的能源技术政策处与其他司室合作编写。本研究由 Timur Gül（能源技术政策处处长）设计和指导。报告的分析和编写工作由 Araceli Fernandez Pales 负责协调。主要作者为 Araceli Fernandez Pales 和 Simon Bennett。

主要贡献者有：Thibaut Abergel（建筑建模和热泵分析共同牵头人）、Praveen Bains（生物能源）、Jose Miguel Bermudez Menendez（氢能）、Chiara Delmastro（建筑建模和冷却分析共同牵头人）、Alexandre Gouy（电池回收）、Peter Levi（工业建模和分析牵头人）、Raimund Malischek（碳捕捉、利用和封存）、Hana Mandova（工业）、Leonardo Paoli（电池、溢出、专利）、Francesco Pavan（工业）、Uwe Remme（能源转换和供应建模牵头人）、Jacopo Tattini（运输）、Jacob Teter（运输建模和分析牵头人）、Tiffany Vass（轻量化、政策、工业），以及 Sadanand Wachche（电池回收）。做出贡献的其他人员包括：Marine Gorner、Pierre Leduc、Taku Hasegawa、Trevor Morgan，以及 Per-Anders Widell。Caroline Abettan、Claire Hilton、Reka Koczka 和 Diana Louis 提供了必要支持。

Edmund Hosker 负责编辑。Jennifer Allain 担任文字编辑。

做出贡献的署内人员主要有：Niels Berghout（碳捕捉、利用和封存）、Sara Budinis（直接空气捕捉）、Jean-Baptiste Le Marois（政策、创新指标），以及 Luis Munuera（技术成熟度、溢出）。做出贡献的其他人员为 Adam Baylin-Stern、Louis Blanluet 和 Pharoah Le Feuvre。

STO 司长 Mechthild Wörsdörfer 在整个项目中提供了鼓励和支持。国际能源署的其他高级管理人员和同事，特别是 Nick Johnstone、贞森惠佑、Laura Cozzi、Laszlo Varro、Joel Couse、Paolo Frankl、Tim Gould、Brian Motherway，以及 Samantha McCulloch，提供了宝贵的评论和反馈。

此外，感谢传播和数字办公室（CDO）为编写本报告提供帮助，包括 CDO 主任 Jad Mouawad，以及 Jon Custer、Astrid Dumond、Tanya Dyhin、Christopher Gully、Maria Kyriacou、Jethro Mullen、Isabelle Nonain-Semelin、Julie Puech 和 Therese Walsh。

本项工作的完成离不开日本经济产业省、荷兰经济事务与气候政策部的支持。

本报告中的分析和结论借鉴了 2019 年 7 月 3 日 ETP-2020 磋商会议上来自政府、工业界、国际组织、金融界和学术界的高级能源官员和专家的战略指导。国际能源署 2019 年 12 月 18 日在巴黎举办的加速能源创新高级别研讨会上获得的见解、反馈和数据，也为本报告提供了指导。本项工作还得益于国际能源署技术合作项目参与方提供的信息和观点，该项目汇集了来自 55 个国家的政府、学术界和工业界的数千名专家，旨在加快能源技术创新。

国际能源署。保留所有权利。

国际能源署以外的许多专家提供了意见，对基础分析工作发表了评论，并审阅了本报告。他们的评论和建议很有价值。这些专家包括：

Florian Ausfelder	DECHEMA
Monica Axell	瑞典研究院
Chris Bayliss	国际铝业协会
Nuno Bento	里斯本大学学院
Michel Berthelemy	核能署
Sama Bilbao y Leon	核能署
Herib Blanco	格罗宁根大学
Jean-Paul Bouttes	法国电力
Nigel Brandon	帝国理工学院
Keith Burnard	温室气体研发技术合作计划
Iain Campbell	落基山研究所
Roberto Cimino	ENI
Christopher Cleaver	剑桥大学
James Craig	温室气体研发技术合作计划
Colin Cunliff	信息技术与创新基金会
Sujit Das	橡树岭国家实验室
Jonathan Davies	欧盟委员会联合研究中心
Carl de Maré	安赛乐米塔尔集团
Bo Diczfalusy	北欧能源研究中心
Francesco Dolci	欧盟委员会
John Dulac	欧盟委员会
Jean-Michel Durand	欧洲能源储存协会
Alessandro Faldi	埃克森美孚
Alexander Farsan	世界自然基金会国际
Maria Ferrara	都灵理工大学
傅莎	能源基金会（中国）
Kelly Sims Gallagher	塔夫茨大学
Marta Gandiglio	都灵理工大学

国际能源署，保留所有权利。

Mónica García	温室气体研发技术合作计划
Bertrand Gatellier	法国石油与新能源研究院
Kirsty Gogan	能源促进人类（Energy for Humanity）
Lukas Gutzwiller	瑞士联邦能源办公室
Caroline Haglund Stignor	热泵技术合作项目
Jacob Handelsman	美国森林和纸业协会
Andreas Hauer	巴伐利亚应用能源研究中心
StéphaneHenriot	法国石油与新能源研究院
Antoine Herzog	法国电力
Howard Herzog	麻省理工学院
本乡尚	三井物产战略研究所
Edmund Hosker	Hosko 有限公司
Kevin Jayne	美国能源部
Henry Jeffrey	海洋能源系统技术合作计划
Goksin Kavlak	麻省理工学院
Noah Kittner	北卡罗来纳大学
Christian Kjær	北欧能源研究中心
Moon-Hyun Koh	崇实大学
Christian Königstein	欧洲专利局
Kazuma Koyama	大金工业
Amit Kumar	印度能源和资源研究所
Marie-Hélène Laurent	法国电力
Magnus Lindgren	先进汽车燃料技术合作项目
Claude Loréa	全球水泥和混凝土协会
Volkmar Lottner	能源储存技术合作项目前主席
Claude Mandil	国际能源署前署长
Yuko Masuda	大金工业
John McCann	爱尔兰可持续能源局
Yann Ménière	欧洲专利局
Paul C. Miles	桑迪亚实验室

国际能源署。保留所有权利。

Roberto Millini	ENI
Philippe Montarnal	法国原子能和替代能源委员会
Simone Mori	Enel 集团
Daniel Mugnier	太阳能供暖和制冷技术合作项目
Manabu Nabeshima	日本经济产业省
Sumie Nakayama	日本电力开发公司
Lena Neij	隆德大学国际工业环境经济研究所
西村元彦	川崎重工
Thomas Nowak	欧洲热泵协会
Rafael Ortiz-Cebolla	欧盟委员会联合研究中心
Henri Paillère	国际原子能机构
Thomas Pellerin-Carlin	雅克-德洛尔研究所
Vincent Petit	施耐德电气
Cédric Philibert	气候和能源高级顾问
Antonio Pires da Cruz	法国石油与新能源研究院
Andrew Purvis	世界钢铁协会
Nicola Rega	欧洲造纸工业联合会
Stephan Renz	热泵技术合作项目
Ian Rowe	美国能源部
Ambuj Sagar	印度理工学院德里分校
Toshiyuki Sakamoto	日本能源经济研究所
BjörnSandén	查尔默斯理工大学
Toshiyuki Shirai	日本经济产业省
Ralph Sims	梅西大学
Jim Skea	帝国理工学院
Matthijs Soede	欧盟委员会
Bert Stuij	荷兰政府
田中伸男	国际能源署前署长
Peter Taylor	利兹大学
Jessika E. Trancik	麻省理工学院

国际能源署。保留所有权利。

Norio Ueda	川崎重工
Fridtjof Fossum Unander	挪威研究理事会
Noé van Hulst	荷兰政府
Mark van Stiphout	欧盟委员会
Antonio Vayá Soler	核能署
Pierre Verlinden	Amrock Pty 有限公司
Julia Walschebauer	欧盟委员会
Jim Watson	伦敦大学学院
Hans-Jörn Weddige	蒂森克虏伯
Eveline Weidner	欧盟委员会联合研究中心
Amanda Wilson	加拿大自然资源部
Charlie Wilson	东安格利亚大学
Kim Winther	Fjernvarme Fyn
Markus Wråke	瑞典能源研究中心
Felix Wu	美国能源部
Masato Yamada	MHI Vestas
Kyota Yamamoto	日本经济产业省
Micah Ziegler	麻省理工学院

国际能源署。保留所有权利。

目录

执行摘要 12
第 1 章 清洁能源技术的创新和政府的关键作用 17
导言 18
我们所谓的创新是什么意思？ 19
成功的新创意最终需要经历四个阶段 22
政府和其他行为体在创新体系中的作用 23
新冠疫情：清洁能源技术创新的威胁抑或机遇？ 29
参考文献 32
第 2 章 2020 全球清洁能源创新现状 35
导言 36
跟踪清洁能源创新进展 36
政府研发资金 37
私营部门研发资金 41
风险投资 43
专利活动 45
国家政策支持 46
新冠疫情对清洁能源创新的潜在影响 48
参考文献 54
第 3 章可持续发展情景下的创新需求 57
导言 57
帮助实现净零排放的能源系统成熟度如何？ 58
技术从实验室走向市场的时间表 69
沿着学习曲线前行 72
加快创新的技术属性 74

国际能源署。保留所有权利。

可持续发展情景下的溢出效应 80
参考文献 88
第 4 章 清洁能源创新需要加快进展 94
导言 94
加速创新情景——创新到底能为我们做出多少贡献？ 98
新冠疫情对关键清洁能源技术的潜在负面影响——减少创新情景 112
参考文献 119
第 5 章 数十年一遇：重塑未来的机会 125
导言 126
加快清洁能源技术创新实现净零排放的五大原则 126
新冠疫情：有必要迅速落实创新政策，以保持发展势头并加快转型 133
根据技术族群的需要量身定制一揽子计划 146
参考文献 158
附录 160
缩略语和缩写词 160
计量单位 161

插图清单

图 1.1 有效能源创新体系的四大支柱 20
图 1.2 技术创新的四个阶段，以及改进后续新一代设计的反馈和溢出效应 23
图 2.1 国际能源署按技术划分统计的公共能源技术研发和示范期支出 38
图 2.2 按国家和行业划分的公共能源研发占 GDP 的比例以及占所有公共研发支出的比例 . 39
图 2.3 全球企业 2007-19 年在部分行业中的研发支出及其在收入中的比重 42
图 2.4 全球能源技术初创企业的早期阶段风险投资交易情况 43
图 2.5 低碳能源技术专利在部分国家/地区的签发状况 45
图 2.6 低碳技术领域相关应用的全球专利计数 46
图 2.7 可能刺激零排放技术创新的明确碳定价水平和部署目标 48
图 2.8 2020 年一季度与 2019 年一季度相比，汽车、航空和化工企业研发支出变化情况 51

国际能源署。保留所有权利。

图 2.9 2007-12 年部分行业的收入和研发支出增长率 52
图 2.10 按年份和上、下半年分类的全球能源相关风投交易金额和数目（早期和晚期） 53
图 3.1 可持续发展情景下，与既定政策情景相比，按当前技术成熟度类别分类的全球能源行业二氧化碳减排量 59
图 3.2 低碳电力价值链上各技术的技术成熟度 65
图 3.3 二氧化碳价值链上各项技术的技术成熟度 67
图 3.4 低碳氢价值链上各项技术的技术成熟度 68
图 3.5 部分能源技术从原型期到进入市场、以及早期应用期的时长 69
图 3.6 可持续发展情景下部分技术实现重大市场份额所需时间 71
图 3.7 太阳能光伏模块成本的演变（上）和锂离子电池价格的演变（下） 73
图 3.8 可持续发展情景下部分技术的单位成本降幅 74
图 3.9 1975-2010 年光伏在多晶硅总需求中的占比（左）和多晶硅价格（右） 78
图 3.10 可持续发展情景下，与既定政策情景相比，通过选定技术协同领域可能实现的减排量 80
图 3.11 按组件类别分类的电化学装置成本降低潜力的细分信息 81
图 3.12 可持续发展情景下碳纤维增强塑料在选定应用中的成本和累计部署情况 83
图 3.13 可持续发展情景下，工业和电力应用中的化学吸收累积能力（左）和资本投入成本学习曲线（右） 85
图 3.14 可持续发展情景下，蒸汽压缩应用的累积能力（左）和资本投入成本学习曲线（右） 87
图 4.1 2050 年按部门分类的全球能源行业二氧化碳排放量 99
图 4.2 部分技术从首个原型到进入市场的时间，包括近期清洁能源技术发展史上速度最快的一些案例 100
图 4.3 现有不同成熟度技术 2050 年对全球能源行业年度二氧化碳减排量的贡献 101
图 4.4 按最终用途划分的全球最终能源需求领域中氢能和电力占比（左），以及氢能技术普及率的部分衡量标准（右） 103
图 4.5 2050 年按来源划分的全球捕捉的二氧化碳排放量 105
图 4.6 加速创新情景与可持续发展情景下，2050 年按交通运输方式分类的全球电气化车辆份额比较 107
图 4.7 不同来源路线和情景中的全球锂生产 108
图 4.8 可持续发展情景下，2030 年按细分市场划分的热泵技术部署情况，以及在延迟创新的假设情景下未部署的部分 114
图 4.9 减少创新情景与可持续发展情景相比，不同细分市场中车辆电池年需求减少量 115
图 4.10 与可持续发展情景相比，减少创新情景下不同领域二氧化碳排放捕捉和封存量的减少 117

国际能源署。保留所有权利。

图 4.11 与可持续发展情景相比，减少创新情景下不同领域全球氢能需求和供给量的减少 118
图 5.1 加快清洁能源技术创新实现净零排放的关键原则 128
图 5.2 部分低碳价值链上各项技术的成熟度 131
图 5.3 部分技术族群及其在低碳价值链上的足迹 147

专栏清单

专栏 1.1 有关创新的关键概念 20
专栏 1.2 政府参与太阳能光伏开发 27
专栏 1.3 企业认为新冠疫情对能源创新有怎样的影响 30
专栏 3.1 新冠疫情大流行对能源使用和二氧化碳排放的影响 60
专栏 3.2 评估技术成熟度：《能源技术展望（ETP）清洁能源技术指南》 62
专栏 3.3 技术跨境传播 70
专栏 3.4 对新冠病毒疫苗的大力投入是否能产生溢出效应，推动生物燃料技术发展？ 78
专栏 3.5 量化溢出效应对加速技术成本下降的影响 80
专栏 3.6 从电化学到碳捕捉的潜在知识溢出 85
专栏 4.1 新冠疫情后，清洁能源技术创新是否面临风险？ 95
专栏 4.2 先进的飞机设计 110
专栏 5.1 能源创新刺激措施的过往经验 137
专栏 5.2 数十年一遇的投资机会 143
专栏 1.1 有关创新的关键概念 20
专栏 1.2 政府参与太阳能光伏开发 27
专栏 1.3 企业认为新冠疫情对能源创新有怎样的影响 30

表格清单

表 1.1 能源创新过程中各阶段主要行为体不同作用的部分示例 25
表 2.1 截至 2020 年 6 月初，经济复苏措施中已宣布的部分相关措施 49
表 3.1 有利于加快创新周期或更快学习的能源技术属性 75
表 5.1 清洁能源创新之外的能源行业可持续复苏计划政策行动 134

国际能源署。保留所有权利。

执行摘要

我们为何需要创新

如果不大力加速清洁能源创新，净零排放的目标将无法实现。世界范围内，许多国家政府和公司纷纷承诺在未来几十年内实现二氧化碳（CO_2）净零排放，以实现长期可持续发展目标，关于气候变化的《巴黎协定》就是一个例子。然而，这些高调的承诺与清洁能源技术的现状明显脱节。虽然目前使用的技术可以在较大程度上达成上述目标设定的减排量，但即使存在更强有力的政策支持，这些技术本身并不足以在确保能源系统安全的同时实现全球净零。

能源效率和可再生能源对实现气候目标具有根本性的作用，但仍需要使用其他技术来处理很大一部分排放。这部分排放大多来自于减排技术选择有限的行业，如航运、卡车、航空以及钢铁、水泥和化工等重工业。这些行业的脱碳将在很大程度上要求开发尚未使用的新技术。而目前许多清洁能源技术还有待进一步努力来降低成本、加速部署。

对培育新技术、推进现有技术而言，创新是关键。本报告评估了大幅加速清洁能源创新的若干途径，以实现净零排放，并增进能源安全。

创新不等同于发明。当一个新创意经历了构思和实验阶段，来到现实世界后，清洁能源创新流程包括四个关键阶段。但通向成熟的路径可能很漫长，而且也无法保证成功。

- **原型期：**概念发展成为设计，然后发展成为新设备的原型（例如，用纯氢替代煤炭的炼钢炉）。
- **示范期：**在完整规模的商业单元中采用新技术，提供第一批实例（例如，水泥厂二氧化碳排放捕捉系统）。
- **早期应用期：**本阶段，新技术与成熟技术之间仍存在成本和性能差距，政策上必须对此予以关注（例如，电动车和氢能动力车）。
- **成熟期：**随着部署推进，产品成为人们在进行新购买时的主流普遍选择（例如，水力涡轮机）。

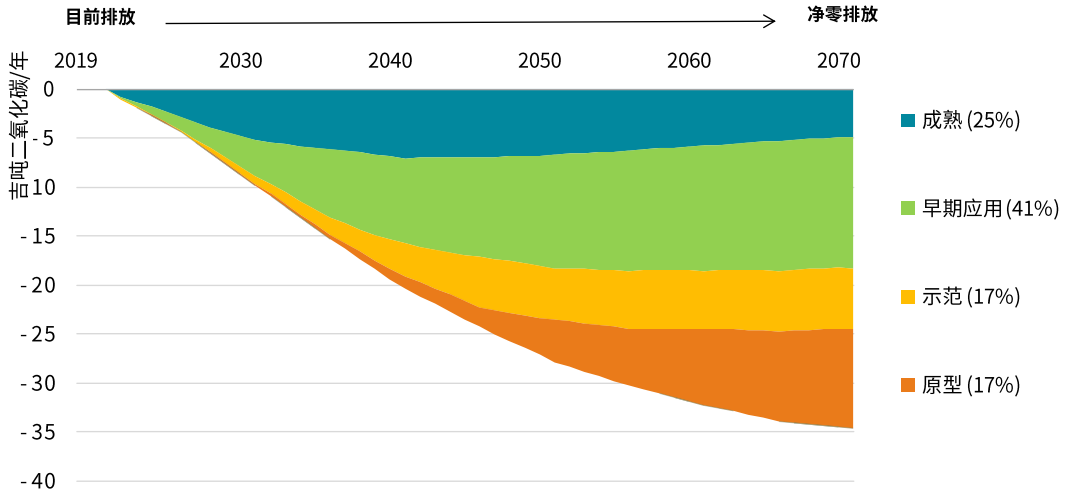
理解能源创新挑战的规模

要想推动世界走上净零排放可持续路径，既没有单一的解决方案，也没有简易的解决方案。减少全球二氧化碳排放将需要丰富多样的技术，以多种组合和应用方式在各行各业发挥作用。这些技术处于差别巨大的不同发展阶段，但我们已经可以得知这些技术很可能会为实现国际能源和气候目标所需的减排量做出多大贡献。

国际能源署。保留所有权利。

能源行业实现净零排放所需的关键技术现已为人所知，但其中有些尚未成熟。世界走上可持续发展轨道所需的累计减排量中，约有一半可以通过四种主要技术方式实现。[1]这些方式包括：实现供热和运输等终端使用行业电气化；应用碳捕捉、利用和封存；使用低碳氢和氢衍生燃料；以及使用生物能源。然而，以上领域均面临挑战，即在减排最困难的行业使得整个价值链具有商业可行性。我们新发布的《能源技术展望清洁能源技术指南》[2]提供了一个框架，用于比较上述四个领域中 400 多种组成技术的市场成熟度。

可持续发展情景下，按成熟度分类的各项技术的二氧化碳减排量



国际能源署 2020。保留所有权利。

注：百分比是指在可持续发展情景下，与基线趋势相比，目前具有特定成熟度的各种技术到 2070 年将可能实现的累计减排量。

目前处于原型期或示范期的技术对国际能源署可持续发展情景下的累计减排量贡献超过三分之一。

早期阶段的技术发挥巨大作用。在转向可持续发展路径所需的累计二氧化碳减排量中，约 35%来自目前处于原型期或示范期的技术。另有 40%的减排量有赖于尚未大规模市场化部署的技术。因此，迫切需要采取措施，加速创新力度。近几十年来，发展最快的能源相关技术实例包括 LED 和锂离子电池等消费品，这些产品从最初原型到进入大众市场经历了 10-30 年。必须以这些实例为基准来构建形成一系列能源技术，以实现净零排放。

[1] 实现净零排放的可持续轨迹或路径是指可持续发展情景。

[2] 国际能源署开发了一个新的互动工具，该工具提供关于 400 多种不同技术设计和组成部分成熟度的详细信息和分析，并汇总成本和性能的改进目标以及相应领域的领先企业。可在网上查阅：www.iea.org/articles/etp-clean-energy-technology-guide.

国际能源署。保留所有权利。

创新如何能帮助加快实现净零排放目标

如果政府和企业希望更快实现净零排放，就需要加速早期阶段技术的进展。本报告中，我们提出了加速创新情景，探讨如何在 2050 年实现全球净零排放，其中部分前提是假设目前尚处于实验室或小原型阶段的技术得以迅速获得商业投资。这些技术的成本和时间表存在很大的不确定性，但这种理论情景表明了全球范围内推动创新可以产生什么成果。

在我们的加速创新情景下，与目前的政策规划相比，2050 年所有额外减排量中几乎一半来自于目前尚未进入市场的技术。与目前在用技术没有改进的情景相比，早期阶段的技术提供了加速创新情景下减排量的约三分之一。实践中，这种情景有一定的要求；例如，要求从现在直至2050年平均每月有两座新的氢能炼钢厂投入运营。目前，用于此类炼钢厂的技术仅处在原型期。同时，这种情景要求每年建造 90 座能捕捉和封存自身二氧化碳排放的生物能源厂。如今，只有一个此种大型设施在运行。

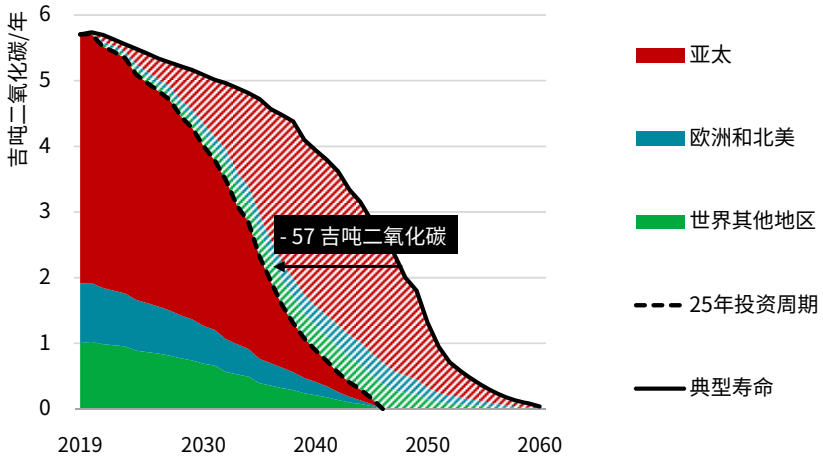
如果现在不加速推动进展，则会带来拉长净零排放转型期的风险。 未来几十年的创新步伐将取决于政府当今出台的政策。新冠疫情后，示范期项目推迟，早期应用期的技术部署放缓，这将需要政府增大未来工作力度，比如在新技术获得竞争力之前为其提供更长期的支持。举例而言，包括氢能电解在内的关键技术所需求的总资本开支可能会在 2030 年前增加 10%，对加大生产规模造成更大困难。

避免大量“锁定”排放至关重要

投资周期与净零目标相一致，可以为新技术创造巨大的市场，避免大量“锁定”排放。对于部分能源部门来说，现在距离 2050 年只有一个投资周期，因此投资的时机和可用的新技术至关重要。对低碳研发加大投入，并对最具挑战性行业中的关键示范项目增加投资，可能尤为有效。在钢铁、水泥和化工行业，如果恰当的技术能够在下一个 25 年的翻新周期于 2030 年左右开始之前及时进入市场，则可以避免近 60 吉吨的二氧化碳排放量（吉吨 CO_2）。

国际能源署。保留所有权利。

下一个投资周期末“解锁”重工业领域减排量



国际能源署 2020。保留所有权利。

注：钢铁和水泥设施的典型寿命为 40 年；化工设施的平均寿命为 30 年。在本报告中的可持续发展情景下，一旦新技术可供商业使用，全部资产都将在第一个 25 年翻新期中被清洁替代品取代或转型成为清洁替代品。

下一个 25 年投资周期结束时存在一个机遇，可以有机会将钢铁、水泥和化工行业现有设备的二氧化碳预计排放量削减近 60 吉吨，减幅达 38%。

新冠疫情可能削弱或催化能源创新

亟需加快创新之际，重大挫折随新冠疫情大流行而来。近期，新冠疫情大流行的破坏作用将在世界范围内削弱将新技术推向市场的能力。市场和政策中存在的不确定性可能减少企业家能够获得的资金。

创新涉及广泛的参与者，而政府在其中的中心性作用远不止是为研发提供资金。政府确立总体国家目标和优先事项，对于确定市场预期、确保知识流动、投资于必要基础设施以及使重大示范项目得以推进至关重要。

如果政府成功应对新冠疫情带来的挑战，则有机会加速清洁能源创新。 这能够有助于保护能源研发领域的约 75 万个工作岗位。此外，这可能是一个战略机遇，让政府能够确保新冠疫情后产业更加强大，并为供给将来的国内和国际增长市场做好准备。在实现可持续能源和气候目标的路径上，我们预计，对目前处于大规模原型期和示范期的技术，未来 20 年内平均每年的投资将为 3500 亿美元左右。

寻求振兴经济活动的政府应即刻关注某些领域。尤其重要的是，要在 2025 年之前将维研发经费持在计划水平，并考虑在战略领域提高研发经费。基于市场的政策和供资可以帮助扩展小型模块化技术的价值链，大幅推动技术进步；太阳能电池板曾经的发展历程就是一个实例。与其他技术跨行业发挥协同效应是一种成本相对较低的创新方式。电化学技术就是显而易见的例子，它是电池、电解技术和燃料电池的共同基础。

国际能源署。保留所有权利。

IEA 提出五项关键创新原则

对于旨在实现净零排放目标并同时维护能源安全的政府而言，这五项原则主要针对的是全球需求背景下的国家政策挑战，但它们与所有关注能源技术和转型的政策制定者和战略家都相关。

1. **设定优先事项、跟踪并调整。**对公共资源支持技术组合的选择程序进行审查，以确保这些程序是严谨的集体决策，灵活且符合当地优势。
2. **推进公共研发和市场引导的民间创新。**利用从公共研发到市场激励等一系列工具，为不同技术相应地提供更多资金。
3. **顾全价值链中各个环节。**从大局出发，确保关键价值链的所有组成部分都朝向下一个市场应用均衡推进，并确保溢出效应得到利用。
4. **建设使能基础设施。**调动民间资金，通过分担网络的强化和商业规模示范期的投资风险，助力跨越“死亡之谷”。
5. **做出全球努力实现区域成功。**合作分享最佳实践、经验和资源，通过现有多边平台和其他途径，应对紧迫的全球技术挑战。

随着世界各国追求更安全、更可持续的能源未来，国际能源署将继续支持各国政府、产业界、投资者和其他利益攸关方推进能源创新，从而向更清洁、更具韧性的能源系统加速转型。

国际能源署。保留所有权利。

第 1 章 清洁能源技术的创新和政府的关键作用

要点

- 更清洁、更有韧性、净零排放的未来能源系统将需要广泛的技术，其中一部分技术仍处于早期发展阶段。对于这些新技术而言，创新是一个不确定的竞争性过程：很多创意都会无果而终。本报告探讨了如何管理不确定性，并且扩大现有可用的、负担得起的清洁能源技术的数量，以支持在符合国际能源和气候目标的时期内实现净零排放。报告中使用了国际能源署的一种新模型，该模型针对目前大多数情况下缺乏规模可扩展的成熟低碳技术的长途交通运输和重工业行业，重点强调了可在这些行业中加快进展的候选技术，包括电气化（由电池支持）、氢能（及氢衍生燃料）、二氧化碳捕捉，以及生物能源。它为政策决策者提供了行动建议。
- 成功的技术概念最终需要经历四个阶段：原型期、示范期、早期应用期和成熟期。这些阶段之间的反馈意味着技术选项总在不断发展。规模、消费者价值以及与其他技术的协同效应等属性，决定了技术以多快的速度通过各阶段。
- 创新过程涉及广泛的参与者，包括政府、研究人员、投资者、企业家、企业和民间社会，在形成新技术或改良技术的创意、完善和资助这些技术直至其进入市场和得到部署方面，他们都发挥重要的作用。创新体系是复杂的，有赖于四大支柱：资源推动、知识管理、市场拉动和社会政治支持。
- 政府需要发挥的作用尤其重要且广泛，远不止于为研发提供资金。政府设定总体国家目标和优先事项，并在确立市场预期方面发挥不可或缺的作用。在确保知识流动、投资使能基础设施和促进重大示范项目方面，政府也肩负着独特的责任。
- 70 年来，太阳能光伏成本几乎一路持续下降，这显示出政府能够带来变革。在不同阶段，美国、德国、中国和其他国家政府运用了研发和市场拉动政策措施，包括设定目标和保障收入，以鼓励对支持创新和规模经济的整条价值链进行投资。锂离子电池的发展方式也体现出类似的规律。
- 新冠疫情大流行可能会给清洁能源创新带来意想不到的重大挫折；国际能源署的一项调查显示，正在开发净零排放技术的企业认为其研发预算很可能将会削减。然而，目前一系列国家正在制定大规模经济复苏计划，这为政府提供了一个支持清洁能源创新就业和加速技术进步的机会，而此时对清洁能源创新的需求达到了前所未有的高峰。

国际能源署。保留所有权利。

导言

我们如果要实现联合国能源相关可持续发展目标，包括根据《巴黎协定》减缓气候变化，就必须迅速朝向温室气体净零排放转型。这就需要使用广泛的一系列清洁能源技术。其中一些技术已经成熟；另一些则仍处于发展的早期阶段，或仅存在于原型期。当前的研究工作可能会在未来适当的时候创造出更多技术。这些能源技术还可能提供其他益处，例如，提高电力系统灵活性的技术还可以让空气更清洁、能源更安全。

成功之路必然艰难而曲折。成功取决于技术创新，而技术创新需要时间：例如，太阳能光伏和电池用了数十年才达到其目前的发展阶段。而且并非每一项进入开发程序的技术都会取得成功；不确定性固有存在于现有技术和新技术的演进中。不过，上述观点都只是为了强调：找到能够成功带来快速变革的创新方式非常重要。

在这样的背景下，《能源技术展望特别报告》将聚焦加速技术进步，以实现可持续发展的未来。报告强调我们目前正处在一个关键节点，并在结论部分提出了有助于实现真正变革的建议。

报告的结构

第 1 章在历史经验的基础上，介绍了清洁能源技术创新所涉及的步骤，以及政府和其他行为体在创新全程中发挥的作用。本章解释了为什么强劲且有凝聚力的创新体系对清洁能源转型至关重要，并探讨了新冠疫情可能带来的风险和机遇。

第 2 章概述了清洁能源技术创新现状。它回顾了支持创新的不同资源，从政府和公共部门资助研发（R&D），到风险投资和专利。随后，本章评估了新冠疫情对这些不同资源的可能影响。

第 3 章从国际能源署可持续发展情景（Sustainable Development Scenario）的视角，审视长期清洁能源技术创新需求，这种设想指明了一条途径，用于实现联合国可持续发展议程中能源相关关键目标，包括根据《巴黎协定》减缓气候变化。可持续发展情景下的排放轨迹与在 2070 年左右实现全球二氧化碳“净零”排放的目标一致。

第 4 章探讨了新冠疫情给清洁能源技术创新带来的机遇和挑战。本章提出了加速创新情景，阐述了在 2050 年前实现净零碳排放对清洁能源技术创新有什么需求。本章还提出了减少创新情景，阐述了延迟推广关键新兴清洁能源技术有何种风险和后果。

第 5 章结论部分为政策决策者提出了有关促进清洁能源技术创新的建议。本章将近期优先事项与结构性变革区分开来，并考虑到我们所面临挑战的规模和所涉及的漫长准备时间，陈述了立即行动的理由。

国际能源署。保留所有权利。

我们所谓的创新是什么意思?

本报告中，技术创新被定义为一个过程，涵盖了产生新产品或生产工艺的创意、以及引导其从实验室到主流市场扩散的发展（专栏 1.1）。在每个发展阶段，都存在资金风险、技术风险和市场风险，而这些风险又受到各种社会和政治因素的影响。因此，实践中只有少数产品能够一路走到大规模市场部署阶段。

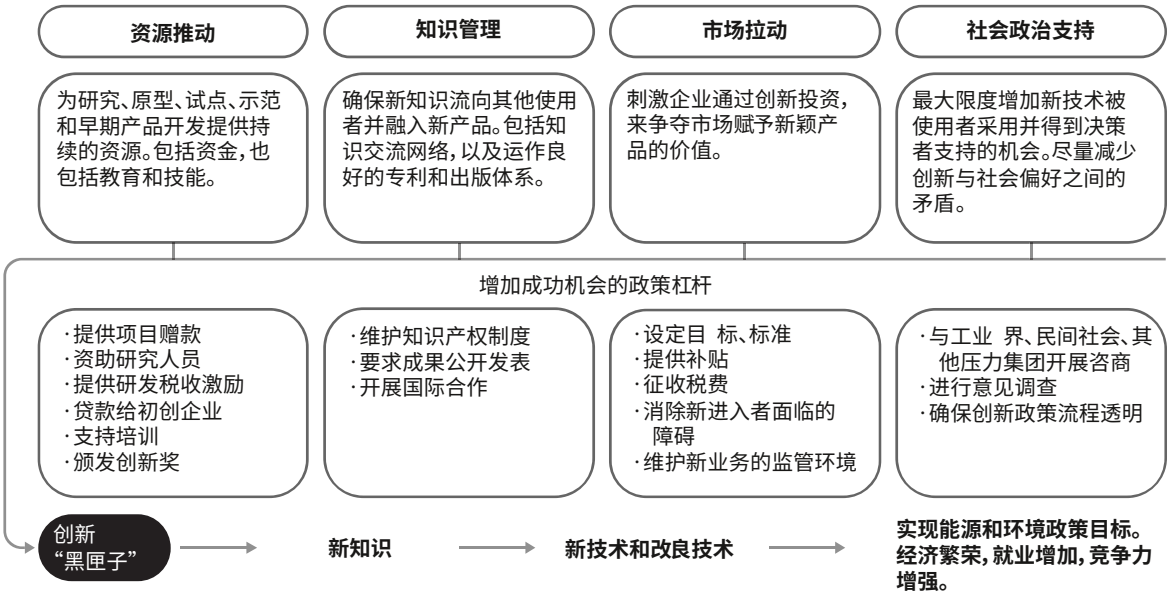
任何一项技术的创新历程都是演进式的。一项技术为更好地适应环境，会随着经验的积累而演进（尤其是成本和性能得到改善），演进方式主要有三种：1）通过研究学习；2）通过实践学习；以及 3）规模经济。一项技术改善后，更有可能得到秉持不同标准的研发出资方和新使用者的青睐。这样就形成了一个良性循环，即所谓的“普及率越高，回报率越高”。然而对早期阶段的技术而言，其成本通常高于竞争者，上述反馈回路明显偏弱，需要协调一致的高风险投资才能获得第一批市场机会。剧变和渐变进展对创新过程都至关重要。

对技术的选择是在不断变化的环境中做出的，因为企业、消费者、政策、竞争技术、基础设施和社会规范都在变化。有多种原因可能使技术对使用者产生更大吸引力。这些原因包括关联技术、消费者行为、政策，有时还包括使用者可获得的信息的变化。这些变量中的每一个都可能发生变化，导致人们忽略某项技术而青睐其他替代技术，或者导致以前被否定的技术找到新的市场机遇。通过同时进行以下两项工作，政府和私营部门行为体可以提高创新成功的机会：改善技术（例如通过研究），以及改善选择环境（例如通过监管、广告或开发新商业模式）。

成功的创新体系囊括利益一致、功能多样的广泛行为体，上述各类功能都可以通过公共政策得到加强（Gallagher et al., 2012）。这些功能可以归纳为四大类（图 1.1）。如果在这四大类中任何一类下行动缺失，则创新体系将难以把研究转化为技术变革。有必要提供持续的研发资金流、熟练的劳动力（如研究员、工程师）和研究基础设施（实验室、研究机构、大学）：这些资源可以来自私营、公共甚至慈善部门，既可以针对特定问题，也可以支持基础研究（资源推动）。研究人员、学术界、企业、政策决策者和国际伙伴之间必须能够便利地交流新知识（知识管理）。新产品或服务的预期市场价值必须足够大，才能使研发风险值得承担，这往往是由市场规则和立法建立的激励措施所决定的。如果市场激励水平高，则新创意开发的大部分风险可以由私营部门承担（市场拉动）。此外，新产品或服务需要得到广泛的社会政治支持，尽管可能会遭到利益受到威胁方的反对（社会政治支持）。

国际能源署。保留所有权利。

图 1.1　有效能源创新体系的四大支柱



国际能源署 2020。保留所有权利。

来源：改编自 IEA (2019), Clean Energy Transitions: Accelerating Energy Technology Innovation Beyond 2020: Focus on India, IEA, Paris, https://webstore.iea.org/clean-energy-transitions-accelerating-innovation-beyond-2020-focus-on-india。

由四大支柱构成的简化框架可以帮助决策者对创新支持问题进行综合全面的思考。

专栏 1.1　有关创新的关键概念

- **技术：**任何专门用于生产、储存和配送能源，或向使用者提供新的或改进的能源服务或商品的装置、装置组件或其使用流程。为清楚明确起见，本报告对“技术应用”（如可再生电力）、“技术类型”（如太阳能光伏）、“技术设计”（如钙钛矿电池）和“技术组件”（如智能逆变器）做出了区分。
- **技术创新：**通过科学和知识的实际应用来改进执行任务方式的过程，通常会产生性能更好的设备，此处的性能是以能效、使用者友好度或成本等指标来衡量的。这个过程包括通过研究学习（研发）和通过实践学习，以及这两者与其所支持的技术创新体系的互动。

国际能源署。保留所有权利。

- **技术创新体系：**有形和无形因素之间动态和不断演进的相互作用，这些因素决定了某一技术中创新过程中的各个阶段。它包括创新者、使用者、机构、出资者、民间社会行为体，以及支配以上各方行动的认知、网络和规则。
- **通过研究学习：**通过投入研发资源来寻找新创意并将其开发成为可行的产品和服务（包括原型期和示范期项目）所进行的知识积累。
- **通过实践学习：**通过重复、试验和反馈来从开展行动的直接经验中所进行的知识积累。
- **规模经济：**当固定成本和可变成本的上升速度低于产出单位数量的上升速度时，在制造和安装中获得的成本优势。与其有关联的包括大规模生产类似商品，以及使用大型设备，例如管道所需材料量不随输量线性增加。规模不经济虽然很少见，但也曾被观察到（Coulomb and Neuhoff, 2006）。
- **不实践即遗忘：**某项技术的生产或使用中断，它致使已经积累的知识丧失，并导致中断后再投入使用的下一个单元的单位成本增加。
- **溢出效应：**通过实践学习或通过研究学习的正外部性，它提高了原创新活动目标以外领域的创新速度。溢出效应可被视为对在地理位置或科学上接近的平行创新生态系统的“免费”投入。知识溢出效应是指纳入新原理，例如太阳能光伏生产方采用来自半导体制造行业的突破性技术。应用溢出效应是指：一项技术在针对原应用通过创新得到完善后，才在另外的新应用中被采用，例如锂离子电池在被开发用于消费品后，在汽车中被采用。
- **公共物品市场失灵：**如果由于知识很容易被其他人获得而造成企业不能充分利用其投资回报，则私营部门生产知识的动机就很有限。在一定程度上，专利和公共研发支出是对这种市场失灵的应对。
- **重大性：**一个阈值，超过这个阈值的技术就被认为具有能够对供应链施加“重大”影响的足够市场份额，本报告将其定义为某一给定行业中全国存量的 1%。超过这个阈值以后，大多数技术在设计、生产和熟悉程度上已经足够成熟，从而使得下一阶段的部署比较顺畅。

国际能源署。保留所有权利。

成功的新创意最终需要经历四个阶段.....

线性的创新过程极为罕见，没有一项技术不经过修改就可以完成从创意到进入市场的全程。技术的发展轨迹受到不同成熟阶段和不同用途的技术之间的反馈循环和溢出效应的影响，往往会经历挫折和再设计。不过，需要逐一考虑所有成功技术最终都要经历的四个不同阶段，因为各阶段都有不同的特点和要求（图 1.2）。这四个阶段与技术类型、技术设计、技术组件这些不同层面的技术定义都相关，不过最适用于技术设计。

原型期：在最初定义之后，一个新概念发展成为设计，然后发展成为新装置或现有设备新配置的原型，或用于改良市场上某产品的组件的原型。在这个阶段，成功概率低，不过各项目的成本也普遍低。

示范期：在给定市场上完整规模的商业单元中采用新技术，提供第一批实例。示范的目的是表明技术有效，并减少出资人认为存在的风险：除非新产品被证明能够在盈利规模和成本下运行，否则潜在客户一般不会考虑新产品。与原型期相比，示范期更耗时，成本和风险也更高。本阶段通常被称为“死亡之谷”，对于大规模有形技术尤其如此。

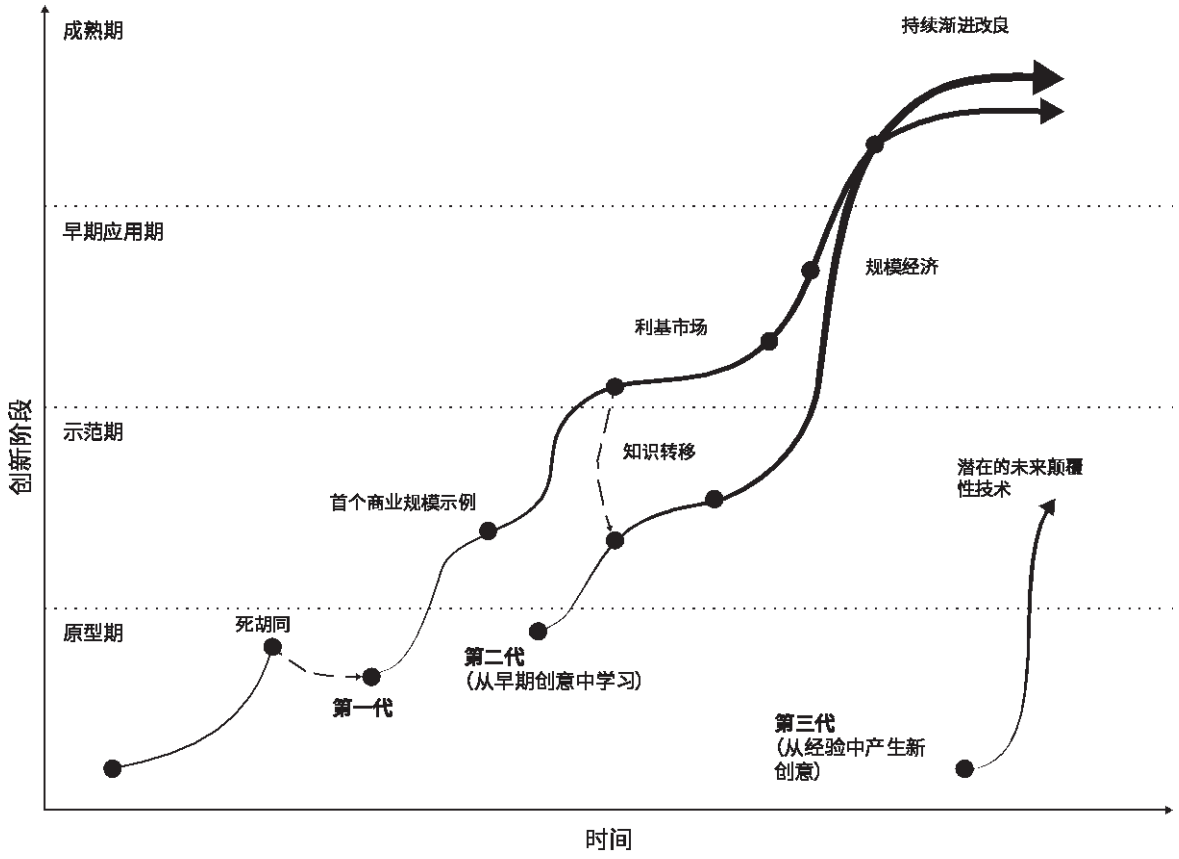
早期应用期：在这一阶段，与现有技术相比仍然成本较高、功能有差距，但为达到特定目的而有意向试用或需要新技术的客户会使用该技术。这一时期是“死亡之谷”的延续，在很多情况下，来自早期利基市场的收入不足以覆盖成本。如果政府认为推广新技术会产生更广泛的社会、环境或经济效益，则可能会通过酌情采购或财政支持等方式提供帮助。然而，在商业环境中运作意味着更多成本和风险可以由私营部门承担，并且竞争会驱动成本下行，鼓励改良。随着利基市场数量增长，新技术在适用市场中达到 1%或更高的重大份额。

成熟期：随着部署推进，从重大走向成熟，产品逐渐成为新购买的主流，甚至可能开始与现有存量资产竞争，导致这些资产提前退役，驱动普及提速。在本阶段，通过实践学习持续渐进，同时，来自工程师和使用者的反馈激发出更多新创意，催生出具有剧变式改进的新原型。虽然本阶段初期可能仍然存在一些成本或性能差距，但具有优势的设计已经被人们接受，风险一般也已为人所熟知，达到私人投资者可以承受的水平。

从早期应用期到成熟期的全程中，技术通过创新而不断改进。在有些情况下，技术成为市场主流很久以后，出现重大的不连续改进，例如电动车用锂离子电池。在另一些情况下，当技术达到了某一程度后，预期在持续学习的过程中技术只会小幅度渐进发展，例如大型水力发电站。

国际能源署。保留所有权利。

图 1.2　技术创新的四个阶段，以及改进后续新一代设计的反馈和溢出效应



国际能源署 2020。保留所有权利。

成功的技术最终要经历创新的四个阶段，研发在每个阶段都会推动改进、激发新颖原型创意。

政府和其他行为体在创新体系中的作用

在能源创新历程的各个阶段，公共和私营部门的行为体，包括非营利性研究机构和出资方，都发挥着不可或缺的作用（表 1.1）。对所有行为体来说，竞争都是能源创新的主要驱动力。包括国有企业在内的各种规模的企业，都有向客户提供更新产品的动机，以增加市场份额，避免被竞争对手以更廉价或性能更好的产品击败。投资基金寻找能够创造最多回报、帮助基金获得更多资本的新企业。各国也常常竞相为本国企业和工人争取投资和市场份额。地方政府也是如此，它们在重塑城市能源系统方面发挥着日益重要的作用。

政府的作用尤为关键。它包括教育人民、资助研发、提供网络基础设施、保护知识产权、支持出口商、购买新产品、帮助中小企业、塑造公共价值观，以及制定市场和金融总体监管框架（Hekkert et al., 2007; Bergek et al., 2008; Kim and Wilson, 2019; Grubler et al., 2012; Roberts and Geels, 2018）。公共干预创新的必要理由是：市场无法充分提供新创意和新技术

国际能源署。保留所有权利。

——所谓的公共物品市场失灵，导致企业将支出优先用于利润确定性更高的项目。特别值得一提的是，剧变式的新概念或“颠覆性”技术，往往产生于基础科学研究，而极少由现有企业提供，因为现有企业倾向于注重对其已有技术组合做出渐进式改进（OECD, 2015）。对于政府想要获得、但市场价值较低的社会或环境成果，颠覆性技术可能尤其重要。

虽然有理由担心公共部门的研发可能会“排挤”企业的研发动机，但证据表明，企业研究的成果量越来越有赖于公共资助的研发所产生的创意（Fleming et al., 2019）。用于能源研发的公共资金很可能刺激私营部门增加而不是减少支出（Nemet and Kammen, 2007）。

如果机械地描述政府如何填补私营部门留下的空白，则低估了政府作为的能力。政府曾经运用其权力为私营部门制定激励措施，并与私营部门合作，取得了政府想要的成果：例如空间探索、疫苗，以及核能。人们越来越认识到，清洁能源技术领域中许多最重大的挑战或可得益于“任务导向”的做法（Díaz Anadón, 2012; Mazzucato, 2018）。支持产业集群、战略性利用公共采购，以及投资于使能基础设施都可以在这种做法中发挥一定的作用，从而提升创新成功的概率。

太阳能光伏的创新故事就是一个例证，说明了政府协调行动如何能够引导和加速技术发展，并在同时发挥私营部门的领导优势（专栏 1.2）。这个例子体现了政府支持的重要性：从研发直至陆续在利基市场中扩大需求（从价值最高、最简单的应用开始），政府支持都很重要。它也体现了创新过程的全球性：在太阳能光伏从实验室走向市场的过程中，几个不同国家的政府都发挥了重要作用，对外部事件做出了适当反应，从而增大了太阳能光伏成功沿着学习曲线推进的机会。重要的是，虽然有时对太阳能光伏需求的增速在个别国家因政策变化而有所下降，但全球市场持续增长，这是由于全球市场以世界各地不同国家的激励措施为支撑。

锂电技术的发展历程呈现出一定的相似性（Kittner, Lill and Kammen, 2017），加拿大、中国、日本、挪威和美国都在其中发挥了作用。有迹象标明，研发工作是降低成本的重要驱动力，例如通过开发新的阴极材料，增加了比容量，提高了电荷容量利用率。[3]虽然阴极和阳极材料价格下降起到了一定的作用，但研发让我们能够使用成本更低的金属代替钴。

光伏和锂电技术创新的故事远未结束。2017 年光伏专利活动量仍远高于 2005 年之前的任何时间，锂电技术专利尚未达到顶峰：成功的新组件和设计很可能将在未来数年中出现。不过，光伏和锂电技术迄今为止的经历凸显了研发在创新历程初始期的重要性，以及世界各国政府在促成重大新技术获得成功方面的关键作用。

[3] Ziegler, M. and J.E. Trancik (2020), Personal communication on 1 March 2020, Massachusetts Institute of Technology.

国际能源署。保留所有权利。

表 1.1 能源创新过程中各阶段主要行为体不同作用的部分示例

阶段	私营部门	政府	投资者社群	民间社会
从原型期到成熟期的各个阶段	• 帮助创造使政策得以制定的空间和政治合法性。 • 通过专业协会、国际投资和标准化来传播知识。	• 设定市场框架和对投资者的激励措施。帮助确立创业的吸引力和市场对新进入者的开放程度。指导国有企业的创新和投资。 • 提升公众对技术变革的期望和信心。 • 确保新知识得到适当的保护，并且，如果新知识得益于公共资金支持，则确保新知识得到适当使用。支持通过会议、开放获取出版和社团等进行知识共享。	• 评估现有技术时考虑到未来气候和其他政策风险。	• 倡导支持理想新技术的政策，包括消费者激励和公共采购。
原型期	• 资助和运营企业实验室。 • 与大学合作并为其提供资助，与无直接竞争关系的企业合作，或与他方合作开展风险无法由一家企业独自承担的项目。	• 优先安排相关研究课题，以引导研究促进社会目标。资助公共研究机构和私营实验室的基础研发和高风险研发。资助或联合资助复杂的多利益攸关方应用研究项目，以测试商业化之前的技术。设立与期望技术进步相关的奖励。 • 调整税收制度，以刺激私人研究支出。	• 提供天使基金，帮助小型初创企业或企业家起步。	• 通过基金会和对大学的捐赠，将资金导向剧变式创新。

国际能源署。保留所有权利。

阶段	私营部门	政府	投资者社群	民间社会
示范期	• 利用企业风险投资来孵化实验室产生的成功新技术并将其推向市场。 • 承担建设、主办和/或运营试点和首创性商业化工厂的风险。	• 通过赠款和贷款为项目和初创企业提供资金。也可以购买股权。 • 通过资助孵化器和投资人网络或降低第三方资本投资风险来支持企业家。 • 确保示范项目的收入，并出台适当的规章制度来管理先行者风险。	提供风投基金和成长股权，以带动技术走向市场。	为示范项目提供第一批用户，支持符合当地价值和承诺就业的项目。
早期应用期	• 开发并完善新产品和服务的商业模式和营销。 • 在生产和经营中促进通过实践学习。	• 运用各类融资（包括优惠贷款、赠款和股权融资）弥补资本市场的空白，以支持企业家扩大规模。 • 利用政府采购、组合标准和采购激励措施，以打造一连串“利基”市场。 • 防止滥用垄断权力，允许对自然垄断市场中的项目开展监管实验。 • 确保及时建设任何必要的使能基础设施和网络。	• 随着技术进步调整对技术的风险认知。 • 与企业分享投资者的需求和机会。	提供早期应用者

国际能源署。保留所有权利。

专栏 1.2　　政府参与太阳能光伏开发

在将太阳能光伏从实验室推向市场、激励早期应用期和促进持续创新方面，多国政府发挥了关键作用，但没有任何一个国家可以独揽大功。

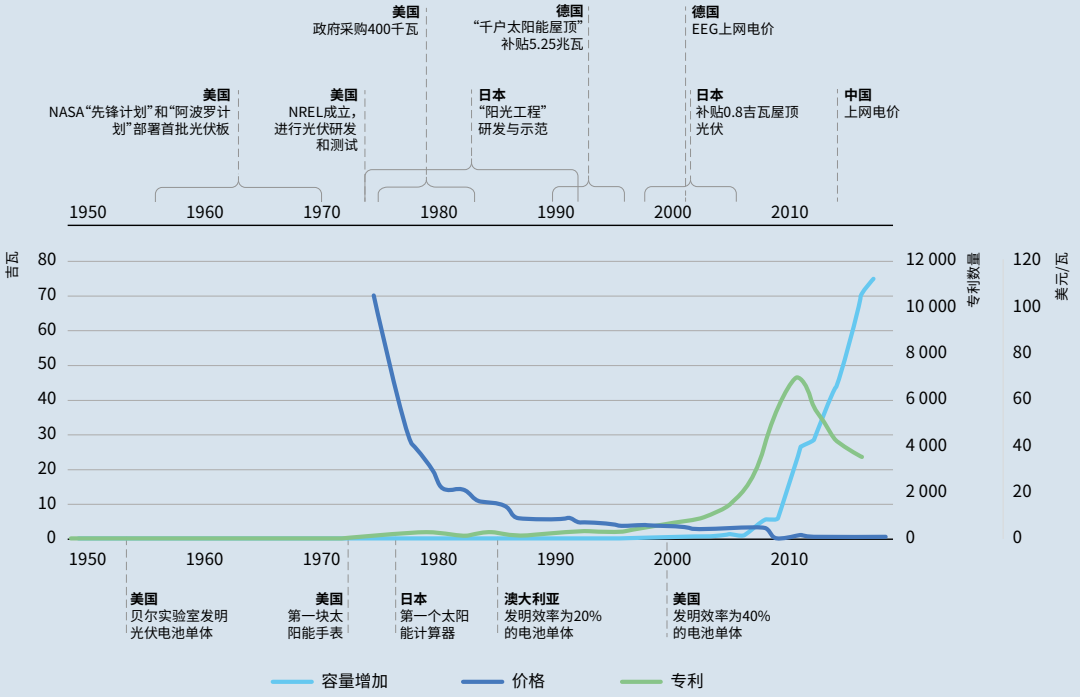
光伏电池的首次示范是在 20 世纪 50 年代由美国贝尔实验室进行的；作为受政府管制的电信许可证的一部分，贝尔实验室获准将 AT&T 和西电公司经营预算中的一定份额用于高风险基础性研发。在美国国家航空和航天局（NASA）的监督领导下，美国在光伏电池技术上的主导地位一直持续到 20 世纪 70 年代；该局拥有数额可观的公共研发资金，并开始在卫星和航天飞机上使用光伏。在 20 世纪 70 年代石油危机的刺激下，日本和美国为寻求更安全的能源，加大了对光伏研究的公共资金投入。美国政府监管的实验室通过剥离成立了企业，并且找到了光伏的利基商机。而在日本，夏普等企业在政府的帮助下建成生产设施，也找到了市场利基。

20 世纪 80 年代至 90 年代期间，用于发电的光伏没有竞争力，只有一些愿为少量电力支付高价的离网客户愿意使用光伏。然而，由于美国、日本和德国出台政府采购和激励政策，这些国家的光伏供应商相继得以扩大规模。随着更多国家的研究人员清楚地认识到光伏的潜力，光伏领域研发经费增加，专利数量加速增长，成本下降。政府的上网电价方案在帮助建立市场方面具有特别重要意义，此类方案于上世纪 90 年代首先在德国出现，截至 2010 年代，意大利、西班牙、美国、中国和印度也已纷纷出台了上网电价方案。此类方案以不断提高的部署目标为后盾，针对并网系统，提供了全球供应链所需的有保障规模扩张。此时，专利申请达到顶峰，市场围绕一种优势设计发生整合。

尽管太阳能光伏发展至今已经历了大约 60 年，但如果这些国家以及此处未提及的其他国家没有分担上述创新阶段的责任，则几乎可以肯定太阳能光伏的进展会更加缓慢（Gallagher, 2014; Nemet, 2019）。

国际能源署。保留所有权利。

光伏发展过程中的关键政府项目（上）和里程碑（下）



国际能源署 2020。保留所有权利。

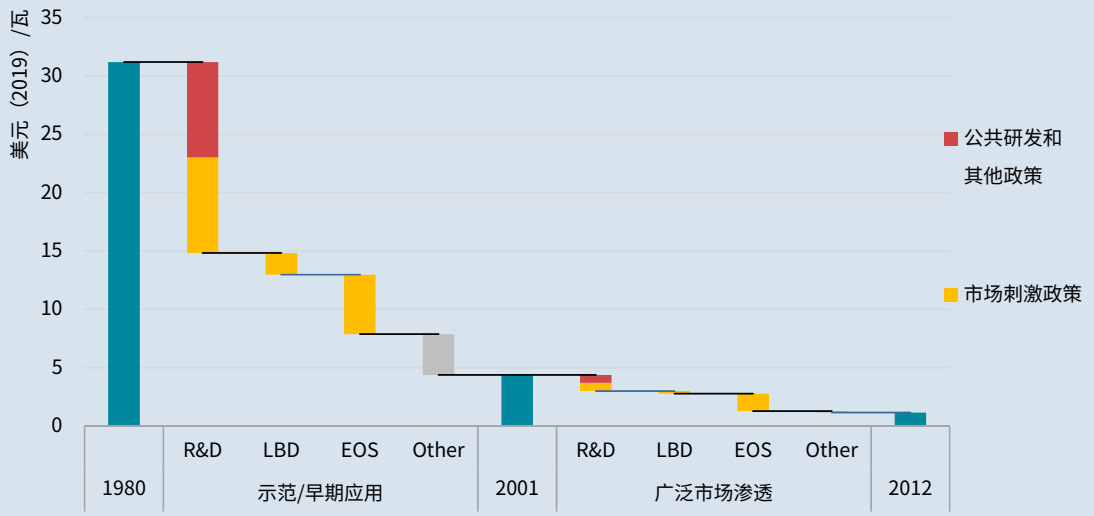
注：NREL = 美国国家可再生能源实验室；EEG = 德国《可再生能源法》。

来源：Nemet (2019); Persat et al. (2019); Kavlak, McNerney and Trancik (2018)。

可以通过估算不同技术要素对降低成本的贡献，并利用一般化假设将这些元素与高层驱动因素对应起来，来评估资源推动和市场拉动措施的相对重要性 （Kavlak, McNerney and Trancik, 2018）。据估计，1980 年至 2012 年期间，可归因于市场拉动措施——即私营部门通过研究学习、通过实践学习（重复性常规生产活动）和规模经济三者结合——的技术改良对太阳能光伏板生产成本下降的贡献份额达三分之二。[1] 此时期全程当中，虽然规模经济对降低成本所做贡献仅占约 22%，但在 2001 年之后，规模经济的重要性大幅提升。[2] 硅价格、晶圆面积和工厂设计很可能都得益于半导体行业的发展，这说明溢出效应很重要。总体而言，上述情况表明约 60%的成本下降是研发的结果，包括公共和私人出资的研发。2001 年之前，研发动机可能尤为强烈，因为这一时期中，晶体光伏和薄膜光伏技术之间的竞争造成了不确定局面，尚不清楚哪种设计将占优势地位。从全球产量份额来看，市场上的领先技术在不到 10 年间两度交替，最终由于更高效的晶体光伏技术在中国量产实现规模经济，致使薄膜光伏的市场份额跌至不足 10%（Hoppmann, 2018）。

国际能源署。保留所有权利。

按高层机制和驱动源划分的不同因素对太阳能光伏成本下降的贡献



国际能源署 2020。保留所有权利

注：R&D = 通过研究学习；LBD = 通过实践学习；EOS = 规模经济。“其他”包括外部驱动的投入价格和成本。假设：研发资金一半来自公共部门，一半来自私营部门，且对成本的影响相同。

来源：国际能源署基于 Kavlak, McNerney and Trancik (2018)的计算结果。

注：1.包括模块效率、非硅材料成本、晶圆面积，以及良率。2.包括一部分非硅材料成本、工厂规模，以及硅价格。

新冠疫情：清洁能源技术创新的威胁抑或机遇？

新冠疫情大流行对世界各国造成了残酷的冲击。截至 2020 年 5 月中旬，全球约有三分之一的人口处于全面或部分封锁中。假设限制措施在今年下半年逐步取消，预计 2020 年全球经济将至少收缩 3%；这将是自 20 世纪 30 年代全球大萧条以来最大的一次经济下挫（IEA, 2020）。如果疫情爆发期和遏制措施持续时间更长，那么全球经济可能收缩达 6%，几乎每个国家 2020 年的国内生产总值（GDP）都会出现萎缩。一些低收入国家在应对疫情大流行及其后果方面压力尤其大。

如本章前文所述，技术创新是结构性变革的驱动力。新技术在竞争中超越老旧的工作方式，为社会带来新的服务。这一过程的各个阶段都吸引着投资，包括政府投资以及高收益自愿参与基金的投资，并且最终还会吸引来自谨慎的机构投资者的投资。有证据表明，清洁能源技术创新带来特定的经济效益，对建立更可持续的能源系统十分必要。对汽车行业进行的一项研究发现，从刺激连锁发明的能力来看，清洁能源创新比针对现有技术的创新活动更有成效（Aghion et al., 2016）。虽然宏观上就业与研发支出的关系很复杂，但有其他研究表明，支持新的高科技产品的研发与就业增长具有相关性（Calvino and Virgillito, 2017）。清洁能源创新还可以很好

国际能源署。保留所有权利。

地为纳税人创造价值：对美国 6 项公共清洁能源研发项目的回顾考察发现，这些项目自 1975 年以来的投资回报率为 27%，效益成本比为 33:1（按 7%的贴现率计算为 11:1；Dowd, 2017）。

全球范围内，新冠疫情可能会造成约 3 亿个全职工作岗位丧失，近 4.5 亿家企业面临严重中断的风险。清洁能源创新是劳动密集型工作：据我们保守估计，目前全球有超过 75 万人从事能源研发，占全球能源系统约 4,000 万从业人员的 1.5%，研发岗位中一半位于中国、日本、美国、法国和德国。如果能源行业失去这些研发人员，将很难再恢复建立起随他们而流失的专业知识和技能：识别技术需求、形成改进概念并建立其测试团队，都要通过多年专业技能和经验积累才能实现。如果从事能源研发的人员数量能够保持不变或切实增加，我们将有更强大的能力来应对未来的重大能源挑战，例如开发首批零排放飞机飞行或下一代太阳能电池板。

新冠疫情大流行通过多种方式威胁到清洁能源创新就业和产出。这些方式包括公共和私人预算压力、清洁能源风险投资环境风险加剧，以及全球供应链中断（见第 2 章）。预计公共研发将比私人研发更为坚挺，为应对疫情，主要经济体的政府有合理可能来试图增加创新资金。企业面临收入下降和现金流匮乏的问题，从而难以获得实现近期增长目标所需的资本投资，但在已承诺降低排放强度和测试新能源技术的企业当中，鲜有迹象表明它们有意背弃承诺。为了快速评估新冠疫情可能会怎样影响这些企业为实现长期目标而支持创新的能力，我们于 2020 年 5 月在业界人士当中开展了问卷调查。调查答复表明，受访者的长期承诺没有变化，预计研发预算有韧性，但他们对全范围创新活动所受影响的看法总体悲观（专栏 1.3）。

2020 年下半年是加倍努力推动清洁能源创新发展的独特机遇期。近期应对疫情的措施重点是减缓健康风险、就业风险和流动性风险，这是可以理解的；不过，现在人们逐渐将注意力转向复苏速度、新就业机会，以及未来经济状况。对于拥有新创意、意欲取代高碳生产者并迅速扩大规模的新参与者而言，如果他们能够在恰当的时机进入市场，可能会找到有利的环境。目前世界各国拟议的经济刺激计划，为推动清洁能源技术创新提供了数十年方得以一遇的机会。在许多对实现净零排放至关重要的行业中，投资周期长达数十年，时不我待，需尽快行动。

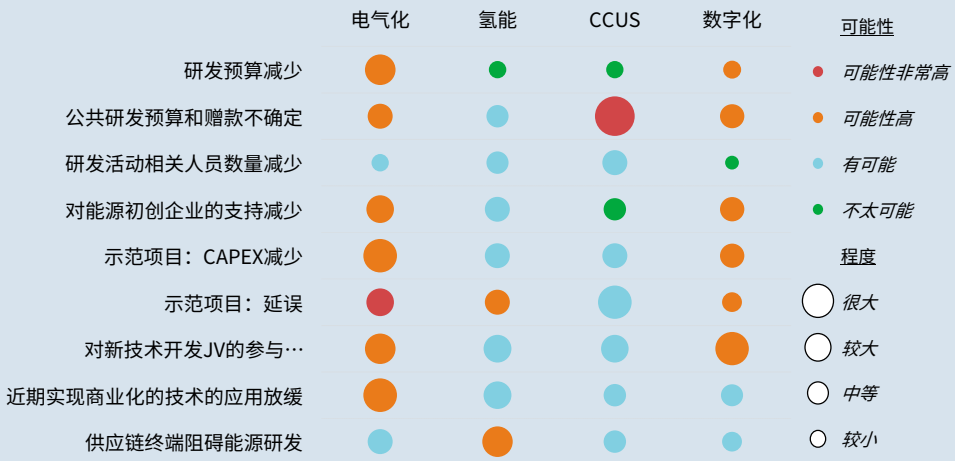
专栏 1.3　　企业认为新冠疫情对能源创新有怎样的影响

2020 年 5 月，国际能源署联系了一些大型企业，这些企业积极开发的技术都是预期对实现净零排放方面有重要作用的，并且主要集中于四个具体技术领域：1）直接电气化；2）氢能；3）碳捕捉、利用和封存（CCUS）；以及 4）数字化。我们也联系了能源行业外的相关终端使用者企业，包括钢铁、水泥和化工行业的企业。对调查做出答复的 28 家企业在全球共有近 150 万名员工。

国际能源署。保留所有权利。

答复表明，专家们十分担忧未来几年是否能保持创新流程畅通。大多数受访者认为，他们的研发、示范和部署战略的全部要素至少“有一些可能”会受到影响。以能源需求电气化技术为优先的企业，特别是重工业企业，认为其研发预算很可能会相当大程度或大幅度减少。碳捕捉、利用和封存领域的企业认为，支持该领域技术的公共预算和赠款很可能会更加不确定，并可能减少。

2020 年 5 月企业专家认为新冠疫情对清洁能源创新有怎样的预期影响



国际能源署 2020。保留所有权利。

注：CCUS：碳捕捉、利用和封存；JV：合资企业；CAPEX：资本支出。国际能源署的网络调查结果来自于一系列行业的 28 位受访者：石油、天然气和电力公用事业（7 位受访者）、钢铁（5 位受访者）、水泥（2 位受访者）、化工和氢能（5 位受访者）、设备制造商（5 位受访者）和采矿（4 位受访者）。

关于对风险的认知，调查中区分了影响的程度和影响发生的可能性，最高程度的担忧全都集中在创新过程的示范期和早期应用期这两个阶段。受访者尤其担忧以下几方面：公共研发资金的稳定性，因为企业一般都会寻求使用公共研发资金在特定领域进行测试；执行大规模示范项目的能力；合作的韧性；以及新清洁能源技术的普及速度放缓。虽然这些是根据企业规模调整后的分析结果，但从答复的样本来看，小型企业的担忧程度更高，而大型企业表示对避免大幅削减研发预算有更高期望。

许多受访者发出了一条积极信息，即他们在清洁能源技术开发方面的战略重点不会改变。受访者还表示，他们在优先技术领域承担风险的偏好变化不大。如果资金流动能够得以维持，并且政策能够支持日益增长的对技术的需求，那么各大企业似乎很可能已准备好继续支持创新。

国际能源署。保留所有权利。

参考文献

Aghion, P. et al.(2016), “Carbon taxes, path dependency, and directed technical change: Evidence from the auto industry”, *Journal of Political Economy*, Vol. 124/1, pp. 1-51, https://doi.org/10.1086/684581.

Bergek, A. et al.(2008), “Analyzing the functional dynamics of technological innovation systems: A scheme of analysis”, *Research Policy*, Vol. 37/3, pp. 407-429, https://doi.org/10.1016/j.respol.2007.12.003.

Calvino, F. and M.E. Virgillito (2017), “The innovation‐employment nexus: A critical survey of theory and empirics”, *Journal of Economic Surveys*, Vol. 32/1, pp. 83-117, https://doi.org/10.1111/joes.12190.

Coulomb, L. and K. Neuhoff (2006), “Learning curves and changing product attributes: The case of wind turbines”, *Cambridge Working Papers in Economics*, University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom, https://www.eprg.group.cam.ac.uk/wp-content/uploads/2014/01/eprg0601.pdf.

Díaz Anadón, L. (2012), “Missions-oriented RD&D institutions in energy between 2000 and 2010: A comparative analysis of China, the United Kingdom, and the United States”, *Research Policy*, Vol. 41/10, pp. 1742-1756, https://doi.org/10.1016/j.respol.2012.02.015.

Dowd, J. (2017), *Aggregate Economic Return on Investment in the U.S. DOE,* US Department of Energy, Washington, DC, https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/11/f46/Aggregate%20ROI%20impact%20for%20EERE%20RD%20-%2010-31-17%20%28002%29%20-%2011-17%20%28optimized%29.pdf.

Fleming, L. et al.(2019), “Government funded research increasingly fuels innovation”, *Science*, Vol. 364/6446, pp. 1139-1141, https://doi.org/10.1126/science.aaw2373.

Gallagher, K.S. (2014), *The Globalization of Clean Energy: Lessons from China*, MIT Press, Cambridge, MA, United States.

Gallagher K.S. et al.(2012), “The energy technology innovation system”, *Annual Review of Environment and Resources*, Vol. 37, pp. 137-162, https://doi.org/10.1146/annurev-environ-060311-133915.

国际能源署。保留所有权利。

Grubler, A. et al.(2012), “Policies for the energy technology innovation system (ETIS)”, Chapter 24 in: *Global Energy Assessment: Toward a Sustainable Future*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, United States and the International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, pp. 1665-1744, https://doi:10.1017/CBO9780511793677.030.

Hekkert, M.P. et al.(2007), “Functions of innovation systems: A new approach for analysing technological change”, *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 74/4, pp. 413-432, https://doi.org/10.1016/j.techfore.2006.03.002.

Hoppmann, J. (2018), “The role of interfirm knowledge spillovers for innovation in mass-produced environmental technologies: Evidence from the solar photovoltaic industry”, *Organization & Environment*, Vol. 31/1, pp. 3-24, https://doi.org/10.1177%2F1086026616680683.

IEA (International Energy Agency) (2020), World Energy Outlook Special Report on Sustainable Recovery, IEA, Paris.

IEA (2019), *Clean Energy Transitions: Accelerating Energy Technology Innovation Beyond 2020: Focus on India*, IEA, Paris, https://webstore.iea.org/clean-energy-transitions-accelerating-innovation-beyond-2020-focus-on-india.

Kavlak, G., J. McNerney and J.E. Trancik (2018), “Evaluating the causes of cost reduction in photovoltaic modules”, *Energy Policy*, Vol. 123, pp. 700-710, https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.08.015.

Kim, Y.J. and C. Wilson (2019), “Analysing energy innovation portfolios from a systemic perspective”, *Energy Policy*, Vol. 134, https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.110942.

Kittner, N., F. Lill and D. Kammen (2017), “Energy storage deployment and innovation for the clean energy transition”, *Nature Energy*, Vol. 2, https://doi.org/10.1038/nenergy.2017.125.

Mazzucato, M. (2018), “Mission-oriented innovation policies: Challenges and opportunities”, *Industrial and Corporate Change*, Vol. 27/5, pp. 803-815, https://doi.org/10.1093/icc/dty034.

Nemet, G.F. (2019), *How Solar Energy Became Cheap: A Model for Low-Carbon Innovation*, Routledge, London, https://doi.org/10.4324/9780367136604.

国际能源署。保留所有权利。

Nemet, G.F. and D.M. Kammen (2007), “US energy research and development: Declining investment, increasing need, and the feasibility of expansion”, *Energy Policy*, Vol. 35/1, pp. 746-755, https://doi.org/10.1016/j.enpol.2005.12.012.

OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) (2015), “Emerging technologies & firm dynamics: The implications of green growth”, OECD, Paris, https://issue.com/oecd.publishing/docs/ggsd_2015_issuepaper2_finalpdf.

Persat et al., (2019), “An Overview of Patent Application Data in the Field of Photovoltaics”, 36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Marseille, France (2019) 7DV.2.7.

Roberts, C. and F.W. Geels (2018), “Political acceleration of socio-technical transitions”, In: Jenkins, K.E.H. and D. Hopkins (eds.), *Transitions in Energy Efficiency and Demand: The Emergence, Diffusion and Impact of Low-Carbon Innovation*, Routledge, pp. 177-194, https://doi.org/10.4324/9781351127264.

国际能源署。保留所有权利。

第 2 章 2020 全球清洁能源创新现状

要点

- 技术创新被广泛认为对气候变化和能源政策目标（包括增加能源供应和减少空气污染）至关重要。然而，跟踪创新进展颇具挑战。投入（资金和技能）与阶段性成果（专利和产品）之间的关系有时模糊不清。更廉价的技术、产业转型、经济增长等政策目标可能很难衡量或归功于特定投入。尽管如此，一系列指标可以让我们更好地了解全球清洁能源创新的情况，包括资金和专利。为确定和分享良好做法，需要有更广泛的成套衡量标准，一些国家政府正在着手制定此类标准。
- 国际能源署成员国的低碳能源研发支出在 2000 年至 2012 年间翻了一番后，自 2012 年以来基本保持稳定。然而，目前的低碳能源研发水平仍然低于 1980 年代的水平。低碳能源技术在公共能源研发总支出中占比约为 80%左右，全球公共能源研发支出 2019 年增长 3%，达到 300 亿美元。总体而言，过去 10 年间公共能源研发支出占 GDP 的比重相当稳定，而医疗卫生、国防等其他公共研究目标获得的研发经费是能源的 5 倍左右。
- 过去十年里，企业能源研发经历了多年的增长，期间几次由于经济挑战而放缓，例如 2007-08 年金融危机、2014 年石油价格暴跌，以及目前的新冠疫情大流行。2019 年，报告支出达到 900 亿美元；在各行业中能源相关研发支出通常最高的汽车行业，支出明显放缓，由于收入下降，研发支出止步不前。2010 年至 2019 年期间，虽然活跃在可再生能源领域的企业的研发支出增长了 74%，但其占比仍不足企业研发支出总额的十分之一。同时，在水泥、钢铁等尚未有商业上可行的深度脱碳解决方案的行业中，相应的研发支出通常相对较少。
- 2019 年，早期风险投资（VC）额为 40 亿美元。投向氢能和电池等增长领域的资金正在不断扩大风投在各行业的影响，欧洲、中国和美国的风投正在增加。然而，自 2012 年以来，清洁能源占全球风投交易的份额减少了一半，这表明：与生物技术和信息技术等其他技术领域相比，清洁能源的相对吸引力已经落后。在这种情况下值得注意的是，很多能源技术初创企业的初始价值在于其拥有的专利，但自 2011 年以来，低碳能源技术的专利申请量逐年下降。
- 新冠疫情大流行对私营部门的清洁能源创新资金迅速产生了消极影响，很可能使清洁能源技术的开发和改进速度放缓。如果没有政策干预，则示范、早期应用和通过实践学习预计将会在第一时间遭受最严重影响。2020 年一季度，多家能源相关企业的研发预算同比出现下滑，风投交易笔数也有所下降。各国所受影响可能并不均衡，弥补创新体系中的空白对新兴经济体而言最为困难。

国际能源署。保留所有权利。

导言

本报告的撰写正值全球经济和能源系统遭受史上最严重冲击之一期间。要确切地判断封锁、受损的经济活动，或对于风险和价值的态度改变将如何影响清洁能源创新，还为时过早。然而，我们已经有了 2020 年上半年的一部分数据，包括从国际能源署为本报告而进行的企业调查中获得的数据，这有助于揭示早期趋势。还可以从 2007-08 年全球金融危机之后观测到的趋势中，推测这次冲击可能带来的其他后果。

本章首先回顾了清洁能源创新体系跟踪框架的主要元素，并考察了一系列清洁能源创新指标截至 2019 年所反映出的实际情况。然后，提供了关于 2020 年能源创新活动的最新信息。最后探讨了新冠疫情大流行可能对未来能源创新产生怎样的影响。

跟踪清洁能源创新进展

向净零排放的清洁能源转型要求能源创新的方向和规模都发生剧变。根据上一章的描述，我们期望旨在支持净零排放的国家创新体系具备以下特征（不排除其他特征）：

- 具有得到广泛传播和普遍支持的愿景，即本世纪中叶和各个中期里程碑之前，如何在不同的最终用途行业中提供和使用清洁能源，该等愿景由已发布的战略和时间表支持，也有更新愿景的程序作为支持。
- 具有支持本世纪中叶总体能源规划的研发计划，该等研发计划体现出技术成熟度、风险状况和配给资本支持类型之间相互匹配一致。
- 用于以下技术的公共和私营部门的研发支出份额提高：目前在实现深度减排方面商业可获得且可扩展选择方案有限的行业所需的技术。[4]
- 用于以下技术的公共和私营部门研发支出份额降低：开采化石燃料并将其转化为能源而不进行碳捕捉、利用和封存（CCUS）的技术。
- 良好匹配清洁能源研发优先事项的支出与扩大升级网络基础设施的支出，包括电网、电信、天然气管道、二氧化碳网络，以及区域供热供冷。
- 在净零排放所需的关键使能技术领域（包括已经商业化的技术类型），增加专利活动，提高科学文章发表数量。

[4] 这些行业包括重工业（钢铁、水泥、化工，以及高温热力使用者）和长途交通运输（公路货运、航运和航空）。虽然清洁能源解决方案已在其中一些行业进行了示范，但还没有商业化，缺乏工业标准的性能保证，而且具有较大价格差距。

国际能源署。保留所有权利。

- 积极参与多边和双边倡议，就符合国家优先事项和比较优势的能源创新挑战开展国际合作。
- 更多有耐心的私人风险投资流入创新净零排放技术，例如通过风投和更耐心的、追求影响的投资者实现。
- 低碳产品和组件对国家贸易平衡的贡献提升，包括来自知识产权许可的收入增加。
- 下述企业定期筹到资本：高度依赖低碳技术早期应用期收入的企业，且它们的技术是用于目前在实现深度减排的商业可获得且可扩展选择方案有限的行业的相关技术。这表明投资者对为这些产品创造的市场充满信心。

目前可获得的数据并不足以对所有这些趋势都进行密切跟踪，而且还有一些衡量健康创新体系的指标是更加难以量化的。不过，可以利用第 1 章所述四大支柱项下的现有信息，来勾画出清洁能源创新体系的绩效图景。在更一般的整体经济层面，汇总了 80 个指标的全球创新指数就采用了这种方式（Cornell University, INSEAD and WIPO, 2018）。

国际能源署已建立一些方法，用于跟踪每年清洁能源创新“资源推动”要素和阶段性成果的一些关键指标。虽然有必要谨记这套指标只是基于全球层面的现有数据反映出部分情况，但它们为了解世界各地的创新努力水平提供了重要洞见，而且今后还有扩展余地。关于示范项目、技术层面的企业研发、组件层面的进出口趋势、公众情绪和双边能源创新合作的更优质数据将提供宝贵的补充：公共能源研发支出的数据质量也亟需得到改善。

上述跟踪活动可使政策决策者和投资者都获益。上世纪 90 年代初，极少有分析师试图评估致力于开发太阳能光伏和锂离子电池的工作量及其技术进步：假使当时存在更优质的数据，则可能会帮助政府更有效地分配资源并推动这些技术加速发展。在国家或区域层面，有些情况下已经可以进行更精细的分析（Wilson and Kim, 2019）。

政府研发资金

全球范围内，2019 年政府能源研发支出增长 3%，达到 300 亿美元，其中约 80%用于低碳能源技术。虽然 2019 年的增长率低于之前的两年，但仍高于 2014 年以来的年均增长率。在中国，2019 年能源研发中低碳部分增长了 10%，能效和氢能这两个领域的研发增长尤为突出。在欧洲和美国，公共能源研发支出均增长了 7%，高于近期年度趋势。

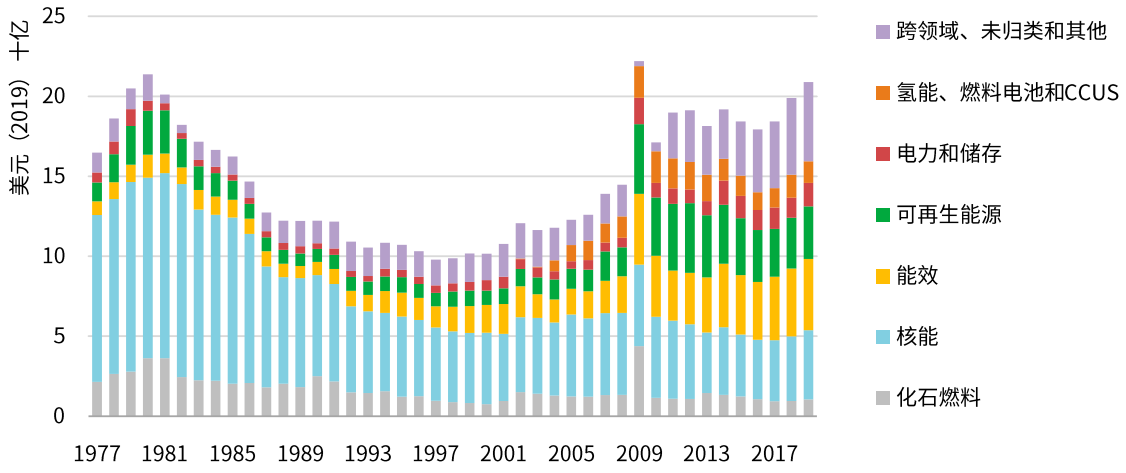
24 个主要国家和欧盟委员会于 2015 年提出“创新使命”（Mission Innovation）倡议，承诺五年内将清洁能源研发的公共投资翻一番，旨在提高公共能源研发支出，并使其与脱碳需求更

国际能源署。保留所有权利。

精准匹配。[5]自那时起，主要经济体的政府一直在加大能源研究投资，在印度等一些国家，国家研发活动水平与“创新使命”成员身份之间体现出清晰的联系。

自 20 世纪 70 年代以来，国际能源署一直维持着关于划拨用于能源研发的国家公共预算的数据集，其中的数据连贯一致。[6]调整通货膨胀后，这些数据显示：2000 年至 2012 年期间，国际能源署成员国的低碳能源研发支出翻了一番，但此后基本保持稳定（图 2.1）。然而，上述低碳能源研发支出仍然略低于 20 世纪 80 年代初观察到的水平，当时一些国家的核能研究占国家预算的份额相当大。从绝对额度来看，化石燃料方面的支出大致保持不变，但在能源研发总额中占比随着总支出增加而下降。

图 2.1　国际能源署按技术划分统计的公共能源技术研发和示范期支出



国际能源署 2020。保留所有权利。

注：2009 年的峰值是 2007-08 年金融危机后刺激资金的结果，特别是在美国。CCUS = 碳捕捉、利用和封存。

来源：IEA (2020a)。

国际能源署成员国政府的研发支出主要用于低碳技术，在 2012 年之前的约十年时间里翻了一番，自 2012 年以来基本持平。

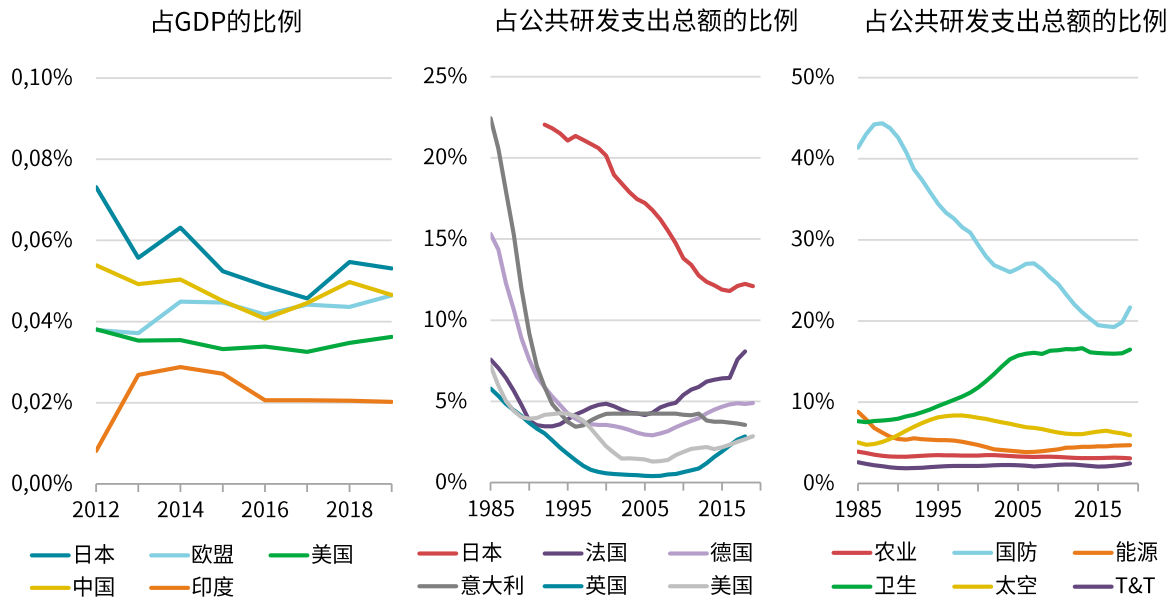
[5]清洁能源的定义和需要加倍的确切支出类型在各国有所不同。

[6]该数据集基于各国提交的数据，涵盖了国际能源署成员国和欧盟，并向任何希望参与的其他国家开放。其范围包括划拨用于示范项目（即研发和部署）的支出。一般来说，各国报告了专门针对能源的研究方案支出，无论资金来自哪个政府部门，但各国关于预算与实际支出的报告方法有差异，在将基础研究归入能源相关课题或示范项目的程度上也有所不同（IEA, 2020a）。虽然有时基础性能源研究由负责监管能源技术的出资机构管理（例如在美国），但在许多其他国家，此类研究并不与其他研究分开，也没有单独报告给国际能源署。鉴于基础科学研发会直接促成支撑新能源技术和初创企业的突破，而公共资助的研发在基础领域具有极大的重要性，因此报告上来的数据很可能低估了总支出。数据集不包括对创新能源技术企业的税收免除、贷款和一般支持的相关数据（IEA, 2011）。

国际能源署。保留所有权利。

如今，公共能源研发的技术组合与过去几十年相比更为平衡，用于能效和可再生能源的资金比以往大幅增加。[7] 尽管如此，技术组合仍然强烈偏向供应方技术，最终用途创新类型不是目前没有商业可获得且可扩展选择方案来实现深度减排的行业所需的。此外，虽然能源研发预算总额在增加，包括用于开发低碳技术的预算，但它占 GDP 的比例并没有增长，而且在大多数情况下，它在政府研发支出总额中所占的份额不断缩小（图 2.2）。在过去几十年中，能源研发支出不断让位给其他公共研究目标，在经合组织成员国中，医疗卫生和国防研发经费是能源研发经费的 5 倍左右。不过，2005 年以来，一些国家用于能源的研发支出份额略有上升，令人鼓舞（图 2.2）。

图 2.2　　按国家和行业划分的公共能源研发占 GDP 的比例以及占所有公共研发支出的比例



国际能源署 2020。保留所有权利。

注：T&T = 交通运输和电信。欧盟包括欧盟委员会的预算，加上截至 2019 年 12 月属于国际能源署成员的欧盟成员国，以及挪威。右图显示的是有可用数据的经合组织国家各类公共研发支出按年度汇总的份额。

来源：国际能源署根据 IEA (2020b)和 OECD (2020a)所做的计算。

2012 年以来，主要经济体的公共能源研发支出占总体 GDP 的比例相当稳定。但自 1985 年以来，能源在政府研发支出中的比重逐渐缩小。

[7]难以进行精确比较的原因是，越来越多的支出并非划拨用于某一特定技术应用，或划拨用于“交叉学科”项目，此类项目包括无法归入某一具体类别的研究，如系统分析或关于将能源来源集成进入网络或最终用途的联合研究。

国际能源署。保留所有权利。

主要经济体资助计划的现状

中国的国家科技重大专项计划是世界上最大的能源技术示范资助计划之一。该计划下，入选国有企业负责开展多年期的重点工程挑战并获得资助，例如 5 年内获得 10 亿美元资助。这些挑战旨在吸引来自地方政府和企业的更多共同出资和优惠贷款。2020 年前重点项目涵盖大型油气、煤层气、核电等；目前已公布的 2020-30 年期间的 16 个项目中，包括涡轮机、煤炭利用和智能电网。科技部的资金则主要用于“国家重点研发计划”。其中，2016 年和 2017 年，每年约有 2 亿美元划拨用于电动车和智能电网，通常是用于基础研究；2019 年约有 6,500 万美元划拨用于可再生能源和氢能。2016-17 年，清洁节能煤每年得到 7,000 万美元拨款。

欧盟委员会正在制定下一个多年期研发资助计划“欧洲地平线”（Horizon Europe），该计划将从 2021 年运作至 2027 年。它预计将为能源、气候和交通运输拨款 170 亿美元，占“欧洲地平线”总预算的 16%。这一类下的大部分资金将用于清洁能源研发：用于化石燃料开采和利用的资金基本已经不再提供。欧盟资助的项目向海外合作方（包括新兴经济体）开放的程度越来越大。“欧洲地平线”将继承其前身的资助工具多样性，以满足创新者的需求，资助工具包括大型示范项目的混合融资选择、创新奖项、对中小企业的支持，以及为初创企业提供的股权融资。其中一部分是正在建立的“创新基金”，目的是将二氧化碳交易收入中高达 110 亿美元的资金返拨给首批示范项目，基金也会吸收其前身 NER300 的经验教训。此外，还将继续努力通过类似于“燃料电池和氢能联合事业”的举措，进一步协调欧盟及其成员国的研究资金；“燃料电池和氢能联合事业”联合公共和私人资金，协调每年超过 2 亿美元的开支。

日本在 2020 年 1 月发布了更新版“环境创新战略”，划定了多达 39 个优先能源技术领域，与大多数其他国家的计划相比，日本的这份文件对目标应用做出了更为具体的描述。该战略保留了 2016 年战略中约 25 个优先事项，并在核能和零碳钢领域新增了优先事项，同时，该战略中关于可再生能源、交通运输和 CCUS 的内容也更加详细。日本新能源和工业技术开发组织的预算约为 15 亿美元，40 年来一直资助日本的产业规模技术试验项目；近期开始将拨款范围扩大到海外项目。日本政府和大型工业企业之间协调程度高，能够合作开展长期项目：2014-18 年的氢能源载体战略计划就是一个很好的例子。

在美国，能源部监管的 17 个国家实验室构成了世界上最大的科研体系之一；20 世纪中期起，这些实验室在原有的核能和化石燃料任务基础上，增加了覆盖大多数能源领域的研究职责。这些实验室中有不少都是由私人企业经营，并与当地大学具有紧密联系。2007-08 年金融危机前不久设立的能源高级研究计划署能源计划，每年提供约 3.5 亿美元资金，旨在培育新的战略能源技术，以实现高市场潜力剧变式技术的快速部署，包括结合不同学科的专业知识以发挥溢出效应。

国际能源署。保留所有权利。

私营部门研发资金

过去十年间，活跃在能源技术领域的企业年度能源研发支出总计增加了约 40%（IEA, 2020b），2019 年其能源研发总支出达 900 亿美元左右。2019 年的研发支出增长 3%，低于 2010-13 年和 2015-18 年 5%的年增长率，这两个时期之前均发生了全球金融危机，而之间则经历了 2014 年油价暴跌带来的经济影响。2014 年，油价崩盘导致油气企业研发支出在两年内削减了 10%，之后用了 4 年时间才恢复。

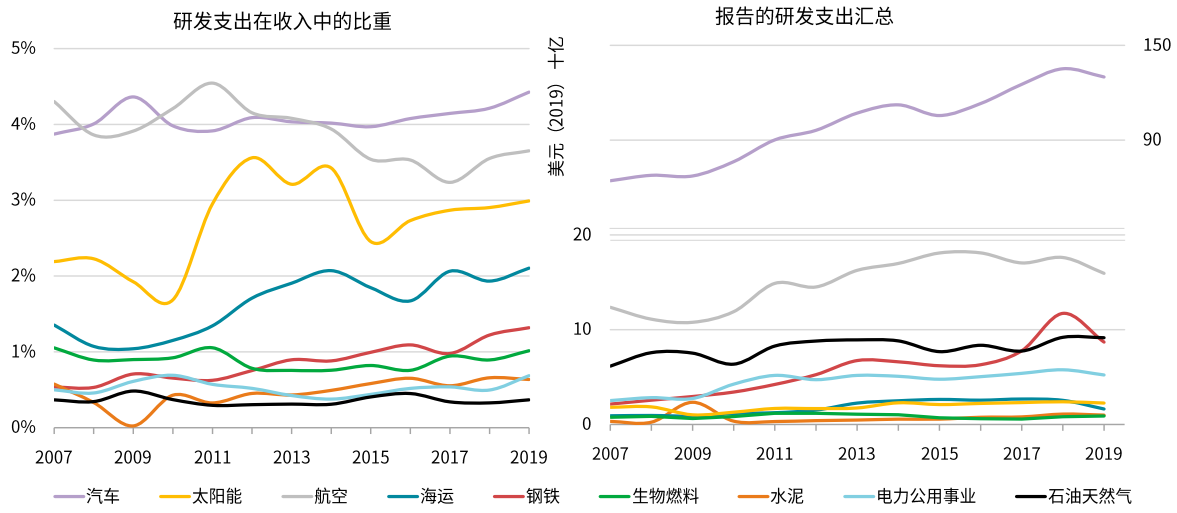
值得注意的是，活跃在可再生能源技术领域的企业比其他能源技术领域的企业研发支出增长更快：2010年至2019年间，前者的研发开支增加了74%，即投入了25亿美元用于改进其技术。

汽车行业的研发支出比任何其他能源相关行业都多（图 2.3）。[8]近年来，在政府政策和竞争压力下，企业对能效和电动车更加关注，研发支出持续增加：然而，2018 年至 2019 年间，能源相关研发的增长似乎进入了平台期。与此同时，新企业，特别是生产电池和燃料电池电动车的企业，开始进入市场，与主要制造商竞争。在全球范围内，自 2005 年以来，年销量超过百万台的汽车制造商数目从 15 家增加到 20 家，刺激了电动车领域一些新的初创企业高调登台。各个成熟的汽车制造商都已宣布新的车辆设计、电池研究联盟，以及高度数字化电动车试点测试，它们未来的成功可能至少部分取决于是否能从现有产品组合的收入中拨出足够的资金投入低碳替代品研发。其他行业的现存企业可能也面临着类似的权衡取舍。

[8] 信息和通信技术（ICT）对能源转型越来越重要，并且也使化石技术的生产率得以提高，但由于该行业的产出并非仅与能源有关，因此这里没有将该行业包括在内。

国际能源署。保留所有权利。

图 2.3　全球企业 2007-19 年在部分行业中的研发支出及其在收入中的比重



国际能源署 2020。保留所有权利。

注：此处数据来自符合以下描述的企业：根据彭博行业分类标准（BICS）所报告的收入中 50%或更多收入来自于这些行业，并且在相应年度的研发和收入数据均可获得。研发总支出（不仅是能源相关研发）按该企业来自所报行业的收入占比进行缩放。报告的研发支出汇总图中，汽车行业的支出汇总数额显示在右侧坐标轴上。BICS 与 ISIC 和 NACE 等其他分类类似，都为分析不同经济活动相关数据提供了一种构架。此处之所以使用 BICS，是因为它对能源相关行业的企业一级的数据的分类程度高。

来源：Bloomberg LLP (2020)。

在一些新技术对净零排放至关重要的行业中，通常只有一小部分收入再投资用于研发，而汽车企业的研发支出明显高于其他行业。

其他行业，尤其是水泥、生物燃料、电力公用事业和钢铁，对研发的投资占其收入的比例要低得多。太阳能光伏制造商、海运业和航空业对研发的投资比上述行业高一些（虽然近年来航空业的份额有所下降），但仍比汽车行业少得多。这可能反映出，相对于汽车制造商而言，这些行业认为新技术驱动的产品对其竞争力不是那么重要。电力公用事业和重工业企业一般是技术的使用者，通常通过与供应商合作来进行技术开发。然而，特别需要注意的是，在新技术对实现净零排放至关重要的行业中，企业的研发投资通常相对较少。这些行业将需要对流程和产品进行测试与修改，并在某些情况下开发新的流程和产品，以实现深度脱碳。

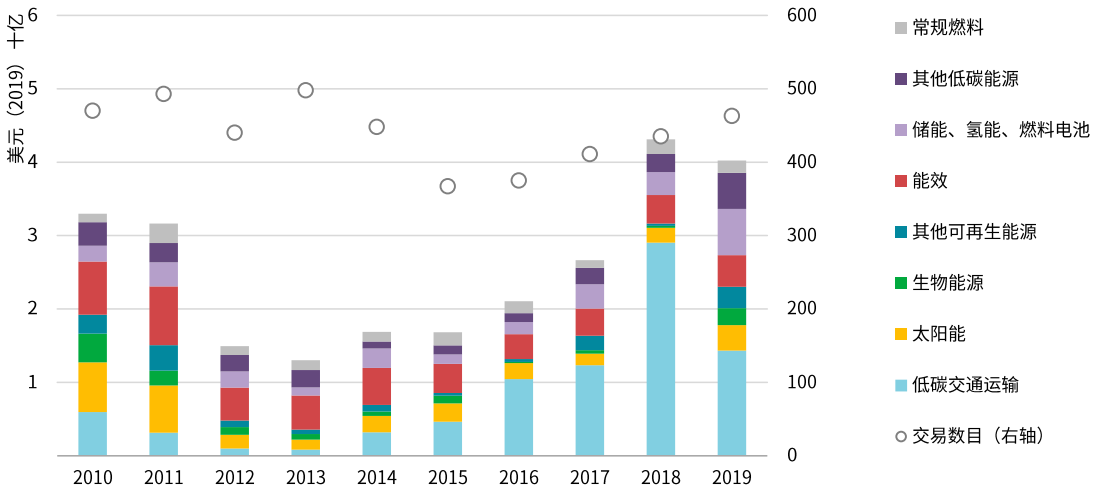
一些政府已经实施了私营部门能源技术支出调查跟踪制度。虽然还没有足够的国家开展这项工作，因此无法进行国际分析，但是加拿大和意大利已经做出了良好表率，取得了不错的进展。

国际能源署。保留所有权利。

风险投资

2019 年，各类投资者对能源技术初创企业的股权投资总额为 165 亿美元。其中，早期阶段风险投资（种子轮、A 轮和 B 轮）估计为 40 亿美元，在创新企业风险最高的阶段对其提供支持（图 2.4）。这比政府和企业的能源研发投入低，但此类私人风险投资发挥重要作用，帮助市场成熟度最高的技术创造市场并扩大规模。2019 年报告的交易总量比 2018 年下降了 7%，但这两年的交易总量都远高于十年来的平均值。

图 2.4　　全球能源技术初创企业的早期阶段风险投资交易情况



国际能源署 2020。保留所有权利。

注：包括种子轮、A 轮和 B 轮融资交易。不包括扭曲同比趋势的 10 亿美元以上的异常交易；此类异常交易总量在 2016 年为 16 亿美元，2017 年为 0，2018 年为 21 亿美元，2019 年为 0。交通运输包括替代动力系统及其基础设施，但不包括共享交通运输、物流或自动驾驶车辆技术。“生物能源”不包括生物化学品。“其他低碳能源”包括 CCUS 和智能电网。“常规燃料”包括化石燃料的开采和使用以及车辆的燃料经济性。

来源：国际能源署根据 Cleantech Group (2020)所做的计算。

2019 年，风险投资保持强劲态势，清洁能源技术初创企业的行业和国家更加多元化。储能和氢能的增幅最大。

如果风险投资提供方看到了潜在的近期市场机会和占领大量市场份额的长期机会，那么风险投资就会提供资金并贯彻私人资本规则，发挥有价值的作用。风险投资人向企业家提供风险投资，以期技术和商业创意投资组合中的优胜企业能够迅速扩大规模、产生足够多利润，使整个投资组合在 5 年间获得每年 20%左右的回报率。在能源行业，风险投资对符合以下条件的初创企业提供的支持效果通常最好：这些企业提供可以快速发展成为原型期的数字技术或服务，不需要密集的资本（Gaddy, Sivaram and O’ Sullivan, 2016; IEA, 2017）。不过，储电、电动车和制氢等硬件领域最近吸引了更多风险投资。大部分风投发生在美国，该国的金融法规支持风投活

国际能源署。保留所有权利。

动，风投融资也很成熟；但是，欧洲和中国近期在全球能源风投活动中的份额都有所上升（IEA, 2020b）。

总体而言，多个趋势表明，在公共政策激励将更为严格这一预期的推动下，投资者看到了低碳技术不断提升的市场潜力。趋势还表明，在某些技术领域（主要是接近市场成熟的较小规模技术和消费品），私人风险投资可以支持并奖励最优秀的创新，从而减少对公共部门支持的需求。在这些领域，风险投资人可以提供资金给希望试验初始创意的研究人员，或提供资金给需要将创意拓展到初始利基市场之外的小企业，来帮助技术穿越“死亡之谷”；上述创意往往是政府资助的早期研发工作的成果（Breschi et al., 2019）。然而，2012 年以来，清洁能源在全球风投交易总额中的占比已从约 10%下降到约 5%，这表明：与生物技术和信息技术等其他技术领域相比，清洁能源对风险投资的吸引力有所减弱。

为了助推该领域的活动，一些政府正在探索对清洁能源初创企业进行直接投资，例如，在风险较高的初创企业中持有所谓的“锚定”股权。成立于 2019 年、总额 1 亿美元的“欧洲突破性能源风投基金”就是一个实例（Breakthrough Energy, 2020）。然而，关于政府入股这类企业的成绩混杂不清，如果技术表现不如预期，政府一般要首先承担损失。值得注意的是，这种政策尽管因为可能为纳税人取得公共研发收益而具有吸引力，但在风投市场成熟的美国并没有得到广泛使用。

一些国家并不采取上述政策，而是为清洁能源初创企业提供针对性赠款支持。“加拿大突破性能源解决方案”在 2020 年初公布了评选出的首批十项技术创意和解决方案。印度于 2018 年成立了清洁能源国际孵化中心，公共部门（提供赠款）与私营部门（提供基础设施和股权）通过该中心形成合作伙伴关系，为有可能解决印度能源挑战的初创企业提供股权融资和指导。法国、意大利等其他国家则向年轻的技术密集型企业提供税收抵免和其他福利，这些企业中有许多是从学术界剥离出来的。

企业也在将风险投资纳入其能源创新战略。面对不确定的监管和技术，特别是在陌生产品或数字产品占主导的领域，企业越来越多地转向企业风险投资[9]和“开放式创新”，而不是使用企业研发预算在企业内部进行开发（Bennett, 2019）。2019 年，全球投向能源技术初创企业的金额（包括企业风险投资和成长股权投资）创下新高，达到约 50 亿美元。随着净零目标推动企业整合核心竞争力以外的新活动，企业很可能会更加倾向于采用企业风险投资和收购初创企业的方式来管理技术不确定性。预期许多有助于实现净零排放的技术可能非常适合企业风险投资，

[9] 企业风险投资是风险投资的一个子集，涉及对下述企业的股权投资：开发新技术或服务、且主要业务既不是风险投资也不是其他股权投资的初创企业。企业风险投资人除了发挥传统风险投资人的作用外，往往通过与初创企业共享其客户群、研发实验室和其他企业资源来为初创企业提供支持。能源行业的企业风险投资历史可以追溯到 20 世纪中期，当时埃克森企业集团（Exxon Enterprises）投资了包括太阳能在内的多种技术，将其纳入公司的多元化战略。

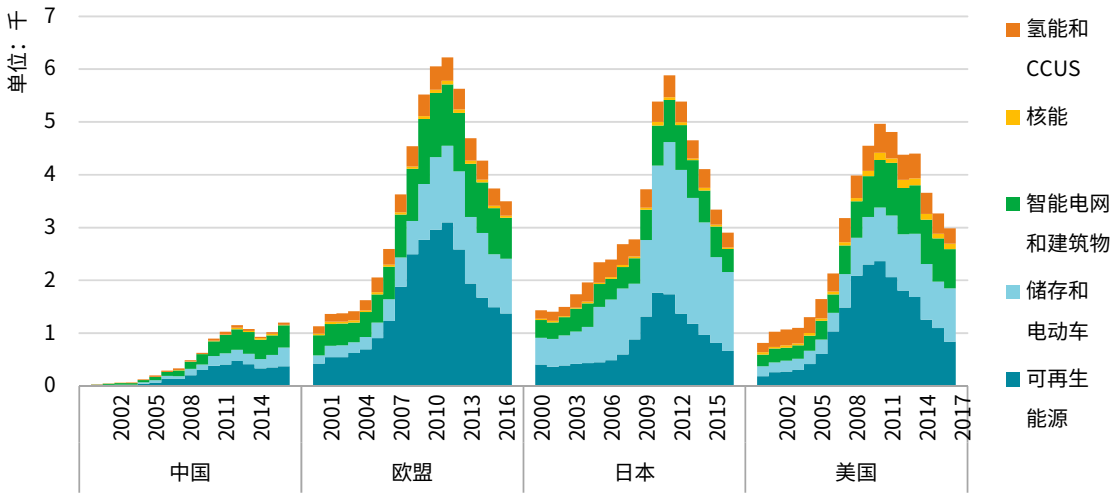
国际能源署。保留所有权利。

特别是能够被包装成有吸引力的消费品的技术，因为此类技术单元规模较小，可以补充企业现有的组合：用于能效和储能的数字控制就是一个例子。

专利活动

低碳能源技术专利申请量在经历了 10 年的强劲增长后，自 2011 年以来明显下滑（图 2.5）。专利使人们能够洞察研究活动，了解被认为具有商业价值的新知识的产生情况：专利捕捉到研发的一些阶段性成果，其中一部分将转化为商业产品。专利不能直接衡量全部研发产出，其中一条重要原因是专利不成比例地较多体现了专利申请较为普遍的技术和司法管辖区的情况：例如，在一些快速发展的领域，专利申请流程所需时间可能相对较长，超过了抓住时机抢在竞争对手之前通过对技术进行营销而收回研发成本所需的时间，而许多基于软件和应用的数字服务是无法取得专利的。然而，专利总体趋势仍然提供了有用信息，能帮助我们了解清洁能源创新的程度和重点。

图 2.5　低碳能源技术专利在部分国家/地区的签发状况



国际能源署 2020。保留所有权利。

注：专利计数是指至少包括两个地方局（geographical offices）的已授权国际专利族的数量。各国计数以发明者的国家为准统计。CCUS = 碳捕捉、利用和封存。

来源：OECD (2020b)。

低碳能源技术专利在经历了 10 年的强劲增长后，自 2011 年以来几乎不间断地逐年放缓。

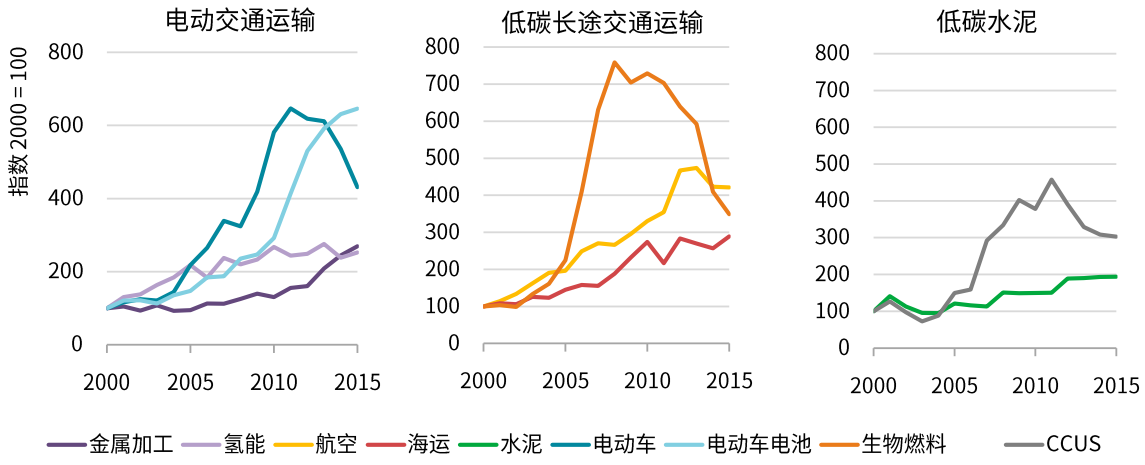
2011 年左右以来，可再生能源专利活动的减少可能在很大程度上反映出一些技术已经成熟。太阳能光伏、生物乙醇和风能技术目前居于主导地位，可能会阻止研究人员寻求改进这些技术，也可能会阻止改进技术进入欧洲、日本和美国市场。可再生能源专利活动水平仍然高于大约 2007 年之前的任何时段，电池（特别是锂离子电池）专利呈增长态势（EPO and IEA, 2020）。

国际能源署。保留所有权利。

但是令人担忧的是，先进生物燃料、新型光伏、地热、海洋能或其他可再生能源领域的专利活动至今仍未能扭转专利活动自 2011 年以来的下降趋势。

一部分低碳技术的普及有赖于同一价值链中其他非能源技术的发展。然而，专利趋势表明，对同一价值链族中不同技术应用的关注程度存在差异（图 2.6）。例如，电动车电池专利增速是金属加工专利增速的 2 倍多，然而电动交通运输的普及取决于通过新方式实现车辆轻量化。

图 2.6　　低碳技术领域相关应用的全球专利计数



国际能源署 2020。保留所有权利。

注：专利计数是指至少包括两个地方局（geographical offices）的已授权国际专利族的数量。各国计数以发明者的国家为准统计。CCUS=碳捕捉、利用和封存。对电动车电池而言，计数是指向世界知识产权组织申请的专利数量。金属加工是指大宗金属制造及将其加工成为金属半成品和成品。

来源：OECD (2020b) and EPO and IEA (2020)。

不同低碳技术之间的专利趋势差异很大，包括在某些应用中需要结合起来才能实现零排放的多种技术。

国家政策支持

虽然有现成的数据反映公共和私营部门为创新体系提供资金的情况，以及早期风险投资等市场主导融资的情况，但这却不足以描绘出整个图景。为了更全面地了解全局，我们还需要研究政府定期提供的信息，包括能源研发如何设定优先事项、知识如何共享、市场如何得以被创造，以及社会政治支持如何得到提升。本节简要概述了一些相关发展。

无论是为清洁能源研究课题资助计划确定优先次序，还是对这些计划的评价安排，都并不遵循全球标准。事实上，这一领域可能会得益于从业人员相互分享最佳做法。在日本，优先顺序的确定和路线图的绘制都有详细的记录，并为研发支出提供明确的指导：政府和大型工业企业间的高度协调有益于上述过程顺利推进，使得政企双方能够合作开展长期项目。类似地，中国也

国际能源署。保留所有权利。

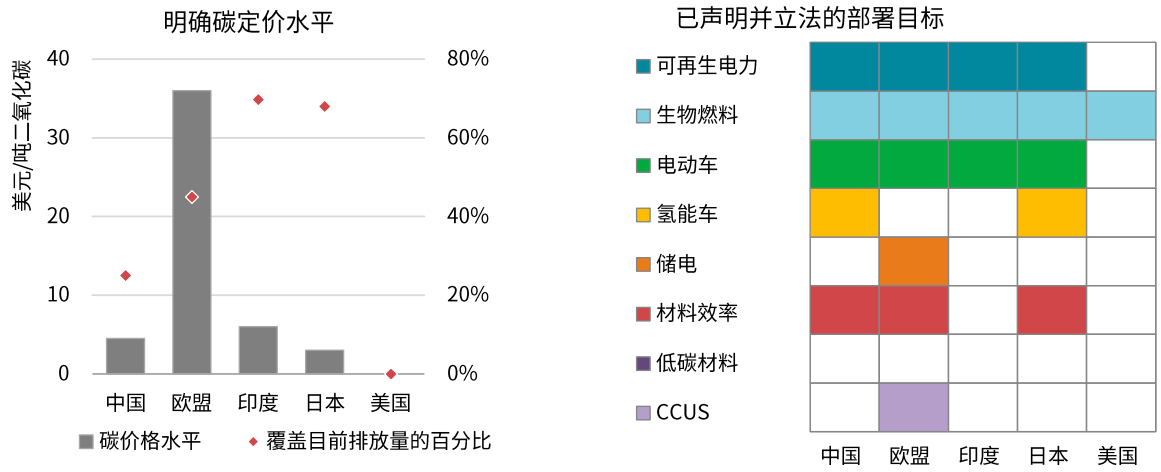
有一个高度集中的、清楚表明国家创新重点的多年期规划框架；然而，此框架也有弊端，即在其各个预算期内可能不够灵活。各国政府都需要思考一个关键问题，那就是如何最好地发挥清洁能源技术不同领域之间的协同作用：日本和韩国在促进跨领域（从电池到燃料电池）推广电化学技术的做法就十分突出。虽然许多国家都有用于审查资助计划的审计程序，但在政策设计中很少以是否符合总体创新政策目标对资助计划进行评价（Pless, Hepburn and Farrell, 2020）。美国的资助计划，特别是有政治风险的高级别举措，提供了一些良好做法的实例。

近年来，各国政府已经开始并且越来越重视知识共享。欧盟委员会现在要求被资助方公开发表研究结果，而由美国能源部协调的技术资助计划则定期详细公布其研究成果。欧盟资助的大型示范期项目所产生的某些知识内容必须公开，阿尔伯塔省（加拿大）的 CCUS 项目也需要遵守类似要求。中国划定了特定区域用于开发和部署某些技术（包括电动车和氢能），对知识交流起到了促进作用。

不同的经济体采用不同的方法来创造用于支持清洁能源技术早期商业化的市场，以达成公共政策的目的。欧盟拥有最高的明确碳价格，也是设定清洁能源技术部署目标最多的辖区（图 2.7）。各主要经济体在可再生电力、生物燃料和电动车领域都设定了目标。部分国家中，公共采购在创造利基市场方面也发挥着作用。在印度，公共采购被用来为发光二极管（LED）、电器、电动车等新产品创造可靠的本地市场；而挪威则通过研发和公共采购相结合的方式来促进海运脱碳（DNV-GL, 2019）。事实证明，中国多种手段相结合的做法，即迅速推出原型、开展公共采购、为制造活动提供廉价融资以及进行内部市场部署，能够有效地在技术成熟早期改进电动车、LED 等量产产品：相对较高的试错容忍度是中国的一项具体优势。在日本，能效和其他领域强有力的标准推动了以市场为导向的创新，而对研发项目、计划和规划进行评价的要求设计完善，有助于改善相关工作。

国际能源署。保留所有权利。

图 2.7　　可能刺激零排放技术创新的明确碳定价水平和部署目标



国际能源署 2020。保留所有权利。

注：不包括地方政策或欧盟成员国政策，此类政策在一些地区增加了创新的市场拉动激励。碳定价包括明确的气候变化相关定价政策；不包括其他一般性能源税（这类税收有影响碳定价的效果）。图中包含的目标为某一给定技术应用未来部署设立了标杆，并明确支持图例中提及的各项技术。CCUS = 碳捕捉、利用和封存。

欧盟的碳价格最高；日本和印度的碳定价制度覆盖面最广；大多数已声明并立法的零排放关键技术目标都集中在可再生能源领域。

新冠疫情对清洁能源创新的潜在影响

全球清洁能源系统很复杂，因此很难评估新冠疫情将如何影响清洁能源技术的开发和改进速度。此外，人们普遍不确定疫情大流行将造成怎样的长期影响，这使得上述评估更加困难。不过，现有数据和历史经验表明，鉴于迫切需要加快清洁能源技术创新时间表，我们有重大理由感到担忧。有迹象表明，全球清洁能源创新体系将由于开支削减而遭到重创，尤其是在私营部门；短期内，最大的影响在于规模化和商业化环境将更加严峻。简而言之，“死亡之谷”可能会更深、更宽。

疫情大流行之前，原本预期 2020 年将是几项重要能源创新政策举措的关键之年；例如，欧盟“欧洲地平线”和“创新基金”的细节，以及中国“十四五”规划中的能源研发内容，都备受关注。这些政策以及世界各地正在准备出台的许多其他政策仍然是顶级优先事项，但大多数国家的当务之急已经转移到管理收入损失和经济复苏上。同时，许多企业面临着严峻的压力，所有企业都不得不做出调整，以适应变幻莫测的经济前景。

虽然在 2020 年上半年，各国政府最急迫的任务是保护人民的健康和生计，但一些国家政府已经在政策应对措施中纳入了对清洁能源创新的直接或间接支持（表 2.1）。目前细节仍不完整，而且其他一些政府仍在思考其立场；不过，这些政策信号至少让我们有了一个初步概念，有助于我们了解 2020 年中期到 2025 年之间清洁能源技术的大环境走向。

国际能源署。保留所有权利。

表 2.1　截至 2020 年 6 月初，经济复苏措施中已宣布的部分相关措施

政府	宣布的措施	状态
欧盟	拟议的复苏工具“下一代欧盟”包括一支战略投资基金，基金将向与绿色经济和清洁能源转型有关的战略领域投资高达 1,500 亿欧元，其中特别提到了氢能。“欧洲地平线”将会通过增资得到加强，并将继续关注绿色技术。智能领域一体化和可持续智能交通运输战略被提议为立即投资的优先领域。	在欧盟委员会 2020 年 5 月 29 日的提议下，立法程序已启动，可能从 2021 年 1 月起实施。
加拿大	设立了不针对特定行业的 4.5 亿加元基金，用于资助大学和医疗卫生研究机构，旨在使其能够留住科研人员；还设立了另一支 2,000 万加元的基金，用于支持因新冠疫情而面临挑战的年轻企业家。魁北克省为处于创新项目不同阶段（规划到进入市场前阶段）的企业提供了针对性资助，以帮助它们加强创新能力。	国家措施于 2020 年 5 月 15 日宣布。
法国	设立了不针对特定行业的 8,000 万欧元基金，为初创企业提供过桥融资，帮助这些企业在两轮筹资之间保持现金水平，同时还将 13 亿欧元用于提供低息贷款，并为创新型中小企业提供高达 150 万欧元的税收减免，以助其度过危机。提供了 2.5 亿欧元用于加快对创新项目的支付支持，还提供了 10 亿欧元的汽车生产现代化和数字化基金。 对航空航天业的 150 亿欧元一揽子支持计划包括：为较小型企业设立的 5 亿欧元投资基金，以及在 2028 年之前示范使用生物燃料或氢基燃料的碳中性洲际飞机并在 2035 年之前启用的计划。电驱动或氢能驱动的短距离混合动力飞机也列入了目标。	基金于 2020 年 3 月 25 日宣布。 航空航天细节于 2020 年 6 月 9 日公布。
德国	已经宣布的刺激计划设立了一支 500 亿欧元的基金，用于解决气候变化、创新和数字化相关问题。这将包括电动车市场拓展措施、储能研发资金，以及 90 亿欧元的氢能战略，以使德国成为电解相关技术“世界供应商”。另有一支不针对特定行业的 20 亿欧元基金，用于扩大对初创企业、新技术企业和小企业的风投融资。	于 2020 年 6 月 3 日宣布。
葡萄牙	将制定国家氢能战略，为正在进行或处于初始阶段的氢能项目提供愿景和框架，旨在将这些项目纳入统一战略，该战略将提供必要支持，以在 2030 年前释放 50 亿至 100 亿欧元的公共和私人投资。	2020 年 5 月 22 日起公开征求意见。
英国	启动了不针对特定行业的“未来基金”，预算为 5 亿英镑，用于向创新型初创企业发放最高 500 万英镑的可转换贷款，同时还提供 7.5 亿英镑，用于通过赠款、股权和其他措施支持创新型初创企业。	于 2020 年 4 月 20 日启动。

来源：Breugel (2020); European Commission (2020); HM Treasury (2020); KPMG (2020); MAAC (2020)。

国际能源署。保留所有权利。

令人关切的另一个领域是新冠疫情对全球供应链的影响以及全球供应链如何传播和发展新知识。如第 1 章所述，太阳能光伏和锂离子电池性能提升、成本降低的历程是全球性历程：不断流动的企业和研究人员对不同国家的市场和资金机会做出反应，使新创意在不同地区之间传递。近期为应对新冠疫情大流行而采取的封锁和限制措施削弱了全球供应链，目前尚不清楚国家政策应对措施将如何影响供应链的未来发展。

从本节介绍的政策宣布情况和数据来看，创新体系被严重削弱这一大局逐渐清晰，首当其冲遭受最大影响的是示范活动、市场进入和通过实践学习。此外，在目前商业可获得且可扩展的低碳选择方案有限的行业，以及开发适当零排放技术的共同努力已经缺失的行业，在清洁能源创新方面可能会面临更长时间的延误。虽然新兴经济体尚未公布其经济刺激计划，但其中许多国家可能将面临巨大的研发预算压力。迄今为止的证据表明存在一个系统性挑战：虽然短期内基础研发和原型期的风险可能比较低，但如果整个体系利用基础研发和原型的能力降低了，那么基础研发和原型的影响就会减弱。从广义的经济角度来看，假使像 2007-08 年金融危机期间那样，在危机年成立的企业数量减少了 20%，那么 3 年后的就业总量可能会下降 0.7%，14 年后的就业总量可能会下降 0.5%（OECD, 2020c）。复苏一揽子计划至今未将这个问题纳入其解决范畴。

政府研发资金

虽然现在还无法确定新冠疫情大流行对公共能源研发有怎样的影响，但前景还是令人担忧。在很多情况下，相关预算可能在未来两年内固定不变，而 2022-25 年期间的预算压力可能达到顶峰。2007-08 年金融危机后几年似乎就是这样的情况。例如，在欧洲，金融危机后的 2011-13 年这三年时间里，研发预算大幅削减，在衰退最严重的国家尤其如此（Izsak et al., 2013）。但值得注意的是，2008-09 年以后，一些主要国家将研发政策作为减少对金融部门依赖的一种方式，并引入了新的创新工具，如担保、贷款和对风投的支持（见第 5 章）。这种做法与这些国家推行反周期研发政策的方针是一致的，但这并不是所有政府都可以采用的（OECD, 2009; Pellens et al., 2018）。

近期，巴西和印度等新兴经济体立下了发展本土清洁能源技术的宏图，但可能会因新冠疫情遭受挫折，除非它们能够动用额外的预算资源。这些国家正在研究其社会和气候的具体技术需求，试图找出其中哪些需求是其他国家的企业和研究人员并未着手解决的。根据预测，未来几十年能源需求增长中，来自新兴经济体的增长将占大多数，因此，新兴经济体的决策对整体清洁能源转型具有重要影响。任何国家如果发生长期衰退，都会有高技能、高流动性人员流失的风险。

政府支出受到威胁的另一创新相关领域是基础设施。政府和受监管实体通常是电网、区域供热、燃气网、通信技术等网络的主要投资者。对新技术的成功速度而言，至关重要的一项因素是预见技术所需的使能基础设施。新冠疫情导致世界各地受监管的公用事业企业收入下滑，这对在智能电网、氢气管道和氢能加注，甚至二氧化碳封存领域加大投资力度构成了挑战。不过，在第三方准入有保

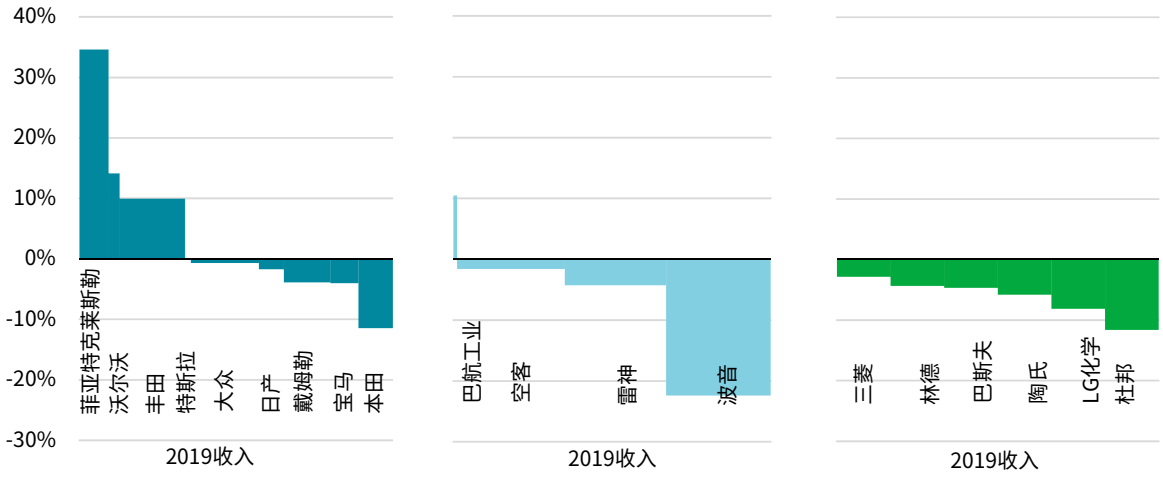
国际能源署。保留所有权利。

障的情况下，新技术方案的进入成本可以大幅降低。在美国，由于政府对石油业二氧化碳管道进行投资，CCUS 项目的第三方准入得到了保障；这构成了当今大型 CCUS 项目设计的基础。

私营部门研发资金

由于 2020 年及之后企业的收入减少，大多数能源相关领域的企业研发极有可能遭到裁减，或增速大大降低。这种影响已经在 2020 年一季度的企业报告中得到了明显体现；在汽车、航空和化工领域，占全球总收入很大一部分的企业的研发投入少于往年（图 2.8）。化工行业中，报告了数据的各企业都削减了研发，有些企业的降幅超过 10%。这与我们通过 2020 年 5 月的调查了解到的受访者的看法相吻合，这些受访者预期：在净零排放关键技术领域的研发预算方面，企业在 2020 年剩余时间和 2021 年将面临压力（第 1 章）。

图 2.8　2020 年一季度与 2019 年一季度相比，汽车、航空和化工企业研发支出变化情况



国际能源署 2020。保留所有权利。

注：图中显示的是报告了季度研发支出的企业子集的数据。条柱宽度与 2019 年的收入成正比。

来源：国际能源署根据企业财务报告所做的计算。

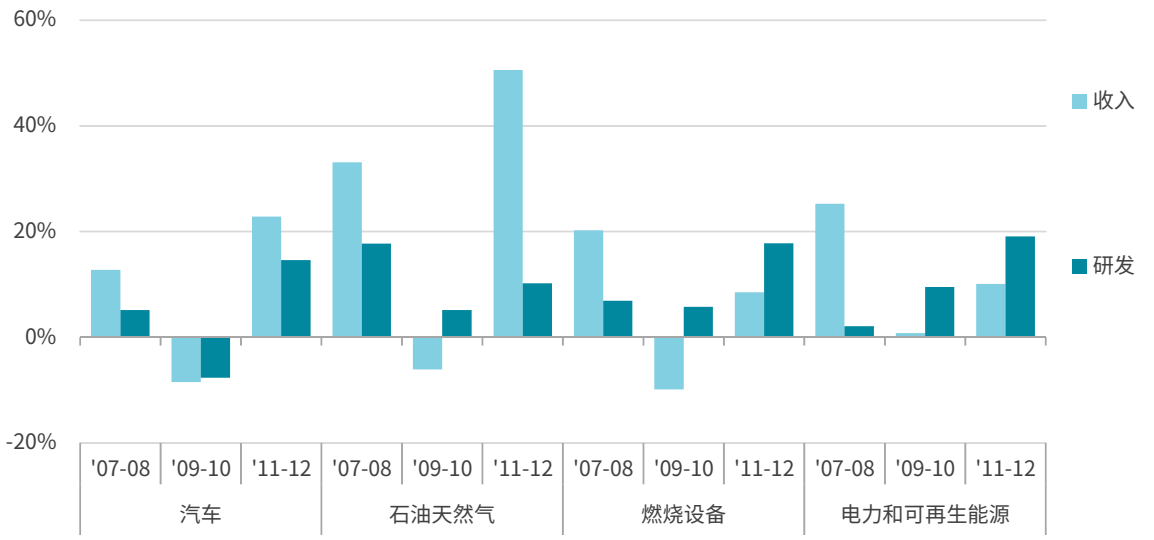
在主要技术企业 2020 年一季度的企业报告中，企业研发经费削减幅度达到或超过 10%的情况十分明显，预计企业研发经费走低将持续到今年年底。

2007-08 年金融危机和 2014 年油价崩盘提供了一些线索，让我们能够洞察到企业很可能会怎样应对新冠疫情大流行的影响。2009-10 年，除汽车行业外，主要能源部门的研发总支出相对于收入都保持了良好水平（图 2.9）。然而，从绝对金额来看，在此期间只有电力供应和可再生能源部门没有放缓增长或削减研发预算。与 2009 年类似，政府政策将在很大程度上影响结果：例如，已有人提议将税收激励和研发专项贷款纳入某些一揽子刺激计划，这应当会有助益。另外值得注意的是，有一些证据表明，衰退可以为企业创造机遇，使其转向颠覆性技术（Archibugi et al., 2013）。

国际能源署。保留所有权利。

虽然研发支出在未来几年可能会受到影响，但预计受影响的程度要比资本支出所受影响小得多，因为企业会设法保留研发人员和研发能力，并完成正在进行的项目。此外，尽管企业面临挑战，但多个行业的主要企业都重申了它们对长期脱碳战略的承诺，这在我们的调查中得到了突出体现。然而，对于大规模技术示范（如 CCUS）来说，削减资本投资可能比削减研发支出会造成更大的损害。重大项目可能会被推迟，丧失极为重要的发展势头。净零目标有赖于若干商业化前的大规模技术，例如 CCUS、低碳钢工艺、大规模氢能供应、新型船舶和飞行器概念（见第 4 章）。现在失去势头尤为可惜：去年，主要工业企业对净零目标做出了若干突破性的承诺，这意味着它们承诺扩大需要示范和先行者投资的技术规模。一个突出的例子是通过将低碳氢纳入油气加工厂和天然气网来帮助一些油气企业实现宏伟的排放目标。[10]多个此类项目，包括欧洲的 H2.50、H21、HySynergy 和 NorthH2 项目，以及加拿大的 Sundance Hydrogen 项目，目前正处于设计阶段，是首批主要靠私营部门而非公共财政激励措施推动的项目。

图 2.9　　2007-12 年部分行业的收入和研发支出增长率



国际能源署 2020。保留所有权利。

注：图中显示了各行业中报告了每年数据的企业中研发支出最高的 20 家企业的平均年增长率，每两年为一个时间段。

来源：国际能源署基于 Bloomberg LLP (2020)的计算。

与 2007-08 年金融危机前相比，2009-10 年关键能源部门的研发总支出增速更慢，汽车行业研发支出下降；电力和可再生能源是例外。

[10]雷普索尔、壳牌、BP 和道达尔都计划在 2050 年前实现“范围 1 和范围 2”净零排放。范围 1 和范围 2 排放直接来自于石油和天然气产业本身的产品生产及其用料的上游生产。这些计划要求必须淘汰油气加工厂不加节制地采用化石燃料制氢的做法，除非它们广泛使用抵扣。

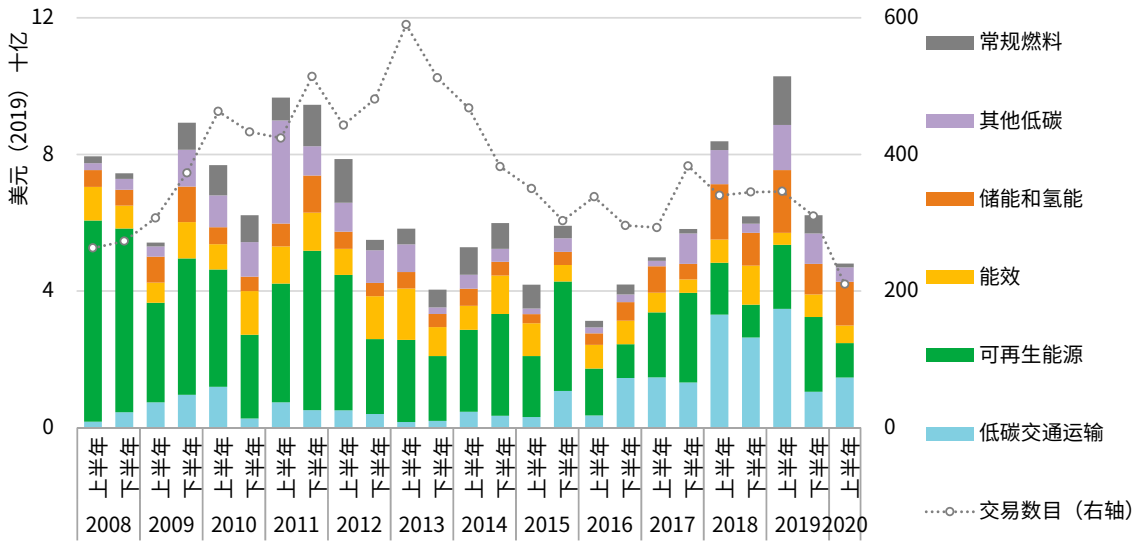
国际能源署。保留所有权利。

风险投资

2020 年上半年，早期阶段能源风险投资交易相对于 2018-19 年下降了约 30%；2020 年下半年，由于金融风险、旅游等限制和政策不确定性，预计全球范围内风险投资交易将呈下降趋势。如果将成长股权包括进来，数据中也可以看到 2020 年上半年全球范围内的下降（图 10）。

人们普遍认为，许多初创企业和创新型中小企业将遭遇生存困难，并面临现金流和债务的挑战，导致裁员和能源技术专家流失。其他初创企业可能不得不以低价出售企业股份。如果市场条件降低了投资者等待财务回报的意愿，那么从事资本密集型技术（例如目前许多商业可获得且可扩展的低碳选择方案有限的行业所需的技术）的年轻企业对风险投资人的吸引力可能会下降。在目前一些主要国家的政府正在争取更多地依靠风投融资将清洁能源技术推向市场的背景下，这可能会导致创新型企业家面临融资枯竭。这还可能会激发政策讨论，以探讨最适合风投融资的清洁能源技术类型，以及将其他类型技术推向市场的其他潜在模式。

图 2.10　按年份和上、下半年分类的全球能源相关风投交易金额和数目（早期和晚期）



注：包括的融资交易有种子轮、A 轮、B 轮、赠款、成长股权、收购和晚期私募股权、代币发行，以及上市后私募投资（PIPE）。2020 年 6 月最后一周报告的交易未计算在内。不包括扭曲同比趋势的 10 亿美元以上的异常交易；此类异常交易总量在 2008 年为 20 亿美元，2009 年 19 亿美元，2010 年 10 亿美元，2011 年 35 亿美元，2012 年 48 亿美元，2013 年 79 亿美元，2014 年 64 亿美元，2015 年 13 亿美元，2016 年 16 亿美元，2017 年 39 亿美元，2018 年 94 亿美元，2019 年 13 亿美元，2020 年 12 亿美元。交通运输包括替代动力系统及其基础设施，但不包括共享交通运输、物流或自动驾驶车辆技术。“可再生能源”包括生物能源，但不包括生物化学品。“其他低碳”包括 CCUS 和智能电网。“常规燃料”包括化石燃料的开采和使用以及车辆的燃料经济性。

来源：国际能源署根据 Cleantech Group (2020)所做的计算。

与 2018-19 年同期相比，2020 年上半年能源相关风投活动（早期和晚期）减少了一半；高价值的晚期融资轮受影响最大。

国际能源署。保留所有权利。

参考文献

Archibugi, D., A. Filipetti and M. Frenz (2013), "The impact of the economic crisis on innovation: Evidence from Europe", *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 80/7, pp. 1247-1260, https://doi.org/10.1016/j.techfore.2013.05.005.

Bennett, S. (2019), *Accelerating Clean Energy Innovation Means Tailoring R&D Policy to Technology Scale and Risk*, IEA, Paris, https://www.iea.org/articles/accelerating-clean-energy-innovation-means-tailoring-r-and-d-policy-to-technology-scale-and-risk.

Bloomberg LLP (2020), *Bloomberg Terminal* (accessed on 7 June 2020).

Breakthrough Energy (2020), "Our investment portfolio" (web page), https://www.b-t.energy/our-investment-portfolio (accessed on 7 June 2020).

Breschi, S. et al.(2019), "Public research and innovative entrepreneurship: Preliminary cross-country evidence from micro data", *OECD Science, Technology and Industry Policy Papers*, No. 64, OECD Publishing, Paris, https://doi.org/10.1787/0d057da7-en.

Bruegel (2020), "The fiscal response to the economic fallout from the coronavirus", https://www.bruegel.org/publications/datasets/covid-national-dataset.

Cleantech Group (2020), *i3 database*, www.cleantech.com/i3 (accessed in May 2020).

Cornell University, INSEAD and WIPO (2018), *The Global Innovation Index 2018: Energizing the World with Innovation*, Cornwell University, INSEAD and the World Intellectual Property Organization, Ithaca, Fontainebleau and Geneva, https://www.wipo.int/edocs/pubdocs/en/wipo_pub_gii_2018.pdf.

DNV-GL (2019), "Someone has to go first" (web page), https://www.dnvgl.com/expert-story/maritime-impact/Someone-has-to-go-first.html.

EPO and IEA (2020), Innovation in Batteries and Electricity Storage: A Global Analysis, forthcoming.

European Commission (2020), *The EU Budget Powering the Recovery Plan for Europe*, European Union, https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/factsheet_1_en.pdf.

国际能源署。保留所有权利。

Gaddy, B., V. Sivaram and F. O' Sullivan (2016), "Venture capital and cleantech: The wrong model for clean energy innovation", *MIT Energy Initiative Working Paper*, MIT Energy Initiative, Cambridge, Massachusetts, https://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2016/07/MITEI-WP-2016-06.pdf.

HM Treasury (2020), "Future fund launches today" (web page), https://www.gov.uk/government/news/future-fund-launches-today.

IEA (International Energy Agency) (2020a), *Energy Technology RD&D Budgets 2020*, IEA, Paris, https://www.iea.org/reports/energy-technology-rdd-budgets-2020.

IEA (2020b), *World Energy Investment 2020*, IEA, Paris, https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2020.

IEA (2017), *Early-stage Venture Capital for Energy Innovation: Financing Models, Trends and Implications for Policy*, Insights Series 2017, IEA, Paris, https://webstore.iea.org/insights-series-2017-early-stage-venture-capital-for-energy-innovation.

IEA (2011), *IEA Guide to Reporting Energy RD&D Budget/Expenditure Statistics*, IEA, Paris, https://www.iea.org/reports/iea-guide-to-reporting-energy-rd-and-d-budget-expenditure-statistics.

Izsak, K. et al.(2013), "The impact of the crisis on research and innovation policies", Study for the European Commission DG Research, Technopolis Group Belgium and Idea Consult, https://ec.europa.eu/research/innovation-union/pdf/expert-groups/ERIAB_pb-Impact_of_financial_crisis.pdf.

KPMG (2020), "Canada: Government and institution measures in response to Covid-19" (web page), https://home.kpmg/xx/en/home/insights/2020/04/canada-government-and-institution-measures-in-response-to-covid.html.

MAAC (Ministério Ambiente e da Ação Climática / Ministry of Environment and Energy Transition) (Minister of Environment and Energy Transition) (2020), *EN-H2 Estratégia nacional para o hidrogénio* [EN-H2 National Hydrogen Strategy], MAAC, https://participa.pt/contents/consultationdocument/Estrate%CC%81gia%20Nacional%20para%20o%20Hidroge%CC%81nio%20DRAFT%20publicac%CC%A7ao.pdf.

国际能源署。保留所有权利。

OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) (2020a), “Gross domestic expenditure on R&D by sector of performance and socio-economic objective (SEO)”, *OECD.Stat* (database), https://stats.oecd.org.

OECD (2020b), “Innovation in environment-related technologies, technology development”, *Environment Database*, https://stats.oecd.org.

OECD (2020c), “Start-ups in the time of COVID-19: Facing the challenges, seizing the opportunities”, OECD, Paris, https://read.oecd-ilibrary.org/view/?ref=132_132859-igoa9ao1mc&title=Start-ups-in-the-time-of-COVID-19-Facing-the-challenges-seizing-the-opportunities.

OECD (2009), “Responding to the economic crisis: Fostering industrial restructuring and renewal”, OECD, Paris, www.oecd.org/sti/ind/respondingtotheeconomiccrisis-fosteringindustrialrestructuringandrenewal.htm.

Pellens, M. et al.(2018), “Public investment in R&D in reaction to economic crises: A longitudinal study for OECD countries”, ZEW – Centre for European Economic Research, *Discussion Paper No. 18-005*, https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3122254.

Pless, J., C. Hepburn and N. Farrell (2020), Bringing rigour to energy innovation policy evaluation, Nature Energy, Vol. 5, https://doi.org/10.1038/s41560-020-0557-1.

Wilson, C. and Y.J. Kim (2019), “Analysing energy innovation portfolios from a systemic perspective”, *Energy Policy*, Vol. 134, https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.110942.

国际能源署。保留所有权利。

第 3 章可持续发展情景下的创新需求

要点

- 创新是可持续发展情景的核心。可持续发展情景下，与目前轨迹相比，从现在到 2070 年的二氧化碳累计减排量中有近 35%来自于目前处于原型期或示范期的技术；如果没有进一步的研发（包括商业示范项目）和技术改进，那么上述技术将无法大规模应用。另有 40%的累计减排量则依赖于尚未在大众市场应用领域商业化部署的技术。
- 只有在关键技术方面大力开展针对性研发工作，才有可能实现净零排放。能源行业实现净零排放的主要途径众所周知：实现最终用途行业电气化；开展二氧化碳捕捉、利用和封存，包括从大气中清除二氧化碳；采用低碳氢和氢基燃料；以及使用生物能源。然而，要想将价值链各个环节商业化，以解决目前没有可扩展的低碳选择方案的部门的排放问题，上述各条途径都需要克服技术挑战。
- 将新能源技术推向市场可能需要数十年时间。即使在太阳能光伏、锂离子电池、LED 等清洁能源技术开发的成功案例中，从最初原型到商业化也需要 10 到 30 年。可持续发展情景假定，协调一致的政策努力将加快新能源技术创新时间表，从而使创新速度保持在不低于以往最快速度的水平。这就要求知识有效地从先行国家传播到后发国家，特别是在最关键的早期应用阶段。
- 不同技术具有不同属性，有些属性有利于加快创新周期，有些属性则会拉长快速创新周期。例如，与大型工程解决方案相比，小型技术和模块化技术的资本密集度较低，因此在开发阶段的投资风险也较低。小型技术和模块化技术还可以实现标准化和大规模生产，从而通过竞争激励创新，将改良产品更快地推上市场。各领域之间的协同作用可以进一步加快创新周期。
- 某一技术领域积累的知识可能对多种关联技术具有很大意义和价值。这种“溢出”经常被忽视，但却非常重要，因为它们带来的益处只需较低成本就可以加以利用，并且可以避免额外研发需求。可持续发展情景下，创新政策激活上述协同作用，从而促使电池电化学、电解技术和燃料电池等高溢出潜力技术领域能够对减排做出贡献：从现在到 2070 年的累计排放比目前轨迹减少 30%。

导言

未来几十年内，清洁能源技术创新将发挥至关重要的作用，帮助实现温室气体净排放量迅速减少到零的目标，这与包括《巴黎协定》气候目标在内的联合国能源相关可持续发展目标（SDGs）一致。

国际能源署。保留所有权利。

2015 年《巴黎协定》提出了目标：“把全球平均气温升幅控制在工业化前水平以上低于 2°C 之内，并努力将气温升幅限制在工业化前水平以上 1.5°C 之内”。《巴黎协定》还呼吁尽快达到温室气体排放峰值，并在此后迅速减排，以在本世纪下半叶实现温室气体源的人为排放与汇的清除之间的平衡，即净零排放。净零排放要求任何剩余的人为排放通过下述方式完全抵消：通过改变土地使用系统产生负排放，通过生物能源与碳捕捉和封存（BECCS）清除温室气体，或从空气中直接捕捉二氧化碳（DAC）。

《巴黎协定》目标并不意味着能源行业二氧化碳排放有单一路径可寻[11]，也不对应实现净零排放的具体日期，原因有二：第一，目标涵盖一系列成果，第二，能源行业所需的轨迹不仅取决于能源行业以外的排放情况，还取决于具有气候影响的其他温室气体和空气污染物的排放情况。在全球范围内总体实现温室气体净零排放的确切时间也取决于何时达到排放峰值，以及随后的减排速度。

在本章中，我们使用国际能源署的**可持续发展情景**来评估：要想在 2070 年前实现二氧化碳净零排放，旨在促成清洁能源转型的清洁能源技术创新需做出怎样的贡献。可持续发展情景从宽广的视角描述了能源行业需要如何演进，才能实现联合国可持续发展目标（SDGs）中能源相关关键目标，包括《巴黎协定》气候目标（SDG 13）、2030 年前普及现代能源（SDG 7），以及大幅减少与能源有关的空气污染及其对公共卫生的相关影响（SDG 3.9）。

如果 2070 年后二氧化碳排放保持在净零水平，那么可持续发展情景下把全球气温升幅控制在 1.8°C以下的概率为 66%。如果 2070 年后二氧化碳排放降至净零以下，那么将提高到本世纪末升温 1.5°C的概率：至于概率提高多少，则取决于最终达到怎样的碳清除水平。政府间气候变化专门委员会特别报告评估的各种情景下，实现上述负排放是一个非常普遍的前提要求：报告提出的 90 种情景下，有 88 种假设存在某种程度的净负排放量。[12]

帮助实现净零排放的能源系统成熟度如何?

技术变革（即对技术进行开发和传播以满足不断增长的需求或取代现有的能源资产）驱动可持续发展情景下的清洁能源转型。构成目前能源系统的资本存量（从供应到最终用途）中，大部分都需要进行调整或改造，才能实现净零排放目标。若要在 50 年内实现全球净零排放，则需要广泛的一系列在用技术或早期开发阶段技术大幅降低成本并提高性能。

开发新技术并将其成功推向市场通常是一个漫长的过程。技术的历程包括从概念演进成为原型，然后进行规模示范，如果成功，则会得到更广泛采用和商业化。鉴于我们无法预测未知技术的

[11] 在本报告中，能源行业的二氧化碳历史排放量和预测排放量包括来自化石燃料燃烧以及与能源使用密切相关的工业过程的排放量，除非另有说明。

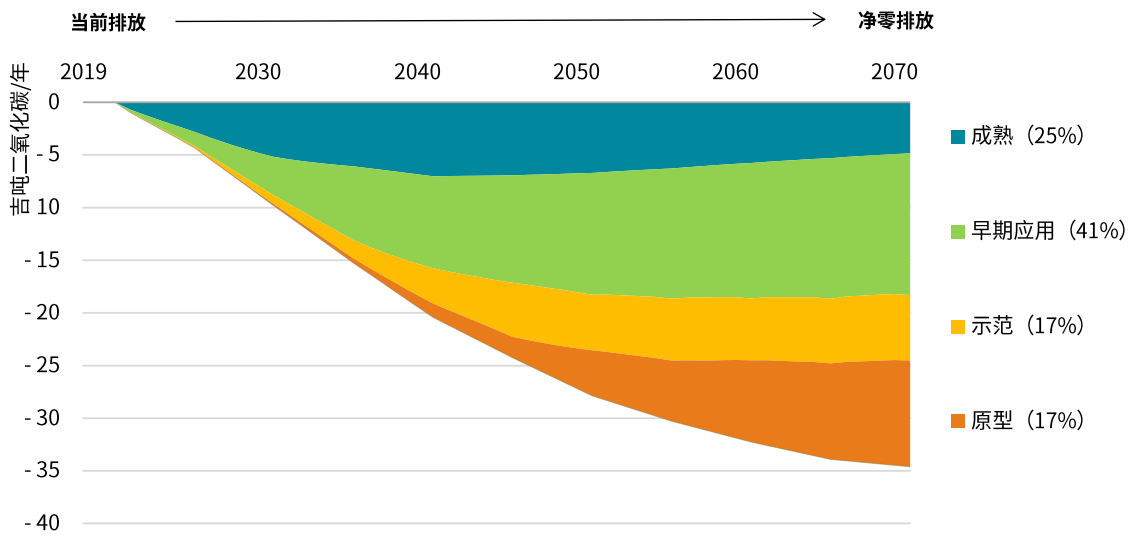
[12] 详情见 IEA (2019)。

国际能源署。保留所有权利。

出现，也无法预测哪些创意可能会成功，因此，可持续发展情景下的能源技术组合中包括了符合以下条件的技术：至少有一个大规模原型现今已得到证实，而且该技术商业化规模成长的途径也已为人所了解，即我们可以获得该技术潜在技术性能和成本的基本信息。然而，实践中有多种因素可能会延迟或破坏清洁能源转型，包括将来的意外事件以及企业、投资者和政府对此类事件难以预测的反应。

可持续发展情景下，与既定政策情景相比，到 2070 年的累计减排量中有近 35%[13]取决于目前处于大规模原型期或示范期的技术，约 40%取决于尚未大规模商业化部署的技术（图 3.1）。在重工业和长途交通运输行业，处于大规模原型期或示范期的技术对减排的贡献更大，因为这两个行业中目前还不存在实现深度减排所需的商业可获得且可扩展选择方案。

图 3.1　可持续发展情景下，与既定政策情景相比，按当前技术成熟度类别分类的全球能源行业二氧化碳减排量



国际能源署 2020。保留所有权利。

注：百分比是指在可持续发展情景下，与既定政策情景相比，通过使用对应成熟度类别中的技术到 2070 年将可能实现的累计减排量。

在可持续发展情景下，目前仅处于大规模原型期或示范期的技术对 2070 年减排量的贡献几乎达到一半。

可持续发展情景下，能源发展路径在很大程度上取决于相互竞争的技术的成本和技术性能如何通过创新发生变化，但也受到不断变化的政策重点和消费者选择的影响。这些因素都是相互联

[13] 本情景用作可持续发展情景的预测基准。本情景评估全球能源系统演进的假设前提是：已经批准或宣布的能源和环境相关政府政策（包括《巴黎协定》下国家自主贡献承诺）得到执行。

国际能源署。保留所有权利。

系的，并且随着时间推移而动态地相互作用。例如，锂离子电池成本下降的速度影响了电动车的接受率，继而又影响了锂离子电池相对于生物燃料这一脱碳手段的竞争力，特别是在轻型车当中。电池容量、效率和充放电功率等其他因素，也在一定程度上决定了电动车的吸引力，以及锂离子电池用于电力系统储能的经济可行性。对于推动净零排放转型的每一种技术而言，技术部署与成本和性能都互为因果：技术采用速度越快，规模经济和学习效应就越大，在良性循环中通过更多创新寻求渐进收益的动机也就越强。

可持续发展情景下，技术变革是清洁能源转型的关键驱动力，但不是唯一的关键驱动力。在这种情景下，随着公众对当前消费模式损害环境和社会的认识不断提高，以及价格信号的变化，消费者会做出反应，与能源服务和商品消费的体量和类型相关的行为会有很大变化。可持续发展情景下，分布式发电和需求响应策略扎根并得到推广，居民与能源系统的互动方式将发生根本性变化，而交通运输系统则转向排量较少的方式，如公共交通、轨道交通和共享出行。消费者和生产者都积极参与材料效率措施，如建筑物翻新、商品再利用和回收，以及产品设计，以促进可持续的报废管理策略。可持续发展情景下，与既定政策情景相比，避免创造某服务需求的策略（如共享交通运输或塑料回收）到 2070 年的累计减排量达到 7%（或近 80 吉吨）。[14]

专栏 3.1　　新冠疫情大流行对能源使用和二氧化碳排放的影响

根据国际能源署的分析结果，新冠疫情大流行对能源使用和二氧化碳排放具有影响，可能造成 2020 年全球能源相关二氧化碳排放量下降近 8%。这一降幅是有史以来单年最大降幅，是 2009 年金融危机造成的创纪录降幅 0.4 吉吨的 6 倍，是二战结束以来历次降幅总和的 2 倍。

基于 2020 年前 4 个月的数据，在全球经济逐步复苏的假设前提下，国际能源署预计 2020 年全球所有主要地区的一次能源总需求将收缩约 6%。其中，石油需求下降 8%，煤炭需求下降 8%，天然气需求下降 5%，电力需求下降 5%。因此，预计 2020 年全球二氧化碳排放量将减少约 2.5 吉吨，达到 31 吉吨以下，比 2019 年低 8%左右。这将是 2010 年以来的最低水平。然而，由于降幅几乎全部是经济活动减少的结果，而不是世界能源生产和消费方

[14] 本情景用作可持续发展情景的预测基准。本情景评估全球能源系统演进的假设前提是：已经批准或宣布的能源和环境相关政府政策（包括《巴黎协定》下国家自主贡献承诺）得到执行。

国际能源署。保留所有权利。

式的结构性变革的结果，因此，随着经济复苏，排放量很可能反弹，除非迅速采取行动来实现上述结构性变化。

这些惊人的数字让人意识到，在全球经济、人口均继续增长的背景下，要想大幅度、永久性减少二氧化碳排放，技术和消费者行为需要发生多么巨大的转变。这些数字凸显了能源和商品的生产和消费方式结构性转型的必要性，这种结构性转型是通过技术变革和消费模式彻底改变而同时实现的，这样才能进而实现既符合可持续目标又符合经济繁荣目标的清洁能源转型。

可持续发展情景下，创新的关键作用突出表明需要高效的创新周期，来以最具成本效益的方式实现净零排放。这意味着要确保有经费支持研究人员提出潜在的强大新创意，有机制在研发机构和工业界人士之间建立起强有力的联系，有最佳机会推动当今的原型期技术充分发挥潜力，并且有持续的改进伴随技术进入市场并扩大规模。要想顺利、迅速实现净零排放，就需要吸取以往经验，避免任何创新瓶颈，例如资本、知识或资金流动不足。

可持续发展情景下，产能设备和耗能设备的更换速度，以及新技术的引进速度，必须不低于能源业历史上的最快速度。对目前处于早期发展阶段的技术来说，扩散时间需要比历史平均水平缩短数十年。这种转变虽然史无前例，但还是有可能发生的。举例而言，可持续发展情景下所需要的许多技术都不同于过去的能源技术，而是依赖于数字化，它们也依赖于消费者的迅速采用，而消费者如今所处的环境中，信息以前所未有的速度传播。其他技术则需要大量新建基础设施，并且效率有所降低（如集成碳捕捉），但却有寻求变革的强大社会和监管压力作为支持。

我们在可持续发展情景下所做的预测，是以对能源创新和部署之间的相互作用进行的大量分析为基础的，并以关键技术如何诞生的历史案例研究为依据。本章其余部分探讨了将新兴技术从实验室推向市场的时间尺度，通过研究学习和通过实践学习对降低成本有何影响，以及在不同时间影响创新速度和成功的已知具体技术属性。它还解释了如何将上述各个因素纳入可持续发展情景。

国际能源署。保留所有权利。

专栏 3.2　评估技术成熟度：《能源技术展望（ETP）清洁能源技术指南》

要想评估一项技术在从初始创意到进入市场的全程中所处位置，可以使用技术成熟度（TRL）等级表。TRL 最初在 20 世纪 70 年代由美国国家航空和航天局（NASA）开发，并且自 20 世纪 90 年代以来在美国政府许多机构中被采用；它定义了不同等级，用于提供某一技术在其时间轴上的成熟度快照（Mankins, 1995）。美国国防部自 2000 年代初就开始将 TRL 等级表用于采购，欧洲航天局则于 2008 年采用了 TRL 等级表。2014 年，TRL 首次在航空航天工业之外得到应用，用于评估“地平线 2020”框架方案下的欧盟资助项目。如今，世界各地的研究机构和技术开发人员已将这份等级表广泛用于确定研究重点和设计创新支持方案。

这份等级表提供了一个通用框架，可以统一适用于任何技术，以评估和比较不同行业的技术的成熟度。技术的历程从确定其基本原则的那一刻起步（TRL 1）。随着概念和应用领域的发展，技术进入 TRL 2，当概念得到实验证明后，步入 TRL 3。然后，技术进入了概念本身需要得到验证的阶段，从实验室环境中开发的原型（TRL 4）开始，逐步推进到部署条件下的测试（TRL 6）。之后，技术进入示范期阶段，包括实际环境中测试（TRL 7），进而开展首次商业示范（TRL 8），最后走向相关环境中全面商业运营（TRL 9）。

当一项技术达到了被认为商业可用的阶段（TRL 9）时，并不一定意味着其成熟度已经能够满足能源政策目标，因为规模往往是关键。在 TRL 9 阶段之后，技术需要进一步得到开发才能被纳入现有系统，或以其他方式发展出足够规模；还可能需要开发其他支持技术，或建立供应链，这反过来又可能需要技术本身再进一步得到开发。为此，国际能源署对本报告中使用的 TRL 等级表进行了扩展，纳入了两个额外的成熟度等级：其中一个等级是技术已商业化且有竞争力，但需要进一步创新努力，才能在大规模部署时将技术纳入能源系统和价值链（TRL 10），最后一个等级是技术已实现可预测的增长（TRL 11）。

随着技术逐一通过各个阶段，技术性能相关的风险水平将会降低，但随着资本支出需求的增大，总体风险水平将会上升。不过，创新很少是线性发展的。并不是所有的技术设计都会进入市场或得到大规模部署。上述发展阶段可能在技术或成本因素的作用下加快或放慢，某一技术在不同的市场和应用领域中也可能处于不同的阶段。随着技术发展并进而产生新的改进创意，即便某一技术配置已经具备了竞争力，仍然可能会出现替代配置和可能更好的组件。不同阶段相互重叠，同时进行，互相影响。

国际能源署。保留所有权利。

国际能源署采用的技术成熟度等级表。

国际能源署 2020。保留所有权利。

为获得本分析报告所需的信息，我们分析了近 400 种单项技术设计和组件的技术成熟度，并将提供相同服务的设计和组件分级排列在一起，创建了《**ETP 清洁能源技术指南**》[15]。这是一个互动框架，包含不同技术设计和组件的成熟度信息，并汇总了成本和性能的改进目标和相应领域的领先参与者。在我们分析的技术设计和组件中，60%目前尚未商业化，35%还处于早期应用期，也就是说，这些技术在很大程度上还有赖于创新来提高性能和降低成本。在我们评估的成熟技术设计中，65%与建筑和发电领域有关：工业、交通运输和燃料转化领域中 TRL 等级较低的技术占比较大。

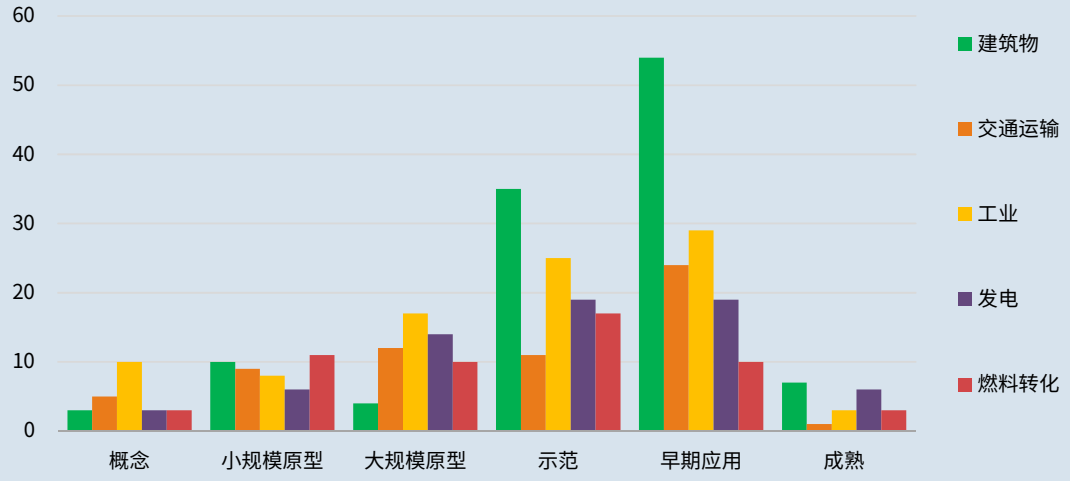
本报告中，我们提到四个更宽泛的成熟度类别，每个类别都包含了完整 TRL 等级表中相应的一系列具体成熟度等级；这四个成熟度类别是：成熟期、早期应用期、示范期，以及原型期。每个技术类型都被归为上述较高层级类别中的一类，归类的依据是与该技术相关的单项技术设计或组件目前的成熟程度。

[15] 如需了解更多信息，请访问：www.iea.org/articles/etp-clean-energy-technology-guide。

国际能源署。保留所有权利。

- “成熟”是指已经达到相当规模的部署，并且预期将只有渐进式创新的商业化技术类型。本类别下的技术类型的全部设计和底层组件均已达到 TRL 11 等级。例如水力发电和电力列车。
- “早期应用”是指部分设计已经进入市场，并且需要政策支持才能扩大推广的技术类型。不过，有与其竞争的设计正在示范期和原型期接受验证。本类别下的技术类型至少有一项 TRL ≥ 9 的底层设计，以及其他 TRL 较低的底层设计。例如海上、风能、电池和热泵技术。
- “示范期”是指设计处于示范期或之前阶段的技术类型，即技术没有 TRL ≥ 9 的底层设计，但至少有一项 TRL 7 或 8 的设计。例如水泥窑的碳捕捉、电解制氢生产氨和甲醇，以及大型远距离电池电动船。
- “大规模原型期”是指设计处于一定规模的原型期的技术类型，即技术没有达到 TRL 7 或 8 的底层设计，但至少有一项 TRL 5 的设计。例如氨动力船、电解制氢炼钢，以及直接空气捕捉。
- “小规模原型期”是指设计处于早期原型期的技术类型，即技术没有达到 TRL 5 的底层设计，但至少有一项 TRL 4 的设计。例如电池电动飞机和初级制钢直接电气化。
- “概念期”是指刚刚提出但仍需验证的应用。例如锂空气电池和电气化蒸汽裂解制烯烃。

《ETP 清洁能源技术指南》中分析的清洁能源技术设计和组件的数量



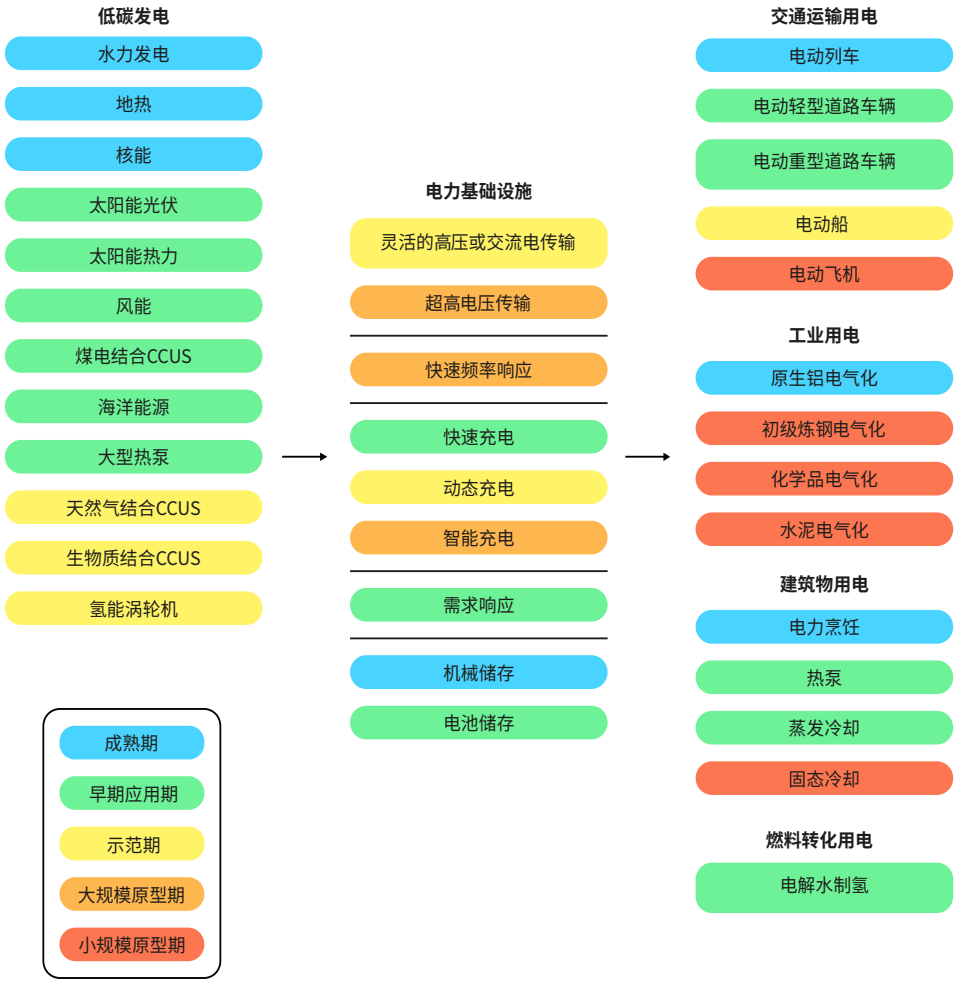
国际能源署 2020。保留所有权利。

国际能源署。保留所有权利。

关键低碳价值链的成熟度

可持续发展情景识别出一些关键的脱碳策略。在可持续发展情景下，与既定政策情景相比，到 2070 年的累计减排量中将有约 40%来自交通运输、工业和建筑领域电气化，以及可再生能源发电部署。约 20%来自向生物能源、氢能和氢衍生合成燃料（使用低碳氢和可持续碳源）等更可持续的替代燃料和原料的转型。另有近 15%来自碳捕捉、利用和封存（CCUS）系统部署，包括可以实现负排放的系统和低碳制氢系统。为了推行这些脱碳策略，需要通过创新来将新技术推向市场，并通过创新在相关价值链各个环节上改进新兴技术。

图 3.2 低碳电力价值链上各技术的技术成熟度



国际能源署 2020。保留所有权利。

注：各项技术都被划入其底层技术设计的最高技术成熟度等级。CCUS = 碳捕捉、利用和封存。如需了解这些技术中每一项的技术设计、以及处于小规模原型期或之前阶段的设计的更多详细信息，请访问：www.iea.org/articles/etp-clean-energy-technology-guide。

目前低碳电力价值链中有些环节尚未达到商业规模；最终用途行业和电力基础设施中的一些技术处于示范期或大规模原型期。

国际能源署。保留所有权利。

在低碳电力价值链中，有一些技术已经成熟，但其他技术还有很长的路要走（图 3.2）。在重工业和长途交通运输等已被证明难以实现电气化的需求领域尤其如此：这些领域的一些关键技术如今仍处于小规模原型期或之前的阶段。其他领域也存在类似情况。旨在制定有效并网措施并为低碳电网提供更大灵活性的创新，变得越来越重要；然而，相关技术目前普遍处于早期应用期和大规模原型期这两个阶段之间。在最终用途行业，电动车和热泵等一些技术已经商业可用，但创新仍然是一个重要问题：这些技术拓展市场的能力取决于进一步技术创新带来的更高性能和更低成本。

作为一项脱碳策略，**二氧化碳排放的捕捉、运输和利用或封存**是否成功取决于该过程中各阶段技术是否商业可用，以及二氧化碳运输和封存网络是否得到大规模发展和扩大。

捕捉：在氨生产、天然气加工等某些工业和燃料转化工艺中，二氧化碳捕捉已有数十年实践历史，但在许多其他可能的应用中，二氧化碳捕捉商业化方才起步，或仍处于大规模示范期（图 3.3）。在每一项潜在的新应用中，包括发电、燃料转化、水泥和钢铁生产，都需要根据各种工艺的特定条件来量身定制广泛的一系列二氧化碳分离工艺。各种二氧化碳分离工艺中，化学吸收是实际操作经验最丰富的技术，目前已用于商业化捕捉设施，也嵌入到了不同行业大多数应用的示范工厂中。因此，化学吸收将是可持续发展情景下未来 20 年应用最广泛的二氧化碳分离工艺。

使用：如今，二氧化碳已经在若干工业领域得到商业使用；例如，用于生产尿素（氮肥的主要前驱体）和碳酸饮料。这两种应用中，二氧化碳都只是暂时封存，最终还是会释放到大气中。二氧化碳的其他潜在用途也已在近期出现：包括建筑材料（可提供长期但非永久二氧化碳封存），以及合成燃料的原料（仅可暂时防止二氧化碳释放到大气中）。[16]

封存：二氧化碳用于提高石油采收率已有 50 余年历史；这也是一种封存形式，因为在整个项目寿命期内，绝大部分二氧化碳都会被保留在油藏中。所使用的二氧化碳大部分来自天然形成的气藏，但来自从工业源捕捉的二氧化碳也越来越多。然而，其他地质封存方案的规模经营经验比较有限。目前有 5 处大型设施在盐水层中封存二氧化碳超过 7 兆吨/年，其中 1 处设施自 1995 年以来一直运行至今（Sleipner CCS 项目）。利用枯竭油气井封存二氧化碳一直局限在试点示范期，但已有计划开发相关商业设施。

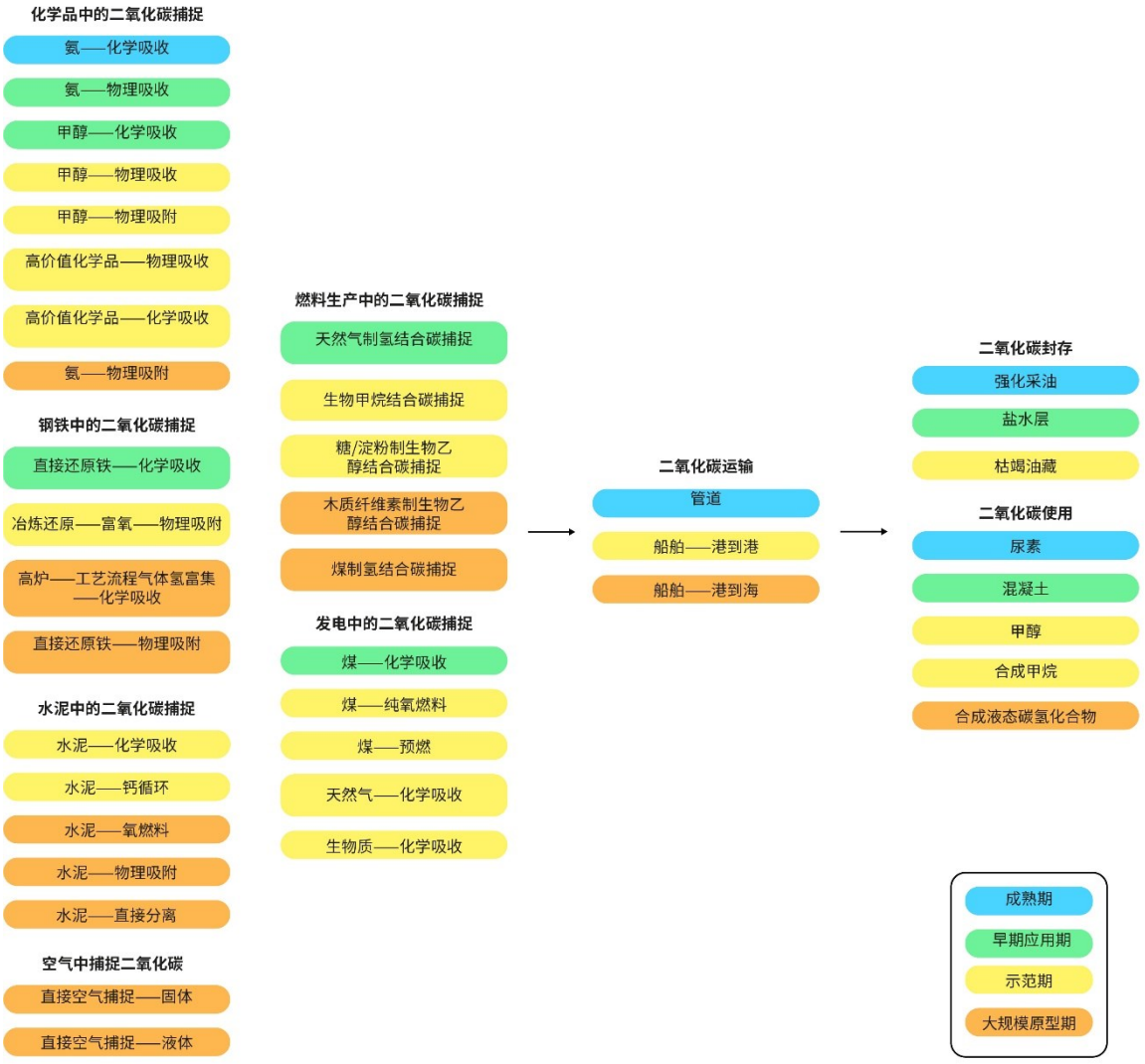
负排放：基于生物质的二氧化碳排放捕捉和封存，以及直接空气捕捉（DAC），都有能力产生负排放，因此具有较大的长期重要潜力。但是，除了少数例外，这两项技术都还没有大规模进入市场。[17] 一些示范工厂和试点已经完成；有些情况下，特别是捕捉的二氧化碳在附近有合适的商业用途时，这些示范工厂和试点持续运行至今。目前，世界范围内有几处小型试点规模的 DAC 工厂在运行：这些工厂中纳入了用于出售被捕捉二氧化碳的商业设施。

[16] 即使二氧化碳再次释放，化石二氧化碳的使用也有助于二氧化碳减排，因为原则上每个碳分子都得到了二次利用：首先是化石燃料中的碳被用于能源生产或工业生产流程；由此产生的二氧化碳再与氢结合，用于生产合成碳氢化合物燃料。

[17] 美国伊利诺伊州的一家生物乙醇工厂每年捕捉并封存 1 兆吨二氧化碳。

国际能源署。保留所有权利。

图 3.3　二氧化碳价值链上各项技术的技术成熟度



国际能源署 2020。保留所有权利。

注：图中包括的技术处于大规模原型期或较先进的阶段。各项技术都被划入其底层技术设计的最高技术成熟度等级。CCUS = 碳捕捉、利用和封存。如需了解这些技术中每一项的技术设计、以及处于小规模原型期或之前阶段的设计的更多详细信息，请访问：www.iea.org/articles/etp-clean-energy-technology-guide。

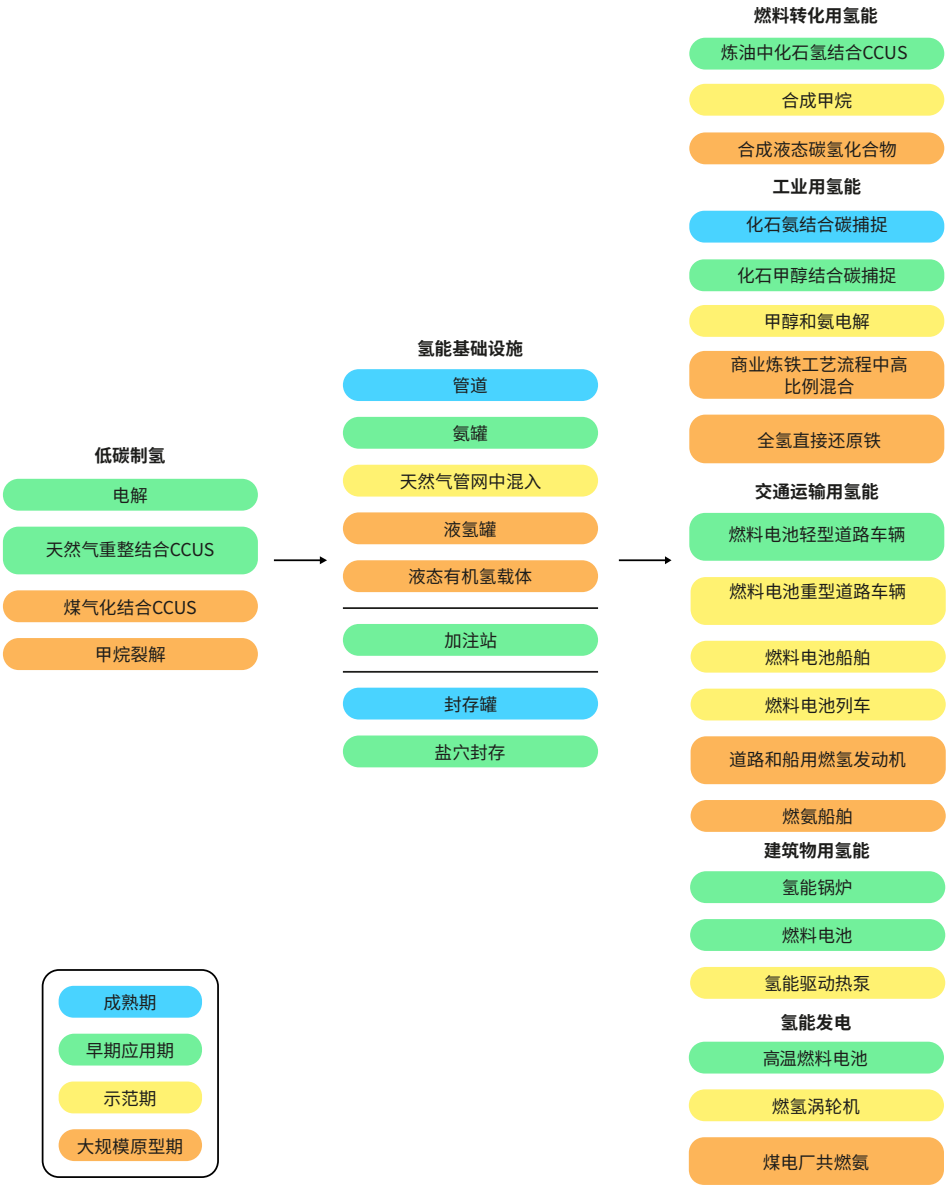
二氧化碳价值链上有一些环节目前尚未实现商业规模运作：许多相关技术仍处于示范期和大规模原型期。

低碳氢价值链如今尚未完全达到商业规模。这条价值链包括生产、运输、封存和消费低碳氢所必需的许多技术，各项技术所处成熟期不同，并且都面临具体的技术挑战（图 3.4）。在目前商业可用的低碳制氢路径中，重工业流程中电解制氢应用相对落后（仅处于示范期），而在相对领先的 CCUS 结合天然气领域，已有设施在运营。暂不谈氢能在炼油和化工生产中的长期使用历史，如今氢能的使用受限于目前商业可行的技术，只能用于轻型车辆、空间供暖，以及建

国际能源署。保留所有权利。

筑物和分布式电力系统发电。[18]在开发出将氢能用于钢铁和重型交通运输的技术之前，以及在以低碳氢衍生燃料（例如合成碳氢化合物燃料和氨）得到商业规模的示范和部署之前，对氢能的全部潜在需求中仍有很大一部分尚未被利用起来。

图 3.4　低碳氢价值链上各项技术的技术成熟度



国际能源署 2020。保留所有权利。

注：图中包括的技术处于大规模原型期或较先进的阶段。CCUS = 碳捕捉、利用和封存。如需了解这些技术中每一项的技术设计、以及处于小规模原型期或之前阶段的设计的更多详细信息，请访问：www.iea.org/articles/etp-clean-energy-technology-guide。

低碳氢价值链上有一些环节目前尚未实现商业规模运营；大部分所需技术仅处于示范期或原型期。

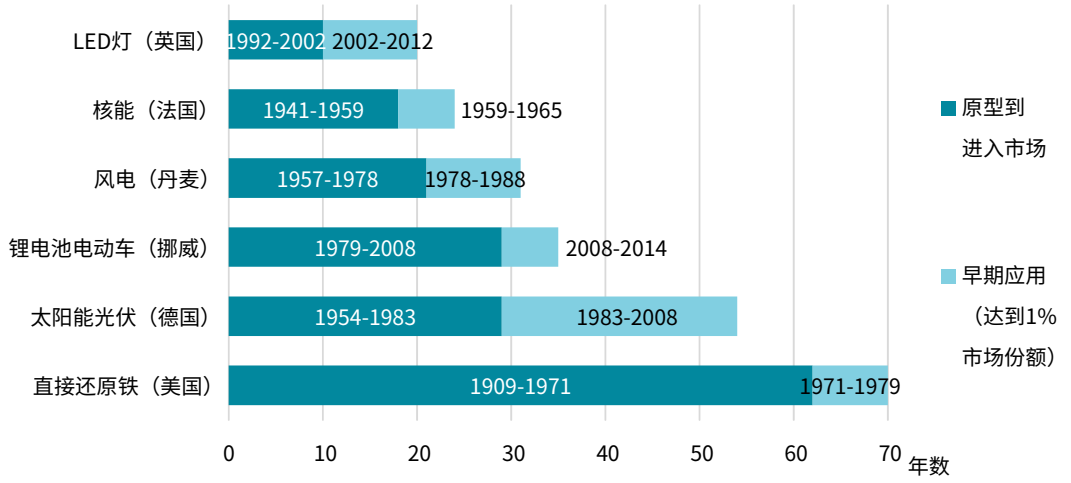
[18] 目前已部署的固定式燃料电池虽然能够使用氢能，但大多还是依赖天然气作为燃料。

国际能源署。保留所有权利。

技术从实验室走向市场的时间表

历史经验表明，新能源技术从第一个原型到实现重大市场份额（即达到国家市场的 1%）需时可达 20 年至近 70 年之久（Gross, 2018; Bento, Wilson and Anadon, 2018）。在清洁能源技术开发方面，即使是最近的成功案例，如太阳能光伏和用于驱动电动车的锂离子电池，从首个原型发展到商业化也经历了约 30 年（图 3.5）。太阳能光伏进入市场后，又用了 25 年才首次达到国家供电市场 1%的份额（首先在西班牙，紧接下来在德国），而锂离子电池驱动的电动车仅用了 6 年就首次达到了同样的国家市场占有率（挪威）。直接还原铁技术从原型到进入市场的时间约为 60 年（即从在瑞典的原型到美国南卡罗来纳州的第一间商业规模 MIDREX 工厂），其中部分原因是大型高炉长时间主导了批量工艺。

图 3.5　部分能源技术从原型期到进入市场、以及早期应用期的时长



国际能源署 2020。保留所有权利。

注：图中国家是指早期应用期的国家，即此处分析的技术首先达到重大市场份额的国家。国家是指早期应用期的国家。市场定义：LED：建筑照明设备存量；核电：发电量；风电：发电量；电动车：轻型车辆存量；光伏：发电量；直接还原铁：钢总产量。

来源：IEA data；Gross (2018)；UK National Statistics (2019)；Worldsteel Association (2020)。

继第一个原型之后，将重大新能源技术大规模推向市场用了 20 年到近 70 年的时间。

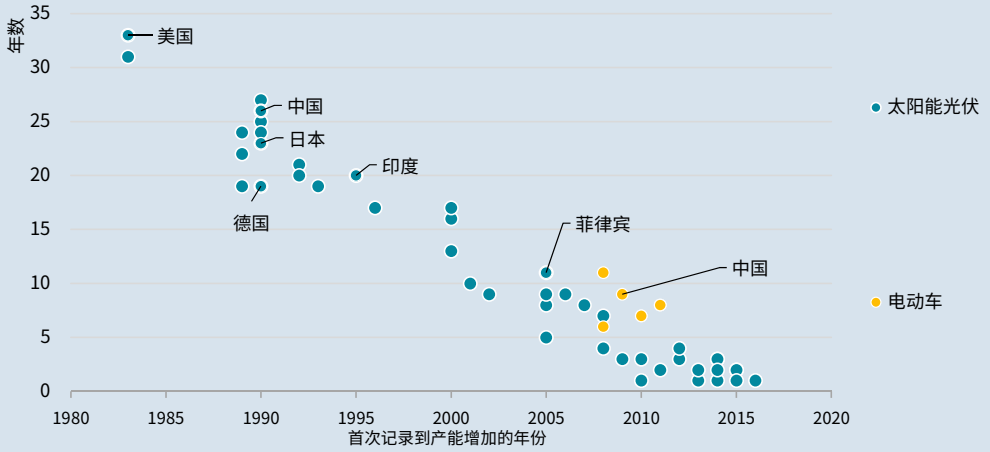
在领先能源技术中，建筑用 LED 照明实现重大市场份额所用的时间最短，这种技术自从开发出最初原型起，仅用了 10 年就被引进了英国，而核电自从开发出最初原型起，仅用了 18 年就被引进了法国。在上述两个例子中，创新都通过政府干预得到提速。虽然白光 LED 灯技术建立在半导体产业知识的基础上，并且在很大程度上是私营部门出资研究出的成果，但其早期应用十分依赖政府出台的照明效率标准和法规。核电大规模部署则是由以下两方面力量共同推动的：若干国家政府资助的基础科研和应用研发，以及法国通过公共采购建立第一批大型核电厂。

国际能源署。保留所有权利。

专栏 3.3　　技术跨境传播

德国用了约 20 年，最终在 2008 年实现了太阳能光伏占全国电力需求的 1%；而菲律宾则只用了约 10 年，就在 2015 年达到了同样的里程碑。在轻型电动车用锂离子电池这个案例中，挪威在先前近 20 年力推部署其他电池驱动电动车的基础上，以及美国电动车用了 12 年达到 1%市场份额的基础上，仅用了 6 年就达到了全国市场份额 1%这一里程碑。[19]

各国太阳能光伏和锂离子电池驱动电动车实现重大市场份额的年数



国际能源署 2020。保留所有权利。

注：图中市场份额是指国内提供服务的份额。对于太阳能光伏发电，市场份额是指占总发电量的比例。对于锂离子电池电动车，市场份额是以占整车存量的比例为代理值估算得出的。

这些趋势表明后来采用者的成本较低，以及国家、政府和企业之间存在机构性和社会性相互学习。然而，这不应当被视为政府采取观望态度、试图利用他国努力的论据。及早应用有益于建立市场领导力。例如，德国和日本的企业分别成为了生产太阳能光伏板和锂离子电池领域的市场领导者，也成为了开发供应链方面有偿提供专业知识的市场领导者。

上述国际部署规律说明，需要尽可能加强国家间的知识交流，以加速部署、加快通过实践学习并尽早实现规模经济。公平的竞争环境是全球公平贸易的核心，而全球一体化的市场有利于创新。在可持续发展情景下，我们假设：技术通过在一个市场的经验中取得的成本降低，将会转移到下一个采用该技术的市场，从而使该技术每次进入下一个市场时，都能更好地与现有技术及其支持企业进行竞争。

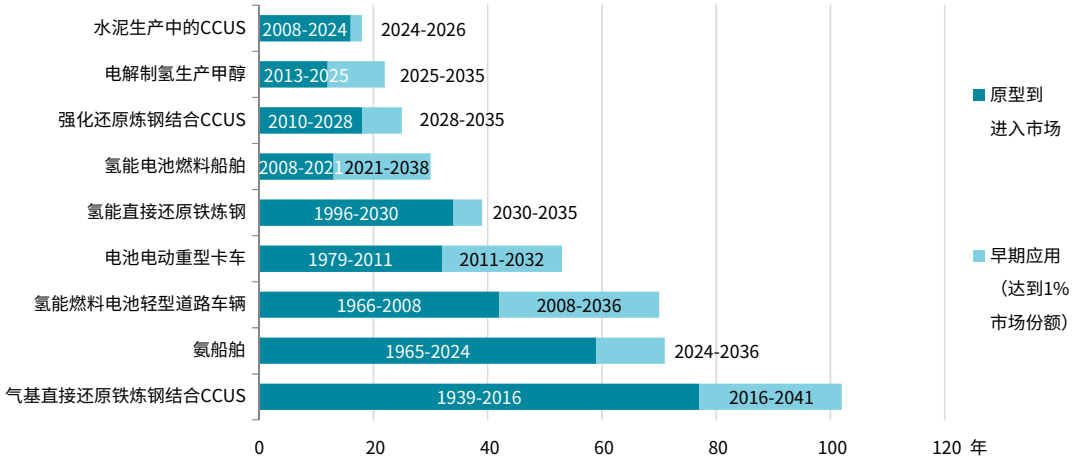
[19] 插电式混合动力车和电池电动车合计。

国际能源署。保留所有权利。

可持续发展情景下，关于新兴技术达到商业成熟期间的假设考虑了历史趋势及其背后的底层因素。每种技术类型从早期原型发展到首个商业化装置所用的时间尤为关键：即使在强有力政策的支持下，这一过程也可能需要十年或更长时间。在实践中，产业动态、投资和技术学习限制了一些技术进入市场的速度，特别是单元规模较大的技术。

总而言之，可持续发展情景假定技术的开发期比过去所观察到的开发期要短，这是因为我们假定政策支持力度要比过去大得多，从而使各行业间的技术知识交流更有效、协同作用更充分。我们还假设，过去曾导致学习中断的因素，包括财务资源缺乏、化石燃料价格风险和政治不稳定，不会影响未来的创新。

图 3.6　可持续发展情景下部分技术实现重大市场份额所需时间



国际能源署 2020。保留所有权利。

注：可持续发展情景下，从进入市场到实现重大市场份额的时间与全球部署预测有关。某项技术的部署速度不仅取决于过去观察到的类似案例的规律，还取决于该技术与提供同等服务的其他现有低碳技术相比，在成本和性能方面的竞争力如何，以及刺激采用该技术的政策的有效程度。

来源：Matsunaga, Tatsuya and Kuniaki (2009); Zemships (2008), Molino et al.(2018); European Cement Research Academy (2012); Brohi (2014); TATA Steel (2017); Kohl and Nielse (1997); Ballard (2019); Kraftwerk Forchung (2013), Nuber, Eichberger and Rollinger (2006)。

可持续发展情景下，在第一个原型之后，将新的清洁能源技术大规模推向市场所需时间大约为 20 年到 80 多年（取决于具体技术）。

在可持续发展情景下，对于目前仍处于试点阶段、需要根据场地定制的大型非模块化技术，我们假设在当前主流市场条件下，从第一个大规模原型到全规模示范需要 6 年到 8 年，之后再到首次商业使用需要 7 年到 10 年。在某些情况下，可能需要在世界各地的不同商业环境中运营 5 个全规模大型示范项目，每个项目运营期 5 至 10 年，并且项目之间发生知识传播，才能树立投资者和监管者的信心。在可持续发展情景下，另一方面，对于发动机、电池、电解技术等小型技术、模块化技术或小型模块化技术，我们假定从早期原型开始起算，技术将在 12-14 年内

国际能源署。保留所有权利。

进入市场[20]。因此，在可持续发展情景下，随着各种技术设计的竞争力增强并被采用，它们将在不同的时间点进入早期应用期（以上图 3.6）。

上述时间度量适用于第一个采用技术的国家；其他国家所需时间一般要短得多（以上专栏 3.3）。

沿着学习曲线前行

当通过研究学习、通过实践学习、标准化、跨产业合作和规模经济共同导致成本和价格下降并持续十年或更长时间时，可以基于经验构建“学习曲线”（或经验曲线），为未来类似技术的预期提供参考。典型的做法是：找出成本降低百分比与累计安装量翻倍所需时间之间的关联，后者是产业经验和规模水平的代理值。

太阳能光伏和锂离子电池就是这种学习曲线的好例子。自上世纪 70 年代以来，光伏在全球累计安装量每翻一番，单位成本就下降 24%：近几年，安装量每翻一番带来的单位成本降幅（学习速度）已达到 30%以上。锂离子电池对应的学习速度一直保持在 20%左右（图 3.7）。在这两种技术的例子中，上述学习速度都导致了价格出现指数型下降。随着安装量进一步扩大，预期未来成本会下降，要想保持下降趋势，可能需要新的技术配置。

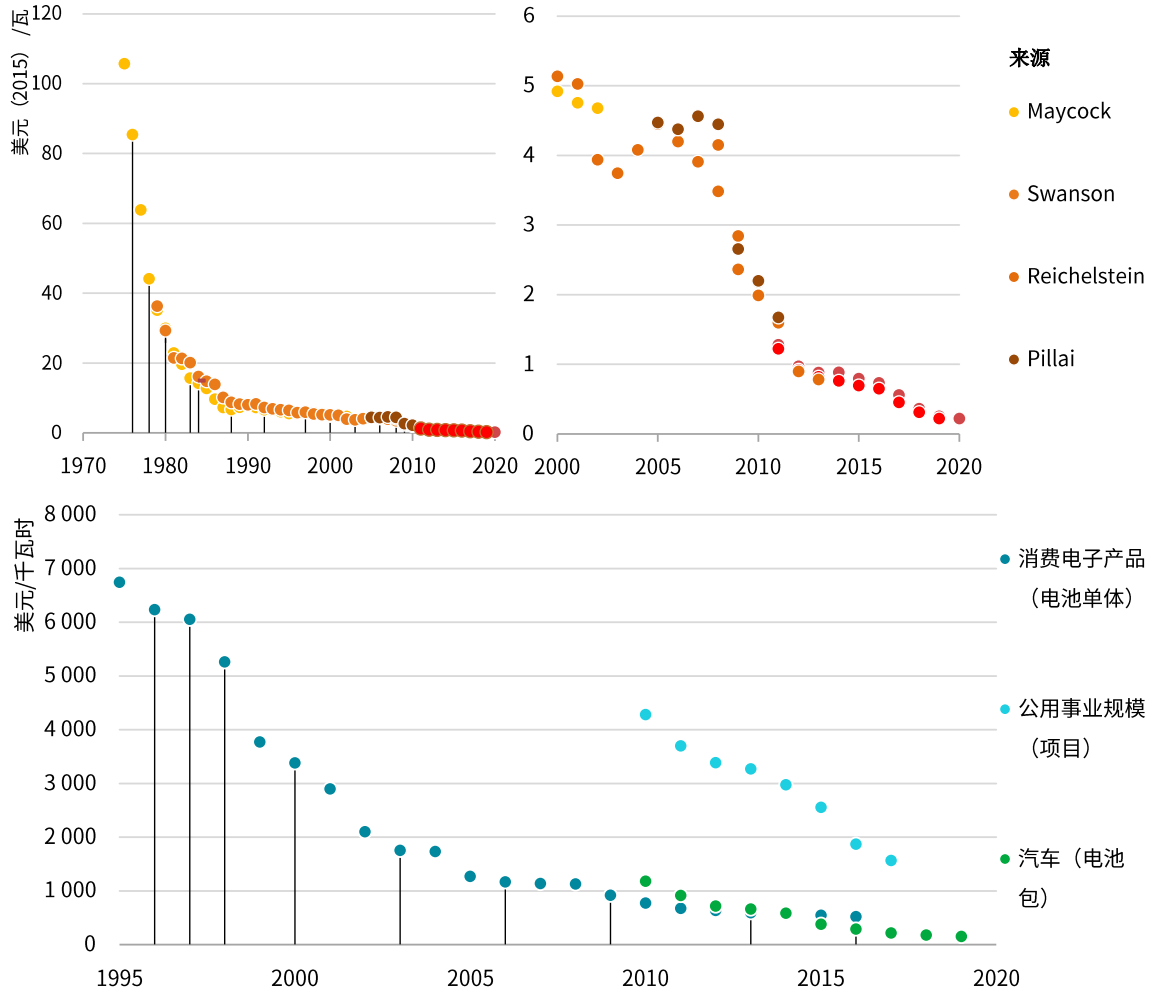
这两项技术都是建立在数十年的相关科学和工程研发基础上的，并且都不是为了服务于能源行业而开发的。第一块光伏板的示范发生在 1954 年，而第一块锂离子电池原型出现在 1979 年。太阳能板的最初应用是为卫星供电，首批商业应用则是用于手表和袖珍计算器中。[21] 锂离子电池最早用在手持摄像机中，后来又用于智能手机。军方是这两种技术的早期使用者：早期个人使用者通常是愿意为面板或装置的独特属性而付费的有钱人。后来，光伏的利基市场包括测光表、手电筒、电栅栏、离网度假屋和灯塔。锂离子电池后来的利基市场包括医用植入物、便携式音乐播放器、移动电话、笔记本电脑、电动工具和航空应用。这两项技术的例子中，在最初几十年的制造期里，都不清楚哪种配置将会成为主导配置：不同研究人员和企业对技术所使用的硅晶圆、电子器件和电极的类型做出了许多改变。对光伏而言，并网发电到上世纪 90 年代才成为其主要市场，而对锂离子电池而言，电动车到 2015 年才成为其主要市场。

[20] 这一考虑仅适用于预测期，并且不包括 2020 年之前从第一个原型到目前开发状态可能已经用了较长时间的技术。

[21] 20 世纪 70 年代末，对电子企业来说，消费品中使用的小型太阳能电池成本几乎为零，原因是：当时未实现盈利的离网应用已在生产大型模块，生产过程中无法使用的下脚料可以满足市场对小型太阳能电池原料的需求。

国际能源署。保留所有权利。

图 3.7　太阳能光伏模块成本的演变（上）和锂离子电池价格的演变（下）



国际能源署 2020。保留所有权利。

注：竖线代表累计安装量各次翻倍。这些技术不具有直接可比性，因为它们的价格分别是电池组、电池单体和系统层面的价格。光伏图中的不同颜色代表不同数据来源。

来源：Kavlak, McNerney and Trancik (2018); Bloomberg LLP (2020); Kittner et al.(2020)。

太阳能光伏和锂离子电池随着累计安装量每两到三年翻一番，成本都经历了指数型下降。

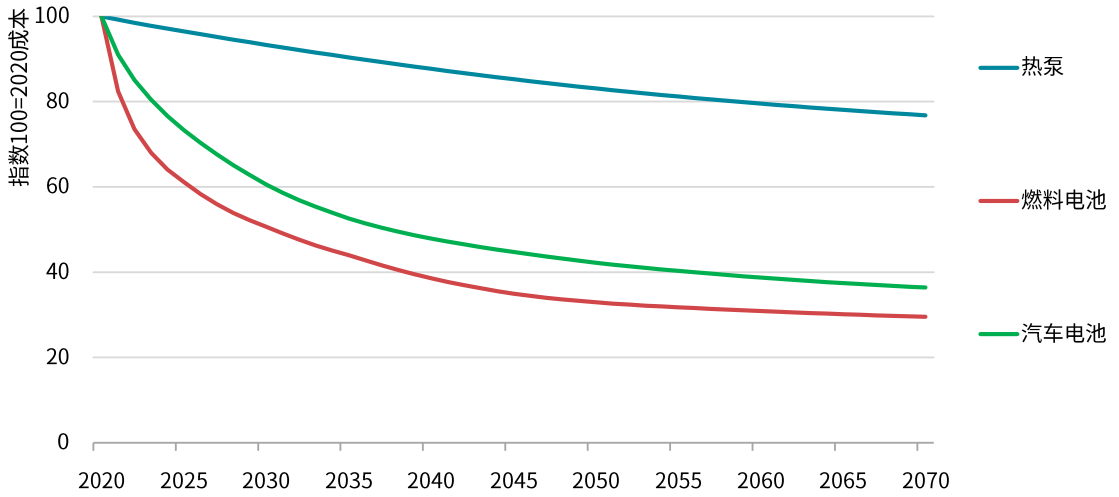
在可持续发展情景下，这两种技术的学习速度酌情应用于其他模块化、适应性强的小型简单设计。例如，电解装置和燃料电池至今为止产量有限，但在未来十年内会迅速普及，这将推动成本降低并促进技术主流化（图 3.8）。在某些情况下，某一技术处于较成熟的发展期，将适用较低的学习速度。例如热泵，此技术已经积累了大量学习经验，因此成本降低轨迹较为平缓。

很明显，并非所有技术都将遵循同样的历程，所以我们根据规模和制造方法类似的技术的学习速度，调整了可持续发展情景下的学习速度。例如，油气加工厂、涡轮机等能源技术，在材料、输量以及制造方面都受益于强大的规模经济，往往会经历单位规模快速增长伴随成本间断性下降的时期（Wilson, 2009）。偶尔，技术的历程甚至会倒退：例如，核裂变是一种复杂的大规

国际能源署。保留所有权利。

模技术，上世纪 70 年代和 90 年代在法国经历了“负学习”，部分原因是一系列连续项目的供应链难以标准化（Grubler, 2010）

图 3.8　　可持续发展情景下部分技术的单位成本降幅



国际能源署 2020。保留所有权利。

注：计算中，成本降幅是以下几个变量的函数：2018 年累计安装量、根据模型预测的新增安装量，以及具体到组件层面的学习速度。热泵、汽车电池组和燃料电池堆的学习速度：10%。电池封装和燃料电池辅助系统的学习速度：5%。

在可持续发展情景下，技术成本下降，下降速度因技术规模和技术属性而异。

加快创新的技术属性

理解不同技术设计的创新动态对政府和投资者来说都是至关重要的。有些类型的技术具有受益于不同创新支持手段的属性，有些则具备有利于（或不利于）快速创新周期的属性（Bennett, 2019）。了解这些属性对创新的影响，可以帮助政府判定是否应当在创新价值链的任何给定环节中发挥主导作用，或者是否可以合理预期私营部门将承担大部分创新风险。

在可持续发展情景下，有些属性会影响学习速度和技术采用速度（表 3.1）。这些因素包括单元规模小、模块化（在上述光伏和锂离子电池的例子中，这两条属性有利于大规模生产、标准化和持续学习），以及溢出效应。还有一条属性是数字化解决方案的使用，对很多种本身不具有数字化性质的能源技术类型而言，这一条属性有潜力大大缩短将技术推向市场的时间。这些属性可以增加成功的机会，但并不能保证成功：能源史上技术开发失败或停滞不前的例子比比皆是。在某些案例中，调拨资源是为了解决某一问题，例如预判的石油短缺，但要解决的这个问题后来不存在了，研发策略的商业价值也随之瓦解（Grubbler and Wilson, 2014）。

国际能源署。保留所有权利。

表 3.1 有利于加快创新周期或更快学习的能源技术属性

属性	说明	以往实例	可持续发展情景下的实例
单元规模足够小，可以大规模生产	对小型单元而言，可以在建造工厂前快速制成原型并测试。因此，全球需求可以支持很多工厂，产业竞争可以加快产品周转速度。此类技术每隔几年就会有创新改良的新一代进入市场。然而，在有些情况下，投资和消费周期不匹配会导致供应过剩和对市场份额的激烈竞争。	• 光伏 • 锂离子电池	• 热泵 • 燃料电池
模块化	模块化带来的许多益处与单元规模小带来的益处相同，但它还可以适用于不能大规模生产、但可以很容易标准化并依次添加到设施中的较大单元。一项主要益处是每一次阶式增加对资本的要求较低，这减少了与扩大规模有关的风险，并使部署的速度与价值链中其他要素的进度相匹配。	• 光伏 • 炼铝	• 基于固体吸附剂的直接空气捕捉 • 用于化学品生产的电解制氢路线 • 小型模块化核反应堆 • 标准化建筑改造
提供消费者认为有价值的服务	技术需要首先在少量消费者愿为该技术的特定益处支付溢价的利基市场上得到采用。终端使用者，尤其是早期应用者，常会愿意支付溢价来获得提供便利、乐趣、声誉等益处的产品。虽然许多低碳技术的性能或经济优势有限，但低碳产品可以提供消费者想要的声誉和其他益处，从而帮助低碳技术进入应用—学习—网络效应—扩展到新应用的良性循环。	• 载客车 • 智能温控器 • LED • 微交通运输 • 智能手机（可替代多达 18 种其他设备）	• 自动驾驶、互联、电动和共享出行 • 联网设备 • 建筑一体化光伏 • 分散化能源交易 • 电致变色窗
溢出效应（与他处的技术进步一道发挥强大协同作用）	不同行业的研究人员和工程师共享知识，减少对专项能源研发的需要。这是因为一项技术在某一应用中实现商业化所需的进步，同时也有利于该技术在另一不相关应用中实现商业化。例如电动车，这项技术推广了数十年都未被广泛采用，直到有了消费电子用品电池、混动车、轻量化技术和发动机的溢出效应推动，才得以起飞。	• 联合循环燃气轮机（来自喷气轮机） • 光伏（来自半导体） • 电动车用锂离子电池（来自消费品用锂离子电池）。 • 照明用 LED（来自电子用 LED） • 海上风能和地热（来自石油和天然气）	• CCUS（来自油气勘探、化学催化和气体分离中的） • 电池、燃料电池和电解技术（来自相互之间和其他电化学技术） • 生物燃料（来自医疗卫生和农业） • 智能化互联能源技术（来自传感器和数据通信）

国际能源署。保留所有权利。

属性	说明	以往实例	可持续发展情景下的实例
可作为“普适性”替代品或“附加安装”装置使用	一项新技术如果不需要改变相关设备或基础设施，就能更快得到应用。“普适性”（drop-in）替代品是指与现有的主流能源服务提供方式完全兼容的替代品。“附加安装”（bolt-on）装置是指与现有的工艺完全兼容，在完整保留现有工艺的基础上，增加额外功能（如排放捕捉）的装置。二氧化碳捕捉有可能成为一种“附加安装”装置，但一般需要对相关基础设施（如二氧化碳封存）进行重大改造。	• 某些生物燃料，如加氢处理植物油 • 生物甲烷 • 催化转化器 • 脱硫	• 氢基合成燃料 • 使用现有道路和电力基础设施的电动车 • 生物航空燃料
以数字化解决方案替代硬件或人工	能源行业许多最新创新已经用数字化流程替代了手工或模拟流程。数字技术创新需要的资本比较有限，可以就地进行连续实验和廉价升级。此外，许多数字产品可以产生具有商业价值的数据，这意味着投资风险由能源相关价值流和数据相关价值流分担。	• 地震地质勘探 • 电网管理	• 自动驾驶、互联、电动和共享出行 • 被动需求响应 • 数字孪生运维 • 3D 打印
对价值链中其他技术改进的依赖度极低	储氢技术都不仅取决于自身改进，还取决于其他技术的改进。同样，二氧化碳捕捉的成功在很大程度上取决于二氧化碳运输和封存的同步发展。对可变可再生能源发电来说，虽然这一属性对其制约小于该属性对氢能和 CCUS 的制约，但仍然有影响，因为可变可再生能源发电往往依赖于电网改进或储存解决方案改进。此种依赖性提高了价值链上各个相连环节的研发风险，可能会大幅减缓创新的速度。	• 生物质发电 • 核能 • LED • 煤气化	• 可再生能源加储存 • 强化还原炼钢
根据当地条件做出调整的必要性极小	有些技术（如电池）在新的区域部署时，可能需要根据当地气候条件进行调整。例如，极端温度、温度波动或频繁的暴风雨等当地条件，都可能显著改变技术的性能。燃料原料的差异（如生物质气化）也会使技术难以在全球市场实现标准化。在某些情况下，最终用途产品需要按照当地消费者偏好、法规和期望进行调整。不会遇到上述问题的技术可以更快地进入更广阔的市场。	• 内燃机 • 涡轮机	• 新型电池电解液 • 燃料电池

注：CCUS = 碳捕捉、利用和封存；运维（O&M）= 运行和维护。

国际能源署。保留所有权利。

要将溢出效应作为加快创新的重要属性予以重视

能源技术发展史上，有很多溢出效应改变投资和产业竞争进程的实例。某一技术领域的知识积累，曾有力驱动了其他相关技术创新。溢出效应虽然经常被忽视，但却对技术政策至关重要，因为它带来的益处只需相对较低的成本就可以加以利用，并且可以避免或减少额外研发需求。在可持续发展情景下，溢出效应在净零排放转型中发挥重要作用。

溢出效应可以指跨技术领域的知识转移（知识溢出），也可以指同一项技术实施于不同应用中而获得知识（应用溢出），不过，上述两种溢出效应之间的界限有时比较模糊。如果两项技术设计具有共同的科学基础、类似的制造工艺，或共同的安装和操作技能，就可能会发生跨领域知识溢出。当为某种应用而优化的一项技术设计或技术组成部分（如进料）适用于另一用途时，就可能会发生应用溢出。如果该技术能够经调整而适用于很多种用途，则上述情况更有可能发生。最强大的一类应用溢出被称为“通用技术”溢出。如果此类技术能根本性提升多个行业的效率，就能在整体经济层面驱动生产力增长。典型案例包括蒸汽机、电力和信息技术（Bresnahan and Trajtenberg, 1995; Ruttan, 2008）。对与这类技术相关的基础科学进行公共投资，可以获得尤其巨大的回报。

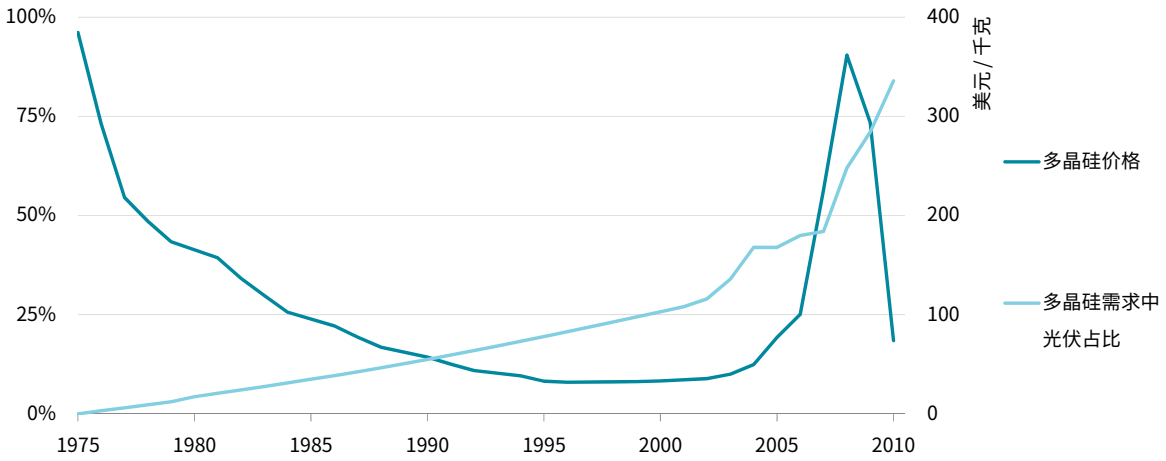
溢出效应下的知识传播主体包括研究人员、工程师、顾问和工厂经营者。较近的地理距离，以及专业协会和会议，都可以加强溢出效应。在溢出效应中，为不同行业提供服务的企业发挥着重要作用，例如工程、采购、建筑承包和技术咨询企业（Hoppmann, 2018）。

使特定能源技术受益的许多关键性溢出来自能源行业之外。如今在发电系统中发挥不可或缺作用的联合循环燃气轮机，最早是在航空航天业中开发的。第一台燃气涡轮喷气发动机，是 1939 年英国政府资助的军事研发中研制出来的。电力公用事业企业最初拒绝使用这些燃气轮机，因为它们当时比蒸汽轮机功率小、效率低，但 20 世纪 60 年代，工业化国家发生多次停电，促使电力企业安装了为飞机设计的燃气轮机作为应急备用。随后，燃气轮机的功率输出和效率发生了改进，以满足电力行业的要求（Watson, 2001）。后来电力行业对燃气轮机的更大需求又导致了其材料和设计进一步完善。

另一个实例是太阳能光伏板，它之所以能实现大规模生产带来的成本竞争力，是得益于微处理器用硅生产的平行发展带来的知识溢出。光伏行业采用半导体制造工艺，以及光伏和半导体两个行业共享硅生产，是光伏成本下降的重要因素，这使得多晶硅价格在 2000 年降至 1975 年的 10%以下，并且自 2000 年起光伏在多晶硅总需求中所占份额上升十分迅速（图 3.9）。同样，锂离子电池中使用的碳阳极的发展也得益于石化行业开发出的知识和工艺：首个功能性碳阳极是由一家石化企业开发的。

国际能源署。保留所有权利。

图 3.9　1975-2010 年光伏在多晶硅总需求中的占比（左）和多晶硅价格（右）



国际能源署 2020。保留所有权利。

注：2008 年的价格暴涨是由于当时光伏板需求暴涨造成供不应求，全球金融危机后供需回归平衡。

来源：Mehta (2014); Ferber, Costogue and Pellin (1982)。

多晶硅价格在 2000 年降至 1975 年的 10%以下，并且自 2000 年起光伏在多晶硅总需求中所占份额上升十分迅速。

专栏 3.4　对新冠病毒疫苗的大力投入是否能产生溢出效应，推动生物燃料技术发展？

随着相关方面竞相争取生产出有效的新冠病毒疫苗，生物技术领域的研发引起越来越多关注。将生物技术以基因工程的方式应用于某些植物和微藻[22]，可能有助于任何疫苗问世后扩大生产规模，同时还可能与生物燃料生产形成协同效应。

疫苗通常是在细菌或哺乳动物细胞内生产的。开发用于疫苗生产的细胞系可能需要数月，而将其稳定扩增至少需要一到两年。相比之下，种植和收获转基因植物和微藻只需数周，而且不需要额外扩增方案，几个月内就可以进入全面生产。这种方法可以更快地生产出疫苗，同时降低生产成本，还有可能避免对疫苗进行昂贵的冷藏（Balfour, 2020; Capell et al., 2020）。

[22] 在这种方式中，基因工程是指操纵生物体内的代谢途径来生产所需的生物产品，从而使植物和微藻成为一类植物工厂。

国际能源署。保留所有权利。

开发用于生产疫苗的基因工程植物（又称转基因植物）并不是新概念，但至今尚未实现商业化。不过，目前有几种植物性疫苗已进入临床试验阶段；ZMapp 就是一个例子：这种疫苗是转基因烟草植物中生产的抗体组合，曾在 2015 年用于抗击埃博拉病毒（Xu, Towler and Weathers, 2016）。一些企业和研究机构正在积极寻求通过转基因植物和微藻来开发一套工具，包括疫苗蛋白、抗病毒药，以及检测试剂盒，用于控制新冠疫情大流行（ISAAA, 2020）。

生物技术领域有两项关键技术，如果得到进一步开发并实现商业化，则可能有助于克服先进生物燃料生产商业化的障碍：

- **基因工程**可以增加生物质材料中可用作能源用途原料的组分含量（如植物中的糖、油和木质纤维材料），或生产能够分解木质纤维材料的酶，从而促进对木质纤维材料的进一步加工，达到生产生物燃料的目的。
- **先进提取工艺**可以通过高纯度、低能耗和低成本的方式有效提取油、蛋白质、糖等多种生物产品（Kumar et al., 2020; CRAG, 2020a）。

生物加工厂是利用潜在协同效应的理想平台，因为它能够从一种生物质原料中生产出多种产品，这与石油加工厂从原油中生产出多种产品的运作方式非常相似。它提供了潜在的多样化收入来源，可以降低每一种生物产品（无论是药品、营养，还是生物燃料）的生产成本，有助于保护生产商免受不同行业市场波动的经济冲击。根据所选原料的不同，前景较好的两种方法是：

- **对微藻进行基因改造**，以增加微藻中的油、糖、蛋白质或其他化合物，提取并精制这些组分，用于生物燃料、制药等众多领域。
- **利用转基因植物**（如烟草）和残留生物质（提取医用蛋白质或酶后剩余的生物质）生产生物乙醇或沼气。

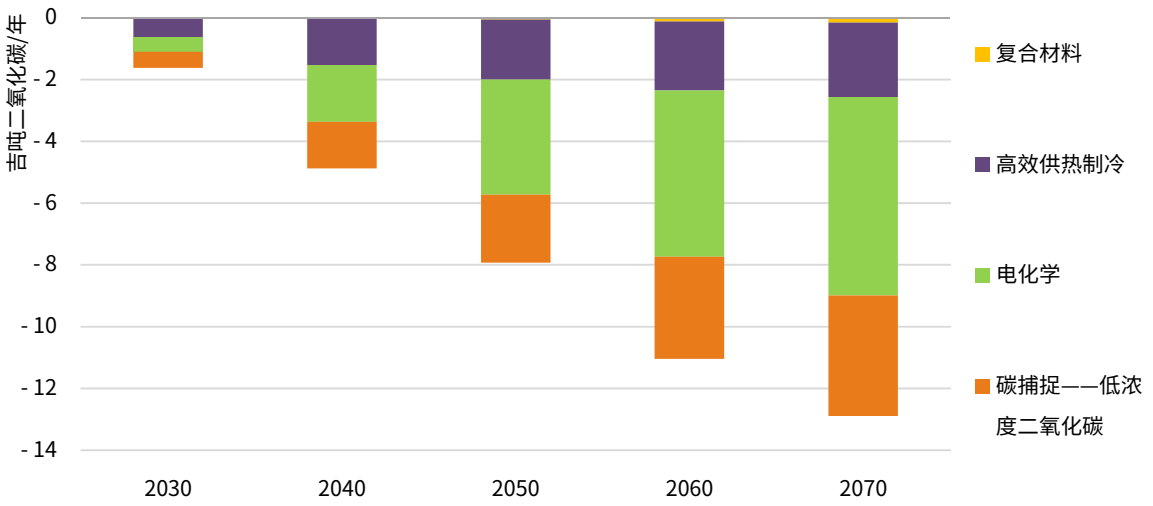
政府、研究机构和企业可以通过引导转基因植物和微藻研究，来刺激产生溢出效应，从而促进制药和生物燃料两种应用。在这方面，西班牙的农业基因组学研究中心就是一个例子：该中心在研究寻找新冠病毒疫苗的同时，还研究如何最好地利用木质纤维材料生产生物乙醇（CRAG, 2020a; 2020b）。

国际能源署。保留所有权利。

可持续发展情景下的溢出效应

在可持续发展情景下，溢出效应的作用尤为重要。本节讨论了溢出效应如何加速以下四个选定技术领域的进展：电化学、低二氧化碳浓度应用中的碳捕捉、轻质化复合材料，以及制冷和供热蒸汽压缩循环。可持续发展情景下，与既定政策情景相比，到 2070 年的累计减排量中有 30%来自于这四种技术的合计贡献，其中电化学贡献了这部分减排量中的 45%左右（图 3.10）。

图 3.10　可持续发展情景下，与既定政策情景相比，通过选定技术协同领域可能实现的减排量



国际能源署 2020。保留所有权利。

可持续发展情景下，四分之一的累计减排量与得益于知识溢出的技术族群有关。

专栏 3.5　量化溢出效应对加速技术成本下降的影响

关于如何量化溢出效应的影响，目前尚没有共识。知识溢出效应的影响不易量化，因为对使用相同科学原理的不同技术而言，相关人员之间的互动十分复杂。不过，应用溢出效应对技术成本的影响，可以利用学习曲线来量化。正如本章前面所讨论的，某一技术的学习曲线描述了成本降幅与累计安装量之间的关联，后者是产业经验和规模水平的代理值。我们绘制学习曲线时，汇总了技术实施于多种应用所产生的预计累计安装量，从而使根据这些曲线所做的预测反映出多种来源的学习积累。然后，我们又绘制了仅将技术部署于单种应用的另一套学习曲线，并以这些学习曲线作为反事实，计算出可持续发展情景下溢出效应对成本下降的影响。

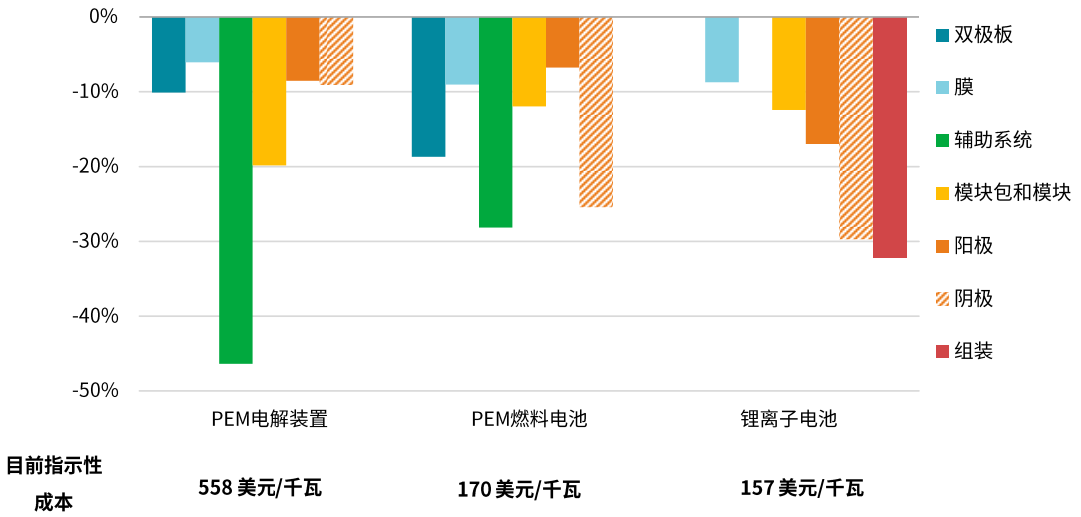
国际能源署。保留所有权利。

电化学：电池、燃料电池和电解装置之间的溢出效应

电化学装置将电能转化为化学能（反之亦然）。由于化学能比电能易于大量储存，因此电化学装置在交通运输电气化和长、短期储存可变可再生能源（通过氢合成）方面具有重要作用。电池、燃料电池和水电解装置都属于电化学装置，在可持续发展情景下，与既定政策情景相比，到 2070 年的预计累计减排量中有 15%来自于它们的贡献。这些技术有共同的科学原理、组件设计，以及材料和制造工艺，这意味着其中一种装置的发展很可能直接或间接推动其他装置的进步。最有可能利用此种协同作用的是那些开发不止一种上述技术的组织。例如，同时开发燃料电池和电池电动车的汽车企业，将数十年积累的氯电解知识用于开发碱水电解装置的制造商，以及开发电池、燃料电池和电解装置组件的化工企业。

说明在这三种电化学装置中加强这种溢出效应的潜力的一种方法是探索特定的通用组件族群的成本降低潜力：电极、膜和电解液、电池和堆叠组装以及工厂的辅助系统组件（图 3.11）。分析表明，在可持续发展情景下，先进的电极（即阴极和阳极）材料和制造技术可以为聚合物电解质膜（PEM）电解装置、燃料电池和锂离子电池释放约 20%至 45%的成本降低潜力（图 3.11），而在 PEM 电解装置和燃料电池之间分享改进辅助系统的经验，可以使这两种技术的成本分别降低 45%和 25%。

图 3.11　按组件类别分类的电化学装置成本降低潜力的细分信息



国际能源署 2020。保留所有权利。

注：PEM = 聚合物电解质膜。按组件分类的成本降低潜力数据来自于对每种装置自下而上的技术研究。组装指的是 PEM 装置的堆叠组装和电池组的电池单体组装。阳极和阴极这两个类别涉及相关的电池材料和制造，以及气体扩散层（阳极）和催化剂层（阴极）。膜是指电池用的膜和电解液，以及 PEM 用的高分子膜。双极板是电解装置和燃料电池独有的组件，而封装和模块成本是电池独有的。

来源：Thompson (2018); Mayyas et al. (2019); IEA analysis based on BatPac; Argonne National Laboratory (2020)。

电化学装置各关键组件的成本降低都有可能从一种装置溢出到另一种装置

国际能源署。保留所有权利。

可持续发展情景下，在电动车和电网储存应用中部署电池会产生溢出效益。燃料电池和电解装置向电池开发和制造学习获益更多，而后者向前两者学习获益较少，这是因为燃料电池和电解装置的价值链发展程度较低，而且这两者大量制造的经验也较少：上述学习有助于加快燃料电池和电解装置的部署，而燃料电池和电解装置则由于享受了溢出获益而比替代技术更具竞争力。

可持续发展情景下，也存在不同应用中部署同一电化学装置而产生的溢出效益。例如，为汽车行业开发的电池和为电网规模应用开发的电池之间具有协同作用，导致电网储能电池成本降低。如果没有前述溢出获益，到 2070 年，可持续发展情景下的电网储能成本会提高 20%。

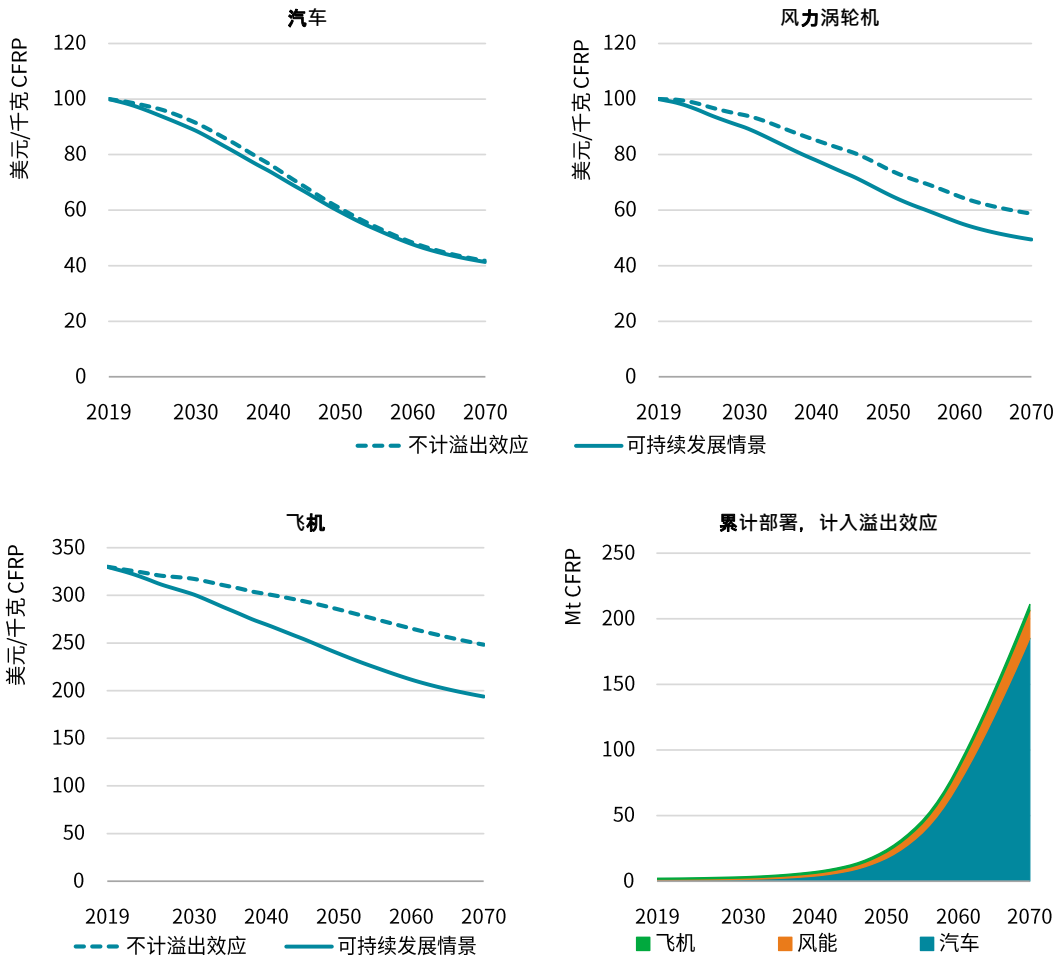
复合材料：轻型风力涡轮机、道路车辆和飞机之间的溢出效应

更多地使用碳纤维增强塑料（CFRP）等轻质材料，为道路车辆和飞机节约燃料以及风机提高容量系数提供了空间。如今，CFRP 在上述三个方面的应用都还处于比较早期的阶段。据估计，在道路车辆中，大多数情况下 CFRP 占平均车重的比例不到 1%。复合塑料在飞机上的使用虽然还没有完全普及，但相对比较普遍：在中小型飞机中，CFRP 占结构重量的比例平均约为 10%，在大型飞机中约为 25%：几乎全部采用 CFRP 的一些设计目前处于示范期（Air Transportation Analytics Ltd. And Ellondee Ltd., 2018; NASA, 2010; Coppinger, 2019）。在风电应用中，约有 25%的风机在制造时叶片中使用了碳纤维组件（Composites, World, 2020）。

共同的材料（碳纤维）和共同的制造基础将上述应用联系在一起的，这意味着随着碳纤维增强塑料使用量增加，将有通过溢出效应加速创新的空间。特别是，在公路交通运输车队中使用碳纤维，将为相对较小的风能和航空行业提供溢出获益的空间（图 3.12）。

国际能源署。保留所有权利。

图 3.12　可持续发展情景下碳纤维增强塑料在选定应用中的成本和累计部署情况



国际能源署 2020。保留所有权利。

注：CFRP = 碳纤维增强塑料。按照与碳纤维生产相关的各个应用在总价格中的份额适用不同应用中的综合学习（溢出效应）。实线代表可持续发展情景下的技术成本轨迹，而“无溢出”情景则是反事实，它表明：如果技术不能从不同应用积累的经验中获益，那么价格下降的速度将会比较慢。基准年成本假设来自于 Das et al. (2016)。

碳纤维增强塑料在航空和风机应用中的使用，得益于从汽车市场的使用中获得的经验。

在航空相关应用中，溢出效应将导致可持续发展情景下 2070 年 CFRP 的成本相对于没有溢出效应的情景下降低 20%：这种成本的降低将导致飞机中使用更多 CFRP，从而降低燃料成本，加快性能提高。

在风机中，复合塑料材料带来了若干改进，主要是可以更早用上更大涡轮直径的风机。扫风面积较大的风机可提供更多、更可靠的电力输出：而更稳定的输出则有利于并网，并且会提高风电在电力市场上的价值。有了更高容量系数的风机，就可以在原本被认为吸引力不大的低风速地区开发风电场，从而增加可开发的风力资源。

国际能源署。保留所有权利。

这些范围甚广的应用所产生的综合溢出效应也将触发整个碳纤维增强塑料供应链上的创新活动，结果是通过碳纤维生产（包括使用替代前驱体、回收纤维和替代生产工艺）、碳纤维转化为碳纤维增强塑料（包括通过快速固化和自动化工艺加速生产）等多种途径降低成本、能耗和排放。与为每种应用进行单独开发的假设情景相比，单是影响 CFRP 生产的二氧化碳强度的供应链创新，就能使 CFRP 集成在 2070 年额外节约 1.5 兆吨二氧化碳排放。

回收碳纤维增强塑料在目前仍是一项挑战，因为目前的许多回收技术都会破坏碳纤维，使其不适合许多应用，从而降低其价值。现有的回收方案往往也很昂贵，或者要用到有毒化学品。要想克服可回收性低的问题，就需要进一步创新：这将促使 CFRP 得到更大量使用，并通过减少对初次 CFRP 生产的需求来降低能耗。目前正在探索几种方法，其中一种是使用无毒溶剂，另一种是将聚合物熔化形成一种新的 CFRP。

碳捕捉：低浓度二氧化碳应用之间的溢出效应

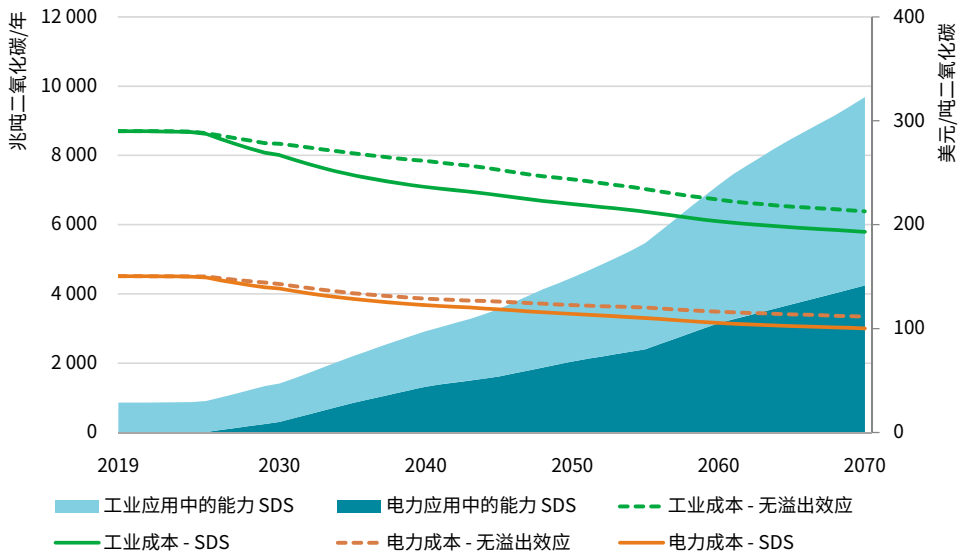
可持续发展情景下，与既定政策情景相比，到 2070 年的累计减排量中将有 10%以上来自于 CCUS 使用的贡献。这就要求开发和推广适应不同二氧化碳源的一系列不同二氧化碳捕捉技术，以达到实现上述目标所必需的部署水平。二氧化碳分离工艺包括化学吸收和膜分离（已经在工业界用于其他气体），以及需要更多颠覆性创新的工艺，如氧燃料和钙循环。

化学吸收是碳捕捉技术中最先进的一种。它开发于 20 世纪 30 年代，数十年来已被商业化应用于从二氧化碳浓度跨度较大的一系列气体中分离出二氧化碳。据估计，目前捕捉二氧化碳的累积已安装能力约为 860 兆吨/年。

尽管迄今为止已经积累了一定的经验，但进一步降低成本仍有空间，可以通过分享在不同工艺流程中使用化学吸收的知识而实现。此外，资本投入成本也有降低空间，例如可以通过捕捉单元标准化、规模经济，以及从大规模部署中通过实践学习来实现。在可持续发展情景下，从工业和发电领域的化学吸收应用中学习意味着，与没有从该技术的其他应用中学习的假设情况相比，到 2070 年部署该技术的成本将降低 10%左右（图 3.13）。

国际能源署。保留所有权利。

图 3.13 可持续发展情景下，工业和电力应用中的化学吸收累积能力（左）和资本投入成本学习曲线（右）



国际能源署 2020。保留所有权利。

注：SDS = 可持续发展情景。实线代表可持续发展情景下的技术成本轨迹，而“无溢出”情景则是反事实，它表明：如果技术不能从不同应用积累的经验中获益，那么价格下降的速度将会比较慢。

在可持续发展情景下，由于不同应用中的学习成果得到分享，因此部署化学吸收的成本下降更快。

专栏 3.6 从电化学到碳捕捉的潜在知识溢出

碳捕捉技术通常依靠温度或压力变化来吸收和释放从气流中捕捉的二氧化碳。然而，现在有新型装置能够利用电化学反应来捕捉和释放二氧化碳。这些反应有潜力在二氧化碳浓度低至 0.04%（即空气中二氧化碳的比例）的情况下捕捉二氧化碳。

其中有一种装置叫做变电吸附（ESA）装置，类似于大型电池。如果含二氧化碳的气体在该装置充电的同时通过电极，该装置就会吸附二氧化碳。放电循环过程中则会释放纯二氧化碳。变电吸附已使用溶液中醌类作为吸附剂，进行了实验室规模示范，最近又做出了将溶剂附着在固体表面的调整。现在，研究人员正在计划制造原型装置。

这种设计结构紧凑、模块化，并且完全依靠电力，因此足够灵活，可以在可变电力供应下运行。此外，每捕捉一吨二氧化碳，变电吸附技术所需的电力最高为 2.5 吉焦，而基于固体吸附剂的直接空气捕捉（DAC）目前需要约 7 吉焦的低温热能和 1-2 吉焦的电力，前者耗能

国际能源署。保留所有权利。

仅为后者的四分之一。但是，变电吸附在成为具有竞争力的替代品之前，将需要延长吸附时间，以尽量减少所需的电池数量，而这将涉及资本投入成本（Wilcox, 2020）。电池数量较少也将有助于解决占地面积大的问题：据估计，一个年吸附量为 1 兆吨二氧化碳的变电吸附 DAC 工厂中，仅捕捉设备占地就达数万平米。这低于对固体吸附式 DAC 设计的预估占地面积，但仍然对部署构成了重大挑战。

另一种可以利用电化学工艺进行碳捕捉的方法是碳酸盐燃料电池。这些电池利用含碳的进料（如天然气）发电，同时将所有的碳转化为二氧化碳和氢副产品流：然后，可以很容易地将二氧化碳与其他废气分离。如果将含有二氧化碳的废气输入燃料电池中，那么燃料电池就会将发电过程产生的二氧化碳和输入废气中的二氧化碳一起分离出来，使这两类来源的二氧化碳可以一起被捕捉。自上世纪 60 年代以来，熔融碳酸盐燃料电池已经经过了测试，并自 90 年代初开始在商业条件下使用：迄今已安装的能力超过 300 兆瓦（Weidner, Ortiz Cebolla and Davies, 2019）。

各种电化学二氧化碳捕捉方法都将继续受益于来自更成熟电化学装置（如电池）的知识溢出，包括它们在大规模生产和电化学板设计方面的经验。

高效的供热和制冷：空调和热泵之间的溢出效应

热泵和高效空调是建筑领域脱碳的基石，在可持续发展情景下，与既定政策情景相比，贡献了到 2070 年累计二氧化碳减排量的近四分之一。这两种装置一般都是基于蒸汽压缩循环，将热能从一处转移到另一处（空气到空气、空气到水、水到水），以提供最终用途服务（空间制冷、空间采暖、加热水）。空调是经过优化的制冷应用，而热泵是经过优化的供热应用。当蒸汽压缩循环可逆时，就能同时提供加热和制冷。几十年来，虽然在设计、制造和安装空调和热泵的过程中积累了不少学习成果，但这两种应用之间的溢出效应仍有潜力刺激进一步创新，加速成本递减和效率递增。

历史上，热泵和空调的发展是一系列因素联合推动的：前期成本降低、可靠性增强，以及单位耗电量所产生或移走的热能效率提高。对于空调来说，能效在市场力量和法规（如产品最低能源性能标准和建筑规范）的共同促进下得到了提高，同时成本不断降低，因此，变频空调等高能效的产品取代了越来越多的低能效产品（Groff, 2014; Desroches, L. B. et al., 2013）。然而，近年来空调性能改善和成本降低的速度有所放缓。热泵的性能和成本指标也得到了改善，这主

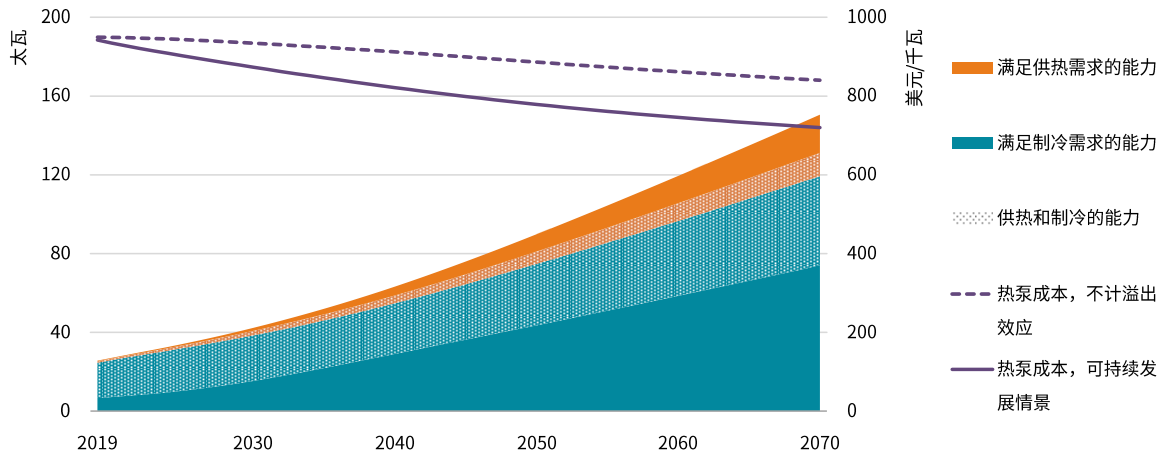
国际能源署。保留所有权利。

要得益于政策激励，同时，热泵需求不断增长，为创新型市场机制创造了机会，例如，配送系统运营商发挥服务提供商和/或热泵运营商的作用。

全球范围内，制冷需求的增长是当前和未来蒸汽压缩技术改进的主要需求拉动机制。目前全球空间制冷安装量是热泵的 10 倍以上。在可持续发展情景下，尽管热泵增长迅速，但到 2070 年空间制冷的安装量仍将是一次供热热泵的近 4 倍。空调和热泵之间的协同作用意味着：可持续发展情景下，制冷应用的溢出效应将使得热泵 2070 年成本额外降低 15%（图 3.4）。

上述成本和性能改善将使热泵占到全球供暖市场份额的一半，主要是在俄罗斯联邦和中国等国家，这些国家目前主要使用天然气或煤炭直接或区域供暖。这些国家很可能需要特别关注辅助系统组件和软成本，预计这两类成本在未来总成本中的份额将不断扩大。从长远来看，这些国家还可能需要替代设计，以降低目前被认为是技术上可实现的最低成本：这可能涉及采用创新型技术，例如使用有助于控制全球变暖的优化制冷剂的蒸汽压缩循环。

图 3.14　可持续发展情景下，蒸汽压缩应用的累积能力（左）和资本投入成本学习曲线（右）



国际能源署 2020。保留所有权利。

注：实线代表可持续发展情景下的技术成本轨迹，而“无溢出”情景则是反事实，它表明：如果技术不能从不同应用积累的经验中获益，那么价格下降的速度将会比较慢。图中成本不包括地热应用；它是指热泵的单位成本，不包括系统所需的额外组件和终端管道。该成本轨迹代表了 20 千瓦以下容量的机组。

估计蒸汽压缩技术的产能增量以制冷应用为主：供热和制冷之间的协同作用将使供热设备的成本降低约 15%。

国际能源署。保留所有权利。

参考文献

Air Transportation Analytics Ltd and Ellondee Ltd.(2018), *Understanding the Potential and Costs for Reducing UK Aviation Emissions*, Report to the Committee on Climate Change and the Department for Transport London, https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/785685/ata-potential-and-costs-reducting-emissions.pdf.

Argonne National Laboratory (2020), *BatPaC Model Software 4.0*, https://www.anl.gov/cse/batpac-model-software.

Balfour, H. (2020), "Using plants as bioreactors to produce proteins for therapeutics", European Pharmaceutical Review, https://www.europeanpharmaceuticalreview.com/article/112762/using-plants-as-bioreactors-to-produce-proteins-for-therapeutics (accessed on 8 June 2020).

Ballard (2019), "Ballard to work with ABB on design and launch of fuel cell-powered river push boat in France", press release, Ballard, https://www.ballard.com/about-ballard/newsroom/news-releases/2019/05/21/ballard-to-work-with-abb-on-design-and-launch-of-fuel-cell-powered-river-push-boat-in-france (accessed on 7 May 2020).

Bennett, S. (2019), "Accelerating clean energy innovation means tailoring R&D policy to technology scale and risk", IEA, Paris, https://www.iea.org/articles/accelerating-clean-energy-innovation-means-tailoring-r-and-d-policy-to-technology-scale-and-risk.

Bento, N., C. Wilson and L.D. Anadon (2018), "Time to get ready: Conceptualizing the temporal and spatial dynamics of formative phases for energy technologies", *Energy Policy*, Vol. 119, pp. 282-293, https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.04.015.

Bloomberg LLP (2020), *Bloomberg Terminal* (accessed in June 2020).

Bresnahan, T. and M. Trajtenberg (1995), "General purpose technologies 'Engines of growth'?", *Journal of Econometrics*, Vol. 65/1, pp. 83-108, https://doi.org/10.1016/0304-4076(94)01598-T.

国际能源署。保留所有权利。

Brohi, E.A. (2014), “Ammonia as fuel for internal combustion engines?: An evaluation of the feasibility of using nitrogen-based fuels in ICE”, Master's Thesis in Sustainable Energy Systems, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/207145/207145.pdf.

Capell, T. et al.(2020), “Potential applications of plant biotechnology against SARS-CoV-2”, *Trends in Plant Science*, Vol. 25/7, pp. 635-643, https://doi.org/10.1016/j.tplants.2020.04.009.

CompositesWorld (2020), “The markets: Renewable energy”, blog post, https://www.compositesworld.com/blog/post/the-markets-renewable-energy.

Coppinger, R. (2019), “Testing and development at Boom Supersonic”, web page, Aerospace Testing International, https://www.aerospacetestinginternational.com/features/testing-and-development-at-boom-supersonic.html.

CRAG (Centre for Research in Agricultural Genomics) (2020a), “Bioengineering lignocellulosic biomass in maize”, web page, https://www.cragenomica.es/research-groups/bioengineering-lignocellulosic-biomass-maize (accessed on 8 June 2020).

CRAG (2020b), “Covid-19: How plant biotechnology can help”, news report, CRAG, Barcelona, Spain, https://www.cragenomica.es/crag-news/covid-19-how-plant-biotechnology-can-help (accessed on 5 June 2020).

Das, S. et al.(2016), “Global carbon fibre composites supply chain competitiveness analysis”, technical report, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, https://doi.org/10.2172/1333049.

Desroches, L.-B. et al.(2013), “Incorporating Experience Curve in Appliance Standards Analysis”, *Energy Policy*, Vol 52, pp. 402–416, https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.09.066.

European Cement Research Academy (2012), “ECRA CCS project: Report on phase III”, TR-ECRA-119/2012, European Cement Research Academy, Dusseldorf, Germany, https://ecra-online.org/fileadmin/redaktion/files/pdf/ECRA_Technical_Report_CCS_Phase_III.pdf.

国际能源署。保留所有权利。

Ferber, R.R., E.N. Costogue and R. Pellin (1982), “Polycrystalline silicon availability for photovoltaic and semiconductor industries”, *International Journal of Solar Energy*, Vol. 1/2, pp. 105-124, https://doi.org/10.1080/01425918208909879.

Groff, G. (2014), “Heat Pumps in North America 2014”, IEA/OECD Heat Pump Centre Newsletter, Vol. 32, No. 3. 2014, http://www.nachhaltigwirtschaften.at/iea_pdf/newsletter/iea_hpc_newsletter_no_3_2014.pdf.

Gross, R. et al.(2018), “How long does innovation and commercialisation in the energy sectors take?Historical case studies of the timescale from invention to widespread commercialisation in energy supply and end-use technology”, *Energy Policy*, Vol. 123, pp. 682-699, https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.08.061.

Grubler, A. (2010), “The costs of the French nuclear scale-up: A case of negative learning by doing”, *Energy Policy*, Vol. 38/9, pp. 5174-5188, https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.05.003.

Grubler, A. and C. Wilson (2013), *Energy Technology Innovation: Learning from Historical Successes and Failures*, Cambridge University Press, Cambridge, https://doi.org/10.1017/CBO9781139150880.

Hoppmann, J. (2018), “The role of interfirm knowledge spillovers for innovation in mass-produced environmental technologies: Evidence from the solar photovoltaic industry”, *Organization & Environment*, Vol. 31/1, pp. 3-24, https://doi.org/10.1177%2F1086026616680683.

IEA (International Energy Agency) (2019), *World Energy Outlook 2019*, IEA, Paris, https://doi.org/10.1787/caf32f3b-en.

ISAAA (International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications) (2020), *Pocket K No. 58: COVID-19 Treatment Efforts Using Plant Technologies*, ISAAA, http://www.isaaa.org/resources/publications/pocketk/58/default.asp (accessed on 4 June 2020).

国际能源署。保留所有权利。

Kavlak, G., J. McNerney and J.E. Trancik (2018), "Evaluating the causes of cost reduction in photovoltaic modules", *Energy Policy*, Vol. 123, pp. 700-710, https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.08.015.

Kittner, N. et al.(2020), "Grid-scale energy storage", Chapter 8 in: *Technological Learning in the Transition to a Low-Carbon Energy System*, Academix Press, pp. 119-143, https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818762-3.00008-X.

Kohl, A.L. and R. Nielsen (1997), *Gas Purification*, Gulf Professional Publishing, Oxford, https://doi.org/10.1016/B978-0-88415-220-0.X5000-9.

Kraftwerk Forchung (2013), "CO2RRECT: Storing electricity while simultaneously capturing CO_2", news report, Kraftwerk Forchung http://kraftwerkforschung.info/en/co2rrect-storing-electricity-while-simultaneously-capturing-co2/page/0.

Kumar, M. et al.(2020), "Algae as potential feedstock for the production of biofuels and value-added products: Opportunities and challenges", *Science of The Total Environment*, Vol. 716, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137116.

Mankins, J. (1995), "Technology readiness level: A white paper", NASA, Office of Space Access and Technology, https://www.researchgate.net/publication/247705707_Technology_Readiness_Level_-_A_White_Paper.

Matsunaga, M., F. Tatsuya and O. Kuniaki (2009), "Powertrain system of Honda FCX Clarity fuel cell vehicle", *World Electric Vehicle Journal*, Vol. 3/4, pp. 820-829, https://doi.org/10.3390/wevj3040820.

Mayyas, A. et al.(2019), "Manufacturing cost analysis for proton exchange membrane water electrolyzers", technical report, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, https://doi.org/10.2172/1557965.

Mehta, S. (2014), "The shifting relationship between solar and silicon in charts", Greentech Media, https://www.greentechmedia.com/articles/read/Solar-and-Silicons-Shifting-Relationship-in-Charts (accessed on 28 February 2020).

Molino, A. et al.(2018), "Biofuels production by biomass gasification: A review", *Energies*, Vol. 11/4, pp. 811, https://doi.org/10.3390/en11040811.

国际能源署。保留所有权利。

NASA (National Aeronautics and Space Administrtion) (2010), *N+3 Aircraft Concept Designs and Trade Studies, Final Report, Volume 1*, NASA, https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20100042401.pdf.

Nuber, D., H. Eichberger and B. Rollinger (2006), "Circored fine ore direct reduction", *Millenium Steel 2006*, pp. 37-40, https://www.millennium-steel.com/wp-content/uploads/articles/pdf/2006/pp37-40%20MS06.pdf.

Ruttan, V.W. (2008), "General purpose technology, revolutionary technology, and technological maturity", Staff Papers 6206, University of Minnesota, Department of Applied Economics, http://dx.doi.org/10.22004/ag.econ.6206.

TATA Steel (2017), "The HIsarna ironmaking process", presentation, https://iea.blob.core.windows.net/assets/imports/events/245/ISTRM_Session3_HISARNA_201117.pdf (accessed on 7 May 2020).

Thompson, S.T. (2018), "Direct hydrogen fuel cell electric vehicle cost analysis: System and high-volume manufacturing description, validation, and outlook", *Journal of Power Sources*, Vol. 399, pp. 304-313, https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.07.100.

UK National Statistics (2019), "Energy consumption in the UK", web page, Department for Business, Energy & Industrial Strategy, https://www.gov.uk/government/statistics/energy-consumption-in-the-uk.

Watson, J. (2001), "Constructing success in the electric power industry: Flexibility and the gas turbine", *Science Policy Research Unit Working Paper Series*, No. 64, University of Sussex Business School, https://ideas.repec.org/p/sru/ssewps/64.html.

Weidner, E., R. Ortiz Cebolla and J. Davies (2019), Global Deployment of Large Capacity Stationary Fuel Cells: Drivers of, and Barriers to, Stationary Fuel Cell Deployment, JRC Technical Reports, Publications Office of the European Union, Luxembourg, http://dx.doi.org/10.2760/372263.

Wilcox, J. (2020), "An electro-swing approach", *Nature Energy*, Vol. 5, pp. 121-122, https://doi.org/10.1038/s41560-020-0554-4.

国际能源署。保留所有权利。

Wilson, C. (2009), “Meta-analysis of unit and industry level scaling dynamics in energy technologies and climate change mitigation scenarios”, IIASA Interim Report, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, http://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/9120.

Worldsteel Association (2020), *Steel Statistical Yearbook*, Worldsteel Association, Brussels, https://www.worldsteel.org/publications/bookshop/product-details~2020-Monthly-crude-steel-and-iron-production-statistics-Steel-Statistical-Yearbook-~PRODUCT~statistics2020~.html.

Xu, J., M. Towler and P. Weathers (2018), “Platforms for plant-based protein production”, In: Pavlov, A. and T. Bley (eds.), *Bioprocessing of Plant in Vitro Systems*, Reference Series in Phytochemistry, pp. 509-548, Springer, Cham, https://doi.org/10.1007/978-3-319-54600-1_14.

Zemships (2008), “One hundred passengers and zero emissions: The first ever passenger vessel to sail propelled by fuel cells”, brochure, Zemships, Hamburg, Germany, https://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.showFile&rep=file&fil=Zemships_Brochure_EN.pdf.

国际能源署。保留所有权利。

第 4 章 清洁能源创新需要加快进展

要点

- 对清洁能源技术创新而言，新冠疫情既是机遇也是风险。疫情提供了数十年一遇的机会，使各国政府能够通过激励措施调整优先事项，促进创新（包括研发），以期实现向净零排放的长期转型。但疫情也可能导致政府和企业预算收紧，从而造成清洁能源创新步伐放缓。
- 我们探讨了有别于可持续发展情景的另外两种情景，以说明不同情景的潜在影响。在“加速创新情景”中，我们研究了需要怎样加快清洁能源技术创新进展（包括目前仅在实验室或小规模原型期的技术），才能在 2050 年之前实现全球净零排放。在“减少创新情景”中，我们研究了如果将目前创新管道中的示范期项目推迟五年，并且将早期应用期这一关键时期中的技术部署放缓，会产生什么影响。
- 加速创新情景下，目前处于原型期或示范期的技术贡献的二氧化碳节约量在 2050 年将比可持续发展情景下高出 75%以上，而如今尚未进入市场的技术贡献的节约量在 2050 年将占全部节约量的 45%。这种快速部署需要有成功创新周期作为支持，创新速度要超越近期能源技术史上最快的创新速度。目前处于示范期或大规模原型期阶段的关键清洁能源技术将最迟需要在 6 年内进入市场，速度比可持续发展情景加快一倍。现有原型的部署将需要突破常规做法，在完成一次商业规模示范后，立即大力向市场部署。
- 加速创新情景下，先进的高能量密度电池化学技术将使交通运输电气化更加普及，而大规模高温工业电加热将在化工等行业广泛部署（这两类技术目前都处于概念和早期原型期）。与可持续发展情景相比，加速创新情景中 2050 年对氢能和氢基燃料的需求将增长近 25%；举例来说，这要求从现在到 2050 年，每个月安装完成近两座新的氢能炼钢厂（目前处于原型期）。2050 年，二氧化碳捕捉量将增加 50%，达到每年约 7.5 吉吨，而且每年将需要近 90 座配备二氧化碳捕捉和封存的新建生物能源厂，此数目几乎是可持续发展情景下预测安装量的三倍。
- 减少创新情景下，技术发展速度受到新冠疫情大流行影响，将比可持续发展情景下慢得多，排放量也会更高。与可持续发展情景相比，到 2030 年，氢能电解等关键技术的资本投入成本将高出近 10%，这会增加投资挑战和融资成本，削弱行业以所需速度扩大生产的能力，并要求政府提供更长期的额外财政支持，直到这些技术具有竞争力。

导言

长期来看，要使全球能源行业进行清洁能源转型，实现净零排放，就必须彻底改变我们生产和消费能源的方式。这就要求我们特别要减少生产和使用不配备碳捕捉、利用和封存（CCUS）

国际能源署。保留所有权利。

的化石燃料，而要使用低碳技术和更高效能源技术。本 ETP 特别报告第 3 章提到的可持续发展情景就描述了这样一种低碳转型。这种情景旨在实现能源相关的联合国可持续发展目标（包括《巴黎协定》的目标），它所提出的转型涉及前所未有的范围、深度和速度。它详述了巨大的技术更替和创新需求，表明还有很多工作尚需完成：可持续发展情景下，与既定政策情景相比，到 2070 年的累计减排量中有近 35%取决于目前仅处于大规模原型期或示范期的技术，约 40%取决于尚未大规模商业化部署的技术。也就是说，市场上现有的大规模技术将不足以实现全球清洁能源净零排放转型，持续大力关注研发和部署对转型十分必要。

在此背景下，很明显，确保政府和企业的研发和部署组合及优先事项与净零排放转型相一致是极为重要的。前路漫漫，道阻且长。如第 2 章和第 3 章所述，技术创新是一个耗时的非线性过程，在这个过程中，一些创意会被放弃，而新的创意亦会不断产生。历史经验表明，新能源技术在首个原型之后，可能需要 20 年到近 70 年才能实现相当规模的部署：即使是最近非常成功的太阳能光伏和电动车用锂离子电池等清洁能源技术，也用了 30 年左右。新冠疫情大流行严重影响了能源等行业的经济活动，进一步加大了上述挑战。为了应对疫情，各国政府现在越来越多地考虑经济刺激计划：这些计划为持续确保能源供应安全创造了行动机会，同时支持清洁能源转型，包括转型所依赖的技术创新。

本章中，作为可持续发展情景的补充，我们分析了另外两种情景，以说明在刺激计划中以及更广泛背景下，优先考虑清洁能源创新很重要：

- 我们分析了**加速创新情景**，探讨了需要在多大程度上增加清洁能源技术创新，才能将净零排放实现时间从可持续发展情景下的 2070 年提前到 2050 年。这种情景旨在强调以下做法的重要性：各国政府在新冠疫情中抓住刺激计划提供的机遇，重新审视其研发和部署组合和优先事项，并使之与长期清洁能源转型目标相契合。
- 我们还分析**减少创新情景**，探讨了由于示范期项目延迟或早期应用期技术发展迟缓，而可能导致的创新活动放缓的风险。这种情景表明，如果政府未能在经济刺激计划中和更广泛背景下优先考虑清洁能源技术创新，很可能会有怎样的后果。

专栏 4.1　　新冠疫情后，清洁能源技术创新是否面临风险？

随着全球经济危机在疫情大流行后逐渐显明，政府和企业的创新努力有可能不再是优先事项，关键清洁能源技术的开发和部署也可能因此延迟。不过，早期迹象总体上令人鼓舞，表明政府和企业都了解：继续重视研发和部署对清洁能源转型很重要。

国际能源署。保留所有权利。

新冠疫情的爆发已经影响到了关键电力技术。2020 年热泵销售报告显示，部分市场的销量暂时趋稳或下跌。2020 年 1 月至 3 月，美国的空气源热泵销量比 2019 年同期增长了 5%，但 4 月却同比下降了 15%（AHRI, 2020）。日本生产商大金预计其 2020 年销售额将下降近 9%（Daikin, 2020），而欧洲热泵协会估计欧洲市场的跌幅可能高达 10%。然而，制造商似乎对热泵的美好前景充满信心。截至 2020 年 6 月，虽然印度仍有一些工厂处于停工状态，但中国和欧洲的热泵制造量已恢复到了疫情大流行前的水平。大金（估计占全球热泵市场份额的三分之一）也计划在 2020 年维持 2019 年的研发支出水平，并且正在加强企业在德国的研发能力（Daikin, 2020a; 2020b）。各国政府抓住机遇，将热泵技术纳入应对新冠疫情挑战的刺激计划：例如，意大利的“超级生态奖金”为 A 级供暖和制冷系统提供 110%的财政激励（最高达 30,000 欧元），并且还奖励其他翻新措施（Gazzetta Ufficiale, 2020）。

交通运输方面，新冠疫情大流行导致部分地区电动车销量急剧下滑。在中国，2 月电动车销量降幅最大，比 2019 年同期下降约 60%：但 4 月销量强劲反弹，回升到上一年同期水平的 80%左右。在美国，4 月电动车销量还不到上一年同期的一半。不过，从欧洲几大汽车市场（法国、德国、意大利和英国）总体情况来看，2020 年前四个月电动车销量超过 14.5 万台，比上一年同期增加约 90%，这是近期扶持政策制度力度再次加大的结果。

碳捕捉、利用和封存（CCUS）方面，短期不确定性因最近宣布的项目和资助而得以缓解。2020 年 3 月，英国确认了对 CCUS 基础设施投资 8 亿英镑（9.95 亿美元）的承诺：该承诺计划至少在两处地点建立 CCUS。欧洲 100 亿欧元的创新基金从 2020 年起可用于支持 CCUS 项目（和其他清洁能源技术），而澳大利亚政府 5 月宣布计划将 CCUS 纳入已有资助方案。2020 年 3 月，美国能源部拨款 2,200 万美元，专门用于资助直接空气捕捉研发（US DoE, 2020），推动了相关研发工作。近期行业对 CCUS 做出的承诺包括：油气行业气候倡议组织于 2020 年 4 月宣布在美国投资建设天然气 CCUS 发电厂，Equinor、壳牌和道达尔于 2020 年 5 月承诺向“北极光”海上二氧化碳封存项目投资超过 7 亿美元。此外，2020 年 6 月，Climeworks 宣布已经筹集了 7,300 万瑞士法郎（7,500 万美元），这是直接空气捕捉领域迄今为止最大的一笔私人投资（Climeworks, 2020）。

国际能源署。保留所有权利。

一些氢能项目已被宣布推迟；例如瑞典旨在开发一批基于电解制氢的甲醇商业规模示范装置的项目，推迟了详细工程设计阶段，不过推迟幅度只有几个月（Liquid Wind, 2020）。其他项目也可能面临延误：据欧洲氢能协会估计，欧洲有多达 1,300 亿欧元的低碳制氢项目投资可能面临风险（Hydrogen Europe, 2020）。不过，也有不少新冠疫情之前的氢能技术发展计划得到了确认。德国、挪威等几国政府在 6 月初宣布了氢能发展战略，并做出了坚定承诺（德国承诺投入 90 亿欧元支持氢能技术，占国家复苏基金总额的 7%）。此外，推动开发完全基于电解制氢的铁矿石还原炼钢的联合团体，于 2020 年 6 月确认承诺，将按计划推进项目。也就是说，工业规模示范厂将于 2023 年开始建造，以期最早在 2026 年生产出商业化的无化石钢（Hybrit, 2020）。

近几个月来，出现了一些促进氢能相关技术创新的新举措。澳大利亚承诺提供 3 亿澳元资金支持氢能动力项目（Department of Industry, Science, Energy and Resources, Australia, 2020）。“欧盟下一代”计划可能将对氢能技术的投资视为支持新冠疫情后经济复兴的手段（EC, 2020）。中国首都北京于 2020 年 6 月发布了《北京市加快新型基础设施建设行动方案(2020-2022 年)》，提出打造中国领先的氢能燃料电池汽车产业试点示范城市，包括建立全国领先的氢能技术制造中心（Beijing Municipality, 2020）。中国国家电力投资集团于 2020 年 5 月披露，计划在湖南株洲建设可再生能源制氢、储氢、加注和燃料电池制造一体化产业基地，总投资达 36 亿元（5 亿美元）（21SPV, 2020）。私营部门将重点主要放在目前商业可用、可扩展的低碳选择有限的行业。例如，丹麦能源和交通运输行业的 6 家企业宣布将联合开发用于长途交通运输和重工业的氢基燃料，首批项目将于 2023 年开始运营（Financial Times, 2020）。2020 年 4 月，若干汽车制造商宣布计划开始生产用于重型道路车辆的燃料电池，最早在 2020 年就会开始（Green Car Congress, 2020; Daimler, 2020），而一些设备制造商则宣布达成协议，将联合开发适合远洋船舶的兆瓦级燃料电池系统（ABB, 2020）。

国际能源署。保留所有权利。

加速创新情景——创新到底能为我们做出多少贡献?

可持续发展情景下，通过宏伟的技术变革，以及堪比历史上最快、最成功的清洁能源技术创新成功案例的优化创新体系，在 50 年内实现能源行业净零排放。在本节中，我们将探讨到 2050 年实现净零排放还需要在多大程度上增加清洁能源技术创新；2050 年是清洁能源转型工作的里程碑年，在《政府间气候变化专门委员会全球升温 1.5°C特别报告》发布后的公开讨论中，这一年得到了极大的关注。

加速创新情景是可持续发展情景下的一个特殊案例，它的重点是延展情景底层的创新驱动力。这种情景并不是作为到 2050 年实现净零排放的理想路径提出的；理想路径这个问题十分复杂，远超出了单纯技术创新的范畴，并且很可能需要我们的生活方式发生更根本的改变。[23]加速创新情景旨在探讨：要想在 2050 年之前实现全球净零排放，发展周期需要比可持续发展情景下的周期缩短多少，以及技术推广率需要提高到什么程度。“加速创新情景”与“可持续发展情景”的区别主要在于以下三处关键变化：

- 对于目前仍处于实验室或早期原型期的技术，可持续发展情景不予考虑，因为这些技术的性能和未来商业化的潜力充满了不确定性。为了探索它们对更早实现净零排放的潜在贡献，我们在加速创新情景中纳入了一部分技术成熟度（TRL）较低的技术，这部分技术具有模块化、规模小的特点，可以大规模生产，而且有可能较大程度上得益于其他净零排放技术的溢出效应、并可以为其他技术贡献较大的溢出效应。我们还纳入了在以下方面具有很大潜力的技术：解锁供应约束，以及将供应曲线向低成本资源移动。
- 对于目前处于原型期的技术，我们假设其进入市场的时间进一步大幅缩短，大大短于近期清洁能源技术开发的成功案例进入市场的时间。我们还假设，将突破常规做法，在完成一次商业规模示范后立即大力向市场部署。
- 对于新颖和新兴清洁能源技术，我们将普及率提高到如下程度：在快速扩张时需要充分协调才能避免额外的市场瓶颈和供应链上的资源约束。

加速创新情景下，所需的创新速度几乎或完全没有先例可循，而且在示范或任何其他阶段也没有为任何延误或意外运营问题留出任何缓冲时间。当然，延误和意外在实践中是必然会发生的。尽管如此，虽然一项技术从实验室到成为主流可能需要几十年（如本报告前面章节所述），但本报告考察的预测期长达 50 年，其间应该会出现一些意外状况。任务导向、支持属性有利于快速创新周期的技术领域的清洁能源创新方法，可以加快进展步伐，如果能与新冠疫情后复苏

[23]见 2019 年《世界能源展望》关于 1.5°C路径所需变化的讨论（IEA, 2019）。

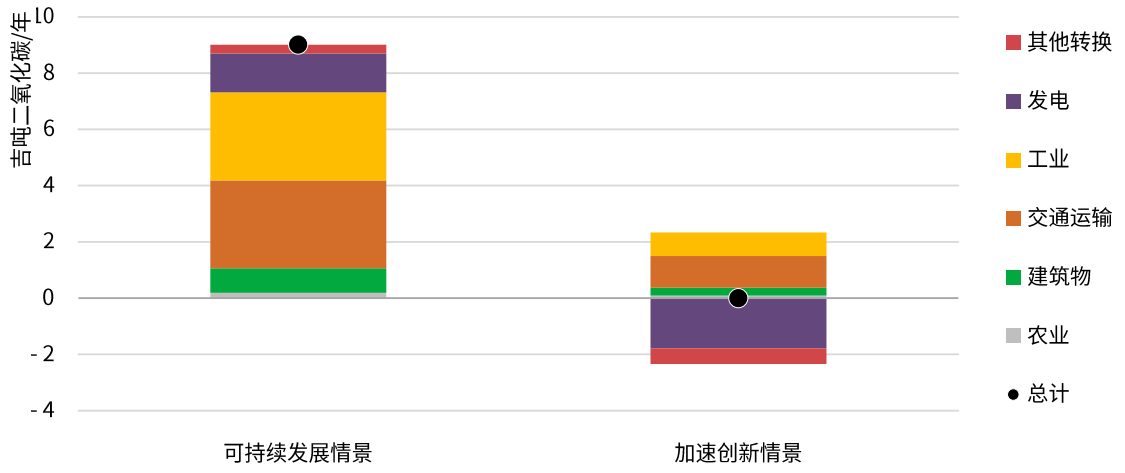
国际能源署。保留所有权利。

计划所带来的数十年一遇的投资机会相结合，则尤其如此。一些目前处于实验室或小规模原型期的技术虽被可持续发展情景排除在外，但这些技术可能进展较快，足以在我们考虑的时间框架内为净零排放转型做出贡献。对成熟度较低的技术而言，尽管无法确定其真正的潜力和潜在扩大规模的难易程度，但我们仍有理由思考：如果在上述时期内成功通过研发将其中一些技术推向市场，可能会产生怎样的影响。这正是加速创新情景尝试去分析的。

加速创新情景下节约的排放量

加速创新情景下，与 2050 年可持续发展情景相比，增强清洁能源技术创新将需要实现额外的 9 吉吨二氧化碳排放净节约，这几乎相当于当前能源行业排放量的 30%（图 4.1）。在加速创新情景的这种结果下，到 2050 年最终用途部门的排放量将显著降低；到 2050 年，其余与交通运输相关的排放量将降至 1.1 吉吨（重型卡车、航空和航运为主）。工业排放将减少到 0.8 吉吨（钢铁、水泥和化学品生产为主）；建筑排放将降至近 0.3 吉吨二氧化碳。为了便于理解，以加速创新情景下的客运为例说明：该领域通过创新技术实现的额外减排量将相当于 2050 年可持续发展情景下各模式客运活动水平下降近 60%。另一个类似的例子是：如果没有额外技术变革，则 2050 年重工业部门的材料产量平均需要下降到可持续发展情景下产量的四分之一左右，才能达到与加速创新情景下等同的减排水平。

图 4.1　2050 年按部门分类的全球能源行业二氧化碳排放量



国际能源署 2020。保留所有权利。

注：排放包括化石燃料燃烧产生的排放和工业工艺中所使用含碳原材料的排放。

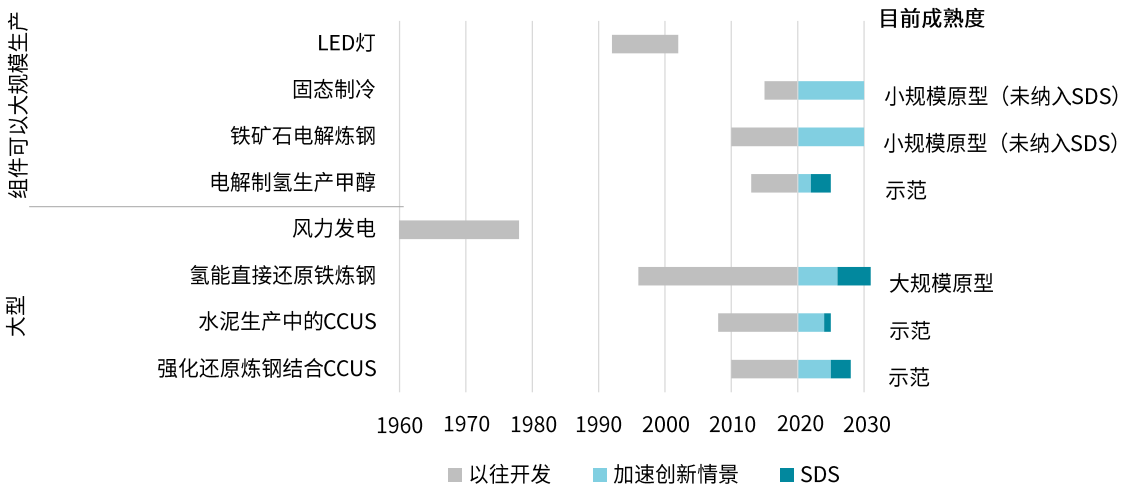
尽管加速创新情景下二氧化碳减排的创新推动力有所增加，但 2050 年仍会有需要通过负排放来抵消的二氧化碳排放。

要在短短 30 年内实现上述能源格局的全球性转变，就需要创新周期远远快于近期清洁能源技术开发成功案例的创新周期。目前处于示范期或大规模原型期的关键清洁能源技术，如氢能炼钢、电解水制氢生产的氨作为航船燃料，以及水泥生产中的碳捕捉等，假定最迟在 6 年后进入

国际能源署。保留所有权利。

市场。这样的速度大约是可持续发展情景下的两倍，后者假设按照常规创新做法，在成功完成几个示范项目后才启动部署（图 4.2）。加速创新情景下，处于实验室阶段或小规模原型期的技术从现在起平均于 10 年内实现商业化；10 年，是本报告探讨的所有技术中从首个原型到进入市场所需的最短时间：历史证据表明，以如此之快的速度推进的唯一案例是 LED，它的体积足够小，可以大规模生产，并且在原型期和示范期需要的资本支出相对较低。

图 4.2　部分技术从首个原型到进入市场的时间，包括近期清洁能源技术发展史上速度最快的一些案例



国际能源署 2020。保留所有权利。

注：SDS = 可持续发展情景；CCUS = 碳捕捉、利用和封存。技术归类为大型工艺技术还是依赖能够大规模生产的部件的工艺技术，取决于所分析的尚未商业化的技术中的设备或工艺步骤的特点。

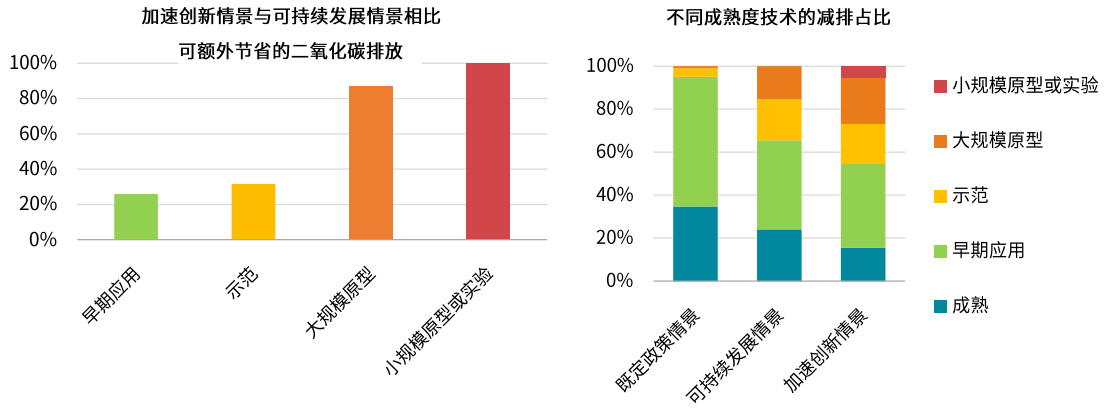
来源：不同技术的历史年份基于 Gross (2018) , European Cement Research Academy (2012); Brohi (2014); TATA Steel (2017) and Nuber, Eichberger and Rollinger (2006)。

与可持续发展情景相比，加速创新情景下，商业化之前的技术进入市场的时间将平均缩短近 40%，这是因为我们假定在完成一次商业规模示范后，就立即大力向市场部署。

加速创新情景下，与可持续发展情景相比，新技术商业化后的采用速度平均增加了约一倍，对于可大规模生产且与其他技术进步有较强协同作用的技术而言，采用速度则增加了几乎两倍。到 2050 年，加速创新情景下通过部署目前尚未进入市场的技术所实现的减排份额，将比可持续发展情景高出 75%（17 吉吨二氧化碳，相当于 2018 年中国、美国和欧盟能源相关排放总和）（图 4.3）。目前处于原型期的技术将贡献的减排量最大，部分原因是假设比可持续发展情景采取了更多行动，来刺激实验室阶段和小规模原型期的技术发展。在可持续发展情景和加速创新情景中，都考虑了目前尚未商业化的技术将发挥的重要作用；而在既定政策情景中，只考虑了现有和已宣布的政策，这些政策一般侧重于成熟的技术或目前处于早期应用期的技术，此类商业化之前的技术在 2050 年仅能在现今的基础上贡献 5%的减排量。

国际能源署。保留所有权利。

图 4.3　现有不同成熟度技术 2050 年对全球能源行业年度二氧化碳减排量的贡献



国际能源署 2020。保留所有权利。

注：右图中，既定政策情景下，2050 年的减排量是以今天的技术性能水平为基准计算的；可持续发展情景和加速创新情景下，减排量是以既定政策情景为基准计算的额外减排量。

与可持续发展情景相比，加速创新情景下，目前处于原型期或示范期的技术 2050 年贡献的年减排量将增加 75%以上。

加速创新情景中的主要脱碳战略与可持续发展情景中的战略没有根本的不同：新颖和新兴技术的目标仍是以电力或替代性清洁能源燃料（如氢能、氢衍生燃料和生物能源）取代化石燃料，或是捕捉排放出的二氧化碳以供使用和封存（CCUS）。区别在于，在加速创新情景下，假设各行业的创新速度都发生阶梯式的变化。

在可持续发展情景和加速创新情景中，**电气化**都将是关键战略；加速创新情景与可持续发展情景相比，电力在最终能源总需求中的占比将提高约四分之一，并在 2050 年达到最终能源总量的 45%左右，而目前这一比例还不到 20%。[24]到 2050 年，加速创新情景在可持续发展情景基础上增加的电力需求中，交通运输和工业将占近 95%，其中公路交通运输电气化占新增电力需求的 40%以上。在加速创新情景中占据核心地位的是：加速电池制造和智能充电基础设施领域的学习，以及开发和示范先进的电池化学技术，特别是用于重型车辆的电池化学技术。如果没有可以取代锂电技术的化学技术进步，则交通运输用电池将难以用于道路车辆和极短距离航运和航空以外的其他用途。加速创新情景下，2050 年的重量能量密度（电池单体）将是目前水平的近 3 倍，而在可持续发展情景下，这一数值将比目前增加 70%（仍然非常快）。至少有两种替代性电池化学技术具有提供上述技术进步的潜力：锂硫（Li-S）和锂空气（Li-air），它们目前分别处于小规模原型期和概念阶段。这些技术的发展将使电动车的采用速度加快：在加速创新情景中，2050 年道路上的轻型和重型车辆分别有近 80%和约 60%将是电池电动车。重型电池电动车的部署量将是可持续发展情景下的近 3.5 倍。

[24]此处报告的电力需求仅指电力的直接使用，不包括电解制氢等间接使用。

国际能源署。保留所有权利。

为了满足加速创新情景对电动车的需求，到 2050 年电池制造能力需要达到约 17 太瓦时；也就是说，从目前到 2050 年，大约每个月需要有一家相当于特斯拉 Gigafactory 规模的电池制造厂投产。加速创新情景还要求快速部署充电基础设施，特别是为电动卡车和公共汽车的高容量电池充电的快速充电站：这种充电站能够在公路和高速公路上进行传导式或感应式动态充电，目前仍处于原型期。加速创新情景下，2050 年全球电动重型车快速充电站的数量将达到 1,900 万个，是可持续发展情景下的 2 倍多。

虽然加速创新情景中设想的电池迅速发展将明显改变公路交通运输，特别是长途重载道路作业，但对航运和航空的影响将比较有限。航运和航空需要高能量密度燃料，所以电池驱动的动力系统只能作为极短距离作业的替代方案：质量复合效应使得电池总重量限制了续航里程。即使到 2050 年，电池驱动的动力系统也将仅占货运航运和客运航空的 3%左右。

2050 年加速创新情景比可持续发展情景增加的额外电力需求中，有一半来自工业。与可持续发展情景相比，加速创新情景下大规模电加热将更为深入地渗透到工业领域。要想在加速创新情景下实现前述的大规模部署水平，就需要在不涉及导电材料的工业工艺流程中迅速推进大规模高温电加热示范[25]。此类加热技术（如电磁）目前大多处于概念验证阶段；然而在加速创新情景中，这些技术最迟将在 10 年后进入市场。

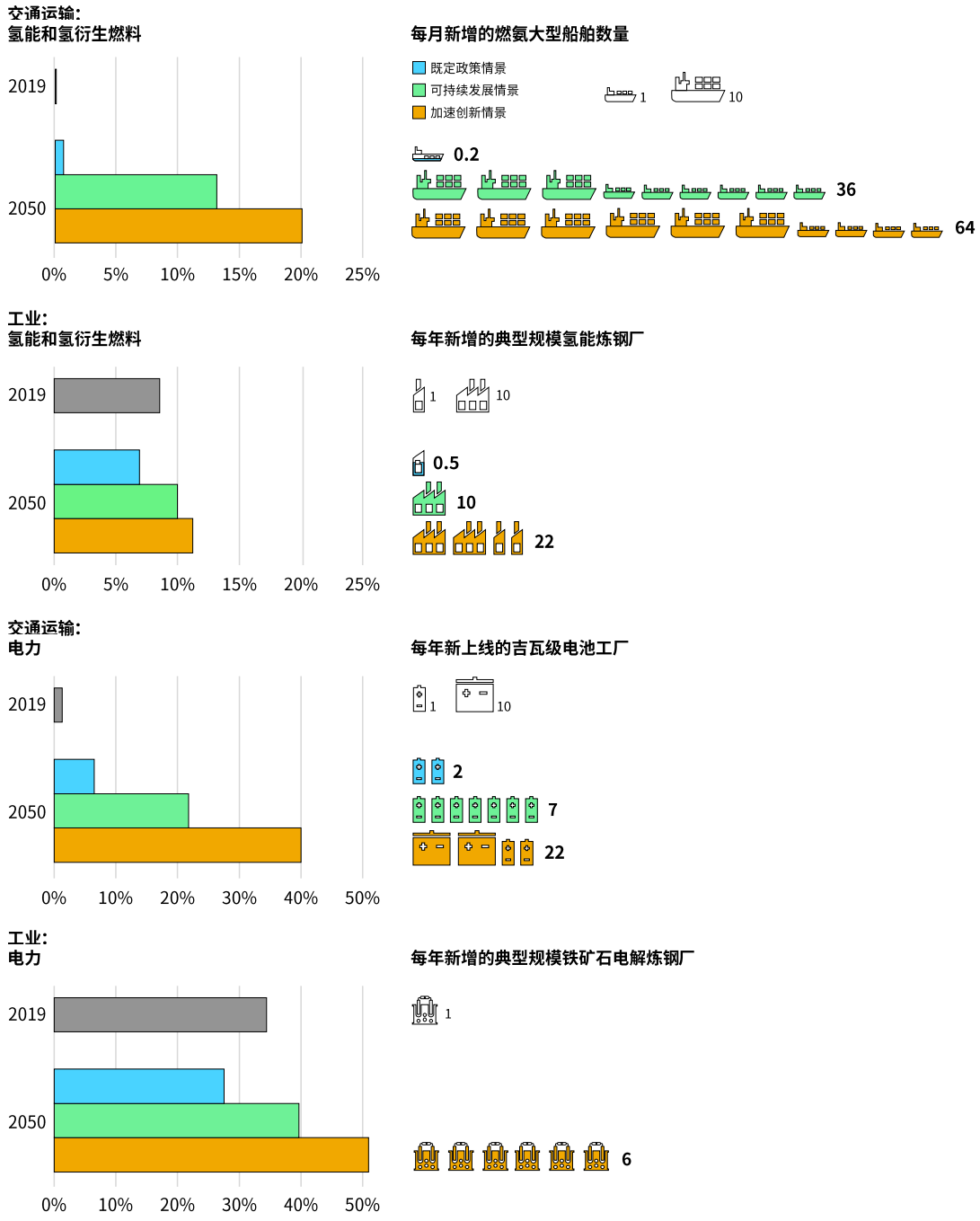
加速创新情景下，如果能够通过铁矿石电解，使初级制钢等高耗能工业工艺流程直接电气化并实现商业化，则将会为电气化开辟新的途径；不过，这种技术目前还处于小规模原型期，因此不在可持续发展情景的考虑范围内。上述情景基于以下假设前提：铁矿石电解在创纪录的时间内（略低于 10 年）从小规模原型发展到进入市场，此后的平均部署量直到 2050 年都保持在每两个月新增 1 兆吨安装能力（相当于常规综合炼钢厂产能的一半）。加速创新情景下，建筑部门从现在到 2050 年平均每月将安装约 30 吉瓦的供热和制冷一体化热泵系统（包括储存系统），这一数字在可持续发展情景下仅略高于 15 吉瓦。

2050 年，加速创新情景相比可持续发展情景，对**氢能和氢衍生合成燃料**（包括氨）的需求将高出近 25%，其中大部分增加的需求来自工业和交通运输部门。例如，在工业领域，上述增加意味着在加速创新情景中，从目前直到 2050 年平均每月将新安装近两座完全基于氢还原的 1 兆吨炼钢厂，这一采用速度是可持续发展情景中的 2 倍多。要达到如此快的采用速度，就必须从根本上改变现有炼钢产能存量；否则，全球目前存在的初级制钢资产中，约有 40%到 2050 年将仍在运营。在交通运输领域，加速创新情景中，从现在直到 2050 年平均每月将有 60 多艘以氨为燃料的大型船舶交付使用，这样的部署速度几乎是可持续发展情景中的 2 倍；以上部署的大背景是：市场对新造大型船舶的月需求量预计只有 80 多艘。

[25] 高温加热是指在 450°C或更高的温度下供热，一些希望实现的特定应用中，要求温度超过 1,000°C。

国际能源署。保留所有权利。

图 4.4 按最终用途划分的全球最终能源需求领域中氢能和电力占比（左），以及氢能技术普及率的部分衡量标准（右）



国际能源署 2020。保留所有权利。

注：最终能源需求包括高炉和焦炉的能源使用。氢能包括对氢能的直接需求、交通运输和建筑对氢衍生燃料的需求，以及工业工艺流程制氢现场的最终能源需求。炼钢厂的典型规模按年产 1 兆吨粗钢产能计算。大型船舶的典型最大载重量按 50 千吨载重吨位计算。普及率显示的是从现在到 2050 年的平均值。吉瓦级电池工厂产能按 35 吉瓦时/年计算。

与可持续发展情景相比，在加速创新情景下，2050 年电力、氢能和其他可再生能源的最终能源需求增加最多：这是以减少化石燃料为代价的。

国际能源署。保留所有权利。

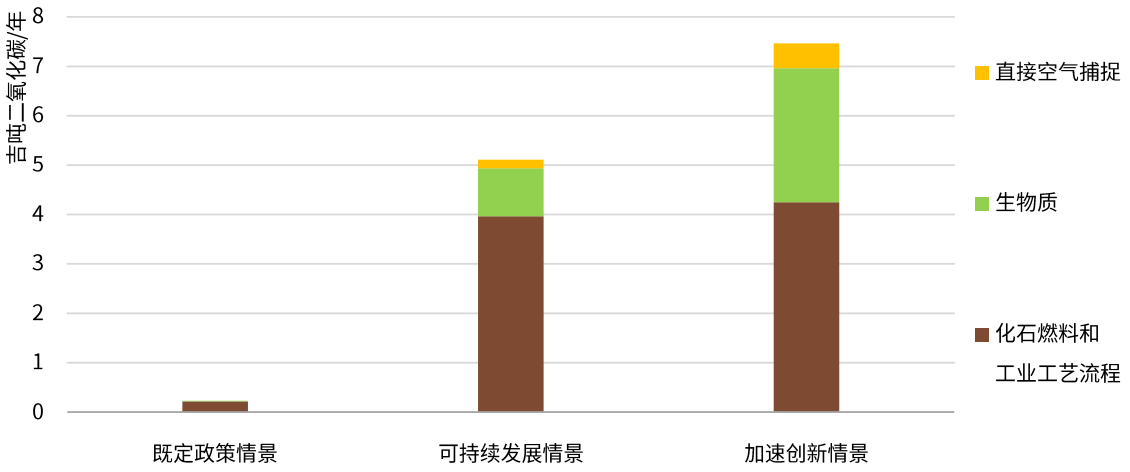
加速创新情景下，相比可持续发展情景，2050 年**生物能源**在最终能源总需求中的份额将增加约 25%，主要是由工业和交通运输相关应用驱动的。对需求方来说，上述增加并不会构成技术上的挑战，因为在大多数应用中生物燃料都是“普适性”燃料；但是在供应方面，上述增加会给生物质供应链带来额外压力。要想释放更多的生物质资源，开辟新的转换路线，确保可持续供应，就必须快速推动生物燃料转换技术和农业实践方面的创新。目前在大多数转换路线中都还处于小规模原型期的基于藻类的生物燃料，到 2050 年将大规模部署，但在可持续发展情景下并没有部署。加速创新情景还要求先进生物燃料生产技术得到迅速大规模示范，如通过气化和费托合成制造生物柴油和生物航空燃油，这些技术的总产能从现在到 2050 年的平均增速将比可持续发展情景快 40%。

加速创新情景下，2050 年**捕捉的二氧化碳排放**总量比可持续发展情景下高出近 50%（每年约为 7.5 吉吨二氧化碳，届时封存的二氧化碳量将是目前的近 200 倍）（图 4.5）。二氧化碳捕捉方面，大部分贡献将来自于直接空气捕捉和生物能源碳捕捉和封存等负排放技术。相对于可持续发展情景而言，这两种技术在抵消长途交通运输和重工业的其余排放量方面将发挥更加重要的作用：2050 年通过这两种技术捕捉的排放量将几乎是可持续发展情景下的 3 倍。在加速创新情景中，从现在到 2050 年，平均每年需要有近 16 座捕捉能力为 1 兆吨的直接空气捕捉设施投产，而在可持续发展情景中，每年需要约 5 座。目前设计的直接空气捕捉工厂的最大捕捉能力为 1 兆吨；迄今为止，此类装置仅以试点规模在运营，规模只相当于 1 兆吨的 0.4%。在生物能源碳捕捉和封存方面，每年需要有近 90 座 1 兆吨捕捉能力的工厂，几乎是可持续发展情景下预测能力的 3 倍。[26]CCUS 领域的加速创新还能使重工业直接减排：例如，从现在到 2050 年，加速创新情景下，水泥行业每月将有 5 座以上产能 1 兆吨的碳捕捉设施，而在可持续发展情景下，这一数字约为 4 座。

[26] 1 兆吨的捕捉能力相当于目前正在运营的最大的二氧化碳捕捉生物燃料厂，该厂于 2017 年在美国投产，生产生物乙醇。

国际能源署。保留所有权利。

图 4.5　2050 年按来源划分的全球捕捉的二氧化碳排放量



国际能源署 2020。保留所有权利。

注：捕捉的排放包括燃料燃烧产生的排放和工业工艺中所使用含碳原材料的排放。

与可持续发展情景相比，加速创新情景下 2050 年的二氧化碳捕捉总量将增加 50%，驱动这一变化的主要是负排放技术的部署几乎增加了 2 倍。

关注目前处于实验室阶段或小规模原型期的技术中的关键机遇

从加速创新情景中可以明显看出，一些技术对在 2050 年前实现净零排放可能会发挥至关重要的作用。对于政策决策者来说，如果希望通过刺激计划支持目前处于实验室阶段或小规模原型期的技术，并希望找到影响力最大的技术，那么有两类技术可能尤其相关。第一类技术具有模块化、规模小的特点，可以大规模生产，而且有可能较大程度上得益于其他净零排放技术的溢出效应、并可以为其他技术贡献较大的溢出效应；第二类技术有较大潜力可以解锁供应约束（如影响生物能源的供应约束，以及稀有或需求不断增大的材料的供应约束），并且能够使供应曲线向低成本资源移动。在加速创新情景中，以下几种技术尤其重要：先进的电池化学和电池回收技术；增加生物质资源的创新做法；以及铁矿石电解炼钢和先进冷却技术。

先进的电池化学和回收工艺

在广泛的一系列应用中增加电池的使用，将对促进二氧化碳减排起到关键作用。交通运输脱碳在很大程度上依赖电动交通：可持续发展情景下，到 2070 年，电动交通应用中的电池安装容量将是今天的 500 倍。电网规模的应用中，2070 年电池的总容量将是现在的 260 倍，发挥促进可变可再生能源整合、促进终端使用电气化等一系列作用。上述部署水平的前提是通过充满雄心的创新努力来维持成本和性能轨迹：可持续发展情景下，与当前水平相比，2070 年平均电池成本将下降 68%，电池单体的重量能量密度将是当前水平的 160%。

国际能源署。保留所有权利。

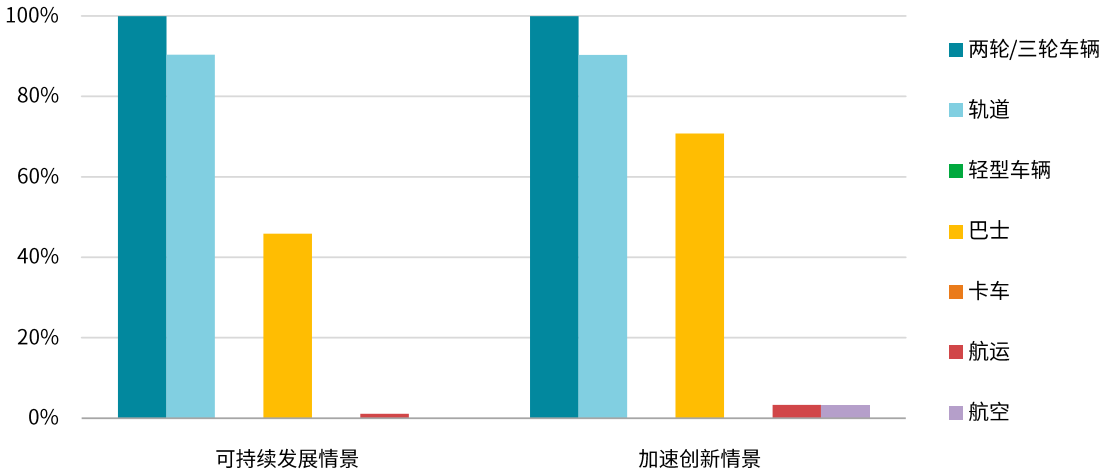
即使有这些改进，在可持续发展情景中，电池在交通运输中的使用仍然主要限于道路车辆和短途航运和航空线路（后者对航空燃料总需求的影响甚微）。可持续发展情景下，商业客运航空所需的电动飞机尺寸和航程到 2070 年将仍不适合大规模实际使用，主要原因是起飞时需要的功率密度高。以如今的电池技术，空客 380 飞机需要的电池总重量是目前用油量的 30 倍，如此大的电池重量使飞机不可能升空。劳斯莱斯、优步和一些初创企业已经开发出了十座飞机和空中电动出租车的早期概念，包括电动垂直起降飞机。然而，航程为 750-1,100 公里的全电动商业客运飞机需要电池单体的密度达到 800 瓦时/千克，即锂离子电池目前性能的 3 倍以上（Schafer et al., 2019）。

通过加速创新，可以缩小电池理论性能与当前性能的差距，甚至可以使电池能够用于航空和航运领域。加速创新还可以增加电动动力系统的竞争力，使其在公路货运领域的竞争力更强。理论上，至少有两种替代电池化学技术可以通过技术进步达到必要的密度：锂硫和锂空气，这两种技术现分别处于小规模原型期和概念阶段（Thackeray, Wolverton and Isaacs, 2012）。而且，技术进步的步伐很快：例如，最近有一种锂硫化学技术的阴极设计，与锂电技术相比，不仅保留了能量密度优势，还大幅延长了电池循环寿命（Lee et al., 2020）。超高密度电池可能最终会使电动飞机成为可能。超高密度电池还可能使电池电动卡车成为最有吸引力的零排放动力系统，即使在区域和长途作业中也是如此，从而加速并扩大重型公路货运电气化。最后，性能更好的电池可以在船上储存大量能量，足以支持中距离航程，无需频繁充电：如果航程得以如此扩展，那么纯电动船将可以用于更多的航线。

到 2050 年，如果实现加速创新情景下假设的 800 瓦时/千克（电池单体）性能目标（比可持续发展情景下高 60%），那么该年电力在重型公路货运中的比例将从可持续发展情景中的 15%提高到近 70%，电池电动卡车将成为车队主力（图 4.6）。航空方面，商业电动飞机将从 2040 年代初开始渗透市场，到 2050 年取代该行业约 3%的燃料用量。航运方面，较高的能量密度将使长达 1,000 公里的旅程成为可能。各类交通运输方式中电气化水平提高，又将缓解替代性高能量密度清洁燃料所受到的约束，2050 年将在可持续发展情景的基础上额外节省超过 1 吉吨二氧化碳排放总量：这相当于 2019 年所有交通运输方式年度排放量的 15%。

国际能源署。保留所有权利。

图 4.6　加速创新情景与可持续发展情景下，2050 年按交通运输方式分类的全球电气化车辆份额比较



国际能源署 2020。保留所有权利。

加速创新情景下，与可持续发展情景相比，先进电池化学技术将使 2050 年电池电动重型卡车的份额增加近 4 倍，并将为短途航运和航空作业的电气化开辟道路。

可持续发展情景下，大规模部署锂基电池带来的需求拉动，将会对上游产生重要影响。2011 年，只有不到 1%的锂供应用于交通运输或电网储存相关应用，而到 2019 年，这一比例已增加到约 20%。2070 年，可持续发展情景下的锂产量大约是目前的 30 倍，总供应量的 90%用于电池。加速创新情景下，2040 年将达到同样的水平。目前，锂的需求量相对于其他金属较小，每年总计约 75 千吨，比铜的需求量低两个数量级。

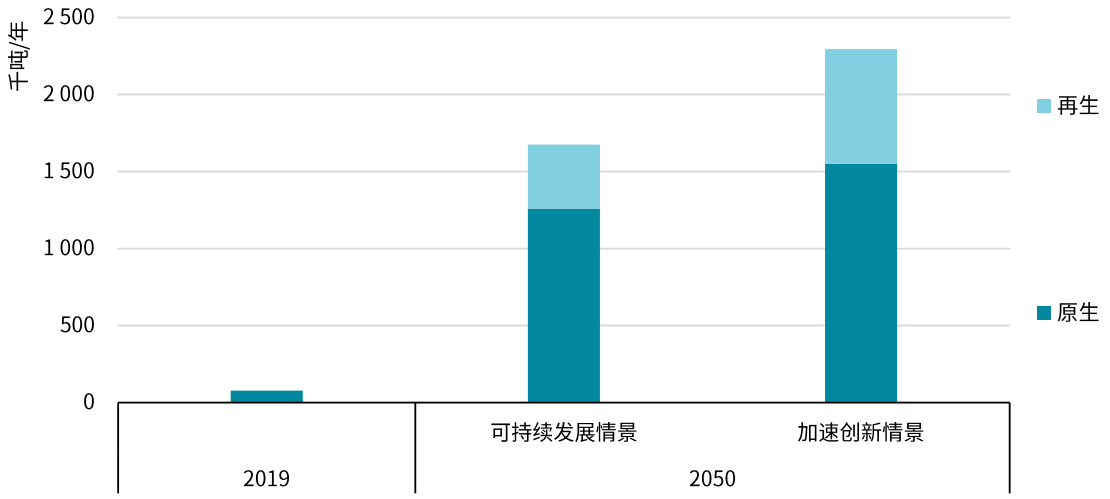
从勘探、开采到加工，锂供应链的各个环节都必须快速扩张和发展，才能确保这种重要商品的可靠供应。由于目前大多数原型期的电池化学技术都使用锂，所以预计锂需求在 2030 年后将继续增长。在这种情况下，回收利用等措施可以避免锂供应链上的潜在瓶颈，是非常重要的。如今的电池回收技术主要集中在钴、镍等高价值金属上：锂回收量极少，一个重要原因是需求有限。不过这在可持续发展情景下将发生变化：到 2070 年，基于目前已有或已处于示范期的回收技术，锂的回收量将达到近 780 千吨，可满足当年锂需求总量的 35%。目前处于早期开发阶段的一些技术可能会提高锂的回收效率，从而降低锂供应链的能耗。

电池回收价值链上有一些技术成熟度较低的技术，可以在当前性能的基础上推动阶梯式改变。例如，人机协作分拣和拆解电池可以大幅降低成本，而超声波辅助分离则提供了加速电池分层组件分离的新方法，与常规搅拌方法相结合可以大大提高效率。生物沥滤技术利用微生物来帮助回收金属：这种技术已经在采矿业中使用，但在电池回收领域还处于早期开发阶段。现已有研究表明，该技术回收金属的效率高于其他方法。创新回收技术的竞争力强弱，关键在于能否处理不同电池化学成分：当这些技术商业化时，它们所处理的电池很可能是基于目前化学成分的电池，但届时正在进入市场的电池化学成分将迅速发展，新成分走向回收市场只是时间问题。

国际能源署。保留所有权利。

加速创新情景假设创新电池回收技术将在未来十年内商业化，将对原生锂的需求降低到原先预计的水平以下，并通过降低成本加速交通运输行业的电气化。再利用电池的主要市场是轻型车辆、城市交通运输和公用事业规模电力储存，因为这些用途受再利用电池低性能和低容量的影响较小，而再利用电池始终都必然落后于现有最佳技术。2050 年，加速创新情景下的再生锂产量将比可持续发展情景下高出近 80%，这将降低锂生产的二氧化碳足迹（图 4.7）。然而，加速创新情景下电气化速度加快，导致对锂的需求增加，抵消了上述排放下降：无论原生锂还是再生锂，加速创新情景下的需求都比可持续发展情景下更大。

图 4.7　不同来源路线和情景中的全球锂生产



国际能源署 2020。保留所有权利。

得益于先进电池回收利用技术，2050 年加速创新情景下的再生锂产量占比将比可持续发展情景下高出近 80%。

扩大可持续生物质供应的创新工艺

可持续发展情景下，全世界一次生物能源需求将从 2019 年的 1,470 百万吨油当量（62 艾焦/年）增加到 2070 年的 2,870 百万吨油当量（120 艾焦/年）。因此，生物能源在一次能源总需求量中的份额将达到近五分之一，增幅在 80%以上，成为第二大能源来源。可持续发展情景下，生物能源在向净零排放转型的过程中将发挥重要作用：它用于难以电气化的领域，并为交通运输用生物燃料生产提供原料。在航运和航空领域，生物燃料的合计占比将从目前微不足道的水平增长到 2070 年的约 30%。需要以可持续的方式扩大生物质资源的消费规模，才能实现真正的生命周期减排和更广泛的环境与社会效益。

不同的科学研究估计了可持续的能源用途生物质的可用量，结果大不相同，但似乎有一种广泛的共识，即可持续生产的生物质不难达到 2,400 百万吨油当量（100 艾焦/年），而长期潜力可

国际能源署。保留所有权利。

高达 5,000 百万吨油当量（200 艾焦/年）。加速创新情景下，2050 年可持续供应的一次生物能源为 3,220 百万吨油当量（135 艾焦/年），比可持续发展情景下 2070 年的量高出 12%。加速创新情景中，生物能源消费的上述可持续扩大和加速是通过一系列创新技术和做法实现的：

- 种植高产作物，在不增加耕地面积的情况下生产更多能源。例如“能源甘蔗”；该品种能产生更多蔗渣，但糖分含量不变。在巴西进行的一些试验表明，“能源甘蔗”蔗渣产量多达标准甘蔗品种的 3 倍（IEA, 2017）。额外的蔗渣可以作为热电联产燃料或用于生产纤维素乙醇。
- 开发藻类、水生生物质等新生物质资源，用于生产液体生物燃料、沼气或高价值化学品。此类技术目前还处于早期原型期发展阶段，生产和收获成本较高，但近期有一些颇有希望的机会，也许能够在生物加工厂中联合生产燃料和化学品（IEA, 2017）。
- 扩大“双作物种植”应用范围，最大限度发挥农田潜力。在土壤和气候条件适宜的前提下，同一块土地上，可以在主要粮食作物收割之后再种植并收获能源作物，一方面提供额外的生物质资源，另一方面使农民的收入多样化。例如，埃塞俄比亚芥（*Brassica carinata*）是一种油料作物，可以用作生物燃料生产的原料；可以在冬季种植这种作物，作为其他季节常规粮食作物的补充（Todo el Campo, 2018）。
- 开发规模大得多的先进废弃物管理系统，使收集和分拣量得到阶梯式增加，同时迅速发展供应链，并实施先进的“变废为能”系统。随着热化学生物质技术的商业化，产生的废弃物可以作为生产交通运输用生物燃料的原料。

加速创新情景下，与可持续发展情景相比，提高可持续生物质资源的可用量将使生物能源发挥更大的作用，特别是在 2040 年以后：到 2050 年，加速创新情景下生物能源在最终能源需求中的份额将比可持续发展情景下高出 25%。在工业领域，加速创新情景中将有更多生物能源用于不需要大幅设备改造的中高温加热应用。水泥窑就是很好的例子。增加水泥窑燃料组合中的生物能源份额并配备 CCUS，将使得 2050 年水泥生产实现的负排放达到可持续发展情景下的 4 倍以上：这有助于推动整个能源系统实现净零排放。

在交通运输行业，重型卡车、航运和航空业都将受益于生物质资源可用量增加。航运和航空领域中，电气化存在技术挑战，因此以生物质替代能源密集型化石液体燃料尤为关键。加速创新情景下，2050 年航运和航空领域的生物燃料消费总量将相比可持续发展情景增加约 18%。

国际能源署。保留所有权利。

专栏 4.2　　先进的飞机设计

自 20 世纪初商业客运航空诞生以来，飞机管状形状这一基本设计几乎没有发生过变化。从根本上改进飞机的空气动力学设计，可能将会带来可观的能效节约，从而减少航空领域对高能量密度替代燃料的需求。然而，在某些情况下，起飞要求可能仍是限制因素。

空中客车（MAVERIC）和波音（波音 X-48）已经研究测试了翼身融合设计的客机小规模原型机，与目前的单通道机身相比，其燃油效率提升的潜在幅度高达 20%。尽管这种设计已在军用飞机中实现了商业化，但在客机中尚处于小规模原型期。这主要是由于乘客难以接受无窗飞机，以及在剧院式座位布局中加入紧急出口比较复杂。由于翼身融合飞机设计的翼展与高度比例很高，因此只适用于大型飞机，这意味着开发成本无法分摊到同类不同尺寸的机型系列中。

与全电动飞机相比，混合动力飞机的开发所需的电池功率和能量密度改进较少，因此受约束较小，而混动飞机的燃料消耗可以比目前性能最好的飞机减少多达 50%。美国国家航空和航天局正在开发的 STARC-ABL 是一款单通道涡轮电动飞机，采用边界层推进器的设计概念。同时，莱特电气（Wright Electric）也已经开发了一款 186 座的短途电动飞机，并计划于 2030 年将其推向市场。

加速创新情景下，我们假设这种新型设计将在 2050 年之前进入客运机队。因此，与可持续发展情景相比，2050 年航空业最终能源需求总量将减少 8%，同年液体航空燃油最终需求总量将减少 50 百万吨油当量以上，大约相当于 2019 年消费量的 15%。

初级制钢的直接电气化

在利用非化石能源制造初级钢方面，目前还没有经济且可推广的技术。最先进的方案以低碳氢作为还原剂，预计将在 2021 年进入中试阶段，并于 2025 年开始商业规模示范（Hybrit, 2020）。一种前途较好的低碳技术是初级制钢的直接电气化（也称为铁矿石电解），具有技术可行性，但迄今为止，此技术下的两种最先进工艺流程只进行了小规模测试。其中一种工艺流程是低温碱性电解，最近已前进到 100 千克级别的中试阶段（ArcelorMittal, 2020）。另一种

国际能源署。保留所有权利。

是 2013 年在实验室验证的高温熔融氧化物电解：2014 年原型电解池已投入使用，2024 年前计划进行全规模电解池测试。

在铁矿石电解中，电解池可以堆叠起来提供所需产能，从而可以在将来递进式扩大产能：因此，对特定的工厂而言，最初投资阶段的资本风险相对较小。铁矿石电解在这方面与氯碱电解水相似，而高温熔融氧化铁电解在布局上与氧化铝电解制铝有许多共同的特点。因此，设计、操作和材料方面的知识溢出可能会从铝电解、氯电解和水电解流向铁矿石电解，这些知识可能包括：在电网以可变可再生能源电力为主的情况，如何按需调整工厂运行，使其顺应为平衡电网而实施的激励措施。

与可持续发展情景下其他初级制钢低碳工艺流程相比，加速创新情景下铁矿石电解之所以能够加速部署，是因为有四个因素共同作用：规模扩大的风险相对较低；其他电解技术的溢出效应；标准化和重复性的制造；以及与电网需求的兼容性。加速创新情景下，2050 年全球约 10%的初级液态钢将由铁矿石电解生产，相对于可持续发展情景，炼钢的电力需求将增加 60%。

先进的无制冷剂制冷

可持续发展情景下，到 2050 年，预计全球使用的空调机数量将达到现在的近 3 倍，超过 55 亿台。上述急剧增长的需求很大程度上是由人口和经济增长驱动的，特别是天气炎热地区的新兴经济体：据估计，全球生活在炎热地区的人口将从现在的 28 亿增加到 2050 年的 40 多亿。加速创新可以通过结合以下做法来遏制需求上涨对气候的影响：早期阶段效率的额外递增、替代性的制冷技术、一体化的冷库，以及制冷剂使用的改变。先进制冷技术需求快速增长将产生溢出效应，可能会进而促进供热服务的技术开发，挖掘出更多的减排潜力。加速创新情景下，这些措施与建筑性能提高相结合，将使 2050 年二氧化碳排放相比可持续发展情景减少 260 兆吨。

空调的标准技术是蒸汽压缩循环，其中目前在用的许多制冷剂是作用很强的温室气体。氢氟碳化物是最常见的制冷剂化合物。超过 195 个国家在《蒙特利尔议定书》的《基加利修正》中，承诺 30 年内将氢氟碳化物制冷剂的使用量减少 80%以上。加速创新情景下，目前处于原型期的无制冷剂冷却技术将在十年后逐步得到应用。其中包括先进蒸发冷却、先进干燥剂和固态冷却技术。

- 膜蒸发冷却和干燥剂通过解耦潜热负荷（蒸气化）和显热负荷（无相变温度变化），使湿度和温度双重控制成为可能。此类技术不仅避免了蒸汽压缩循环中的耗能组成部分，而且还不需要使用制冷剂。测试显示，膜系统在先进蒸发冷却系统中性能系数良好，从 5 到 15.5 不等。
- 固态冷却技术是制冷、空调和热泵技术的一种新方法。此类技术依靠热效应来提供冷却：目前，压卡（在压力变化下产热）和电卡（在电场中产热）材料似乎最适合热应用。这些技术目前还处于原型期，但试验条件下的研究表明，家用应用中压卡制冷的

国际能源署。保留所有权利。

性能尤其优越，根据环境、材料和流速条件的不同，相对于蒸汽压缩制冷机的改善幅度在 5%到 150%之间。

加速创新情景假设，这些技术的成功规模化示范将使其应用在 2030 年代不断增加，最初应用始于利基市场：膜辅助蒸发冷却和干燥剂将首先用于需要在冷却的同时控制湿度的市场中，而固态技术则将提供一系列建筑能源服务，包括热水、热舒适和家用制冷。加速创新情景下将得到初步部署的还包括：使用全球升温潜能值较低或为零的制冷剂的先进蒸汽压缩技术，以及更紧凑的热交换器、制冷剂流量控制和电化学压缩机等下一代组件。

考虑到市场规模，加速创新情景中替代制冷技术的更快速创新可以产生溢出效应，惠及配备下一代组件、使用全球升温潜能值较低的制冷剂的蒸汽压缩技术：溢出效应可以提高效率，并且加快可逆式供暖和制冷系统的普及，从而在预测期内更早取代燃气供暖。加速创新情景下，先进空间制冷技术将在 2050 年占到全球制冷能力的 30%以上，使存量建筑的平均能效等级从 2019 年的 4 级左右提高到 2050 年的 9 级，增加不止一倍。

综上所述，加速创新情景中，无制冷剂冷却技术以及先进冷却技术较早得到采用，将在其他领域产生连锁效应，加快建筑领域脱碳进程。如果能将上述技术与其他建筑能效提升措施相结合，那么从 2030 年到 2050 年，与可持续发展情景相比，建筑领域将实现额外节能 3000 百万吨油当量，其中三分之二的节约将集中在住宅。上述额外节约量超过了目前建筑领域的终端能源消费总量。创新的供暖和制冷系统对建筑物年度减排总量的贡献将高达 60%。

新冠疫情对关键清洁能源技术的潜在负面影响——减少创新情景

清洁能源创新有可能发挥重要作用，重塑未来能源行业。然而，不应低估清洁能源创新面临的威胁，即研发支出减少，以及可能丧失对长期气候目标的政策关注，特别是考虑到所需的技术发展速度。

在本节中，我们探讨了新冠疫情导致的创新步伐放缓，可能对直接电气化、CCUS 和氢能及氢衍生燃料产生怎样的影响；可持续发展情景下，与既定政策情景相比，上述技术在 2070 年前的累计减排量中贡献的份额约为 40%。这些技术领域中，每一个都有赖于其价值链各个环节上不同成熟度的多种技术的持续和快速发展。这意味着，上述技术能否在最大程度上促进脱碳，取决于其整个价值链上的各项技术能否进入市场，然后扩大规模。

在可持续发展情景的基础上，本节基于两项关键假设评估了技术创新可能出现的延迟会有怎样的影响：

- 对于正在进行或已宣布的示范项目，我们假设其完成时间将推迟 5 年。

国际能源署。保留所有权利。

- 对于早期应用期的技术，我们假设其部署速度到 2025 年将放缓 50%，到 2030 年放缓 30%，到 2040 年放缓 15%。

直接电气化

近年来，在支持性政策环境的助推下，电动最终用途技术的发展势头普遍增强。过去 5 年间，购买供暖系统热泵的家庭数量平均每年增长超过 5%；2019 年，这一增速在许多国家有明显上升（去年欧洲的热泵购买量增加了 14%[EHPA, 2020]，美国增加了 6%）。得益于专项激励，热泵购买量在中国、欧盟和美国等大部分寒带和温带地区都保持了增长。然而增长的起始基数很低，2019 年全球热泵技术供暖只占总供暖需求的不到 5%。此外，热泵销售主要由新建筑安装推动，而旧建筑改造则较为滞后。如果要充分发挥热泵技术的潜力，就需要改变改造滞后的现状：在大多数发达经济体中，建筑物的寿命一般为 80 至 200 年，现有建筑物中多达四分之三到 2040 年将仍在使用。

创新式设计将有助于充分发挥热泵技术的潜力。这种设计需要紧凑，能够利用现有管道，并且能够在性能较差的建筑中安全地输送热量、集成储能单元（如热电池，通常直接连接到同一场地的太阳能光伏板），或者在非高峰期替代用电。一些设备供应商主动迎接上述挑战，示范了根据当地特定条件定制的新颖设计，可以将效率提高至多达现有水平的 2 倍（例如，被动式房屋中带预热的超高效地源热泵或空气源热泵）；另一些设备供应商则正在示范下一代组件，例如电化学压缩机（US DoE, 2019）和电卡循环（Fraunhofer ISE, 2019）。

过去十年中，直到 2019 年全球电动车销量年增长率都保持在 60%以上，而 2019 年随着中国监管环境变化以及主要市场乘用车销量萎缩，增长放缓至 6%。近年来，全球制造锂离子电池单体的能力迅速扩大：如今全球制造商每年可生产的电动道路车辆用电池总容量约为 320 吉瓦时，远高于 2019 年销售的 210 万台电动车所需的约 100 吉瓦时电池总量。一些初创企业已经可以提供对加速创新情景至关重要、利用先进化学技术的商用电池单体。例如，商用锂硫电池现在可用于低循环寿命的应用，如无人驾驶飞行器（Service, 2018）。同时，电气化长途交通运输也在不断发展：全电动无人驾驶集装箱货船设计已于 2020 年 2 月开始示范（Skredderberget, 2018）。与此同时，在过去几年中，各种初创企业和成熟的航空航天和汽车企业已示范了能够搭载 1 至 4 名乘客的无人驾驶电动客机（Marr, 2018; Hawkins, 2019; Hyundai, 2020）。未来几十年内，虽然这种飞机应用必然还不会成为主流，但它们可以助推电池技术和车辆自动化方面的创新加速。

为了测试重工业完全电气化的工艺流程，目前已在开展相关试点试验和可行性研究。其中包括初级制钢直接电气化的两种最先进工艺流程：现在已有 100 千克的低温碱性电解中试（ArcelorMittal, 2020），以及高温熔融氧化物电解的原型电解池，后者计划于 2024 年前进行全规模电解池测试。此外，6 家大型石化企业于 2019 年组建了联盟，共同研究如何利用可再生电力取代化石燃料，来为石脑油或天然气蒸汽裂解器供能，用于高价值化学品生产：该联盟已

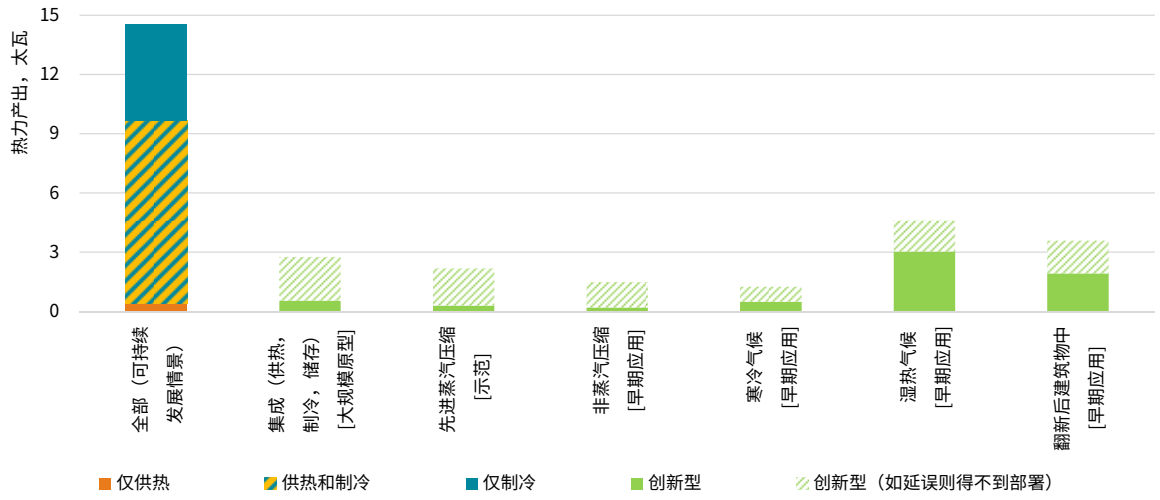
国际能源署。保留所有权利。

就专项研发预算承诺达成共识（Borealis, 2019）。此外，近两年挪威和瑞典都开展了可行性研究，探索水泥窑加热流程的电气化范围（Cementa, 2019; Gautestad, 2018）。

目前还不确定新冠疫情会对电力技术的普及率和开发计划产生怎样的影响。鉴于小规模原型期或更早阶段技术的开发计划风险较高，我们重点分析进展延迟对这些处于早期应用期的技术会有什么影响，特别是热泵和电动道路车辆。

减少创新情景与可持续发展情景相比，由于已经商业化的**热泵**设计采用率较低，以及创新设计的示范期推迟 5 年，到 2040 年建筑物中化石燃料锅炉的二氧化碳直接排放量累计将增加约 3 吉吨（大致相当于 2019 年建筑相关的直接排放量总和）。2030 年，创新热泵的安装产热能力在减少创新情景下将比可持续发展情景下低 60%（图 4.8）。以下产品受测试和示范期延迟的影响最大：集成了储存解决方案或下一代组件（即先进蒸汽压缩循环）的产品，以及非蒸汽压缩系统（例如蒸发冷却）产品；2030 年减少创新情景与可持续发展情景的产热能力差异中，约 60%与这些产品相关。此外，热泵技术采用率较低还会减少从经验中学习的机会，使上述技术的平均成本降幅无法在 2030 年达到 10%。较高的技术成本进而又会使热泵更难与现有的化石供暖方案竞争，在家庭购买力有限的情况下尤其如此。

图 4.8　可持续发展情景下，2030 年按细分市场划分的热泵技术部署情况，以及在延迟创新的假设情景下未部署的部分



国际能源署 2020。保留所有权利。

注：翻新后建筑中热泵的安装量仅包括用作供热装置的热泵。

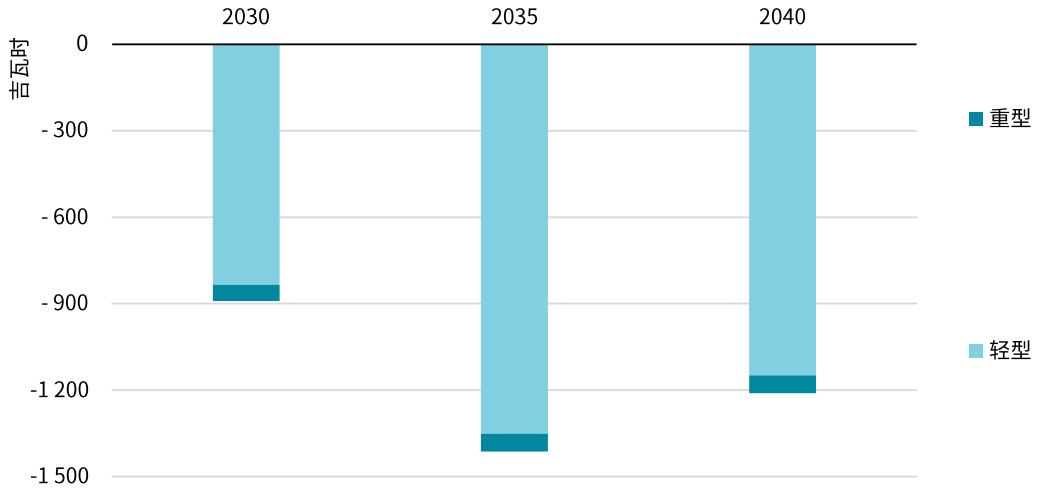
减少创新情景下，延迟对创新热泵的研发投资、原型测试和示范，将导致 2030 年全球相关安装产热能力比可持续发展情景下少 60%。

减少创新情景下，**电动道路车辆**采用速率放缓；这会进一步导致到 2040 年二氧化碳累计排放相比比可持续发展情景，增加约 2.5 吉吨。上述放缓将导致到 2040 年电池累计产量比可持续发

国际能源署。保留所有权利。

展情景下少 20%（图 4.9）。2040 年每年减少的电池制造能力将相当于 34 座吉瓦级工厂。[27] 电池制造能力和作业量的这种减少意味着通过实践学习和其他创新驱动力都相应放缓，而这又将致使到 2025 年电池平均成本相比可持续发展情景增加 8%。大部分电池需求减少是由轻型电池电动车采用速度放缓造成的；在可持续发展情景下，轻型电池电动车将驱动 2040 年之前的绝大部分电池需求。减少创新情景下，电动车普及速度放缓会产生连锁反应，影响重型交通运输的电气化：在电动动力系统刚开始大规模进入重型车辆市场的这一关键节点，前述放缓将延迟电池性能和成本的改善。

图 4.9　减少创新情景与可持续发展情景相比，不同细分市场中车辆电池年需求减少量



国际能源署 2020。保留所有权利。

减少创新情景下，2040 年汽车电池需求相比可持续发展情景有所减少，减幅相当于 2019 年交通运输电池需求的 10 倍。

CCUS

近些年，二氧化碳价值链的发展势头相当迅猛。2020 年加拿大有两个阿尔伯塔碳干线项目投入运营，捕捉化肥生产和石油加工产生的二氧化碳，合计捕捉能力为 1.5-2 兆吨/年。2019 年 Gorgon 二氧化碳注入项目投入使用，捕捉天然气加工产生的二氧化碳。2017 年全球首个与生物质源排放相关的大型 CCUS 项目在美国投产，2016 年全球首个配有 CCUS 的大型钢铁设施在阿布扎比上线。扩大 DAC 部署的计划包括美国正在开发的一处设施，年捕捉二氧化碳量为 1 兆吨，计划于 2020 年代中期投入使用。2019 年，至少有两座试点工厂也开始运营，以测试不同的二氧化碳捕捉技术与氢能、生物能源等其他脱碳策略结合应用于发电的效果。例如，2019 年底日本在一座吹氧集成气化联合循环发电厂（160 兆瓦）开始进行二氧化碳捕捉试验：该项

[27] 吉瓦级电池工厂产能按 35 吉瓦时/年计算。

国际能源署。保留所有权利。

目还计划在联合循环发电厂和固体氧化物燃料电池系统的集成气化燃料电池中示范氢能的使用（Osaki CoolGen, 2019）。

投资环境的改善促进了针对工业基地和低碳制氢的更多 CCUS 项目得到开发。在挪威，计划于 2024 年之前开发一套完全集成的工业碳捕捉和封存（CCS）系统：目前正在对从水泥设施和“变废为能”回收厂中捕捉二氧化碳进行可行性研究；而一个由油气企业组建的联盟正在北海开发海上二氧化碳封存（Northern Lights, 2020a）。此外，欧洲正在开发的二氧化碳全价值链项目还包括计划于 2021 年投产的荷兰 Porthos 项目（Rotterdam CCUS, 2020）；计划于 2020 年代中期上线的英国零碳亨伯（ZCH）和净零蒂赛德（NZT）项目（Net Zero Teeside, 2020a）；以及计划于 2028 年上线的爱尔兰 Ervia Cork 项目（Ervia, 2020）。这些欧洲项目将在未来十年内共同带来每年多达 10 兆吨的新增二氧化碳捕捉和封存能力。在美国，在 45Q 税收抵免扩大[28]以及加州《低碳燃料标准》等配套政策的推动下，至少有 20 处大型设施正在开发。这些设施涵盖了不同成熟阶段的一系列应用，包括天然气加工、生物燃料和水泥生产、DAC，以及天然气和燃煤发电。

新冠疫情大流行带来的经济后果可能会影响计划中的投资。减少创新情景下，如果 CCUS 技术商业化前的示范项目延迟，并且早期应用阶段的部署放缓，那么 2030 年、2040 年的二氧化碳捕捉量将相比可持续发展情景分别减少 50%和 35%（图 4.10）。因此，二氧化碳捕捉与封存的部署到 2040 年将累计减少约 8 吉吨，相当于 2019 年交通运输领域的直接排放总量。减少创新情景下，未来 20 年二氧化碳捕捉受影响最大的领域将是水泥生产和发电，与可持续发展情景相比的 CCUS 部署减少量中，几乎 80%都来自这两个领域。完全集成二氧化碳枢纽项目下，目前已有计划示范水泥生产中的二氧化碳捕捉；在可持续发展情景中，2020 年代中期开始将会扩大部署。两座配备 CCUS 的发电厂已经投产；可持续发展情景下这方面也将扩大部署。低碳水泥生产对此类技术示范的依赖度尤其高，这是因为该领域能够产生类似减排量的其他技术方案（例如某些替代性胶凝材料）的开发程度目前还远远落后。

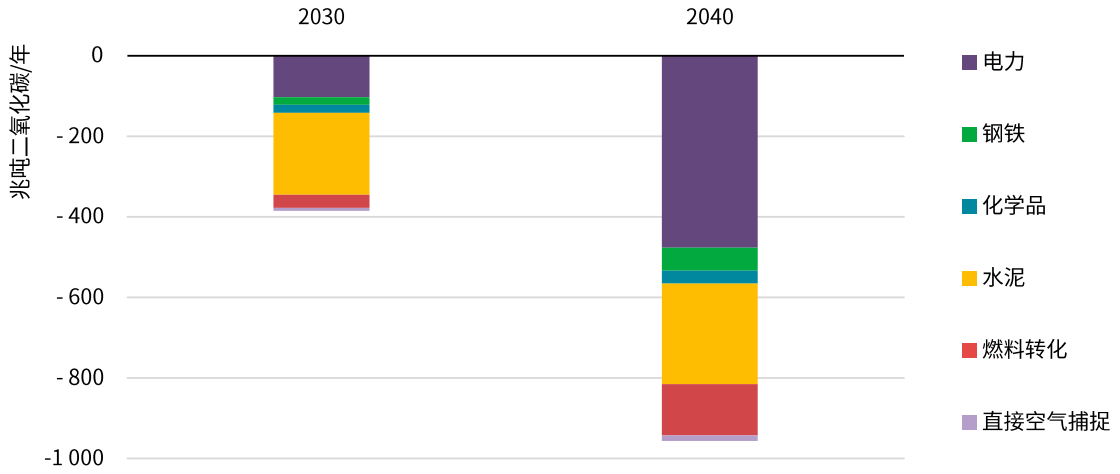
各种捕捉技术中，减少创新情景下 CCUS 部署水平降低将主要影响化学吸收技术。这种技术目前已经积累了相当多的操作经验，然而，由于减少创新情景下通过实践学习将会减少，到 2030 年通过化学吸收技术捕捉二氧化碳的成本将比可持续发展情景下高出 5%左右。对物理吸收和富氧燃烧等成熟度更低的示范期或原型期二氧化碳分离工艺而言，其成本受到的影响会更大。

可持续发展情景下，未来 20 年大规模 DAC 的预估部署量较小，这意味着减少创新情景与可持续发展情景相比，大规模 DAC 示范的延迟不会显著减少 CCUS 在预测期内的预估总体能力扩张程度。然而，由于上述延迟严重限制了未来十年通过实践学习带来的成本下降空间，因此将导致 2030 年大规模 DAC 工厂的成本增加约 35%。

[28] 45Q 是 2018 年扩大的一项税收抵免，对二氧化碳永久地质封存提供最高 50 美元/吨的抵免，或对强化采油提供最高 35 美元/吨的抵免（US Government, 2018）。

国际能源署。保留所有权利。

图 4.10　与可持续发展情景相比，减少创新情景下不同领域二氧化碳排放捕捉和封存量的减少



国际能源署 2020。保留所有权利。

减少创新情景与可持续发展情景相比到 2040 年的 CCUS 部署减少量中，近 80%都来自水泥生产和发电领域的二氧化碳捕捉减少。

CCUS 示范项目需要密集的资本，不过可以创造大量就业，特别是在建设阶段。减少创新情景下，此类就业机会将会面临风险。例如，挪威的全链工业 CCS 系统示范项目在投资阶段可创造近 4,000 个工作岗位（Northern Lights, 2020b）。据报告，其他完全集成的工业 CCUS 系统（配备多个捕捉设施）在建设期可能会创造数千个工作岗位：例如，英国的净零蒂赛德（NZT）项目在建设阶段预计将创造 5,500 个直接就业岗位（Net Zero Teeside, 2020b）。从现有 CCUS 设施的情况来看，一座独立的 CCUS 工厂（例如服务于单一捕捉源）很可能在平均三年的建设阶段创造 400 至 1,200 个工作岗位，并在数十年的预期运营期间创造 20 至 60 个工作岗位（Northern Lights PCI, 2020; Government of Alberta, 2019; Lake Charles Methanol, 2020）。

氢能

氢能技术的发展势头在 2019 年有所增强。2019 年水电解制氢能力达到了 25 兆瓦以上，创下历史纪录。日本福岛氢能研究场目前的装机容量为 10 兆瓦，是 2010 年代初以来所有项目平均规模的 20 倍（Asahi Kasei Corporation, 2020）。已经宣布的大型电解制氢能力高达数百兆瓦，预计在 2020 年代初投产：这些氢将用于燃料转化、化工生产和天然气管网混输氢气。2019 年燃料电池电动车（FCEV）存量相对于 2018 年几乎翻了一番，主要是受亚洲市场对巴士和轻型卡车等需求激增推动的结果。全球范围内，氢能加注基础设施与燃料电池电动车使用量同步扩张：2019 年增长率超过 20%。最近，法国和意大利分别进行了[29]天然气输配管网混输氢

[29]按体积计算的混合比例。

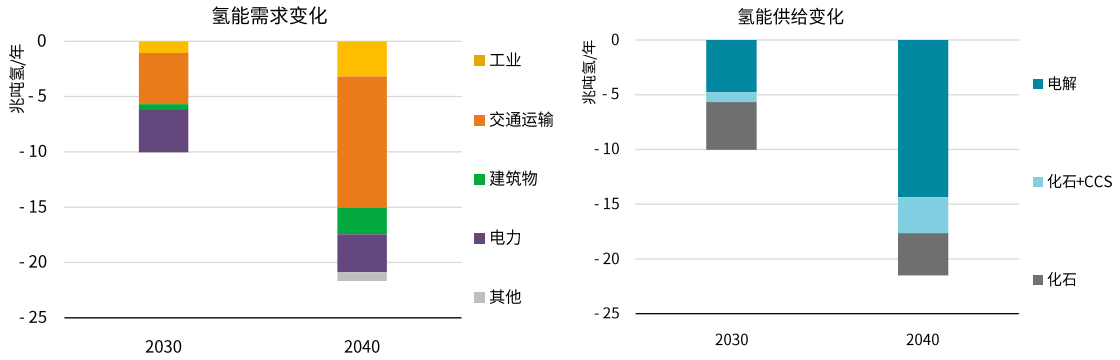
国际能源署。保留所有权利。

气的示范和试点试验，混入的氢气比例分别高达20%和 10%；在瑞典，一座试点工厂即将开始运行，以验证完全基于电解制氢的大型铁矿石还原炼钢。

新冠疫情爆发后，发展势头是否会持续还有待观察。减少创新情景下，如果氢能技术商业化前的示范项目延迟，并且早期应用阶段的部署放缓，那么 2030 年、2040 年的年度氢能需求量将相比可持续发展情景分别减少 9%和 12%（图 4.11）。与可持续发展情景相比，到 2040 年，上述减少将导致二氧化碳排放累计增加超过 1.5 吉吨，即几乎是目前制氢相关年排放量的 2 倍。交通运输领域氢能需求的降幅最大：2040 年氢能需求量将相比可持续发展情景减少近 12 兆吨，约占该年氢能需求减少总量的一半。上述减少主要反映出重型燃料电池电动车和氨动力航运方面相应采用的延迟。2040 年氢能需求降幅的三分之二将转化为电解生产的减少，电解生产的部署速度将低于可持续发展情景下预测的速度，这是因为氢能需求增长的不确定性较高，推高了投资风险。

如果全球电解制氢到 2030 年的累计产能下降近 8 兆吨/年，那么由于技术学习速度放缓，该年水电解装置的平均资本支出将相比可持续发展情景增加近 10%。上述增加只会不明显地略微抬高电解制氢的平准化成本（最高达 3.1 美元/千克）[30]，但将给本已是资本高度密集型的项目的前期投融资带来额外压力，并对就业产生潜在影响：如果取消 2020 年和 2021 年旨在扩大电解制氢工厂产能的项目储备，将危及 3,300 至 4,400 个直接和间接工作岗位。[31]

图 4.11　　与可持续发展情景相比，减少创新情景下不同领域全球氢能需求和供给量的减少



国际能源署 2020。保留所有权利。

注：CCS = 碳捕捉和封存。

2040 年减少创新情景与可持续发展情景相比的氢能需求减少总量中，交通运输将占一半左右；电解制氢量将急剧下滑。

[30] 平准化氢成本的计算基于 69%（转化效率）、每兆瓦时 50 美元（电价）、5,000 个满负荷小时和 8%加权平均资本投入成本。

[31] 基于 100 万美元投资创造 6 至 8 个工作岗位计算，包括工程、制造、建设和运营（IEA, 2020）。

国际能源署。保留所有权利。

参考文献

21SPV (2020), 21SPV website, www.21spv.com (accessed in June 2020).

ABB (2020), “ABB brings fuel cell technology a step closer to powering large ships”, press release, ABB, Zurich, https://new.abb.com/news/detail/60096/abb-brings-fuel-cell-technology-a-step-closer-to-powering-large-ships.

AHRI (Air-Conditioning, Heating, & Refrigeration Institute) (2020), Monthly statistical reports, AHRI, http://ahrinet.org/statistics (accessed in June 2020).

ArcelorMittal (2020), “Siderwin, targeting radically new steel production without CO_2 emissions”, ArcelorMittal, https://automotive.arcelormittal.com/news_and_stories/news/2019Siderwin.

Asahi Kasei Corporation (2020), “Asahi Kasei starts green hydrogen production at the world’s largest single-stack alkaline-water electrolysis system in Fukushima”, Asahi Kasei Europe, https://www.asahi-kasei.eu/en/News/Asahi%20Kasei%20Starts%20Green%20Hydrogen%20Production%20at%20the%20World%E2%80%99s%20Largest%20Single-Stack%20Alkaline-Water%20Electrolysis%20System%20in%20Fukushima_n272.

Beijing Municipality (2020), Beijing Municipality website, http://www.beijing.gov.cn/zhengce/zhengcefagui/202006/t20200610_1921162.html (accessed in June 2020).

Borealis (2019), “Petrochemical companies form Cracker of the Future Consortium and sign R&D agreement”, Brightlands, https://www.borealisgroup.com/news/petrochemical-giants-form-consortium-cracker-of-the-future-and-sign-agreement.

Cementa (2019), “Cementa and Vattenfall take the next step towards a climate neutral cement”, press release, Cementa Heidelberg Cement Group, https://www.cementa.se/sites/default/files/assets/document/d3/3a/20190130-cementa_and_vattenfall_take_the_next_step_towards_a_climate_neutral_cement.pdf.

Climeworks (2020), “Climeworks raises CHF 73M (USD 75M) – the largest ever private investment into direct air”, Climeworks, Zurich, https://www.climeworks.com/news/climeworks-raises-chf-73m-usd-75m.

国际能源署。保留所有权利。

Cooling Post (2020), “Daikin predicts 8.6% sales drop this year”, Cooling Post, https://www.coolingpost.com/world-news/daikin-predicts-8-6-sales-drop-this-year.

Daikin (2020a), “Daikin strengthens production and R&D capacity of heating systems in Germany”, press release, Daikin, https://www.daikin.eu/en_us/press-releases/daikin-strengthens-production-and-r-d-capacity-of-heating-system.html.

Daikin (2020b), “Briefing to analysts and investors on FY 2019 financial results ended March 31, 2020, Q&A session”, Daikin, https://www.daikin.com/investor/data/kessan/20200513/shitugioutou.pdf.

Daimler (2020), “Volvo Group and Daimler Truck AG are planning to form a joint venture”, Daimler, https://www.daimler.com/company/news/planning-joint-venture-volvo.html.

Department of Industry, Science, Energy and Resources, Australia (2020), “Government announces $300m Advancing Hydrogen Fund”, Australian Government, https://www.energy.gov.au/news-media/news/government-announces-300m-advancing-hydrogen-fund.

EC (European Commission) (2020), “Europe’s moment: Repair and prepare for the next generation”, press release, EC, Brussels, https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_20_940.

EHPA (European Heat Pump Association) (2020), “Market data, the European heat pump market has achieved double-digit growth for the fourth year in a row”, EHPA, https://www.ehpa.org/market-data.

Ervia (2020), Ervia website, https://www.ervia.ie (accessed in June 2020).

European Cement Research Academy (2012), “ECRA CCS project: Report on phase III”, TR-ECRA-119/2012, European Cement Research Academy, Dusseldorf, Germany, https://ecra-online.org/fileadmin/redaktion/files/pdf/ECRA_Technical_Report_CCS_Phase_III.pdf.

Financial Times (2020), “Danish groups join forces to deliver green hydrogen project”, Financial Times, https://www.ft.com/content/6d2c8d8a-a767-4e41-b0f9-3237dd711597.

Fraunhofer IAF (2019), “Fraunhofer starts development of refrigerant-free, energy-efficient electrocaloric heat pumps”, press release, Fraunhofer IAF, https://www.iaf.fraunhofer.de/en/media-library/press-releases/elkawe.html.

国际能源署。保留所有权利。

Gautestad, T. (2018), “Norcem starts innovation project on electrification of cement production”, translated online from Norwegian, Norcem, https://www.norcem.no/no/ELSE-elektrifisering-sementproduksjon .

Gazzetta Ufficiale (2020), Decreto-legge 19 maggio 2020, n.34 web page in Italian, https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2020/05/19/20G00052/sg.

Government of Alberta (2019), “Cement facility paves the way for new tech”, press release, Government of Alberta, https://www.alberta.ca/release.cfm?xID=66196FC0E4109-052E-F842-D509C18E65C0575E.

Green Car Congress (2020), “Mitsubishi Fuso to begin series production of fuel-cell trucks by late 2020s; concept eCanter F-CELL”, Green Car Congress (news report), https://www.greencarcongress.com/2020/04/20200402-mftbc.html.

Gross, R. (2018), “How long does innovation and commercialisation in the energy sectors take?Historical case studies of the timescale from invention to widespread commercialisation in energy supply and end use technology”, *Energy Policy*, Vol. 123, pp. 682-699, https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.08.061.

Hawkins, A. (2019), “Porsche teams up with Boeing to build flying cars for rich people”, The Verge, https://www.theverge.com/2019/10/11/20909771/porsche-boeing-partnership-flying-cars-rich-people.

Hybrit (2020), Hybrit website, http://www.hybritdevelopment.com (accessed in June 2020).

Hydrogen Europe (2020), *Post Covid-19 and the Hydrogen Sector: A Hydrogen Europe Analysis*, Hydrogen Europe, Brussels, https://hydrogeneurope.eu/sites/default/files/Hydrogen%20Europe%20Analysis_Post%20COVID-19%20and%20the%20Hydrogen%20Sector_final.pdf.

Hyundai (2020), “Hyundai and Uber announce aerial ridesharing partnership, release new full-scale air taxi model at CES”, press release, Hyundai, https://www.hyundai.com/worldwide/en/company/news/news-room/news/-0000016369.

IEA (International Energy Agency) (2020), *World Energy Outlook Special Report on Sustainable Recovery*, IEA, Paris, https://www.iea.org/reports/sustainable-recovery.

国际能源署。保留所有权利。

IEA (2019), *World Energy Outlook*, IEA, Paris, https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019.

IEA (2017), *Technology Roadmap: Delivering Sustainable Bioenergy*, IEA, Paris, https://webstore.iea.org/technology-roadmap-delivering-sustainable-bioenergy.

Lake Charles Methanol (2020), "1,500 new manufacturing and construction jobs", web page, https://www.lakecharlesmethanol.com/jobs.

Lee, B.J. et al.(2020), "Revisiting the role of conductivity and polarity of host materials for long‐life lithium-sulfur battery", *Advanced Energy Materials*, Vol. 10/22, https://doi.org/10.1002/aenm.201903934.

Liquid Wind (2020), "How is the coronavirus impacting Liquid Wind and your potential customers?", webinar on 14 May 2020, https://www.linkedin.com/posts/liquid-wind_covid19-coronavirus-greenrecovery-activity-6673855658393182209-LMeb.

Marr, B. (2018), "6 amazing passenger drone projects everyone should know about", Forbes, https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2018/03/26/6-amazing-passenger-drone-projects-everyone-should-know-about/#5e7e0ad14ceb.

Net Zero Teesside (2020a), Net Zero Teesside website, https://www.netzeroteesside.com (accessed June 2020).

Northern Lights (2020a), "About the project", web page, https://northernlightsccs.com/en/about.

Northern Lights (2020b), "Facts and reports", web page, https://northernlightsccs.com/en/facts-and-reports.

Northern Lights PCI (Northern Lights Project of Common Interest) (2020), "CCS and the EU COVID-19 recovery plan: The positive economic impact of a European CCS ecosystem", memorandum, https://www.eydecluster.com/media/23954/northern-lights-pci-memorandum-value-of-a-european-ccs-ecosystem-in-green-recovery.pdf.

Nuber, D., H. Eichberger and B. Rollinger (2006), "Circored fine ore direct reduction", Millenium Steel 2006, pp. 37-40, https://www.millennium-steel.com/wp-content/uploads/articles/pdf/2006/pp37-40%20MS06.pdf.

国际能源署。保留所有权利。

OSAKI CoolGen Corporation (2019), "Starting demonstration tests for oxygen-blown integrated coal gasification combined cycle technology with CO_2 capture", press release, OSAKI CoolGen Corporation, www.osaki-coolgen.jp/en/news/pdf/20200204.pdf.

Rotterdam CCUS (2020), Rotterdam CCUS website, https://www.rotterdamccus.nl/en (accessed in June 2020).

Schafer, A.W. et al.(2019), "Technological, economic and environmental prospects of all-electric aircraft", *Nature Energy*, Vol. 4, pp. 160-166, https://doi.org/10.1038/s41560-018-0294-x.

Service, R.F. (2018), "New generation of batteries could better power aerial drones, underwater robots", *Science Magazine*, https://www.sciencemag.org/news/2019/05/new-generation-lithium-ion-batteries-could-hold-more-charge-without-catching-fire.

Skredderberget, A. (2018), "The first ever zero emission, autonomous ship", Yara, www.yara.com/knowledge-grows/game-changer-for-the-environment.

TATA Steel (2017), "The HIsarna ironmaking process", presentation, https://iea.blob.core.windows.net/assets/imports/events/245/ISTRM_Session3_HISARNA_201117.pdf (accessed on 7 May 2020).

Thackeray, M.M., C. Wolverton and E.D. Isaacs (2012), "Electrical energy storage for transportation: Approaching the limits of, and going beyond, lithium-ion batteries", *Energy & Environmental Science*, Issue 7, pp. 7854-7863, https://doi.org/10.1039/C2EE21892E.

Todo el Campo (2018), "UPM, INIA y la Facultad de Agronomía exploran la Brassica carinata como una nueva alternativa de cultivo de invierno", in Spanish, www.todoelcampo.com.uy/upm-inia-y-la-facultad-de-agronomia-exploran-la-brassica-carinata-como-una-nueva-alternativa-de-cultivo-de-invierno-15?nid=35049.

US DoE (US Department of Energy) (2020), "Department of Energy to provide $22 million for research on capturing carbon dioxide from air", press release, US DoE, https://www.energy.gov/articles/department-energy-provide-22-million-research-capturing-carbon-dioxide-air.

国际能源署。保留所有权利。

US DoE (2019), “Xergy – hydrogen metal hydride based heat pump”, presentation, https://www.energy.gov/sites/prod/files/2019/05/f62/bto-peer-2019-xergy-hydrogen-metal-hydride-based-heat-pump.pdf.

US Government (2018), Bipartisan Budget Act of 2018, 115th Congress, 2d Session, H.R. 1892, https://www.congress.gov/115/bills/hr1892/BILLS-115hr1892eas2.pdf.

国际能源署。保留所有权利。

第 5 章 数十年一遇：重塑未来的机会

要点

- 本报告明确指出：要为世界提供实现能源和气候目标（包括净零排放）的最佳机会，就必须加快清洁能源创新。如果不持续、大力关注清洁能源创新，我们成功的机会就会日渐萎缩。政府、产业和清洁能源投资者面临巨大的机遇。可持续发展情景下，从现在到 2040 年，对目前仅处于原型期或示范期的技术的年均投资总额约为 3,500 亿美元，到 2060 年代将达到近 3 万亿美元。
- 我们确立了缩短创新周期、实现净零排放的五大原则。这些原则侧重于与清洁能源技术特别相关的某些领域，这些领域往往未得到能源政策决策者关注，或有待加强。五大原则以本报告的分析结果为基础：

1. **设定优先事项、跟踪并调整。**在选择支持哪些技术组合的过程中，需要既严格又灵活的程序，还要考虑到当地的需求和优势。
2. **推进公共研发和市场引导的民间创新。**不同技术需要不同的下一步支持：包括增加公共研发资金、提供市场激励等一系列支持方式。
3. **顾全价值链中各个环节。**在各种应用中，一项技术与市场的距离取决于其价值链中最薄弱的环节，价值链各环节不均衡进展会阻碍创新。
4. **建设使能基础设施。**政府可以调动民间资金，通过分担网络强化和示范项目的风险来填补创新中存在的空白。
5. **做出全球努力实现区域成功。**技术挑战是紧迫的、全球性的，因此有充分的理由通过现有多边论坛等方式进行合作。

- 新冠疫情意味着，寻求推动经济活动的政府应立即关注上述某些关键原则。尤其重要的是，要维持原计划的研发经费水平，并考虑在战略领域增加研发经费投入。不应当让当前的清洁能源示范期项目走向失败。以市场为基础的政策和资金可以帮助扩大电解装置和电池等模块化技术的价值链，显著推动技术进步。在更广泛的刺激计划中，可以同时推进创新激励措施和基础设施投资等其他相关措施。
- 此外，经济复苏措施还提供了创新的机会，从而可以创造长期更有利于清洁能源的未来环境。可以更新并改进创新政策，包括设定技术优先级的程序以及继续跟踪和评价系统，以与长期目标保持一致。在常被忽视的重工业和长途交通运输领域，对关键示范项目进行投资，可以尽早并赶在 2030 年前后的预定投资周期内及时提供低碳选择方案，避免“锁定”大量排放。在电气化，碳捕捉、利用和封存，氢能和生物能源领域，对研发和使能基础设施进行协调投资，也可以大大促进清洁能源转型。

国际能源署。保留所有权利。

导言

我们正处于能源史上前所未有的时刻。在开发与净零排放目标相适的清洁能源技术组合的进程中，世界现在可能正处于转折点。对创新的重要性及其在能源系统转型中的作用的认识，达到了空前的普及程度。国家和企业都制定了宏伟的 2050 年减排目标，引起了对上述认识的大量关注。钢铁、水泥、燃料生产、航空、航运、天然气供应等主要工业部门，还没有商业化的深度脱碳解决方案，但都在参与相关项目和政策制定。巴西、中国和印度等新兴经济体正在加强建设符合各自国情的本土技术创新体系。

这些积极的趋势是否能转化为更快的创新步伐、更紧密地配合清洁能源向净零排放转型，取决于政府政策；而新冠疫情大流行的发生，使得政府的作用比以往任何时候都更加重要。新冠疫情开始时，研发投资的规模并不足以应对挑战的规模，特别是在目前商业可用、可扩展的低碳选择有限的部门。现在，有机会通过经济复苏计划下的措施等方式来解决上述问题。维持并提高前景好的新技术进入能源系统的速度，不仅对实现能源政策目标至关重要，而且还有潜力推动未来经济增长：本报告指出了一系列广泛的投资，这些投资长期有助于实现向净零排放转型，短期则刺激经济复苏。

然而，也存在风险：新冠疫情造成的经济损失可能导致研发预算和投资减少。这将严重损害清洁能源创新，使净零排放前景趋于黯淡。创新历程长达数十年，虽然可持续发展情景下部署的许多技术类型已经走向成熟，但一些关键技术仍有很长的路要走。特别是在工业脱碳方面，如果相互竞争的不同方案延迟示范，将加大实现气候目标的难度，仅低碳氢技术的示范项目延迟就可能导致从现在到 2040 年增加 1.5 吉吨二氧化碳（见第 4 章）。新技术的价值链是脆弱的，全球清洁能源创新体系可能需要数年时间才能从削减开支造成的后果中恢复。

本章是报告的最后一章，将汇总本报告中的分析结论，提出政策行动建议。本章首先提出了缩短创新周期、实现净零排放的五大原则。在净零排放宏伟目标的大背景下，这些原则侧重于与清洁能源技术特别相关的某些领域，这些领域往往未得到能源政策决策者关注，或有待加强。此外，在同样紧迫的新冠疫情大流行相关政策背景下，本章随后的各节强调了一揽子政策中能够促进实现近期和长期目标的具体要素。这部分章节探讨了在 2025 年及以后维持清洁能源创新的即期行动，以及创新相关经济复苏措施重塑清洁能源未来的新机遇。然后，这些章节考察了上述行动和机遇与实现净零排放的关键技术族群之间的相关性，并结合实例说明了需要采取什么行动。

加快清洁能源技术创新实现净零排放的五大原则

本报告提出，要将创新政策和能源政策结合起来考虑，并应将清洁能源技术创新视为能源政策决策的核心内容。过去，人们倾向于将研发和创新政策与能源政策分开看待。有时能源战略与

国际能源署。保留所有权利。

技术创新方案经验教训之间没有正式形成反馈回路。在一些国家，创新政策和能源政策分属不同部委管辖，而在另一些国家，同一部委内的相关处室之间联系不充分。无论采取何种组织安排，都需要将这两类政策结合起来考虑，需要相关工作人员密切协作。

在本报告前几章分析结果的基础上，本节提出了政策行动建议。例如，基于历史案例中观察到的创新进展加速（如太阳能光伏和半导体），以及我们识别出的对实现净零排放至关重要的技术类型，本报告建议各国政府更密切关注技术集群在不同行业之间的协同作用；基于对进展不均衡领域（如合成燃料）的分析，我们建议将价值链作为一个整体来看待，并识别出特定技术设计的价值链中最薄弱的环节。

这些建议是针对国家政府和超国家组织提出的，但其中不少建议也适用于城市和其他地方当局以及企业的行动。当然，不同的政府会根据各自的情况选择不同的研发组合和政策工具。从全球角度来看，只要在全局层面上能够覆盖所有关键的创新空白，那么不同的国家、地区和企业采用不同的研发组合则是有益的：这种做法在面临不确定的情况下，鼓励竞争和多样性。

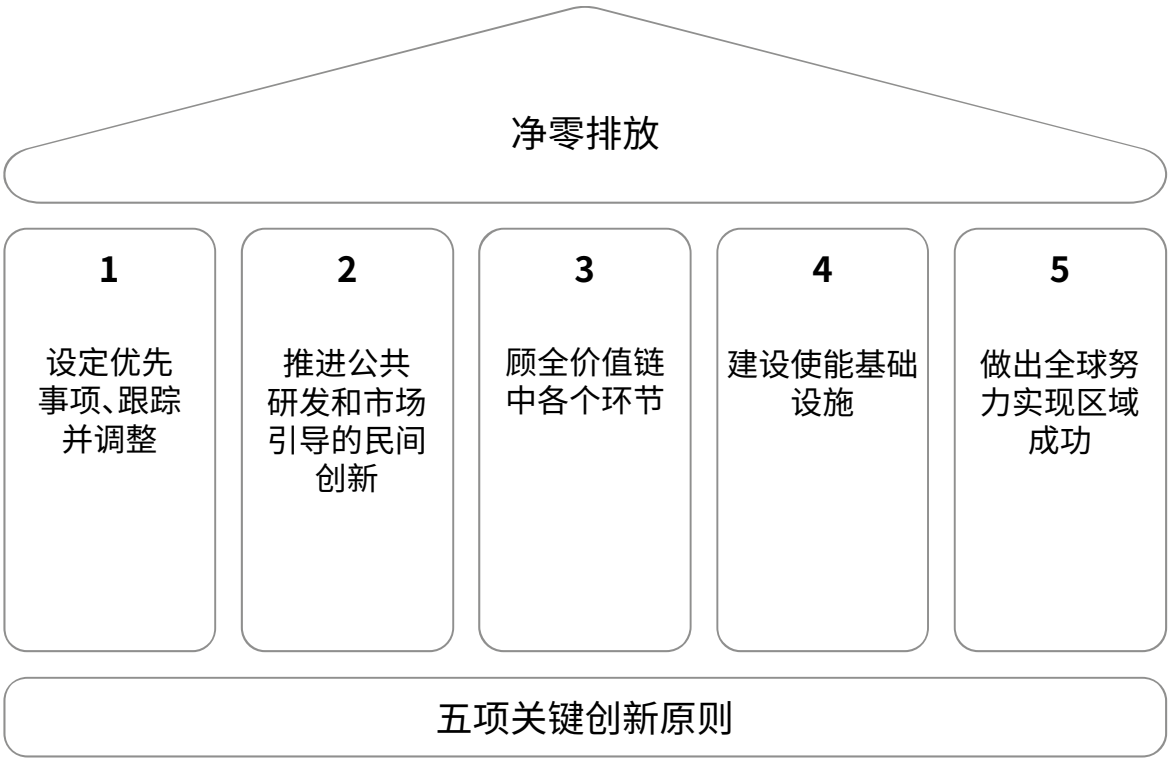
这些建议并不试图提供放之四海而皆准的单一技术组合。概括而言，建议并不针对具体的技术，而是侧重于能够指导做出技术选择、并能适应意外突破的良好做法。正如本报告第 3 章和第 4 章的分析结果突出体现的，可持续发展情景下，大部分长期减排是以四大跨行业技术领域为支撑的，因此，这些技术领域是加快创新的关键。这四大技术领域是：1）最终用途的电气化；2）碳捕捉、利用和封存（CCUS）；3）氢能和氢基合成燃料；以及 4）生物能源。对于减排难度最大、难以及时协调全价值链创新的行业而言，这四大技术领域都尤为相关。因此，我们尽可能采用这些行业的实例来说明报告中提出的建议。

虽然本章内容侧重的是公共政策，但私营部门企业家、企业和出资者的作用也至关重要。创新体系中，私营部门参与人数远多于公共部门，在大多数经合组织国家，公共部门雇员仅占研发人员总数的 5-25%（OECD, 2020）。成功与否将取决于公共和私营部门是否能够密切合作议定前进方向、确定项目和衡量标准，以及共同汲取过去成败的经验教训。

本章提出了一系列要素，提议将其纳入加速清洁能源技术一揽子创新政策，以尽可能实现向净零排放的成功转型。这一系列要素并不是详尽无遗的：成功的清洁能源创新体系需要多种支持，包括并非具体针对能源的许多支持（见第 1 章）。上述一系列要素侧重于某些与清洁能源技术特别相关的领域，这些领域往往未得到能源政策决策者的关注，或有待加强才能以实现净零排放目标。这些建议是任何时间皆可适用的一套良好做法，不仅仅适用于新冠疫情大流行影响下的情形。上述建议可归纳为五大核心原则（图 5.1）。

国际能源署。保留所有权利。

图 5.1 加快清洁能源技术创新实现净零排放的关键原则



国际能源署 2020。保留所有权利。

政府可以通过应用五大关键原则，缩短创新周期，实现净零排放。

1.设定优先事项、跟踪并调整

如果创新体系的参与者力出一孔，为同一总体目标努力，那么该体系就会更强大，更有影响力。通过制定路线图的程序，可以确定未来愿景、促进达成共识，并为当地技术开发寻找现实的目标市场。在制定愿景时，鉴于某些最终用途方面存在的脱碳挑战，有充分的理由支持针对特定行业或用途（如低碳钢供应或建筑供热）来制定，而不仅仅是在技术类型层面（如生物燃料、风电或热泵）制定。虽然中国、欧盟和日本等国家和地区有着成熟的多年期计划制度来确立优先事项，但在通过补充程序来确保灵活性、对照目标评价成果的方面经验较少。本项下的关键要求有：

- 与技术专家、民间社会和市场分析人员合作，**建立并宣传关键行业的清洁能源长期愿景**和中期里程碑。优秀的路线图从质和量两方面描述发展路径和目标，还考虑到有关人员和企业的活动可能随着时间推移而发生的变化，从而为所有相关利益攸关方之间就机会和权衡进行对话奠定基础。
- **识别出从出发点到目的地的技术需求和创新空白**。可以将清洁能源愿景与现有技术局面进行对比，确定成本和性能有待改进的领域，以及存在跨行业互动的领域。在这一

国际能源署。保留所有权利。

过程中，可以使用《能源技术展望清洁能源技术指南》[32]等工具作为协助（见第 3 章）。联合国力推的技术需求评估方法，以及英国能源创新需求评估工作方法就是一些应用范例。

- **结合当地专长、研发能力、产业比较优势和潜在溢出效应，确定一组优先研发课题。**设定优先领域是一项既困难又必要的工作，各国政府在分享这一领域良好做法方面有很大的空间。在对可持续发展情景进行分析后，我们特别强调：考虑跨行业溢出效应很重要。例如，在一些国家，支持电化学或轻质材料的跨行业技术集群可能比储能或交通运输等应用集群能够更快地加速创新。较小经济体的政府尤其有动机划分研发的优先等级，重点研发其最有能力作出贡献的技术类型。通过文件设定优先事项的例子参见日本的“环境创新战略”，集群化的例子参见韩国的电池、太阳能光伏和电子技术集群。
- **参照已声明的政策目标跟踪进展，将事前评价纳入政策设计，并建立优先事项定期审评程序。**致力于创新意味着要有长远眼光并接纳不确定性，但这并不降低定期评估进展和政策导向的重要性。在政府评估清洁能源创新政策的绩效时，更优质的数据有相当大的潜力可以提供协助，获得优质数据的方法之一是确保在工作全程中收集事后评价所需的信息。此项下的例子包括：加拿大和意大利收集私营部门能源研发数据，以支持政策制定；美国的独立方案评价十分成熟，例如 2017 年美国国家科学、工程和医学研究院对 ARPA-E（能源高级研究计划署）工作的审评。
- **向公众传达愿景，培养并形成社会政治支持。**能源创新需要时间；要想实现宏伟的净零目标，时间上的回旋余地不大。要缩短推广和持续改进所需的时间，就要调动各利益攸关方的积极性。在实践中，这就要求实现程序透明化，并提前识别出公众可能担忧（和热衷）的领域。例如，欧盟委员会通过欧洲晴雨表问卷，定期进行能源问题民意调查。

2.推进公共研发和市场引导的民间创新

要使创新与清洁能源向净零排放转型的机遇步调一致，就需要在目前公共和私营部门清洁能源研发和创新资源的基础上，投入更多的资源。虽然无法明确指出投入资源的具体金额，或此等资源在各国最适合通过哪个机构支出，但可以确定，创新体系需要足够的资金，才能产生与行业净零排放愿景相匹配的新创意储备，而这些创意的推动者需要有融资渠道，以将创意推向原

[32] For more information please visit: iea.li/CleanTechGuide.

国际能源署。保留所有权利。

型期、示范期，并推广到一个又一个连续的利基市场（前提是创意的潜力在各个阶段都得到证实）。本项下的关键要求有：

- **通过将公共资金与市场机制相结合，最大限度发挥私人资本的作用。**根据优先技术领域，选取适当的工具组合，包括研究赠款、标准、部署激励、贷款、奖金和项目赠款。对于每个概念或项目，相关方案和政策设计都应当考虑其成熟度、单元规模、模块化程度、价值链复杂程度，以及对客户的价值。在太阳能光伏的发展历程中，先后获得了研究赠款和公共采购支持，然后又有市场拉动政策与制造支持共同激励，其中制造支持刺激了私营部门的创新，推低了成本。为提高公共资金的效率，一些国家政府不断调整其能源创新政策工具，例如美国的能源高级研究计划署、欧盟的“创新融资”（InnovFin），以及中国的国家科技重大专项。加拿大和印度等国则寻求加强风投融资激励措施，以期为活跃的创业社区提供长期鼓励。
- **针对每个优先事项，支持不断发展变化的、囊括不同成熟期竞争性设计的组合，并优先支持具有快速创新潜力的方案。**多样性和竞争性有助于推动进步，并为意料之外的发展留有空间；而小型、模块化、大规模制造的技术设计具有较高的溢出潜力，提供了快速创新动力。在为解决当前许多能源挑战而提出的方案中，都可以看到上述类型的技术，而且，已经有越来越多的研究分析认为应当将这些类型的技术纳入技术组合。通过这种方法加速创新进程的例子有太阳能光伏和锂电技术，未来该方法也将使电解技术、燃料电池、热泵和智能家居技术受益。
- **确保政府资助的研发工作所产生的知识能迅速、公开地与科研界分享，并确保纳税人获得的价值最大化。**这是一种知识共享的良好做法（例如，开放获取出版是欧盟研发赠款的条件之一），还可以提升公众支持度。

3.顾全价值链中各个环节

为特定的最终用途提供能源服务，需要不同的供给、配送、储存和使用技术，而整个价值链的强度取决于其最薄弱的环节（图 5.2）。单个国家和企业没有必要对某一价值链上的所有步骤做出技术改进（事实上大多数国家也没有能力做到），但通过考虑整个价值链，可以更容易地确定哪些领域的部署进度需要加快。根据可持续发展情景下关键最终用途行业重要性的分析结果，侧重于价值链的方法从每一种应用的需求出发，而不是以供应为重点。本项下的关键要求有：

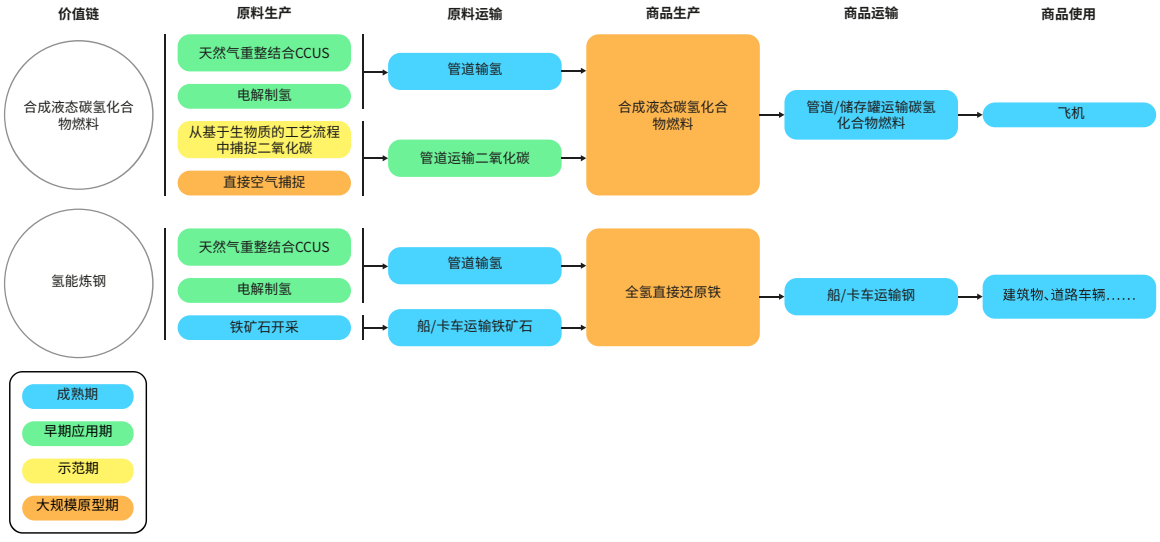
- **对于每个技术领域，找出当地创新者的最大机遇存在于价值链中什么位置。**能源相关设备是一个全球性的产业，其中有数不清的专门部件和中间产品在国际上交易。各国政府在确定技术优先次序的过程中思考比较优势时，应当既考虑其在未来贸易网络中

国际能源署。保留所有权利。

的哪些位置上具有比较优势，也考虑能源安全、技术集群和一体化等战略问题。例如，一个小规模的高技能经济体可能希望优先发展工业用氢能，但认识到其相对优势在于项目整合和气体处理，而不是电解装置制造。

- **确保价值链上的各个要素得到充分支持。**在净零排放能源系统的四个关键技术领域（即直接电气化、CCUS、氢能和生物能源），价值链都存在发展进度不均衡（见第 3 章）。某些技术领域的问题涉及上游供应，例如生物质的生产；而另一些技术领域的问题则在于下游，例如二氧化碳封存的可用性或智能电网。虽然发展进度不均衡在很大程度上是无法避免的，但在需要部署整条价值链时，链上各个要素都必须达到充分的成熟度。同时，对于比较成熟的要素，可以利用市场拉动政策扶持利基市场，进一步推进创新。早期的利基市场往往需要最短的新价值链，是风险最低的市场：例如将捕捉的二氧化碳销售用于强化采油，以及将地热二氧化碳用于生产合成燃料。很重要的一点是，最好的利基市场与最具潜力的未来市场可能不在同一个行业：例如，将低碳氢混入气网或在油气加工厂中使用，可能是将其用于交通运输的宝贵跳板。
- **在区域和国际层面上与价值链上其他要素的开发者合作。**多边和双边合作有助于确保对价值链上的各个要素进行及时且有针对性的投资。国际项目可以帮助将资金导向最需要的地方。

图 5.2　部分低碳价值链上各项技术的成熟度



国际能源署 2020。保留所有权利。

注：CCUS = 碳捕捉、利用和封存。

合成燃料和氢能炼钢价值链上的技术的成熟度不同，这两条价值链与市场的距离取决于其各自最弱的环节。

国际能源署。保留所有权利。

4.建设使能基础设施

为实现净零排放，需要在几个关键领域取得迅速的技术进展，而其中一些关键领域要求有新的基础设施，或对现有网络进行升级。上述基础设施包括工业工艺流程的大型示范设施。网络需求则包括智能电网、氢气管网、低温区域供热网络、二氧化碳封存基础设施，以及用于联网家电和车辆的通信网络。这类投资具有自然垄断性质，并且采用收益（returns to adoption）较大（即后来的采用者往往成本较低，收益较高），因此具有很强的公益性。基础设施一旦到位，就可以成为创新的平台，促使产生充分利用基础设施的新创意，尤其是在第三方使用权得到保障的情况下。另一方面，如果项目推动者不仅要承担开发价值链上其他要素的风险，还要承担新基础设施的风险，将严重阻碍技术的普及。因此，政府有充分的理由确保建立与新技术需求相配套的使能基础设施。本项下的关键要求有：

- **激励网络所有者和运营商测试和部署**服务于新技术的**使能基础设施**，以将新技术纳入现有的电网、管道和通信系统。受监管的网络运营商和公用事业企业通常不得不最大限度降低风险，这削弱了它们将新的赋能技术纳入网络基础设施的能力。新的监管模式不断出现，提供了更大的实验空间。例如，英国的 RIIO 2（收入 = 激励 + 创新 + 产出）价格管制规定，网络的运营商可以获得创新基金，以及对某些试验技术的适当监管豁免。
- **对于技术推广成本障碍较大的大规模示范项目，承担初始投资风险**。用于工业设施的 CCUS、无化石燃料的钢铁工艺、新型核电设计、浮动式海上风电等技术，都面临首批商业项目资本投入成本高的问题。无论是成本还是风险，首批商业项目都是最高的，而后续进入者则可以从先前的经验中学习而获益。因此，政府在这一发展阶段进行直接投资、同时采取行动为低碳钢等产品创造更多市场价值是合理的。为这些项目提供公共资金，可以以广泛分享项目经验教训为条件。例如，在加拿大阿尔伯塔省、欧盟和英国，获得公共资金支持的 CCUS 项目公布了研究结果，供技术界使用。在某些情况下，设施还可以“开放使用”，用于测试不同的设计；例如，挪威蒙斯塔德技术中心和美国国家碳捕捉测试中心就开放用于二氧化碳捕捉相关测试。

5.做出全球努力实现区域成功

由于气候挑战具有全球性，因此，为实现净零排放所需填补的创新空白也具有全球性，如果各国能够在国际层面分担一部分重担，将能在最大程度上提高创新效率。政府间多边合作平台已经存在，可以根据需要予以加强，以确保全球创新体系尽可能高效运作。适当知识产权制度也可以发挥重要的作用，最大限度实现贸易的创新效益。本项下的关键要求有：

国际能源署。保留所有权利。

- **跨国合作，确保没有任何一项必要技术领域因国家无力单独承担较高的开发风险而无法获得足够的资金。**各国的学习和经验都能推动所有区域的创新前沿，因此是全球公共物品。在大多数情况下，对给定的经济体而言，这种贡献以及本地创新者的先行者优势，构成了动用公共财政资源支持研发、示范和早期应用的充分理由。然而，有些情况下，如果市场参与者来自多个国家，技术前景不明朗，并且项目成本特别高，那么风险可能太高，以至于各国无法独自提供资金支持；用于低碳氢和低碳工业工艺流程等的 CCUS 就属于这类情况。对于研发预算较少的国家和财力较弱的企业来说，如果合作能够留住本国或本企业创新人才，那么合作可能尤其具有吸引力。以这种方式聚集创新资源的先例虽少，但并非没有；预算庞大的欧盟能源研发和跨国核聚变研究就是先例。最近的一个案例是，法国和德国政府宣布于 2020 年初共同出资建设一个浮动式海上风电项目。
- **与其他清洁能源创新政策决策者交流有关良好创新政策实践的经验。**本章中的若干项建议涉及将会产生积极效果、但最佳做法尚无共识的行动。研发优先事项的设定、资助工具的设计和评价都属于这一类，都可以从政府间经验交流中获益。
- **通过支持有关网络，促进重叠领域的研究人员之间快速交流知识，以及行业之间相互促进发展。**利用国际层面的协同作用，可以最大限度提高知识和应用溢出的效益和速度。此外，国际知识交流网络也有助于避免重复努力，定位尚未解决的创新空白。现有多边合作平台为深化合作奠定了良好的基础。这些平台包括国际能源署的技术合作项目（旨在促进 38 个技术领域的合作）、“创新使命”（Mission Innovation），以及清洁能源部长级会议等等。

新冠疫情：有必要迅速落实创新政策，以保持发展势头并加快转型

新冠疫情并不改变净零排放一揽子创新政策中的要素，但各国政府在着手制定经济活动修复、刺激和复苏政策时，值得对一些要素予以立即关注。政府在支持能源创新方面的核心作用已经得到充分论证，特别是在具有公益性的研发领域，并且广泛共识认为，要解决温室气体的外部性问题，就需要政府在未来几十年采取强有力的行动。能源创新提供了机遇，一方面促进因新冠疫情大流行而受损的经济活动，另一方面助推向净零排放转型。能源创新支持着大量就业岗位，包括约 75 万名研发人员，并且是经济增长的驱动力：对于应对气候变化和其他长期的能源和可持续发展挑战，能源创新也是至关重要的。同理，由新冠疫情导致的能源创新投资下滑，

国际能源署。保留所有权利。

既会产生短期经济代价，也会增加能源转型的长期成本，还会加大实现本世纪中期气候目标的难度。

国际能源署《世界能源展望关于可持续复苏的特别报告》指出，在设计刺激计划时，十分有必要考虑总体能源政策目标，如提高能源行业韧性、应对气候变化等（表 5.1）。该报告中的建议指明了短期和长期利益一致的若干能源投资领域。

表 5.1　清洁能源创新之外的能源行业可持续复苏计划政策行动

建筑物	• 实施大规模的公共建筑改造计划，为私人改造提供融资补贴 • 落实电器更迭机制，替换低效电器，安装热泵以及使用太阳能热水器和生物质锅炉的可再生能源系统 • 通过提供现代化炉灶以及开发先进生物质和液化石油气配送系统，支持清洁烹饪的普及
交通运输	• 实施车辆更迭方案，加快高能效汽车和电动车的普及 • 促进高铁发展，鼓励购买新型高效卡车、飞机和船舶 • 加快部署电动车充电网络，升级公共交通，改善步行和自行车基础设施
工业	• 激励工业能效，特别是轻工业电机和工艺流程热泵的升级 • 提高废弃物的收集率和可回收材料的回收率，特别是在废弃物收集程序不正规的地点 • 升级采用高效农用泵
电力	• 投资电网升级，特别是配电系统强化和现代化 • 降低风险，加速部署风能和太阳能光伏发电新项目 • 延长寿期即将届满的核电站的寿期，并更新现有水电设施
燃料	• 支持符合适当可持续性标准的生物燃料产业 • 实施甲烷泄漏检测方案，解决上游石气作业中的甲烷逃逸问题 • 改革效率低下的化石燃料补贴，而不提高最终用途价格

来源：IEA (2020a)。

本报告以下各节遵循同样的逻辑，指明了可纳入复苏措施的净零排放一揽子创新政策的要素，这些要素都有潜力在当前形势下实现以下两个关键目标（一个短期目标，一个中期目标）：

- 保持整个创新体系不脱离正轨。
- 做出兼具战略性和雄心的投资，以重塑经济，在 2030 年前实现净零排放。

本报告通篇的分析表明：将对清洁能源技术创新的支持延续到这两个时间段甚至更远，会十分有益。这主要有两个原因。第一，世界范围内，如果解决某些最终用途行业排放问题的能力进

国际能源署。保留所有权利。

一步偏离正轨，则后果将是无法承受的。第二，刺激资金和新的市场现实带来了独特的投资机遇：这一机遇可能带动一些关键技术以比预期快得多的速度成功穿越“死亡之谷”。

保持整个创新体系不脱离正轨

短期内，政府希望促进劳动密集、可快速部署并且具有较大经济乘数效应的经济活动。维持经济中各领域的创新支出符合上述类型经济活动的特征。包括公共部门研发在内的研究工作需要密集的劳动，是未来生产力和增长的基础。如果有些新技术和示范项目的制造工厂已经处于规划后期阶段，那么很可能马上就能快速部署，也就是随时可以破土动工。已经启动或准备启动、但目前面临资金不确定问题的研发项目，可以迅速启动或快速扩大规模。

考虑每一项措施时，都应当从在严峻风险中保持发展势头的系统性方法背景出发。如果清洁能源创新体系的任何一项关键功能遭到破坏，都可能掐断新技术储备渠道，储备水平可能需要数年时间才能得到恢复。这个论点进一步肯定了价值链方法（正如以下建议所突出体现的），还肯定了清洁能源创新支持与其他刺激资金要素（包括基础设施投资、企业支持等）的结合运用。

以下建议都来自上文提出的五大原则的要素。之所以选择这些建议，是因为它们有助于抵御短期风险。这些建议也纳入了 2007-08 年金融危机后于 2009 年实施的刺激措施的经验教训（见专栏 5.1）。

推进公共研发和市场引导的民间创新

- 维持计划内的 2020-21 年清洁能源公共研发方案
- 在主要经济体中，发出以下早期信号：2021-25 年的预算将逆周期提高，与 2009-11 年的增幅一致（美国为 100%或 47 亿美元，其他主要经济体为 60%或 18 亿美元）。[33]
- 采取低成本措施，通过加强专业网络、确保成果公开发表，以及执行现有法规（例如知识产权相关法规），来提高研发生产力。
- 探索国际融资方案，避免进一步扩大新兴市场与全球研发和创新领先者之间的差距。
- 在扶持陷入困境的企业时附加条件，要求其致力于清洁能源创新。对于减排难度最大的能源供应、重工业和长途交通运输部门的企业，救援协议中的条件可以是要求购买新技术、投资使能基础设施或将利润暂时重新投入研发。对企业的有条件贷款或税收激励中，可以要求企业增加清洁能源技术研发支出，以抵御研发支出的削减；例如，欧洲投资银行在 2010 年代向汽车企业提供资金时，要求企业增加电动车研发资金，为我们树立了榜样。对于有活力的创新型初创企业和中小企业，可以提供资本（如短

[33]加拿大、法国、德国、荷兰、挪威、西班牙、瑞典和英国。

国际能源署。保留所有权利。

期赠款、贷款或贷款担保），特别是如果可以通过行政方式有针对性地支持战略领域的企业，则此类支持尤为适用。

顾全价值链中各个环节

- 对于即将可以快速推广的大规模制造技术，通过协调对市场需求、工厂竣工、现场试验和研发的支持，在价值链各环节采取行动。这类行动尤其适用于新型锂离子电池设计、电解技术、燃料电池、热泵和高效空调。
- 在现有工具的基础上，创建利基市场，避免对复杂新法规的需求。市场化的支持很可能吸引更多的私人资本，对发展新业务有长期效果。2009 年，美国《复苏与再投资法》（简称《复苏法》）的激励措施运用了税收制度，而欧洲则提出了可能利用欧盟排放交易体系签发“碳差异合同”，保障工业界低碳氢消费者的收入。
- 在刺激计划的大型公共采购方案中，对创新低碳解决方案给予优惠待遇。例如，低碳建筑材料、能源管理智能控制，以及异地预制和标准化等制造业节能改造新方法。

建设使能基础设施

- 如果重大技术示范和大规模实地试验处于规划的后期阶段，并且仍然预期有后续的商业投资，则确保这些示范和试验继续进行直至完成。从快速支出和创造就业角度来看，价值链和基础设施要求简单的项目最有吸引力。CCUS 领域中，在美国寻求 45Q 税收抵免支持的 15 个项目中，有一些已进入规划晚期，其二氧化碳封存合同也具有合理确定性；挪威的“北极光”项目距离最终投资决定也近在咫尺。智能电网领域中，需求响应、负荷聚合和电力储存在不同实施环境中的示范项目，将建立起监管机构对更快/更广泛采用的信心。
- 网络基础设施由于具有经济乘数效应，因此很可能成为政府的投资对象，这一机遇将能够使网络基础设施更契合净零排放的未来。有些情况下，可能需要放宽某些监管规定，以使受监管实体能够对关键使能技术做出广泛投资。例如，智能电网升级、电动车充电、区域供热现代化，以及氢气管道。

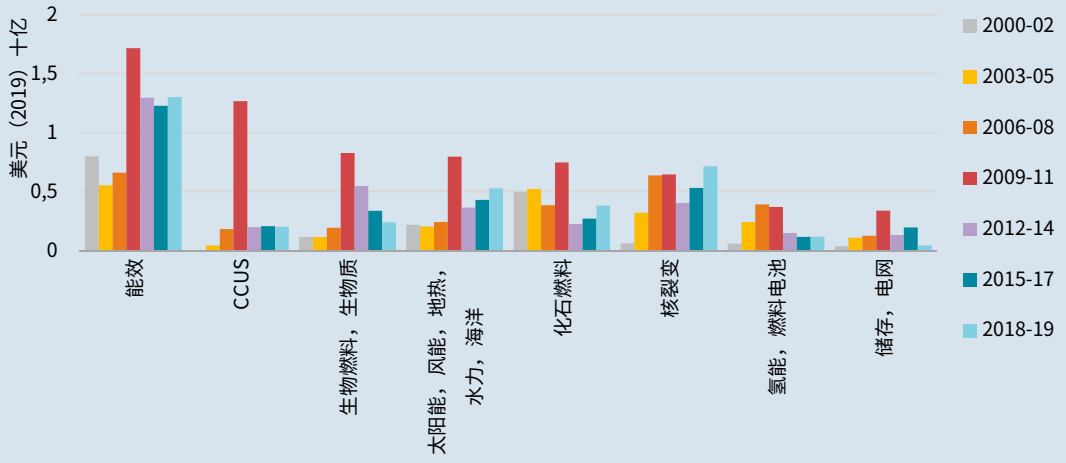
国际能源署。保留所有权利。

专栏 5.1　　能源创新刺激措施的过往经验

面对 2007-08 年全球金融危机的预期严重负面影响，世界各国政府于 2009 年前出台了广泛的经济刺激计划。其中，几个经济资源充足的大国政府选择将资金导向清洁能源创新领域。这种做法一般是为了使短期的刺激措施与提高生产力和推动技术的长期投资相匹配，一旦经济复苏，将可以减少二氧化碳排放。

这种做法规模最大、范围最广的例子是 2009 年美国《复苏与再投资法》，该法提供了 900 多亿美元支持清洁能源活动。其中 75 亿美元用于能源研发和重大示范项目，其他资金用于扩大早期技术的价值链。截至 2010 年底，《复苏法》预计到 2012 年将创造 32,200 个创新和就业培训岗位-年（CEA, 2010）。从 2009 年到 2011 年的三年时间里，美国联邦政府能效方面的研发投入比 2006-08 年每年提高了 10 多亿美元，增幅达 160%。用于碳捕捉、利用和封存研发和示范的资金也增加了 10 亿美元以上，增幅近 600%。用于电网和储能的资金虽然绝对体量较小，但增幅达两倍，也十分引人注目，并且对电池的发展来说恰逢其时。

2000-19 年美国联邦政府对应用能源技术研发和示范的资助情况



国际能源署 2020。保留所有权利

注：不包括基础能源研究或核聚变研发，也不包括能源高级研究计划署（ARPA-E）资金。CCUS = 碳捕捉、利用和封存。

来源：IEA (2020b); Gallagher and Anadon (2017)。

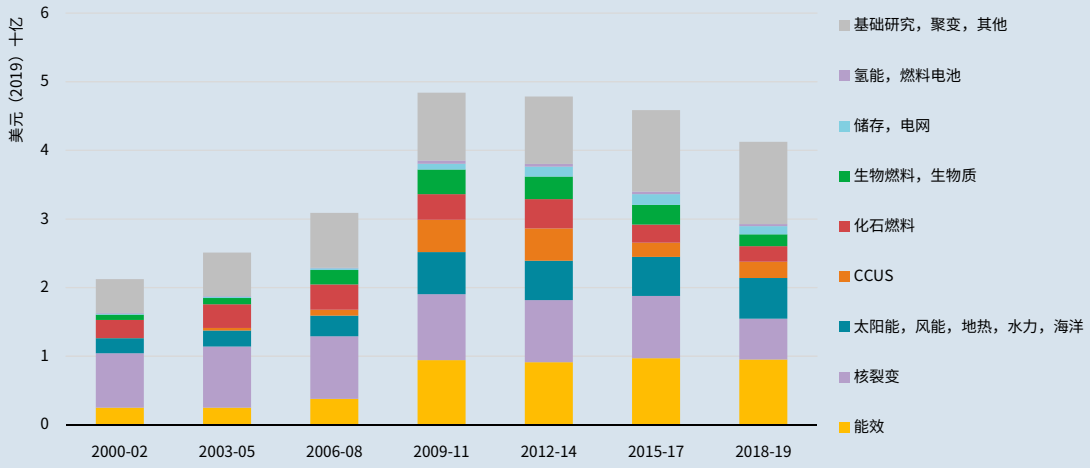
《复苏法》为锂离子电池技术的发展做出了显著的贡献。该法为美国电池研发提供的资金大大推动了全球研发经费的增长，而当时电动车虽已具备进入市场的条件，但还需要更好

国际能源署。保留所有权利。

的电池；美国当时的混动车电池产量还不到全球的 2%（Walsh, Bivens and Pollack, 2011）。新的电池设计使得电动车电池成本下降了 70%，2008 年至 2015 年美国电动车销量从 1,500 增加到 11.4 万台（US DoE, 2015; IEA, 2016）。上述发展并不完全归功于《复苏法》，但毫无疑问的是，对价值链不同环节（不仅仅是研发）的及时拨款，使电动车行业得以受益。该法为 12 个电网级示范项目拨款 1.4 亿美元；为 8 个电动车和充电装置示范项目拨款 4 亿美元，外加人员培训和研发；2015 年前为能源高级研究计划署下的 60 个新型电池开发项目拨款 1.6 亿美元；为 30 家电池、电池部件和电动车传动系统部件制造厂拨款 20 亿美元；为电池厂提供 3,300 万美元的税收抵免；为电动车和电池制造提供 20 亿美元的贷款；并且为购买电动车提供 22 亿美元的税收抵免（US DoE, 2020a, 2020b, 2020c; Walsh et al., 2011）。在获得赠款的 30 个制造项目中，有 26 个项目已在 2011 年之前启动施工；2 家电池厂已经投入生产。

美国以外，虽然清洁能源创新的支出金额普遍大大低于《复苏法》提供的支持金额，但德国也拨出了约 5 亿欧元用于交通运输研发（Deutscher Bundestag, 2009; Schmidt et al., 2009）；并且，采用此类刺激措施的其他大型经济体中，2009-11 年间清洁能源研发年度预算增加了约 60%。在这些国家，资金的增加普遍具有持久性，而《复苏法》资助的许多领域的资金水平在 2011 年后有所下降，现已回落到接近 2009 年前的水平。

2000-19 年部分国家使用刺激资金资助公共能源研发和示范的情况



国际能源署 2020。保留所有权利

注：加拿大、法国、德国、荷兰、挪威、西班牙、瑞典和英国的数据。由于没有得到欧盟委员会在整个时期中的一致数据，因此没有将其纳入。CCUS = 碳捕捉、利用和封存。

来源：IEA (2020b)。

国际能源署。保留所有权利。

几个最大的经济复苏一揽子计划有一个共同特点：它们都投资支持复杂工程项目的大规模技术示范。刺激计划释放出的巨额资金为建设这些金融风险大、资本密集的项目提供了令人欣喜的机会。所有项目都在项目许可、监管挑战、融资和商业模式方面取得了宝贵的经验；在有些情况下，相关经验已根据接收资助的法律条件得到了公开分享；然而，项目的成功情况参差不齐。

2009 年，加拿大、欧盟和美国的 CCUS、聚光太阳能（CSP）、海上风能、智能电网和储能项目获得了 120 亿美元的资金。在加拿大，上述资金占刺激计划总金额的 1.2%、能源相关预算的 59%，此外还有支持智能电网和可再生能源研发的资金。从比例来看，欧盟和美国相对较低，欧盟为 0.7%和 33%，《复苏法》为 1.2%和 9.3%。获得资助的 58 个项目中，40 个项目已投入运行并取得了运营经验。其中很多项目是美国的规模较小的智能电网和储电项目。CCUS 项目成功率较低：截至目前，19 个项目中有 5 个项目成功投入运行，包括 2020 年开始运营的 1 个项目。

2009 年各国政府批准的经济刺激预算提供的示范项目资金

方案		CCUS	CSP	储电	海上风能	智能电网
加拿大 经济行动计划 清洁能源基金	预算（十亿美元）	0.41	-	-	-	-
	项目	3	-	-	-	-
	首个项目投入运行的时间	2015	-	-	-	-
	到 2020 年已开始运营的项目	2	-	-	-	-
欧盟 欧洲经济复苏计划	预算（十亿美元）	1.46	-	-	0.35	-
	项目	6	-	-	6	-
	首个项目投入运行的时间	-	-	-	2011	-
	到 2020 年已开始运营的项目	0	-	-	5	-

国际能源署。保留所有权利。

方案		CCUS	CSP	储电	海上风能	智能电网
美国《再投资与复苏法》	预算（十亿美元）	3.37	5.8*	0.14	-	0.42
	项目	10	5	12	-	16
	首个项目投入运行的时间	2013	2013	2011	-	2010
	到 2020 年已开始运营的项目	3	5	11	-	16

* 贷款担保。

注：CCUS = 碳捕捉、利用和封存；CSP = 聚光太阳能。

来源：US DoE (2020a; 2020d); Herzog (2016); EC (2018); Government of Canada (2014)。

对于旨在快速支出资本并沿着价值链增进就业的项目，某些规模和复杂程度的组合具有显著风险。挑战包括：

- 资金支出要足够快。二氧化碳封存设施可能需要数年才能建成，因此，要在法律规定的时间内快速完成资金支出，是没有任何延误余地的。但竞争机制的实施、反应和评价都需要时间，而且美国能源部在民用能源预算一年内增加两倍后，需要聘用新的人员。延误的原因还包括许可程序、以前没有验证过的社会关切，以及技术问题。
- 在经济困难时期，特别是在新技术并非主要发起人的核心业务活动的情况下，在政府资金的基础上吸引共同投资比较困难。
- 在缺乏灵活性的赠款规则下，适应不确定的市场环境（包括二氧化碳价格下降和监管停滞不前）有难度。对于价值数亿美元的新资产，项目发起人希望确定它们将会运行多年，而不仅仅是在赠款的较短期限内运行。
- 全新的价值链中包括来自不同风险偏好部门的企业，协调起来有挑战。

如果项目失败导致人们将某个技术领域与低效、高成本或不成熟联系在一起，或者由于其他原因，整个技术领域可能都会受挫。例如，在欧洲很多地区，迅速部署大型 CCUS 项目的努力与对化石燃料可持续性的关切联系在一起。

国际能源署。保留所有权利。

从以往的经验来看，有助于成功的因素包括：

- 接入现有的电力网络、燃料供应管网或二氧化碳管道等基础设施。
- 以最简单、最廉价的方式填补技术或法规的知识空白。
- 在获得资助时已达到或完成了前端工程设计阶段。
- 在现有市场或双边承购合同条件下拥有可靠的产品销售渠道。
- 资金有灵活性，能够承受有限的成本或时间超支。

如今，由于公众意识提高以及国家和国际气候政策框架改善，各国政府似乎具备更好的条件来实施绿色刺激计划的工作（Kröger et al., 2020）。此外，上述一些经验教训已经被吸取并用于改进政策设计，例如即将推出的欧盟创新基金，而其他经验教训，如赠款和税收抵免与贷款相比的相对有效性，也已经被相关机构记录在案（Aldy, 2013）。

做出兼具战略性和雄心的投资，以重塑经济，在 2030 年前实现净零排放

各国正在商议的刺激计划的规模十分巨大。美国目前已批准的措施达 2 万亿美元，其实际价值与 2007-08 年金融危机中 2008 年美国《紧急经济稳定法》和《复苏法》授权的总金额几乎相同。同时，欧盟也提出了总额约为 8,500 亿美元的措施，但尚未得到批准。仅这两套计划的金额，就相当于全球所有能源资产的年度资本支出的两倍以上。到目前为止，各国政府已经宣布了价值约 9 万亿美元的措施（IEA, 2020b）。相比之下，能够支撑清洁能源创新成果飞跃发展的资金总量并不多。每个大型示范项目耗资约为 5 亿至 20 亿美元。此外，并非全部成本都需要由纳税人承担：随着资本投入成本的预期下降，如果将公共支出与贷款、贷款担保和增强收入确定性的措施结合起来，则私营部门的共同投资可能会在清洁能源创新总支出中占到很大比例。

现在对研发、示范和基础设施项目的战略组合进行投资，可以使世界走上净零排放的道路。这样做还可以确保先发经济体在新的工业领域具有领先地位，并且防止复苏中锁定高碳增长。特别是，如果能够避免在错误的时间对高排放基础设施启动新的投资周期，那么长寿期资产将迎来数十年一遇的解锁排放量机遇（专栏 5.2）。更早提供具有成本竞争力的低碳技术，可大大降低未来为实现净零排放目标而实施提前退役和颠覆性整修的成本。这种情况下，还可以节省

国际能源署。保留所有权利。

二氧化碳排放：减少创新情景显示，如果氢能示范项目因新冠疫情大流行而推迟，那么到 2040 年可能会额外增加 1.5 吉吨的二氧化碳排放量（见第 4 章）。然而，上述组合中，十分有必要优先考虑以下部门中前途较好的解决方案：深度脱碳技术落后、而且尤其难以筹集到大型示范项目资金的部门。清洁能源创新支出还将在科学和工程领域以及沿着建筑供应链创造就业机会。

设定优先事项、跟踪并调整

- 根据长期目标审议研发资金和其他能源创新措施。公共创新政策有效性的许多决定性条件都包含在政策框架和机构程序中，并与资格标准、绩效评价、进展跟踪、成果传播、资助工具的灵活性、知识产权执行和竞争法等因素有关。结合未来的目标和过去的经验教训，刺激基金中的新资金可能意味着实施改革的机遇。
- 根据新情况调整清洁能源技术的优先事项设定程序，将新的发展纳入考虑范围，包括新冠疫情可能引发的长期结构和行为变化。

推进公共研发和市场引导的民间创新

- 在预算允许的情况下，增加创新资金支持已确定具有特别长期战略重要性的优先清洁能源价值链。近期行动旨在修复受损的创新体系，可能注重确保示范项目和早期应用项目得以继续；但长期政策应当更多地侧重于增强新创意储备，以期这些创意能够在未来发展进入原型期阶段。研发方面，目前值得投入更多关注的技术领域包括：先进电池化学、直接空气捕捉（DAC）设计、基于藻类的生物燃料、铁矿石电解等重工业工艺流程电气化、电动飞机设计，以及通过电器互联实现建筑物能源控制。
- 寻找最适合疫情后经济的重点领域。如果全球经济风险偏好降低，不愿将大量资本置于风险之下，那么就更有理由加强支持单元规模较小的模块化技术。适当的支持机制和私营部门资金的潜在效用将取决于技术的成熟度、迅速扩大规模的潜力，以及从与其他技术的跨部门协同作用中获益的能力。

建设使能基础设施

- 划拨资本资源用于推动重要大规模首创示范项目的规划和运营，并推动与终端使用者合作进行实地试验；同时还要确保：如果此类项目取得成功，市场将支持对后续一系列项目的投资。对净零排放目标至关重要、但推广挑战较大的技术实例包括氢基合成燃料；用于制氢、水泥窑或炼钢的 CCUS；以及氢能炼钢。

国际能源署。保留所有权利。

做出全球努力实现区域成功

- 深化国际对话，讨论共同任务和基金，特别是在当前经济环境下可能难以在国家层级融资的高成本、高回报的技术方案。重工业、直接空气捕捉、生物能源与碳捕捉和封存（BECCS）、国际低排放航运、航空和海上二氧化碳封存等新的低碳工艺都具有很强的全球公益性。其中许多技术是“流动”的，即很容易从一处迁至另一处；还有许多技术预计将位于其用户的监管制度管辖之外。
- 参加国际对话，讨论建立更多更大利基市场的时机。这将有助于避免方案之间留有空白以及由此造成的全球供应链中断。

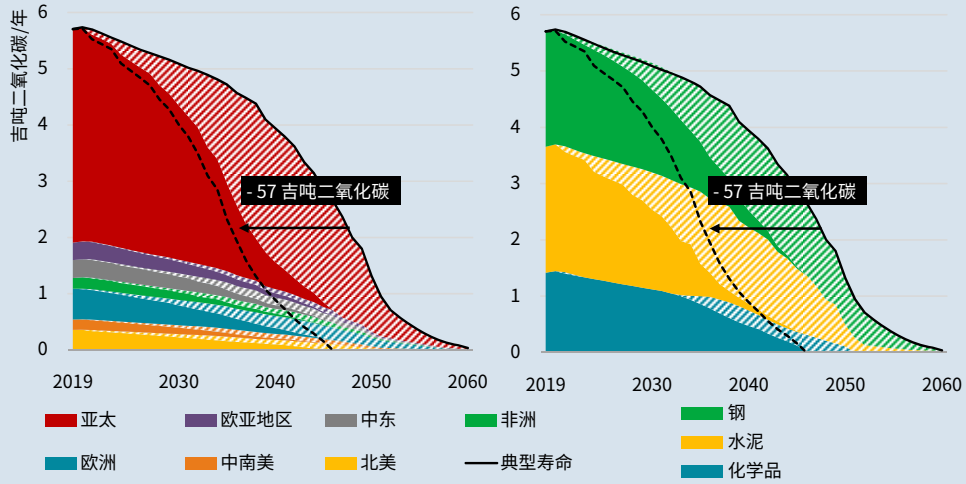
专栏 5.2　　数十年一遇的投资机会

部分行业距离 2050 年只有一个投资周期之遥。对其他行业来说，在 2070 年，即可持续发展情景下的净零排放年，有理由预期下一批新的资本资产仍在运行。这意味着，把握投资时机和适时提供清洁能源解决方案至关重要。如果创新时间表能够与净零排放目标相一致，那么将为新能源技术打开数十亿美元的市场，并避免数十亿吨“锁定”排放的风险。

在可持续发展情景下，一旦新的低碳技术足够成熟，适合早期应用，就会被迅速采用。在需要新产能时，或现有设备寿期届满或根据需要提前退役时，新技术进入市场。这给我们留下了很小的回旋余地，尤其是在重工业领域。在水泥、化工和钢铁行业，现在缺乏商业化的低碳方案，这意味着目前处于原型期或示范期的技术将在 2030 年之前开始得到广泛部署。这是因为：尽管大多数炼钢厂和水泥厂都比较年轻，直到 2045-55 年才达到 40 年的设计寿命，但在未来 10-18 年将面临重大的整修决策；如果整修时采用与现在相同的技术，则可能将现有排放水平再锁定 25 年。钢铁、水泥和化工行业的业主如果在 25 年后，而不是 40 年后，改用与深度脱碳相适应的生产技术，那么到 2070 年，可使行业的二氧化碳累计预计排放量减少近 60 吉吨，减幅达 38%。从工厂的规模和厂龄来分析，上述削减将主要发生在中国和其他亚洲国家。

国际能源署。保留所有权利。

可持续发展情景下，避免在重工业行业的下一个投资节点上“锁定”二氧化碳排放



国际能源署 2020。保留所有权利。

注：钢铁、水泥和化工资产的典型寿命分别为 40 年和 30 年。这里考虑的“25 年投资周期”情景下，在新技术被认为具有商业可用性后，所有资产都在其第一个 25 年整修节点上，被替换或改造为低碳资产。

钢铁、水泥和化工行业中，在下一个 25 年投资周期结束时进行干预，预计可以避免“锁定”来自现有设备二氧化碳排放量的 38%，即接近 60 吉吨。

对这些行业中的大多数净零排放技术而言，最早要到 2028-35 年才可能发展到早期应用期。例如，有一批直接还原铁的氢能炼钢示范试验，计划于 2025 年到 2035 年间开展（Hybrit, 2020）。若不能与上述项目和其他试点和示范项目的时间表保持同步，则水泥、化工、钢铁行业的许多工厂将失去在其投资周期的整修节点转而使用低碳技术的机会：这是因为如果将来要提前退役，或在工厂运营生命周期中进行更具颠覆性的整修或替换，将会产生更高的排放，以及更高的成本。

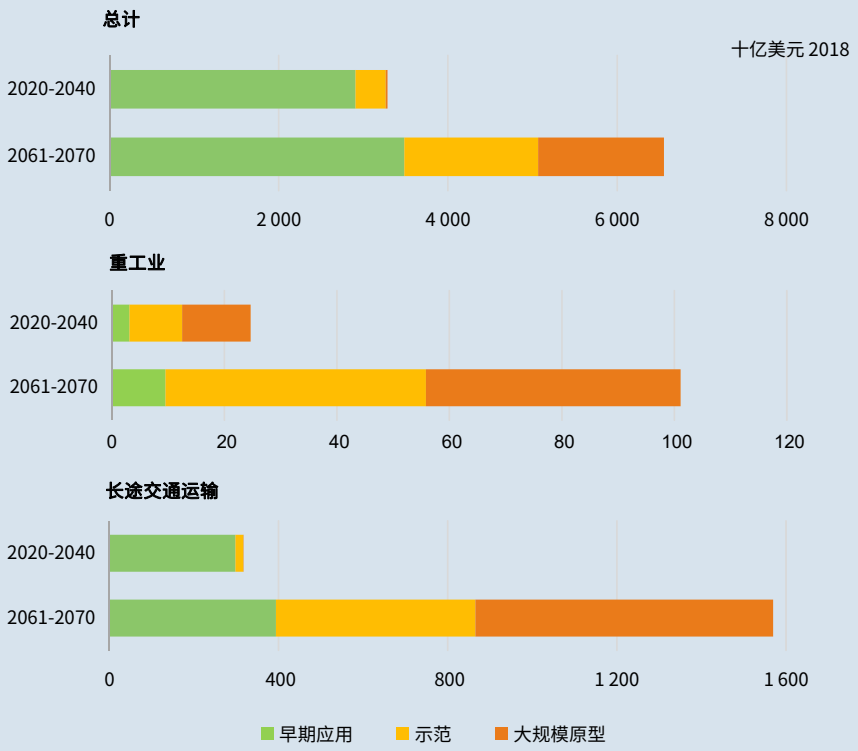
一揽子复苏计划可以在近期投资于一些项目，以帮助确保提供与可持续发展情景一致的可用技术，这是未来可能不会再有的重大机遇。复苏计划可以支持一系列商业规模的示范项目（按各项目的公众支持度从高到低排序）；要想让市场对新技术树立信心，这些项目通常是必需的。还可以为 2028 年之前需要做出 25 年投资决定的设备提供资金，使投资决定与新技术将来需要的改造相适；这一策略主要与欧洲和北美工厂有关。在直接还原铁的氢能炼钢这一具体领域，可以将高炉改造为可以使用氢能的直接还原铁工艺流程，为将来进一步改造做好铺垫。已经宣布的早期改造计划包括：将在第一家示范工厂进行试验的同时，改造现有的高炉，以适用上述工艺流程（SSAB, 2020）。

国际能源署。保留所有权利。

重工业与交通运输、建筑或发电行业相比，投资中用于部署目前尚未商业化的技术的比例较高，因此上述机遇在重工业中最为明显，但并不限于重工业。我们估计，从现在到 2070 年期间，如果将现有的能源基础设施运营到其寿命结束，将会产生近 800 吉吨的二氧化碳排放。其中虽然有 150 吉吨来自重工业，但更多排放却是来自电力行业，该行业煤电装机容量中有 33%的机龄在 10 年以下。要想避免在错误的时间进入新的投资周期，就需要提供迅速可用的电厂配备 CCUS 改造技术，以及长途交通运输脱碳技术。

这些低碳技术如果成功实现商业化并得到早期市场的支持，那么就可能会迎来巨大的商业新机遇。在可持续发展情景下，目前处于原型期或示范期的技术的投资额在 2020 年至 2040 年期间年均将达到约 3,500 亿美元。到 2060 年代，对上述技术的年度投资的各行业合计规模将增加到 3 万亿美元，届时重工业中上述成熟度的技术的市场规模将达到每年近 1,000 亿美元。

可持续发展情景下，目前处于商业化前或早期应用期的不同成熟度技术的年均投资额



国际能源署 2020。保留所有权利。

注：图中显示的年度投资不包括成熟技术相关投资。

在可持续发展情景下，对目前处于示范期或大规模原型期的技术的投资是重要的投资机会，特别是在重工业和长途交通运输等相对缺乏可扩展的低碳选择的行业。

国际能源署。保留所有权利。

根据技术族群的需要量身定制一揽子计划

有一点对于向净零排放转型而言至关重要，那就是所有能源终端使用者都能在与可持续发展情景下的时间表同步（或在可能的情况下尽早）的前提下，获得负担得起的清洁能源解决方案。在全球层面上，有待完善和开发的技术组合范围较广，其技术类型比能源系统以前需要管理的技术类型更加多样化。该组合包括越来越多的小规模、分散在供给侧的装置，也包括用于集成新燃料的、更灵活的需求侧技术。这些技术可以归为不同的技术族群，涵盖不同的价值链（图 5.3）。上述组合还包括传统能源网络以外的技术，例如生物能源与碳捕捉和封存（BECCS）以及直接空气捕捉（DAC）等，这些技术能够抵扣二氧化碳排放，将在未来发挥重要作用。在与清洁能源创新有关的经济复苏措施中，不同的技术将适合发挥不同的作用。

本节中，我们根据技术属性的相似程度，将上一节提出的政策措施按其关键技术族群进行了重新分类。在每一个技术族群内，如果充分利用技术之间的联系，则知识和应用溢出效应将会释放加速创新的巨大潜力：在这一背景下，本节针对每个技术族群提出了一些具体的行动建议，以帮助政策决策者将为优先技术领域量身定制的方法纳入总体战略。

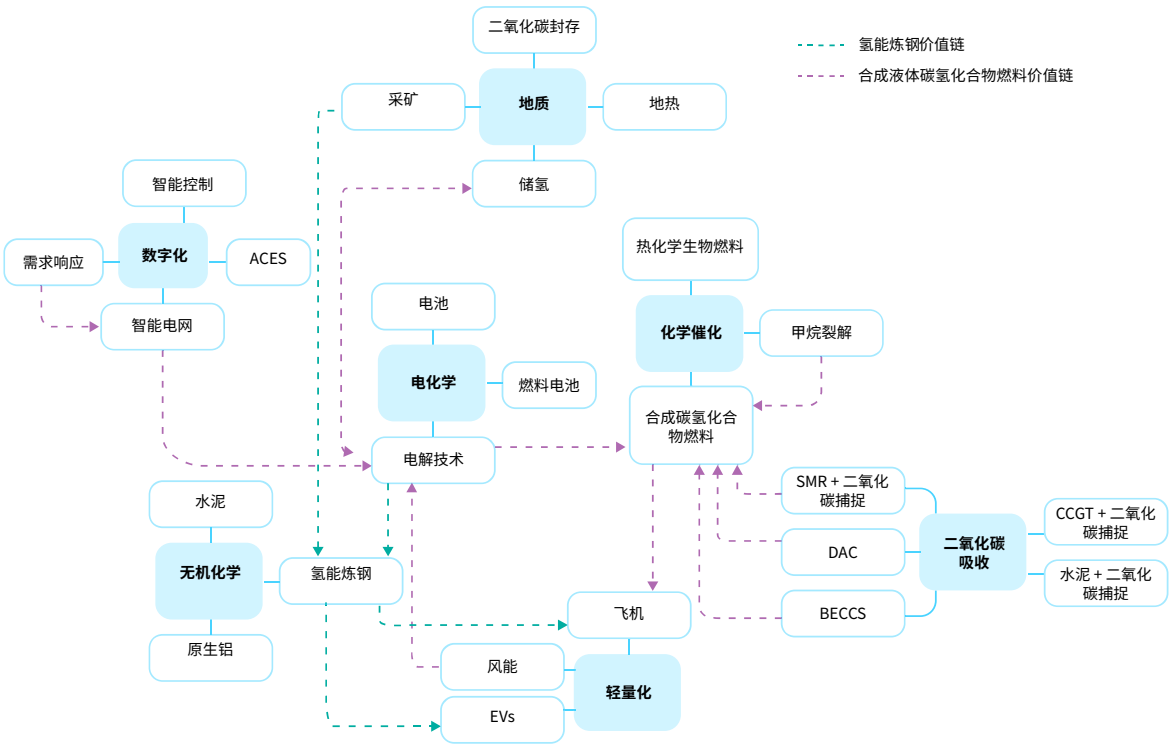
技术族群：

1. 电化学：在电能和化学能之间进行转换的模块化电池单体。
2. 二氧化碳捕捉：将二氧化碳从工业和电力部门的排放或从空气中分离出来的工艺流程。
3. 供热和制冷：高效灵活的电气化设计。
4. 催化：将生物质和二氧化碳转化为产品的更高效的工业工艺流程。
5. 轻量化：轻型材料及其在风能和车辆中的集成。
6. 数字化：使能源系统灵活高效的数据和通信集成。

上述清单并非详尽无遗，它涵盖了最有希望推进电气化、氢能和氢基燃料、CCUS 和生物能源等领域价值链的各类解决方案。在实现净零排放方面具有重要作用的其他技术包括科学原理复杂的大型技术（例如小型模块化核反应堆等核技术），以及消费者导向的小规模技术（例如灵活的或建筑物一体化的太阳能光伏或高效电机）。在这两个极端之间，还有增强地热能、储氢或二氧化碳封存等地质技术，以及海洋能源、预制净零能耗建筑物围护、热力储能和机械储能等高潜力领域。

国际能源署。保留所有权利。

图 5.3　部分技术族群及其在低碳价值链上的足迹



国际能源署 2020。保留所有权利。

注：DAC = 直接空气捕捉；BECCS = 生物能源与碳捕捉和封存；ACES = 自动化、联网、电动和共享出行；EV = 电动车；SMR = 蒸汽甲烷重整；CCGT = 联合循环发电厂。

低碳技术族群横跨不同的价值链。

1.电化学：在电能和化学能之间进行转换的模块化电池单体

- 技术类型实例：电池、电解技术、燃料电池、电化学还原铁。
- 本族群的相关价值链类型：电气化、氢能和氢基合成燃料。
- 最难减排的相关行业：钢铁、化工、长途交通运输。
- 摘要：需要采取行动，保持近期投资者在这些领域的重大势头，并通过加快扩大为新市场进行制造和创新的规模，投资于更清洁的经济复苏。
- 关键属性：

国际能源署。保留所有权利。

单元规模[34]	模块化程度	价值链复杂程度	价值链成熟度	消费者附加价值
• 50 千瓦至 20 兆瓦	• 非常高	• 低	• 低（如氢能基础设施和炼钢原型）至 • 高（如电池应用）	• 低（如电解装置）至 • 中（家用电池储能、基于燃料电池的微型热电联产）

- 针对本技术族群的政策建议：

	保持整个创新体系不脱离正轨	通过投资重塑未来
设定优先事项、跟踪并调整	• 审议优先事项，将重点放在关键的净零排放优先事项上。 • 委托进行下列方面的研究：此类技术的工业和研发总体状况，以及当地技能和能力空白。	• 确定未来十年的研发优先事项。 • 通过创建研究网络、交流和联合计划支持溢出效应。 • 将电化学的其他应用纳入研发方案，如铁矿石还原和二氧化碳还原。
推进公共研发和市场引导的民间创新	• 维持研发预算，召集公共资金资助的研究人员交流最新项目的研究成果。 • 扶持有生命力的创新型初创企业和中小企业克服流动性挑战。 • 将条件和脱碳目标纳入向重工业、航运、航空和石气企业提供的任何支持中。 • 考虑向相关行业中实力受创的大型工业企业提供贷款，以维持其研发预算，并有力地将其导向电气化和氢能。	• 大幅增加公共研发资金，用于支持企业和风险投资者眼前并不关注的新型电池化学技术，包括固态、锂空气和长时间储存等概念。 • 支持研究不同应用的企业、国家和实验室的研究人员相互交流。 • 资助开放使用的示范装置（例如，测试二氧化碳高捕捉率的燃料电池配置，包括直接空气捕捉）。 • 支持能够处理较高氢气混合比例的最终用途设备的开发和升级。
顾全价值链中各个环节	• 继续扩大为制造商提供的财政支持。支持对电解装置和燃料电池的自动化制造工艺进行开发。 • 实施车辆更迭方案，加快电动车（包括插电式混动车）的普及。	• 提出愿景，分行业描绘国家创新在此类技术未来价值链中的角色。 • 制定行业部署标准和目标，打造一个又一个连续的利基市场。

[34] 电力、燃料或热能等各个技术中，不同技术族群的单元规模都以能量单位衡量，指的是能量吞吐能力。

国际能源署。保留所有权利。

	保持整个创新体系不脱离正轨	通过投资重塑未来
	• 通过公共采购购买燃料电池货车或电动垃圾车等低碳气体和市政车辆。	• 随着电化学装置制造规模加大，确保及时投资，以保护其关键材料（锂、铂等）的供应链。 • 支持对电解装置和燃料电池的自动化制造工艺进行开发。
建设使能基础设施	• 支持在电网中部署电池。 • 资助或激励对天然气管网进行改造，使其能够接收氢气。扩大电动车充电和加氢。	• 开展实地试验，测试电池和电解装置在不同电力市场环境中的性能。
做出全球努力实现区域成功	• 加快协调跨国标准、法规和认证的努力。 • 做出区域努力，确保不同辖区的购买激励措施能够加强市场创造能力，从而在预算压力下提高政策效率。 • 探索国际融资方案，以保持新兴市场的研发和推广沿着正轨推进。	• 依托现有的多边平台，加强国家和行业之间的知识共享。

2.二氧化碳捕捉：将二氧化碳从工业和电力部门的排放或从空气中分离出来的工艺流程

- 技术类型实例：配有二氧化碳捕捉的天然气重整、化石燃料废气的化学吸收、直接空气捕捉、水泥排放的化学吸收、提高二氧化碳浓度的工艺流程再配置、新型捕捉方法。
- 本族群的相关价值链类型：CCUS、氢能、电气化和配有 CCUS 设备的工厂生产生物能源。
- 最难减排的相关行业：水泥、钢铁、化工、使用氢能或抵扣的长途交通运输。
- 摘要：只要当地条件支持较高的项目成功率，就要采取行动保持项目不脱离正轨；并且提高工业界和投资者对未来排放监管的预期。
- 关键属性：

国际能源署。保留所有权利。

单元规模	模块化程度	价值链复杂程度	价值链成熟度	消费者附加价值
• 50 兆瓦至 500 兆瓦 • （固体直接空气捕捉为 15 千瓦）	• 低 • （不过，有些直接空气捕捉燃料电池方案模块化程度更高）	• 高（CCUS） • 中（直接空气捕捉）	• 低（专用二氧化碳封存）至 • 中（配备长期监测的强化采油）	• 低

- 针对本技术族群的政策建议：

	保持整个创新体系不脱离正轨	通过投资重塑未来
设定优先事项、跟踪并调整	• 委托进行下列方面的研究：此类技术的工业和研发总体状况，以及当地技能和能力空白。	• 确定未来十年的研发优先事项。 • 通过创建研究网络、交流和联合计划支持溢出效应。
推进公共研发和市场引导的民间创新	• 维持研发预算，召集公共资金资助的研究人员交流最新项目的研究成果。 • 扶持有生命力的创新型初创企业和中小企业克服流动性挑战。 • 将条件和脱碳目标纳入向重工业、航空或航运提供的任何支持中。 • 考虑向能源、工业、交通运输等相关行业中实力受创的大型工业企业提供贷款，以维持其研发预算，并有力地将其导向商业规模 CCUS（包括直接空气捕捉）。	• 增加公共研发支出，用于研发二氧化碳捕捉新技术，特别是模块化方法和捕捉率很高的方法。 • 力争加强碳定价制度等气候政策，并扩大其行业覆盖面，确保行业有动机通过 BECCS 和直接空气捕捉来清除二氧化碳。
顾全价值链中各个环节	• 通过公共采购购买配备 CCUS 的工厂生产的低碳氢、低碳建筑材料和生物乙醇。	• 提出愿景，分行业描绘地方创新在工业领域和合成燃料领域的二氧化碳捕捉未来价值链中的角色。 • 确保在合成燃料价值链中，生物能源二氧化碳捕捉和直接空气捕捉方面不落后。

国际能源署。保留所有权利。

	保持整个创新体系不脱离正轨	通过投资重塑未来
		• 制定行业低碳产品和燃料的部署标准和目标（例如低碳燃料标准），打造一个又一个连续的利基市场。
建设使能基础设施	• 考虑填补有可能被推迟或失败的大规模项目的融资缺口，并在监管期限或价值链风险可能威胁到项目生命力的情况下，考虑调整期限或解决风险。 • 扩大对二氧化碳封存设施探索和启用工作的现有资助，并加强对所有相关工业设施附近的二氧化碳封存方案和二氧化碳运输基础设施的详细研究。 • 改造天然气管网，使其能够接收氢气。	• 做出投资，将新的二氧化碳封存设施和管道推上产业集群附近的市场。 • 向净零排放的关键行业（包括生物能源）中准备运营大型二氧化碳捕捉厂的项目提供运营支持（可交易额度、税收抵免、差异合同）。 • 提供资本支持扩大直接空气捕捉规模。
做出全球努力实现区域成功	• 做出区域努力，减少可用的二氧化碳封存设施被延迟的市场风险，例如，可以在北海协调建立封存点。 • 将二氧化碳捕捉确定为全球公益挑战，并设立相关的国际“任务”和奖项。	• 依托现有的多边平台，加强国家和行业之间的知识共享。 • 加大努力发展与差别排放定价制度相一致的低碳产品国际市场。 • 在具有适当能源资源和二氧化碳封存潜力的新兴市场，开展国际直接空气捕捉合作项目。

3.催化：将生物质和二氧化碳转化为产品的更高效的工业工艺流程

- 技术类型实例：甲烷化、甲烷裂解、液体燃料合成、多糖水解、藻类加工、化学储氢、生物和二氧化碳大宗化学品、氨裂解、人工光合作用。
- 本族群的相关价值链类型：生物能源、化学品、氢基合成燃料。
- 最难减排的相关行业：长途交通运输；高温工业工艺流程。
- 摘要：加紧努力寻求突破，引导化工和生物技术行业的巨大研发能力向净零排放挑战迈进。
- 关键属性：

国际能源署。保留所有权利。

单元规模	模块化程度	价值链复杂程度	价值链成熟度	消费者附加价值
• 50 兆瓦至 100 兆瓦	• 中	• 高（依赖上游和下游的不确定发展）	• 低（以二氧化碳为基础的产品和燃料）至 • 中（先进生物燃料）	• 低至中

- 针对本技术族群的政策建议：

	保持整个创新体系不脱离正轨	通过投资重塑未来
设定优先事项、跟踪并调整	• 委托进行下列方面的研究：此类技术的工业和研发总体状况，以及当地技能和能力空白。 • 宣传能源相关研发挑战的重要性和盈利能力（与竞争生物技术人才的其他行业相比较）。	• 与化学催化和生物技术专家合作，确定未来十年的研发优先事项。 • 通过创建研究网络、交流和联合计划支持溢出效应。
推进公共研发和市场引导的民间创新	• 维持研发预算，支持毕业生，并且跨行业召集公共资金资助的研究人员交流二氧化碳和能源相关最新项目的研究成果。考虑资助研究人员之间的跨行业交流。 • 扶持有生命力的创新型初创企业和中小企业克服流动性挑战。 • 将条件和脱碳目标纳入向燃料供应和交通运输行业企业提供的任何直接支持中。	• 增加公共研发支出，用于支持与工业界联系密切的化学和生物化学催化示范中心。 • 设立悬赏奖，奖励有助于攻克关键挑战的催化性能改进，例如二氧化碳还原、甲烷裂解或纤维素水解。 • 制定以下领域的标准和目标，以支持利基市场：在燃料供应中部署低碳液体（可持续生物燃料和合成氢基燃料），以及在天然气管网中部署低碳气体（包括生物甲烷、氢气和合成甲烷）。
顾全价值链中各个环节	• 保留现有成功政策，以确保对可持续生物燃料的需求，在低油价、交通运输量降低的当前时期支持现有生产设施。	• 确保生物能源和直接空气捕捉开发中缓慢的二氧化碳捕捉不会阻碍合成燃料部署进度。 • 支持氨作为发电燃料和储氢介质的新示范项目。

国际能源署。保留所有权利。

	保持整个创新体系不脱离正轨	通过投资重塑未来
	• 从正在开发的二氧化碳捕捉、电解和合成燃料生产（包括合成氨）项目中，寻找效率提升空间和相互协同作用，以管理较高的价值链风险。	
建设使能基础设施	• 考虑填补有可能被推迟或失败的先进生物燃料设施建设的融资缺口。	• 资助测试设施，用于对甲烷裂解、氨裂解、海藻生物燃料等竞争性方案开展试验，并公布试验结果。
做出全球努力实现区域成功	• 将填补关键创新空白确定为全球公益挑战，并设立相关的国际“任务”和奖项。 • 支持研究类似技术问题的研究人员和初创企业之间的跨国知识交流计划。	• 依托现有的多边平台，加强国家和行业之间的知识共享。 • 加大努力发展与差别认证和排放定价制度相一致的低碳燃料和气体国际市场。 • 确保可持续生物燃料的研发侧重于可获得性最强、因而能够促进净零排放的原料类型。

4.供热和制冷：高效灵活的电气化设计

- 技术类型实例：热泵、高效空调、先进制冷剂冷却、区域供热供冷、热能储存。
- 本族群的相关价值链类型：电气化、数字化。
- 最难减排的相关行业：建筑物、工业。
- 摘要：刺激研发和溢出效应，提供更高效灵活的设计，以适应更广的应用、服务（包括灵活性）和气候条件。
- 关键属性：

单元规模	模块化程度	价值链复杂程度	价值链成熟度	消费者附加价值
• 1 千瓦至 5 兆瓦	• 高（区域能源除外）	• 低	• 高	• 中至高

国际能源署。保留所有权利。

- 针对本技术族群的政策建议：

	保持整个创新体系不脱离正轨	通过投资重塑未来
设定优先事项、跟踪并调整	• 委托进行下列方面的研究：此类技术的工业和研发总体状况，以及当地技能和能力空白。	• 确定未来十年的研发优先事项。 • 通过创建研究网络、交流和联合计划支持溢出效应。
推进公共研发资助和市场引导的民间创新	• 维持研发预算，召集公共资金资助的研究人员交流最新项目的研究成果。 • 考虑向相关行业中实力受创的大型工业企业提供贷款，以维持其研发预算，并有力地将其导向能效改善。 • 将建筑物翻新的条件纳入对部署高效供热供冷设备的任何支持中。 • 制定或加强产品标签和性能标准，以刺激市场普及。	• 增加公共研发支出，用于研发下一代部件、膜蒸发制冷和干燥剂、固态制冷技术，以及紧凑型供热、制冷、通风和蓄热集成解决方案，包括专门用于替代化石燃料锅炉的产品。 • 为设备性能标准设定长期预期，并提供优惠贷款或其他形式的资本，支持扩大制造或转型为制造效率和性能超出监管前沿的电器。
顾全价值链中各个环节	• 支持智能控制和商业模式部署，以便家庭、区域能源网络运营商和产业能够提供灵活性，通过需求侧响应和蓄热促进可变可再生能源并网。	• 为光伏、热泵和储存等一体化设计提供购买激励资金。
建设使能基础设施	• 升级现有的区域供热网络，以提高其性能，并纳入替代性低碳能源。 • 支持试点项目，测试第三方接入区域供热供冷网络的新法规和商业模式。	• 制定超高效区域能源网络部署标准和目标，打造一个又一个连续的利基市场。 • 资助实地试验，测试热泵和空调运行配合需求响应激励措施的能力。
做出全球努力实现区域成功	• 加快协调跨国标准、法规和认证的努力。 • 做出区域努力，确保不同辖区的购买激励措施能够加强市场创造能力，从而在预算压力下提高政策效率。 • 将超高效空间供热制冷确定为全球公益挑战，并设立或强化相关的国际“任务”和奖项。	• 依托现有的多边平台，加强国家和行业之间的知识共享。 • 在气候相似地区的邻国之间探索如何协调标准和公共采购。 • 促进改善测试程序以及（如有可能）改善智能电表数据，以反映实际使用时的作业条件，并缩小设备书面性能与实际性能之间的差距。

国际能源署。保留所有权利。

5.轻量化：复合材料及其在风能和车辆中的集成

- 技术类型和材料实例：碳纤维增强聚合物、3D 打印。
- 本族群的相关价值链类型：电气化、氢能和氢基燃料，以及生物能源（通过使燃料负荷的成本降低）。
- 最难减排的相关行业：长途交通运输、高耗能行业（通过低成本风能）。
- 摘要：采取行动支持研发并促进多种应用之间的溢出效应，以降低成本，提高不同价值链的竞争力。
- 关键属性：

单元规模	模块化程度	价值链复杂程度	价值链成熟度	消费者附加价值
• 任何规模	• 不适用	• 低	• 高	• 中

- 针对本技术族群的政策建议：

	保持整个创新体系不脱离正轨	通过投资重塑未来
设定优先事项、跟踪并调整	• 委托进行下列方面的研究：此类技术的工业和研发总体状况，以及当地技能和能力空白。	• 确定未来十年的研发优先事项。 • 通过为轻质材料各应用相关行为体创建研究网络、交流和联合计划，支持溢出效应。
推进公共研发资助和市场引导的民间创新	• 维持研发预算，召集公共资金资助的研究人员交流最新项目的研究成果。 • 将条件和脱碳目标纳入向公路交通运输企业提供的任何直接支持措施中。 • 维持公路交通运输的燃料经济性标准，并发出加强公路交通运输和航空燃料标准的信号。	• 增加公共研发支出，用于研发新型前驱体和替代碳纤维生产工艺流程、将碳纤维转化为碳纤维增强聚合物的快速固化和自动化工艺流程，以及先进回收利用工艺流程。
顾全价值链中各个环节	• 支持交流和联合计划，在制造商对电动车或风机设计的研究与材料生产商改善材料性能的研发之间建立起联系。	• 提出愿景，分行业描绘地方创新在此类技术未来价值链中的角色，包括降低碳纤维增强聚合物生产和回收利用的二氧化碳强度，以及其他报废管理策略。 • 制定不同行业中鼓励轻量化的标准和目标，打造一个又一个连续的利基市场。

国际能源署。保留所有权利。

	保持整个创新体系不脱离正轨	通过投资重塑未来
建设使能基础设施	• 扩大电动车充电和加氢，支持交通运输电气化。 • 扩大能够连接远处海上风机的传输网络，并激励叶片轻量化。	• 考虑投资 3D 打印新设施和配套通信基础设施，以支持未来轻量化领域的创新。 • 探索开发碳纤维回收利用网络，包括收集、分离和加工设施。
做出全球努力实现区域成功	• 加快协调跨国标准、法规和认证的努力。	• 依托现有的多边平台，加强国家和行业之间的知识共享。

6.数字化：使能源系统灵活高效的数据和通信集成

- 技术类型实例：用于能效监测、基线测量和计费的传感器；智能家居系统；排放审计；用于交通运输和物流管理处理、智能充电、智能管理区域供热系统等的大数据、机器学习和人工智能；分布式账本和区块链；智能合约；分布式电网管理。
- 本族群的相关价值链类型：电气化。
- 最难减排的相关行业：建筑物、工业、长途交通运输。
- 摘要：引导数字能力和创造力的指数级增长，以应对能源系统的挑战，让能源使用者参与进来，并将其与市场无缝连接。
- 关键属性：

单元规模	模块化程度	价值链复杂程度	价值链成熟度	消费者附加价值
• 1 毫瓦至 10 千瓦	• 高	• 中	• 低至中	• 高

国际能源署。保留所有权利。

- 针对本技术族群的政策建议：

	保持整个创新体系不脱离正轨	通过投资重塑未来
设定优先事项、跟踪并调整	• 委托进行下列方面的研究：此类技术的机遇，以及当地技能和能力空白。 • 宣传能源相关研发挑战的重要性和盈利能力（与竞争数字人才的其他行业相比较）。 • 召集机器学习和人工智能（例如在自动车辆方面）领域的领导者，制定填补关键能源创新空白的路线图。	• 投资于技术跟踪能力，使政策决策者和监管人员能够随时了解数据收集和处理的最新进展。
推进公共研发和市场引导的民间创新	• 维持传感器和电网控制等使能硬件的研发预算，并且支持具有宝贵技能的毕业生留在本行业。 • 扶持有生命力的创新型初创企业和中小企业克服流动性挑战。 • 协助受监管公用事业企业试点有前途的网络和市场管理新型数字技术（例如通过监管沙盒和创新基金）。	• 设立悬赏奖，激励数字企业和研究人员攻克该领域的挑战，如分散式电网控制、连接到大型电网的微型电网的分布式账本、能源服务合同的履行形况和证券化、需求响应、排放定价和交易，以及燃料碳强度核算等。
顾全价值链中各个环节	• 推动电力市场完善，以实现更多基于地点和时间的价格信号。	• 找出物理性能和数字技术潜力之间的空白，并酌情激励资产所有者升级物理设备，如电力工程设备。 • 推进激励燃料碳强度认证和需求响应等领域创新的市场机制。
建设使能基础设施	• 确保刺激措施下的能效和能源网络投资中纳入前瞻性数字设备，如传感器和高带宽通信。	• 投资基础设施，允许创新型智能软硬件领域的公共和私营部门研究人员利用大型开放使用的示范设施进行受控试验，以便能够公开发表竞争性解决方案的比较结果。智能充电、交通运输、电网管理、智能家居和分布式市场都将是合适的应用。 • 实施一项多年计划，为电力、燃气和热力网络的数字化使能基础设施募集投资。 • 制定措施，激励受监管实体迅速测试长期可为消费者省钱的创新型解决方案。

国际能源署。保留所有权利。

	保持整个创新体系不脱离正轨	通过投资重塑未来
做出区域努力实现当地成功	• 支持研究类似技术问题的研究人员和初创企业之间的跨国知识交流计划。	• 建立示范网络，支持对不同行业的绩效进行同类比较。 • 依托现有的多边平台，加强国家和行业之间的知识共享。 • 加大努力发展与差别认证和排放定价制度相一致的低碳燃料和气体国际市场。 • 针对发展中地区远程离网市场，协调开放使用协议、标准和解决方案方面的工作。

参考文献

Aldy, J.E. (2013), “A preliminary assessment of the American Recovery and Reinvestment Act’s Clean Energy Package”, *Review of Environmental Economics and Policy,* pp. 136-155.

CEA (Council of Economic Advisors) (2010), “The economic impact of the American Recovery and Reinvestment Act of 2009: Second quarterly report”, CEA, https://obamawhitehouse.archives.gov/sites/default/files/microsites/100113-economic-impact-arra-second-quarterly-report.pdf.

Deutscher Bundestag (2009), Draft to ensure employment and stability in Germany, [Entwurf eines Gesetzes zur Sicherung von Beschäftigung und Stabilität in Deutschland], http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/16/118/1611825.pdf

EC (European Commission) (2018), *On the implementation of the European Energy Programme for Recovery and the European Energy Efficiency Fund*, EC, Brussels, https://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/1/2020/EN/COM-2020-38-F1-EN-ANNEX-1-PART-1.PDF.

Gallagher, K.S. and L.D. Anadon (2017), *DOE Budget Authority for Energy Research, Development, and Demonstration Database,* Tufts University, University of Cambridge, Harvard Kennedy School.

Government of Canada (2014), *Evaluation of the Clean Energy Fund* (CEF).

Herzog, H. (2016), “Lessons learned from CCS demonstration and large pilot projects”, *MIT Energy Initiative Working Paper*.

国际能源署。保留所有权利。

Hybrit (2020), “Hybrit – towards fossil-free steel”, Hybrit, www.hybritdevelopment.com.

IEA (International Energy Agency) (2020a), *Energy Technology RD&D Budgets 2020* (database), IEA, Paris, https://www.iea.org/reports/energy-technology-rdd-budgets-2020.

IEA (2020b), World Energy Outlook Special Report on Sustainable Recovery, IEA, Paris.

IEA (2016), *Global EV Outlook 2016*, IEA, Paris.

Kröger, M. et al.(2020), A Green New Deal after Corona: What We Can Learn from the Financial Crisis, DIW Berlin.

OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) (2020), “R&D personel by sector and major field of R&D”, *OECD.Stat* (database), https://stats.oecd.org (accessed on 13 June 2020).

Schmidt, S. et al.(2009), Sind die deutschen Konjunktur Programme nachhaltig, FÖS Studie.

SSAB (2020), “SSAB, LKAB and Vattenfall are one step closer to producing fossil-free steel on an industrial scale”, press release, https://www.ssab.com/news/2020/06/ssab-lkab-and-vattenfall-one-step-closer-to-production-of-fossilfree-steel-on-an-industrial-scale.

US DoE (US Department of Energy) (2020a), *SmartGrid.gov Recovery Act project information*, https://www.smartgrid.gov/projects (accessed on 24 April 2020).

US DoE (2020b), *ARPA-E projects,* https://arpa-e.energy.gov/?q=project-listing (accessed on 12 June 2020.

US DoE (2020c), Loans Program Office.Portfolio projects by technology.

https://www.energy.gov/lpo/portfolio/portfolio-projects-technology

US DoE (2020d), *SmartGrid.gov Recovery Act: regional demonstration projects,* https://www.smartgrid.gov/recovery_act/program_impacts/regional_demonstration_technology_performance_reports.html (accessed on 24 April 2020).

US DoE (2015), Revolution…Now.The future arrives for five clean energy technologies - 2015 update, US DoE, Washington, DC.

Walsh, J., J. Bivens and E. Pollack (2011), “Rebuilding green: The American Recovery and Reinvestment Act and the Green Economy”.

国际能源署。保留所有权利。

附录

缩略语和缩写词

ARPA-E	能源高级研究计划署
AUD	澳大利亚元
BECCS	生物能源与碳捕捉和封存
BICS	彭博行业分类标准
CAD	加拿大元
CCS	碳捕捉和封存
CCUS	碳捕捉、利用和封存
CO_2	二氧化碳
CCGTs	联合循环燃气轮机
CFRP	碳纤维增强塑料
DAC	直接空气捕捉
EOR	强化采油
ESA	变电吸附
ETP	能源技术展望
EU	欧盟
EUR	欧元
EV	电动车
FCEV	燃料电池电动车
FIC	加速创新情景
GBP	英镑
GDP	国内生产总值
H_2	氢
ICT	信息和通信技术
IEA	国际能源署
IPCC	政府间气候变化专门委员会

国际能源署。保留所有权利。

ISIC	国际标准行业分类
LED	发光二极管
Li-air	锂空气
Li-ion	锂离子
Li-S	锂硫
LPG	液化石油气
NACE	欧洲共同体内部经济活动统计分类
NASA	美国国家航空和航天局
OECD	经济合作与发展组织
PEM	聚合物电解质膜
PV	光伏
R&D	研发
RD&D	研发和部署
SDG	可持续发展目标
SDS	可持续发展情景
SME	中小企业
STARC-ABL	后置边界层推进器单通道涡轮发电飞机
STEPS	既定政策情景
S&T	科技
TRL	技术成熟度
US	美国
USD	美元
US DoE	美国能源部
VC	风险投资

计量单位

GJ	吉焦
GJ/t	吉焦/吨
Gt	吉吨
$GtCO_2$	吉吨二氧化碳

国际能源署。保留所有权利。

GW	吉瓦
GWh	吉瓦时
GWh/yr	吉瓦时/年
kt	公制千吨
kW	千瓦
Mt	兆吨
Mt	百万吨
Mt/yr	兆吨/年
$MtCO_2$	兆吨二氧化碳
$MtCO_2/yr$	兆吨二氧化碳/年
Mtoe	百万吨油当量
MW	兆瓦
MWh	兆瓦时
tCO_2	吨二氧化碳
TW	太瓦
TWh	太瓦时
USD/kg	美元/千克
W	瓦
Wh/kg	瓦时/千克

国际能源署。保留所有权利。

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY

The IEA examines the full spectrum of energy issues including oil, gas and coal supply and demand, renewable energy technologies, electricity markets, energy efficiency, access to energy, demand side management and much more. Through its work, the IEA advocates policies that will enhance the reliability, affordability and sustainability of energy in its 30 member countries, 8 association countries and beyond.

IEA member countries:

Australia
Austria
Belgium
Canada
Czech Republic
Denmark
Estonia
Finland
France
Germany
Greece
Hungary
Ireland
Italy
Japan
Korea
Luxembourg
Mexico
Netherlands
New Zealand
Norway
Poland
Portugal
Slovak Republic
Spain
Sweden
Switzerland
Turkey
United Kingdom
United States

The European Commission also participates in the work of the IEA

IEA association countries:

Brazil
China
India
Indonesia
Morocco
Singapore
South Africa
Thailand

Please note that this publication is subject to specific restrictions that limit its use and distribution. The terms and conditions are available online at www.iea.org/t&c/

This publication and any map included herein are without prejudice to the status of or sovereignty over any territory, to the delimitation of international frontiers and boundaries and to the name of any territory, city or area.

Source: IEA. All rights reserved.
International Energy Agency
Website: www.iea.org

Chinese translation of Energy Technology Perspectives 2020 – Special Report on Clean Energy Innovation
此执行摘要原文用英语发表。虽然国际能源署尽力确保中文译文忠实于英文原文，但仍难免略有差异。此中文译文仅供参考。

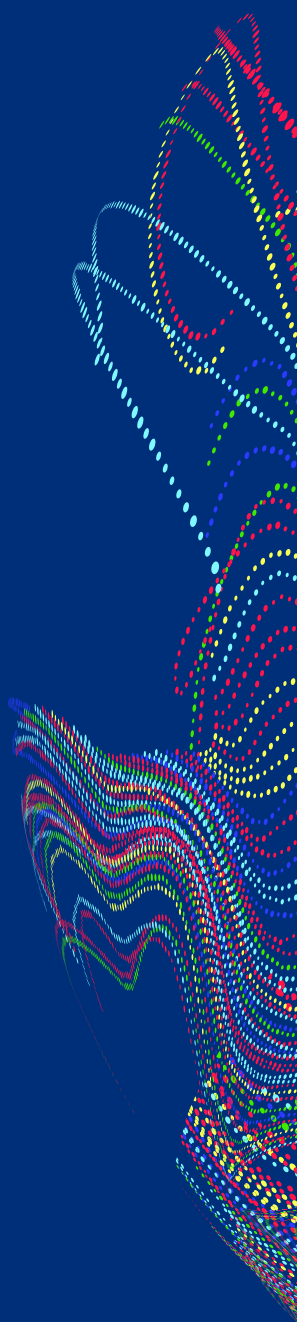
No reproduction, translation or other use of this publication, or any portion thereof, may be made without prior written permission. Applications should be sent to: rights@iea.org

This publication reflects the views of the IEA Secretariat but does not necessarily reflect those of individual IEA member countries. The IEA makes no representation or warranty, express or implied, in respect of the publication's contents (including its completeness or accuracy) and shall not be responsible for any use of, or reliance on, the publication. Unless otherwise indicated, all material presented in figures and tables is derived from IEA data and analysis.

This publication and any map included herein are without prejudice to the status of or sovereignty over any territory, to the delimitation of international frontiers and boundaries and to the name of any territory, city or area.

* The statistical data for Israel are supplied by and under the responsibility of the relevant Israeli authorities. The use of such data by the OECD is without prejudice to the status of the Golan Heights, East Jerusalem and Israeli settlements in the West Bank under the terms of international law.

IEA. All rights reserved.

IEA Publications
International Energy Agency
Website: www.iea.org
Contact information: www.iea.org/about/contact

Typeset in France by IEA - March 2021
Cover design: IEA
Photo credits: © Shutterstock