

全球能源部门 2050年 净零排放 路线图

International
Energy Agency

iea

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.

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.

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

气候危机是我们这个时代面临的巨大挑战，国际社会努力解决气候危机的决定性时刻即将到来。虽然越来越多的国家承诺在本世纪中叶或之后不久达到净零排放，但全球温室气体排放量也在不断增加。要想在 2050 年实现净零排放并将全球气温上升控制在 1.5°C 以内，我们必须信守承诺、言出必行。

要达成目标，支撑经济的能源系统全面转型势在必行。我们目前所处的时期，正是对上述努力而言最关键的十年的开局之年。将于 11 月举行的《联合国气候变化框架公约》第 26 次缔约方会议（COP26），是在 2015 年《巴黎协定》的基础上加强全球气候雄心和行动的焦点。国际能源署（IEA）一直大力支持英国政府担任 COP26 主席国，以期取得我们世界所需的成功。今年 3 月，我很高兴与 COP26 主席阿洛克·夏尔马（Alok Sharma）共同主持了 IEA-COP26 净零峰会；会上，40 多个国家的最高级能源和气候领导人强调了推动清洁能源转型的全球势头。

峰会上的讨论为本特别报告提供了素材；尤其值得一提的是，国际能源署提出的“实现净零排放的七项原则”，现已获得 22 个成员国政府的支持。本报告对于全球能源部门如何在 2050 年前实现净零排放提出了设想。我相信本报告，即《全球能源部门 2050 年净零排放路线图》，是国际能源署有史以来最重要、最具挑战性的工作之一。该路线图代表了国际能源署在能源数据建模方面开创性工作的最新成就，首次将《世界能源展望》和《能源技术展望》这两个旗舰系列中的复杂模型结合起来。它将指导国际能源署的工作，并将成为这两个系列在未来的有机组成部分。

尽管目前排放方面的言辞与现实之间存在差距，但我们的路线图显示，仍然有多种路径可以在 2050 年前实现净零排放。在分析中，我们关注的是技术上最可行、成本效益最高、社会上最能接受的一种路径。即便如此，这条路径仍然狭窄、充满挑战，需要政府、企业、投资者、公民等所有利益攸关方从今天开始每年都采取行动，才能实现目标。

本报告列出了总计 400 多项清晰的里程碑，涵盖了所有部门和技术，说明了需要在何时做成何事，以将全球经济的主要驱动能源从化石燃料转变为太阳能、风能等可再生能源。我们的路径需要大量的投资、创新、巧妙政策设计和实施、技术部署、基础设施建设、国际合作，以及许多其他领域的努力。

国际能源署自 1974 年成立以来，核心任务之一就是促进能源供应安全和可负担性，以期推动经济增长。这一核心任务也是我们路线图的主要关注点，路线图借鉴了我们的国际货币基金组织和国际应用系统分析研究所合作开展的特别分析。该分析表明，能源系统转型这项巨大的挑战，对经济而言可能是极大的机遇，有潜力创造数百万新就业机会，助推经济增长。

路线图的另一指导原则是：清洁能源转型必须公平、包容，不能落下任何人。我们必须确保发展中经济体获得所需的资金和技术知识，以继续建设其能源系统，通过可持续的方式满足其不断增长的人口和经济的需求。为目前无电可用的数亿人（大多数在非洲）提供电力，是道义上的当务之急。

净零转型以人为本、服务于人。最重要的是，要清醒地认识到，不是每一个化石燃料行业的工人都能轻松转岗进入清洁能源领域，所以政府需要加强培训、投入资源，助力创造新的机会。转型的全程中，必须让公民积极参与，让他们感到自己是推动转型

的一部分，而不是被迫接受转型。我于 2021 年初召集的“以人为本清洁能源转型全球委员会”正在探讨上述主题，研究如何使公民从机遇中受益，并有效应对清洁能源经济转型带来的不良影响。全球委员会由丹麦首相梅特·弗雷泽里克森领导，成员包括政府领导人、部长和知名思想家，将在 11 月的 COP26 会议之前公布其主要建议。

路线图中描绘的路径是全球性的，但各国需要根据国情制定自己的战略。实现清洁能源转型，没有放之四海而皆准的方法。相关规划需要反映各国不同的经济发展阶段：在我们的路径中，发达经济体将比发展中经济体更早实现净零。国际能源署作为世界领先的能源机构，随时准备为各国政府提供支持和建议，帮助他们制定和实施各自的路线图；并且，鉴于国际合作对 2050 年实现净零排放至关重要，国际能源署还鼓励跨部门国际合作。

这份具有里程碑意义的报告的完成，离不开国际能源署同事们的非凡的敬业精神和不懈的努力和严谨的工作。我要感谢 Laura Cozzi 和 Timur Gül 两位优秀同事领导下的整个团队。

世界前方是一项巨大的挑战：在 2050 年之前，将净零排放从可能性较小的情况变成切实可达的现实。随着各经济体从去年新冠疫情引起的冲击中恢复，全球二氧化碳排放量已经开始大幅反弹。各国政府亟需采取行动，迎头赶上耽误的进度，果断加速清洁能源转型。

国际能源署致力于领导相关工作，本报告的撰写就是一个实例。

法提赫·比罗尔博士
国际能源署 署长

本项研究是国际能源署各部门合作的成果，由世界能源展望小组和能源技术展望小组编撰，由首席能源建模师兼能源需求展望部主任 **Laura Cozzi** 和能源技术政策部主任 **Timur Gül** 设计和指导。

主要作者和协调人包括：**Stéphanie Bouckaert**、**Araceli Fernandez Pales**、**Christophe McGlade**、**Uwe Remme**，以及 **Brent Wanner**。首席经济师 **Laszlo Varro** 以及 **Davide D'Ambrosio** 和 **Thomas Spencer** 也是核心团队的成员。

其他主要作者有：**Thibaut Abergel**（建筑物）、**Yasmine Arsalane**（经济展望、电力）、**Praveen Bains**（生物燃料）、**Jose Miguel Bermudez Menendez**（氢能）、**Elizabeth Connolly**（交通运输）、**Daniel Crow**（行为）、**Amrita Dasgupta**（创新）、**Chiara Delmastro**（建筑物）、**Timothy Goodson**（建筑物、生物能源）、**Alexandre Gouy**（工业）、**Paul Hugues**（工业）、**Lilly Lee**（交通运输）、**Peter Levi**（工业）、**Hana Mandova**（工业）、**Ariane Millot**（建筑物）、**Paweł Olejarnik**（化石燃料供应）、**Leonardo Paoli**（创新、交通运输）、**Faidon Papadimoulis**（数据管理）、**Sebastian Papapanagiotou**（电力网络）、**Francesco Pavan**（氢能）、**Apostolos Petropoulos**（交通运输）、**Ryszard Pośpiech**（数据管理）、**Leonie Staas**（行为、工业）、**Jacopo Tattini**（交通运输）、**Jacob Teter**（交通运输）、**Gianluca Tonolo**（能源普及）、**Tiffany Vass**（工业），以及 **Daniel Wetzel**（就业）。其他贡献者包括：**Lucila Arboleya Sarazola**、**Simon Bennett**、**Cyril Cassisa**、**Arthur Contejean**、**Musa Erdogan**、**Enrique Gutierrez Tavarez**、**Taku Hasegawa**、**Shai Hassid**、**Zoe Hungerford**、**Tae-Yoon Kim**、**Vanessa Koh**、**Luca Lo Re**、**Christopher Lowans**、**Raimund Malischek**、**Mariachiara Polisenia**，以及 **Per Anders Widell**。

Caroline Abettan、**Teresa Coon**、**Marina Dos Santo**、**Marie Fournier-S'niehotta**、**Reka Koczka** 和 **Diana Louis** 提供了必要支持。

Edmund Hosker 负责编辑，**Debra Justus** 担任文本编辑。

国际货币基金组织（IMF），特别是 **Benjamin Hunt**、**Florence Jaumotte**、**Jared Thomas Bebee** 和 **Susanna Mursula**，与国际能源署合作提供宏观经济分析。国际应用系统分析研究所（IIASA），特别是 **Peter Rafaj**、**Gregor Kiesewetter**、**Wolfgang Schöpp**、**Chris Heyes**、**Zbigniew Klimont**、**Pallav Purohit**、**Laura Warnecke**、**Binh Nguyen**、**Nicklas Forsell**、**Stefan Frank**、**Petr Havlik** 和 **Mykola Gusti**，与国际能源署合作提供土地利用相关空气污染和温室气体排放的分析和有关指标。

国际能源署的其他高级管理人员和众多同事提供了宝贵的评论和反馈，特别是 **Keisuke Sadamori**、**Mechthild Wörsdörfer**、**Amos Bromhead**、**Dan Dorner**、**Nick Johnstone**、**Pascal Laffont**、**Toril Bosoni**、**Peter Fraser**、**Paolo Frankl**、**Tim Gould**、**Tom Howes**、**Brian Motherway**、**Aad van Bohemen**、**César Alejandro Hernández**、**Samantha McCulloch**、**Sara Moarif**、**Heymi Bahar**、**Adam Baylin-Stern**、**Niels Berghout**、**Sara Budinis**、**Jean-Baptiste Dubreuil**、**Carlos Fernández Alvarez**、**Ilkka Hannula**、**Jeremy Moorhouse**，以及 **Stefan Lorenczik**。

为分析工作提供了宝贵意见的人员有：**Trevor Morgan**（独立顾问）和 **David Wilkinson**（独立顾问）。

感谢国际能源署传播和数字办公室（CDO），特别是办公室负责人 Jad Mouawad，以及 Astrid Dumond、Jon Custer、Tanya Dyhin、Merve Erdil、Grace Gordon、Christopher Gully、Jethro Mullen、Julie Puech、Rob Stone、Gregory Viscusi、Therese Walsh 和 Wonjik Yang，在报告制作和推广以及网站材料方面的协助。

最后，感谢国际能源署信息系统单元的 Ivo Letra 在报告制作过程中提供的必要支持；并感谢国际能源署法律顾问办公室、管理和行政办公室，以及能源数据中心在本报告编写过程中各自提供的协助。

同行评审员

许多高级政府官员和国际专家提供了意见并审阅了报告的草稿。他们的评论和建议非常有价值。这些人员包括：

Aimee Aguilar Jaber	经济合作与发展组织（OECD）
Keigo Akimoto	日本地球创新技术研究所
Doug Arent	美国国家可再生能源实验室（NREL）
Daniel Balog	匈牙利常驻经合组织代表团
Georg Bäuml	大众汽车
Harmeet Bawa	日立 ABB 电网
Pete Betts	英国格兰瑟姆气候变化与环境研究所
Sama Bilbao y Leon	世界核协会
Diane Cameron	核能署（NEA）
Rebecca Collyer	欧洲气候基金会
Russell Conklin	美国能源部
François Dassa	法国电力
Jelte de Jong	荷兰经济事务与气候政策部
Carl de Maré	安赛乐米塔尔集团
Guillaume De Smedt	液化空气集团
Agustin Delgado	伊维尔德罗拉公司
Johanna Fiksdahl	挪威常驻经合组织代表团
Alan Finkel	澳大利亚政府低排放技术特别顾问
Niklas Forsell	国际应用系统分析研究所（IIASA）
James Foster	英国商业、能源和产业战略部
Hiroyuki Fukui	丰田
Rosanna Fusco	埃尼
李高	中华人民共和国生态环境部
François Gautier	法国常驻经合组织代表团
Oliver Geden	德国国际与安全事务研究所
Dolf Gielen	国际可再生能源署（IRENA）
Francesca Gostinelli	意大利国家电力公司
Jae H. Jung	大韩民国外交部
Michael Hackethal	德国经济事务和产业部
Peter Wood	壳牌

Selwin Hart	联合国
Jacob Herbers	美国能源部
Takashi Hongo	日本三井物产战略研究所
Christina Hood	新西兰 Compass Climate
Michael Kelly	世界液化石油气协会
David King 爵士	剑桥大学
Ken Koyama	日本能源经济研究所
Fabien Kreuzer	欧盟委员会能源总司
Joyce Lee	全球风能理事会（GWEC）
陈霖豪	中华人民共和国科学技术部
Todd Litman	加拿大维多利亚交通政策研究所
Claude Lorea	全球水泥和混凝土协会
Ritu Mathur	能源和资源研究所（TERI）
Vincent Minier	施耐德电气
Steve Nadel	美国能效经济委员会
Stefan Nowak	光伏发电系统技术合作项目（PVPS TCP）
Brian Ó Gallachóir	海洋和可再生能源爱尔兰，爱尔兰科学基金会能源、气候和海洋研究中心，科克大学
Henri Paillère	国际原子能机构（IAEA）
Yongduk Pak	韩国能源经济研究院（KEEI）
Alessandra Pastorelli	意大利常驻经合组织代表团
Jonathan Pershing	美国国务院
Glen Peters	国际气候与环境研究中心（CICERO）
Stephanie Pfeifer	机构投资者气候变化小组（IIGCC）
Cédric Philibert	独立顾问
Lynn Price	美国劳伦斯伯克利国家实验室
Andrew Purvis	世界钢铁协会
Julia Reinaud	能源突破联盟
Yamina Saheb	OpenEXP
Ignacio Santelices	智利可持续能源机构
Andreas Schäfer	伦敦大学学院
Vivian Scott	爱丁堡大学
Simon Sharpe	英国内阁办公厅
Adnan Shihab Eldin	前科威特科学促进基金会
白井俊之	日本经济产业省
Adam Sieminski	沙特阿卜杜拉国王石油研发中心（KAPSARC）
Stephan Singer	气候行动网络
Varun Sivaram	美国国务院
Jim Skea	帝国理工学院
Jeff Stehm	气候相关财务信息披露工作组
Jonathan Stern	牛津大学
Wim Thomas	独立顾问

David Turk	美国能源部
Fritjof Unander	挪威研究理事会
Rob van der Meer	欧洲水泥协会（CEMBUREAU）
Noé van Hulst	国际氢能经济和燃料电池伙伴计划（IPHE）
Tom van Ierland	欧盟委员会气候行动总司
David Victor	加州大学圣地亚哥分校
Amanda Wilson	加拿大自然资源部
Harald Winkler	开普敦大学
Markus Wolf	美国电力科学研究院（EPRI）
Markus Wråke	瑞典能源研究中心
William Zimmern	BP

对本研究做出贡献的个人和组织不对研究中的任何观点或判断负责。所有错误和疏漏完全由国际能源署负责。

本文件和其中的任何地图不影响任何领土的地位或主权，不影响国际边界的划定以及任何领土、城市或地区的名称。

欢迎读者提出评论和问题，请将意见和问题发送给：

Laura Cozzi 和 Timur Gül

可持续发展、技术与展望司
国际能源署

9, rue de la Fédération
75739 Paris Cedex 15
France

电子邮件: NZE2050@iea.org

网站: www.iea.org

前言	3
致谢	5
政策决策者摘要	13

1

已宣布的净零承诺与能源部门

27

1.1 导言	27
1.2 减排目标和净零承诺	29
1.2.1 国家自主贡献	29
1.2.2 净零排放承诺	30
1.3 既定政策情景下的排放和能源展望	33
1.3.1 二氧化碳排放	33
1.3.2 能源供应总量、终端消费总量和发电量	34
1.3.3 现有资产的排放量	36
1.4 已宣布承诺情景	37
1.4.1 二氧化碳排放	38
1.4.2 能源供应总量	39
1.4.3 终端消费总量	41
1.4.4 发电	42

2

2050 年全球二氧化碳净零排放路径

43

2.1 导言	43
2.2 情景设计	44
2.2.1 人口和 GDP	45
2.2.2 能源和二氧化碳的价格	46
2.3 二氧化碳排放	48
2.4 能源供应总量和终端能源消费总量	51
2.4.1 能源供应总量	51
2.4.2 终端消费总量	55
2.5 脱碳的关键支柱	59
2.5.1 能效	59
2.5.2 行为改变	61
2.5.3 电气化	64
2.5.4 可再生能源	67

2.5.5	氢和氢基燃料	69
2.5.6	生物能源	70
2.5.7	碳捕捉、利用和封存（CCUS）	73
2.6	投资	74
2.7	关键的不确定因素	76
2.7.1	行为改变	78
2.7.2	生物能源和土地利用变化	83
2.7.3	CCUS 用于应对化石燃料的排放	87

3

2050 年各部门实现净零排放的路径

93

3.1	导言	94
3.2	化石燃料供应	94
3.2.1	净零排放情景下的能源趋势	94
3.2.2	石油和天然气投资	97
3.2.3	来自化石燃料生产的排放	97
3.3	低排放燃料的供应	98
3.3.1	净零排放情景下的能源趋势	98
3.3.2	生物燃料	100
3.3.3	氢和氢基燃料	101
3.3.4	关键里程碑和决策点	104
3.4	电力部门	106
3.4.1	净零排放情景下的能源和排放趋势	106
3.4.2	关键里程碑和决策点	109
3.5	工业	113
3.5.1	净零排放情景下的能源和排放趋势	113
3.5.2	关键里程碑和决策点	121
3.6	交通运输	123
3.6.1	净零排放情景下的能源和排放趋势	123
3.6.2	关键里程碑和决策点	129
3.7	建筑物	132
3.7.1	净零排放情景下的能源和排放趋势	132
3.7.2	关键里程碑和决策点	138

4.1	导言	142
4.2	经济	143
4.2.1	投资和融资	143
4.2.2	经济活动	145
4.2.3	就业	147
4.3	能源产业	149
4.3.1	石油和天然气	149
4.3.2	煤炭	151
4.3.3	电力	152
4.3.4	能源消耗行业	154
4.4	公民	155
4.4.1	与能源有关的可持续发展目标	155
4.4.2	可负担性	158
4.4.3	行为改变	161
4.5	政府	163
4.5.1	能源安全	163
4.5.2	基础设施	167
4.5.3	能源零售业的税收收入	169
4.5.4	创新	171
4.5.5	国际合作	173

附录

191

附录 A.	情景预测表格	179
附录 B.	技术成本	187
附录 C.	定义	189
附录 D.	参考文献	203

能源部门占当今温室气体排放的约四分之三，是避免气候变化最恶劣影响的关键，而气候变化或许是人类有史以来所面临的巨大挑战。2050 年全球二氧化碳降至净零排放，与控制全球平均温度的长期增长不超过 1.5°C 的努力是一致的，这需要能源生产、运输和消费方式的彻底转型。实现净零排放的政治共识与日俱增，令世界对未来的进步相当乐观，但是人们对 2050 年实现全球净零排放所需要做出的改变知之甚少。要想让今天的雄心壮志变成现实，需要做大量的工作，尤其是考虑到各国的国情不同，做出必要改变的能力也有差异。国际能源署的这份特别报告提出了实现上述目标的途径，由此推动建立清洁、有韧性的能源系统，为人类的繁荣和福祉带来重大利益。

报告中详述的 2050 年全球净零排放路径，需要各国政府大力加强并成功实施其能源和气候政策。迄今为止的承诺远没有达到路径的要求。过去一年来，承诺实现净零排放的国家数量迅速增加，现已覆盖全球约 70% 的二氧化碳排放量。这是向前迈进了一大步；但是，大多数国家的承诺还缺乏近期政策和措施的支撑。此外，即使在 2050 年成功实现了已有的承诺，届时全球仍将排放约 220 亿吨的二氧化碳。按照这种趋势发展下去，2100 年全球气温将上升约 2.1°C 。由于新冠疫情的影响，2020 年全球二氧化碳排放量下降；但是随着经济复苏，碳排放量已经开始强劲反弹。如果不及时采取行动扭转上述趋势，那么 2050 年将无法实现净零排放。

本报告的政策决策者摘要部分概述了全球能源部门 2050 年实现二氧化碳净零排放的基本条件。按照报告中详述的路线图，是在不考虑能源部门以外的排放抵消、较少依赖负排放技术的情况下实现这一目标。该路线旨在实现技术可行性、成本效益和社会认可度的最大化，同时确保经济持续增长和能源安全供应。我们重点强调了目前需要采取的优先行动，以确保短暂但可以抓住的 2050 年实现净零排放的机会不被浪费。报告描绘了全球图景，但是不同国家和地区的起点不同，实现目标的时间也可能不同：发达经济体必须先于新兴市场和发展中经济体达到净零排放，并协助它们实现目标。我们也认识到，报告提出的路径不一定是唯一的路径；因此，我们考察了一些关键的不确定性因素，特别是生物能源、碳捕捉和人们行为改变在净零排放中的作用。实现净零排放将有赖于世界各地人们无数的决策，但我们的主要目标是为政策决策者提供决策依据，因为政策决策者有最大的发挥空间使世界更加接近其气候目标。

2050 年净零排放取决于 2030 年前以空前的力度推进清洁技术

实现净零排放的路径很窄：要想不偏离这条路径，就需要立刻大量部署所有可用的清洁高效能源技术。本报告提出的净零排放路径中，2030 年世界经济将比目前增长约 40%，但能源消费却减少 7%。有必要在全球范围内大力提高能效，使 2030 年之前能源强度每年平均降低 4%，降低速度约为过去二十年平均水平的三倍。能源部门减排不仅仅限于二氧化碳：在我们的路径中，由于全球一致努力部署一切可用的减排措施和技术，来自化石燃料供应的甲烷排放也将在未来十年减少 75%。

越来越廉价的可再生能源技术，使电力在通向净零排放的赛道中脱颖而出。我们的路径要求今后十年迅速扩大太阳能和风能：2030 年之前，太阳能光伏每年新增装机 630 吉瓦，风电每年新增装机 390 吉瓦，增速达到 2020 年纪录水平的四倍。对于太阳能光伏发电而言，这相当于未来十年每天要安装一个目前世界最大的太阳能光伏园。水

电和核能作为当今世界两个最大的低碳电力来源，为电力低碳转型提供必要基础。随着电力部门变得更加清洁，电气化成为整个经济领域减排至关重要的手段。电动车在全球汽车销售中的占比将由目前的 5% 提高到 2030 年的 60% 以上。

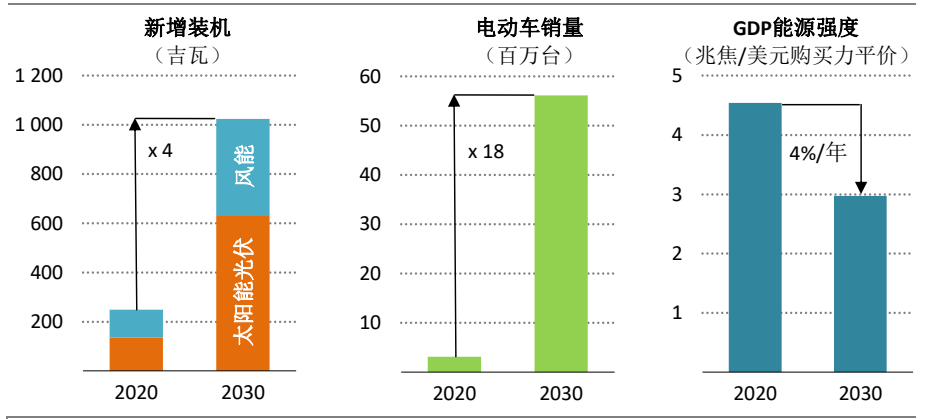
优 先 行 动

实现清洁能源在 2020 年起的十年中大规模扩张

全球 2030 年实现必要大幅减排所需的所有技术都已经存在，推动其部署所需的政策也已经得到证实。

随着世界继续努力应对新冠疫情的影响，支持经济复苏的投资和支出有必要与净零路径保持一致。应加强政策，加快部署清洁和高效能源技术。指令和标准对于驱动消费者支出、推进行业投资于最高效的技术至关重要。目标和竞争性拍卖可以赋能风能和太阳能，加速电力部门转型。化石燃料补贴逐步取消、碳定价以及其他市场改革可以确保提供适当的价格信号。应出台政策限制或抑制某些燃料和技术的使用，例如未采用减排措施的燃煤发电站、燃气锅炉和常规内燃机车辆。在智能输配电网网络等大规模基础设施投资的规划和激励方面，政府必须发挥领导作用。

净零排放路径上，2030 年之前关键清洁技术的提升



注：GDP = 按购买力平价计算的国内生产总值。

2050 年实现净零排放需要清洁能源技术创新取得巨大飞跃

到 2050 年实现净零排放，需要进一步快速部署目前可用的技术，并广泛使用目前尚未进入市场的技术。为了将这些新技术及时推向市场，未来十年必须做出重大创新努力。在我们提出的路径中，到 2030 年全球大部分二氧化碳减排量将通过当今可用的技术来实现。不过，到 2050 年，几乎一半的碳减排将通过目前处于示范或原型期的技术而实现。在重工业和长途交通运输领域，更高比例的碳减排将依靠目前仍处于开发阶段的技术。

最大的创新机遇涉及先进电池、氢电解槽和直接空气捕获储存。在净零路径中，这三个技术领域对于 2030 年至 2050 年期间的全球二氧化碳减排至关重要。未来十年内的创新，从研发、示范直到部署阶段，都需要大规模配套基础设施，包括用于运输已捕获二氧化碳的新建管道和港口与工业区之间的氢气运输系统。

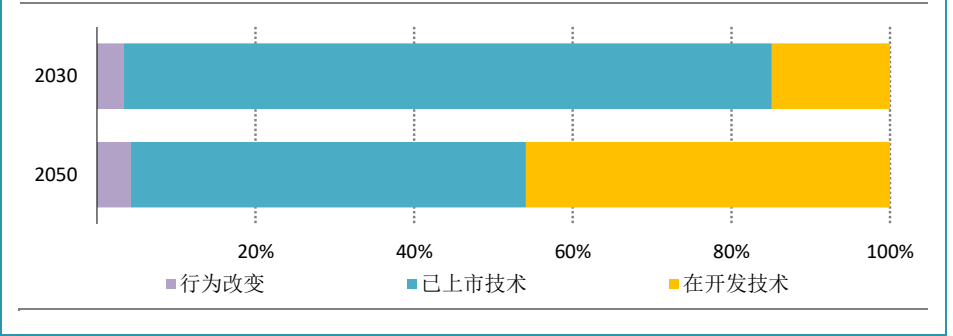
优 先 行 动

力促创新，为下一阶段转型打好基础

必须快速提升清洁能源创新速度，政府的能源和气候政策要以研发、示范和部署为核心。

需要增加政府的研发支出并调整其重点。从公共研发投入来看，电气化、氢能、生物能源和碳捕获、利用和封存（CCUS）等关键领域的资金较少，仅为较成熟的低碳发电和能效技术的资金的三分之一左右。要支持加速推广示范项目，撬动私人研发投资，并提升总体部署水平以促进成本降低。此外，还需要尽快在全球范围内调动约 900 亿美元的公共资金，以便在 2030 年之前完成一系列示范项目。目前，同期预算只有约 250 亿美元。这些技术的开发和部署将创造重要的新产业、商业机遇，以及就业机会。

以 2020 年为基准，净零路径的年度二氧化碳减排量



净零转型以人为本、服务于人

若没有公民的持续支持和参与，则无法实现净零路径提出的转型规模和速度。净零转型将会影响到人们生活的方方面面，包括交通运输、供暖、烹饪、城市规划和工作等。在净零路径中，约 55%的累积减排量与消费者选择相关，例如购买电动车、对房屋进行节能改造或安装热泵。此外，行为的改变，尤其是在发达经济体中，还可贡献约 4%的累积减排量；上述行为改变包括以步行、自行车或公共交通代替汽车出行，以及放弃长途飞行等。

为约 7.85 亿无电人口提供电力，为 26 亿仍无法获得清洁烹饪燃料的人口提供清洁烹饪燃料，是净零路径不可或缺的一部分。减排与 2030 年能源普遍可及这两项工作必须齐头并进。这需要每年花费约 400 亿美元，相当于每年能源部门投资额的 1%左右，还可以通过降低室内空气污染实现额外的共同利益。

清洁能源转型带来的一些变化，可能会给转型实施带来挑战，因此决策必须透明、公正且具有成本效益。政府需要确保清洁能源转型以人为本，并且具有包容性。在净零路径中，随着越来越多的人可获得能源、现代能源服务需求迅速增长，新兴市场和发展中经济体的家庭能源支出占可支配收入的比重将温和上涨，这些能源支出包括购买高效电器和燃料费用等。需要密切关注和确保家庭对能源的负担能力；可以向最贫困人口提供直接支持的政策工具包括税收抵免、贷款，以及针对性补贴。

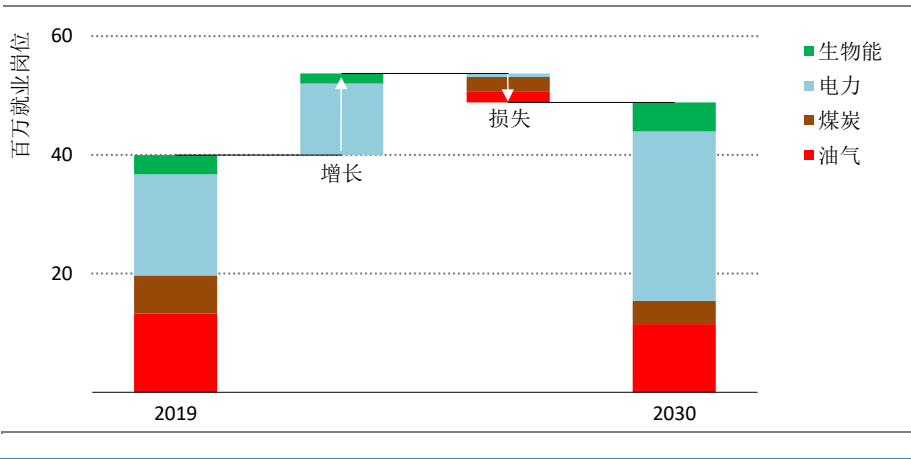
优 先 行 动

清洁能源就业将强劲增长，但必须大面积推广

能源转型必须考虑到个人和社区受到的社会和经济影响，并将人视为积极参与者。

净零排放转型带来大量的新就业机会：净零路径中，由于清洁能源领域的活动和投资增加，到 2030 年将创造 1400 万个就业机会。此外，在更高效的电器、电动和燃料电池车以及建筑物改造和节能建筑方面的支出，将进一步增加 1600 万个工作岗位。然而，这些新的就业机会往往不同于随着化石燃料减少而失去的工作，地点、技能组合和部门都不尽相同。在净零路径中，约有 500 万个工作岗位流失。这些流失的岗位大多位于化石燃料资源附近，而且其中许多工作的报酬较高；因此结构性变化可能会对社区造成冲击，产生长期影响。政策层面上，需要对此予以认真关注，处理好就业损失问题。至关重要的一点是，要尽量减少上述变化带来的困难，例如对工人进行再就业培训，尽可能将新的清洁能源设施设在受影响严重的地区，并提供区域援助。

2019-2030 年净零路径上的全球能源供应就业情况



可再生能源成为主导能源

在净零排放路径中，2050 年全球能源需求将比目前低 8% 左右，但其服务的经济规模是目前的两倍多，服务的人口比目前多 20 亿。能源更高效利用、资源效率和行为改变的有机结合，将抵消因世界经济发展和能源普遍可及而引起的能源需求的增长。

能源部门主要依靠可再生能源，而不是化石燃料。2050 年，风能、太阳能、生物能、地热能和水能将占能源供应总量的三分之二。太阳能将成为最大的能源来源，占能源供应总量的五分之一。到 2050 年，太阳能光伏装机将是现在的 20 倍，风电装机将是现在的 11 倍。

净零排放意味着化石燃料消费将大幅减少。化石燃料消费在能源供应总量中的占比，将由目前的近五分之四减少到 2050 年的略超于五分之一。2050 年仍在使用的化石燃料的用途包括：含碳商品（如塑料）、配有 CCUS 装置的生产设施，以及缺乏低排放技术的部门。

2050 年电力将占能源消费总量的近 50%。电力将在交通运输、建筑物、工业等各部门中起着关键作用，在氢气等低排放燃料生产中起着至关重要的作用。为实现上述情景，2050 年全球总发电量需要达到目前的 2.5 倍以上。同时，从今开始不再对无减排设施的燃煤电厂（效率最低的燃煤）建设做出最终投资决定，2030 年之前最低效的燃煤电厂全部淘汰，2040 年之前对仍在使用的其余燃煤电厂进行改造。到 2050 年，近 90% 的发电来自可再生能源，风能和太阳能光伏发电合计占近 70%，其余大部分来自核电。

工业、交通运输和建筑物领域的减排需要更长时间。要想实现工业领域 2050 年减排 95%，就需要大力建设新的基础设施。从现在到 2030 年的十年间，通过研发、示范和初步部署，科技创新将取得快速进展，新清洁技术将进入市场，届时这些技术将必须要在全世界付诸应用。2030 年起，每月需要为 10 座重工业工厂配备 CCUS，建造 3 座新氢能工厂，并在工业场所增加 2 吉瓦电解槽制氢能力。出台政策，要求在 2035 年之前停止销售内燃机汽车，并推动电气化，从而支持交通运输领域大幅减排。到 2050 年，全球路上行驶的汽车均为电动车或燃料电池车。在电力无法容易或经济地满足能源需求的情况下，有必要发展低排放燃料。例如，航空业将主要依靠生物燃料和合成燃料，而氨对航运业至关重要。在建筑物领域，需要 2025 年起全球范围禁止新增化石燃料锅炉，从而推动电热泵的销售。绝大多数老旧建筑物和所有新建筑物均要符合“零碳就绪”建筑物能源规定。¹

¹ “零碳就绪”建筑物是高效建筑，要么直接使用可再生能源，要么使用到 2050 年将完全脱碳的能源供应，如电力或区域供热。

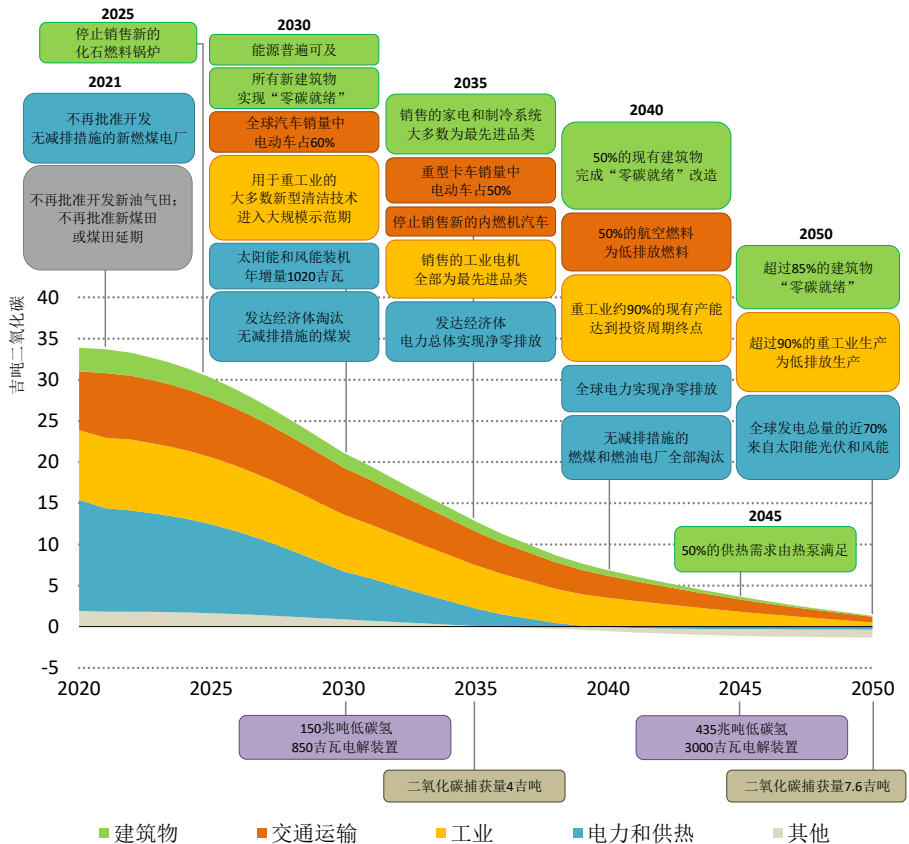
优 先 行 动

设定近期里程碑，走上实现长期目标的正轨

各国政府需要提供可信的逐步规划，以实现其净零目标，并树立投资者、行业、公民和其他国家对本国政府的信心。

政府的长期政策框架必须到位，以使政府各部门和利益攸关方能够做出有计划的变化，促进有序转型。《巴黎协定》所要求的长期国家低排放战略，可以作为国家转型的愿景，而本报告可以作为全球转型的愿景。这些长期目标需要有配套的可衡量的短期目标和政策。净零路径详细提出了 400 多个部门和技术里程碑，以指导 2050 年实现净零的全球征程。

净零路径上的关键里程碑



净零路径上，无需投资于新的化石燃料供应

除了 2021 年及之前已经承诺的项目外，净零路径提出不再批准油气田新开发项目，也不再批准新建煤矿或扩建、延期现有项目。净零路径中，坚定不移地关注气候变化政策将导致化石燃料需求急剧下降；因此，石油和天然气生产者将转移关注焦点，从现有油气资产的运行完全转向产出和碳减排。到 2050 年，对未采用减排措施的煤炭的需求将仅占能源消费总量的 1%，降幅达 98%；天然气需求将下降至 1.75 万亿立方米，降幅 55%；石油需求将下跌至 2400 万桶/天，相比 2020 年的约 9000 万桶/天降低 75%。

清洁发电、网络基础设施和终端用能部门是投资增长的关键领域。有利的输配电网年度投资将从目前的 2600 亿美元增长到 2030 年的 8200 亿美元。电动车充电桩将从目前的约 100 万台增加到 2030 年的 4000 万台，这将需要 2030 年的年度投资额达到近 900 亿美元。电动车电池的年产量将从目前的 160 吉瓦时跃升至 2030 年的 6600 吉瓦时，相当于未来十年每年新增近 20 个超级电池工厂（gigafactory）²。2030 年之后氢能和 CCUS 的推广，意味着现在就要开始基础设施建设：每年用于二氧化碳管道

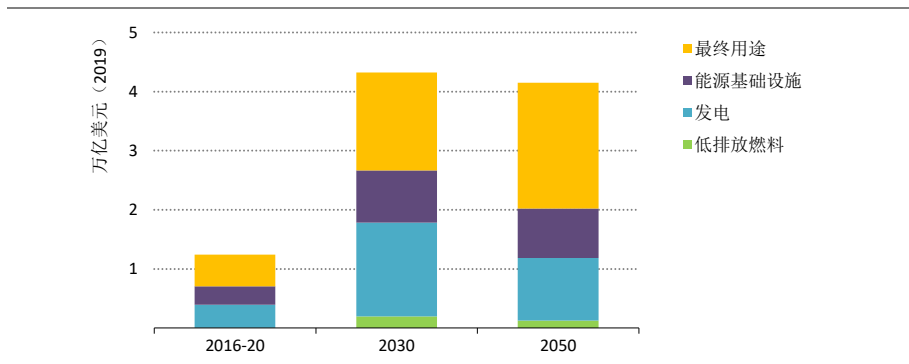
优 先 行 动

推动清洁能源投资实现历史性增长

需要制定政策来发出市场信号，以释放新型商业模式，调动私人支出；特别是在新兴经济体。

加快国际公共财政交付对能源转型至关重要，特别是在发展中经济体，但所需额外投资中的大部分将最终需要由私营部门来提供资金。要想调动大规模基础设施建设所需的资金，需要开发商、投资者、公共财政机构和政府之间更紧密地合作。减少投资者的风险对于确保清洁能源转型的成功和可负担性至关重要。许多新兴市场和发展中经济体中，新能源项目和工业设施主要依靠公共资金，它们需要改革政策和监管框架以吸引更多私人资金。这些经济体将需要国际长期资本，以支持现有和新兴清洁能源技术的发展。

净零路径上的清洁能源投资



² 超级电池工厂的产能假设 = 每年 35 吉瓦时。

空前的清洁能源投资热潮助推全球经济增长

根据我们与国际货币基金组织（IMF）的共同分析，到 2030 年，全球年度能源投资总额将猛增至 5 万亿美元，带动全球 GDP 增量每年提升 0.4 个百分点。随着全球从新冠疫情中恢复，清洁能源和能源基础设施的投资空前增长，2030 年投资额将是现在的三倍多，这将带来巨大的经济利益。私营部门和政府 in 清洁能源（包括能效）、工程、制造和建筑行业等方面的支出猛增，将创造数百万个就业机会。上述各项行动将使 2030 年的全球 GDP 比基于当前趋势的测算值高出 4%。

在实现以投资引导增长并确保利益由所有人共享方面，各国政府发挥关键作用。不同地区受到的宏观经济影响差异很大。但是，在吸引大量私人资本，并帮助抵消许多国家化石燃料收入减少等方面，政府投资和公共政策是十分必要的。把清洁能源新技术推向市场的重大创新努力，能够提高生产率并创造全新产业；可以将这些新产业布局到现有产业工作流失的地区。净零路径上，改善空气质量可带来重大的健康益处，2030 年全球因空气污染而过早死亡的人数将比今天减少 200 万。实现 2030 年能源普遍可及，将大大提高发展中经济体的民生福祉和生产力水平。

能源安全方面新问题已经浮现，旧问题仍然存在

石油和天然气生产的收缩，将对这些燃料的所有生产国和生产商产生深远的影响。在净零路径中，不再需要新建油气田，油气供应日益向少数低成本生产商集中。石油方面，欧佩克在全球石油供应中的份额将从近年来的约 37% 增至 2050 年的 52%，达到石油市场历史上的最高值。油气生产国的人均年收入将从近年来的 1800 美元降至 2030 年代的 450 美元，降幅约 75%，可能会带来一系列社会影响。这些国家需要进行结构性改革，开发新的收入来源，即使改革不可能完全弥补油气收入的下降。虽然传统能源供应活动减少，但是油气行业的专业知识与氢能、CCUS 和海上风电等技术契合度很高，非常适合于解决一些减排最具挑战部门的碳减排技术问题。

能源转型需要大量的关键矿物，其供应将成为一个重要的增长领域。在净零路径中，铜、钴、锰和各种稀土等关键矿物的总市场规模将在 2020 年至 2030 年期间增加近 6 倍。这些矿产的收入将在 2030 年之前就超过煤炭的收入。这为矿业公司创造了重要的新机会，同时也引起了新的能源安全关切，包括在供给跟不上激增需求的情况下出现价格波动，推高转型成本。

随着所有部门快速电气化，电力在世界能源安全中的中心地位将愈发凸显。一方面，由于化石燃料发电装机逐步退出，常规灵活性电源减少；而另一方面，电力系统灵活性到 2050 年要翻两番，以平衡风能、太阳能和不断演变的需求。因此，转型需要以智能和数字化程度更高的电网为支撑，大力发展能提高灵活性的各种渠道，包括电池、需求侧响应和低碳灵活发电厂。电力系统对网络攻击和其他新兴威胁的韧性也需要增强。

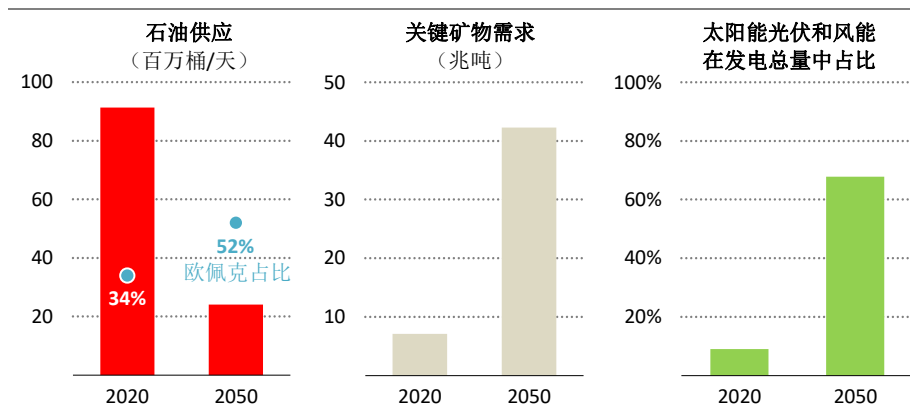
优 先 行 动

当即应对新出现的能源安全风险

实现净零排放的道路上，要确保以可承受的价格不间断、可靠地供应能源和能源相关关键商品——这一点的重要性将会有增无减。

随着对可再生电力的依赖增加，石油和天然气的作用减弱，能源安全的焦点将发生转变。电力的重要性在不断提升，供给不断变化和网络安全风险等潜在的脆弱点将随之而来。政府需要为电池、数字解决方案和电网的投资创造市场，奖励灵活性，实现充足可靠的电力供应。由于对关键清洁能源技术所需的关键矿物的依赖度不断增加，所以需要建立新的国际机制，以确保供应的及时性和生产的可持续性。同时，由于石油生产将更为集中，因此传统的能源安全问题仍将继续存在。

净零路径中的全球能源安全指标



国际合作对 2050 年实现净零排放至关重要

净零排放是否能够成为现实，取决于各国政府是否能高度专注、坚定不移地聚焦于政府间合作，以及与企业、投资者和公民之间的合作。所有利益攸关方都需要充分发挥各自的作用。净零路径中各级政府采取的广泛措施，将推动、影响和激励消费者的购买行为和企业投资，包括能源企业对生产和能源服务新方法的投资方式，企业对设备的投资方式，消费者家居制冷供暖、为设备充电和为出行提供动力的方式。

政府政策决定对这些变化起到支撑作用。设计制定具有成本效益的国家和地区净零路线图，要求政府各部门之间开展合作，打破部门壁垒，将能源融入到各国关于金融、劳务、税收、交通运输和工业等方面的政策中去。仅靠能源部或环境部等少数部委的力量，不足以采取充分的政策行动，实现 2050 年净零排放目标。

能源消费变化导致化石燃料税收大幅下降。如今，柴油、汽油和其他化石燃料消费税是许多国家公共收入的重要来源，其在国家收入中的占比在有些情况下高达 10%。在

净零路径中，来自石油和天然气零售的税收将在 2020 年至 2030 年期间下降约 40%。要想较好地应对上述税收下降，将需要长期财政规划和预算改革。

净零路径依赖于各国政府开展前所未有的紧密国际合作，特别是在创新和投资领域。国际能源署随时准备为各国政府提供支持，包括制定国家和地区的净零路线图、指导和协助实施相关计划、促进国际合作，以加快全球能源转型。

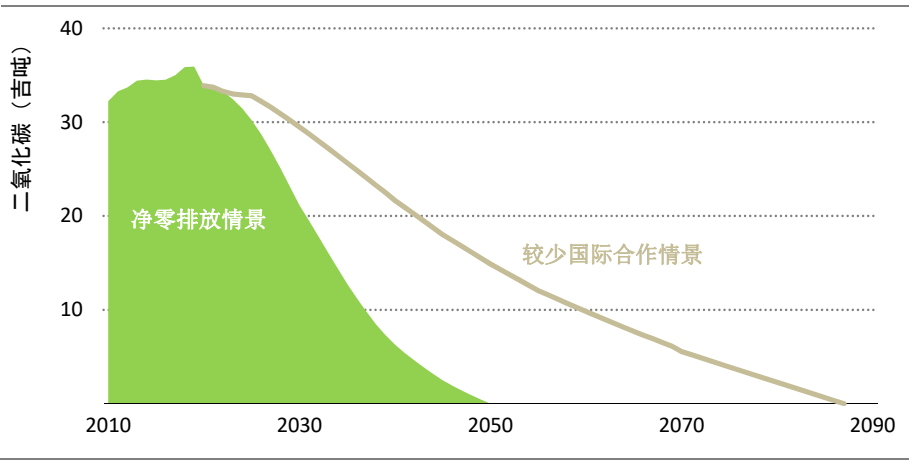
优 先 行 动

将国际合作推向新高度

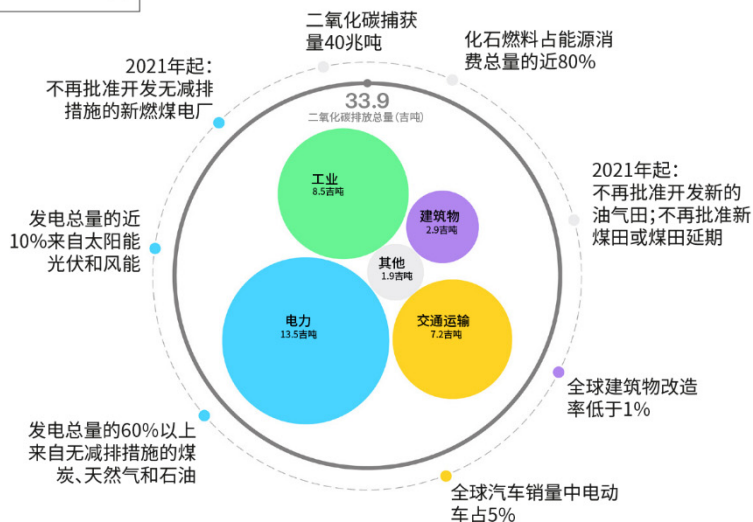
各国政府力求仅在本国实现净零排放并不够，还需要通过协调的行动来应对全球挑战。

各国政府必须开展有效的互利合作，跨越国界实施协调一致的措施，包括谨慎平衡国内新增就业机会、本地商业优势，以及全球对清洁能源技术部署的整体需要。各国市场之间需要相互连接，才能加快创新，制定国际标准，并且协调推广清洁技术。合作中，必须认识到各国发展阶段的差异和社会各组成部分的不同情况。对许多富裕国家来说，如果没有国际合作，实现净零排放将更加困难和昂贵。对很多发展中国家而言，倘若没有国际援助，净零排放路径将不甚明朗。关键技术和基础设施的部署需要技术和资金支持才能得到保障。除非扩大国际合作，否则到 2050 年全球二氧化碳排放量将不会实现净零。

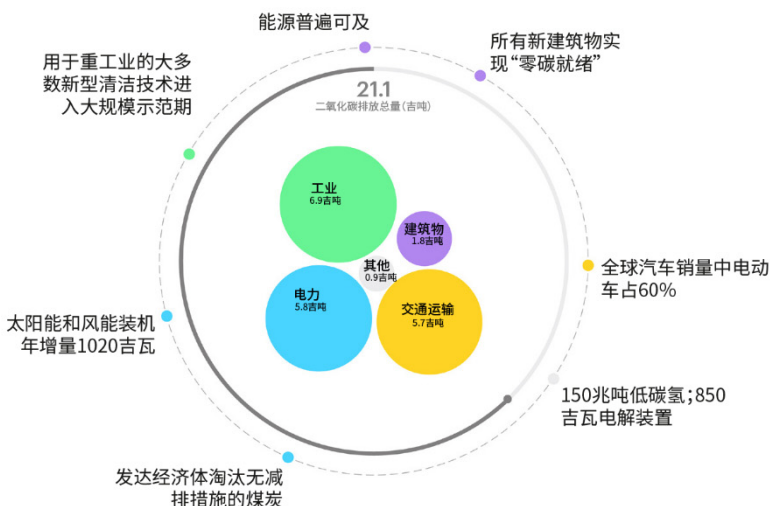
净零路径上以及较少国际合作情景下，全球能源相关二氧化碳排放量



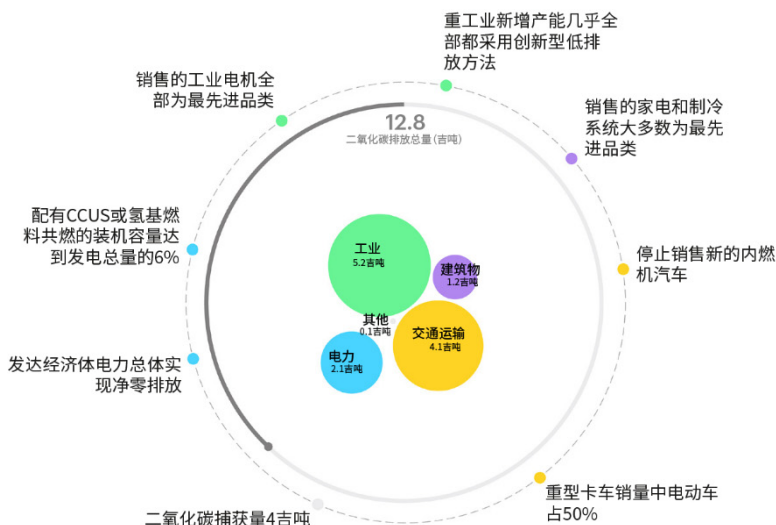
2020

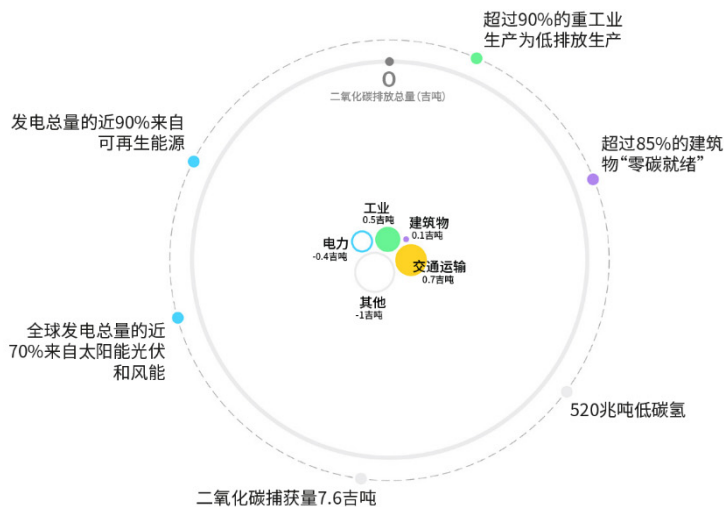
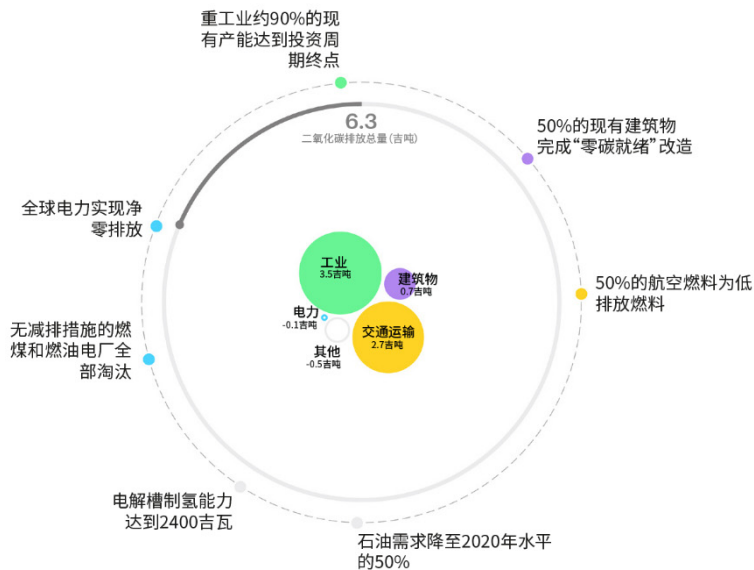


2030



2035





已宣布的净零承诺与能源部门

摘要

- 过去一年中，承诺将温室气体排放减少到净零的政府数量骤增。净零承诺至今已覆盖约 70% 的全球 GDP 和二氧化碳排放量。然而，已宣布的净零承诺中，只有不到四分之一被正式写入国内立法，并且只有少量承诺具有配套措施或政策来支持其全面按时兑现。
- 既定政策情景（STEPS）只考虑政府已出台或已宣布的具体政策。能源相关和工业过程的二氧化碳年排放量将从 2020 年的 34 吉吨上升到 2030 年的 36 吉吨，并在 2050 年前保持在大致相同的水平。如果排放量继续按此轨迹发展，并且非能源相关的温室气体排放量也具有类似的变化趋势，则 2100 年温度将上升约 2.7°C（概率 50%）。2050 年，可再生能源在全球发电总量中的占比将接近 55%（2020 年占比为 29%），但其他部门的清洁能源转型将相对滞后。2020 年至 2050 年期间，全球煤炭使用量将下降 15%，石油使用量将增加 15%，而天然气使用量将增加近 50%。
- 已宣布承诺情景（APC）假定所有已宣布的国家净零承诺将全面按时实现，无论承诺目前是否有具体政策支持。全球能源相关和工业过程的二氧化碳排放量将在 2030 年下降到 30 吉吨，2050 年下降到 22 吉吨。若依此轨迹外推，并假定对非能源相关温室气体排放采取类似的行动，则 2100 年温度将上升约 2.1°C（概率 50%）。2050 年全球发电量将几乎翻倍，超过 50 000 太瓦时。2050 年可再生能源在发电量中的占比将上升到近 70%。石油需求不会恢复到 2019 年的峰值，从 2020 年到 2050 年将下降约 10%，降至 8 000 万桶/天。煤炭用量在 2050 年将下降 50%，降至 26 亿吨煤当量，而天然气用量将在 2025 年扩大 10%，达到 43 500 亿立方米，并且直到 2050 年都将大致保持这一水平。
- 在已宣布承诺情景下，能效、电气化和用低排放能源取代煤炭发电，在实现净零目标方面将发挥核心作用，这种作用在 2030 年之前尤其明显。核能、氢能、生物能以及碳捕捉、利用和封存（CCUS）的相对贡献将因各国国情而异。
- 已宣布承诺情景和既定政策情景之间的趋势分歧，表明了现有净零承诺可能做出的贡献，同时强调了制定符合长期净零承诺的切实政策和短期计划的必要性。然而，已宣布承诺情景也清晰地显示，现有的净零排放承诺即使全面兑现，也远远达不到在 2050 年前实现全球净零排放。

1.1 导言

2021 年 11 月将迎来《联合国气候变化框架公约》第 26 次缔约方会议（COP 26），这是自 2015 年《巴黎协定》签署以来最重要的大会。随着 COP 26 的临近，越来越多的国家宣布了在未来几十年实现温室气体净零排放的长期目标。2021 年 3 月 31 日，国际能源署（IEA）主办了净零排放峰会，以总结各国和各企业为实现《巴黎协定》目标而做出的数目不断增加的承诺，并重点探讨了将净零排放目标变为现实所需的行动。

实现这些目标对我们提出了很高的要求。新冠疫情严重冲击了世界经济，导致2020年二氧化碳排放量史无前例地下降了5.8%。然而，我们的月度数据显示，全球能源相关二氧化碳排放量于2020年12月开始再次攀升，据我们估计2021年二氧化碳将反弹至约33吉吨，仅比2019年的水平低1.2%（IEA, 2021）。可持续的经济复苏系列方案提供了独特的机遇，使二氧化碳排放在2019年达峰后逐步下降；然而，迄今为止的证据表明，排放至少在短期内会随着经济复苏增长而回升（IEA, 2020a）。

国际能源署最近分析了不同国家和地区的能源系统实现净零排放所需的技术和政策。2020年《世界能源展望》研究了新冠疫情相关经济复苏的背景下，2030年之前需要做什么，才能让世界走上到2050年实现净零排放的道路（IEA, 2020b）。2020年《能源技术展望》提出了加速创新情景，探讨了仅通过加速能源技术开发和部署是否能在2050年实现全球净零排放：分析结果表明，相对于基线趋势，2050年实现净零排放所需的减排量几乎有一半依赖于目前尚未商业化的技术（IEA, 2020c）。

本特别报告是应COP 26主席国英国的要求编写的，它结合了上述两份报告提出的洞见和经验教训，为在2050年前实现全球能源相关和工业过程的二氧化碳净零排放制定了全面而详细的路径（也可称为路线图）。本报告评估了实现这一目标的成本、对就业和经济可能产生的影响，以及对世界的更广泛的影响。它还重点指出了在通往2050年的道路上所需的技术、基础设施、投资和政策方面的关键里程碑。

本报告共有四章：

- **第1章**基于现有政策和承诺，探讨了全球二氧化碳排放量、能源供应和能源使用的前景。它提供了基于**既定政策情景（STEPS）**的全球能源使用和排放预测，该情景仅考虑各国已出台或已宣布的明确政策，包括国家自主贡献。本章还探讨了**已宣布承诺情景（APC）**，这是在既定政策情景基础上的又一种情景，它假设世界各国迄今为止已宣布的所有净零目标都能全面实现。
- **第2章**介绍了**2050年净零排放情景（NZE）**，描述了如果世界要在2050年之前实现净零排放，能源需求和能源结构将需要发生什么变化。它还评估了相应的投资需求，并探讨了技术和消费者行为方面的关键不确定因素。
- **第3章**考察了净零排放情景对各个部门的影响，包括化石燃料供应、低排放燃料（如氢、氨、生物燃料、合成燃料和生物甲烷）供应，以及电力、交通运输、工业和建筑物等部门。它重点描述了在净零排放情景中实现净零排放所需的关键变化，以及在此过程中需要达到的主要里程碑。
- **第4章**探讨了净零排放情景对经济、能源行业、公民和政府的影响。

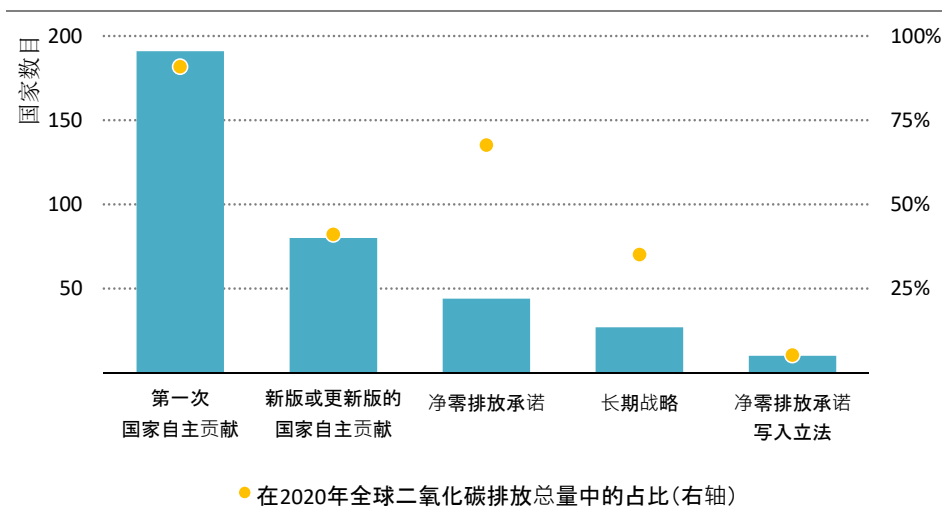
1.2 减排目标和净零承诺

1.2.1 国家自主贡献

根据《巴黎协定》，缔约方¹必须向《联合国气候变化框架公约》提交国家自主贡献（NDCs），并实施旨在实现其既定目标的政策。这是一个动态的过程：协定要求缔约方每五年以渐进的方式更新国家自主贡献，提出尽可能高远的目标。191个国家提交了第一轮国家自主贡献，涵盖了全球90%以上的能源相关和工业过程的二氧化碳排放量。²第一批国家自主贡献包括无条件的目标，也包括以国际资金、技术和其他执行手段支持为条件的目标。

截至2021年4月23日，已有80个国家向《联合国气候变化框架公约》提交了新的或更新的国家自主贡献，涵盖了超过40%的全球二氧化碳排放量（图1.1）。³与第一轮相比，许多更新的国家自主贡献中的目标更高、部门更多或温室气体覆盖面更广。此外，27个国家和欧盟已经按照《巴黎协定》的要求，向《联合国气候变化框架公约》通报了低温室气体排放的长期发展战略。这些战略中有些包含了净零承诺。

图 1.1 ▷ 有国家自主贡献、长期战略和净零承诺的国家数目，以及它们在2020年全球二氧化碳排放量中的占比



国际能源署。保留所有权利。

已批准《巴黎协定》的国家中约有40%更新了国家自主贡献，

但净零承诺涵盖了全球约70%的二氧化碳排放量

¹ 缔约方是指《联合国气候变化框架公约》的197个成员，包括所有联合国会员国、联合国大会观察员国巴勒斯坦、非联合国会员国纽埃和库克群岛，以及欧盟。

² 除非另有说明，本报告中的二氧化碳排放量是指能源相关和工业过程的二氧化碳排放量。

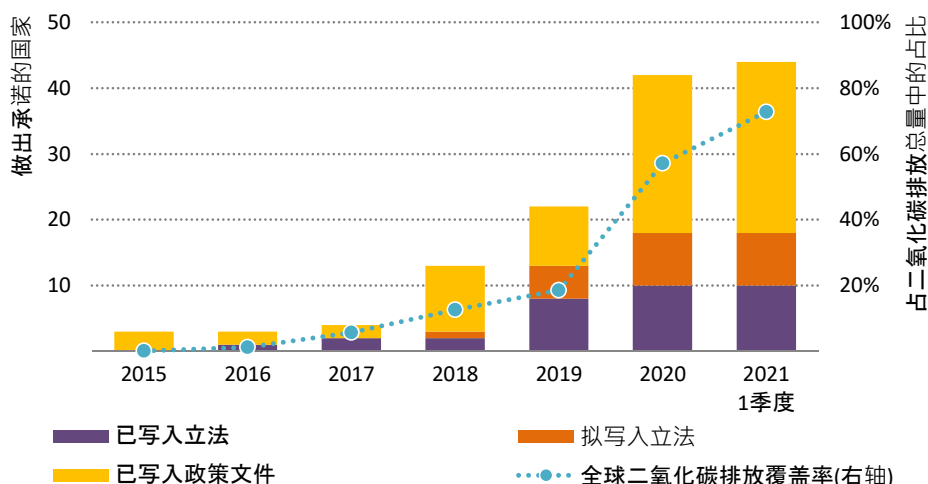
³ 有几个国家已经表示，它们打算在2021年晚些时候或2022年提交新的或更新的国家自主贡献。

1.2.2 净零排放承诺

承诺将温室气体排放减少到净零的政府数量骤增（图 1.2）。在《巴黎协定》中，各国同意“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”。政府间气候变化专门委员会（IPCC）《全球升温 1.5°C 特别报告》中，强调了在本世纪中叶或更早达到全球二氧化碳净零排放对于避免气候变化最坏影响的重要性（IPCC, 2018）。

国家政府、地方政府、各种联盟⁴以及大量企业实体已经宣布了各自的净零排放承诺（见“焦点”）。截至 2021 年 4 月 23 日，44 个国家和欧盟已承诺实现净零排放目标：它们总共占到全球二氧化碳排放量和 GDP 的 70% 左右（图 1.3）。其中，10 个国家已将实现净零目标规定为法律义务，8 个国家正拟将其规定为法律义务，其余国家已在官方政策文件中做出了承诺。

图 1.2 ▶ 国家层面净零排放承诺的数目以及在全球二氧化碳排放量中的占比



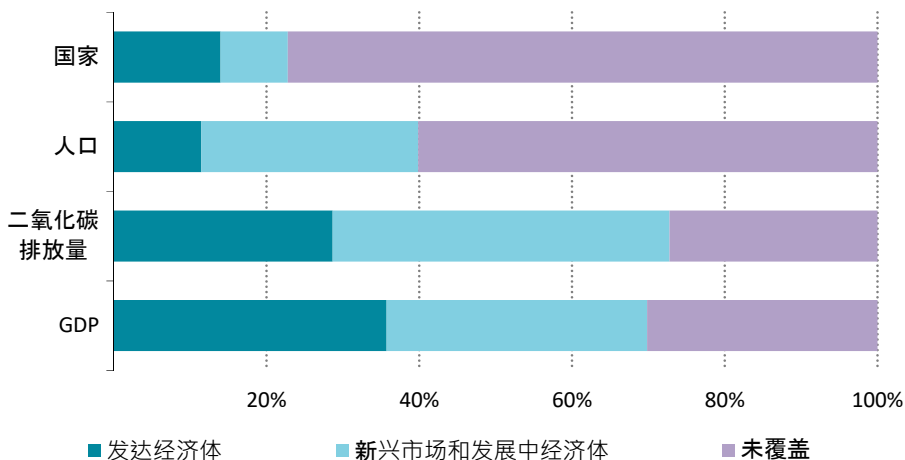
国际能源署。保留所有权利。

*宣布净零排放承诺的政府数目骤增，
越来越多的此类承诺载入法律*

注：写入立法 = 净零承诺已得到议会批准，具有法律约束力。拟写入立法 = 净零承诺提案已向议会提出，有待议会表决立法。写入政策文件 = 净零承诺已提出，但不具有法律约束力。

⁴ 例如：联合国领导的气候目标联盟中，参与各方表示正在努力实现 2050 年净零排放；2017 年联合国气候峰会上发起的碳中和联盟中，参与各方承诺制定低温室气体排放长期战略，以将温度上升限制在 1.5°C 以内。

图 1.3 > 已宣布的国家层面净零排放承诺的覆盖范围



国际能源署。保留所有权利。

净零承诺已立法、拟立法、或写入官方政策文件的国家，覆盖了全球约 70% 的二氧化碳排放量和 GDP

注：GDP = 按购买力平价计算的国内生产总值。

与国家自主贡献中提出的一些较短期承诺相比，净零承诺很少有详细的配套政策和明确的实施途径支持。不同的净零排放承诺在时间尺度和覆盖范围上也有很大的差异。一些关键的差异包括：

- **温室气体覆盖面。**大多数承诺涵盖了所有的温室气体排放，但有些承诺对某些类型的排放予以豁免或适用另一套规则。例如，新西兰的净零承诺涵盖了除生物甲烷以外的所有温室气体，为生物甲烷设定了单独的减排目标。
- **部门界线。**有些承诺不包括来自特定部门或活动的排放。例如，荷兰的温室气体净零排放目标仅限于电力部门（总体目标是将温室气体排放总量减少 95%）；法国、葡萄牙、瑞典等国家的净零排放承诺不涵盖国际航空和航运。
- **二氧化碳移除（CDR）的使用。**对于国家主权领土内的二氧化碳移除，不同国家承诺中采用的方法不尽相同。二氧化碳移除的可选方法包括自然的二氧化碳汇（森林、土壤等），以及技术解决方案（直接空气捕捉、配备碳捕捉和封存的生物能源等）。例如，乌拉圭表示将利用自然二氧化碳汇来帮助实现净零排放，而瑞士则计划在 2050 年利用二氧化碳移除技术来平衡一部分剩余排放量。
- **国际排放转让的使用。**有些承诺允许将国家境外的温室气体减排计入净零目标，例如通过碳信用额的转让实现的减排，而另一些承诺则不允许这样做。例如，挪威允许使用国际转让，而法国则明确规定不允许使用国际转让。瑞典等国家允许转让，但规定了转让使用的上限。
- **时间框架。**大多数净零排放承诺（涵盖了 2020 年全球二氧化碳排放量的 35%）计划于 2050 年之前实现目标，但芬兰实现净零排放的目标日期是 2035 年，奥地利和冰岛是 2040 年，瑞典是 2045 年。中国、乌克兰等国则将目标日期设定在 2050 年之后。

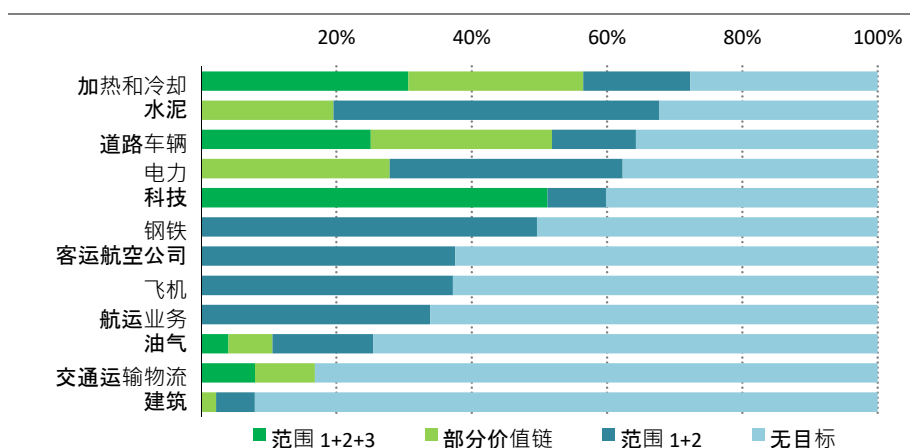
焦点

企业对实现净零排放的需要作何反应？

近年来，宣布净零排放目标的企业数目迅速增加：截至 2021 年 2 月，已有约 110 家直接消耗大量能源或生产高耗能产品的企业宣布了各自的净零排放目标。

已宣布净零排放目标的企业生产的加热和冷却设备、道路车辆、电力和水泥约占全球总量的 60-70%（图 1.4）。在技术部门，有净零排放目标的企业收入占部门收入总额的近 60%。在其他部门，净零承诺覆盖了航空和航运业务的 30-40%、交通运输物流的 15%，以及建筑业的 10%。随着更多的企业做出承诺，上述份额很可能会继续增加。

图 1.4 ▢ 已宣布 2050 年净零排放承诺的大型能源相关企业在不同部门的活动



国际能源署。保留所有权利。

*从部门内已设定净零排放目标的企业的情况来看，
有些部门在净零排放的路上走得更远*

注：范围 1 = 来自企业自有或控制的能源和其他来源的直接排放。范围 2 = 与企业发电、产热以及购买和使用的燃料有关的间接排放。范围 3 = 来自非自有或直接控制但与企业活动有关的来源的间接排放（如员工差旅，所购材料和燃料的开采、运输和生产，以及燃料、产品和服务的终端使用）。部分价值链包括范围 1 和 2 的排放，以及企业价值链中特定地理位置或环节的范围 3 的排放。

来源：国际能源署基于各行业 10-25 强企业报告的分析。

不同企业做出的承诺可能不易相互比较。大多数企业根据温室气体核算体系（WRI, WBCSD, 2004）进行排放核算、设定净零承诺，但这些承诺的覆盖面和时间框架有很大差异。有些承诺只覆盖企业自身的排放，例如在办公室和生产设施中改用零排放的电力，以及在交通运输或工业作业中不再使用石油；做出此类承诺的企业包括联邦快递、安赛乐米塔尔和马士基。有些承诺则涵盖了企业价值链中某些部分的更广泛排放（如欧洲的雷诺），或与企业活动有关的所有间接排放

（如大金、丰田、壳牌、埃尼和海德堡）。大约 60% 的承诺着眼于到 2050 年实现净零排放，但有几家企业已经将期限提前到 2030 年或 2040 年。

已经宣布净零承诺的企业中，约有 40% 还没有说明将如何实现承诺的目标。对于已有详细规划的企业来说，主要的选择包括直接减排、使用二氧化碳移除技术（如造林，配备碳捕捉、利用和封存（CCUS）的生物能源，或配备二氧化碳封存的直接空气捕捉），以及购买排放配额（其他方减排产生的信用额）。要想消除价值链中最难减排部分的排放，使用抵扣可能是成本效益较好的方案，但前提是产生排放信用额的机制能够带来永久性的、额外的可证实减排量。然而，在全球范围内，符合净零排放要求的排放信用额的供应很可能是有限的，使用排放信用额可能会占用原本可以投入直接减排方案的资金。

1.3 既定政策情景下的排放和能源展望

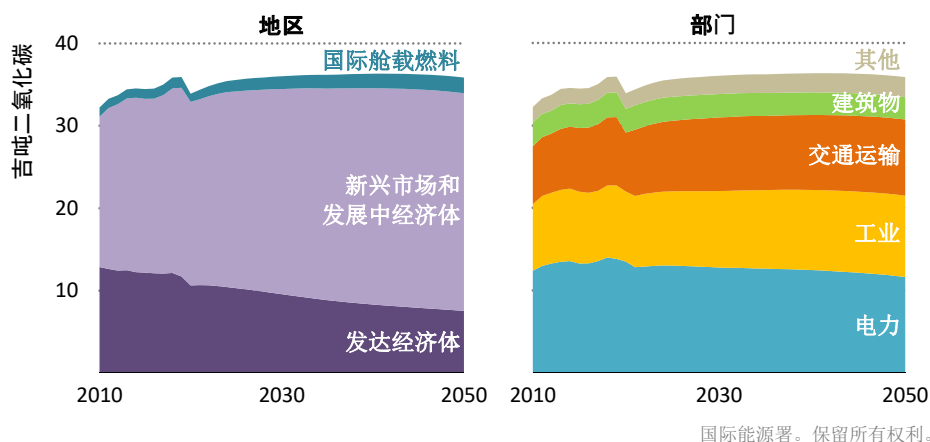
国际能源署的既定政策情景（STEPS）显示了现有既定政策对能源部门的影响。这种情景考虑了国家能源和气候规划方面和相关支持政策方面的最新信息。它还考虑了具有健全执行法律或监管措施支撑的政策，包括各国截至 2020 年 9 月根据《巴黎协定》提出的国家自主贡献，以及各国已宣布的经济刺激和复苏系列方案中的能源相关部分。到目前为止，只有少数净零排放承诺具有配套的详细政策、实施计划或中期目标的支持；因此，大多数净零排放承诺没有纳入既定政策情景的考虑范围。

1.3.1 二氧化碳排放

既定政策情景下，全球二氧化碳排放量在近期趋势中只略有整体改善。电力部门改用可再生能源，使得排放量提前达峰，但所有部门的总体减排量远不能达到 2050 年净零排放的要求。二氧化碳年排放量从 2020 年新冠疫情造成的下滑中迅速反弹：将从 2020 年的 34 吉吨上升到 2030 年的 36 吉吨，然后在 2050 年前保持在大致相同的水平（图 1.5）。如果 2050 年后排放量继续按此轨迹发展，并且其他来源的温室气体排放量具有类似的变化趋势，则 2100 年全球平均表面温度将上升约 2.7°C（概率 50%）。

发达经济体与新兴市场和发展中经济体相比，排放前景差异很大。在发达经济体中，二氧化碳排放量尽管在 2020 年代初会发生小幅反弹，但由于在减少能源需求和改用清洁燃料方面的政策和技术进步，2020 年至 2050 年期间的排放量将下降约三分之一。在新兴市场和发展中经济体中，由于人口增加、经济快速增长、城市化和基础设施扩张，能源需求将继续强劲上涨：其影响将大于能效提高和清洁技术部署的减排作用，导致二氧化碳排放量到 2040 年代中期增长近 20%，然后到 2050 年略有下降。

图 1.5 > 既定政策情景下，不同地区和部门的能源相关和工业过程的二氧化碳排放量



2020 年后，全球二氧化碳排放量将迅速反弹，然后趋于平稳，
发达经济体的减排量将被其他地区的排放增量所抵消

注：其他 = 农业和能源部门自用。

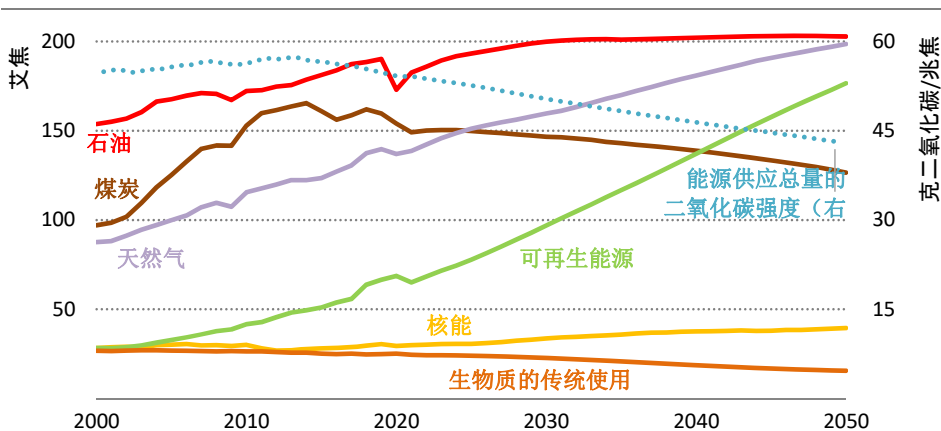
1.3.2 能源供应总量、终端消费总量和发电量

既定政策情景中预测的二氧化碳排放趋势是两类变化的作用结果：能源使用量的变化，以及燃料和技术结构的变化。2020 年至 2050 年期间，在既定政策情景下全球能源供应总量（TES）⁵增幅略高于 30%（图 1.6）中。如果不考虑能源强度（即每单位 GDP 的能源使用量）预计将年均减少 2.2%，则 2050 年的能源供应总量将比目前高出约 85%。在发达经济体中，此期间尽管经济活动量将增加 75%，但能源使用量将下降约 5%。在新兴市场和发展中经济体中，2020 年至 2050 年间经济产出将扩大两倍，相应地，2050 年能源使用量将增加 50%。虽然新兴市场和发展中经济体的 GDP 和能源使用量将会增长，但在 2050 年仍将有 7.5 亿人用不上电，其中 95% 以上在撒哈拉以南非洲，并且有 15 亿人将继续依赖传统的生物能源来烹饪。

2020 年至 2050 年期间，全球燃料结构将发生重大变化。煤炭用量在 2014 年达峰后将下降约 15%。石油需求量在 2020 年因新冠疫情急剧下降，之后迅速反弹，2023 年将恢复到 2019 年的水平，即 9800 万桶/天，并在 2030 年后不久达到约 1.04 亿桶/天的平台期。天然气需求量将从 2020 年的 3.9 万亿立方米增加到 2030 年的 4.6 万亿立方米，进而增至 2050 年的 5.7 万亿立方米。核能将在 2020 年至 2030 年间增长 15%，主要是由于中国的核能扩张。

⁵ 根据《国际能源统计建议》（IEA, 2020d），一次能源供应总量（或一次能源需求总量）一词已被更改为能源供应总量。

图 1.6 ▸ 既定政策情景下，能源供应总量和二氧化碳排放强度

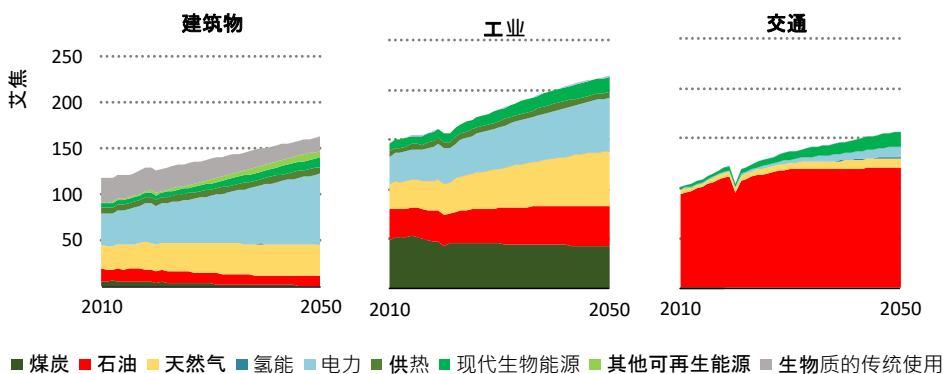


国际能源署。保留所有权利。

从目前到2050年，煤炭用量下降，石油步入平台期，可再生能源和天然气大幅增长

在既定政策情景下，所有部门的终端消费总量都将增加，其中以电力和天然气部门为主（图 1.7）。全部增幅都发生在新兴市场和发展中经济体。能源使用量变化最大的是电力部门（图 1.8）。2020年至2050年间，全球电力需求将增加80%，大约是终端能源消费总体增长率的两倍。全球电力需求增量中，85%以上来自新兴市场和发展中经济体。从目前到2050年，在新兴市场和发展中经济体中，尽管可再生能源强劲增长，但煤炭仍是主要的发电能源；在发达经济体中，煤炭发电量将急剧下降。

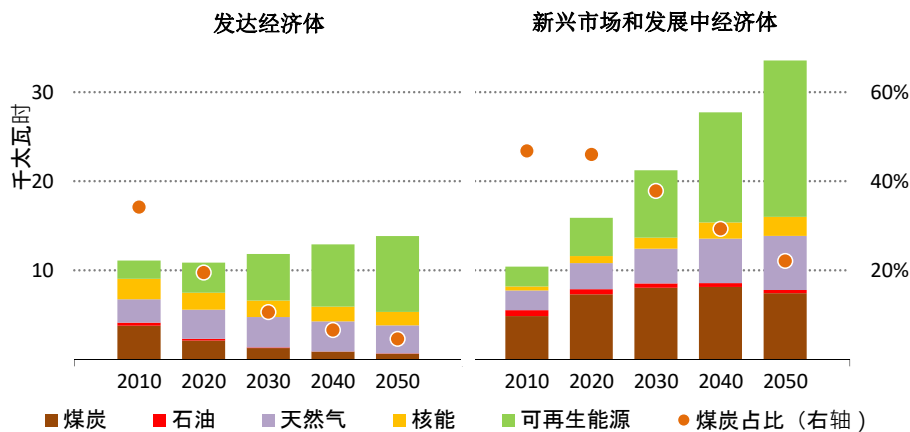
图 1.7 ▸ 既定政策情景下，不同部门和燃料的终端消费总量



国际能源署。保留所有权利。

2020年至2050年间，终端能源消费年均增长1%，
大部分增长由电力和天然气满足

图 1.8 ▽ 既定政策情景下，不同燃料的发电量以及煤电的占比



国际能源署。保留所有权利。

新兴市场和发展中经济体驱动了全球电力需求的大部分增长，

这些增长主要由可再生能源和燃气满足，但煤炭对发电仍然很重要

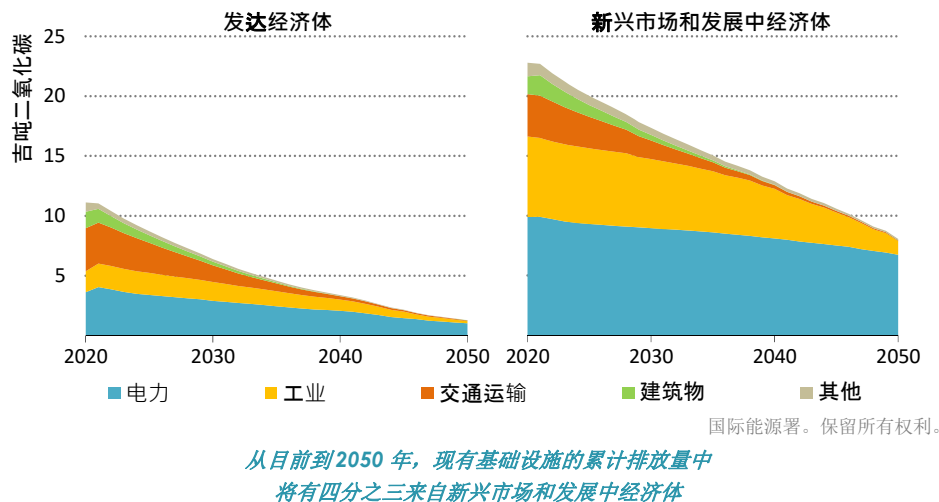
1.3.3 现有资产的排放量

能源部门拥有大量的长期和资本密集型资产。城市基础设施、管道、炼油厂、燃煤电厂、重工业设施、建筑物和大型水电站的技术和经济寿命可能远远超过 50 年。我们估计，如果今天的能源基础设施以类似于过去的方式运行到典型寿命结束，则 2020 年至 2050 年期间能源相关和工业过程的二氧化碳累积排放量将达到近 650 吉吨。与将全球变暖限制在 1.5°C（概率 50%）的剩余二氧化碳总预计量相比，上述估计将超出预计的 30% 左右（见第 2 章）。

电力部门占现有资产排放总量的 50% 以上；仅燃煤电厂就占排放总量的 40%。工业是第二大排放部门，其中钢铁、水泥、化工和其他工业占现有资产排放总量的 30% 左右。这些子行业中，生产设施寿命较长（高炉或水泥窑典型寿命为 30-40 年），并且全球资本存量相对较新，因此这些子行业占排放总量的比例较大。交通运输部门占现有资产排放的比例略高于 10%，建筑物部门略低于 5%。交通运输和建筑物部门的车辆和设备寿命通常比电力和工业部门的资产寿命短得多（例如，一般认为乘用车寿命为 17 年左右），但道路、电力网络和燃气网络等有关基础设施网络的寿命非常长。

不同区域之间现有资产的排放量存在较大差异（图 1.9）。发达经济体与新兴市场和发展中经济体相比，资本存量往往旧得多，特别是在电力部门，因此发达经济体的现有资产将会更早达到寿期。例如，中国燃煤电厂的平均厂龄为 13 年，亚洲其他地区为 16 年，而欧洲约为 35 年，美国约为 40 年（IEA, 2020e）。

图 1.9 ▸ 不同部门和地区现有基础设施的排放量



1.4 已宣布承诺情景

已宣布承诺情景（APC）中，假定所有国家层面的净零排放承诺都将全面按时实现。因此，它在既定政策情景中的政策承诺基础上更进一步。已宣布承诺情景的提出，旨在考察全面实施国家净零排放承诺会推动世界在净零排放道路上走多远，并研究这样的道路需要能源部门转型达到多大规模。

已宣布承诺情景下，有关净零排放承诺实施方式的假设对能源系统有着重要影响。涵盖所有温室气体排放的净零承诺并不一定意味着能源部门的二氧化碳排放量需要达到净零。例如，一个国家的净零规划可能设想通过林业或土地利用来吸收排放，或通过使用配备CCUS的生物能源或直接空气捕捉（DAC）产生的负排放来抵消部分剩余的能源相关排放。⁶ 我们无法确切知道净零承诺将如何实施，但已宣布承诺情景的设计，特别是关于能源系统路径的细节，参考了一些国家机构为支持净零承诺而制定的路径（专栏 1.1）。对于尚未做出净零承诺的国家，我们假定它们的政策与既定政策情景中的政策相同。人口和经济增长等非政策假设与既定政策情景的假设相同。

专栏 1.1 ▸ 就实现国家净零排放目标与国家机构进行磋商

有些学术和政府机构为支持政府做出的净零承诺制定了路径；国际能源署与这些机构的专家进行了广泛磋商，以便获取净零路径相关工作所需的信息。参与磋商的各方包括为中国、欧盟、日本、英国和美国等制定了净零排放路径的团体，以及政府间气候变化专门委员会（IPCC）。我们并没有在已宣布承诺情景中直接使

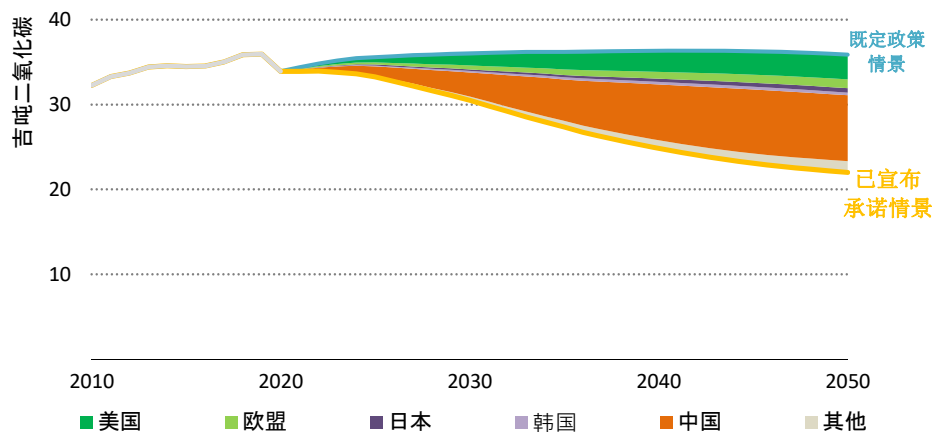
⁶ 例如，根据欧盟最近的整个经济体范围净零减排路径，2050年能源部门仍将排放约1.4亿–2.1亿吨二氧化碳，这些排放由来自管理的土地利用汇的二氧化碳移除以及配备CCUS的生物能源和DAC所抵消。（European Commission, 2018）。

用这些路径的数据；不过，磋商讨论为我们模型中的国家偏好和各辖区的限制因素提供了信息，并为在整个经济体范围内实现净零目标所需的能源相关二氧化碳总体减排水平描绘了基线。

1.4.1 二氧化碳排放

已宣布承诺情景下，到 2023 年排放量会出现小幅反弹，不过反弹幅度将远低于紧随 2008-09 年金融危机后出现的排放增长。二氧化碳排放量将再也不会达到以前的 36 吉吨峰值。到 2030 年，全球二氧化碳排放量将下降约 10% 至 30 吉吨，到 2050 年下降至 22 吉吨。这比 2020 年的水平低 35% 左右，比既定政策情景下的水平低 14 吉吨（图 1.10）。如果 2050 年后排放量延续这一趋势，并且非能源相关的温室气体排放量具有类似的变化水平，则 2100 年全球平均表面温度将上升约 2.1°C（概率 50%）。

图 1.10 ▶ 2010-2050 年不同情景下全球能源相关和工业过程的二氧化碳排放量，以及各地区的减少量



国际能源署。保留所有权利。

如果实现现有净零排放承诺，则 2050 年全球二氧化碳排放量减少到 22 吉吨；

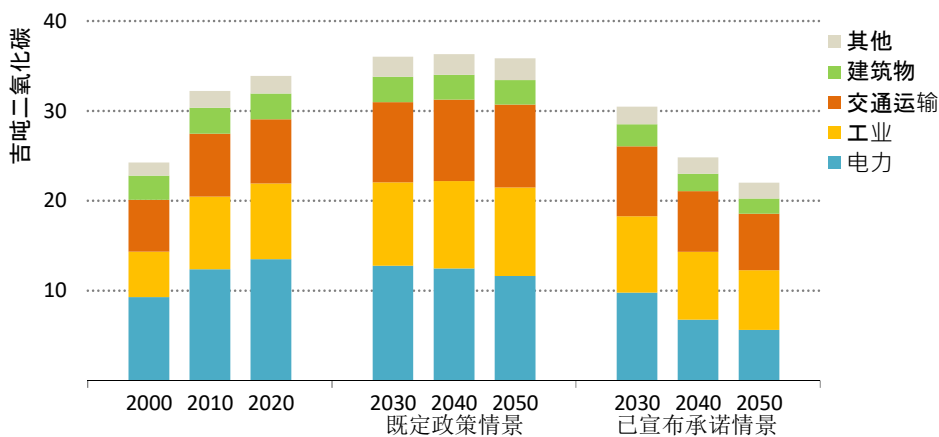
这大幅低于目前政策下的排放量，但离净零排放还很远

可见，迄今已做出的净零承诺对当前的二氧化碳排放轨迹将产生重大影响。然而，也可以看出，现有净零排放承诺远远不足以在 2050 年实现全球净零排放。这凸显了切实政策和规划对全面实现长期净零承诺的重要性。以上分析还突出表明了更多其他国家做出（并兑现）净零排放承诺的价值：越多国家这样做，且承诺目标越高远，则与 2050 年实现净零排放的目标越接近。

已宣布承诺情景下，二氧化碳排放量降幅最大的是电力部门，该部门的全球排放量将在 2020 年至 2050 年间下降近 60%。尽管随着能源终端使用的电气化程度上升（特别

是交通运输和建筑物的电气化），电力需求几乎翻了一番，但电力部门的排放量仍将如上所述出现下降（图 1.11）。而既定政策情景下的排放量降幅还不到 15%。

图 1.11 ▽ 既定政策情景和已宣布承诺情景下，各部门的全球二氧化碳排放量



国际能源署。保留所有权利。

**宣布的净零承诺将使 2050 年电力部门的排放量减少 60%，
建筑物部门减少 40%，工业部门减少 25%，交通运输部门减少 10% 出头。**

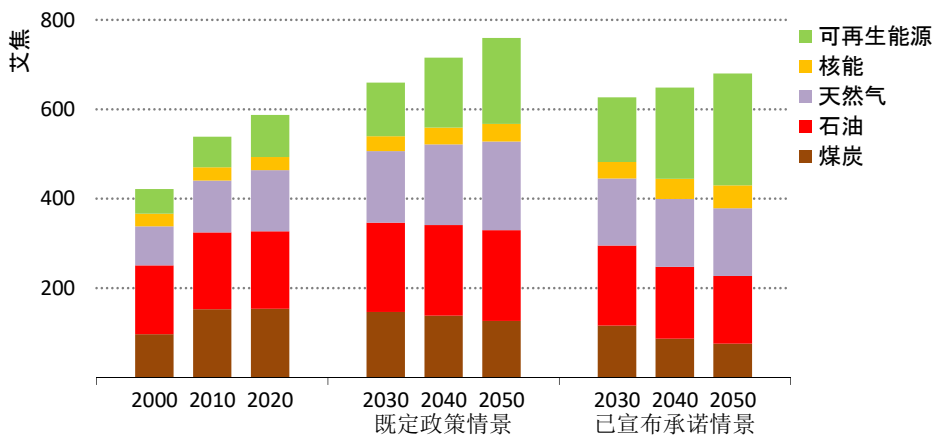
已宣布承诺情景下，交通运输和工业部门从目前到 2050 年的二氧化碳排放量下降较不明显，未做出净零承诺的地区能源需求增长将部分抵消其他地区的减排努力。2020 年至 2050 年期间，建筑物部门的排放量将下降约 40%，而既定政策情景下该降幅约为 5%：建筑物中的化石燃料使用主要是用于供热，而已做出承诺的国家在全球供热需求中占比较高。

即使在已做出净零承诺的地区，2050 年也仍将有一些剩余的排放，主要是在工业和交通运输部门。这是因为缺乏可以在重型卡车、航空、航运和重工业中消除所有排放的商业化方案。

1.4.2 能源供应总量

已宣布承诺情景下，2020 年至 2050 年间全球能源供应总量将增加 15% 以上，而在既定政策情景中该增幅为三分之一（图 1.12）。从目前到 2050 年，能源强度年均降幅将达到约 2.6%，而既定政策情景下则为 2.2%。在新兴市场和发展中经济体中，经济和人口增长最快，而净零承诺数目相对较少；这些国家的能源需求将大幅增加，增幅将大于做出净零承诺的国家的能源需求量减幅。

图 1.12 ▸ 既定政策情景和已宣布承诺情景下，不同来源的能源供应总量



国际能源署。保留所有权利。

在已宣布承诺情景下，已宣布的净零承诺将使能源供应总量中的可再生能源占比从2020年的12%提升到2050年的35%，被可再生能源取代的主要是煤炭和石油

已宣布承诺情景下，可再生能源主导全球能源供应的增长，在能源结构中的份额将从2020年的12%增加到2050年的35%（既定政策情景下2050年为25%）。电力部门中，太阳能光伏发电和风电共占可再生能源供应增长的50%左右，生物能源占30%左右。生物能源用量在工业部门将增加一倍，在发电部门将增加两倍，在交通运输部门将增加三倍：当它与CCUS结合使用时，在减少供热的排放和从大气中清除二氧化碳方面将发挥重要的作用。核能在能源结构中的份额保持不变，产出到2030年将增加四分之一（既定政策情景下增加15%），该增量由现有核电厂的寿期延长和一些国家的新建反应堆驱动。

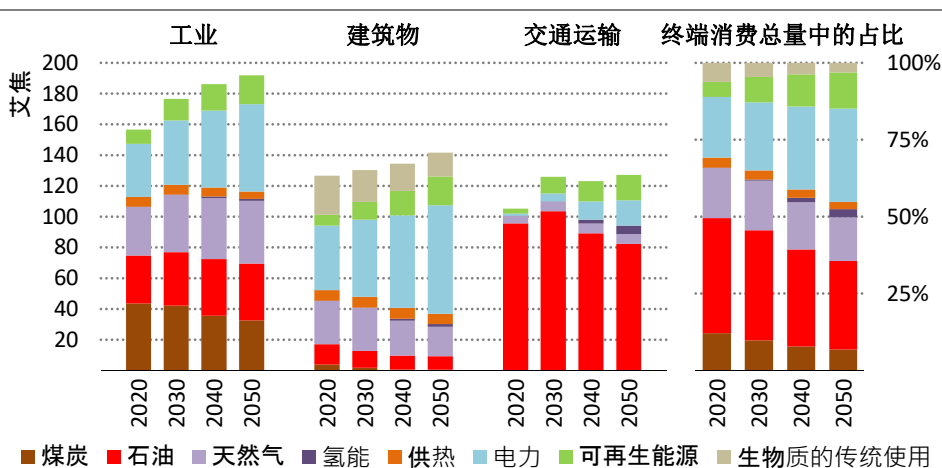
与既定政策情景相比，已宣布承诺情景中全球煤炭用量的下降速度快得多。全球煤炭用量将从2020年的52.5亿吨煤当量下降到2030年的40亿吨煤当量，进而下降到2050年的26亿吨煤当量（既定政策情景下，2050年为43亿吨煤当量）。下降的主要原因是：在做出净零承诺的国家，随着对燃煤电厂进行再利用、改造或退役，燃煤发电量减少。在发达经济体中，无减排措施的燃煤电厂一般会在未来10-15年内被逐步淘汰。中国在2060年实现碳中和的道路上，电力用煤量将在2020年至2050年间下降85%，降幅将超过无净零承诺的国家的煤炭持续增加量。全球范围内，2020年至2050年期间工业用煤量将下降25%，而在既定政策情景中的下降幅度为5%。

石油需求在2020年代初略有恢复，但将不会重返2019年的历史峰值。由于交通运输电气化得到大力推动以及向生物燃料和氢能转型（尤其是在做出承诺的地区），石油需求将在2030年代早期下降到9000万桶/天，2050年下降到8000万桶/天，比既定政策情景中低约2500万桶/天。天然气需求将从2020年的约3.9万亿立方米增加到2025年的约4.35万亿立方米，之后直到2050年将大致持平（在既定政策情景中继续增加到约5.7万亿立方米）。

1.4.3 终端消费总量

已宣布承诺情景下，全球各个主要终端用能部门的能源用量都将继续增长，但增速显著低于既定政策情景下的增速（图 1.13）。2020 年至 2050 年期间，终端消费总量（TFC）将增加约 20%，而既定政策情景中增加量为 35%。在已宣布承诺情景中，能效提升措施将发挥重要作用，减少做出净零承诺的國家的需求增长。如果没有能效提升，则电力需求的增长将使得发电中用可再生能源取代化石燃料的难度加大。与既定政策情景相比，已宣布承诺情景下能源需求减少最多的部门是交通运输，这要归功于向电动车的转型加速，而电动车的能效大约是常规内燃机汽车的三倍。

图 1.13 ▸ 已宣布承诺情景下的终端消费总量



国际能源署。保留所有权利。

已宣布的净零承诺将推动全球从化石燃料转向电力、可再生能源和氢能。电力的份额将从目前的 20% 上升到 2050 年的 30%

已宣布承诺情景下，终端能源使用中的燃料结构将经历重大转变。到 2050 年，在除了交通运输部门以外的各个部门中，电力将是用量最大的单一燃料；交通运输部门中，石油仍将占据主导地位。交通运输部门继续大量使用石油的原因是：没有净零承诺的國家仍然大量使用石油，而且交通运输部门中的很大一部分（尤其是卡车和航空）难以实现电气化。然而，在已宣布承诺情景中，交通运输部门的电力使用将会取得进展，由于电动车快速增加，石油用量将在 2030 年后开始下滑，到 2050 年电动车将占全球乘用车销量的 35% 左右，2050 年占近 50%（既定政策情景下，2050 年约为 25%）。建筑物部门的电气化步伐在已宣布承诺情景中也比在既定政策情景中快得多。

到 2050 年，全球所有终端用能部门都将扩大可再生能源的直接使用。现代生物能源将占这一增长的大部分，主要形式是将生物甲烷混入天然气管网，以及在交通运输中使用液体生物燃料。现代生物能源的使用主要发生在做出净零承诺的地区。与既定政策情景相比，氢能和氢基燃料在已宣布承诺情景中将发挥更大作用，在 2050 年达到近 15 艾焦，不过它们届时在全球终端消费总量中的份额仍然只有 3%。交通运输部门

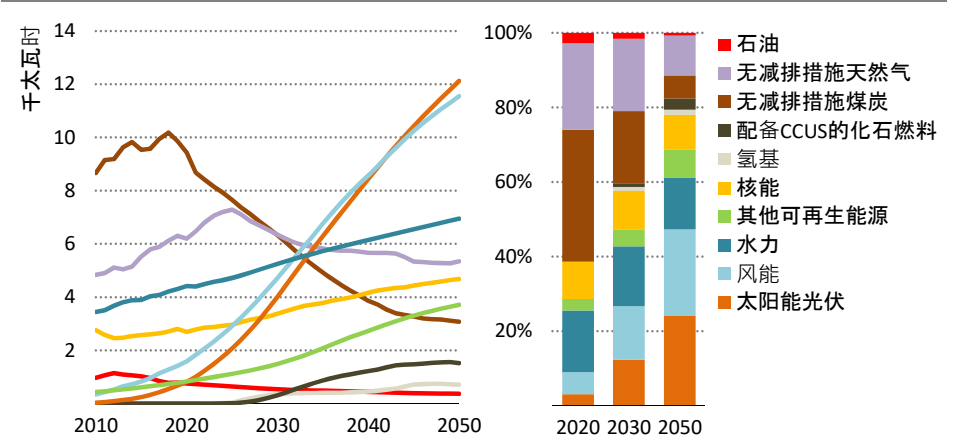
将占 2050 年所有氢能消费的三分之二以上。同时，工业和精炼部门的现场制氢也将逐渐转向使用低碳技术。

1.4.4 发电

已宣布承诺情景下，在未来三十年全球发电量将几乎翻一番，从 2020 年的约 26 800 太瓦时上升到 2050 年的超过 50 000 太瓦时，比既定政策情景中的发电量高出约 4000 太瓦时。所有发电增量都来自低排放能源。由于太阳能光伏和风能在发电中领先于其他能源，可再生能源在发电中的比例将从 2020 年的 29% 上升到 2050 年的近 70%（既定政策情景下约为 55%）（图 1.14）。2050 年，太阳能光伏和风能共计将占到电力供应的近一半。水电继续扩大，到 2050 年将跻身于电力结构中的第三大能源。核电也将稳步增长，在中国的增长带动下，将保持约 10% 的全球市场份额。用于发电的天然气从现在到 2020 年代中期将略有增加，然后回落；煤炭在发电中的份额将从 2020 年的 35% 左右下降到 2050 年的不足 10%。届时仍存的煤炭发电量中，将有 20% 来自配备 CCUS 的煤电厂。

到 2030 年左右，氢和氨将开始作为发电的燃料投入使用，主要是与燃气轮机中的天然气和燃煤电厂中的煤炭结合使用。这将延长现有资产的使用寿命，有助于保障电力系统的充足性，并降低许多国家电力部门转型的总体成本。电池总容量也将大幅提升，在 2050 年达到 1600 吉瓦，比既定政策情景下高出 70%。

图 1.14 ▶ 已宣布承诺情景下，不同能源来源的全球发电量



国际能源署。保留所有权利。

已宣布承诺情景下，电力供应中可再生能源的份额将创下新高，从 2020 年的略低于 30% 上升到 2050 年的近 70%，而燃煤发电量将稳步下降

注：其他可再生能源 = 地热能、太阳能热力和海洋能。

2050 年全球二氧化碳净零排放路径

摘要

- 2050 年净零排放情景（NZE）显示了全球能源部门到 2050 年实现二氧化碳净零排放所需做出的努力。在相应减少能源部门以外的温室气体排放的同时，这也与将全球气温升幅限制在 1.5°C 避免出现温度超标（概率为 50%）的努力相一致。实现这一目标将需要全球各国政府在目前国家自主贡献和净零承诺的基础上提高目标。
- 在净零排放情景中，全球能源相关和工业过程产生的二氧化碳排放量在 2020 年至 2030 年间下降近 40%，并在 2050 年达到净零。2030 年将实现可持续能源普及。来自化石燃料使用的甲烷排放量到 2030 年将减少 75%。这些变化发生的同时，全球经济到 2050 年不止翻一番，全球人口增加 20 亿。
- 在净零排放情景中，2020 年至 2030 年间，能源供应总量下降 7%，并在 2050 年之前保持在这个水平上下。2030 年前，太阳能光伏和风能成为全球的主要电力来源，在 2050 年将共计提供全球近 70% 的发电量。生物能源的传统使用将在 2030 年前逐步淘汰。
- 2050 年，煤炭需求将降至 6 亿吨煤当量，降幅达 90%；石油需求将下跌至 2 400 万桶/天，降幅 75%，而天然气需求将下降至 1.75 万亿立方米，降幅 55%。2050 年仍在使用的化石燃料将用于：含碳的非能源商品（如塑料）的生产、配备碳捕捉、利用和封存（CCUS）的工厂，以及缺乏低排放技术的部门。
- 在净零排放情景中，2030 年前约一半的减排量源于能效、风能和太阳能。它们将在 2030 年后将继续贡献减排，但 2030 年至 2050 年期间，电气化、氢能使用和 CCUS 部署将不断增加，并在此期间贡献一半以上的减排量；目前上述相关技术尚未全部进入市场。在净零排放情景中，2050 年二氧化碳的移除量达到 1.9 吉吨，低碳氢的需求达 5.2 亿吨。2030 年，公民和企业的行为改变可以避免 1.7 吉吨二氧化碳的排放、减缓能源需求增长，以及促进清洁能源转型。
- 近年来，全球范围内的能源部门年平均投资额为 2.3 万亿美元；在净零排放情景中，到 2030 年，投资额将跃升至 5 万亿美元。在净零排放情景中，以在全球 GDP 中的占比来衡量，目前到 2050 年的年均能源投资将比近年高出约 1%。
- 净零排放情景探索各种能使能源部门脱碳的机会，包括所有的燃料和技术。但通往 2050 年的路径有许多不确定因素。如果行为改变比净零排放情景设想的程度低，或者可用的可持续生物能源较少，那么能源转型将更加昂贵。如果不能开发出化石燃料的 CCUS，可能会推迟或阻碍对水泥生产过程中的排放进行 CCUS 和碳移除技术的开发，从而使 2050 年实现净零排放的难度大大增加。

2.1 导言

实现与世界气候目标相适应的全球能源转型无疑是一项艰巨的任务。正如第 1 章所强调的那样，目前各国政府做出的将排放量减少到净零的承诺，总共涵盖了当今全球经济活动和全球二氧化碳排放量的 70% 左右。已宣布承诺情景显示，如果所有这些承诺

都得到全面兑现，我们的进展与目标（2050 年实现全球净零排放）之间的差距将会缩小。但它也表明，差距仍将很大。即使全部现有的净零承诺全面实现，2050 年全球能源相关和工业过程的二氧化碳排放量仍将达到 22 吉吨，与 2100 年温度上升约 2.1℃（概率 50%）的目标相一致。

在本章中，我们将研究 2050 年净零排放情景下的能源部门转型。首先，将概述预测所依据的关键假设和市场动态，包括化石燃料和二氧化碳的价格预测。接下来将讨论全球二氧化碳排放、能源使用和投资趋势，包括能效措施、行为改变、电气化、可再生能源、氢和氢基燃料、生物能源以及 CCUS 所发挥的关键作用。此外，还将探讨净零排放全球路径上的一些关键不确定因素，涉及行为改变、可持续生物能源的可用性以及化石燃料的 CCUS 部署。特定能源部门的转型将在第 3 章进行详细评估和讨论。

2.2 情景设计

2050 年净零排放情景（NZE）的设计旨在表明：为了实现 2050 年能源相关和工业过程的二氧化碳净零排放，主要部门的各种行为体需要做出的努力及其期限。¹ 另一个目标是尽量减少能源部门的甲烷排放。近年来，能源部门约占全球温室气体（GHG）排放量的四分之三。在净零排放情景中，2050 年之前实现能源相关和工业过程的二氧化碳净零排放并不依赖于能源部门以外的行动，但限制气候变化确实需要能源部门以外的行动。因此，我们与国际应用系统分析研究所（IIASA）合作，额外研究了净零排放情景中与能源部门转型相称的土地利用方面的二氧化碳减排。在采取行动减少所有其他温室气体排放源的同时，到 2050 年实现能源部门的二氧化碳净零排放，是与将全球长期平均气温升幅限制在 1.5℃（概率 50%）、避免出现温度超标的努力相一致的（IPCC, 2018）。

净零排放情景旨在确保目前到 2030 年能源相关和工业过程的二氧化碳排放量与 IPCC 在《全球升温 1.5℃ 特别报告》中评估的 1.5℃ 情景下的减排量一致，即温度不超标或超标幅度较低或有限。² 此外，净零排放情景纳入了与能源相关的《联合国可持续发展目标》的具体行动，即到 2030 年实现能源普及并实现空气污染大幅减少。净零排放情景中的预测来自于一个混合模型，该模型结合了以下两个模型的一些组成部分：国际能源署用于《世界能源展望》年度预测的世界能源模型（WEM），以及能源技术展望（ETP）模型。

专栏 2.1 ▶ 国际能源署净零排放情景的建模方法

国际能源署结合 WEM 和 ETP 模型的相对优势，采用了一种新的混合建模方法来建构净零排放情景。WEM 是一个大规模的模拟模型，用于复制竞争性能源市场的运作方式，并深入研究政策对每个部门和地区的影响。ETP 模型是一个大规模的部分

¹ 除非另有说明，本章中的二氧化碳排放量指的是能源相关和工业过程的二氧化碳排放量。二氧化碳净零排放是指向大气中排放的二氧化碳为零，或通过直接空气捕捉和配备碳捕捉和封存生物能源来移除二氧化碳，从而抵消任何剩余二氧化碳的排放。

² 如果升温超过 1.5℃ 但超出的幅度小于 0.1℃，并且在 2100 年升温回落到 1.5℃ 以下，则 IPCC 将这种情景定为“温度不超标或不大超标”；如果升温超过 1.5℃，超出的幅度介于 0.1-0.4℃ 之间，但在 2100 年回落到 1.5℃ 以下，则为“较高的温度超标”。

优化模型，包含对能源转换、工业、交通运输和建筑物部门的 800 多项单项技术的详细技术描述。

国际能源署首次采用上述混合建模方法。这两个模型的结合，使我们能够深入了解净零排放情景中的能源市场、投资、技术，以及实现能源部门转型所需的政策水平和细节。

WEM 和 ETP 模型的结果与国际应用系统分析研究所（IIASA）开发的温室气体-空气污染相互作用和协同作用（GAINS）模型进行了耦合（Amann et al., 2011）。GAINS 模型用于评估空气污染物的排放以及空气污染对健康的影响。国际能源署的模型结果也首次与 IIASA 的全球生物圈管理模型（GLOBIOM）耦合，以提供关于土地利用以及生物能源需求的净排放影响的数据。

国际货币基金组织（IMF）使用全球综合货币和财政（GIMF）模型对净零排放情景中投资和支出变化对全球 GDP 的影响做出了估计。GIMF 是一个多国动态随机一般均衡模型，被 IMF 用于政策和风险分析（Laxton et al., 2010; Anderson et al., 2013）。自 2008 年以来，IMF 一直用它来制做《世界经济展望》情景分析。

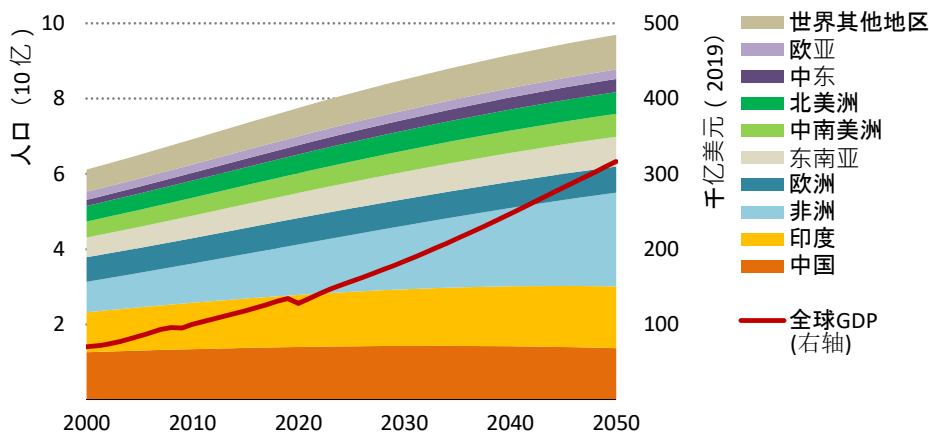
2050 年在全球范围内实现二氧化碳净零排放有许多可能的路径，并且任何一条路径都会受到许多不确定因素的影响；因此，净零排放情景是其中一条路径，而不是实现净零排放的唯一路径。路径取决于多种因素，例如：新技术和新兴技术的创新速度、人们能够或愿意改变行为的程度、可持续生物能源的可用性以及国际合作的程度和有效性。我们在这一章和第 3 章中将探究一些关键的替代方案和不确定因素。2050 年净零排放情景是建立在以下原则之上的：

- 所有可用技术和减排方案的采用，都是由成本、技术成熟度、政策偏好以及市场和国家条件决定的。
- 所有国家都为实现全球净零排放而合作。这需要各国参与实现净零目标的努力，以有效和互利的方式进行合作，在认识到各国和各地区经济发展处于不同阶段的同时，也认识到确保公正转型的重要性。
- 整个能源部门有序转型。这包括始终确保燃料和电力供应安全，尽可能减少搁浅资产，并力求避免能源市场波动。

2.2.1 人口和 GDP

净零排放情景中，能源部门转型的大背景是世界人口和经济大幅增长（图 2.1）。2020 年，全球约有 78 亿人；根据联合国预测的中位变量，预计到 2030 年将增加约 7.5 亿人，到 2050 年将增加近 20 亿人（UNDESA, 2019）。几乎所有的人口增长都发生在新兴市场和发展中经济体：2020 年至 2050 年间，仅非洲的人口增长就超过 11 亿。

图 2.1 ▶ 净零排放情景下，世界不同地区的人口和全球 GDP



国际能源署。保留所有权利。

到 2050 年，世界人口将增长到 97 亿人，
全球经济规模是 2020 年的两倍多

注：GDP = 按购买力平价计算的国内生产总值。

来源：国际能源署基于 UNDESA (2019) 的分析；Oxford Economics (2020)；IMF (2020a, 2020b)。

世界经济将从新冠疫情的影响中迅速恢复。经济规模将在 2021 年恢复到疫情前的水平。从 2022 年起，GDP 的增长趋势接近疫情前的速度，即年均 3% 左右，与国际货币基金组织的评估相一致。应对新冠疫情导致了政府债务大量增加，但经济增长的恢复，加上许多国家的低利率，使局势从长期来看是可控的。到 2030 年，世界经济规模将比 2020 年大 45% 左右，到 2050 年则将是 2020 年的两倍以上。

2.2.2 能源和二氧化碳的价格

对未来能源价格的预测不可避免地存在着高度的不确定性。在国际能源署的情景中，预测的价格旨在维持供需之间的平衡。净零排放情景下，石油和天然气需求迅速下降，因此不需要再进行化石燃料勘探，而且，除了已经批准开发的油气田，不需要再开发新的。也不再需要新建或延展煤矿。市场需要边际项目以满足需求，边际项目运营成本对定价的影响将越来越大，这将导致化石燃料的价格明显低于近年来的水平。到 2030 年，油价将下降到 35 美元/桶左右，然后缓慢下降到 2050 年的 25 美元/桶。

表 2.1 ▶ 净零排放情景下的化石燃料价格

实际值（2019 年美元）	2010	2020	2030	2040	2050
国际能源署原油（美元/桶）	91	37	35	28	24
天然气（美元/百万英热单位）					
美国	5.1	2.1	1.9	2.0	2.0
欧盟	8.7	2.0	3.8	3.8	3.5
中国	7.8	5.7	5.2	4.8	4.6
日本	12.9	5.7	4.4	4.2	4.1
蒸汽煤（美元/吨）					
美国	60	45	24	24	22
欧盟	108	56	51	48	43
日本	125	75	57	53	49
中国沿海地区	135	81	60	54	50

注：国际能源署原油价格是其成员国的加权平均进口价格。天然气价格是以总热值为基础的加权平均价格。美国天然气价格反映了国内市场的批发价格。欧盟和中国的天然气价格平衡反映了管道和进口液化天然气（LNG），而日本的天然气价格只反映了进口液化天然气。使用的液化天然气价格是在海关边境的再气化前的价格。蒸汽煤价格是调整为每千克 6 000 千卡热量的加权平均值。美国蒸汽煤价格反映了矿口价格加上运输和处理成本。中国沿海地区的蒸汽煤价格平衡反映了进口价和国内销售价格，而欧盟和日本的蒸汽煤价格则只反映了进口价格。

根据指导净零排放情景的有序转型原则，石油市场和价格的轨迹将避免过度波动。前景在很大程度上取决于资源富集国的政府和国有石油企业所采取的战略。在净零排放情景中，我们假定尽管有成本较低的资源可供支配，但政府及企业将限制对新油气田的投资。这将减少关停或关闭成本较高的生产的需要。净零排放情景下，由于资源大国现有的油气田规模大、产量下降速度慢，因此它们的市场份额仍将上升。

生产者经济体可以采取其他做法。面对迅速下降的油气需求，它们可以选择增加产量，以占领更大的市场份额。在这种情况下，需求的下降和低成本石油供应的增加，无疑将导致价格进一步走低，而且价格很可能发生剧烈波动。在实践中，特定油气生产国的可选方案取决于该国对较低油价的适应能力，以及该国可以用其自然资源生产的低排放燃料的出口市场的发展程度。

预先考虑到并缓解供应侧反馈的问题是有序能源转型讨论的核心议题。价格下降通常会导致需求发生一定的反弹，从而有可能导致无减排措施化石燃料使用增加，破坏更广泛的减排努力；政策和法规对于避免这种情况至关重要。

随着能源部门的转型，更多的燃料将在全球范围内进行交易，如氢基燃料和生物燃料。本报告假定这些商品的价格由各地区内的国内生产或进口的边际成本决定。

在净零排放情景中，所有地区都将出台广泛的能源政策和配套措施，以减少排放。例如：可再生燃料强制性规定、能效标准、市场改革、研发和部署，以及低效化石燃料补贴取消。在某些情况下，也需要直接的减排法规。例如，在交通运输部门实施法规，以减少内燃机汽车的销售、增加液体生物燃料和合成燃料在航空和航运中的使用，并采取措施确保低油价不会导致石油消费增加。

在净零排放情景中，所有地区都将实施二氧化碳定价（表 2.2）。我们假设在不久的将来，所有发达经济体的发电、工业和能源生产部门都将采用二氧化碳定价，到 2030 年二氧化碳平均价格上升到 130 美元/吨，到 2050 年上升到 250 美元/吨。在中国、巴西、俄罗斯、南非等其他一些主要经济体，以上部门的二氧化碳价格在 2050 年将上升到约 200 美元/吨。所有其他新兴市场和发展中经济体都将采用二氧化碳定价，但我们认为这些市场和经济体将实施更直接的政策来改革其能源系统，因此二氧化碳价格水平将低于其他地方。

表 2.2 ► 净零排放情景下，电力、工业和能源生产的二氧化碳价格

美元（2019 年）每吨二氧化碳	2025	2030	2040	2050
发达经济体	75	130	205	250
部分新兴市场和发展中经济体*	45	90	160	200
其他新兴市场和发展中经济体	3	15	35	55

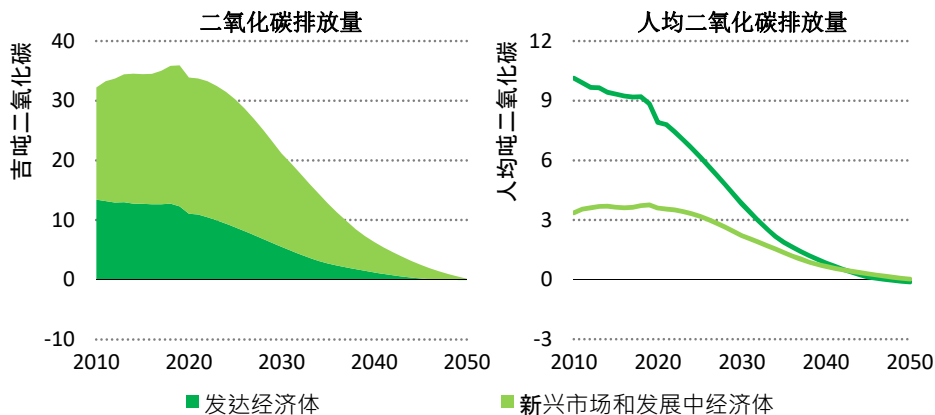
* 包括中国、俄罗斯、巴西和南非。

2.3 二氧化碳排放

在净零排放情景中，全球能源相关和工业过程的二氧化碳排放量在 2030 年下降到大约 21 吉吨，在 2050 年达到净零（图 2.2）。³ 发达经济体的二氧化碳排放量在 2045 年左右降至净零，发达国家在 2050 年将总共从大气中移除约 0.2 吉吨二氧化碳。几个新兴市场和发展中经济体的排放量也将在 2050 年前下降到净零，但总的来说，在 2050 年，这个国家群体还有大约 0.2 吉吨的剩余排放量。剩余排放量都将被发达经济体的二氧化碳移除量所抵消，从而在全球范围内实现二氧化碳的净零排放。

³ 在净零排放情景中，从目前到 2030 年期间，二氧化碳排放量下降的速度与 IPCC SR 1.5 中的 P2 路径大致相同（IPCC, 2018）。P2 情景被描述为“一种向可持续和健康的消费模式、低碳技术创新和管理良好的土地系统转变，但社会对 BECCS[配备碳捕捉和封存的生物能源]的接受程度有限……的情景”。在净零排放情景中，2030 年后，排放下降速度将比 P2 情景快得多，P2 情景中到 2050 年仍将有 5.6 吉吨的能源部门和工业过程的二氧化碳剩余排放量。

图 2.2 ▶ 净零排放情景下，全球二氧化碳净排放量



国际能源署。保留所有权利。

发达经济体的二氧化碳排放量在2045年左右降至净零，全球到2050年降至净零。

到2040年代初，全球两大类经济体的人均排放量将不相上下。

注：包括国际航空和航运的二氧化碳排放。

一些新兴市场和发展中经济体在生产基于可再生能源的电力和生物能源方面具有非常大的潜力，它们也是二氧化碳移除（CDR）的一个关键来源。移除方法包括利用可再生电力配备 CCUS 来生产大量的生物燃料（部分将出口），以及进行直接空气碳捕捉和封存（DACCS）。

发达经济体的人均二氧化碳排放量将从 2020 年的约 8 吨降至 2030 年的约 3.5 吨，届时将接近 2020 年新兴市场和发展中经济体的平均水平。新兴市场和发展中经济体的人均排放量也在下降，但起点要低得多。到 2040 年代初，两大类经济体的人均排放量将不相上下，约为每人 0.5 吨二氧化碳。

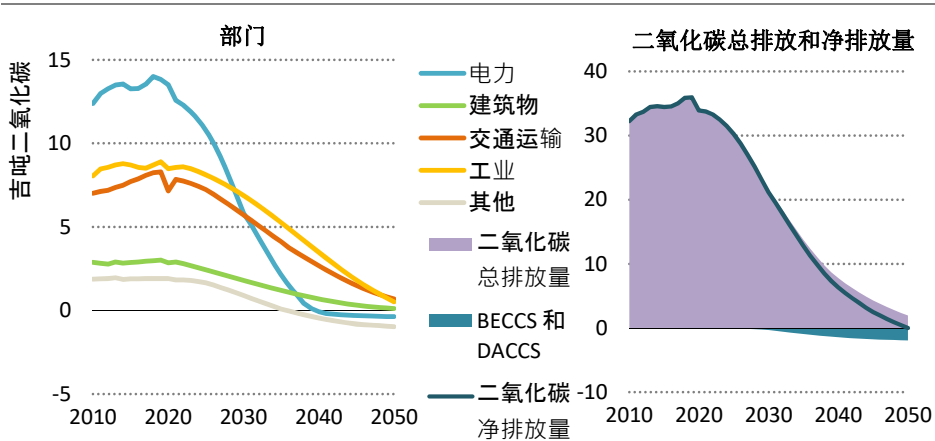
在净零排放情景中，2020 至 2050 年间，全球能源相关和工业过程的二氧化碳累计排放量略高于 460 吉吨。从目前到 2050 年，假如采取同步行动解决农业、林业和其他土地利用（AFOLU）的二氧化碳排放问题，那么该领域产生的二氧化碳将约为 40 吉吨（见第 2.7.2 节）。这意味着所有来源的二氧化碳排放总量将约为 500 吉吨，与 IPCC SR1.5 的二氧化碳预计量一致；从 2020 年开始，将升温限制在 1.5°C（50%概率）的二氧化碳总预计量为 500 吉吨（IPCC, 2018）。⁴除了将二氧化碳排放减少到净零，净零排放情景还寻求减少能源部门的非二氧化碳排放。例如，来自化石燃料生产和使用的甲烷排放量，将从 2020 年的 1.15 亿吨（3.5 吉吨二氧化碳当量）⁵降至 2030 年的 3 000 万吨和 2050 年的 1 000 万吨。

⁴ 该预计量基于 IPCC SR1.5 的表 2.2（IPCC, 2018）。它假设 2006-2015 年期间升温 0.53°C，从 2018 年起剩余的二氧化碳预计量为 580 吉吨。2018 年至 2020 年，二氧化碳的排放量大约为 80 吉吨。

⁵ 根据 IPCC 第五次评估报告中叙述的 100 年全球升温潜能，将非二氧化碳气体换算为二氧化碳当量（IPCC, 2014）。一吨甲烷相当于 30 吨二氧化碳。

在净零排放情景中，全球最快和最大量的减排首先出现在电力部门（图 2.3）。发电是 2020 年最大的排放源，但从目前到 2030 年，发电排放量将下降近 60%，主要是由于燃煤电厂的大幅减少；电力部门将在 2040 年左右实现小幅的净负排放。建筑物部门由于不再使用化石燃料锅炉，以及对现有建筑物进行能效改造，排放量在 2020 至 2030 年间将下降 40%。同期，工业和交通运输部门的排放量都将下降约 20%，而且随着低排放燃料和其他减排方案的推广，这两个部门的减排速度将在 2030 年代加快。不过，交通运输和工业部门的一些领域很难完全消除排放，例如航空和重工业；这两个部门在 2050 年都将有少量的剩余排放。这些剩余排放可以通过应用配备 CCUS 的生物能源（BECCS）和直接空气碳捕捉和封存（DACCS）来抵消。

图 2.3 ▶ 净零排放情景下，不同部门的全球二氧化碳净排放量，以及全球二氧化碳总排放量和净排放量



国际能源署。保留所有权利。

电力部门的排放下降最快，工业和交通运输部门的排放 在 2030 年代下降速度加快。
2050 年，通过 BECCS 和 DACCS 移除的二氧化碳约为 1.9 吉吨。

注：其他 = 农业、燃料生产、转化和相关过程排放，以及直接空气捕捉。BECCS = 配备碳捕捉和封存的生物能源；DACCS = 直接空气碳捕捉和封存。BECCS 和 DACCS 包括捕获和永久封存的二氧化碳排放量。

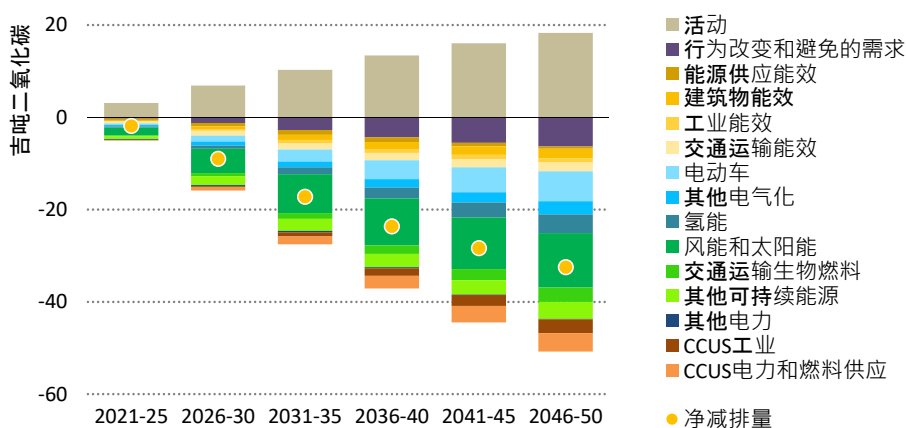
净零排放情景有以下的系统性偏好：所有新资产和基础设施要有尽可能高的可持续性和能效；由此带来的减排量占到 2050 年减排总量的 50%。解决现有基础设施的排放问题将贡献 2050 年减排量的 35%，而行为改变和避免的需求（包括材料利用效率的提高⁶以及交通运输部门的交通运输方式转变）将贡献其余 15% 的减排量（见第 2.5.2 节）。在净零排放情景中，将部署广泛的技术和措施，以减少发电厂、工业设施、建筑物、管网、设备和电器等现有基础设施的排放。净零排放情景的设计旨在尽可能减

⁶ 材料利用效率包括减少材料需求的策略，或转向使用低排放材料或低排放生产路线。例如轻量化和回收。

少搁浅资本，即初始投资没有得到回报的情况，但在很多情况下，提前退役或较低的利用率仍然会造成搁浅价值，即收入减少。

在净零排放情景中，更高能效技术的快速部署、终端使用的电气化和可再生能源的迅速增长，将在所有部门的减排方面发挥核心作用（图 2.4）。到 2050 年，近 90% 的发电量将来自可再生能源，工业和建筑物部门中约 25% 的非电力能源使用也将来自可再生能源。新兴的燃料和技术，特别是氢和氢基燃料、生物能源和 CCUS，也会发挥重要作用，尤其是在减排通常最为困难的部门。

图 2.4 ▶ 净零排放情景下，2020 年起的年均二氧化碳减排量



国际能源署。保留所有权利。

可再生能源和电气化对减排的贡献最大，但要实现净零排放，还需要一系列广泛的措施和技术

注：活动 = 经济和人口增长带来的能源服务需求变化。行为 = 使用者的决定引起的能源服务需求的变化，例如改变加热温度。避免的需求 = 技术发展（例如数字化）带来的能源服务需求变化。

2.4 能源供应总量和终端能源消费总量

2.4.1 能源供应总量⁷

2030 年能源供应总量将下降到 550 艾焦，比 2020 年低 7%（图 2.5）。在全球人口和经济大幅增长的情况下还能出现能源供应总量下降，是因为能源强度（产生一个单位 GDP 所使用的能源量）有所降低。2020 年至 2030 年期间，能源强度将平均每年下降 4%。这是通过一系列措施综合实现的：电气化、推动各种提高能效和材料利用效率的机会、有效减少能源服务需求的行为改变，以及摒弃生物能源的传统使用。⁸ 上述能

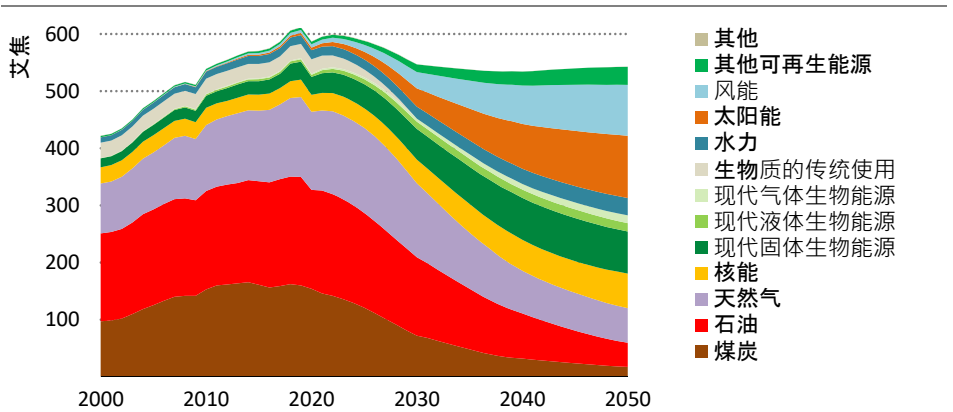
⁷ 根据《国际能源统计建议》，一次能源供应总量（TPES）或一次能源需求总量（TPED）已被更改为能源供应总量（TES）（IEA, 2020a）。

⁸ 现代形式的烹饪需要的能源比传统的使用生物质的低效炉灶要少得多。例如，液化石油气炉烹饪与传统使用生物质烹饪相比，能源使用减少五倍左右。

源强度的改善速度比前些年的速度快得多：2010 年至 2020 年期间，能源强度年均降幅不到 2%。

2030 年后，终端用能部门的持续电气化将有助于进一步降低能源强度，但由于在 2030 年以前已经尽可能大力提高能效，因此 2030 年以后提高能效的机会相对较少。与此同时，先进生物燃料、氢、合成燃料等新燃料的产量增加，趋向于推高能源使用量。因此，2030 年至 2050 年间能源强度的下降速度将放缓到每年 2.7%。随着经济和人口的持续增长，这意味着能源供应总量在 2030 年至 2040 年间略有下降，但随后直到 2050 年将大致保持平稳。在净零排放情景中，从现在到 2050 年尽管全球人口将增加近 30 亿，全球经济规模扩大三倍以上，但 2050 年能源供应总量将接近 2010 年的水平。

图 2.5 ▶ 净零排放情景下的能源供应总量



国际能源署。保留所有权利。

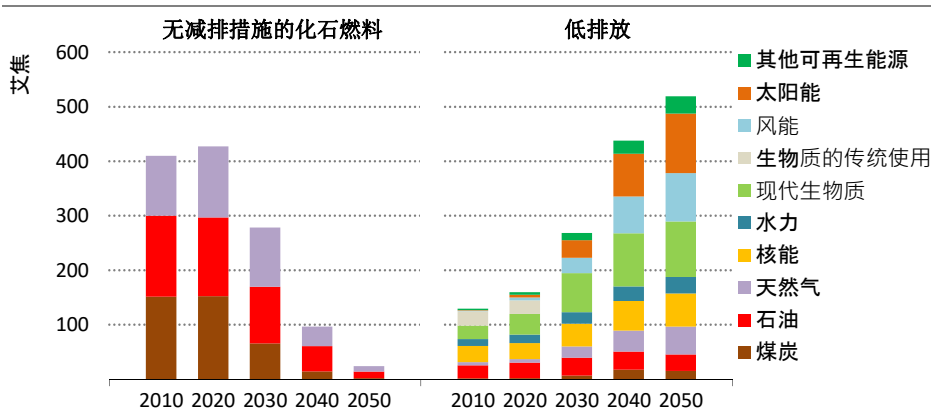
净零排放情景中，可再生能源和核电取代大部分的化石燃料用量，而化石燃料的占比将从 2020 年的 80% 下降到略高于 2050 年的 20%。

净零排放情景中 2050 年的能源结构比目前的更加多样化。2020 年，能源供应总量中石油占 30%，煤炭 26%，天然气 23%。2050 年，可再生能源将供应三分之二的能源使用量，来源包括生物能、风能、太阳能、水电和地热（图 2.6）。来自核电的能源供应也将有很大的增长，在 2020 年和 2050 年之间几乎翻一番。

在净零排放情景中，化石燃料用量大幅减少。其在能源供应总量中的占比，将从 2020 年的 80% 下降到 2050 年的 20% 多一点。不过，化石燃料的使用在 2050 年并没有下降到零：化石燃料仍将大量用于非能源产品的生产、配备 CCUS 的工厂，以及重工业和长途运输等难以减排的部门。2050 年的所有剩余排放都将被其他地方的负排放所抵消（专栏 2.2）。煤炭用量将从 2020 年的 52.5 亿吨煤当量下降到 2030 年的 25 亿吨煤当量，再到 2050 年的不足 6 亿吨煤当量；2020 年到 2050 年间年均下降 7%。石油需求在 2020 年下降了到 9 000 万桶/天以下，而且需求不会恢复到 2019 年的峰值；2030 年将下降到 7 200 万桶/天，2050 年下降到 2 400 万桶/天；2020 年到 2050 年间年均下降超过 4%。2020 年天然气用量下降到 3.9 万亿立方米，但在 2020 年代中期将超过

2019 年的高峰，然后随着电力部门逐步淘汰天然气而开始下降。天然气用量在 2030 年将下降到 3.7 万亿立方米，2050 年将下降到 1.75 万亿立方米；2020 年到 2050 年间年均下降近 3%。

图 2.6 ▶ 净零排放情景下，无减排措施的化石燃料和低排放能源的能源供应总量



国际能源署。保留所有权利。

2050 年，化石燃料仍将用于非能源产品的生产、
配备 CCUS 的工厂，以及难以减排的部门

注：低排放包括化石燃料结合 CCUS 的使用和非能源使用。

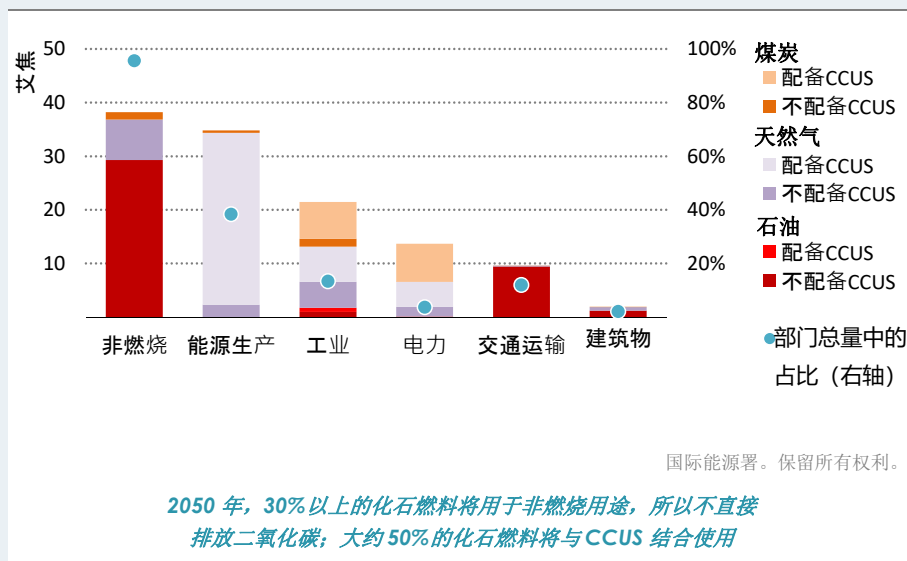
专栏 2.2 ▶ 净零排放情景下，为什么化石燃料的使用在 2050 年不会下降到零？

在净零排放情景中，2050 年的化石燃料消耗总量将约为 120 艾焦，而 2020 年为 460 艾焦。尽管 2050 年能源部门的二氧化碳净排放量为零，化石燃料的使用却不会下降到零，主要有如下三个原因：

- **用于非能源目的。**在净零排放情景中，2050 年化石燃料总用量的 30% 以上（石油用量的 70%）用于非燃烧应用，因此不会导致任何直接的二氧化碳排放（图 2.7）。例如作为化学品原料，以及用于润滑剂、石蜡和沥青的生产。净零排放情景下，将投入大量努力限制此类化石燃料的应用；例如，全球塑料回收率将从 2020 年的 15% 上升到 2050 年的 55%。但从目前到 2050 年，非能源应用中的化石燃料使用仍会略有上升。
- **结合 CCUS 使用。**2050 年约有一半的化石燃料使用将发生在配备 CCUS 的工厂中（2050 年从化石燃料中捕获的二氧化碳排放约为 3.5 吉吨）。大约有 9 250 亿立方米的天然气将在配备 CCUS 的设施中转化为氢。此外，电力和工业部门使用的约 4.7 亿吨煤炭和 2 250 亿立方米天然气将配备 CCUS，主要是为了延长较新设施的运营年限，减少搁浅资产。
- **在缺乏技术选择的部门使用。**在净零排放情景中，2050 年剩余的 20% 的化石燃料使用发生在很难完全消除排放的部门。届时的化石燃料主要是石油，它将继续为一些领域提供燃料，特别是航空业。少量无减排措施的煤炭和天然

气将用于工业和能源生产。2050 年，无减排措施化石燃料的使用将产生大约 1.7 吉吨的二氧化碳排放，而配备碳捕捉、利用和封存的生物能源（BECCS）和直接空气碳捕捉和封存（DACCS）将完全抵消这些排放。

图 2.7 ▽ 净零排放情景下，2050 年化石燃料的用量以及各部门的用量占比

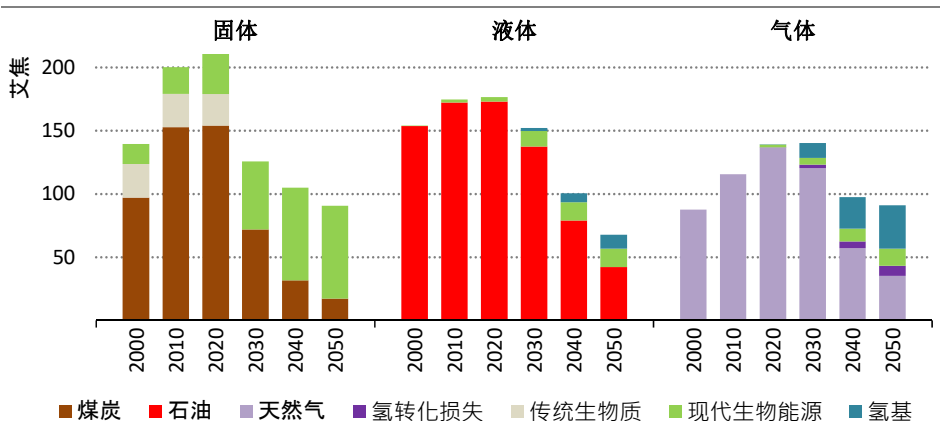


国际能源署。保留所有权利。

注：“非燃烧”包括用于石化原料、润滑剂和沥青等非排放、非能源目的的用途。“能源生产”包括用于直接空气捕捉的燃料。

在净零排放情景中，固体、液体和气体燃料继续发挥重要作用，其中生物能源和氢能有很大的增长（图 2.8）。目前，大约 40% 的生物能源用量是以传统方法将生物质用于烹饪，在净零排放情景中这将被迅速淘汰。现代形式的固体生物质（可用于减少电力和工业部门的排放）用量将从 2020 年的 32 艾焦上升到 2030 年的 55 艾焦和 2050 年的 75 艾焦，能抵消很大一部分的煤炭需求下降。氨、合成燃料、液体生物燃料等低排放液体燃料的用量，将从 2020 年的 3.5 艾焦（160 万桶油当量/天）增加到 2050 年的略高于 25 艾焦（1 250 万桶/天）。氢、合成甲烷、沼气、生物甲烷等低排放燃气的供应量，将从 2020 年的 2 艾焦上升到 2030 年的 17 艾焦和 2050 年的 50 艾焦。在净零排放情景中，2020 年至 2030 年间，气态氢产量的增长速度将是美国页岩气产量增速最快十年的两倍。

图 2.8 ▽ 净零排放情景下的固体、液体和气体燃料



国际能源署。保留所有权利。

来自生物能源、氢和氢基燃料的低排放固体、液体和气体燃料的增加，

将部分抵消煤炭、石油和天然气需求的减少

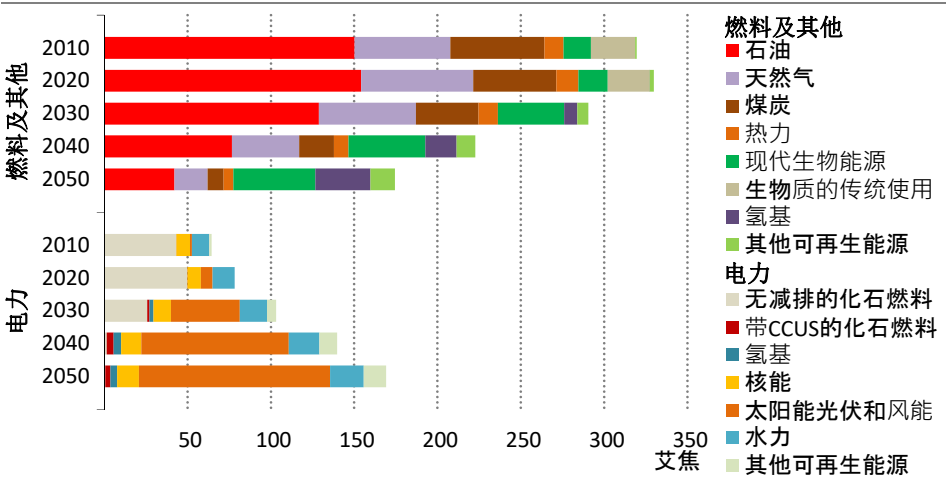
注：氢转化损失 = 使用蒸汽甲烷重整生产低碳商品氢时的天然气消耗。“氢基”包括氢、氨和合成燃料。

2.4.2 终端消费总量

全球终端消费总量在 2020 年下降 5% 后略有反弹，但在净零排放情景中将不会恢复到 2019 年的水平（435 艾焦）。2025 年至 2050 年间，终端消费总量年均降幅近 1%，到 2050 年降至 340 艾焦。能效措施和电气化两者对降幅的贡献最大，而行为改变和材料利用效率也将发挥作用。如果没有这些改进，2050 年的终端能源消费量将约为 640 艾焦，比净零排放情景中的水平高出约 90%。从 2020 年到 2030 年，电力的终端消费量将增加 25%，到 2050 年，将增加到高于 2020 年水平的两倍。在净零排放情景中，来自终端使用部门和制氢领域的电力消耗将会增加，电力需求年度总增量相当于每年增加一个像印度一样大的电力市场。电力在全球终端能源消费量中的占比将从 2020 年的 20% 跃升到 2030 年的 26% 和 2050 年的 50% 左右（图 2.9）。建筑物和工业部门直接使用的可再生能源，加上生物能源和氢基燃料等低排放燃料，在 2050 年将占比另外 28% 的终端能源消费；化石燃料将占其余部分，其中大部分用于非排放工艺或配备 CCUS 的设施。

在净零排放情景中，从目前到 2030 年期间，工业部门的大部分全球减排量是通过提高能效和材料利用效率、增加供热的电气化程度，以及燃料方面转向使用太阳能热力、地热能 and 生物能源来实现的。因此，CCUS 和氢能在减少二氧化碳排放方面发挥着越来越重要的作用，特别是在钢铁、水泥和化工等重工业领域。工业部门的电力消费在 2020 年至 2050 年期间将增加一倍多，2050 年电力将提供当年工业能源需求总量的 45%（图 2.10）。工业部门对商品氢的需求将从目前的不到 100 万吨增加到 2050 年的约 4 000 万吨。2050 年，还有 10% 的工业能源需求是由配备 CCUS 的工厂使用的化石燃料来满足的。

图 2.9 ▸ 净零排放情景下，不同燃料的全球终端消费总量



国际能源署。保留所有权利。

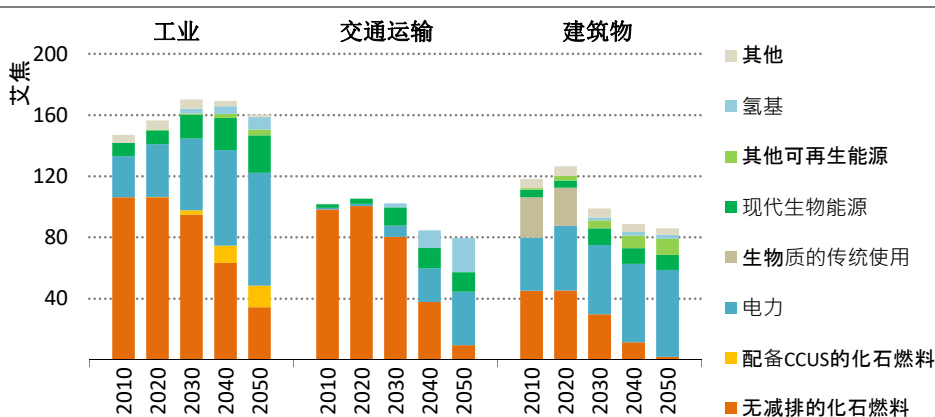
电力在终端能源用量中的占比从2020年的20%跃升至2050年的50%

注：“氢基”包括氢、氨和合成燃料。

在交通运输方面，2020年燃料使用量的90%以上都是石油；但全世界都在迅速脱离石油，转用其他燃料。在公路交通运输部门，2050年电力将开始占据主导地位，提供超过60%的能源使用量，而氢和氢基燃料发挥的作用较小，主要是为长途重型卡车提供燃料。在航运方面，能效的提高将大大降低能源需求（特别是在2030年之前），而先进生物燃料和氢基燃料（例如氨）将逐渐取代石油。在航空领域，合成液体燃料和先进生物燃料的使用迅速增长，在能源需求总量中的份额将从目前的几乎为零上升到2050年的近80%。总的来说，到2040年代初，电力将成为全球交通运输部门的主要燃料；2050年，电力将占该部门能源消费的45%左右（2020年仅占1.5%）。氢和氢基燃料将占能源消费的近30%（2020年几乎为零），生物能源则占另外15%（2020年约为4%）。

在建筑物部门，包括加热在内的终端使用的电气化将推动电力需求在2020年至2050年期间增加约35%：2050年电力将成为主要燃料，达到16 000太瓦时，占建筑物部门能源消费总量的三分之二。到2050年，发达经济体三分之二的住宅建筑物以及新兴市场和发展中经济体约40%的住宅建筑物都将安装有热泵。基于可再生能源的现场能源系统，如太阳能热水器和生物质锅炉，将在2050年提供建筑物部门终端能源使用的另外四分之一（2020年仅占6%）。低排放的区域供热和氢仅提供7%的能源使用量，但在一些地区将发挥重要作用。

图 2.10 ▶ 净零排放情景下，不同部门和燃料的全球终端能源消费量



国际能源署。保留所有权利。

终端用能部门将从无减排措施的化石燃料全面转向使用电力、可再生能源、氢和氢基燃料，
以及现代生物能源结合 CCUS

注：“氢基”包括氢、氨和合成燃料。

建筑物能源消费在 2020 年至 2030 年间将下降 25%，这主要是由于大力推动能效，逐步淘汰传统的固体生物质烹饪方式，并用液化石油气（LPG）、沼气、电饭煲和改良生物能源炉取而代之。到 2030 年将实现电力普及，届时因此导致的全球电力需求增加将不到 1%。鉴于持续的能效提高和电气化，建筑物部门的能源消费在 2030 年和 2050 年之间将收缩约 15%。到 2050 年，建筑物的能源使用量将比 2020 年少 35%。在净零排放情景中，能效措施（包括改善建筑物围护结构及确保所有进入市场的新电器都是最节能型号）将在限制电力需求上升方面发挥关键作用。如果没有这些措施，2050 年建筑物的电力需求将比净零排放情景中的水平高出约 10 000 太瓦时（70%）。

焦点

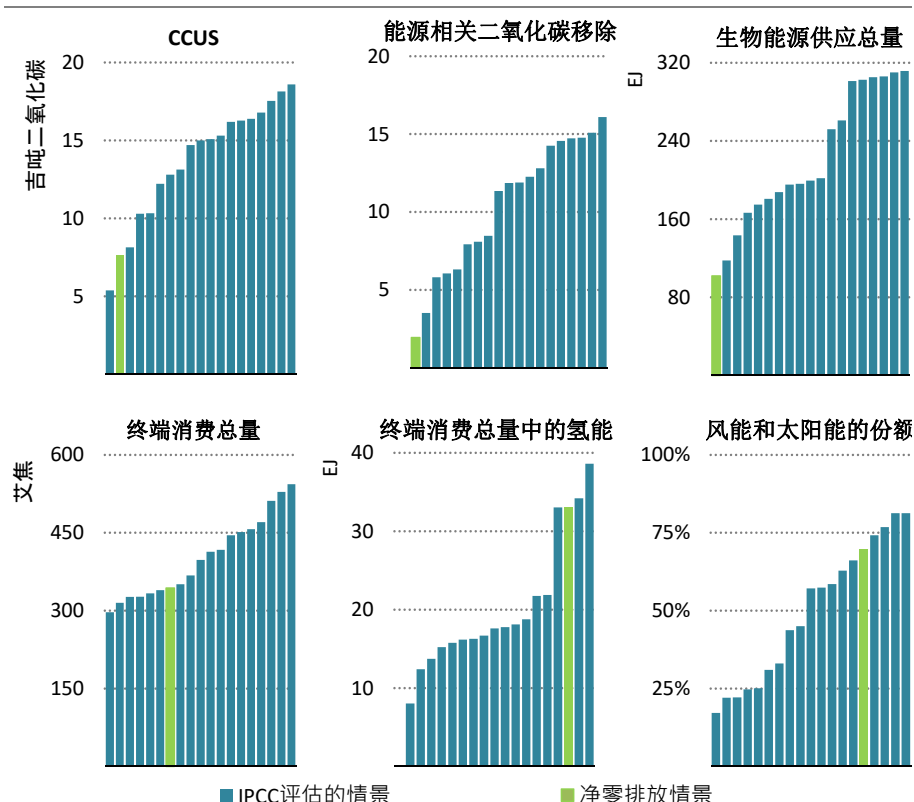
对比：净零排放情景与类似的 1.5°C IPCC 评估情景

政府间气候变化专门委员会（IPCC）SR1.5 评估的情境中，有 90 种不同的情景至少有 50% 的概率能将 2100 年的升温限制在 1.5°C（IPCC，2018）。⁹ 在这些情景当中，只有 18 种的能源部门和工业过程的二氧化碳排放量在 2050 年达到净零，即：在 IPCC 评估的 1.5°C 情景中，只有五分之一的情景在 2050 年之前能源和工业过程部门的减排目标与净零排放情景具有可比性。¹⁰ 以下是这 18 种情景与净零排放情景中 2050 年情况的一些比较（图 2.11）。

⁹ 包括 53 种温度不超标或不大超标的场景以及 37 种温度较大幅超标的场景。

¹⁰ 低能源需求情景在 2050 年将约有 4.5 吉吨能源部门和工业过程的二氧化碳排放，这种情景不包括在这里的比较中。

图 2.11 ▸ IPCC 情景和净零排放情景中 2050 年部分指标的比较



国际能源署。保留所有权利。

**2050 年实现能源部门和工业过程的二氧化碳净零排放的所有情景中，
净零排放情景的能源相关二氧化碳移除量和生物能源消费量最低**

注：CCUS = 碳捕捉、利用和封存。能源相关二氧化碳移除包括通过配备 CCUS 的生物能源和配备 CCUS 的直接空气捕捉捕获并永久封存的二氧化碳。风能和太阳能的份额是以总发电量的百分比给出的。在 IPCC 评估的 18 种情景中，只有 17 种情景在终端消费总量中包含氢能的使用。

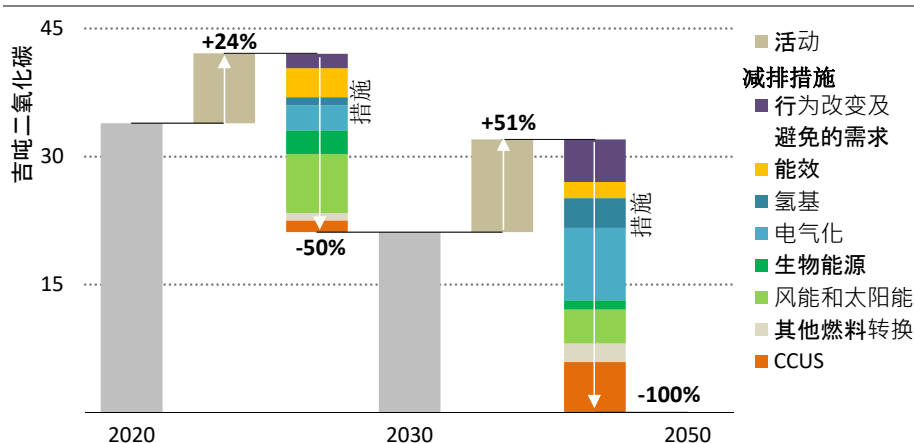
- **CCUS 的使用：**IPCC 评估的情景中，2050 年使用 CCUS 捕获的二氧化碳的中位值约为 15 吉吨，是净零排放情景水平的两倍以上。
- **二氧化碳移除（CDR）的使用：**在 IPCC 情景中，2050 年通过 BECCS 和 DACCS 捕获和封存的二氧化碳排放量介于 3.5-16 吉吨之间，而在净零排放情景中为 1.9 吉吨。
- **生物能源：**IPCC 情景下，2050 年使用的一次生物能源的中位数为 200 艾焦（目前为 63 艾焦），其中有些情景的生物能源用量超过 300 艾焦。净零排放情景下，2050 年使用的一次生物能源为 100 艾焦。

- **能效**：IPCC 情景中的终端消费总量在 2050 年为 300-550 艾焦（而 2020 年约为 410 艾焦）。净零排放情景中 2050 年终端能源消费量为 340 艾焦。
- **氢能**：IPCC 情景中，2050 年终端消费总量中氢能的中位值为 18 艾焦，而净零排放情景中为 33 艾焦。¹¹
- **发电**：在 IPCC 情景中，2050 年风能和太阳能在总发电量中的占比约为 15-80%，中位值为 50%。在净零排放情景中，风能和太阳能在 2050 年提供发电总量的 70%。

2.5 脱碳的关键支柱

在净零排放情景中，未来 30 年内实现二氧化碳排放量的快速减少需要广泛的政策方法和技术（图 2.12）。全球能源系统脱碳的关键支柱是能效、行为改变、电气化、可再生能源、氢和氢基燃料、生物能源以及 CCUS。

图 2.12 ▸ 净零排放情景下，2020-2050 年不同减排措施贡献的减排量



国际能源署。保留所有权利。

在净零排放情景中，从现在到2030年，太阳能、风能和能效将贡献约一半的减排量，此后电气化、CCUS和氢能的贡献逐渐增加

注：活动 = 经济和人口增长带来的能源服务需求变化。行为 = 使用者的决定引起的能源服务需求变化，例如改变加热温度。避免的需求 = 技术发展（例如数字化）带来的能源服务需求变化。改用其他燃料 = 从煤炭和石油转向使用天然气、核能、水力、地热、聚光太阳能或海洋能。

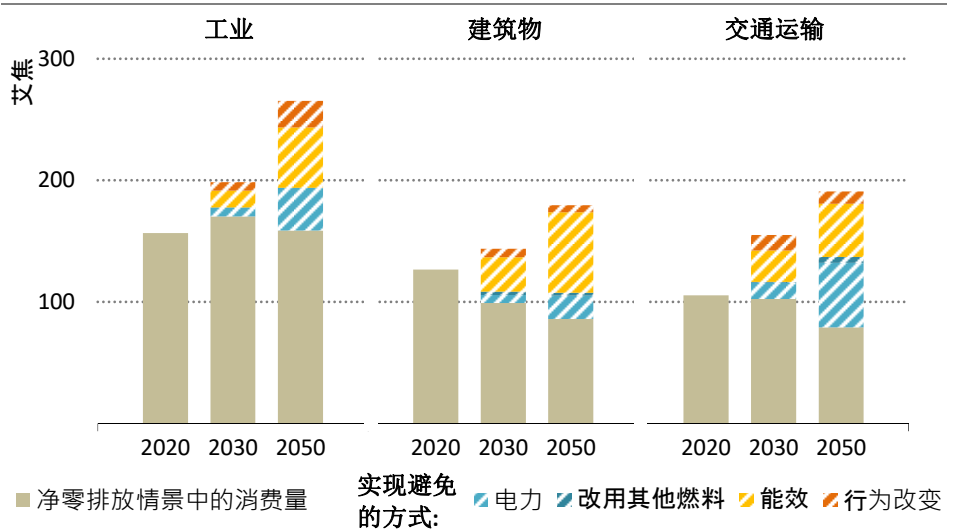
2.5.1 能效

在净零排放情景中，提高能效对尽可能减少能源需求的增长将做出重要贡献。工业、建筑物、电器和交通运输方面的许多能效措施可以很快付诸实施并扩大规模。因此，净零排放情景下，能效措施在前期发挥的作用尤为显著，从目前到 2030 年期间对缓

¹¹ 净零排放情景中，氢能的数值包括终端能源消费量中所消耗的氢和氢基燃料的总能量含量。

和能源需求与排放将发挥最明显的作用。尽管 2030 年后能效进一步提高，但由于其他减排措施发挥的作用越来越大，能效对整体减排的贡献比例将下降。如果没有净零排放情景中部署的能效、行为改变和电气化措施，2050 年的终端能源消费量将比净零排放情景下高出约 300 艾焦，即 90%（图 2.13）。能效的提高也有助于降低电力供应可能发生的中断对企业和消费者的影响。

图 2.13 ▶ 净零排放情景下，终端消费总量和通过不同减排措施避免的需求量



能效在减少各个终端用能部门的能源消费方面发挥关键作用

注：CCUS = 碳捕捉、利用和封存。改用其他燃料包括改用与氢有关的燃料、生物能源、太阳能热力、地热或区域供热。

在建筑物领域，许多能效措施在减少能源使用和排放的同时，也将节省资金。净零排放情景下，建筑物部门的能效将得到直接而快速的改善，主要是得益于大规模的改造计划。净零排放情景中，从现在到 2050 年，发达经济体中每年将约有 2.5% 的现有住宅建筑完成改造，达到零碳就绪标准¹²（目前的改造率不到 1%）。在新兴市场和发展中经济体，建筑物更替率较高；从目前到 2050 年，每年的改造率约为 2%。到 2050 年，绝大部分现有住宅建筑物将完成零碳改造。到 2030 年，所有地区都将出台能源相关建筑物规范，以确保几乎所有新建筑物都是零碳就绪的。2020 年代，所有国家都将出台或加强最低能源性能标准和低能效电器的替换制度。到 2030 年代中期，全球销售的几乎所有家用电器的能效都将与目前最高能效的型号一致。

在交通运输部门，将采用严格的燃油经济性标准，并确保从 2035 年起全球不再销售使用内燃机（ICE）的新乘用车，从而推动汽车销售迅速转向能效更高的电动车

¹² 在净零排放情景中，零碳就绪建筑物是高度节能的，2050 年之前将直接使用可再生能源或完全脱碳的能源供应（如电力或区域供热）。到 2050 年，零碳就绪建筑物将成为零碳建筑物，不需要进一步改造建筑或其设备（见第 3 章）。

(EV)。¹³ 这一变化对能效的影响将在 2030 年代显现，因为届时车辆存量的构成将发生变化：电动车在 2030 年占道路上所有汽车的 20%，在 2040 年占 60%（目前只占 1%）。从目前到 2050 年，随着重型道路车辆转向使用电力或燃料电池，它们的燃料经济性将持续改善，而航运和航空的能效将提高，因为能效更高的飞机和船舶将取代现有的存量。

在工业部门，大多数制造业存量已经相当高效，但仍有机会提高能效。净零排放情景中，从目前到 2030 年期间，能源管理系统、一流的工业设备（例如电动机、变速驱动装置、加热器和研磨机的安装），以及诸如余热回收等工艺集成方案的经济潜力将得到最大程度的开发。在净零排放情景中，2030 年以后能效提高的速度会放慢，因为届时工业部门减排所需的许多技术将比其同等传统技术需要更多的能源。例如，使用 CCUS 将增加捕捉设备作业的能耗，而厂内电解制氢将比主制造工艺需要更多的能源。

表 2.3 ▶ 净零排放情景下，全球能效的关键里程碑

部门	2020	2030	2050
能源供应总量	2010-20	2020-30	2030-50
年度能源强度改善（兆焦/美元 GDP）	-1.6%	-4.2%	-2.7%
工业			
天然气直接还原铁的能源强度（吉焦/吨）。	12	11	10
初级化学品的过程能源强度（吉焦/吨）	17	16	15
交通运输			
内燃机重型卡车的平均燃料消耗（指数 2020=100）	100	81	63
建筑物			
零碳就绪建筑物在总存量中的占比	<1%	25%	>85%
新建建筑物：加热和冷却能耗（指数 2020=100）	100	50	20
电器：单位能耗（指数 2020=100）	100	75	60

注：零碳就绪建筑物 = 见第 3.7 节的描述。

2.5.2 行为改变

如果没有公民的积极自愿参与，净零排放情景中所展示的能源部门的大规模转型是不可能实现的。推动能源相关产品和服务需求的终究是人，而社会规范和个人选择将在引导能源系统走上可持续发展的路径方面发挥关键作用。净零排放情景中略低于 40% 的减排量来自于低碳技术的普及，这些技术需要大量的政策支持和投资，但公民或消费者的直接参与很少，例如发电或炼钢技术。还有 55% 的减排量既需要低碳技术的部署，又需要公民及消费者的积极参与，例如安装太阳能热水器或购买电动车。其余 8% 的减排量来自于行为改变和材料利用效率提高，从而减少能源需求，例如减少商务飞行（图 2.14）。消费者的态度也会影响关注公众形象的企业投资决策。

在净零排放情景中，行为改变是指消费者正在进行的或重复的行为的改变，将对能源服务需求或能源相关活动的能源强度产生影响。¹⁴ 净零排放情景中，技术进步也会导

¹³ 2020 年，普通电池电动车只需要普通内燃机汽车的 30% 左右的能源来提供相同水平的活动。

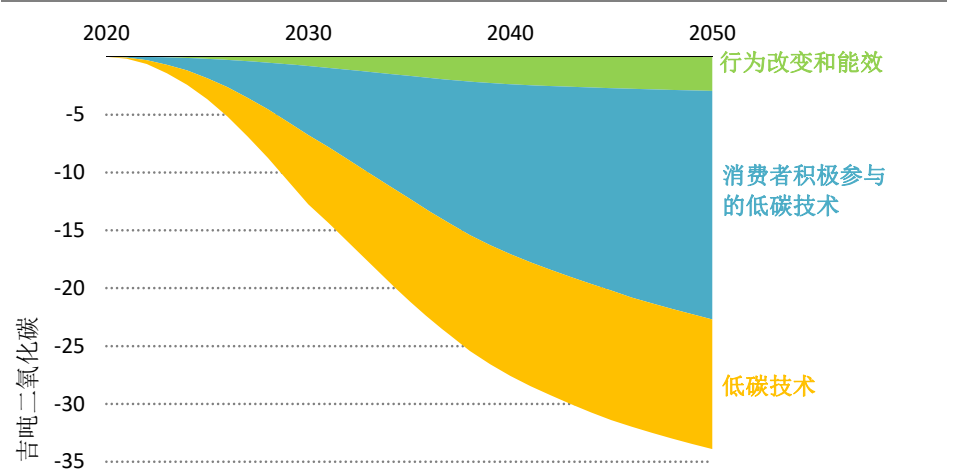
¹⁴ 因此，举例而言，购买电热泵而不是燃气锅炉不属于行为改变，因为这既不是经常发生的事件，也不一定影响能源服务需求。

致能源服务需求减少，但这不被视为行为改变。例如，在净零排放情景中，随着数字化程度提高、智能设备市场份额增长，如智能温控或空间差异化温控，将逐渐不再需要人们在家庭节能中发挥主动作用。

净零排放情景下，行为改变主要有三类。可以采用广泛的政府干预措施来推动这些改变（见第 2.7.1 节）。

- **减少过度用能或能源浪费。**包括减少建筑物和道路的能源使用，例如降低室内温度设置、在住宅中采取节能措施，以及将高速公路的限速设定为每小时 100 公里。
- **转变交通运输方式。**包括城内出行方式由汽车转向骑自行车、步行、共享汽车或巴士，以及在可行的情况下，用高速铁路取代区域航空旅行。许多这类行为改变将需要打破惯常生活方式，因此需要一定的公众接受度甚至是对此改变的热情。许多改变还需要新的基础设施（如自行车道、高速铁路网）、明确的政策支持和高质量的城市规划。
- **提升材料利用效率。**包括减少对材料的需求，例如提高回收率，以及改进建筑物和车辆的设计和建造。提升的范围将在一定程度上反映社会的偏好。例如，在一些地方，近几年来人们已经不再使用一次性塑料制品，这一趋势在净零排放情景中将加速发展。材料利用效率的提升取决于制造业和建筑业的技术创新、旨在推动最佳实践和创新普及的支持性准则和法规，以及整个社会的回收利用率提高。

图 2.14 ▸ 净零排放情景下，技术和行为改变在减排中的作用



国际能源署。保留所有权利。

大约 8% 的减排量来自于行为改变和材料利用效率

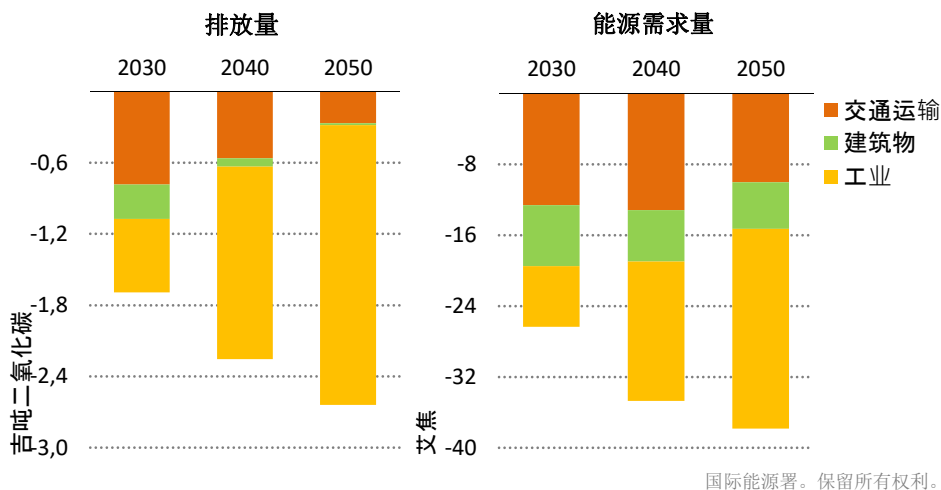
注：“低碳技术”包括低碳发电、终端使用的低碳燃气和生物燃料。“消费者积极参与的低碳技术”包括燃料切换、电气化和终端使用中的能效提升。“行为改变和材料利用效率”包括转换交通运输方式、遏制过度用能或能源浪费，以及采取提高材料利用效率的措施。

净零排放情景下行为改变所带来减排量中，四分之三是通过在基础设施发展支撑下有针对性的政府政策来实现的，例如在有高速铁路的情况下，转向铁路旅行。其余的减

排量来自于自主形成的节能习惯，主要是家庭住宅节能。此外，面向公众的宣传活动也有助于塑造消费者在能源使用方面的日常选择。（第 4 章探讨了政府可以通过哪些具体行动来推动行为改变）。

在净零排放情景中，目前到 2050 年期间，行为改变将使能源相关活动年均减少约 10-15%，2050 年全球能源需求总量将减少超过 37 艾焦（图 2.15）。2030 年避免的二氧化碳排放将约为 1.7 吉吨，其中 45%来自交通运输，主要是得益于城市中逐步淘汰汽车和提高燃料经济性的措施。例如，如果将高速公路的限速降低到 100 公里/小时，则 2030 年公路交通运输的二氧化碳排放量将减少 3%，即 1.4 吨。在大城市中，从单人车辆转向共享汽车或骑自行车和步行，可进一步节省 1.85 亿吨二氧化碳。由于材料利用效率的提高和回收利用的增加，2030 年大约 40%的减排量将发生在工业部门，其中最大的贡献来自于减少废弃物和改善建筑物的设计和建造。2030 年其余的减排量将来自建筑物部门的行为改变，例如调整空间加热和冷却的温度。

图 2.15 ▶ 净零排放情景下，行为改变和材料利用效率促成的二氧化碳减排量和能源需求减少量



到2030年，行为改变和材料利用效率提升将贡献1.7吉吨的二氧化碳减排量，
使能源需求减少27艾焦；2030年到2050年，降幅将进一步增加

2050 年，低排放电力和燃料在交通运输和建筑物部门中的重要性日益增加，这意味着 90%的减排量将发生在工业领域，主要是在直接减排难度最大的部门。仅材料利用效率一项就可以减少 20%的水泥和钢铁需求，节省大约 1.7 吉吨二氧化碳排放。2050 年交通运输部门的减排量中，近 80%来自于减少航空客运需求的措施，其余则来自于公路交通运输。

净零排放情景中，行为改变的范围、规模和普及速度在不同地区之间有很大差异，取决于几个因素：现有基础设施支持行为改变的能力，以及地理、气候、城市化、社会

规范和文化价值观的差异等。例如，目前私家车使用较多的地区跟其他地区相比，转向公共交通、共享汽车、步行和骑自行车的速度将相对缓慢的；航空旅行转向高速铁路的前提是火车依托现有或潜在路线的旅程时间与飞机类似；在评估建筑物和车辆中调节空调温度的潜力时，应考虑到季节性影响和湿度。在较富裕的地区，通常人均能源相关活动水平较高，因此行为改变在减少用能过渡或能源浪费方面发挥着尤其重要的作用。

净零排放情景中的大多数行为改变将对几乎每个人的日常生活产生一些影响，但没有任何一项改变截然脱离当今世界许多地方已经践行的节能做法。例如，在日本，一系列节能宣传活动成功地减少了制冷需求，与净零排放情景中到 2040 年许多地区假定的减少量一致；许多大城市已经出台了限制城中汽车使用的立法；英国和西班牙已经测试了将限速降低到大约 100 公里/小时（净零排放情景中 2030 年全球采用的限速水平），以减少空气污染并改善交通安全。

表 2.4 ▸ 净零排放情景下，全球行为改变的关键里程碑

部门	年份	里程碑
工业	2020	● 全球平均塑料收集率 = 17%。
	2030	● 全球平均塑料收集率 = 27%。 ● 轻量化使普通乘用车的平均重量减少 10%。
	2050	● 全球平均塑料收集率 = 54%。 ● 肥料使用效率提高 10%。
交通运输	2030	● 出台生态驾驶和高速公路 100 公里/小时限速。 ● 大城市逐步淘汰内燃机汽车。
	2050	● 在可行的情况下，高速铁路取代区域航班。 ● 商务和长途休闲航空旅行量不超过 2019 年的水平。
建筑物	2030	● 空间加热温度控制在平均 19-20℃。 ● 空间制冷温度控制在平均 24-25℃。 ● 降低过高的热水温度。
	2050	● 每单位楼面面积的高耗能材料的使用减少 30%。 ● 建筑物的使用寿命平均延长 20%。

注：“生态驾驶”包括通过预判来实现平稳刹车和启动。

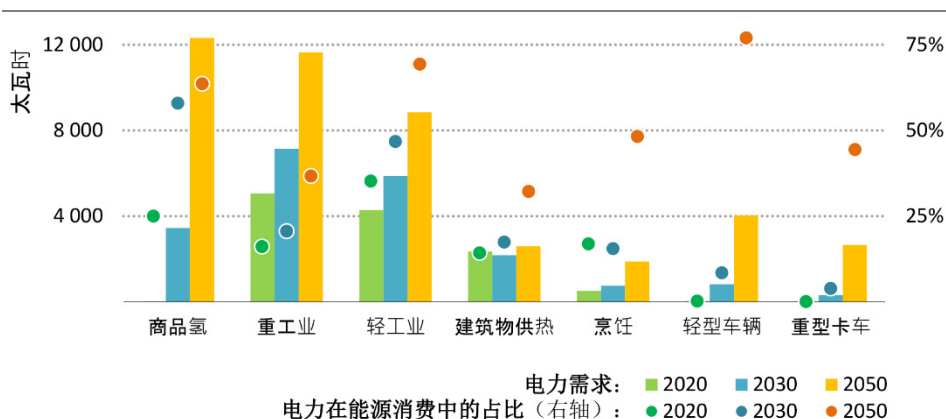
2.5.3 电气化

直接使用低排放电力来代替化石燃料是净零排放情景中驱动减排的最重要力量之一，占到 2050 年实现的总减排量的 20%左右。2020 年至 2050 年期间，全球电力需求将增加一倍多，终端用能部门用电的最大绝对增长发生在工业部门，该部门的用电将于 2020 年至 2050 年期间增加 11 000 太瓦时以上。这在很大程度上是由于电力越来越多地用于低温和中温加热以及基于次级废料的钢铁生产（图 2.16）。

在净零排放情景中，交通运输部门内电力的份额将从 2020 年的不到 2%增加到 2050 年的约 45%。到 2030 年，全球乘用车销售总量的 60%以上将是电动车（2020 年仅为 5%），到 2050 年，全球的汽车将几乎全面电气化（其余的是氢能动力车）。未来十

年，全球电动乘用车销量的增速将是过去十年内燃机汽车销量增速的 20 倍以上。卡车的电气化速度较慢，因为卡车（尤其是长途运输卡车）需要比目前市场上电池密度更高的电池，以及新型大功率充电基础设施；尽管如此，到 2030 年电动卡车将占全球重型卡车总销量的 25% 左右，2050 年将约占三分之二。航运和航空的电气化更为有限，只有在电池能量密度大幅提高后才会起步（见第 3.6 节）（图 2.17）。在净零排放情景中，2050 年对交通运输用电的需求将达到约 14 太瓦时，是 2020 年的 90 倍。电池需求的增长意味着对关键矿产的需求增加。例如，2030 年和 2050 年的电池用锂的需求将分别达到 2020 年需求的 30 倍和 100 倍以上 (IEA, 2021)。

图 2.16 ▶ 净零排放情景下，全球电力需求以及部分应用的电力消费在能源消费中的占比



国际能源署。保留所有权利。

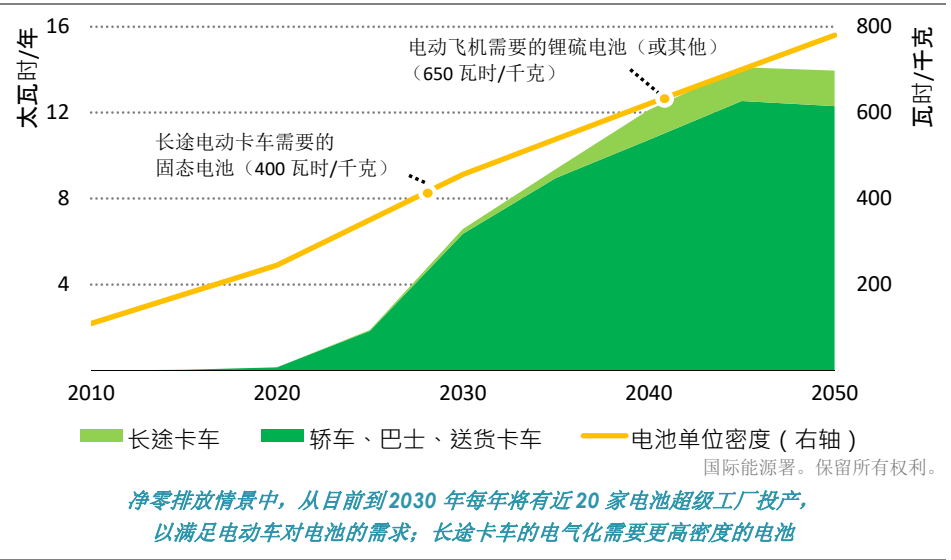
*从目前到2050年期间，全球电力需求增加一倍以上，
最大增幅将发生在制氢和工业部门*

注：商品氢 = 由一家企业生产并出售给其他企业的氢。轻型车辆 = 乘用车和面包车。重型卡车 = 中型货运卡车和重型货运卡车。

净零排放情景中，由于大力提高电器、冷却、照明和建筑围护结构的效率，建筑物的电力需求将得到缓和。但活动的大量增加，以及通过使用热泵实现的供热广泛电气化，意味着建筑物中的电力需求仍将稳步上升，在 2050 年占到建筑物能源消费总量的 66%。

在终端用能部门直接用电日趋增长的同时，制氢用电也将大量增加。在净零排放情景中，2050 年使用电解法生产的商品氢需要大约 12 000 太瓦时的电力，这比目前中国和美国的年度电力需求总和还要高。

图 2.17 ▶ 净零排放情景下，交通运输部门的电池需求增长和电池能量密度增加情况



电力需求的增长将从过去十年的每年 2%加快到目前到 2050 年期间的每年 3%，并且可
变可再生能源发电的份额将显著增加；因此，净零排放情景中电力部门的年均投资额
是近几年的三倍。电力需求的增加也要求做出广泛的努力，通过需求侧管理、灵活的
低排放发电（包括水力和生物能源）作业以及电池储能，确保电力供应的稳定性和灵
活性。

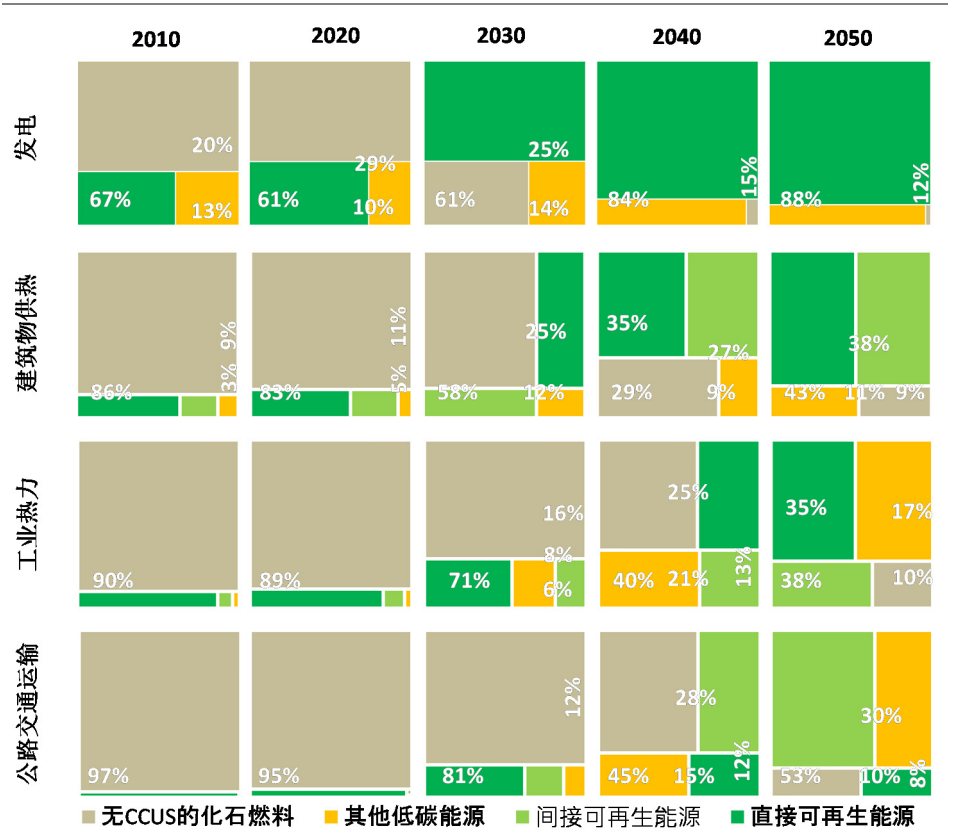
表 2.5 ▶ 净零排放情景下，全球电气化的关键里程碑

部门	2020	2030	2050
电力在终端消费总量中的占比	20%	26%	49%
工业			
电弧炉炼钢占比	24%	37%	53%
轻工业电力占比	43%	53%	76%
交通运输			
电动车在存量中的占比：			
轿车	1%	20%	86%
两轮/三轮车辆	26%	54%	100%
巴士	2%	23%	79%
面包车	0%	22%	84%
重型卡车	0%	8%	59%
电动车的年度电池需求（太瓦时）	0.16	6.6	14
建筑物			
安装的热泵（百万台）	180	600	1 800
热泵在供热能源需求中的占比	7%	20%	55%
无电可用的人口（百万）	786	0	0

2.5.4 可再生能源

在全球层面，可再生能源技术是减少电力供应排放的关键。几十年来，水电一直是领先的低排放能源，但在净零排放情景中，风能和太阳能的扩张将发挥主要作用，使可再生能源发电量到 2030 年增加 2 倍，到 2050 年增加 7 倍以上。可再生能源在全球总发电量中的占比将从 2020 年的 29% 增加到 2030 年的 60% 以上，到 2050 年达到近 90%（图 2.18）。为此，2020 年至 2050 年期间，风能和太阳能的年增量需要达到过去三年平均水平的五倍。可调度的可再生能源，以及其他低碳发电源、储能技术和强大的电网，对于维护电力安全至关重要。在净零排放情景中，2050 年全球主要的可调度可再生能源将是水力（占发电量的 12%）、生物能（5%）、聚光太阳能（2%）和地热能（1%）。

图 2.18 ▸ 净零排放情景下，部分应用所使用燃料在用能总量中的占比



国际能源署。保留所有权利。

可再生能源是电力减排的核心，对直接和间接减少建筑物、工业和交通运输的排放贡献重大

注：间接可再生能源 = 使用可再生能源生产的电力和区域供热。其他低碳 = 核电、配备 CCUS 的设施，以及低碳氢和氢基燃料。

可再生能源在减少建筑物、工业和交通运输部门的排放方面也将发挥重要作用。可再生能源可以间接使用（消费由其生产的电力，或区域供热），也可以直接使用（主要用于制热）。

在交通运输方面，可再生能源通过为电动车提供电力，在减少排放方面发挥重要的间接作用。液体生物燃料和生物甲烷的使用，也是可再生能源为直接减排做出贡献的途径之一。

在建筑物中，可再生能源主要用于水加热和空间加热。可再生能源的直接使用将从 2020 年占全球供热需求的 10% 左右上升到 2050 年的 40%，大约四分之三的增长来自太阳能热力和地热。深度改造以及能源相关建筑物规范尽可能与可再生能源搭配：到 2050 年，几乎所有可用的屋顶空间和太阳能日照充分的建筑物都将配备太阳能热力热水器，因为它们每平方米的产出高于太阳能光伏，而且在水箱中储热通常比储存电力更具成本效益。屋顶太阳能光伏可以在现场生产可再生电力，目前安装在全球约 2 500 万个屋顶上；到 2030 年这个数字将增加到 1 亿，到 2050 年将增加到 2.4 亿。2030 年，另有 15% 的建筑物供热是以电力的形式间接来自可再生能源，到 2050 年，这一比例将上升至近 40%。

净零排放情景中，在工业部门，生物能源是满足中低温度需求的最重要的直接可再生能源。太阳能热力和地热也可以提供低温热能，用于非高耗能工业和重工业的辅助或下游工艺。2030 年，生物能源、太阳能热力和地热共计将提供约 15% 的工业热力需求，这一比例大约是 2010 年的两倍；2050 年该比例将增加到 40%。通过电力间接使用可再生能源，将使 2050 年可再生能源对工业用能总量的贡献比例再增加 15%。

表 2.6 ▸ 可再生能源部署的关键里程碑

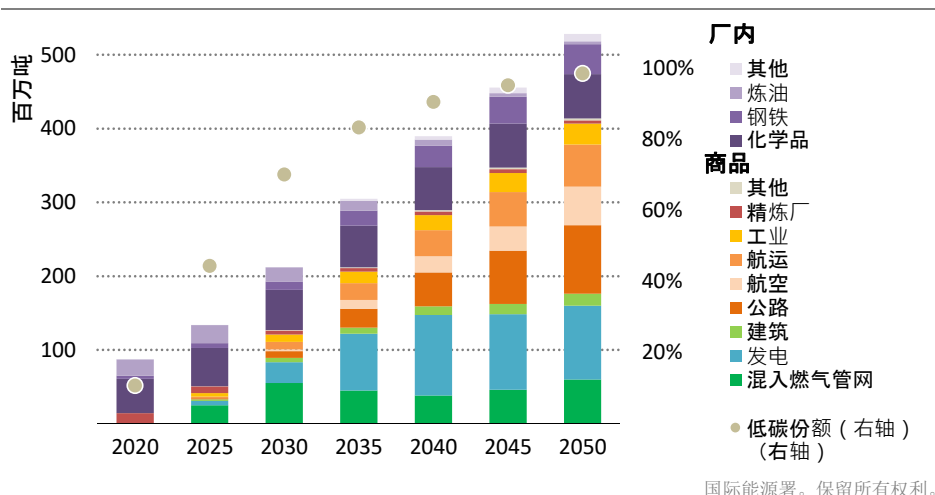
部门	2020	2030	2050
电力部门			
可再生能源在发电量中的占比	29%	61%	88%
年度新增装机（吉瓦）：			
太阳能光伏总计	134	630	630
风能总计	114	390	350
– 其中：海上风能	5	80	70
可调度的可再生能源	31	120	90
终端用能部门			
可再生能源在终端消费总量中的占比	5%	12%	19%
拥有屋顶太阳能光伏的住户（百万）	25	100	240
太阳能热力和地热在建筑物中的占比	2%	5%	12%
太阳能热力和地热在工业终端消费中的占比	0%	1%	2%

2.5.5 氢和氢基燃料

净零排放情景中，氢能利用方面最初关注的重点是：在不需要立即建立新的传输和配送基础设施的情况下，从现有的化石能源转向低碳氢能。这包括在工业、精炼厂和发电厂中的氢能使用，以及将氢气混合到天然气中配送给终端使用者。

全球氢能使用量将从 2020 年的不足 9 000 万吨扩大到 2030 年的超过 2 亿吨；低碳氢的占比将从 2020 年的 10% 上升到 2030 年的 70%（图 2.19）。2030 年全球生产的低碳氢约有一半来自电解，其余的来自煤炭和天然气结合 CCUS，不过这一比例在不同地区有很大差异。氢气也将在燃气管网中与天然气混合：2030 年，全球氢气平均混合比例为 15%（以体积计），这将使来自天然气消费的二氧化碳排放量减少约 6%。

图 2.19 ▸ 净零排放情景下，全球氢和氢基燃料的使用量



国际能源署。保留所有权利。

氢能最初关注的重点是在现有用途中转向低碳氢；
然后氢和氢基燃料将扩展到所有终端用途

注：包括氢，以及氢及合成燃料中含有的氢。

氢能的发展将促进电解制造能力的迅速扩大和新建氢能运输基础设施的同步发展，从而推动电解技术和储氢（特别是在盐穴中）的成本迅速降低。储存的氢能用于应对平衡电力需求的季节性波动，以及对氢能的需求和通过离网可再生能源系统供应的氢能之间可能出现的不平衡。在 2020 年代，氢能终端使用设备的安装也会大量增加，包括在 2030 年前将有超过 1 500 万辆氢燃料电池汽车上路。

净零排放情景中，2030 年后所有部门都将迅速扩大低碳氢的使用。在电力部门，氢和氢基燃料为电力系统的灵活性提供了重要的低碳能源，实现的方式主要是对现有的燃气发电能力进行氢共燃改造，也包括对燃煤电厂进行氢共燃改造。虽然此类燃料在 2050 年发电总量中的比例只有 2% 左右，但却需要非常大量的氢，并将使电力部门成为氢能需求的重要推手。在交通运输方面，净零排放情景中 2050 年氢能将满足卡车

燃料用量的约三分之一，不过其先决条件是政策决策者决定在 2030 年前发展必要的基础设施。到 2050 年，氢基燃料还将满足航运燃料消费总量的 60%以上。

在 2050 年生产的 5.3 亿吨氢中，约有 25%是在工业设施内生产的（包括精炼厂），其余则是商品氢（由一家企业生产的、用于出售给其他企业的氢）。2050 年使用的低碳氢中，几乎 30%是以氢基燃料的形式使用的（包括氢以及合成的液体和气体）。电解制氢的份额将不断增加，在 2050 年将占总产量的 60%。电解装置由电网电力、拥有优良可再生资源地区的专用可再生能源和其他低碳能源（如核电）提供动力。鉴于目前电解装置的制造能力欠缺，以净零排放情景所要求的速度推广电解装置将是一项关键的挑战；另一关键挑战在于确保发电能力充足。净零排放情景中，全球氢贸易随着时间的推移不断发展，大量的氢能将从中东、中南美洲和澳大利亚等燃气和可再生能源丰富的地区出口到亚洲和欧洲的需求中心。

表 2.7 ► 氢和氢基燃料部署的关键里程碑

部门	2020	2030	2050
氢基燃料总产量（百万吨）	87	212	528
低碳氢产量	9	150	520
化石燃料结合 CCUS 制氢的比例	95%	46%	38%
电解制氢的比例	5%	54%	62%
商品氢产量	15	127	414
厂内制氢产量	73	85	114
氢基燃料消费总量（百万吨）	87	212	528
电力	0	52	102
其中，氢	0	43	88
其中，氨	0	8	13
精炼厂	36	25	8
建筑物和农业	0	17	23
交通运输	0	25	207
其中，氢	0	11	106
其中，氨	0	5	56
其中，合成燃料	0	8	44
工业	51	93	187

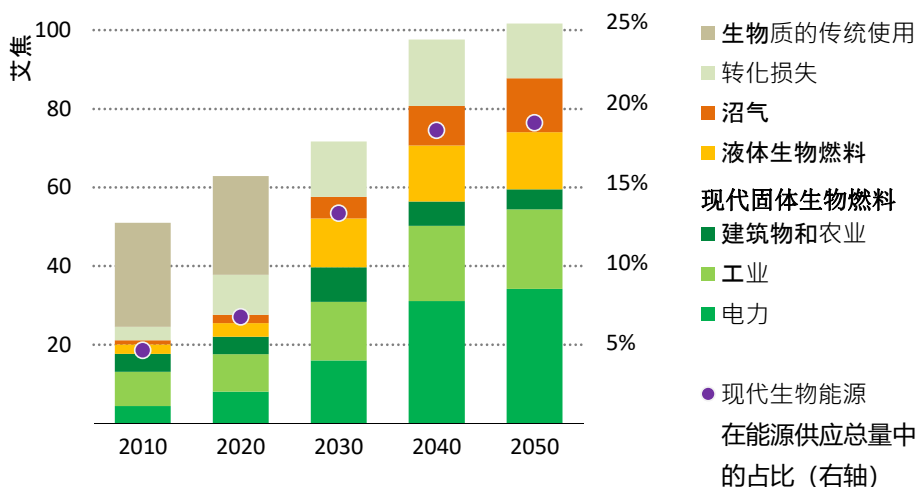
注：氢基燃料是以生产所需的百万吨氢为单位报告的。

2.5.6 生物能源

2020 年全球对生物能源的一次能源需求量接近 65 艾焦，其中约 90%为固体生物质。约 40%的固体生物质用于传统的烹饪方法，这种用途不可持续、低效而且污染环境，并与 2020 年 250 万人的过早死亡有关。净零排放情景中，到 2030 年固体生物质的传统使用将下降到零，实现联合国可持续发展目标 7。各种形式的现代生物能源将会增加，足以抵消生物质传统使用的减少；现代生物能源的产量将从 2020 年的不足 40 艾

焦上升到 2050 年的约 100 艾焦（图 2.20）。¹⁵ 2050 年所有生物能源都将来自于可持续的来源，而且净零排放情景中的生物能源使用总量远低于全球可持续生物能源潜力的估计值，从而避免了生物能源对生物多样性、淡水系统以及粮食价格和供应产生负面影响的风险（见 2.7.2 节）。

图 2.20 ▶ 净零排放情景下的生物能源供应总量



国际能源署。保留所有权利。

现代生物能源的用量将在 2050 年上升到 100 艾焦，满足能源需求总量的近 20%。

2050 年全球需求量远低于可持续生物能源潜力的估计值

注：“转化损失”发生在生物燃料和生物气的生产过程中。

从目前到 2050 年，现代固体生物能源的用量年均增加约 3%。在电力部门，2050 年固体生物能源的需求量将达到 35 艾焦，以提供灵活的低排放发电，补充太阳能光伏和风能发电，并且在配备 CCUS 的情况下从大气中移除二氧化碳。2050 年，生物能源燃料的发电量将达到 3 300 太瓦时，即总发电量的 5%。生物能源也将提供大约 50% 的区域供热量。在工业领域，2050 年固体生物能源的需求量将达到 20 艾焦，用于提供高温热力以及与煤炭共同燃烧，从而降低现有发电资产的排放强度。造纸和水泥生产对生物能源的需求量最高：2050 年，生物能源将满足造纸业能源需求的 60% 和水泥生产能源需求的 30%。2030 年，建筑物中的现代固体生物能源需求量将增加到近 10 艾焦，其中大部分用于改良炉灶，届时不可持续的生物质传统使用方式将不复存在。在发达经济体中，生物能源也将越来越多地用于空间和水的加热。

¹⁵ 现代生物能源包括生物气、液体生物燃料和从可持续来源中获得的现代固体生物质。不包括生物质的传统使用。

净零排放情景中，到 2030 年，农村地区的家庭和村庄沼气池将为近 5 亿住户提供可再生能源和清洁烹饪燃料，沼气的总使用量在 2050 年将上升到 5.5 艾焦（2020 年为低于 2 艾焦）。¹⁶ 在燃气管网的强制性混合要求的推动下，2050 年生物甲烷的需求将增长到 8.5 艾焦，许多地区的平均混合率将增加到 80% 以上。生物甲烷总使用量的一半用于工业部门，取代天然气作为工业过程热源。2050 年，建筑物和交通运输部门各占生物甲烷消费量的 20% 左右。

生物能源的一大优势是可以利用现有的基础设施。例如，生物甲烷可以使用现有的天然气管道和终端使用者设备，而许多普适性液体生物燃料可以利用现有的石油配送网络，并且用于车辆时只需对车辆进行小幅或有限的改造。生物质液化石油气（从可再生原料中提取的液化石油气）与传统液化气相同，因此可以用同样的方式进行混合和配送。可持续的生物能源还将为农村社区提供宝贵的就业和收入来源，减轻妇女的不必要负担（妇女通常负责收集燃料），通过减少空气污染和适当的废弃物管理带来健康益处，并减少低效燃烧和废弃物降解产生的甲烷排放。

净零排放情景中，液体生物燃料的消费将从 2020 年的 160 万桶油当量/天上升到 2030 年的 600 万桶油当量/天，主要用于公路交通运输。2030 年后，液体生物燃料的增长放缓，到 2050 年增至约 700 万桶油当量/天；随着电力越来越多地主导公路交通运输，液体生物燃料将转向用于航运和航空。2050 年液体生物燃料将几乎有一半用于航空，其中生物煤油占飞机燃料使用总量的 45% 左右。

在净零排放情景中，配备碳捕捉和封存的生物能源（BECCS）将发挥关键作用：抵消难以完全消除排放的部门的排放。2050 年，大约有 10% 的生物能源将在配备 CCUS 的设施中使用，通过 BECCS 捕获的二氧化碳将达到约 1.3 吉吨。其中约 45% 捕获于生物燃料的生产，40% 捕获于电力部门，其余则捕获于重工业，特别是水泥生产。

表 2.8 ► 生物能源部署的关键里程碑

	2020	2030	2050
能源供应总量（艾焦）	63	72	102
先进生物质原料的占比	27%	85%	97%
现代气体生物能源（艾焦）	2.1	5.4	13.7
生物甲烷	0.3	2.3	8.3
现代液体生物能源（百万桶油当量/天）	1.6	6.0	7.0
先进生物燃料	0.1	2.7	6.2
现代固体生物能源（艾焦）	32	54	74
固体生物质的传统用量（艾焦）	25	0	0
使用传统生物质燃料烹饪的人数（百万）	2 340	0	0

注：当森林得到可持续管理时，来自森林种植的生物能源被认为是先进生物能源（见第 2.7.2 节）。

¹⁶ 沼气是甲烷、二氧化碳和少量其他气体的混合物，由在无氧环境中厌氧消化有机物产生。生物甲烷是一种近乎纯净的甲烷来源，通过从沼气中去除二氧化碳和其他污染物或通过固体生物质的气化而生产（IEA, 2020b）。

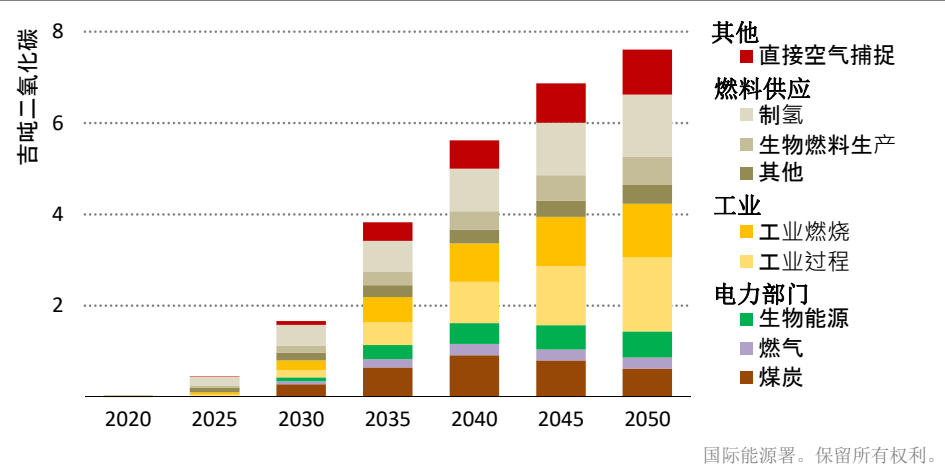
2.5.7 碳捕捉、利用和封存 (CCUS)

CCUS 可以通过以下方式推动二氧化碳净零排放转型：解决现有资产的排放问题；为减排最困难的部门的排放问题提供解决途径；为迅速扩大低碳制氢提供具有成本效益的路径；以及通过配备碳捕捉和封存的生物能源 (BECCS) 和直接空气碳捕捉和封存 (DACCS) 从大气中移除二氧化碳。

在净零排放情景中，政策将支持一系列措施，以建立 CCUS 投资市场，并鼓励参与制氢和生物燃料生产、工业枢纽运作以及现有燃煤电厂改造的各方共享二氧化碳运输和储存基础设施。净零排放情景中，目前在开发项目将在现今每年约 4 000 万吨的基础上，于未来 5 年内使二氧化碳捕获量小幅增加；但在接下来的 25 年内，随着政策行动取得成果，捕获量将迅速扩大。到 2030 年，全球每年将捕获 1.6 吉吨二氧化碳，到 2050 年将上升至 7.6 吉吨（图 2.21）。在 2050 年捕获的二氧化碳总量中，约有 95% 储存在永久性的地质封存点中，5% 用于供应合成燃料。全球地质封存能力的估算值远高于净零排放情景中储存累计捕获和封存的二氧化碳所需的能力。2050 年，通过配备碳捕捉和直接空气捕捉的生物能源从大气中捕集的二氧化碳将达 2.4 吉吨，其中 1.9 吉吨将永久封存，0.5 吉吨用于供应合成燃料，特别是航空燃料。

净零排放情景中，2050 年二氧化碳捕获量的近 40% 为工业中能源相关和工业过程的二氧化碳排放。CCUS 对于水泥生产尤其重要。净零排放情景中，尽管做出各种努力提高效率，CCUS 对于限制水泥生产过程中的排放依然至关重要。2050 年二氧化碳捕获量的近 20% 来自电力部门（其中约 45% 来自燃煤电厂，40% 来自生物能源电厂，15% 来自燃气电厂）。2050 年，配备 CCUS 的发电厂将只贡献总发电量的 3%，但捕获的二氧化碳体量却比较大。在新兴市场和发展中经济体中，大量的煤电厂是近年来才建成的；在有储存机会的地方，改造对煤电厂减排将发挥重要作用。在发达经济体中，配备 CCUS 的燃气电厂将发挥更大的作用，在拥有廉价天然气和现有管网的地区以相对较低的成本提供可调度的电力。2030 年，约 50 吉瓦的燃煤电厂（占届时总数的 4%）和 30 吉瓦的天然气电厂（占总数的 1%）将配备 CCUS；到 2050 年，这组数字将分别上升到 220 吉瓦（占总数的近一半）和 170 吉瓦（占总数的 7%）。2050 年捕获的二氧化碳中还有 30% 来自燃料转化，包括制氢和生物燃料的生产以及炼油。其余的 10% 来自直接空气捕捉；从目前到 2030 年，直接空气捕捉捕获的二氧化碳将从几个试点项目迅速扩大到每年 9 000 万吨，在 2050 年之前进一步扩大到每年近 1 吉吨。

图 2.21 ► 净零排放情景下，全球不同来源的二氧化碳捕获量



到2050 年，每年从不同来源捕获的二氧化碳将达 7.6 吉吨。2.4 吉吨捕获的二氧化碳来自生物能源的使用和直接空气捕捉，其中 1.9 吉吨将永久封存。

表 2.9 ► 全球 CCUS 的关键里程碑

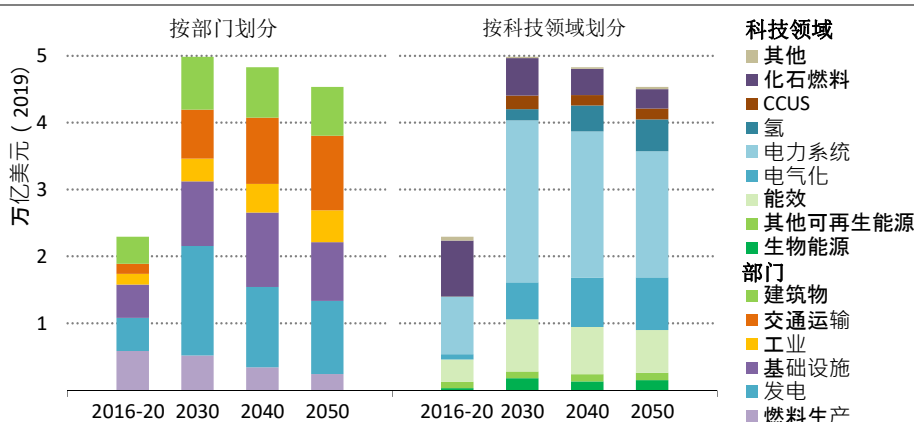
	2020	2030	2050
二氧化碳捕获总量（百万吨）	40	1 670	7 600
从化石燃料和工业过程中捕获的二氧化碳	39	1 325	5 245
电力	3	340	860
工业	3	360	2 620
商品氢生产	3	455	1 355
非生物燃料生产	30	170	410
从生物能源中捕获的二氧化碳	1	255	1 380
电力	0	90	570
工业	0	15	180
生物燃料生产	1	150	625
直接空气捕捉	0	90	985
移除	0	70	630

2.6 投资

2050 年实现二氧化碳净零排放所需的全球能源系统的彻底转型，取决于投资的大幅扩张和资本用途的巨大转变。在净零排放情景下，全球的能源投资将从过去五年的年均 2 万亿美元扩大到 2030 年之前的年均近 5 万亿美元，以及 2050 年之前的年均 4.5 万

亿美元（图 2.22）。¹⁷ 净零排放情景中，能源领域的年度资本投资总额将从近年来占全球 GDP 的 2.5% 左右上升到 2030 年的 4.5% 左右，然后到 2050 年回落到 2.5%。

图 2.22 ▶ 净零排放情景下的年均资本投资额



国际能源署。保留所有权利。

能源方面的资本投资将从近年来占 GDP 的 2.5% 上升到 2030 年的 4.5%；

大部分用于发电、管网和电力终端使用者设备

注：基础设施包括电网、公共电动车充电设施、二氧化碳管道和储存设施、直接空气捕捉和封存设施、氢能加注站、氢能进出口终端、化石燃料管道和中转站。终端使用能效投资是指提高设备能源性能（相对于常规设计）的增量成本。电力系统包括发电、储存和配送，以及公共电动车充电设施。电气化投资包括在车辆电池、热泵和基于电力的材料生产路线的工业设备等方面的支出。

随着资本用途转变，发电领域的年度投资额从过去五年的 5 000 多亿美元上升到 2030 年的 16 000 多亿美元，之后将随着可再生能源技术成本的不断下降而回落。核能的年度投资额也会增加：与目前的水平相比，到 2050 年将增加一倍以上。然而，燃料供应的投资额将从 2010 年代最后 5 年的年均约 5 750 亿美元下降至 2030 年的 3 150 亿美元，2050 年进而降至 1 100 亿美元。化石燃料供应在能源部门总投资中的占比将从近年来的 25% 下降到 2050 年的仅 7%：这将部分被氢、氢基燃料和生物能源等低排放燃料供应支出的增加所抵消。2050 年，低排放燃料的年度投资额将增加至近 1 400 亿美元。在净零排放情景中，交通运输方面的投资将大幅增加，从近年来的每年 1 500 亿美元增加到 2050 年的超过 1.1 万亿美元：这主要是由于电动车与传统汽车相比前期成本较高，尽管电池的成本有所下降。

从技术领域来看，电气化是净零排放情景的主要关注点。除了在发电领域的投资增加以外，电网扩展和现代化方面的投资也将显著增长。年度投资额将从近年来的年均 2 600 亿美元上升到 2030 年的约 8 000 亿美元，并在 2050 年前保持在这一水平。面对

¹⁷ 本报告中呈现的投资水平考虑到的建筑物能效改进比国际能源署《世界能源投资报告》（IEA, 2020c）中的更宽泛，因此与该报告中的数字不同。

电力需求的增加和可变发电量在电力组合中的占比加重，这种投资对于确保电力安全必不可少。对终端用能部门电气化的投资也显著增加，其中包括对电动车电池、热泵和电动工业设备的投资。除电气化投资外，随着生产设施规模的扩大，从目前到 2030 年氢能投资将适度增加，此后随着氢能在交通运输领域使用的扩大，氢能投资将有更大增长：包括生产设施、氢能加注站和终端使用者设备在内的氢能年度投资将在 2030 年达到 1 650 亿美元，并在 2050 年超过 4 700 亿美元。全球对 CCUS 和能效的投资也将增加（到 2050 年，这两个领域的年度投资额将分别达到 1 600 亿美元以上和 6 400 亿美元左右），主要投向工业和建筑物部门的深度建筑改造和节能电器。

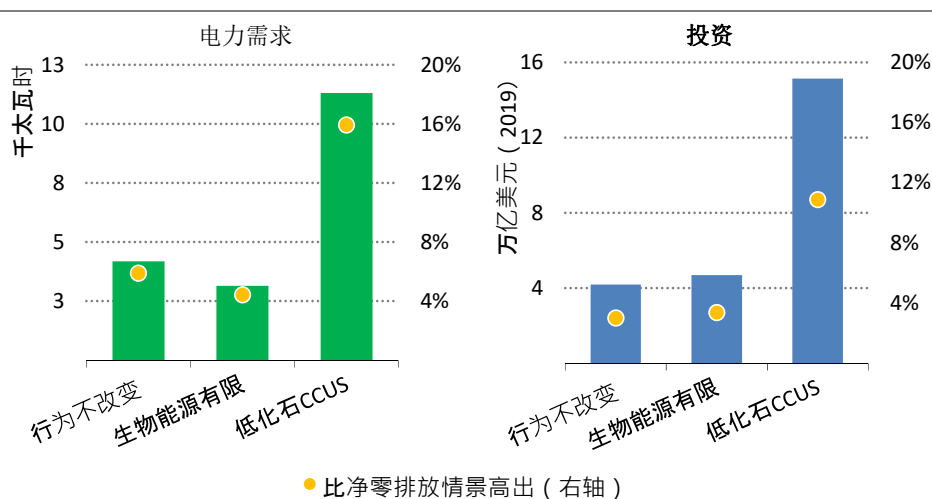
为了获得净零排放情景所需的投资资金，需要将现有资本导向清洁能源技术，并大幅提高能源投资的总体水平。通过推出激励机制、制定适当的监管框架以及改革能源税的公共政策，可以调动资金，推动投资额增长，投资额增量的大部分将来源于私人资金。然而，政府也需要直接融资，以促进新基础设施项目的发展，并加快目前处于示范期或原型期的技术的创新。许多新兴市场和发展中经济体的项目往往比较依赖公共融资，因此，如果出台政策确保可融资的项目源源不断，扩大优惠债务融资和使用发展融资，则将在促进这些经济体的私人投资方面发挥重要作用。净零排放情景中将有大规模的跨国合作努力，以促进资本的国际流动。

净零排放情景中大量增加的资本投资，将在一定程度上由较低的运营支出抵消。目前，运营成本在上游燃料供应项目和化石燃料发电项目的总成本中占很大比重，而在净零排放情景中，清洁技术的运营成本低得多，并将发挥越来越大的作用。

2.7 关键的不确定因素

由于诸多原因，通往净零排放的道路是不确定的：我们不能确定经济的基本条件将如何变化，哪些政策将是最有效的，公民和企业对市场和政策信号将作何反应，还有技术及其成本将如何在能源部门内外演变。因此，净零排放情景只是到 2050 年实现净零排放的一条可能路径。在此背景下，本节将探讨如果净零排放情景中关于行为改变、生物能源和化石燃料 CCUS 的假设出现偏差，将会产生什么影响。之所以选择这三个领域，是因为其相关假设存在高度的不确定性，也是因为它们对于在 2050 年前实现净零排放的贡献至关重要。

图 2.23 ▶ 2050 年的额外电力需求量，以及 2021-2050 年期间对部分不确定领域的额外投资



国际能源署。保留所有权利。

行为不改变、生物能源有限并且化石燃料CCUS 得不到发展——

其中每一项都将导致投资金额要增加4-15 万亿美元，才能实现净零排放

注：“行为不改变”假设不做出任何净零排放情景中的行为改变。“生物能源有限”假设不增加用于生物能源生产的土地。“低化石 CCUS”假设除了已经批准或在建的项目外，基于化石燃料的 CCUS 不再增加。

我们的分析清楚地强调，更悲观的假设将大大增加 2050 年实现净零排放的成本和难度（图 2.23）。

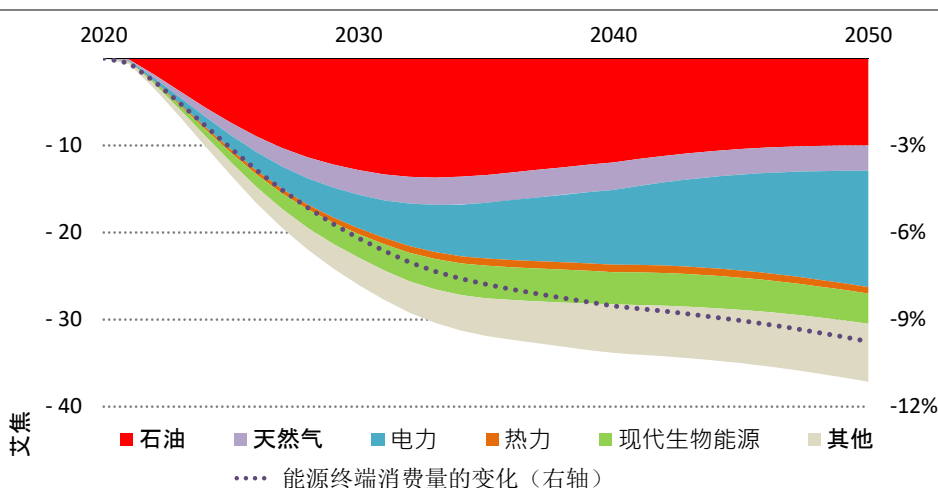
- 行为改变对于减少交通运输、建筑物和工业的能源需求很重要。如果净零排放情景中假设的行为改变无法实现，2050 年的二氧化碳排放量将增加约 26 吉吨。通过使用额外的低碳电力和氢能来避免这些排放，将需额外花费 4 万亿美元。
- 净零排放情景中，2020 年到 2050 年间生物能源使用量将增长 60%，用于种植生物能源的土地面积将增加约 25%。净零排放情景中，2050 年的生物能源使用量远远低于目前对全球可持续生物能源潜力的最佳估计值，但该估计值存在着高度的不确定性。如果生物能源的土地用量保持在目前的水平，则 2050 年的生物能源使用量将减少约 10%，而要在 2050 年实现净零排放将需要 4.5 万亿美元的额外投资。
- 如果不为化石燃料开发 CCUS，搁浅资产的风险将大大增加，并需要在风能、太阳能和电解产能方面增加约 15 万亿美元的投资，以实现相同水平的减排。这也可能会严重拖延配备碳捕捉和封存生物能源（BECCS）和直接空气碳捕捉和封存（DACCS）的进展：如果这些技术不能大规模部署，那么到 2050 年实现净零排放将困难得多。

2.7.1 行为改变

净零排放情景中某些部门行为变化的影响

净零排放情景中，能源消费者行为的改变在降低二氧化碳排放和能源需求增长方面发挥着重要作用。2050 年，行为改变将使全球能源需求减少 37 艾焦，即 10%，如果没有这些改变，2021 年至 2050 年的累计排放量将额外增加 10% 左右（图 2.24）。行为改变在交通运输部门发挥的作用尤其重要。

图 2.24 ▸ 净零排放情景下，因行为改变而减少的不同燃料的终端消费总量



国际能源署。保留所有权利。

行为改变和材料利用效率对终端能源消费量的影响 随着时间的推移而增加

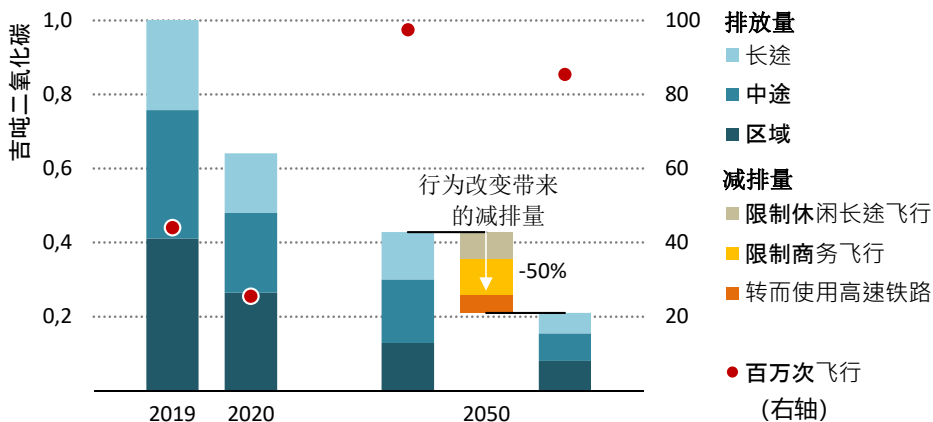
注：“其他”包括煤炭、氢能、地热、太阳能热力、合成油和合成气。

客运航空。假如不出现净零排放情景中假设的行为改变，2020 年至 2050 年，全球的客运航空需求将增长两倍以上。其中约 60% 的增长将发生在新兴市场和发展中经济体。在净零排放情景中，三种改变将让 2050 年的航空排放减少 50%，而航班班次仅减少 12%（图 2.25）。

- 将商务航空旅行保持在 2019 年的水平。商务旅行虽然在 2020 年下降到几乎为零，但在新冠疫情之前占航空旅行的四分之一以上。在净零排放情景中，将商务航空旅行保持在 2019 年的水平将在 2050 年避免大约 1.1 亿吨二氧化碳的排放。
- 将以休闲为目的的长途飞行（超过 6 小时）保持在 2019 年的水平。平均而言，单次长途飞行的排放量是区域飞行（不到一小时）的 35 倍。这将影响不到 2% 的航班，但在 2050 年将避免 7 000 万吨二氧化碳的排放。
- 转向使用高速铁路。从区域航班转向高铁的机会因地区而异。在全球范围内，鉴于现有的铁路基础设施，我们估计 2019 年约有 15% 的区域航班由高铁取代；未来

的高铁线路将确保到 2050 年约有 17% 的航班可以由高铁取代 (IEA, 2019)。¹⁸ 这意味着 2050 年的二氧化碳排放量将减少约 4 500 万 (在净零排放情景中, 高速列车在 2050 年不产生任何排放)。

图 2.25 ▸ 净零排放情景下, 全球航空业的二氧化碳排放量以及行为改变对其影响



国际能源署。保留所有权利。

到 2050 年, 航空客运需求将大幅增长, 但行为改变在 2050 年可贡献 50% 的减排量,

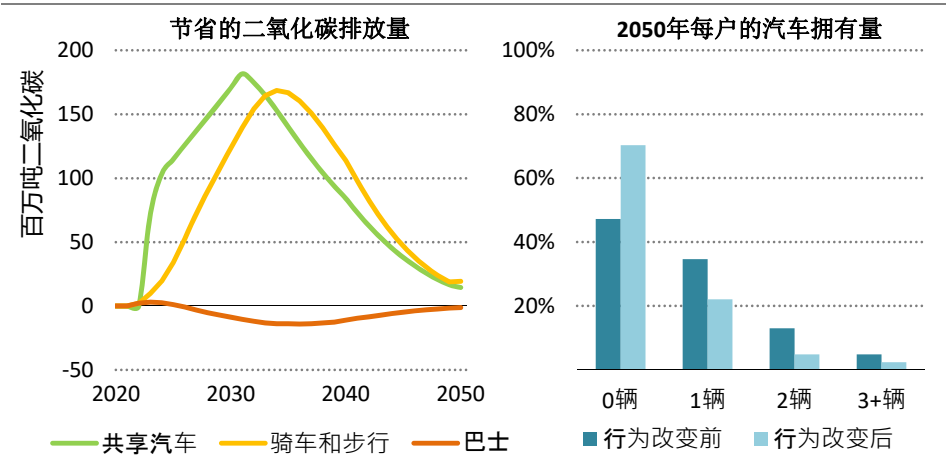
尽管航班班次只减少 12%

注: 长途 = 6 小时以上的飞行; 中途 = 1-6 小时的飞行; 区域 = 不到 1 小时。商务飞行 = 以工作为目的的旅行; 休闲飞行 = 以休闲为目的的旅行。平均速度范围为 680-750 公里/小时, 具体因飞行距离而异。

汽车的使用。净零排放情景中, 我们假定了各种旨在减少城市中汽车使用和总体汽车拥有量的新措施。这些措施实施后, 城市地区的汽车共乘市场将快速增长, 大城市将逐步淘汰污染严重的汽车, 并以自行车、步行和公共交通取而代之。净零排放情景中, 这些变化的时间点取决于城市的条件, 城市必须有必要的基础设施和公共支持, 才能确保人们放弃使用私人汽车。视城市的具体情况而定, 有 20-50% 的汽车出行将由巴士代替, 其余的由自行车、步行和公共交通取代。这些变化在 2030 年代中期将使城市中汽车的二氧化碳排放量总共减少 3.2 亿吨 (图 2.26)。随着汽车电气化越来越普遍, 这些变化对排放的影响会逐渐消失, 但在 2050 年, 其对抑制能源使用仍有重大影响。

¹⁸ 这个假设的前提是: 新的铁路路线避开水体、穿山隧道; 旅行所需时间与航空旅行相近; 需求中心足够大, 能确保高速铁路在经济上行得通。

图 2.26 ▶ 净零排放情景下，行为改变促成的全球二氧化碳减排量以及每户的汽车拥有量



国际能源署。保留所有权利。

在城市中不鼓励使用汽车的政策将促成二氧化碳排放量迅速减少、汽车拥有量降低，
不过，随着汽车日渐电气化，政策的影响会逐渐减弱

城市中汽车的使用日渐减少也将影响汽车拥有量。调查数据表明，汽车共享计划和公共交通服务的存在使汽车拥有量降低 35%，最大的变化发生在有多辆车的家庭（Jochem et al., 2020; Martin, Shaheen and Lidiker, 2010）。如果行为没有改变，2050 年 35% 的家庭会有汽车；净零排放情景中，如果行为发生改变，该比例将下降到 20% 左右，而拥有两辆车的家庭将从家庭总数的 13% 下降到不到 5%。

净零排放情景中，城市出行模式的变化将对材料需求产生影响。汽车拥有量的减少将导致 2050 年钢铁需求小幅下降，在钢铁生产中节省约 4 000 万吨二氧化碳。目前到 2050 年期间，需要通过在全球范围内新建约 8 万公里的自行车道来支持更多自行车出行，从而将增加对水泥和柏油的需求。然而，这种影响是很小的：与此相关的额外排放仅相当于通过减少汽车使用而避免的排放量的不到 5%。

净零排放情境中如何实现行为变化

净零排放情景中，法规和强制性规定可以促成行为改变带来的减排量的 70% 左右。例如：

- 在净零排放情景中，随着时间的推移，最高限速从目前的水平降低到 100 公里/小时，将使 2050 年道路车辆的排放量将减少 3%。
- 在建筑物部门，实施电器能效最大化标准。
- 规定办公室供热温度和空调机组默认制冷温度，减少过度的冷热需求。

- 最初由市场机制推动变化，例如高速铁路取代区域航班；¹⁹ 随着时间的推移，可以根据民情和消费者惯例的变化通过监管来推动变化。

基于市场的工具使用各种经济激励和抑制措施来影响民众的决定。净零排放情景中，这些措施可以促成行为改变带来的减排量的三分之二左右。例如：

- 实施拥堵定价和按车辆类型区分的有针对性的干预措施，²⁰ 如针对污染最严重的车辆的收费，或针对清洁汽车的优先停车。
- 采取能够减少旅行的交通需求措施，如燃料税和基于距离的车辆保险和登记费（Byars, Wei and Handy, 2017）。
- 采用帮助消费者推动变革的信息措施，如强制标示制造中包含的或生命周期内的排放，并要求企业披露其碳排放信息。

净零排放情景中，**信息和公众意识措施**可以促成行为改变带来的减排量的 30% 左右。例如：

- 通过个性化和实时的旅行计划信息，促进出行转向步行、自行车和公共交通。
- 产品标签和公众宣传活动相结合，推动回收利用率及相关行为习惯。
- 对类似家庭的消费模式进行比较，可以减少高达 20% 的能源浪费（Aydin, Brounen and Kok, 2018）。

净零排放情景中的行为改变实现难度因地点而异，政策干预需要借鉴行为科学的洞见，并考虑到现存的行为规范和文化偏好。有些行为改变可能比其他行为改变更容易被社会接受。英国和法国的公民集会表明，对频繁和长途飞行者征税以及禁止污染性车辆进入市中心有较高的支持率；相反，限制汽车拥有权或降低限速的措施的接受度较低（Convention Citoyenne pour le Climat, 2021; Climate Assembly UK, 2020）。对于减少家庭能源使用的行为改变，支持率可能尤其高：最近的一项调查显示，85% 的人支持晾晒衣服和关掉电器，只有 20% 的人认为降低家庭温度设置是不可取的（Newgate Research and Cambridge Zero, 2021）。

表 2.10 ► 净零排放情景下的关键行为改变

政策方案	相关的政策-目标	成本效益	及时性	社会接受度	CO ₂ 排放影响
少车城市 • 在大城市中逐步淘汰内燃机汽车。 • 城市汽车出行全部共享。	• 低排放区。 • 限制进入。 • 停车限制。 • 登记上限。 • 停车定价。 • 交通阻塞费。 • 自行车道和公共交通投资。	• 减缓空气污染。 • 公共卫生保健。 • 减少拥堵。 • 城市空间。 • 美化和宜居。	●	●	●

¹⁹ 法国已经提议了一项法律，禁止在有两个半小时以下的铁路替代方案的情况下乘坐国内航班（Assemblée Nationale, 2021）。

²⁰ 拥堵收费目前在 11 个主要城市使用，已被证明可减少高达 27% 的交通流量。低排放区根据车辆类型对进入城市区域的车辆收费，目前在 15 个国家践行（TfL, 2021; Tools of Change, 2014; European Commission, 2021）。

节能驾驶 - 将高速公路的限速降低到 100 公里/小时以下。 - 生态驾驶。 - 将车内空调温度提高 3℃。	- 限速。 - 实时燃料效率显示。 - 宣传活动。	- 道路安全。 - 减少噪音污染。				
减少区域航班 在可行的情况下，以高速铁路取代所有 <1 小时的航班。	- 高铁投资。 - 补贴高铁出行。 - 溢价。	- 降低空气污染。 - 降低噪音污染。				
减少国际航班 - 将商务航空旅行保持在 2019 年的水平。 - 将休闲长途飞行保持在 2019 年的水平。	- 宣传活动。 - 溢价。 - 企业目标。 - 对飞行常客征税。	- 降低空气污染。 - 降低噪音污染。				
空间加热 平均设定温度为 19-20℃。	- 宣传活动。 - 消费反馈。 - 企业目标。	- 公共卫生保健。 - 能源可负担性。				
空间冷却 平均设定温度为 24-25℃。	- 宣传活动。 - 消费反馈。 - 企业目标。	- 公共卫生保健。 - 能源可负担性。				

● = 低匹配度 ● = 中匹配度 ● = 高匹配度

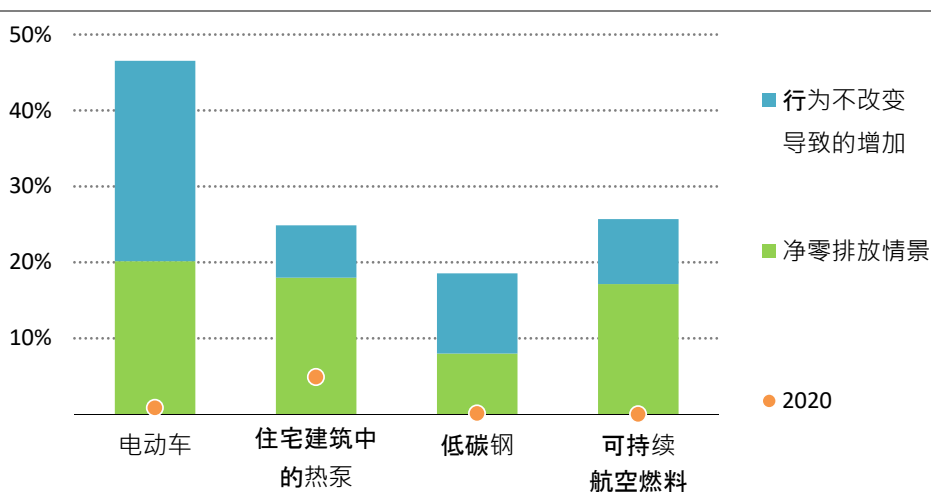
注：大城市 = 居民超过 100 万的城市。二氧化碳排放影响 = 2020-2050 年的累计减排量。生态驾驶 = 提前升档，以及避免突然加速、减速或怠速。可以居家办公的工作岗位数目在不同地区有很大差异；全球范围内，平均有 20% 的工作可以居家办公。

净零排放情景中的行为改变将在城市的空气污染、道路安全、噪音污染、拥堵和健康方面带来更广泛的好处。当共同利益变得明显时，对政策干预的态度可能会迅速改变。例如，在斯德哥尔摩，对拥堵收费的支持率从方案出台时的不到 40% 跃升到三年后的 70% 左右；在新加坡、伦敦和其他城市也出现了类似的趋势，所有这些城市在出台收费后，空气污染都得到了缓解（Tools of Change, 2014; DEFRA, 2012）。

如果不改变行为，到2050年实现净零排放是否仍然可能？

如果净零排放情景中描述的行为改变没有实现，则 2030 年的终端能源使用量将增加 27 艾焦，二氧化碳排放量将增加 1.7 吉吨，而 2050 年将分别增加 37 艾焦和 2.6 吉吨。结果将是本来就亟需以空前速度发展的低碳技术，需要以更快的速度发展。2030 年电动车在全球汽车总量中的份额将需要从 20% 左右增加到 45%，才能确保相同的减排水平（图 2.27）。住宅如要实现同样的减排，需要电热泵的销量在 2030 年达到 6.8 亿台（净零排放情景中仅为 4.4 亿台）。如果没有材料利用效率的提高，2030 年的低碳初级钢铁生产份额需要比净零排放情景中的高一倍以上。2050 年，可持续航空燃料的使用也需要上升到 700 万桶/天（净零排放情景中仅为 500 万桶/天）。2050 年，水泥和钢铁生产的二氧化碳排放量将比净零排放情景预测的高 1.7 吉吨，因而需要在工业中增加部署 CCUS、部署电弧炉，以及更多地使用低碳氢能。

图 2.27 ▶ 净零排放情景下，2030 年有/没有行为改变的情况下低碳技术和燃料的份额



国际能源署。保留所有权利。

在行为不改变的情况下，2030 年低排放技术在终端使用中的份额需要大幅提高，才能达到与净零排放情景中相同的排放量

注：电动车 = 全球道路上电动车的份额。可持续航空燃料 = 生物航空煤油和合成航空煤油。低碳钢指的是初级钢的产量。

2.7.2 生物能源和土地利用变化

净零排放情景中，现代形式的生物能源在实现净零排放方面发挥关键作用。生物能源是一种用途广泛的可再生能源，可用于所有部门，而且通常可以利用现有的输配电基础设施和终端使用者设备。但在扩大生物能源供应方面存在制约因素：由于利用废弃物物流生产生物能源的潜力有限，因此在扩大生物能源生产、实现可持续发展目标和避免与其他土地利用（尤其是粮食生产）的冲突之间，可能要权衡利弊。

净零排放情景中的生物能源使用水平考虑到了这些限制：2050 年的生物能源需求约为 100 艾焦。2050 年的全球可持续生物能源潜力早先被评估为至少 100 艾焦 (Creutzig, 2015)，而最近的评估显示，如果整合相关的联合国可持续发展目标，则潜力在 150-170 艾焦之间 (Frank, 2021; IPCC, 2019; IPCC, 2014; Wu, 2019)。然而，这种潜力的确切水平有很大的不确定性。利用与国际应用系统分析研究所 (IIASA) 合作开发的模型，我们在此研究了如果可持续生物能源的可用水平较低，将对 2050 年实现净零二氧化碳排放产生什么影响。我们还研究了实现农业、林业和其他土地利用 (AFOLU) 的大规模减排需要做什么。

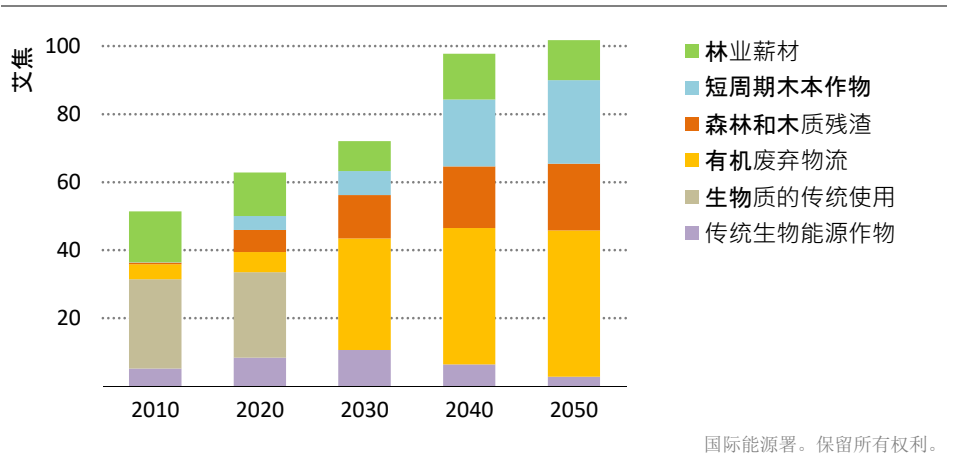
确保可持续的生物能供应

目前生产的大多数液体生物燃料来自专用生物能源作物，如甘蔗、玉米或油料作物，通常被称为传统生物燃料。增加原料用量、扩大生产这些生物燃料的耕地将会与粮食

生产发生冲突。在净零排放情景中，生物能源将转向可持续的、经认证的农产品和木材。生物燃料的生产过程则尽可能使用先进的转换技术和 CCUS（见第 3.3.2 节）。另一重点在于使用先进生物能源原料，包括来自其他工艺的废弃物流、短周期的木本作物和不需要使用耕地的原料。净零排放情景中，到 2050 年，先进生物能源将占生物能源供应的绝大部分。使用传统能源作物生产的生物燃料将从 2020 年的约 9 艾焦增长到 2030 年的约 11 艾焦，但随后将在 2050 下降至 3 艾焦，降幅为 70%（包括生物燃料生产过程中消耗的原料）。

不需要使用土地的先进生物能源原料包括来自农业和工业的有机废弃物流，以及来自森林采伐和木材加工的木质残渣。净零排放情景中，对全面的废物收集和分类进行投资，将从各种有机废弃物流中释放出约 45 艾焦的生物能源供应，主要用于生产生物气和先进生物燃料（图 2.28）。在净零排放情景下，2050 年来自木材加工和森林采伐的木质残渣将提供额外的 20 艾焦生物能源，这个数字低于目前对可持续总潜力的最佳估计值的一半。生物能源也可以从专用的短周期木本作物中生产（将满足 2050 年生物能源供应中的 25 艾焦）。²¹ 可持续管理的林业薪材或种植园²²，以及通过不与粮食生产或生物多样性冲突的农林系统与农业生产相结合的植树造林，在 2050 年将提供略高于 10 艾焦的生物能源。

图 2.28 ► 净零排放情景下，全球不同来源生物能源的供应量



2020 年至 2050 年期间，生物能源的使用量将增加约 60%，
同时逐渐摆脱传统原料和生物质的传统使用方式

注：有机废弃物流包括农业残余物，以及食品加工、工业和城市有机废弃物流；无需使用土地。
来源：国际能源署基于国际应用系统分析研究所的数据所做的分析。

净零排放情景中，专门用于生物能源生产的土地总面积将从 2020 年的 3.3 亿公顷增加到 2050 年的 4.1 亿公顷。2050 年的 4.1 亿公顷中约有 2.7 亿公顷是森林，占全球受管

²¹ 在庄稼地、牧场或不适合种植粮食作物的边缘土地上种植的木质短周期轮作萌生林。
²² 可持续林业管理确保森林的碳储量和碳吸收能力得到扩大或保持不变。

理森林总面积的约四分之一，森林总面积的约 5%。同年将有 1.3 亿公顷的土地用于短周期先进生物能源作物，0.1 亿公顷用于传统生物能源作物。在净零排放情景中，用于生物能源生产的耕地与目前的水平相比整体没有增加，而且不在林地上种植生物能源作物。²³ 在边缘土地上种植木质能源作物将大幅提高生物能源作物的总产量，而且，木质能源作物每公顷的单位生物能源产量是传统生物能源作物的两倍。

净零排放情景中，用于生物能源的土地总量远远低于充分考虑到可持续性制约因素的潜在可用土地的估算范围，包括保护生物多样性热点和实现联合国关于生物多样性和土地利用的可持续发展目标 15 的需要。不过，实施生物能源产品认证和严格控制哪些土地可以转用于扩大林业种植园和木质能源作物，对于避免土地利用冲突的问题至关重要。认证对于确保二氧化碳抵消的完整性也至关重要（见第 1 章）；应谨慎管理抵消的使用，并将其限制在缺乏替代减排方案的部门。一个相关的土地利用问题是如何解决能源部门以外的排放问题（专栏 2.3）。

专栏 2.3 ▶ 平衡土地利用、农业和林业的排放

为了限制全球温度上升，所有的温室气体排放源都需要下降到接近零，或者用二氧化碳移除来抵消。近年来，能源部门约占温室气体排放总量的四分之三。除能源部门外，最大的温室气体排放源是农业、林业和其他土地利用（AFOLU），该领域近几年产生的温室气体净排放量在 10-12 吉吨二氧化碳当量之间。²⁴ 农业、林业和其他土地利用的二氧化碳排放量约为 5-6 吉吨，一氧化二氮和甲烷排放量约为 5-6 吉吨二氧化碳当量（IPCC, 2019）。

减少农业、林业和其他土地利用的排放及提高移除量的方案包括：停止砍伐森林、改进森林管理方法、制定增加土壤碳含量的耕作方法，以及植树造林。最近，一些企业表示对这类基于自然的解决方案感兴趣，希望通过这种方式抵消企业运营中的排放（见第 1 章）。就植树造林而言，从现在到 2050 年，如果每年将约 1.7 亿公顷（约为印度面积的一半）的土地改造为林地，则能够封存约 1 吉吨二氧化碳。

在净零排放情景中，到 2050 年，能源相关和工业过程的二氧化碳净零排放的实现并不依赖于能源部门以外的任何抵消。但农业、林业和其他土地利用方面的相关行动将有助于抑制气候变化。净零排放情景中，由于摆脱传统作物以及在边缘土地和牧场上增加短周期先进生物能源作物的生产，2050 年的能源部门转型将减少约 1.5 亿吨的农业、林业和其他土地利用二氧化碳排放。为了进一步减少农业、林业和其他土地利用的排放，需要在 2050 年前将森林砍伐量减少三分之二，制定更好的森林管理办法，并新造约 2.5 亿公顷的森林。这些变化的综合作用将在 2040 年之前使农业、林业和其他土地利用的二氧化碳排放量减少到零，并在 2050 年之

²³ 2050 年用于生物能源作物的 1.4 亿公顷土地中，7 000 万公顷是边缘土地或目前用于放牧的土地，7 000 万公顷是耕地。净零排放情景中，到 2050 年，木本作物的耕地使用量将增加 6 000 万公顷，但这将被生产传统生物燃料原料的耕地使用量的减少所抵消。

²⁴ 农业、林业和其他土地利用（AFOLU）排放是来自人类活动的排放，不包括自然土地汇从大气中移除的二氧化碳的排放。

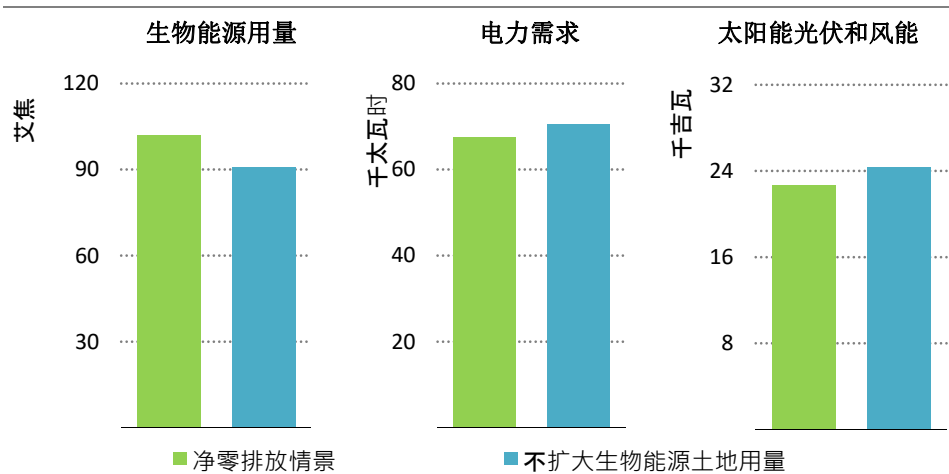
前每年吸收 1.3 吉吨二氧化碳。在这种情景下，2020 年至 2050 年期间，农业、林业和其他土地利用的累计二氧化碳排放量将约为 40 吉吨。

鉴于畜牧业生产与一氧化二氮和甲烷排放之间的联系，来自牲畜的非二氧化碳排放以及其他农业排放可能更难减缓。畜牧方式的改变和技术的改良（包括改变动物饲料）有助于减少前述排放，但可能必须利用造林才能完全抵消排放。另一个办法是通过减少对畜牧产品的需求来减少排放。例如，我们估计，如果目前人均肉类消费水平最高的家庭的消费量减少到全球平均水平，则在 2050 年将减少超过 1 吉吨二氧化碳当量的温室气体排放。对畜牧产品需求的减少将使全球牲畜所需的草场减少近 2 亿公顷，用于种植牲畜饲料的耕地减少 8 千万公顷。

如果不扩大生物能源的土地使用，到2050年实现净零排放是否可能？

对全球可持续生物能源潜力的估计存在很大的不确定性，尤其是新的土地可持续转化为生物能源生产用地的程度。因此，净零排放情景对生物能源的使用预测比较谨慎，预测的 2050 年消费量（100 艾焦）远远低于整合了相关可持续发展目标的最新潜力估算，即 150-170 艾焦。但是，可用于提供可持续生物能源的土地有可能比估计的更加有限。在此，我们探讨将专门用于生物能源作物和林业种植的土地面积限制在 3.3 亿公顷左右（即目前使用的面积）对排放的影响。

图 2.29 ► 不扩大生物能源土地用量对电力需求和 2050 年实现净零排放的能力的影响



国际能源署。保留所有权利。

在不扩大生物能源土地用量的情况下实现净零排放，需要太阳能光伏和风能再增加 3 200 太瓦时发电量，即净零排放情景的装机量再增加近 10%

将土地用量限制在 3.3 亿公顷将使 2050 年的可用生物能源供应量减少 10 艾焦以上。这将主要表现为短周期木质能源作物供应量的减少；在净零排放情景中这些作物主要

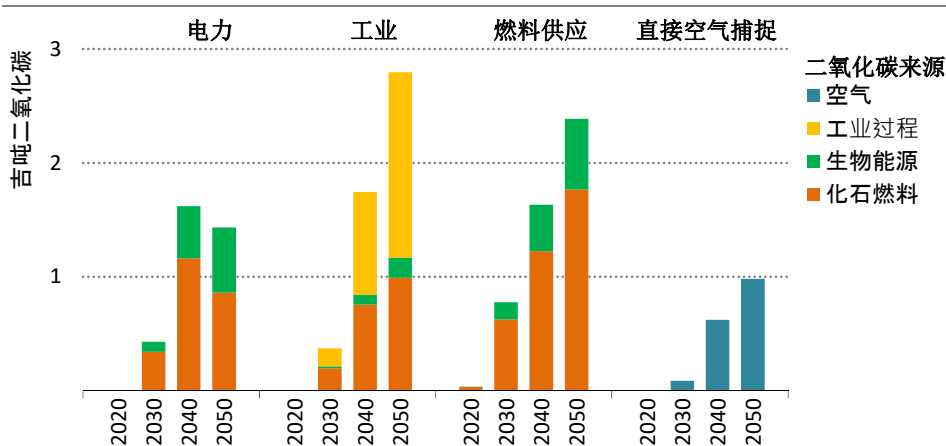
用于替代化石燃料，为工业过程和发电提供高温热量。没有生物能源的情况下，很可能用氢能和合成甲烷来替代，而它们的生产在 2050 年将需要大约 7 000 万吨的氢（比净零排放情景中的多 15%）。如果通过使用电解来生产以上所需的氢，将需要大约 750 吉瓦的电解产能，并使 2050 年的电力需求增加约 3 200 太瓦时（图 2.29）。

所需的额外电力可以利用可再生能源生产，这将需要在 2050 年额外增加 1 700 吉瓦的风能和太阳能光伏装机以及近 350 吉瓦的电池容量。2030 年代的年度增量将需要比净零排放情景中的高出 160 吉瓦。2050 年之前，额外的风能、太阳能、电池和电解产能，以及支持这一更高水平部署所需的电网和储存能力将需花费超过 5 万亿美元。这比净零排放情景中设想的扩大生物能源用量的成本高出不止 4.5 万亿美元，需要的总投资额比净零排放情景中的多 3%。因此，虽然不扩大生物能源的土地用量，在 2050 年仍有可能实现净零排放，但这将使能源转型的成本大大增加。

2.7.3 CCUS 用于应对化石燃料的排放

净零排放情景中，2050 年将总共捕获 7.6 吉吨的二氧化碳，其中近 50%来自化石燃料燃烧，20%来自工业过程，约 30%来自配备二氧化碳捕获和直接空气捕捉的生物能源使用（图 2.30）。在净零排放情景中，2030 年之前，用于化石燃料的 CCUS 将占 CCUS 总增长的近 70%。然而，由于经济、政治和技术原因，迅速扩大 CCUS 规模的前景非常不确定。在这里，我们研究如果化石燃料 CCUS 仅限于现有和计划中的项目，对 2050 年达到净零排放将有何影响。

图 2.30 ▶ 净零排放情景下，CCUS 应用于不同部门和排放源的情况



国际能源署。保留所有权利。

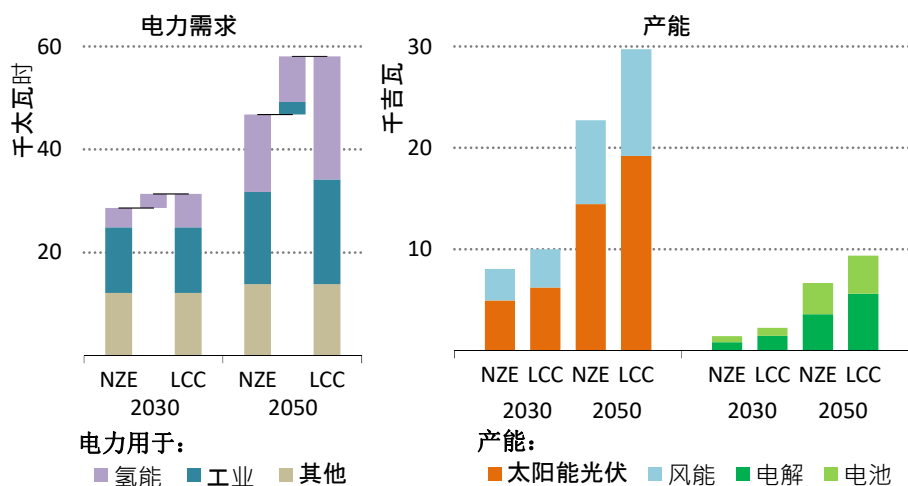
2030 年，二氧化碳捕获总量中来自化石燃料排放的比例接近 70%，
2050 年接近 50%

如果没有基于化石燃料的CCUS，到2050年实现净零排放是否可能？

净零排放情景中，2030年前新增的大部分CCUS项目为化石燃料的CCUS应用。这些项目有助于减少其他非化石燃料CCUS应用的风险，而此类应用对于实现净零排放至关重要。鉴于基于化石燃料的CCUS项目所面临的挑战，我们构建了一个低CCUS情景（LCC），在这个情景中，除了已经在建或获准开发的项目外，不再开发新的化石燃料CCUS项目。在低CCUS情景中，2050年从化石燃料中捕获的二氧化碳排放量只有约1.5亿吨，而在净零排放情景中，2050年的捕获量为36亿吨。

2050年低CCUS情景下，工业领域由于缺乏新的化石燃料CCUS项目，将导致二氧化碳排放比净零排放情景中多出1.2吉吨。必须使用替代技术来消除这些排放，才能在2050年实现净零排放。这将需要用到一些处于原型阶段的技术，如电动水泥窑和用于高价值化学品生产的电动蒸汽裂解装置（见专栏2.4）。假设这些技术能够得到示范和大规模部署，到2050年，电力需求将增加约2400太瓦时，工业领域的氢能需求将增加约4500万吨。此外，还必须以替代方式来生产净零排放情景中用配备CCUS的化石燃料生产的1.45亿吨氢。通过电解提供这1.9亿吨的氢将需要在2050年额外增加2000吉瓦的电解产能（几乎比净零排放情景中的多60%）以及9000太瓦时的电力（图2.31）。

图 2.31 ▶ 不扩大部署基于化石燃料的CCUS对2050年实现净零排放的影响



国际能源署。保留所有权利。

如果不部署基于化石燃料的CCUS，将大大增加电力需求，并需要更多的太阳能、风能和电解产能

注：NZE = 净零排放情景。LCC = 低CCUS情景，指的是应用于化石燃料的CCUS只限于目前在建或已批准开发的项目。

创新是开发新型清洁能源技术和推进现有清洁能源技术的关键。随着 2050 年的趋近，创新的重要性与日俱增，因为我们依靠现有技术将无法沿着净零排放路径实现目标。净零排放情景中，2050 年所需的减排量几乎有 50% 取决于目前还处于原型或示范阶段的技术，即尚未进入市场的技术（见第 4 章）。

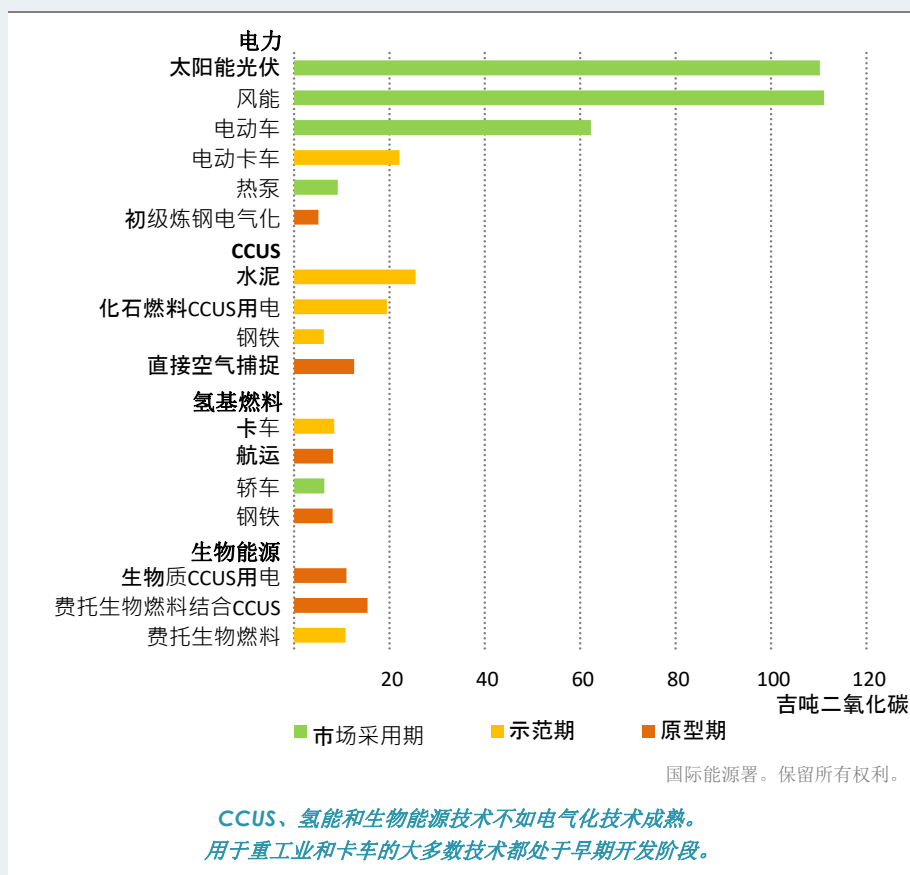
当一个新创意经历了构思和实验阶段，来到现实世界后，清洁能源创新流程包括四个关键阶段（IEA, 2020d）。但创新走向成熟的路径可能很漫长，而且也无法保证成功。

- **原型期：**概念发展成为设计，然后发展成为新装置的原型；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。
- **市场采用期：**技术在一些市场上得到部署。然而，它要么在成本和性能上与现有技术存在差距（例如用于制氢的电解装置），要么具有竞争力但仍面临障碍，如在与现有基础设施或消费者偏好的整合方面有困难，还达不到其全部市场潜力（例如热泵）。这两种情况都需要政策上的关注，以刺激更大范围的推广，降低成本，克服现有的障碍，让更多的成本和风险逐渐由私营部门承担。
- **成熟期：**技术已经在市场上稳定下来，新的购买或安装持续不断，甚至在一些环境中，由于更新的技术开始与现有资产存量竞争（如水力涡轮机）使技术的购买量或安装量出现下降。

创新在净零排放情景中至关重要，有创新，才能将将新技术推向市场并改进新兴技术，包括电气化、CCUS、氢能和可持续生物能源。在净零排放情景中，对创新的依赖程度在不同部门和相关价值链的不同环节中有所不同（图 2.32）。

- **电气化：**净零排放情景中使用低排放电力所带来的 170 吉吨二氧化碳累计减排量中，有近 30% 来自于目前处于原型或示范阶段的技术，如基于电力的初级钢铁生产、电动卡车。
- **氢能：**目前并非所有低碳氢价值链的环节都已经进入市场。大多数需求侧技术，如氢能炼钢，仅处于示范或原型阶段。净零排放情景中，这些技术可以实现与氢能有关的累计减排量的 75% 以上。
- **CCUS：**净零排放情景下来自 CCUS 的累计减排量中，约有 55% 是由目前处于示范或原型阶段的技术做出的贡献。虽然二氧化碳捕捉已经在某些工业和燃料转化过程中使用了几十年，如氨的生产和天然气加工，但在许多其他可能的应用中，相关技术仍处于大规模示范阶段。
- **生物能源：**净零排放情景中，与可持续生物能源相关的累计减排量的约 45% 来自于目前处于示范或原型阶段的技术，其中以用于生产生物燃料的技术为主。

图 2.32 ▽ 净零排放情景下，不同成熟度的部分技术贡献的累计二氧化碳减排量



注：费托生物燃料 = 生物质气化费托合成。成熟度等级显示的是处于最先进阶段的技术设计的成熟度。

在电力部门，2050 年将需要为工业和燃料转型额外生产 11 300 太瓦时的电力，并以其他方式生产的电力取代净零排放情景中配备 CCUS 的化石燃料发电厂生产的几乎所有电力。如果使用可再生能源，则 2050 年将需要额外的 7 000 吉瓦风能和太阳能光伏装机。这比净零排放情景中多出约 30%，意味着 2030 年代太阳能光伏和风能的年增量将需要达到 1 300 吉瓦（比净零排放情景中的多出 300 吉瓦）。要配合上述额外的可变可再生能源发电量，并提供净零排放情景中配备化石燃料 CCUS 的电厂的灵活性，2050 年将需要增加约 660 吉瓦的电池容量（比净零排放情景中 2050 年的预测值多 20%），同时还需要增加 110 吉瓦的其他可调度容量。

在低 CCUS 情景中，降低现有燃煤和燃气发电厂的 CCUS 配备率，也会提高搁浅资产的风险。我们估计，2030 年高达 900 亿美元的现有燃煤和燃气产能可能搁浅，而 2050 年可能达到 4 000 亿美元。净零排放情景中，2050 年之前对基于化石燃料的 CCUS 的

投资约为 6 500 亿美元，这在低 CCUS 情景中是没有的。但是，在低 CCUS 情景中，需要额外的投资来扩大风能、太阳能和电解产能，推动重工业的电力路线，以及扩大电网和储存能力，才能支持所需的更高水平部署。因此，为在 2050 年达到净零排放，低 CCUS 情景中的额外累计投资额将比净零排放情景高出 15 万亿美元。

如果不开发基于化石燃料的 CCUS，还可能会推迟或阻止其他 CCUS 应用的开发。如果没有基于化石燃料的 CCUS，使用者数目和部署在产业集群周围的二氧化碳运输和储存基础设施的数量将减少。由于基础设施的前期成本高昂，并且 CCUS 基础设施集群的初期推广存在其他风险，因此可以承担相关成本和风险的行为体和资本库将更为有限。此外，开发以化石燃料为基础的 CCUS 所带来的学习和成本降低的溢出效应会减少，从而使更多新生的 CCUS 技术成功示范和推广的可能性大大降低。其他 CCUS 技术发展的延迟将对在 2050 年达到净零排放的前景产生重大影响。例如，要想从大气中移除二氧化碳或基本消除水泥生产的排放，CCUS 是唯一可扩展的低排放选择。如果这些技术的进展放缓，不能大规模部署，那么到 2050 年实现净零排放的难度将会大幅增加。

2050 年各部门实现净零排放的路径

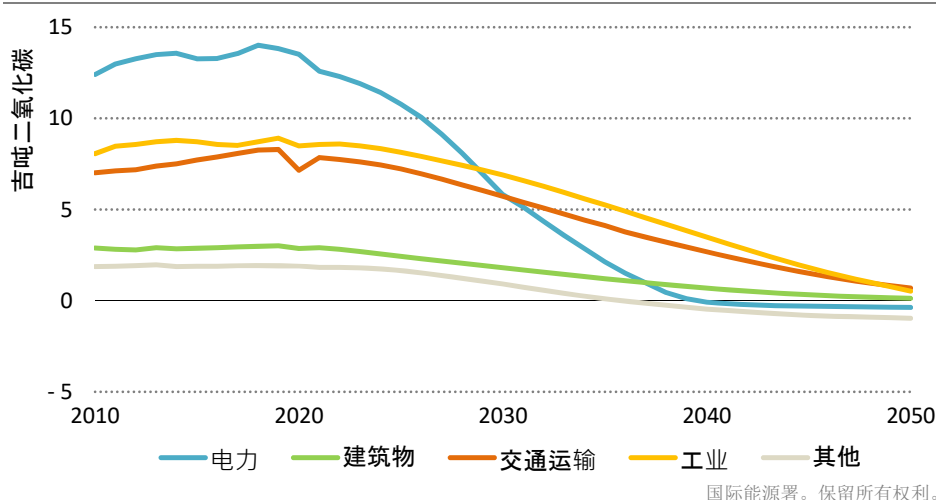
摘要

- 净零排放情景（NZE）下，从现在到 2050 年化石燃料用量将大幅下降，除了已经批准开发的油气田，不需要再开发新的油气资源。也不再需要新建或延期煤矿。生物气、氢和氢基燃料等低排放燃料将快速增长，2050 年在全球终端能源中将占近 20%，而 2020 年这一比例仅为 1%。2050 年将生产超过 5 亿吨低碳氢，其中约 60%是利用电解法生产的，电解用电量将占 2050 年全球发电总量的 20%。2050 年全球航空燃料中将有 45%为液体生物燃料。
- 净零排放情景下，电力需求将迅速增长，从现在到 2030 年增加 40%，到 2050 年增加 1.5 倍以上；来自发电的排放量，在发达经济体中将于 2035 年降至净零，全球范围内则将于 2040 年降至净零。推动转型的是可再生能源，其在发电量中的占比将从 2020 年的 29%上升到 2030 年的 60%，到 2050 年接近 90%。从 2030 年到 2050 年，每年将增加 600 吉瓦的太阳能光伏和 340 吉瓦的风能。效率最低的一批燃煤电厂将在 2030 年前被淘汰，所有未采用减排措施的煤电将在 2040 年前被淘汰。对电网的投资到 2030 年将增加两倍，到 2050 年一直保持在高位。
- 工业排放方面，从现在到 2030 年将下降 20%，到 2050 年将下降 90%。净零排放情景中，2050 年约 60%的重工业减排量将来自于目前尚未商业化的技术：其中许多使用氢能或 CCUS。2030 年起，所有新增工业产能都将接近零排放。2030 年起，全球每月将有 10 间新建和现有重工业工厂增配 CCUS，新建 3 家使用氢能的工业工厂，并在工业场点增加 2 吉瓦的电解槽制氢能力。
- 交通运输方面，排放量到 2030 年将下降 20%，到 2050 年将下降 90%。初期重点是提高交通运输系统的运营和技术效率、交通运输方式转变，以及公路交通运输的电气化。到 2030 年，汽车销量中将有 60%以上为电动车（2020 年为 4.6%），重型卡车销量中将有 30%为燃料电池或电动车（2020 年不足 0.1%）。到 2035 年，全球汽车销量将几乎被电动车包揽，而到 2050 年，销售的重型卡车将几乎全部都是燃料电池或电动车。低排放燃料和行为改变有助于减少长途交通运输的排放；不过，航空和航运的减排仍然颇具挑战，其二氧化碳排放量在 2050 年将达到 3.3 亿吨。
- 建筑物方面，排放量到 2030 年将减少 40%，到 2050 年将减少 95%以上。到 2030 年，全世界现存建筑物约有 20%得到改造，并且新建筑物全部都符合零碳就绪建筑物标准。在发达经济体及全球范围内，售出电器中最高效型号的占比将分别于 2025 年和 2030 年代中期超过 80%。2025 年起，除了与氢能兼容的化石燃料锅炉外，将不再出售新的化石燃料锅炉，而热泵销量将迅猛增长。到 2050 年，电力将满足建筑物用能的 66%（2020 年为 33%）。从现在到 2050 年，用于供热的天然气用量将下滑 98%。

3.1 导言

2050 年净零排放情景（NZE）下，全球能源系统将以以前所未有的速度和广度进行转型。本章探讨了主要部门将如何转型，以及转型过程中的具体挑战和机遇（图 3.1）。本章涵盖的主体包括：化石燃料和低排放燃料的供应，发电，以及工业、交通运输和建筑物三大终端用能部门。针对每一个部门，我们都列出了关键的技术和基础设施里程碑，净零排放情景成功与否将取决于这些里程碑能否实现。我们进一步探讨了这些里程碑需要哪些关键的政策决定以及何时才能实现。此外，鉴于 2050 年实现净零排放的路径不止一条，而且清洁能源转型相关不确定因素很多，我们在本章中还探讨了另一些情况，即如果决定不依赖于某些燃料、技术或减排方案，那么将对整个转型和各终端用能部门造成什么影响。

图 3.1 ▸ 净零排放情景下，不同部门的二氧化碳排放量



从现在到2025年，电力部门的排放量下降最快，交通运输、建筑物和工业部门的排放量稳步减少。
减少的部分原因是低排放燃料供应增加

注：其他 = 农业、燃料生产、转化和相关过程排放，以及直接空气捕捉。

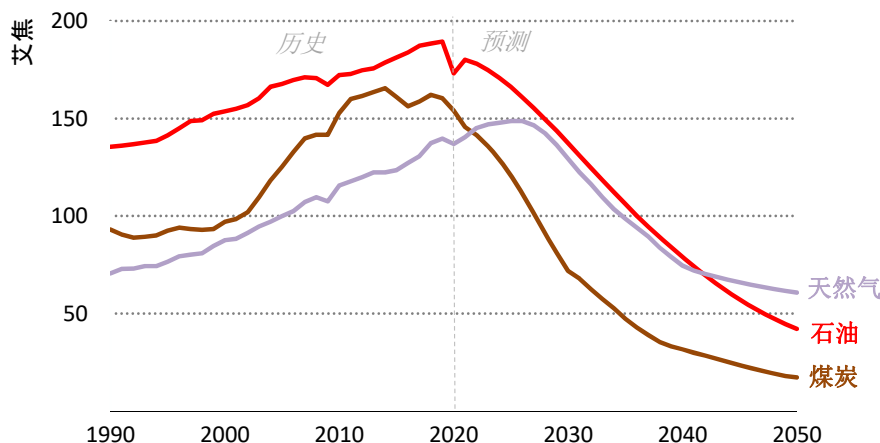
3.2 化石燃料供应

3.2.1 净零排放情景下的能源趋势

煤炭用量将从 2020 年的 52.5 亿吨煤当量下降到 2030 年的 25 亿吨煤当量，到 2050 年下降到 6 亿吨煤当量以下。即使加大碳捕捉、利用和封存（CCUS）的部署，2050 年的煤炭用量也将比 2020 年低 90%（图 3.2）。石油需求将不会再恢复到 2019 年的峰值，而是从 2020 年的 8 800 万桶/天，下降到 2030 年的 7 200 万桶/天，之后继续下降到 2050 年的 2 400 万桶/天；2020 年到 2050 年间的降幅接近 75%。天然气需求在经历了

2020 年的下滑后迅速反弹，并将在 2020 年代中期之前持续增高，达到约 43 000 亿立方米的峰值，然后在 2030 年下降到 37 000 亿立方米，2050 年下降到 17 500 亿立方米。到 2050 年，天然气用量将比 2020 年减少 55%。

图 3.2 ▶ 净零排放情景下，煤炭、石油和天然气的产量



国际能源署。保留所有权利。

2020 年和 2050 年间，煤炭、石油和天然气需求将分别下降 90%、75% 和 55%

石油

净零排放情景中的石油需求轨迹显示：除了已经批准开发的油田外，不需要勘探新的石油资源，也不再需要新油田。但是，需要继续投资于现有的石油生产资源。净零排放情景下，2020 年到 2050 年间石油需求的年均降幅将超过 4%。如果立即切断对产油期油田的所有资本投资，将导致石油供应量的年降幅超过 8%。如果继续对产油期油田进行投资，但不开发新油田，则供应量的年降幅约为 4.5%（图 3.3）；供需差额将由已经批准开发的油田补足。

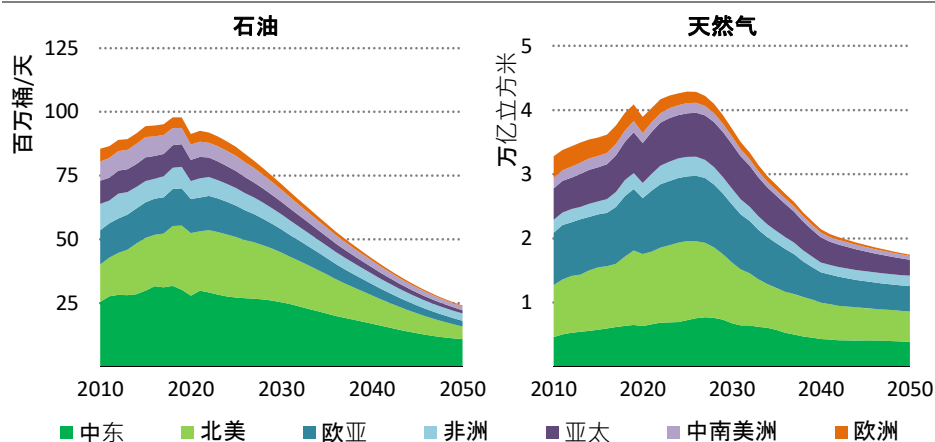
在净零排放情景中，上述动态关系将在油价中有所体现，油价将在 2030 年下降到约 35 美元/桶，2050 年下降到 25 美元/桶。这一价格轨迹主要由目前运营中的油田的运营成本决定，只有极少量的现有生产需要关停。然而，净零排放情景下，各国的产油收入相比近几年的水平都将大幅减少，¹而且净零排放情景中预计将有大量搁浅资本和搁浅价值。²净零排放情景中的油价原则上足以支付成本最低的石油生产商（包括中东的生产商）开发新油田的成本，但我们假定主要石油资源持有者将不会投资新油田，因为这样做会产生较大的额外价格下行压力。

¹ 政府也可以减少或取消上游税收，以确保生产成本低于油价，维持国内生产。

² 搁浅资本是指投入化石燃料基础设施、但因气候政策造成的需求减少或价格下降而导致在资产运营期内无法收回的资本投资。搁浅价值是指因气候政策造成的需求减少或价格下降而导致一项资产的未收入减少或资产所有者在某一特定时间点的资产估值减少（IEA, 2020a）。

净零排放情景下，炼油部门也面临重大挑战。炼油厂吞吐量将明显下降，产品需求也将发生重大变化。随着车辆快速电气化，对汽油、柴油等传统精炼产品的需求将大幅走低，而对石化产品等非燃烧产品的需求则将有所增加。近年来，石油需求中约有 55% 是用于提炼汽油和柴油，但到 2050 年这一占比将下降到不足 15%，而乙烷、石脑油和液化石油气（LPG）的占比将从近期的 20% 上升到 2050 年的近 60%。这种转变将加剧炼油厂石油需求的下降，2020 年至 2050 年期间，炼油厂的用量将降低 85%。虽然炼油厂对于需求变化已经习以为常，但由于净零排放情景下的变化剧烈，必然导致部分炼油厂关停，特别是无法集中力量开展石化业务或生产生物燃料的炼油厂。

图 3.3 ▶ 净零排放情景下，石油和天然气的产量



国际能源署。保留所有权利。

除了已经批准开发的油气田，不需要再开发新的油气资源。供应将越来越集中于几个主要产油国

天然气

净零排放情景下，除了已进入开发阶段的天然气田，不需要再开发新的天然气田；对于目前处于建设或规划阶段的许多液化天然气（LNG）液化设施，也不再有需要。2020 年到 2050 年间，以液化天然气形式交易的天然气体量将下降 60%，通过管道交易的天然气体量将下降 65%。2030 年代，全球天然气需求年均降幅将超过 5%，因此部分气田可能提前关闭或暂时关停。2040 年起，天然气需求的下降速度放缓，2050 年全球天然气用量中一半以上将用于在配备 CCUS 的设施中制氢。净零排放情景中，由于氢气（用电解法也可以生产）和生物甲烷的产量较大，所以气体燃料总量下降比天然气的下降更为平缓。这对燃气行业的未来有重要影响（见第 4 章）。

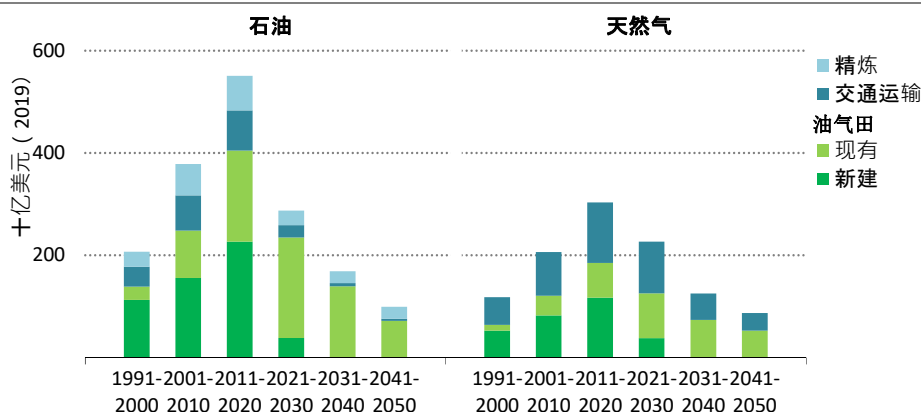
煤炭

净零排放情景中，随着煤炭需求骤减，将不需要开发新煤矿或扩建、延期现有煤矿。焦煤的需求下降速度比蒸汽煤稍慢，但现有的生产来源足以满足目前到 2050 年的需求。煤炭需求的下滑将对采煤地区的就业产生重大影响（见第 4 章）。随着越来越多的煤炭生产设施配备 CCUS，煤炭需求的下降到 2040 年代将有所放缓：净零排放情景下，2050 年生产的煤炭中将有约 80% 采用 CCUS。

3.2.2 石油和天然气投资

净零排放情景下，从 2021 年到 2030 年，上游油气年均投资额约为 3 500 亿美元（图 3.4），与 2020 年的水平相当，但比前五年的平均水平低 30% 左右。净零排放情景下，一旦开发期的油田投产，所有上游投资都将用于支持现有油田的运营；2030 年后，每年的上游投资总额将约为 1 700 亿美元。

图 3.4 ▶ 净零排放情景下，投向石油和天然气供应的投资额



国际能源署。保留所有权利。

一旦开发期的油气田投产，所有上游投资都将用于维持现有油气田的运营

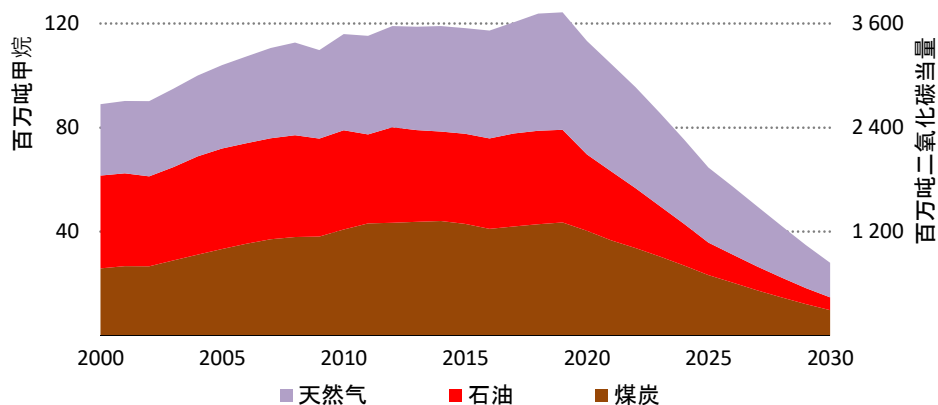
注：2021-2030 年期间对新油田的投资将投向已经在建或已经批准的项目。

3.2.3 来自化石燃料生产的排放

净零排放情景下，来自煤炭、石油和天然气供应链的排放量将急剧下降。当今，全球石油生产的平均温室气体（GHG）排放强度略低于每桶 100 千克二氧化碳当量。如果这一数值保持不变，那么全球生产中将有很大一部分无法赢利，因为二氧化碳价格适用于化石燃料的整条价值链。例如，净零排放情景中，到 2030 年发达经济体的二氧化碳价格将为每吨二氧化碳 100 美元，按照目前的平均排放强度计算，每桶石油的生产成本将增加 10 美元。

煤炭和天然气供应链以及石油供应链的排放量中，甲烷分别约占 60% 和 35%。净零排放情景下，2020 年到 2030 年间，来自化石燃料的甲烷总排放量将下降约 75%，相当于温室气体排放减少 2.5 吉吨二氧化碳当量（图 3.5）。上述降幅中，约有三分之一是由于化石燃料消费总量减少，但更大量的下降是减排措施和技术部署大幅增加的结果，到 2030 年这些措施和技术将消除所有技术上可避免的甲烷排放（IEA, 2020a）。

图 3.5 ▸ 净零排放情景下，煤炭、石油和天然气的甲烷排放量



国际能源署。保留所有权利。

*由于全球一致努力部署所有可用的减排措施和技术，
2020 年至 2030 年期间化石燃料的甲烷排放量将减少 75%*

净零排放情景中，减少现有油气作业排放强度的行动将会：结束所有的燃除做法；对集中排放源使用 CCUS（包括捕捉通常与天然气一起开采出的自然来源的二氧化碳）；以及实现上游作业大规模电气化（通常利用离网可再生能源实现）。

净零排放情景将不可避免地给化石燃料行业以及业内工作人员带来重大挑战，但也将带来机遇。在净零排放情景下，采煤业将急剧衰落，但清洁能源转型所需的矿物开采却迅速增加，在这种情况下，采矿业的专业知识可能会极具价值。在 CCUS、低碳氢、生物燃料、海上风能等清洁能源技术的大规模开发方面，油气行业可能会发挥关键的促进作用。要想扩大这些技术的规模并降低其成本，将需要大规模工程和项目的管理能力，而这类能力与大型油气企业的能力高度匹配。这些问题（包括净零排放情景下如何帮助重大变化所影响到的群体等问题）将在第 4 章中详细讨论。

3.3 低排放燃料的供应

3.3.1 净零排放情景下的能源趋势

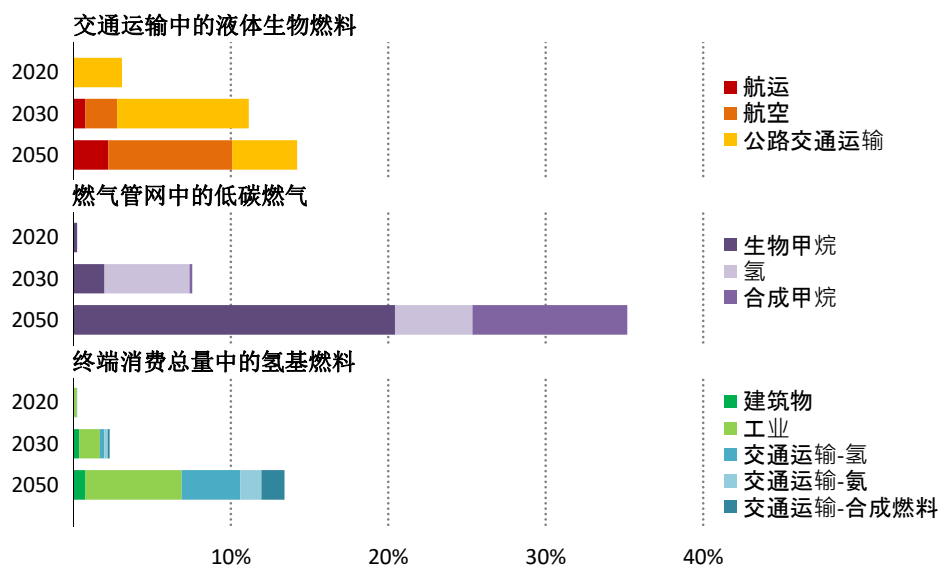
要实现净零排放，就需要在电力无法以低难度或经济的方式满足能源需求的情况下，采用低排放燃料³（图 3.6）。部分长途交通运输（卡车、航空和航运）方式以及重工

³ 低排放燃料是指液体生物燃料、沼气和生物甲烷，以及氢基燃料（氢、氨和合成碳氢化合物燃料），这些燃料在使用时不会直接排放化石燃料的任何二氧化碳，在生产时排放量也很少。例如，通过配备 CCUS、捕集率高（90%或更高）的天然气所生产的氢属于低排放燃料，但未采用 CCUS 生产出的氢则不属于低排放燃料。

业热能和原料供应很可能就是这种情况。一些低排放燃料实际上是有普适性的，也就是说，它们与现有的化石燃料配送基础设施和终端使用技术兼容，并且几乎不需要对设备或车辆进行任何改造就可以使用。

如今，低排放燃料仅占全球终端能源需求的 1%；在净零排放情景中，这一比例在 2050 年将增加到 20%。液体生物燃料将满足 2050 年全球交通运输能源需求的 14%，而 2020 年仅为 4%；到 2050 年，氢基燃料将满足交通运输能源需求的另外 28%。低碳燃气（生物甲烷、合成甲烷和氢气）将满足 2050 年全球对管网供应燃气的需求的 35%，而目前的占比接近于零。低碳氢和氢基燃料在全球终端能源使用总量中的份额之和将在 2050 年达到 13%。氢和氨还将为具备灵活性的电力系统提供重要的低排放能源，并在 2050 年贡献发电总量的 2%，这足以使电力部门成为驱动氢需求的重要力量。

图 3.6 ▶ 净零排放情景下，全球各部门低排放燃料的供应情况



国际能源署。保留所有权利。

液体生物燃料、生物甲烷、氢基燃料等形式的低排放燃料 可以帮助直接电气化有困难的部门脱碳

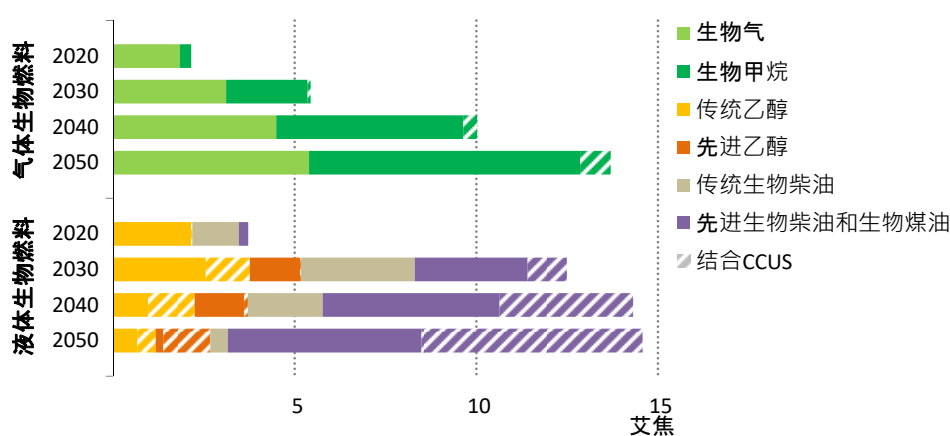
注：燃气网中的低碳气体是指在燃气网中把生物甲烷、氢气和合成甲烷与天然气混合，用于建筑物、工业、交通运输和发电。合成燃料是指由氢和二氧化碳制成的合成碳氢化合物燃料。氢的终端能耗不仅包括氢、氨和合成碳氢化合物燃料的终端能耗，也包括工业部门现场制氢的能耗。

3.3.2 生物燃料⁴

2020 年，全球现代生物能源（除了用于传统烹饪以外的生物质）的一次供应中，约有 10% 作为液体生物燃料用于公路交通运输，6% 作为生物气（沼气和生物甲烷）用于提供电力和热力，其余直接用于发电和住宅供热。在净零排放情景中，生物燃料的供应量急剧加速上升，到 2050 年液体生物燃料将增加三倍，生物气将增加五倍。

目前，交通运输用液体生物燃料主要由甘蔗、玉米、大豆等传统作物生产，只有大约 7% 以其他方式生产。传统作物直接与粮食生产争夺可耕作的土地，产出扩大程度有限。因此，净零排放情景下，大部分生物燃料的增长来自先进原料，如废弃物、残渣，以及在边角地和不适合粮食生产的耕地上种植的木质能源作物（见第 2.7.2 节）。净零排放情景中，使用木质原料的先进液体生物燃料生产技术在未来十年内将得到迅速推广，其贡献的成果在液体生物燃料中的占比将从 2020 年的不足 1% 跃升至 2030 年的近 45% 和 2050 年的 90%（图 3.7）。到 2030 年，依托生物质气化费托合成和纤维素乙醇，先进液体生物燃料日产量将达到 270 万桶油当量，主要用于生产柴油和航空煤油的普适性替代品。到 2050 年，先进液体生物燃料产量将再增加 130%，达到超过 600 万桶油当量/天，其中大部分是生物煤油。

图 3.7 ▸ 净零排放情景下，全球各类、通过不同技术生产的生物燃料的产量



国际能源署。保留所有权利。

**2020 年至 2050 年期间，依托可持续生物质供应链的发展，
液体生物燃料产量将增加三倍，生物气产量将增加五倍**

注：CCUS = 碳捕捉、利用和封存。传统乙醇是指使用粮食能源作物生产的乙醇。先进乙醇是指使用废弃物、残渣以及在边角地和非耕地上种植的非粮食能源作物生产的乙醇。传统生物柴油包括使用粮食能源作物以脂肪酸和脂肪酸甲酯（FAME）路线生产的生物柴油。先进生物柴油包括使用废弃物、残渣和在边缘和非耕地上种植的非粮食能源作物以基于生物质的费托和氢化酯和脂肪酸（HEFA）路线生产的生物柴油。生物甲烷包括沼气升级和以基于生物质气化的路线生产的甲烷。

⁴ 从生物能源中制成的液体和气体。

目前，使用上述原料的生产技术大多仍处于开发阶段。目前的产出能力（主要是纤维素乙醇）约为 2 500 桶油当量/天。净零排放情景假定，目前在日本、英国和美国开展的相关项目将在未来几年内把此类技术推向市场。在未来十年里，所需的各种先进液体生物燃料（包括由废油制成的液体生物燃料）的总增量相当于每十周要建造一座日产 5.5 万桶油当量的生物精炼厂（目前世界上最大的生物精炼厂的日产能为 2.8 万桶油当量）。

净零排放情景下，从 2030 年起，此类生物燃料的供应将从电气化日益成为主流的乘用车和轻型卡车领域，迅速转向重型公路货运、航运和航空。氨将在航运领域得到更广泛的采用。先进液体生物燃料在全球航空燃料市场上的份额将从 2030 年的 15% 增加到 2050 年的 45%。氢化酯和脂肪酸（HEFA）、费托生物燃料（bio-FT）等先进生物燃料，将能够在一定程度上调整其产品品类，从可再生柴油转为生物煤油；现有的乙醇工厂，特别是那些可以改装 CCUS 或集成纤维素原料的工厂，也将为上述变化做出贡献。

生物气供应量的增长将比液体生物燃料的还要快。注入燃气管网的生物气总量将从 2020 年的不足 1% 扩大到 2050 年的近 20%，从而降低管网燃气的排放强度。生物甲烷主要是通过厌氧消化原料（如粪便等农业残余物和城市固体生物废弃物）产生沼气并对其升级而制成的，因此可以避免甲烷排放。由于原料比较分散，我们假定每年将建造数千处的注入点以及相关配送管道。在净零排放情景中，沼气和生物甲烷也用作清洁烹饪燃料并用于发电。

在乙醇、费托生物燃料、沼气升级等一些生物燃料生产路线中，生物燃料的生产可以以相对较低的成本与 CCUS 相结合，因为生产过程释放非常纯净的二氧化碳流。净零排放情景下，到 2050 年，使用生物燃料结合 CCUS 将可以在一年内移除 0.6 吉吨的二氧化碳，这将抵消交通运输和工业部门的剩余排放量。

3.3.3 氢和氢基燃料

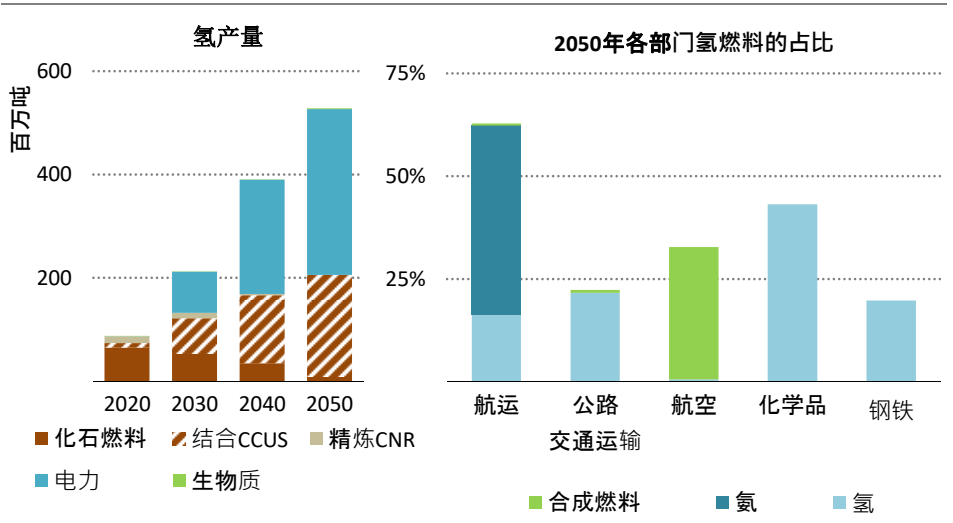
当今能源部门用氢主要局限于炼油，以及化工行业制氨和制甲醇。2020 年全球氢需求量约为 9 000 万吨，主要由化石燃料（以天然气为主）生产，排放的二氧化碳近 9 亿吨。净零排放情景下，氢的需求量和生产路线都将发生根本性变化。2050 年的需求量将增加近五倍，达到 5.3 亿吨，其中一半用于重工业（主要是钢铁和化学品生产）和交通运输部门；30% 转化为其他氢基燃料，主要包括用于航运和发电的氨、用于航空的合成煤油，以及混入燃气管网的合成甲烷；17% 用于燃气发电厂，以平衡太阳能光伏和风力发电的增加，并提供季节性储存。到 2050 年，氢基燃料总体⁵将占全球终端能源需求的 13%（图 3.8）。

现阶段，氨被用作化学工业的原料；但在净零排放情景中，氨由于具有较低的运输成本和比氢更高的能量密度，也用作不同能源应用的燃料。净零排放情景下，氨将占到 2050 年全球航运能源需求的 45% 左右。在减少现有燃煤电厂二氧化碳排放方面，氨与

⁵ 氢基燃料的定义是：氢、氨以及由氢和二氧化碳制成的合成碳氢化合物燃料。

其他燃料共燃也是一项潜在的早期选择方案。然而，由于氨具有毒性，因此很可能只有受过专业训练的操作员才能对其进行处理操作，可能会限制氨的潜力。

图 3.8 ▶ 净零排放情景下，全球使用不同燃料生产的氢的产量，以及各部门的氢需求量



国际能源署。保留所有权利。

到2050年，在水电解和天然气结合CCUS的驱动下，氢产量将剧增至目前水平的六倍，以满足航运、公路交通运输和重工业部门不断增长的需求

注：精炼 CNR = 精炼厂石脑油催化重整产生的副产品氢。

在净零排放情景中，合成煤油将满足 2050 年全球航空燃料需求的约三分之一。在燃烧生物能源的发电厂或生物燃料的生产工厂制造合成煤油，需要从大气中捕捉二氧化碳。我们可以认为这种来源的二氧化碳是碳中性的，因为它制成的燃料在使用时不会造成净排放。也有可能使用氢和二氧化碳同时生产先进液体生物燃料和合成液体燃料，这两套工艺的集成将会降低液体燃料的总体生产成本。除了合成液体燃料以外，2050 年，使用氢和二氧化碳生产的合成甲烷可以满足建筑物、工业和交通运输部门对管网供应燃气需求量的 10%。

净零排放情景下，到 2050 年制氢技术将基本全部为低碳技术：水电解将占全球氢产量的 60% 以上，而天然气结合 CCUS 将占近 40%。全球电解槽制氢能力将在 2030 年达到 850 吉瓦，2050 年达到 3 600 吉瓦，而目前只有约 0.3 吉瓦。电解用电量将接近 15 000 太瓦时，即 2050 年全球电力供应量的 20%，主要来自可再生资源（95%），但也来自核电（3%）和化石燃料结合 CCUS（2%）。2050 年，天然气结合 CCUS 制氢将消耗 9 250 亿立方米的天然气，约占全球天然气需求量的 50%，并将捕获 1.8 吉吨二氧化碳。

降低成本的关键在于扩大技术部署和相关制造能力。目前市场上已经有了水电解装置，并且使用天然气结合 CCUS 制氢已经完成了商业规模示范（全世界有七个工厂在运作）。以上两种制氢方法的选择取决于经济因素，主要是天然气和电力的成本，以及是否可以二氧化碳存储。净零排放情景下，2050 年天然气结合 CCUS 制氢的生产成本约为每千克氢气 1-2 美元，天然气成本一般占生产总成本的 15-55%。水电解方面，受益于学习效应和规模经济，净零排放情景中 2030 年的资本支出将比 2020 年低 60%。由于电力占生产总成本的 50-85%（具体因电力来源和地区而异），因此生产成本的降低将取决于低碳电力成本的降低。在净零排放情景中，使用可再生能源制氢的平均成本将从现在的 3.5-7.5 美元/千克下降到 2030 年的约 1.5-3.5 美元/千克，然后进一步下降到 2050 年的 1-2.5 美元/千克——届时基本与天然气结合 CCUS 制氢的成本持平。

如果要氢气转化为氨、合成碳氢化合物燃料等其他能源载体，则成本会更高。但转化后的燃料更便于运输和储存，而且通常还与现有基础设施或终端使用技术兼容（例如航运用氨或航空用合成煤油）。氨与氢相比，额外的合成步骤将生产成本推高了大约 15%（主要是由于额外的转化损失和设备成本）。

合成碳氢化合物燃料的成本相对较高，所以在净零排放情景中其使用在很大程度上限于替代低碳选择较少的航空领域。合成煤油的成本在 2020 年为 300-700 美元/桶；净零排放情景下，随着可再生能源发电和二氧化碳原料的成本下降，合成煤油的成本将在 2050 年降低到 130-300 美元/桶，但仍然远远高于 2050 年常规煤油 25 美元/桶的预计成本。从配备 CCUS 或直接空气捕捉（DAC）的生物能源中捕集的二氧化碳的供应是成本因素之一，在 2050 年合成碳氢化合物燃料成本中占到 15-70 美元/桶。要想缩小上述成本差距，就要求对化石煤油采取惩罚性措施，或对合成煤油采取支持性措施（对应的二氧化碳价格为 250-400 美元/吨）。

净零排放情景下，全球对低碳氢的需求量不断增加，将为各国创造出口可再生电力资源的机会。例如，智利和澳大利亚在各自的国家氢能战略中已宣布要成为氢气主要出口国的雄心。在净零排放情景中，随着天然气需求量下降，产气国可以使用天然气结合 CCUS 制氢并出口，参与氢气市场。然而，由于氢气的能量密度低，所以长距离运输难度大、成本高，长途运输可能会使氢气价格增加约 1-3 美元/千克。这意味着在一些国家的国情下，虽然国内低碳电或天然气结合 CCUS 的生产成本相对较高，但国内制氢的成本仍然低于进口氢气的成本。尽管如此，在净零排放情景中国际贸易的重要性依然将会不断提高：2050 年，全球将有约一半的氨和三分之一的合成液体燃料参与贸易。

3.3.4 关键里程碑和决策点

表 3.1 ▸ 低排放燃料转型的关键里程碑

部门	2020	2030	2050
生物能源			
现代生物能源中现代生物燃料的占比（不包括转化损失）	20%	45%	48%
先进液体生物燃料（百万桶油当量/天）	0.1	2.7	6.2
整体燃气管网中生物甲烷的占比	<1%	2%	20%
从生物燃料生产中捕捉和储存的二氧化碳（百万吨二氧化碳）	1	150	625
氢			
产量（百万吨氢）	87	212	528
其中：低碳（百万吨氢）	9	150	520
电解产能（吉瓦）	<1	850	3 585
氢气相关生产的电力需求（太瓦时）	1	3 850	14 500
从氢气生产中捕获的二氧化碳（百万吨二氧化碳）	135	680	1 800
氢和氨贸易用的港口中转站的数量	0	60	150

生物燃料

在不同地区，现已有一些考虑到生命周期温室气体净排放和其他可持续性指标的可持续性框架，例如欧盟的《可再生能源指令 II》、巴西的《国家生物燃料政策》（RenovaBio）和美国加州的《低碳燃料标准》。然而，这些框架的范围、方法和可持续性衡量标准不尽相同。未来几年内，就可持续性框架和指标达成全球共识将有助于刺激投资，应作为优先事项。此类框架应涵盖各种形式的生物能源（液体、气体和固体）和其他低排放燃料，并应努力持续改善环境绩效。理想情况下，应同步制定认证制度。

另一早期优先事项是：各国政府尽快评估本国可持续生物质原料的潜力，以确定废弃物、残渣和适合在边角地种植的能源作物的数量和类型。评估应作为制定生物燃料国家路线图（涵盖各种液体和气体生物燃料）以及低排放燃料战略的基础。在这种情况下，需要尽早决定如何支持废弃物和残渣的可持续收集，这将涉及林业、农业、畜牧业、食品业，以及先进的城市固体废弃物分类系统：净零排放情景中，支持措施将在 2025 年前到位。有效支持措施可以包括激励使用生物燃料作为原料的低排放燃料标准。在国际层面共享知识将有助于此类措施的设计，并协助已有收集系统的地区将其最佳做法进行高效传播，例如北欧国家的林业残渣，以及欧洲、中国和东南亚国家的废弃食用油收集。

各国政府还需要决定如何最好地支持沼气装置和配送，以便在 2030 年前淘汰传统生物质烹饪和加热的做法。此类做法在一些发展中国家仍然很普遍。这个问题最好通过更广泛的计划与其他问题一道解决，在提倡清洁烹饪的同时，增加电力和液化石油气的普及度。

到 2025 年，还需要决定如何以最佳方式开创可持续生物燃料市场、并且缩小生物燃料与化石燃料的成本差距。相应措施将需要激励先进液体生物燃料技术在终端用能部门（特别是重型卡车、航运和航空）得到快速开发和部署，具体机制可以包括低碳燃料标准、生物燃料要求、二氧化碳移除信用额等等。未来四年间，可以促进先进生物燃料生产规模扩大的措施包括：激励现有炼油厂既加工石油也加工生物油，或将炼油厂完全转变为生物加工厂；对乙醇工厂进行 CCUS 改造；以及对纤维素乙醇生产和现有乙醇工厂进行集成。

将需要新建基础设施，以便能向燃气管网注入更多生物甲烷，并运输、储存从乙醇厂和费托生物燃料厂捕获的二氧化碳。各国政府应优先考虑在 2030 年前对沼气升级设施和生物甲烷注入点进行联合开发，并确保对尽量减少供应链的散逸性生物甲烷排放予以特别关注。在生物质供应允许的情况下，政府可能会认为有必要鼓励将配备 CCUS 的生物燃料工厂部署在计划实施综合 CCUS 项目的现有工业枢纽附近，如英国的亨伯地区。

氢基燃料

当务之急应是政府对发展低碳氢产业的机会和挑战进行评估，将其纳入国家氢战略或路线图。将需要决定是在国内通过低碳电力水电解制氢、通过燃气结合 CCUS 制氢、或两者皆用，还是依赖进口的氢基燃料。沿着氢供应链建立技术领导地位，有助于创造就业机会、刺激经济增长。

在未来十年里，将需要决定降低低碳制氢成本的最佳方式。在已有大量氢需求的应用中推动低碳制氢的一种可能方式是：替换工业和炼油业中现有氢生产使用的燃料，以低碳氢取代无减排措施的化石燃料。差价合约等金融支持工具，可以帮助弥补目前低碳氢生产与现存无减排措施化石燃料生产之间的成本差距。

还需要决定扩大氢规模的最佳方式。工业港口可能是一个很好的起点，因为它们可以获得海上风电或二氧化碳储存等形式的低碳氢气供应。工业港口还提供机会促进港口相关的氢能新用途，例如航运和运货卡车，并且可能成为国际氢贸易网络的最早一批节点。要进行氢贸易，就需要制定方法来确定不同制氢路线的碳足迹，并落实来源保证和低碳氢（和氢基燃料）认证制度。

扩大低碳氢生产规模、触发成本降低的另一个早期途径是：将氢气混入现有的燃气管网。有益的配套措施包括对安全标准进行国际协调、对燃气网络中氢气的允许浓度制定国家法规，以及采用氢混入配额或低排放燃料标准。

在技术可行、天然气需求下降的情况下，对现有燃气管道进行再利用，将氢气运输连接到大型氢需求中心，可以带来成本低、成效高的机会，为推动氢气新基础设施的开发提供原动力。以净零排放情景所要求的速度开发氢基础设施，将涉及价值链上生产、运输、需求等环节的大量投资风险，包括制氢技术、低排放发电和二氧化碳的运输和储存。政府和地方当局可以协调各利益攸关方的规划进程，发挥重要作用；直接公共投资或政府和社会资本合作有助于开发必要的氢能共享基础设施；国际合作和跨境举措可以帮助分担投资负担和风险，从而促进大规模部署（欧盟共同利益重点项目就是一个例子）。

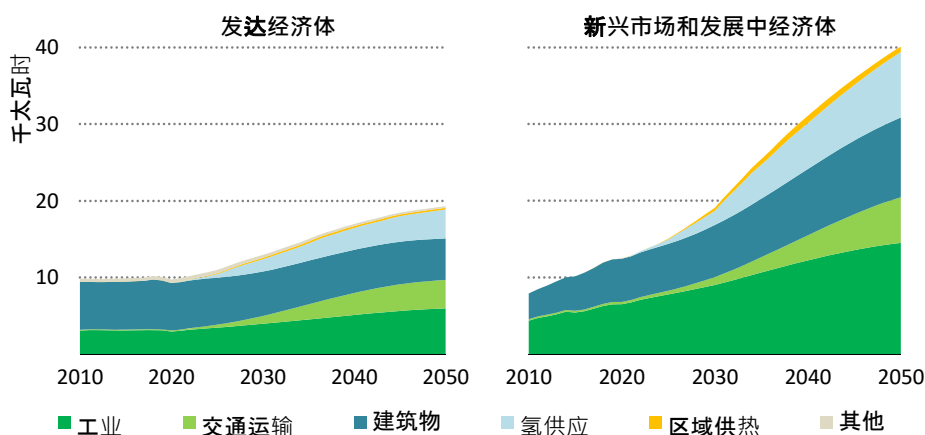
3.4 电力部门

3.4.1 净零排放情景下的能源和排放趋势

净零排放情景下，经济活动增加、终端使用快速电气化以及电解制氢扩大，将导致电力需求显著增加，同时，电力生产方式将发生根本性转变。2020 年，全球电力需求量为 23 230 太瓦时，此前十年的年均增速为 2.3%。在净零排放情景中，电力需求将在 2050 年攀升到 60 000 太瓦时，年均增速达到 3.2%。

从现在到 2050 年的全球电力需求增量中，将有 75%来自新兴市场和发展中经济体（图 3.9）。在人口不断增长、收入和生活水准不断提高以及与脱碳有关的新需求来源等因素的驱动下，新兴市场和发展中经济体的电力需求到 2030 年将增加一半，到 2050 年将增加两倍。在发达经济体中，电力需求在经历了长达十年的疲软期之后恢复增长，将在 2020 年至 2050 年之间几乎翻一番，这主要是由终端使用电气化和制氢驱动的。

图 3.9 ▶ 净零排放情景下，不同部门和区域组的电力需求



国际能源署。保留所有权利。

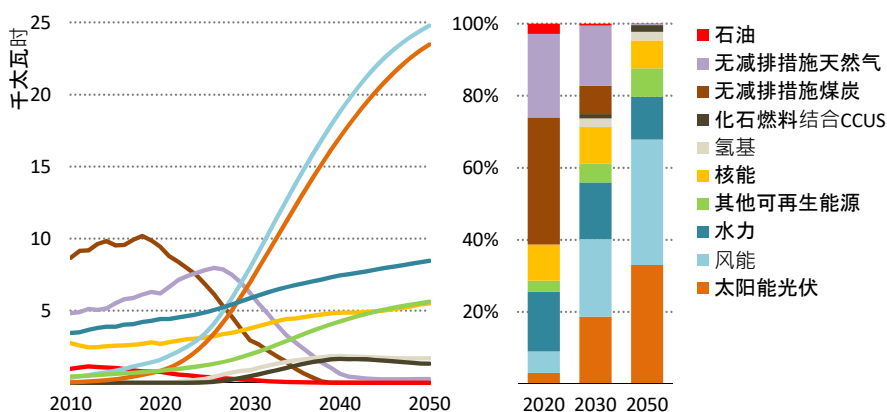
*终端使用的电气化和制氢将推高全球的电力需求，
进一步推动新兴市场和发展中经济体的服务范围扩大*

电力部门转型是 2050 年实现净零排放的核心。发电是当今与能源相关二氧化碳排放的最大来源，占能源相关排放总量的 36%。2020 年全球发电产生的二氧化碳排放总量为 12.3 吉吨，其中燃煤发电为 9.1 吉吨，燃气电厂为 2.7 吉吨，燃油电厂为 0.6 吉吨。净零排放情景中，发达经济体以及新兴市场和发展中经济体发电产生的二氧化碳排放总量将分别于 2030 年代和 2040 年左右下降到零。

在净零排放情景下，可再生能源对电力脱碳的贡献最大：全球可再生能源发电量到 2030 年将几乎增加两倍，到 2050 年增加七倍（图 3.10）。可再生能源在电力总产出

中的占比将从 2020 年的 29% 提高到 2030 年的 60% 以上，并进一步提高到 2050 年的近 90%。太阳能光伏和风能将引领增长，在 2030 年之前成为全球电力的主要来源：到 2050 年，二者各自的发电量将超过 23 000 太瓦时，相当于 2020 年世界发电总量的 90% 左右。2020 年代后期，为提高电力系统的灵活性并维持电力安全，太阳能光伏和风能发电配备电池储能系统将成为常态，同时辅以需求响应以实现短期的灵活性，并通过水力或氢能发电实现连续多日甚至多个季节的灵活性。水电是目前最大的低碳电力来源，在净零排放情景中，水电将稳步增长，到 2050 年翻一番。生物能发电（包括生物能发电厂发电和通过燃气管网输送的生物甲烷发电）到 2030 年将翻一番，到 2050 年将增加近四倍。

图 3.10 ▶ 净零排放情景下，全球不同来源的发电量



国际能源署。保留所有权利。

太阳能和风能引领发展，使可再生能源在发电总量中的占比从 2020 年的 29% 提高到 2050 年的近 90%，与核电、氢能和 CCUS 相辅相成

净零排放情景下，核能也将做出重大贡献，核能产出到 2030 年将稳步上升 40%，到 2050 年翻一番；不过，核能在 2050 年的发电总量中的份额低于 10%。全球核电新装机将在 2030 年代初达到每年 30 吉瓦的高峰，是过去十年增速的五倍。在发达经济体中，许多国家都在寻求延长现有反应堆的寿命，因为这些反应堆是最具成本效益的低碳电力来源之一（IEA, 2019），而新建反应堆的装机容量在 2021 年到 2035 年间的年均增幅将达到约 4.5 吉瓦，并且重点逐渐转向小型模块化反应堆。虽然做出了这些努力，但是发达经济体的核电占发电总量的占比将从 2020 年的 18% 下降到 2050 年的 10%。净零排放情景下，三分之二的新增核电装机是在新兴市场和发展中经济体中建造的，以大型反应堆为主，这些国家的反应堆总量到 2050 年将翻两番。这些国家的核电在发电总量中的占比将从 2020 年的 5% 提高到 2050 年的 7%，而且核电在 2050 年将满足 4% 的商业热力需求。

近年来，核能技术取得了进步，若干带有强化安全功能的首创式大型反应堆已完成了建设。虽然在中国、俄罗斯和阿联酋的核电项目按期完成，但在欧洲和美国却出现了

大量延误和成本超支。小型模块化反应堆和其他先进反应堆设计正在走向全面示范期，具有可扩展的设计、较低的前期成本，并有潜力提高核能在运营和产出（例如电力、热力或氢）方面的灵活性。

在燃煤或燃气电厂中进行 CCUS 改造或采用氢基燃料共燃，将使现有资产能够为转型做出贡献，在减排的同时维持电力安全。最适合 CCUS 的机会存在于有空间可用于增设捕集设备的年轻大型设施，以及具有二氧化碳储存方案或使用需求的地点。机会主要集中在中国的燃煤电厂和美国的燃气产能。净零排放情景下，虽然燃煤和燃气电厂在 2030 年至 2050 年期间将仅提供发电总量的 2%，但此类电厂改造后在此期间的二氧化碳排放捕获量将高达 15 吉吨。

碳捕捉技术仍然处于商业化的早期阶段。近五年来，有两座商业化发电厂配备了 CCUS，目前全球有 18 个 CCUS 发电项目处于开发阶段。CCUS 进一步扩大的关键在于开发项目按时完成，以及通过实践中学习的方式降低成本。CCUS 技术的一种替代方案是改造现有燃煤和燃气发电厂，使其能够使用高比例氢基燃料共燃。在净零排放情景中，2030 年氢基燃料发电量将达到 900 太瓦时，2050 年达到 1 700 太瓦时（这两年都占全球发电量的 2.5% 左右）。一个氨共燃率达 20% 的大规模（1 吉瓦）示范项目于 2021 年开展，目的是最终转向纯氢燃烧。制造商已经发出信号，未来的燃气轮机设计将能够共燃高比例的氢。虽然共燃氢基燃料所需的投资额看起来并不高，但燃料成本相对较高，因此目标应用旨在支持电力系统的稳定性和灵活性，而不是大宗电力。

净零排放情景下，用于发电的无减排措施的化石燃料将在全球范围内急剧减少。未采用减排措施的燃煤发电到 2030 年将减少 70%，包括发达经济体淘汰的无减排措施煤炭发电，到 2040 年将在所有其他地区被淘汰。大规模的燃油发电将在 2030 年代被淘汰。不配备碳捕捉的天然气的发电量将在近期上升并取代煤炭，但将从 2030 年开始下降，到 2040 年将比 2020 年少 90%。

电力部门将是最早实现净零排放的部门，主要原因包括成本低、政策支持广泛，以及一系列成熟的可再生能源技术。首先是太阳能光伏：它是大多数市场上最便宜的电力新来源，并在 130 多个国家有政策支持。陆上风电也是一种成熟、商业化的低成本技术，有着广泛支持，并且可以迅速扩大规模；在条件好的地区，其成本较低，与太阳能光伏发电成本相当；不过，陆上风电在一些市场中面临着公众反对、许可和牌照手续繁多等问题。海上风电技术近几年来已经迅速发展成熟，预计可在短期内加速部署。目前以底部固定式装置为主，但在净零排放情景中，从 2030 年左右开始浮式海上风电将做出重大贡献，帮助释放世界各地存在的巨大潜力。水力、生物能和地热能都是成熟且灵活的可再生能源。它们作为可调度的发电方案，将是确保电力安全的关键，可以与电池相互补充（电池成本已急剧降低），已被证明有能力提供高价值的电网服务，并且在大多数地方都可以在几个月内建成。聚光太阳能和海洋能相对不太成熟，但在创新的推动下，长期内或许可以做出重要贡献。

3.4.2 关键里程碑和决策点

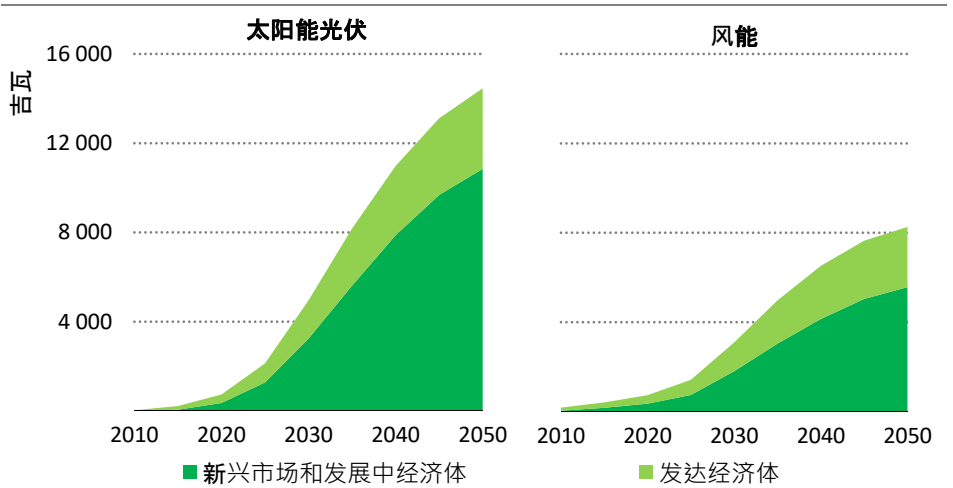
表 3.2 ▸ 全球发电转型的关键里程碑

类别			
电力部门脱碳	- 所有发达经济体：2035。 - 新兴市场和发展中经济体：2040。		
氢基燃料	2025 年之前开始对燃煤电厂进行氢共燃改造，并对燃气轮机进行氢共燃改造。		
无减排措施的化石燃料	2030 年之前淘汰所有亚临界燃煤电厂（现有 870 吉瓦，在建 14 吉瓦）。 2040 年之前淘汰所有无减排措施的燃煤电厂。 2030 年代淘汰大型燃油电厂。 - 无减排措施的天然气发电将在 2030 年达到顶峰，到 2040 年减少 90%。		
类别	2020	2030	2050
发电总量（太瓦时）	26 800	37 300	71 200
可再生能源			
装机容量（吉瓦）	2 990	10 300	26 600
在发电总量中的占比	29%	61%	88%
太阳能光伏和风能在发电总量中的占比	9%	40%	68%
碳捕捉、利用和封存（CCUS）发电量（太瓦时）			
配备 CCUS 的煤炭和燃气电厂	4	460	1 330
配备 CCUS 的生物能电厂	0	130	840
氢和氨			
全球燃煤发电的平均混合比例（不含 CCUS）	0%	3%	100%
全球燃气发电的平均混合比例（不含 CCUS）	0%	9%	85%
无减排措施的化石燃料			
无减排措施的煤炭在发电总量中的占比	35%	8%	0.0%
无减排措施的天然气在发电总量中的占比	23%	17%	0.4%
核电			
2016-20	2021-30	2031-50	
年均新增装机（吉瓦）	7	17	24
基础设施			
电网投资额（十亿美元）（2019 年）	260	820	800
变电站装机（吉伏安）	55 900	113 000	290 400
电池储能（吉瓦）	18	590	3 100
电动车公共充电装置（吉瓦）	46	1 780	12 400

要实现净零排放情景中设想的电力部门转型，就要对所有低排放燃料和技术进行大量增容。全球可再生能源产能到 2030 年将增加两倍以上，到 2050 年增加八倍。这意味着 2030 年到 2050 年间年均增加超过 600 吉瓦的太阳能光伏发电装机、340 吉瓦的风能发电装机（包括替换）（图 3.11），同时，海上风电的重要性将随时间推移而不断增加（占 2021 年到 2050 年间风电总增量的 20% 以上，而 2020 年只占 7%）。电力部

门每年部署的电池容量需要同步扩大，从2019年的3吉瓦增加到2030年的120吉瓦，2040年超过240吉瓦。还需要对现有燃煤和燃气电厂进行改造。

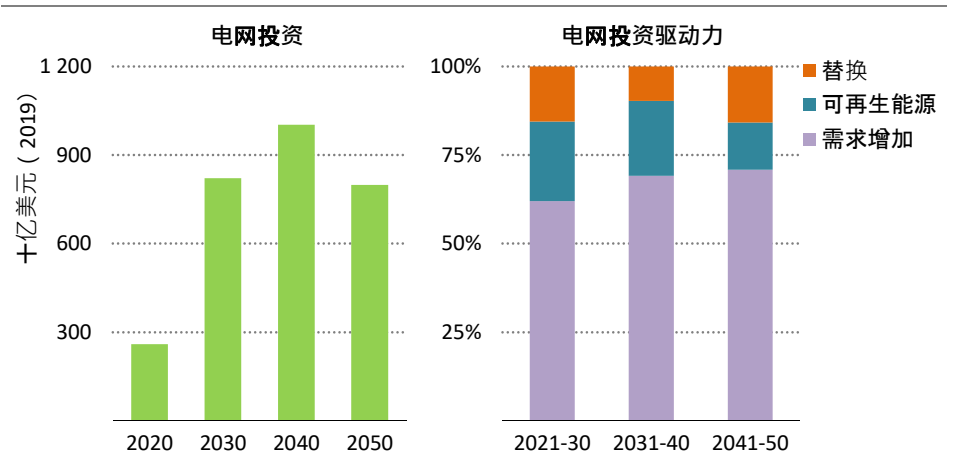
图 3.11 ▶ 净零排放情景下，太阳能光伏和风能装机容量



国际能源署。保留所有权利。

太阳能光伏和风能需要迅速扩大规模以实现电力脱碳，
到2050年，总装机容量将分别增加19倍和10倍

图 3.12 ▶ 净零排放情景下，全球的电力网络投资



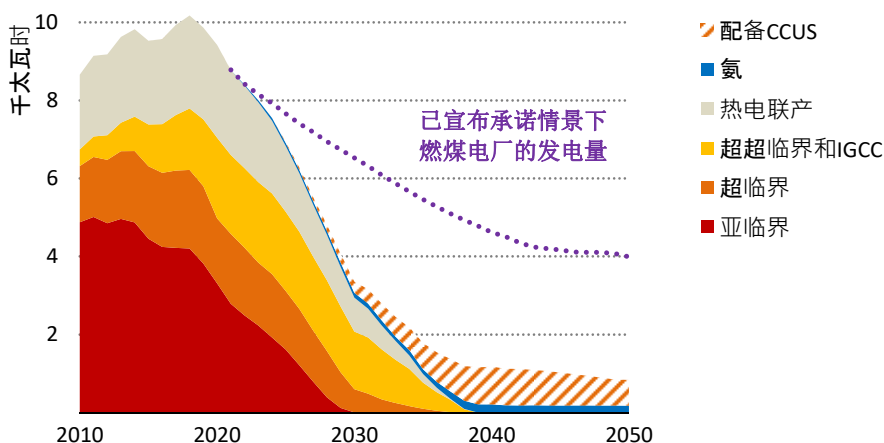
国际能源署。保留所有权利。

电网投资额到2030年将增加两倍，并在2050年前持续保持在高位，
投资将用于满足新需求、更换老旧基础设施以及集成更多可再生能源

电网投资将是实现转型的关键。过去 130 多年来建成的全球电网的总长度到 2040 年需要增加一倍以上，到 2050 年需要再增加 25%。电网总投资到 2030 年和 2040 年分别需要增加到 8 200 亿美元和 1 万亿美元，然后，当电力完全脱碳、可再生能源增长随需求增长相应放缓后，电网总投资才会回落（图 3.12）。在净零排放情景中，目前到 2050 年电网投资的重要作用之一是更换老旧基础设施。

如果要遵循净零排放情景中设想的到 2050 年实现净零排放的路径，政府将面临电力方面的几项关键决策，特别是关于如何最好地利用现有电厂。在燃煤或燃气产能的改造方面，无论是碳捕捉还是与氢基燃料共燃（或完全转用氢基燃料），都需要在 2030 年之前做出决定，这样才能在无减排措施的电厂广泛退役之前推动首批改造项目。对于其他化石燃料发电厂，则需要做出逐步淘汰的决定。应在 2040 年前完全淘汰燃煤电厂（除非对其进行改造），在 2030 年前首先淘汰效率最低的煤电厂（图 3.13）。需要关停 870 吉瓦的全球现有亚临界煤炭产能（占电力总产能的 11%），并开展国际合作以促进替代方案的发展。到 2040 年，应淘汰所有大规模的燃油电厂。到 2050 年，天然气发电仍将是电力供应的一支重要力量，但需要政府提供大力支持，以确保 CCUS 很快得到大规模部署。

图 3.13 ▶ 净零排放情景下，各类燃煤发电技术的发电量



国际能源署。保留所有权利。

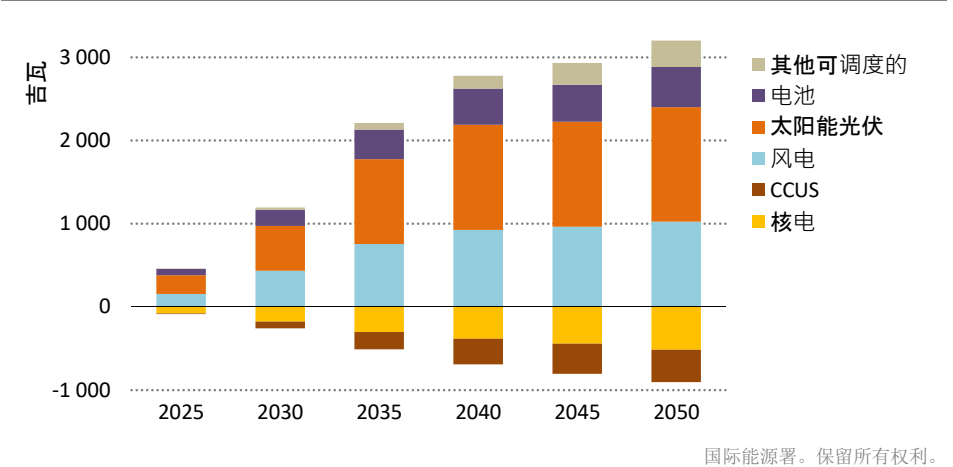
2020 年，燃煤发电占全球能源二氧化碳排放量的 27%；净零排放情景下，亚临界电厂将在 2030 年前被全部淘汰，未配备 CCUS 的电厂将在 2040 年前被全部淘汰

注：IGCC = 整体煤气化联合循环。氢包括燃煤电厂共燃氢和完全转用氢。

政府尽早采取行动，助推一些能够提供电力系统灵活性的技术完成示范阶段并走向市场，将有助于促进净零排放路径进展。扩大储能技术的种类，以作为电池的补充并解决新出现的长时间季节性储能需求，将会非常有价值。支持太阳能和风能占比较高的电网稳定性的技术解决方案，也将受益于研发支持。

核电方面，需要就三方面做出重要决策：延长寿命、新建速度，以及核电技术进展。在发达经济体中，如果不采取行动延长核电站的寿命并做出必要的投资，那么就需要就新建核电站和未来十年可能退役的大量核电站做出决策。发达经济体若不进一步延长核电站的使用寿命，也不在建项目之外增建新的核电站，则其核电产出将在未来二十年内减少三分之二（IEA, 2019）。新兴市场和发展中经济体需要就新核电站的建设速度做出决定。从 2011 年到 2020 年，平均每年有 6 吉瓦的新核电装机上线。净零排放情景下，到 2030 年新建速度将增加到每年 24 吉瓦。第三方面的决定涉及政府对先进核技术的支持力度，特别是对小型模块化反应堆和高温气体反应堆相关技术的支持力度，这两种技术可以将核能市场扩大到电力以外的其他领域。

图 3.14 ▶ 低核低 CCUS 情景下，全球所需的额外替代发电能力



如果核电和碳捕捉发挥的作用骤减，则需要太阳能光伏和风能增速加快，
这将使净零目标的成本更高，实现的可能性更小

注：低核低 CCUS 情景假设：由于发达经济体既不额外延长核电站寿命也不新建核电项目，新兴市场和发展中经济体不加快目前的建设速度，并且配备 CCUS 的燃煤和燃气发电产能比净零排放情景低 99%，因此造成 2050 年全球核电产出比净零排放情景低约 60%。

如果不及早在核电和 CCUS 方面做出决策，净零排放路径的成本将会更高，而且风能和太阳能需要比净零排放情景下更快地扩张，增长负担将会加重；这样将会推高无法实现净零排放目标的风险（图 3.14）。在低核低 CCUS 情景中，我们假设：由于发达经济体既不额外延长核电站寿命也不新建核电项目，新兴市场和发展中经济体不加快目前的建设速度，并且完工的 CCUS 项目仅限于那些已宣布的 CCUS 项目（占净零排放情景中 CCUS 产能增量的 1%），因此造成 2050 年全球核电产出比净零排放情景下低 60%。

我们的分析表明，取代上述低碳发电来源的负担将主要落在太阳能光伏和风力发电领域，太阳能光伏和风能的装机容量需要比净零排放情景下多出 2 400 吉瓦——这一数字远远超过了 2020 年运营中的太阳能光伏和风能全球总装机（图 3.14）。此外，低核低 CCUS 情景下，需要在净零排放情景下部署的 3 100 吉瓦之外，再部署约 480 吉瓦

的电池容量，外加超过 300 吉瓦的其他可调度容量，才能满足所有季节的需求并确保系统的充足性。这将要求对发电厂和相关电网资产增加 2 万亿美元的投资（扣除核电和 CCUS 的较低投资额）。2021 年至 2050 年间，预计消费者的额外电力成本总计将高达 2 600 亿美元（已将避免的燃料成本考虑在内）。

3.5 工业

3.5.1 净零排放情景下的能源和排放趋势

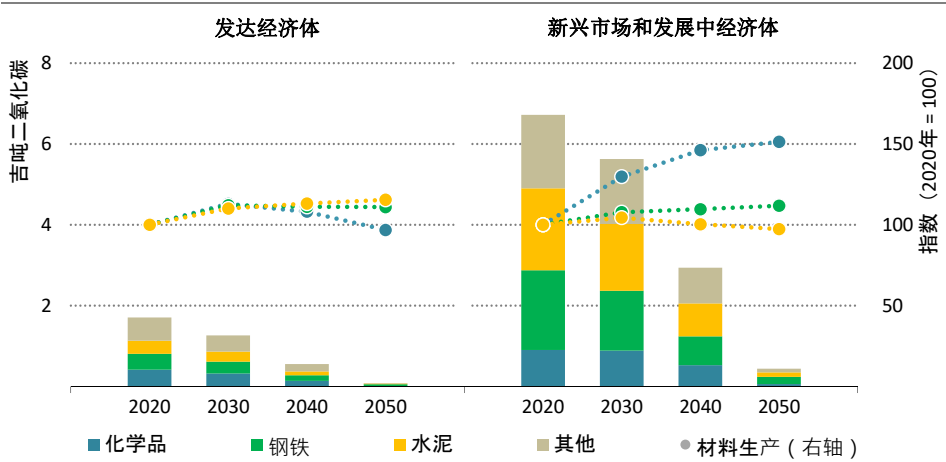
工业作为全球能源部门二氧化碳排放的第二大来源，在实现净零目标方面作用重大。工业二氧化碳排放⁶（包括能源使用和生产过程）在 2020 年总计约 8.4 吉吨。其中发达经济体约占 20%，新兴市场和发展中经济体约占 80%；不过，由于全球材料生产供应链以及制造供应链十分复杂，所以发达经济体消费的成品通常远远多于其生产的成品。

化工、钢铁和水泥这三个重工业行业占工业能耗总量的近 60%，占工业部门二氧化碳排放量的约 70%。新兴市场和发展中经济体集中了这些行业的很大一部分生产活动，产量占这些行业商品总产量的 70-90%（图 3.15）。2020 年，仅中国就生产了钢铁和水泥总产量中的近 60%。这些大宗材料是我们现代生活方式的基本原料，几乎没有成本竞争力较高的替代品；所以挑战在于：在继续生产这些材料的同时，不排放二氧化碳。

净零排放情景下，全球材料需求的前景平稳，将有小幅增长。这与过去 20 年的情况形成了鲜明的对比：那一段时间内，随着全球经济和人口增长，全球钢铁需求增加了 1.1 倍，水泥增加了 1.4 倍，塑料（化学部门的一组关键材料产出）增加了 0.9 倍。当经济处于发展期时，人均材料需求一般会迅速增长，用于增加商品和基础设施的存量。随着经济走向成熟，未来的需求主要是为了整修和替换存量，而存量往往已达到饱和状态。净零排放情景下，世界上许多国家的需求将趋于平缓甚至出现下降，导致全球需求增长放缓。印度等一些国家的钢铁和水泥产量增幅较大，而中国的产量在千禧年后随工业繁荣期的变化而大幅下降。

⁶ 除非另有说明，本节中的二氧化碳排放都是指工业部门的直接二氧化碳排放。

图 3.15 ▶ 净零排放情景下，不同工业细分部门的全球二氧化碳排放量



国际能源署。保留所有权利。

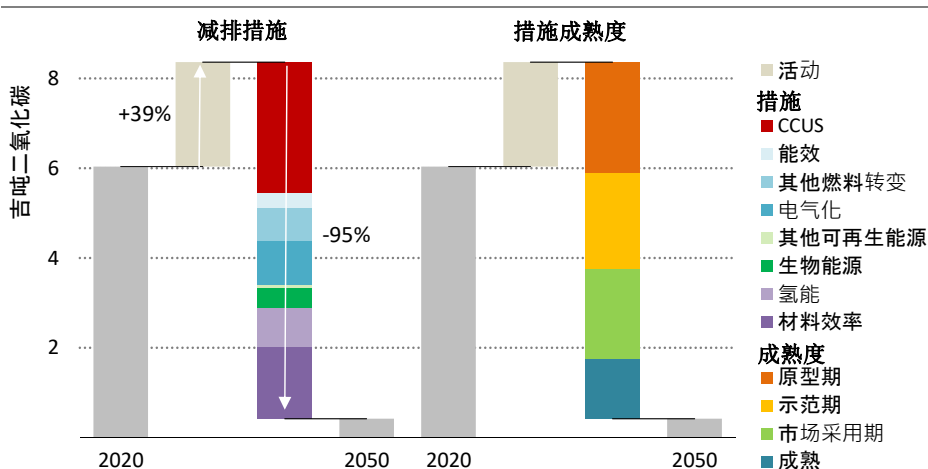
**2050 年，工业部门的大部分剩余排放将来自于
新兴市场和发展中经济体的重工业**

注：“其他”包括铝材、纸、其他非金属矿物和其他有色金属的生产，以及一系列轻工业。

净零排放情景下，材料总需求中的某些部分将迅速增长，以支持能源相关基础设施的必要发展，特别是可再生能源发电和交通运输基础设施。到 2050 年，仅这两个领域所需的额外基础设施（与现在相比）就将占届时钢铁总需求的约 10%。但是，协调的跨部门战略，包括交通运输方式转变和建筑物翻新，以及设计、制造方法、施工实践和消费行为等其他变化，将足以抵消上述增长。总体而言，2050 年全球钢铁需求将比现在高 12%，初级化学品需求高 30%，水泥需求大致持平。

在净零排放情景中，重工业的二氧化碳排放量到 2030 年将下降 20%，到 2050 年将下降 93%。这主要是由于设备的运行效率得到优化、新增产能采用最佳的技术，以及提高材料效率的措施得到采用。然而，这些措施能减少的排放量是有限的。净零排放情景下，2050 年几乎 60% 的减排量是通过利用目前尚处于开发阶段（大规模原型或示范规模）的技术实现的（图 3.16）。

图 3.16 ▶ 净零排放情景下，全球重工业二氧化碳排放量，以及不同减排措施和不同成熟度技术的减排量



国际能源署。保留所有权利。

一系列措施将减少重工业的排放，
CCUS 和氢能等创新技术在其中发挥关键作用

净零排放情景下，2050 年氢能和 CCUS 技术将贡献约 50% 的重工业减排量。这两类技术使提供大量的高温热力得以实现（在许多情况下，不容易通过目前的技术采用电力来提供大量的高温热力），并有助于减少在有些工业生产固有的化学反应的过程排放。生物能源也将在广泛的工业应用中做出贡献。

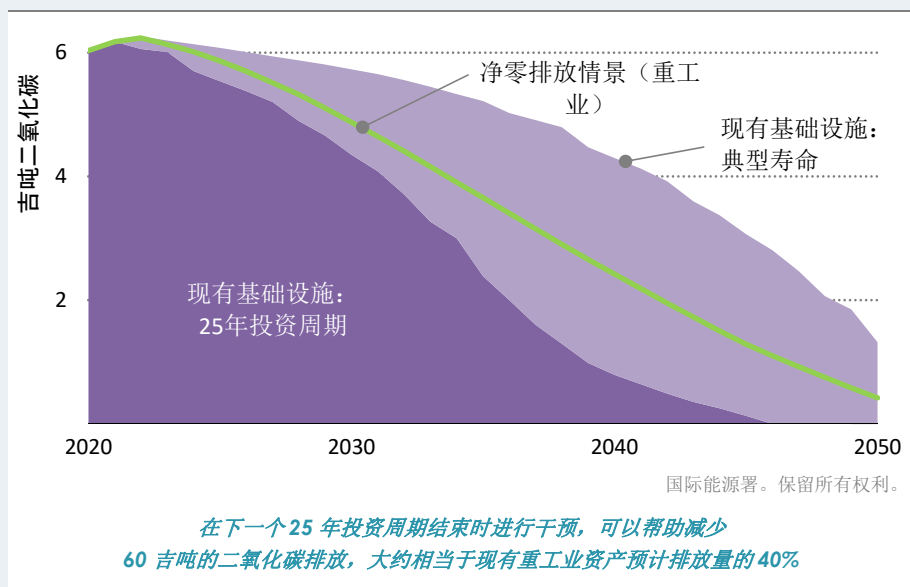
重工业的减排速度之所以比能源系统中其他领域的减排速度更慢，除了对高温热力和过程排放的需求外，还有两个其他原因。首先，许多工业材料和产品可以很容易地在全球范围内进行贸易，这意味着市场竞争激烈，利润率低。因此，因采用更昂贵的生产路线而额外增加的成本将无法被市场吸收。可以通过制定强有力的全球合作和技术转让框架或国内解决方案，来为相关技术创造公平的竞争环境，但这样做需要时间。其次，重工业使用资本密集型的长寿命设备，这将减缓创新低排放技术的部署步伐。从现在到 2030 年间增加的产能（即在创新工艺大规模推广之前增加的产能）在很大程度上将造成 2050 年工业排放持续存在，这些排放中有 80% 以上都发生在新兴市场和发展中经济体。对低碳技术投资做出战略性的时间安排，有助于尽可能减少提前退役的需要（专栏 3.1）。

专栏 3.1 ▸ 重工业的投资周期

重工业距离 2050 年只有一个投资周期之遥。高炉、水泥窑等排放密集型资产的平均寿命约为 40 年。不过，在资产运行约 25 年后，工厂通常会对其进行重大整修，以延长资产寿命。

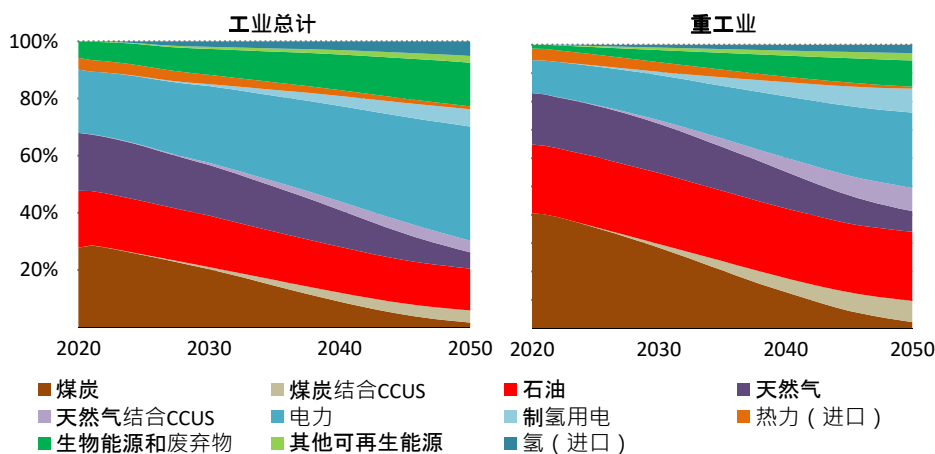
挑战在于：确保目前处于大规模原型和示范阶段的创新近零排放工业技术在未来十年内进入市场，届时现有资产中约有 30% 将达 25 年的年限，面临投资决策。如果相关创新技术没有准备好，或者准备好了但却没有使用，将对减排步伐产生重大的负面影响，或者将有可能导致更多资产搁浅（图 3.17）。相反，如果相关技术准备好了，并且现有工厂在 25 年厂龄的投资决策点上得到改造或替换，将可以使现有重工业资产到 2050 年的预计累积排放量减少约 40%。从现在到 2030 年是一个关键的机会窗口，不容错过。

图 3.17 ▸ 净零排放情景下，现有重工业资产的二氧化碳排放量



在净零排放情景中，工业的能源结构将发生根本性变化。化石燃料在工业用能总量中的占比将从现在的约 70% 下降到 2050 年的 30%。届时仍在使用的化石燃料绝大部分用于重工业，主要是用作化学原料（50%）或用于配备 CCUS 的工厂（约 30%）。在工业能源需求增长中，电力将是主要燃料，在工业能耗总量中的份额将从 2020 年的 20% 上升到 2050 年的 45%。这部分电力中约有 15% 用于制氢。生物能源将发挥重要作用，2050 年将占工业用能总量的 15%，但可持续的生物能源供应是有限的，而且电力和交通运输部门对它的需求量也很大。可再生太阳能和地热技术在供热方面的贡献较小，但增长迅速（图 3.18）。

图 3.18 ▶ 净零排放情景下，不同燃料在工业部门的全球终端能源需求



国际能源署。保留所有权利。

到2050年，工业部门的化石燃料用量将减少一半，主要由电力和生物能源取代

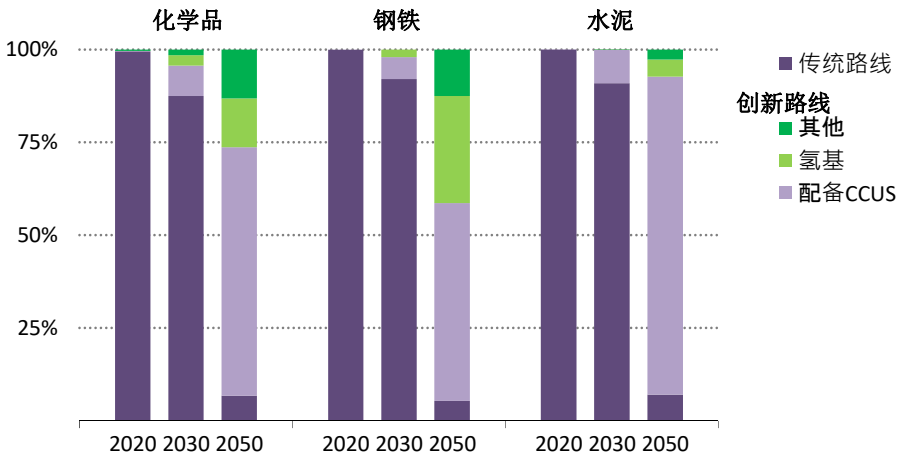
注：工业能耗包括化学原料以及高炉和焦炉消耗的能源。氢指的是进口氢，不包括自产自用的氢。氢用电是指通过电解生产自用氢时使用的电力。

化学制品生产

在净零排放情景中，化学品细分部门的排放量将从2020年的1.3吉吨下降到2030年的1.2吉吨，再下降到2050年的6500万吨左右。化石燃料在化学品生产用能总量中的占比将从2020年的83%（以石油和天然气为主），下降到2030年的76%和2050年的61%。净零排放情景下，到2050年，石油将仍然是初级化学品生产中使用量最大的燃料，燃气和煤炭也有使用，但用量较小。

净零排放情景中，目前市场上可用的技术将贡献目前到2030年期间全球化工行业减排量的近80%。这些技术包括塑料回收和再利用、氮肥使用效率提高，以及能效提高措施；其中前两者将会减少对初级化学品的需求。2030年以后，大部分减排量将来自于目前正在开发集成用于化学工艺的技术，包括某些CCUS应用和直接利用可变可再生电力的电解制氢技术（图3.19）。在能够获得低成本天然气的地区，配备CCUS的传统路线和裂解技术将最具竞争力，而在因缺乏基础设施或公众接受度而导致CCUS部署阻力大的地区，电解将是更受欢迎的方案。

图 3.19 ▶ 净零排放情景下，全球大宗材料不同生产路线的工业生产情况



国际能源署。保留所有权利。

到2050年，近零排放路线将在水泥、初级钢铁和化学品生产中占主导地位，其中CCUS和氢基技术将发挥关键作用

注：CCUS = 碳捕捉、利用和封存。“化学品”是指初级化学品（乙烯、丙烯、苯、甲苯、混合二甲苯、氨和甲醇）的生产。“钢铁”是指初级钢生产。“其他”包括利用生物能和直接电气化生产的创新工艺。“氢基”是指电解氢。由配备 CCUS 的化石燃料生产的氢包含在“配备 CCUS”类别下。

钢铁生产

在净零排放情景中，由于无减排措施化石燃料的使用骤减，全球钢铁细分部门的二氧化碳排放量将从 2020 年的 2.4 吉吨下降到 2030 年的 1.8 吉吨，再下降到 2050 年的 0.2 吉吨。无减排措施化石燃料在整个燃料结构中的份额将从现在的 85% 下降到 2050 年的 30% 出头。2050 年，最后一批大量用煤的行业仍然包括钢铁行业，这主要是因为煤炭作为化学还原剂发挥重要作用，不过，钢铁行业用煤大部分将结合 CCUS。

净零排放情景下，钢铁细分部门将发生根本性的技术转型，大规模从煤炭转向电力。到 2050 年，电力和其他非化石燃料将占该部门终端能源需求量的近 70%，而 2020 年仅占 15%。上述转变是由使用废料的电弧炉（EAF）、使用氢气的直接还原铁（DRI）设施、铁矿石电解和辅助设备电气化等技术推动的。在净零排放情景中，煤炭在钢铁生产用能总量中的份额将从 2020 年的 75% 下降到 2050 年的 22%，其中 90% 将与 CCUS 结合使用。

从现在到 2030 年，目前已进入市场的技术将贡献钢铁生产减排量的 85% 左右。这些技术包括材料效率和能效措施、以及利用废料的生产工艺的大幅扩张；其中利用废料的生产工艺的用能量只有初级钢铁生产的约十分之一，这种生产工艺的扩张主要是由于随着更多产品报废，可用的废料相应增加。目前处于中试阶段的、向商用高炉和直接还原铁用熔炉注入部分氢气的技术，将于 2020 年代中期加快发展。2030 年后，大部分减排量将来自目前正在开发的技术，包括用氢直接还原铁和铁矿石电解。配备 CCUS 的几项工艺技术将得到同步部署，包括创新型冶炼还原、使用天然气的直接还原法制铁（特别是在天然气价格低的地区），以及在工厂厂龄相对年轻的地区开展创新型高炉改造。

水泥生产

如今，生产一吨水泥平均产生约 0.6 吨二氧化碳，其中三分之二是过程排放，即由原材料释放的碳。化石燃料（主要是煤，也有一些石油焦）占热能需求的 90%。

2030 年与 2020 年相比，减排量中约 40%将归功于水泥中用于取代部分熟料（活性最高、排放最密集的成分）的替代原料的掺入比例提高、水泥需求降低，以及能效措施。通过使用掺合水泥，全球熟料-水泥比例将从 2020 年的 0.71 下降到 2030 年的 0.65。这一比例在 2030 年后将以较慢的速度继续下降，2050 年将达到 0.57（掺合水泥的熟料-水泥比例最低可达到 0.5，但市场应用潜力取决于各区域的具体情况）。到 2050 年，石灰石和煅烧粘土将是用于掺合水泥的主要替代材料。由于技术上可实现的最低熟料-水泥比例为 0.5，因此需要采取其他措施才能实现更深度的减排。

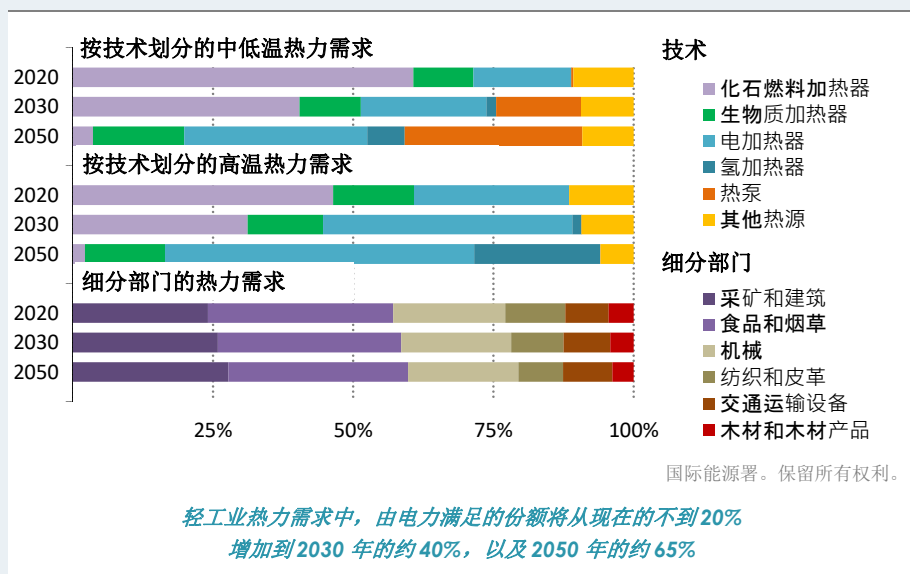
净零排放情景下，从 2030 年起，大部分减排量将来自于使用目前尚处于开发阶段的技术。其中最重要的技术是 CCUS，2050 年与现在相比，CCUS 将贡献减排量中的 55%。在净零排放情景中的许多情况下，采用 CCUS 处理化石燃料燃烧排放将比改用零排放能源具有更高的成本效益。到 2050 年，水泥生产将不再使用煤炭，届时水泥生产的热能有 40%来自天然气（目前为 15%），35%来自生物质和可再生废弃物（目前为不足 5%），约 15%来自氢和直接电气化，其余则来自石油产品和不可再生废弃物。由于供应有限，可持续生物质无法实现更高的份额。水泥窑直接电气化目前还处于小规模原型阶段，2040 年之后才开始小规模部署。从 2040 年代起，氢将满足水泥窑热能需求的 10%左右，不过，在这之前，将已经有少量量的氢混入燃料中。由替代性胶凝材料制成的创新型水泥将能够限制或避免过程排放，甚至能够在固化过程中采用二氧化碳捕捉技术；但相对于 CCUS 等其他方案，此类创新型水泥技术或是仍处于较早期的开发阶段，或是适用用途有限。

专栏 3.2 ▶ 其他工业细部门情况如何？

工业部门的产出并不仅限于钢铁、水泥和化学品。工业部门还包括其他高耗能细分行业，例如铝、纸、其他非金属矿物和有色金属，以及生产车辆、机械、食品、木材、纺织品和其他消费品的轻工业，还有建筑施工和采矿作业中消耗的能源。

净零排放情景下，轻工业的排放量到 2030 年将下降约 30%，到 2050 年将下降约 95%。与重工业不同，这些细部门中深度减排所需的大部分技术都可以在市场上获得，并且可以立即部署。原因之一是这些细部门 90%以上的热力总需求是中低温热力，更容易高效地实现电气化。

图 3.20 ▶ 净零排放情景下，轻工业中不同温度热力技术的占比



注：轻工业不包括非特定的工业能耗。中低温热力对应的温度范围为 0-400 °C，高温热力对应的温度范围为 >400 °C。其他热力来源包括太阳能热力和地热加热装置，以及从电力和燃料转型部门进口的热力。

到 2030 年电力将满足热力需求的 40%，到 2050 年将满足约 65%。对于低温（<100 °C）和部分中温（100-400 °C）热力，热泵在电气化中将发挥重要作用（2050 年占热力总需求的 30%左右）。净零排放情景中，未来 30 年内每个月需要安装约 500 兆瓦的热泵。除了电气化，氢能和生物能在高温热力（>400 °C）方面也将发挥较小的作用，分别将满足 2050 年能源总需求的 20%和 15%左右（图 3.20）。电解产能在轻工业的部署速度将显著低于重工业，但单元规模也会小得多。大约 5%的热力需求是通过直接使用可再生能源来满足的，包括太阳能热力和地热能技术。

在上述制造行业中，能效也将发挥关键作用，特别是提高电动马达（输送机、泵和其他驱动系统）的能效。到 2030 年，其他行业马达销量中 90%将为 3 级或以上。

3.5.2 关键里程碑和决策点

表 3.3 ▶ 全球重工业细分行业转型的关键里程碑

类别			
重工业			
• 2035 年：几乎所有新增产能都采用创新型低排放路线。			
工业马达			
• 2035 年：销售的所有电动马达都是同类中最先进的。			
类别	2020	2030	2050
工业总计			
电力在终端消费总量中的占比	21%	28%	46%
氢需求（百万吨氢）	51	93	187
捕获的二氧化碳（百万吨二氧化碳）	3	375	2 800
化学品			
回收占比：			
塑料收集再利用	17%	27%	54%
二次生产再利用	8%	14%	35%
氢需求（百万吨氢）	46	63	83
配备现场电解产能（吉瓦）	0	38	210
创新型路线产量占比	1%	13%	93%
捕获的二氧化碳（百万吨二氧化碳）	2	70	540
钢铁			
回收、再利用：废料作为投入的比例	32%	38%	46%
氢需求（百万吨氢）	5	19	54
配备现场电解产能（吉瓦）	0	36	295
在初级钢产量中的占比：			
氢基 DRI-EAF	0%	2%	29%
铁矿石电解-EAF	0%	0%	13%
配备 CCUS 的工艺	0%	6%	53%
捕获的二氧化碳	1	70	670
水泥			
熟料-水泥比例	0.71	0.65	0.57
氢需求（百万吨氢）	0	2	12
创新型路线产量占比	0%	9%	93%
捕获的二氧化碳（百万吨二氧化碳）	0	215	1 355

注：DRI = 直接还原铁；EAF = 电弧炉。

净零排放情景下，从 2030 年起的所有工业新增产能都将采用近零排放技术。未来几年将新建和替换的重工业产能大部分都发生在新兴市场和发展中经济体；它们可能期待来自发达经济体的资金支持。净零排放情景意味着从 2030 年到 2050 年的每个月，都增加 10 座配备 CCUS 的工业工厂，增加 3 座完全使用氢的工业工厂，以及在工业场点增加 2 吉瓦的电解产能。这样的目标虽然挑战不小，但却是可以实现的。作为比较，从 2000 年到 2015 年，仅在中国平均每月就有约 12 座新的重工业设施建成。到 2050 年，几乎所有重工业生产都将采用近零排放技术。

政府必须采取果断行动，以净零排放情景所设想的规模和速度实现重工业的清洁能源转型。在今后两年内，发达经济体的政府将需要做出决策，提供资金支持关键近零排放工业技术的研发，并支持大规模示范相关的投资风险缓释。如此，每项技术在不同地区将至少有两到三个商业示范项目，并在 2020 年代中期实现市场部署。国际协调与合作将有助于更好地利用资源，防止出现资金缺口。

各国政府还需要很早就大规模部署近零排放技术做出决策。到 2024 年和 2026 年，发达经济体以及新兴市场和发展中经济体政府应分别完成战略制定，将近零排放技术纳入下一系列钢铁和化工厂的产能新增和替换中，战略决策应包括决定是采用 CCUS 还是氢能，或是两者兼而有之。这些战略要想成功，就需要纳入开发和资助 CCUS 和/或氢能必要基础设施的切实规划，以及清洁电力制氢的切实规划。鉴于所需准备时间较长，必要基础设施的建设应尽快开始。

在类似的时间框架内，水泥生产国政府应决定如何为水泥行业开发必要的 CCUS 基础设施，包括必要的法律和监管框架。水泥进口国应制定计划，逐步转向完全使用低排放水泥，因此，这些国家可能需要支持其他国家发展配备 CCUS 的设施，以保障供应，避免其他国家承担过大的负担。

战略必须有具体配套政策作为支持。到 2025 年，所有国家都应有长期的二氧化碳减排政策框架，以便为下一波新增产能投资采用近零排放技术提供确定性。要想让战略取得成功，很可能需要一些初始措施，如碳差价合同、公共采购和鼓励私营部门采购的激励措施。随着新技术部署推进、成本下降，到 2030 年左右，很可能有必要采用二氧化碳税、排放交易系统、排放绩效标准等其他措施来取代初始措施。对近零排放新增产能提供资金支持也可能将发挥重要的作用，相关措施包括低息和优惠贷款、混合融资，以及发达经济体向用于支持新兴市场和发展中经济体项目的基金捐款。战略还应包括通过提高材料效率减少工业排放的措施，例如修订设计法规，激励产品和建筑物使用寿命的延长，以及改善材料收集和分类回收系统。

对于参与全球贸易的产品，有必要在 2020 年代中期之前就近零排放转型达成国际协议，以创造公平的竞争环境。否则，各国可能不得不采取措施来保护国内的近零排放生产，使其避免跟高排放产品竞争。任何此类政策的设计都需要尊重国际贸易监管框架，如世界贸易组织的监管框架。

即使创新加速、有力政策到位，在近零排放技术出现之前，仍需要新增一些高排放产能，才能满足未来十年的需求。一种合理做法是，政府要求任何新增产能的设计都必须支持未来改造，以使得未来几年内无减排措施的新增产能具备在将来集成近零排放技术所需的技术潜力和空间。净零排放情景下，2030 年以后的投资将只投向创新型近零排放工艺路线。

政府不应忽视的一点是：还需要采取措施刺激轻工制造业部署已有的近零排放技术。实现这一目标的最便捷方法可能是采用碳价格机制，然后随着时间的推移，通过碳税、大型制造商排放交易系统等方式充分提高碳价格。可交易的低碳燃料和排放标准等其他监管措施也可以产生同样的效果，但在行政管理方面可能更加复杂。要实现净零排放情景中通过提高能效来减排的目标，很可能需要制定一些技术性要求，例如对新马达和新锅炉适用最低能源性能标准。针对中小企业设计的方案和激励措施也可以发挥有益作用。

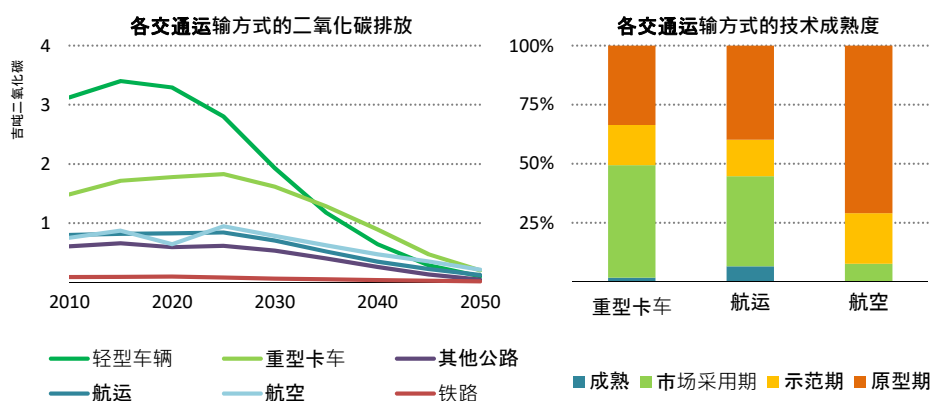
3.6 交通运输

3.6.1 净零排放情景下的能源和排放趋势

全球交通运输部门的二氧化碳排放量在 2020 年超过了 7 吉吨，在新冠疫情前的 2019 年接近 8.5 吉吨。⁷在净零排放情景中，交通运输部门 2030 年的二氧化碳排放量将略高于 5.5 吉吨，到 2050 年将约为 0.7 吉吨，比 2020 年低 90%。尽管客运量和货运量都将迅速增加，到 2050 年分别比现在增加近 1 倍和 1.5 倍，并且全球乘用车将从 2020 年的 12 亿辆增加到 2050 年的近 20 亿辆，二氧化碳排放量仍然将会下降。

各种交通运输方式的脱碳速度不同，因为相应的技术成熟度差异较大（图 3.21）。到 2040 年，两轮/三轮车辆将几乎停止排放二氧化碳，随后，到 2040 年代后期，轿车、面包车和轨道车辆的二氧化碳排放将接近零水平。2020 年至 2050 年期间，重型卡车、航运和航空的二氧化碳排放量平均每年将下降 6%，但在 2050 年仍合计超过 0.5 吉吨。这是因为交通运输活动预计将会增加，而且长途交通运输二氧化碳减排所需的许多技术目前仍处于开发阶段，在未来十年内不会大量进入市场。

图 3.21 ▶ 净零排放情景下，全球不同交通运输方式的二氧化碳排放情况，以及从现在到 2050 年的减排量中不同成熟度技术的贡献占比



国际能源署。保留所有权利。

乘用车可以利用市场上的低排放技术，但重型卡车、航运和航空的减排仍待取得重大技术进展

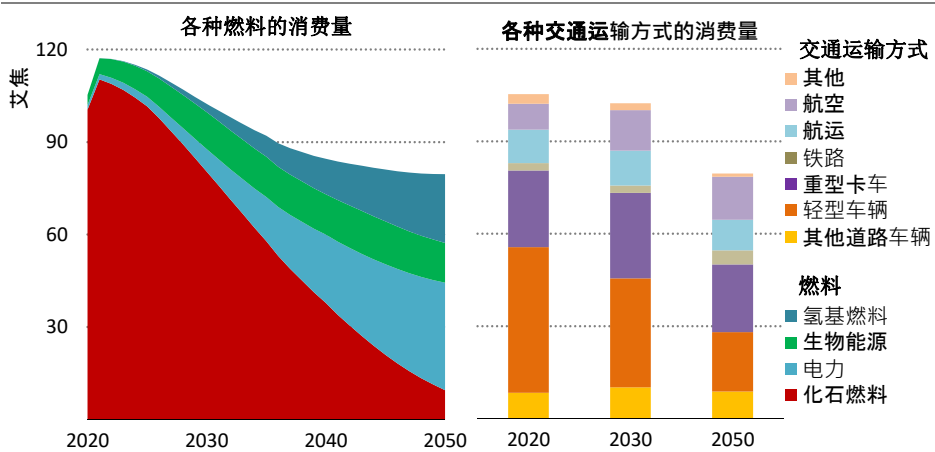
注：其他道路 = 两轮/三轮车辆和巴士。航运和航空包括国内和国际作业。有关成熟度类别的详细信息，见专栏 2.4。

⁷ 除非另有说明，这里报告的二氧化碳排放是指车辆运行过程中燃烧的化石燃料的直接排放。

净零排放情景下，交通运输部门的脱碳取决于促进方式转变和各种客运方式更高效运行的政策（见第 2.5.7 和 4.4.3 节），⁸以及能效改善。脱碳还取决于两大类技术转型：转向电动出行（电动车和燃料电池电动车）⁹，以及转向更高的低碳燃料混合比例和低碳燃料的直接使用（生物燃料和氢基燃料）。这些转变很可能需要配套干预措施，以刺激对供应基础设施的投资，并激励消费者接受变化。

交通运输历来严重依赖石油产品；尽管生物燃料和电力用于该部门已取得进展，但在 2020 年，石油产品仍占交通运输部门能源需求的 90%以上（图 3.22）。在净零排放情景中，石油的份额将在 2030 年下降到 75%以下，2050 年下降到 10%出头。净零排放情景下，到 2040 年代初，全球交通运输部门的主导燃料将是电力：2050 年将占终端消费总量的近 45%；其次是氢基燃料（28%）和生物能源（16%）。到 2030 年，生物燃料在公路交通运输用石油产品中的混合比例将达到近 15%，这将使石油需求减少约 450 万桶油当量/天。2030 年以后，在电力和氢能应用范围有限的航空和航运领域，生物燃料的使用将会增加。储氢载体（如氨）和低排放合成燃料也将为这两种交通运输方式的能源需求提供更高比例的能源。

图 3.22 ▸ 净零排放情景下，全球不同交通运输燃料和方式的终端消费情况



国际能源署。保留所有权利。

到2050年，电力和氢基燃料将满足交通运输能源需求的70%以上

注：其他道路车辆 = 两轮/三轮车辆和巴士。

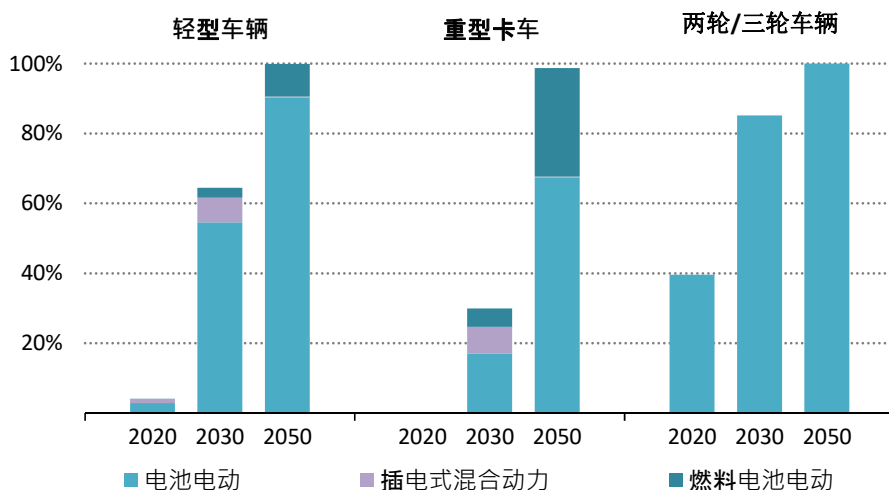
⁸ 高效运行的例子包括：各种交通运输方式的无缝集成（方式间）和客运中的“出行即服务”（Mobility as a Service）；公路货运中的物流措施，如回程运输、夜间交货、实时路由；航运中的减速航行；以及空中交通管理（如航空起降调度）。

⁹ 电动车包括电池电动车、插电式电力-汽油混合动力车，以及插电式电力-柴油混合动力车。燃料电池电动车包含一个电池和电动马达，能够在无尾气排放的情况下运行。

道路车辆

净零排放情景中，电气化在道路车辆脱碳中将发挥核心作用。电池成本在近十年下降了近 90%，电动乘用车销量在过去五年中平均提高了 40%。电池技术已经具有比较强的商业竞争力。在净零排放情景下，燃料电池电动车将在 2020 年代取得进展。重型卡车电气化进展将相对缓慢，原因包括电池的重量、充电所需的高能量和高功率要求，以及每次充电后行驶距离有限。不过，燃料电池重型卡车将会取得重大进展，主要是在 2030 年之后（图 3.23）。世界范围内，道路上的电池电动、插电式混合动力和燃料电池电动轻型车（轿车和面包车）的数量将在 2030 年达到 3.5 亿辆，2050 年达到近 20 亿辆，而 2020 年只有 1 100 万辆。电动两轮/三轮车辆的数量也将迅速上升，从目前的不到 3 亿辆增加到 2030 年的 6 亿辆和 2050 年的 12 亿辆。电动巴士将从 2020 年的 50 万辆增加到 2030 年的 800 万辆，然后进一步增加到 2050 年的 5 000 万辆。

图 3.23 ▶ 净零排放情景下，全球电池电动车、插电式混合动力车和燃料电池电动车在各类车辆总销量中的占比



国际能源署。保留所有权利。

全球电池电动车、插电式混合动力车和燃料电池电动车的销量将剧增

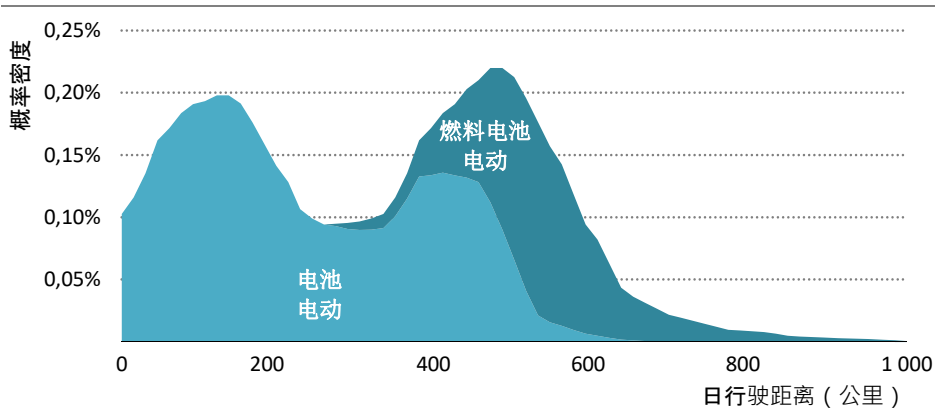
注：轻型车辆 = 乘用车和面包车；重型卡车 = 中型和重型货运卡车。

从中期来看，轻型车辆在发达经济体中的电气化速度较快，到 2030 年电气化的轻型车辆将占销量的 75% 左右。同年，在新兴和发展中经济体中，电气化的轻型车辆将占销量的 50% 左右。到 2030 年代初，发达经济体销售的几乎所有轻型车辆都是电池电动车、插电式混合动力车或燃料电池电动车，到 2030 年代中期，新兴和发展中经济体也将如此。

对于长途作业的重型卡车而言，生物燃料目前是柴油的主要商业可行替代品，2020 年代将在重型卡车减排方面发挥重要作用。在净零排放情景中，2030 年以后，随着配套基础设施建成和成本下降（电池成本降低，能量密度提高，生产和输送氢气的成本降

低），电动和氢能动力重型卡车的数量将会增加（IEA, 2020b）。同样在此期间，可用的可持续生物能源供应量将会减少，因为有限的供应将越来越多地流向航空和航运等减排困难的领域；不过生物燃料在 2050 年仍能满足重型卡车约 10% 的燃料需求（见第 2 章）。2030 年，发达经济体的电池电动和燃料电池电动重型卡车销售市场份额较高，是新兴市场和发展中经济体水平的两倍以上；随着 2050 年的临近，这一差距将会缩小。

图 3.24 ▶ 2050 年按日行驶距离划分的重型卡车分布情况



国际能源署。保留所有权利。

行驶距离是影响卡车动力系统选择的关键因素

要想实现净零排放情景的目标，就需要迅速扩大电池制造规模（目前已宣布的 2030 年产能只能满足该年需求的 50%），以及在 2025 年和 2030 年之间迅速在市场上推出下一代电池技术（固态电池）。电池电动车和燃料电池电动车的一种长途运营替代方案是为卡车提供导电充电或感应充电的电气化公路系统，但此类系统也需要得到快速开发和部署。

航空¹⁰

净零排放情景假设从 2020 年到 2050 年航空旅行量（以收入乘客公里数衡量）每年的增长率只有约 3%；2010-19 年期间的年增长率约为 6%。净零排放情景假设航空业的增长将受到政府综合政策的限制，这些政策通过对商业客运航班征税等方法，提倡以高速铁路替代航空出行，并限制长途商务旅行的增加（见第 2.5.2 节）。

在净零排放情景中，全球航空业的二氧化碳排放量将从 2020 年的约 6.4 亿吨（低于 2019 年的约 1 吉吨）上升到 2025 年左右的峰值 9.5 亿吨。然后随着低排放燃料使用增加，排放量将在 2050 年减少到 2.1 亿吨。由于航空要求高能量密度的燃料，因此减

¹⁰ 这里的航空包括国内和国际航班。虽然这里的重点是商业客运航空，但专用货运和通用（军事和私人）航空也包括在能源和排放核算中，专用货运和通用航空总共占燃料使用和排放的 10% 以上。

排比较困难。2050 年，航空业的排放量将占无减排措施的化石燃料和工业过程二氧化碳排放量的 10% 多一点。

在净零排放情景中，全球航空煤油用量将从 2020 年的 9 艾焦下降到 2050 年的约 3 艾焦（在新冠疫情前 2019 年约为 14.5 艾焦），其在用能总量中的份额将从几乎 100% 下降到略高于 20%。可持续航空燃料（SAF）的使用将从 2020 年代后期开始显著增加。2030 年，航空业燃料消费总量中将有 15% 左右是可持续航空燃料，其中大部分是生物航空煤油（一种液体生物燃料）。据估计，这将使中程航班（1200 公里）的人均票价增加约 3 美元。到 2050 年，生物航空煤油和合成氢基燃料将分别满足航空燃料消费总量的 45% 和 30% 左右。预计这将使 2050 年中程航班的人均票价增加约 10 美元。净零排放情景下，商业电池电动飞机和氢能飞机将从 2035 年开始普及，但在 2050 年燃料消费量中的占比不足 2%。

在净零排放情景中，操作方面的改进以及机身和发动机的燃油效率技术，将会减缓燃料需求的增速，因此也有助于二氧化碳减排。这些改进是渐进式的；但革命性的技术，如开放式旋翼机、翼身融合飞机和混合动力飞机，将可以推动进一步发展，使航空业能够达到国际民用航空组织（ICAO）雄心勃勃的 2050 年效率目标（IEA, 2020b）。

海运¹¹

2020 年，海运在全球范围内的二氧化碳排放量约为 8.3 亿吨（2019 年为 8.8 亿吨），约占能源部门排放总量的 2.5%。由于市场上缺乏可用的低碳方案，以及船舶的使用寿命较长（通常为 25-35 年），航运是净零排放情景下少数无法在 2050 年前实现零排放的交通运输方式之一。不过，航运业的二氧化碳排放量将每年下降 6%，到 2050 年降至 1.2 亿吨。

短期内，采取措施优化作业效率、提高能效，将有相当大的潜力可以减少航运业的燃料消费。这些措施包括减速航行、使用风力辅助技术等（IEA, 2020b）。中长期来看，在净零排放情景中通过改用生物燃料、氢和氨等低碳燃料，将会实现大幅减排。有证据表明，氨很可能是一种尤其适合扩大规模的候选燃料，并且是需要高能量密度燃料的长途跨洋航行的关键燃料。

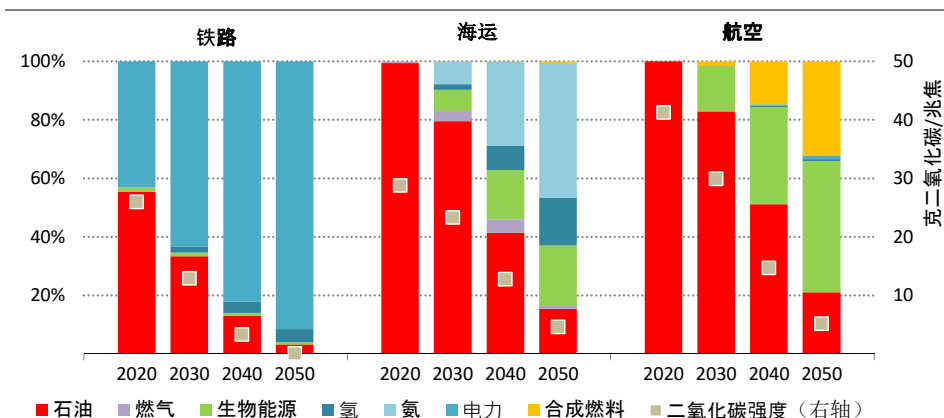
净零排放情景下，氨和氢是未来 30 年内将采用的主要低碳航运燃料，它们在航运能耗总量中的合计份额将在 2050 年达到约 60%。世界上最大的 20 个港口处理的货物量占全球的一半以上（UNCTAD, 2018）；这些港口可以成为制氢和制氨工业枢纽，服务于化工和精炼行业，并为船舶加注燃料。目前，最大的船用发动机制造商中，有两家正在开发以氨为燃料的船舶内燃机，这些新型内燃机预计将于 2024 年进入市场。可持续生物燃料在 2050 年将满足近 20% 的航运能源总需求。电力发挥的作用将会非常小，因为电池与液体燃料相比能量密度较低，只适合于 200 公里以内的航线。净零排放情景中，即使电池能量密度随着固态电池走向市场而提高 85%，也只有短途航运路线可以实现电气化。

¹¹ 这里的海运包括国内和国际作业。

铁路

铁路交通运输在客运方面是能效最高、碳强度最低的方式，在货运方面则仅次于航运。净零排放情景下，到 2050 年客运铁路在交通运输活动总量中的占比将几乎翻一番，达到 20%，其中城市铁路和高速铁路（HSR）的增长尤为迅速，并且高速铁路还有助于减缓航空旅行的增长。在净零排放情景中，全球铁路部门的二氧化碳排放量将从 2020 年的 9 500 万吨（2019 年为 1 亿吨）下降到 2050 年的几乎为零，这主要是由快速电气化驱动的。

图 3.25 ▸ 净零排放情景下，非公路部门的全球能耗情况，按燃料和二氧化碳强度划分



国际能源署。保留所有权利。

铁路主要依靠电力来实现脱碳，而航运和航空则主要通过改用低排放燃料来减少排放

注：合成燃料 = 低排放的合成氢基燃料。

在净零排放情景中，从今开始，高吞吐量交通走廊上的所有新轨道都将是电气化轨道，而最近在欧洲示范的氢能和电池电动列车则将用于吞吐量不足以支持电气化经济可行性的铁路线路。2020 年，石油占铁路部门能耗总量的 55%，而到 2050 年将几乎降至零：电力将取代石油，满足铁路能源需求量的 90% 以上，而氢能将满足另外 5% 的铁路能源需求。

3.6.2 关键里程碑和决策点

表 3.4 ▸ 全球交通运输部门转型的关键里程碑

类别				
公路交通运输				
• 2035 年：全球停止销售新的内燃机乘用车				
航空和航运				
• 尽快实施严格的降低碳排放强度的目标。				

类别		2020	2030	2050
公路交通运输				
PHEV、BEV 和 FCEV 销量占比：	轿车	5%	64%	100%
	两轮/三轮车辆	40%	85%	100%
	巴士	3%	60%	100%
	面包车	0%	72%	100%
	重型卡车	0%	30%	99%
石油产品中掺入生物燃料		5%	13%	41%
铁路				
电力和氢能在能耗总量中的占比		43%	65%	96%
由交通运输方式转变导致的活动增加（指数 2020 年 = 100）。		100	100	130
航空				
合成氢基燃料在航空能耗总量中的占比		0%	2%	33%
生物燃料在航空能耗总量中的占比		0%	16%	45%
通过行为改变措施而避免的需求（指数 2020 年 = 100）		0	20	38
航运				
在航运能耗总量中的占比：	氨	0%	8%	46%
	氢	0%	2%	17%
	生物能源	0%	7%	21%
基础设施				
电动车公共充电桩（百万台）		1.3	40	200
氢加注单元		540	18 000	90 000
电气化铁路路线占比		34%	47%	65%

注：PHEV = 插电式混合动力车；BEV = 电池电动车；FCEV = 燃料电池电动车。

电气化是公路和铁路交通运输二氧化碳减排的主要选择，相关技术已在市场上出现，应立即加速推广，同时增加电动车充电基础设施。要想在减排困难的部门（重型卡车、航运和航空）实现深度减排，就要在未来十年内大规模推广所需的相关技术（目前这些技术大多处于原型和示范阶段），同时还要制定氢加注站等配套基础设施的发展规划。

为使交通运输部门走上与净零排放情景相一致的减排轨道，政府需要在未来十年做出一系列决定。今后几年，所有政府都需要取消化石燃料补贴，并鼓励整个交通运输部门转向低碳技术和燃料。2025 年之前，各国政府需要从本国的战略重点和需求出发，在各种能够促进交通运输脱碳技术中，设定明确的研发重点。理想情况下，这项工作将参考国际对话和合作中获得的信息。研发对于电池技术尤为关键，因此应将电池研发确定为当下的优先事项。

为了实现净零排放情景所要求的减排量，政府还需要迅速采取行动，释放出停止销售新的内燃机汽车的信号。早做承诺将有助于私营部门对新的动力系统、相应的供应链以及加注基础设施做出必要的投资（见第 4.3.4 节）。这对需要长期规划的电池金属供应尤其重要（IEA, 2021a）。

到 2025 年，城市地区的电动车公共充电基础设施需要得到足够大规模的部署，让用不上私人充电桩的人们也可以选择使用电动车。各国政府应确保让充电桩安装企业有条件采用可持续的商业模式，消除规划和建设方面的障碍，并制定监管、财政和技术措施，以实现并鼓励智能充电，确保电动车支持电网稳定，并且刺激可变可再生能源的普及（IEA, 2021b）。

重型卡车方面，电池电动卡车刚刚开始进入市场，而燃料电池电动技术预计将在未来几年内走向市场。政府应与卡车制造商合作，在短期内采取措施，将电池电动和燃料电池电动卡车的快速商业化普及作为优先事项来推动。到 2030 年，政府应评估各种技术的竞争前景，以便将研发重点放在最重要的挑战上，并为战略性基础设施的部署预留充分的时间，从而为 2030 年代的大规模普及铺平道路。

鉴于船舶更新周期缓慢，各国政府最迟需要在 2025 年前确定本国在航运和航空领域的低碳燃料战略，并应于战略确定以后迅速将其付诸实施。国际合作和协调将是成功的关键。行动应优先针对使用最频繁的港口和机场，以便让初始投资产生尽可能大的影响。工业区附近的港口是理想的低碳燃料枢纽。

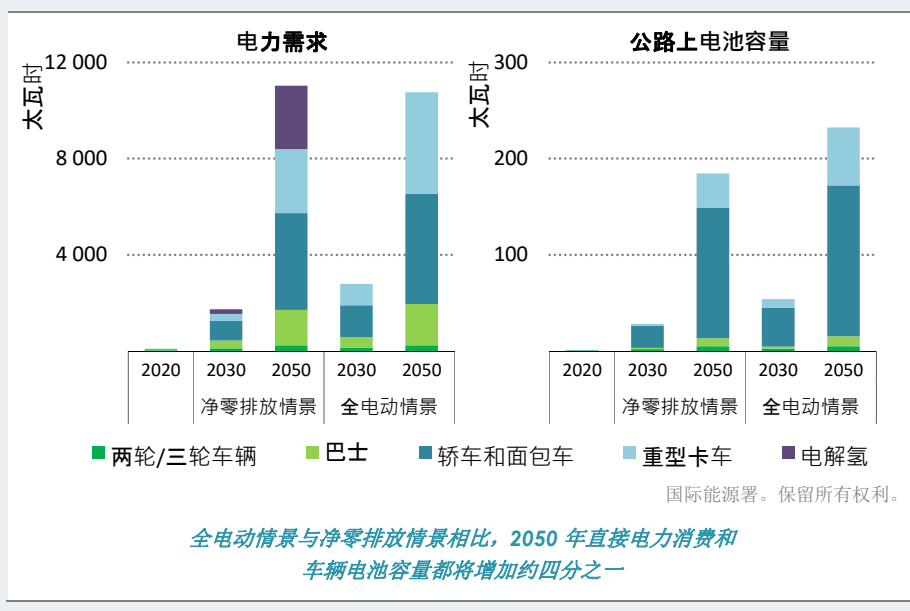
在公路交通运输中同时使用多种燃料是净零排放情景的一个核心组成部分。然而，有些政府可能想考虑采用全电动路线来消除交通运输产生的二氧化碳排放，特别是如果燃料电池电动车、先进生物燃料等其他技术未能按预期发展。因此，我们建立了*全电动情景*，以研究道路车辆全部电气化的影响。净零排放情景下，公路交通运输的脱碳主要是通过普及插电式混合动力车（PHEVs）、电池电动车（BEVs）、燃料电池电动车（FCEVs）和先进生物燃料来实现的。全电动情景假设公路交通运输的脱碳速度与净零排放情景相同，但仅通过电池电动车实现。

全电动情景与净零排放情景相比，对电池技术进一步发展的依赖度更高，到 2030 年代，电池的能量密度将至少需要达到 400 瓦时/千克，并且还需要使电池电动卡车在长途作业中比燃料电池电动卡车有更大的成本优势。这意味着在 2030 年，道路上行驶的电池电动车辆将需要比净零排放情景下多 30%（即多 3.5 亿台）。届时这些车辆将需要超过 6 500 万个公共充电桩来支持，这些充电桩需要的累计投资额约为 3 000 亿美元，比净零排放情景高出 35%。还需要更快地扩大电池制造。2030 年，全球电池电动车用电池的年产能将需要增加近 9 太瓦时，比净零排放情景多 80 座超级工厂（假设每座超级工厂的年产量为 35 吉瓦时），相当于从现在到 2030 年平均每月多增加 2 座以上。

公路交通运输用电增加也会给电力部门带来额外的挑战。如果考虑到对电解氢的需求，则两种情景下公路交通运输的电力需求总量（11 000 太瓦时或 2050 年电力消费总量的 15%）将大致相同。然而，净零排放情景中的电解制氢比较灵活，可以在可再生能源产能过剩的地区和时间段生产，也可以采用专有的（离网）可再生能源电力。全电动情景中，如将汽车智能充电灵活性考虑在内，峰值电力需求将比净零排放情景高出约三分之一（2 000 吉瓦），主要是由于巴士和卡车有在晚间或夜间充电的额外电力需求。重型车辆的超快速充电站如果不配备储能装置，可能会导致额外的需求高峰，给电网带来更大的压力。

公路交通运输的全面电气化虽然是可以实现的，但可能会带来额外的挑战和副作用。例如，它可能增加电网的压力，需要大量的额外投资，并且加重交通运输系统在电力中断时受到的影响程度。燃料多元化可以在抗风险和能源安全方面带来益处。

图 3.26 ▶ 净零排放情景和全电动情景下，全球公路交通运输的电力需求和电池容量



3.7 建筑物

3.7.1 净零排放情景下的能源和排放趋势

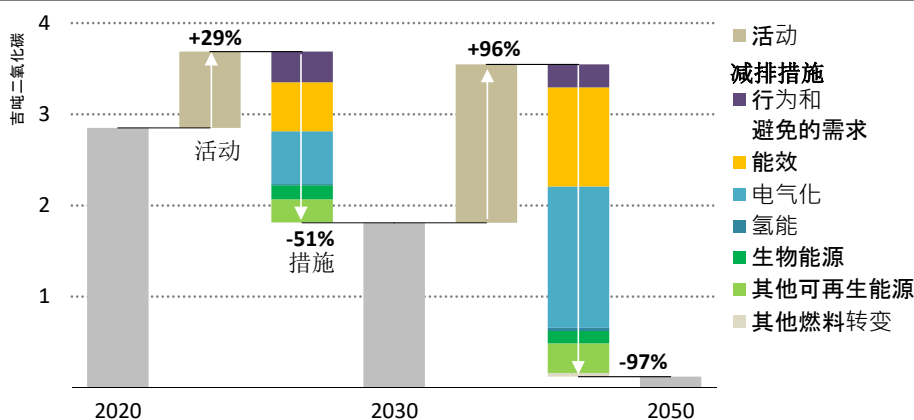
2020 年至 2050 年期间，全球建筑物部门的楼面面积预计将增加 75%，其中 80%是在新兴市场和发展中经济体。从现在到 2050 年，全世界每周将增加的楼面面积相当于巴黎市的面积。此外，许多发达经济体中，建筑物使用寿命很长，现有建筑物中约有一半到 2050 年仍将继续使用。净零排放情景下，对电器和冷却设备的需求将持续增长；新兴市场和发展中经济体中，此类需求增长尤为明显，例如空调到 2030 年将增加 6.5 亿台，到 2050 年将增加 20 亿台。在净零排放情景中，尽管需求呈现上述增势，但建筑物部门的二氧化碳排放总量将从 2020 年的近 3 吉吨下降到 2050 年的约 1.2 亿吨，降幅超过 95%。¹²

净零排放情景中，能效和电气化是建筑物部门脱碳的两大主要驱动力（图 3.27）。这种转变主要依靠市场上已有的技术，包括改良型新建筑和现有建筑物围护结构、热泵、节能电器，以及生物气候和材料高效的建筑物设计。通过数字化和智能控制实现的效率提高，将使建筑物部门的二氧化碳排放量到 2050 年减少 3.5 亿吨。在净零排放情景中行为改变也很重要，通过调整空间加热的温度设置或降低过高的热水温度，将

¹² 除非另有说明，本节中的二氧化碳排放都是指直接二氧化碳排放。净零排放情景还力求减少建筑物中建筑材料相关的排放。到 2030 年，每平方米的新建楼面面积的隐含排放量将减少 40%；通过设计、施工、使用和报废阶段的措施，到 2050 年，材料效率策略将使水泥和钢铁用量比现在减少 50%。

实现 2030 年减少近 2.5 亿吨二氧化碳。额外的行为改变，例如更多地使用低温水洗衣并自然风干衣物，将会促进电力供应的脱碳。以上方式的减排有可能迅速实现，而且不需要任何成本。

图 3.27 ▶ 净零排放情景下，建筑物部门减排措施对全球二氧化碳直接排放量的影响



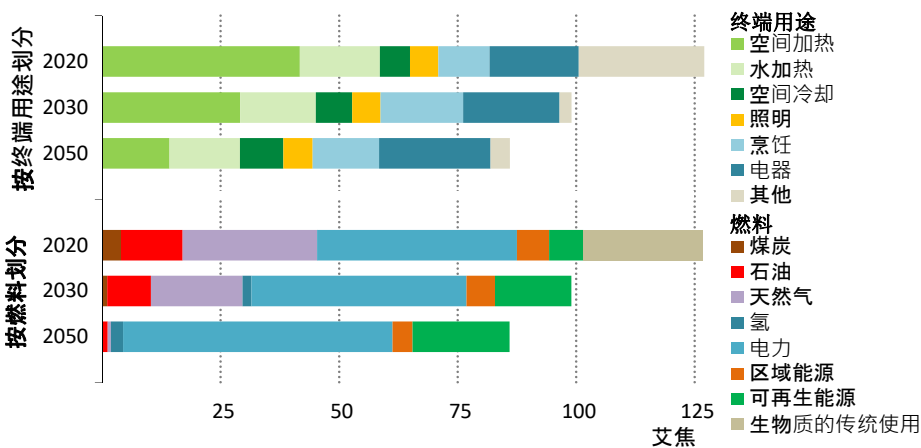
国际能源署。保留所有权利。

从现在到 2050 年，电气化和能效将贡献建筑物相关减排量的近 70%，其次是太阳能热力、生物能源和行为改变

注：活动 = 与人口增长、楼面面积增加和人均收入有关的能源服务需求变化。行为 = 由使用者的决定（例如改变加热温度）引起的能源服务需求变化。避免的需求 = 技术发展（例如数字化）带来的能源服务需求变化。

净零排放情景下，将迅速转向零碳就绪技术，化石燃料在建筑物部门能源需求中的份额到 2030 年和 2050 年将分别下降到 30% 和 2%。电力在建筑物部门能源结构中的占比到 2030 年将达到近 50%，2050 年将达到 66%，而 2020 年仅为 33%（图 3.28）。在净零排放情景中，当今由化石燃料主导的所有终端使用都将将日趋电气化，电力在空间加热、水加热和烹饪中的份额将从目前的不到 20% 增加到 2050 年的 40% 以上。到 2050 年，在供热需求高、城市人口密集和已具备燃气或区域供热网络的地区，区域能源网络和氢基燃料等低碳燃气仍将十分重要。净零排放情景下，到 2050 年生物能源将可以满足热力需求总量的近四分之一，并且将有 50% 以上用于烹饪——生物能源的这种用途几乎由新兴市场和经济体包揽；在新兴市场和经济体，到 2030 年将有 27 亿人可以使用清洁能源烹饪。空间加热方面，由于能效提高和行为改变（如调整温度设定），2020 年至 2050 年间的空间加热需求将下降三分之二。

图 3.28 ▶ 净零排放情景下，按燃料和终端用途划分的全球建筑物终端能耗情况



国际能源署。保留所有权利。

到2050年，建筑物部门的化石燃料用量将下降96%，
空间加热能源需求将减少三分之二，主要是能效提高的结果

注：“其他”包括海水淡化和固体生物质的传统使用，这两项并没有归入具体的最终使用类别。

零碳就绪建筑物

建筑物部门的净零排放情景路径要求在能效和灵活性方面取得阶梯式进展，并完全摆脱化石燃料。为此，到2050年，85%以上的建筑物都需要符合零碳就绪建筑物的能源规范（专栏3.4）。这意味着到2030年，各地区都要对所有新建筑物适用强制性的零碳就绪建筑物能源规范，到2050年，大多数现有建筑物都要进行改造，以达到零碳就绪建筑物能源规范。

在发达经济体中，改造率将从现在的每年不到1%增加到2030年的每年2.5%左右，即每年约有1000万套住宅完成改造。新兴市场和发展中经济体与发达经济体相比，建筑物寿命通常较短，这意味着净零排放情景下，新兴市场和发展中经济体到2030年的建筑物改造率相对较低，每年约为2%。这需要在2030年前平均每年改造2000万套住宅。为了以最低成本实现减排，并尽量减少干扰，改造需要具有全面、一次性完成的特征。

专栏 3.4 ▶ 推进零碳就绪建筑物

要实现建筑物部门用能脱碳，就需要在2050年前对几乎所有的现有建筑物完成一次深入的改造，并要求新建筑物达到严格的效率标准。适用于新建筑物和现有建筑物的建筑能源规范是推动这种变化的基本政策工具。目前，只有75个国家已制定或正在制定建筑物能源规范，其中约40个国家的规范强制性适用于住宅和服务用建筑物这两类建筑物。在净零排放情景中，所有国家最迟将在2030年实施全面的零碳就绪建筑物规范。

什么是零碳就绪建筑物？

零碳就绪建筑物是高效建筑物，要么直接使用可再生能源，要么使用到 2050 年将完全脱碳的能源供应，如电力或区域供热。这意味着，到 2050 年，零碳就绪建筑物将成为零碳建筑物，不需要进一步改造建筑或其设备。

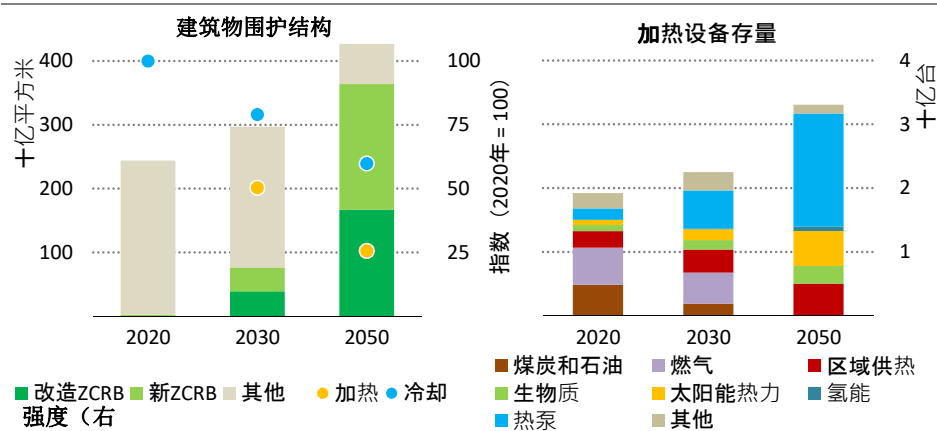
零碳就绪建筑物应根据使用者需求，最大限度地提高能源、材料和空间的高效智能利用，从而促进其他部门的脱碳。关键的考虑因素包括：

- **范围。**零碳就绪建筑物能源规范应涵盖建筑物运营（范围 1 和 2）以及建筑材料和组件制造过程中的排放（范围 3 或隐含碳排放）。
- **能源使用。**零碳就绪能源规范应认可被动式设计特征、建筑物围护结构改良和高能效设备在减少能源需求、降低建筑物运营成本和降低能源供应脱碳成本方面发挥的重要作用。
- **能源供应。**但凡在可能的情况下，新的和现有的零碳就绪建筑物都应集成当地可用的可再生资源，如太阳能热力、太阳能光伏、光伏热和地热，以减少对公用事业规模能源供应的需求。可能需要储热或电池储能设备来支持当地能源发电。
- **电力系统集成。**零碳就绪建筑物能源规范需要让建筑物成为能源系统的灵活资源，利用互联和自动化来管理建筑物用电需求和储能装置运行（包括电动车）。
- **建筑物和建筑价值链。**零碳就绪建筑物能源规范的目标也应包括在建筑物中使用净零排放的材料。材料效率策略可以使建筑物部门的水泥和钢铁需求比基线趋势降低三分之一以上，而更多使用生物来源和创新型建筑物材料，可以进一步减少隐含排放。

加热和冷却

净零排放情景下，在零碳就绪改造和新建筑物中，建筑物围护结构改良将贡献加热和冷却能源强度的大部分降幅，但加热和冷却技术也将做出重大贡献。在净零排放情景中，空间加热将发生转变，用天然气供热的家庭在家庭总数中的比例将从现在的近 30% 下降到 2050 年的不到 0.5%，而用电供热的家庭将从现在的近 20% 上升到 2030 年的 35% 和 2050 年的约 55%（图 3.29）。高效电热泵将成为净零排放情景下空间加热的主要技术选择，全世界每月的热泵安装量将从现在的 150 万增加到 2030 年的约 500 万，并继续增加到 2050 年的 1 000 万。气候最寒冷的地区也将会使用混合热泵，但混合热泵在 2050 年满足的加热需求不超过 5%。

图 3.29 ▶ 净零排放情景下，全球各类建筑物和供暖设备存量，以及有用空间加热和冷却需求的强度变化



国际能源署。保留所有权利。

到2050年，85%以上的建筑物都将是零碳就绪建筑物，
平均有用供热强度降低75%，热泵可满足一半以上的供暖需求

注：ZCRB（零碳就绪建筑物）指的是符合零碳就绪建筑物能源规范的建筑物。建筑物围护结构图中的“其他”是指不符合零碳就绪建筑物能源规范的围护结构。“其他供暖设备存量”包括电阻式加热器、混合热泵和燃气热泵。

然而，并非所有的建筑物都适合通过热泵实现脱碳；生物能锅炉、太阳能热力、区域供热、燃气管网中的低碳燃气和氢燃料电池都将发挥重要作用，共同推动全球建筑物在2050年之前实现零碳就绪。生物能源到2030年和2050年分别可以满足10%和20%以上的空间加热需求。太阳能热力是水加热的优选可再生技术，特别是在热力需求较低的情况下；在净零排放情景中，太阳能热力能满足的需求到2050年将达到35%，而现在只有7%。对于不适合安装热泵的许多紧凑型城市中心而言，区域供热网络仍然是很有吸引力的选择；在净零排放情景中，区域供热网络将在2050年满足20%以上的空间加热用终端能源需求，而现在仅略高于10%。

净零排放情景下，2025年起全球将不再有新的燃煤和燃油锅炉出售。到2030年和2050年，燃气锅炉的销量将分别比现在低40%以上和90%。在净零排放情景中，到2025年，任何出售的燃气锅炉都能够燃烧100%的氢气，因此属于零碳就绪锅炉。低碳燃气（氢、生物甲烷、合成甲烷）在建筑物用燃气中的占比将从现在的几乎为零，上升到2030年的10%，再上升到2050年的75%以上。

符合零碳就绪建筑物能源规范标准的建筑物不仅对空间加热的需求较低，对空间冷却的需求也较低；空间冷却是2000年以来建筑物部门增长最快的终端用途。2020年，空间冷却只占全球建筑物总能耗的5%，但随着收入增加和气候变暖，未来几十年对冷却的需求很可能会强劲增长。在净零排放情景中，2050年60%的住户将装有空调，而2020年只有35%。高性能的建筑物围护结构（包括生物气候设计和隔热）可以使空间冷却需求降低30-50%，同时在极端高温事件中提供更大的韧性。净零排放情景下，

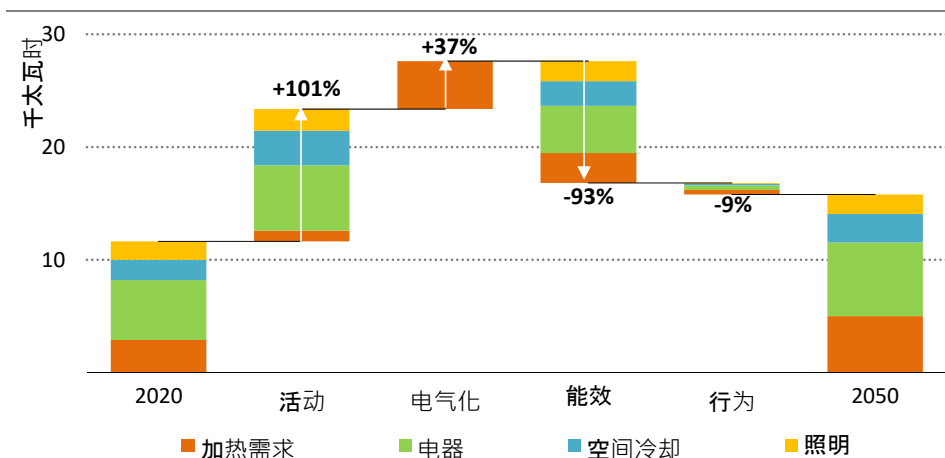
空间冷却的电力需求每年将增长 1%，2050 年将达到 2 500 太瓦时。如果没有住宅建筑物改良围护结构和更高效设备所带来的 2 000 太瓦时的节约，则空间冷却需求将接近上述数值的两倍。

电器与照明

在净零排放情景中，由于政策措施和技术进步，未来 30 年间电器和照明将更加高效。净零排放情景下，到 2025 年，发达经济体中电器和空调总销量的 80% 以上将是相应市场上现有的最先进技术，到 2030 年代中期，这一比例将增加到 100%。到 2050 年，新兴市场和发展中经济体将占电器和空调总销量的一半以上；净零排放情景假设新兴市场和发展中经济体在未来十年将有一系列政策行动，推动 2030 年这些市场的设备总销量中 80% 达到当今发达经济体的最佳技术效率，到 2050 年这一数字将增加到接近 100%（图 3.30）。到 2025 年，所有地区的发光二极管（LED）灯在灯泡总销售中的份额将达到 100%。最低能源性能标准与电器智能控制要求相辅相成，将共同推进各地区的需求侧响应。

建筑物用能将越来越集中在电动、电子和互联设备和电器上。净零排放情景下，电力在建筑物能耗中的占比将从 2020 年的 33% 上升到 2050 年的三分之二左右；许多建筑物都将利用当地太阳能光伏板、电池储能设备和电动车充电器，集成非集中式发电。同期，装有太阳能光伏板的住宅建筑物的数量将从 2 500 万增加到 2.4 亿。在净零排放情景中，智能控制系统将根据当地可再生能源的发电情况，及时灵活调整电力使用，或为电力系统提供灵活服务，而优化的家用电池和电动车充电将使住户能够与电网互动。这些发展不仅有助于增进电力供应安全，还可以使可再生能源集成融入系统的难度和成本降低，从而降低能源转型的成本。

图 3.30 ▶ 建筑物部门全球各终端用途的电力需求变化



国际能源署。保留所有权利。

能效对于减缓电器和空调的电力需求增长至关重要，
通过能效实现的节约足以抵消电力供热用能的增加

3.7.2 关键里程碑和决策点

表 3.5 ▸ 全球建筑物部门转型的关键里程碑

类别			
新建筑物			
• 从 2030 年起：所有新建筑物都零碳就绪。			
现有建筑物			
• 2030 年起：每年有 2.5% 的建筑物完成零碳就绪改造。			
类别	2020	2030	2050
建筑物			
完成零碳就绪改造的现有建筑物的占比	<1%	20%	>85%
零碳就绪的新建筑物的占比	5%	100%	100%
加热和冷却			
热泵存量（百万台）	180	600	1 800
使用太阳能热力的住宅（百万套）	250	400	1 200
通过行为改变避免的住宅能源需求	不适用	12%	14%
电器和照明			
电器：单位能耗（指数 2020 年=100）	100	75	60
照明：LED 在销售中的份额	50%	100%	100%
能源普及			
用电人口（十亿人）	7.0	8.5	9.7
使用清洁能源烹饪的人口（十亿人）	5.1	8.5	9.7
建筑物中的能源基础设施			
分布式太阳能光伏发电（太瓦时）	320	2 200	7 500
电动车私人充电桩（百万台）	270	1 400	3 500

政府需要在近期内就以下问题做出决策：建筑物能源规范和标准、化石燃料淘汰、低碳燃气使用、加速改造，以及鼓励建筑物部门能源转型投资的财政激励措施。如果希望决策发挥最佳效果，就需要注重整个价值链的脱碳，不仅考虑到建筑物，还要考虑到建筑物能源供应和基础设施网络，以及施工部门和城市规划的作用等更广泛的因素。这样的决策大概率能够带来更广泛的利益，特别是在减少燃料贫困方面。

政府还需要在近期内采取行动，确保零碳就绪建筑物在 2030 年前成为世界各地新建和改造建筑物的新常态。政府要在 2025 年前采取行动，才能保障符合零碳就绪要求的建筑物能源规范的实施不迟于 2030 年。虽然这一目标适用于所有地区，但零碳就绪建筑物的实现方式在不同地区和气候条件下会有很大的差异，加热和冷却技术策略也是如此。各国政府应考虑在未来十年内，通过实现公共建筑物零碳就绪来促进所有建筑物实现零碳就绪。

政府将需要克服财政障碍，解决激励错配问题，在尽量降低对建筑物使用干扰的情况下，设法使新建和改造零碳就绪建筑物不仅成本可负担，而且还对业主和用户具有吸引力。在这方面，建筑物能效证书、绿色租赁协议、绿色债券融资和“即省即付”（pay-as-you-save）模式都可以发挥一定作用。

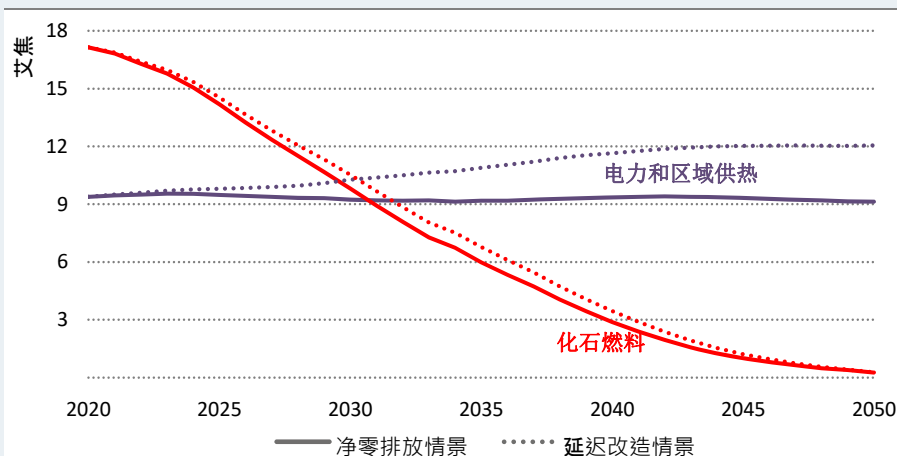
启动建筑物部门零排放进程有一种稳妥、不留遗憾的做法，那就是在近几年将零碳就绪建筑物改造作为经济复苏策略的支柱之一。如果错过了提高建筑物能效的机遇，则建筑物部门用能电气化的相关电力需求将会上升，能源系统脱碳的难度和成本也将大幅增加（专栏 3.5）。

专栏 3.5 ▶ 如果全球改造率不提高到 2.5% 会怎样？

净零排放情景中，现有建筑物加热方面的脱碳取决于对大多数现有建筑物进行深度改造。到 2050 年，几乎所有的建筑物都要达到零碳就绪建筑物能源规范，这就要求从现在到 2030 年每年的改造率达到 2.5%，而目前每年的改造率还不到 1%。改造可能会干扰到建筑物用户，需要大量的前期投资，并可能面临行政许可方面的困难。要想在未来几年实现所需的改造速度和深度，这些问题是建筑物部门将面临的巨大挑战。

如果 2030 年达不到 2.5% 的年度改造率，则后期弥补的工作量将十分巨大，因此到 2050 年绝大多数建筑物完成改造这一目标几乎不可能实现。模型表明，若加快改造的时间推迟十年，将导致住宅空间加热的能源需求增加 25%，空间冷却需求增加 20% 以上；相对于净零排放情景，2050 年住宅空间加热和冷却的电力需求将增加 20%（图 3.31）。在延迟改造情景中，相关政策和燃料转变仍将推动化石燃料需求下降，但到 2050 年额外燃烧的化石燃料将达到 15 艾焦，额外排放的二氧化碳将达到 1 吉吨。

图 3.31 ▶ 净零排放情景和延迟改造情景下，全球住宅空间加热和冷却的能源需求



国际能源署。保留所有权利。

如果不及时增加改造的速度和深度，则后期将几乎不可能赶上预设改造进度，这将增加电力部门的压力，推高化石燃料需求

政府需要制定政策，对用于空间加热和水加热的燃煤、燃油锅炉和暖气炉做出规定；在净零排放情景中，2025 年起将不再销售燃煤和燃油锅炉及暖气炉。政府还需要采取

行动，确保新的燃气锅炉能够使用脱碳燃气管网中的低碳燃气（氢就绪）来运行。因此，必须要有吸引力极大的替代品来取代被淘汰的锅炉类型，这些替代品包括热泵、高效木柴炉（使用可持续供应的木材）、区域能源、太阳能光伏、太阳能热力和其他可再生能源技术。至于哪种替代品是最佳选择，在一定程度上取决于当地的条件，但在大多数情况下，电气化将是能效和成本效益最高的低碳方案，而在密度允许的情况下，脱碳和扩大区域能源网络很可能是比较合理的做法。在缺乏更高效替代品的地区，在现有的或升级的燃气管网中使用生物甲烷或氢气可能是最佳选择。

政府还需要确定最低能源性能标准（MEPS）。净零排放情景下，所有国家将最迟于 2025 年制定针对各大电器类别的最低能源性能标准，并且标准的严格程度将相当于目前发达经济体中最严格的水平。举例而言，这将意味着届时停止销售白炽灯、卤素灯和紧凑型荧光灯。要想正确设定最低能源性能标准的水平，就需要做出缜密规划：通过国际合作来统一标准和目标可能将有益于保持低成本。

净零排放情景具有系统性；也就是说，如果建筑物方面的策略和政策与电力系统、城市规划和交通出行领域的战略和政策保持一致，将能够发挥最大作用。这将有助于确保建筑物集成的光伏技术、电池储能和智能控制的规模可以成功得到扩大，从而使建筑物为电网服务做出积极贡献。这也将有助于促进智能电动车充电基础设施的部署。对密集型综合用途的城市规划提供政策激励，结合便利的本地服务和公共交通，可以减少对个人车辆的依赖（见第 2 章）。建筑物策略与新建筑物碳减排措施之间也是相互联系的，在净零排放情景中，到 2050 年新建筑物的隐含碳排放将减少 95%。

实现净零排放的更广泛影响

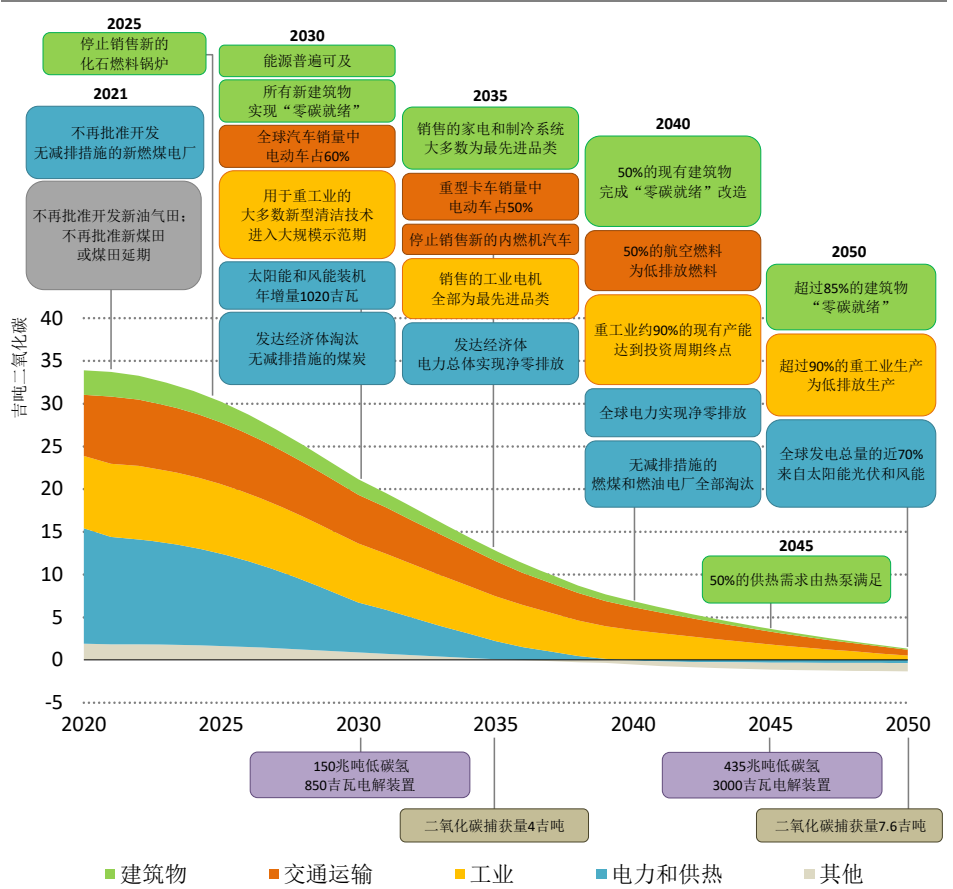
摘要

- **经济：**在我们的 2050 年净零排放情景中，全球的二氧化碳排放量到 2050 年将达到净零，并且对电力、低排放燃料、基础设施和终端用能部门的投资将上升。从现在到 2030 年，清洁能源的就业岗位将增加 1 400 万个，但石油、天然气和煤炭行业的就业岗位却将减少约 500 万个。区域之间将存在差异，工作岗位的增加与减少不总发生在同一地区，新增岗位的技能组合也不总与流失的岗位相符。就业岗位和投资的增加将刺激经济产出，从现在到 2030 年，全球 GDP 将因此实现净增长。但是，石油和天然气生产者经济体 2050 年的油气收入相比最近几年将下滑 80%，进口国油气零售业的税收也将下降 90%。
- **能源产业：**化石燃料的生产将严重收缩，但生产企业可以凭借自身的技能和资源在开发新的低排放燃料和技术方面发挥关键作用。从现在到 2050 年，电力需求将增加 1.5 倍有余。为满足需求，电力行业将扩大规模并增加资本密集度，重点将放在可再生能源、灵活性资源和电网上。大型能源消耗企业、汽车制造商及其供应商在提高能效并改用替代燃料的同时，将调整设计并更新工厂设备。
- **公民：**对无电可用和无清洁烹饪选择的公民来讲，净零排放情景最晚将于 2030 年实现电力和清洁烹饪的普及。未来十年，普及工作每年将花费大约 400 亿美元，并增加不到 0.2% 的二氧化碳排放。对全世界的公民而言，净零排放情景将带来深刻的变革，他们的积极支持对这一目标的实现必不可少。净零排放情景中约四分之三的行为改变可以由政府政策直接影响或强制规定。对公民来说，能源费用也是一个重要问题。尽管对现代能源服务的需求将大幅增加，从现在到 2050 年，在新兴市场和发展中经济体中，能源支出在家庭可支配收入中的比例仍将保持稳定。
- **政府：**为实现到 2050 年在全球范围内达到净零排放的目标，政府的行动将至关重要，为所有其他行为体的决策奠定基础。在此要特别强调四点：第一，净零排放情景的实现远不能仅仅依靠能源部长采取其职责内的行动，而是需要一个协调的跨政府部门的方法。第二，净零排放情景中油气需求的减少可能会降低一些传统的能源安全风险，但这些风险并不会消失，与此同时，对电力系统和关键矿产的依赖程度日益升高将可能导致新的脆弱性出现。第三，需要加速创新。净零排放情景中，从现在到 2030 年的减排量大多可以通过市场上现有的技术来实现，但 2050 年的减排量中有近一半将依赖目前还处于开发阶段的技术。第四，需要前所未有的国际合作水平。国际合作将有助于加快创新、制定国际标准，以及促进新基础设施的建设以连接各国市场。若没有净零排放情景中所假设的合作，向净零排放的转型将延迟几十年。

4.1 导言

到 2050 年实现净零排放是一项艰巨的任务，特别是在经济和人口增长的背景下。各国政府要坚定不移地关注这一目标，与各行业和公民一起，确保立即以协调的方式推进全球向净零排放的转型。在这一章节中，我们将探讨净零排放情景下，到 2050 年在世界范围内实现净零排放对经济、能源行业、公民和各国政府而言意味着什么。

图 4.1 ▶ 净零排放情景下，政策、基础设施和科技部署的一部分全球里程碑



国际能源署。保留所有权利。

到2050年实现全球净零排放的道路上有多个里程碑。
若任何部门滞后，都可能无法在其他领域弥补。

净零排放情景中，广泛的措施和法规将有助于影响或改变个人的购买决定、他们的住宅供热和制冷方式以及交通运输手段。许多产业也将面临变革，特别是那些目前参与能源生产或大规模用能的产业。对个人和产业而言，有一些转变可能不受欢迎，正因如此，确保能源转型的透明、公正和成本效益，以及说服公民相信改革的必要性就显

得尤为重要。这些变化将带来的好处十分显著。现在大约有 7.9 亿人无电可用，26 亿人无清洁烹饪选择。净零排放情景将展示减排如何能与普及电力和清洁烹饪以及改善空气质量努力携手并进。由于清洁能源技术将创造许多新商机和工作岗位，而且创新将激发新的产业能力，净零排放情景也将提供重大机遇。

所有这些变化都将建立在政府决策的基础之上，因此，各级和各国政府的全力支持将十分必要。到 2050 年达到全球净零排放所需的变革之大，并非政府能源或环境部门能够单独做到，也不是各个国家可以独立完成的。这些重大变革的实现需要前所未有的国际合作水平，同时要承认和顾及各个国家发展阶段的差异，并理解特定群体与社会成员所面临的困难，特别是那些可能受到净零排放转型负面影响的群体和社会成员。净零排放情景中，政府将首先制定明确的长期目标，确保这些目标从最初就有清晰的近期目标和政策措施来充分支撑，近期目标和政策措施应清楚地规划路径，并考虑到各国独特的起始条件，以支持新基础设施和技术的部署（图 4.1）。

4.2 经济

4.2.1 投资和融资

要实现到 2050 年的净零排放转型，就要大幅增加在电力、基础设施和终端用能部门的投资。未来十年中，发电的新增投资最多：年度投资将从过去五年的约 0.5 万亿美元增加到 2030 年的 1.6 万亿美元（图 4.2）。到 2030 年，对电力部门中可再生能源的年度投资将达到约 1.3 万亿美元，比有史以来化石燃料供应的最高投资水平（2014 年的 1.2 万亿美元）略高。对清洁能源基础设施的年度投资将从过去 5 年的约 2 900 亿美元增加到 2030 年的约 8 800 亿美元。这些投资将用于电力网络、公共电动车充电站、氢气加注站和进出口终端、直接空气捕捉和二氧化碳管道，以及储存设施。终端用能部门低碳技术的年投资额将从近年来的 5 300 亿美元上升到 2030 年的 1.7 万亿美元。

¹ 后者主要用于建筑物的深度改造、工业过程转型以及新低排放车辆和更高能效电器的采购等。

2030 年后到 2050 年，发电的年投资额将降低三分之一。为打造低排放电力部门而建造的许多基础设施将在净零排放情景的第一个十年内完成，并且可再生能源的费用在 2030 年后会持续下降。在终端用能部门，对电动车、CCUS、工业和交通运输中氢的使用、高能效建筑物和电器的投资将持续增加。

净零排放情景中，全球对化石燃料供应的投资将稳步下降，从过去五年的年均约 5 750 亿美元降低到 2050 年的 1 100 亿美元，上游化石燃料的投资仅限于维持现有的石油和天然气田的生产。这一投资情况反映出在净零排放情景中，化石燃料在 2050 年仍将有使用，用于配备了 CCUS 的工业过程、零排放工业过程（如石化生产），以及减排最困难的部门（通过二氧化碳移除来抵消排放）当中。2020 至 2050 年间，对低

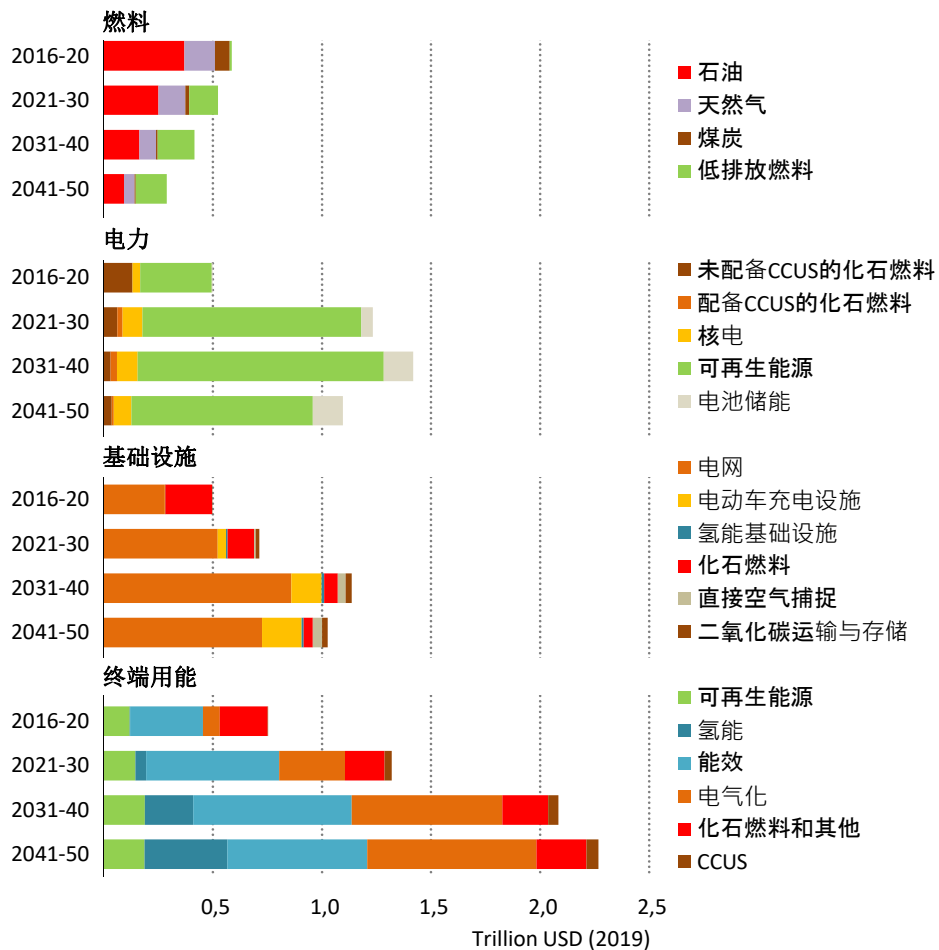
¹ 本报告中呈现的投资水平考虑到的建筑物能效改进比国际能源署《世界能源投资》报告（IEA, 2020a）中的更宽泛，因此与该报告中的数字不同。终端能效投资是指提高设备能源绩效（相对于常规设计）的增量成本。

排放燃料的投资将大幅增加，2050 年的投资额将是 2020 年的 30 多倍，达到约 1 350 亿美元。其中，氢及氢基燃料与生物燃料生产大致各占投资额的一半。

净零排放情景中 2021 至 2050 年间，能源部门年均投资总额占国内生产总值（GDP）的比例将比过去五年高约 1%。私营部门所提供的资金对于满足更高的投资需求将起到至关重要的作用，开发商、投资者、公共金融机构和政府之间需要为此加强合作。对于大型基础设施项目的开发和目前处于示范或原型期的技术（例如一些氢能和 CCUS 的应用）而言，未来五到十年的协作将尤为重要。企业和投资者已经表明对投资清洁能源技术的浓厚兴趣，但能否将兴趣转化为净零排放情景中所需的实际投资水平，也将取决于公共政策。

一些投资的障碍将需要得到解决。许多新兴市场和发展中经济体依赖公共资源来为能源项目与新的工业设施提供资金。在某些情况下，监管和政策框架的改善将促进长期资本的国际流动，为新的和现有的清洁能源技术的开发提供支持。净零排放情景中，对交通运输和建筑物投资的快速增长给政策决策者带来了不同类型的挑战。多数情况下，在节能电器或低排放车辆上所增加的资本支出，将被产品寿命期间较低的燃料和电力支出抵消有余，但一些低收入家庭和中小企业可能无法负担所需的前期资本投入。

图 4.2 ▶ 净零排放情景下，不同部门和技术的全球年均能源投资需求



国际能源署。保留所有权利。

*发电、基础设施和终端用能部门的投资迅速增加；
化石燃料的投资急剧下降，但被低排放燃料投资的增长部分抵消。*

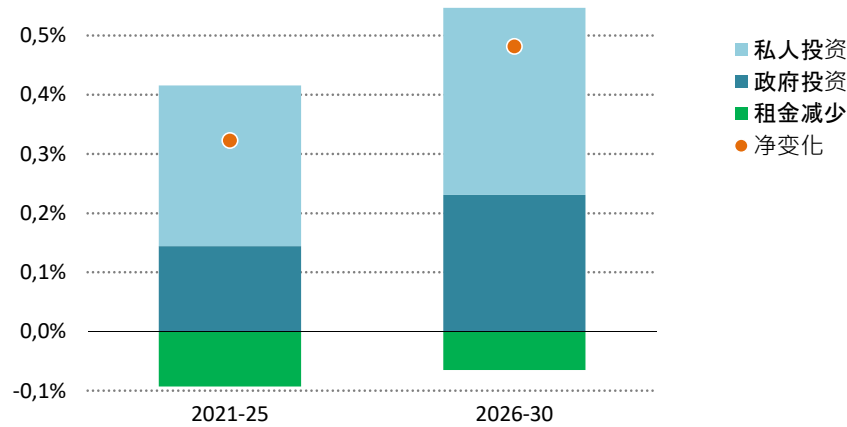
注：CCUS = 碳捕捉、利用和封存；EVs = 电动车。基础设施包括电力网络、公共电动车充电设施、二氧化碳管道与储存设施、直接空气捕捉与封存设施、氢能加注站，以及氢气进出口终端。

4.2.2 经济活动

到 2050 年实现净零排放所需的能源转型将对所有经济活动产生直接或间接的影响。在与国际货币基金组织的协作下，我们为净零排放情景中能源部门的变化对全球宏观经济的中期影响建立了模型。这一分析表明，净零排放情景中私人人和政府对清洁能源

技术支出的激增将创造大量的就业机会并刺激工程、制造和建筑行业的经济产出。因此，在 2026 至 2030 年间，GDP 的年增长将比既定政策情景²的水平高出近 0.5%（图 4.3）。³

图 4.3 ▶ 与既定政策情景相比，净零排放情景下全球 GDP 的年增长率变化



国际能源署。保留所有权利。

*净零排放情景中，政府和私人投资的激增对全球 GDP 产生了积极的影响，
但各地区之间存在巨大的差异*

注：GDP = 国内生产总值。租金下降的主要原因是化石燃料收入的减少。

来源：国际能源署基于国际货币基金组织的相关数据的分析。

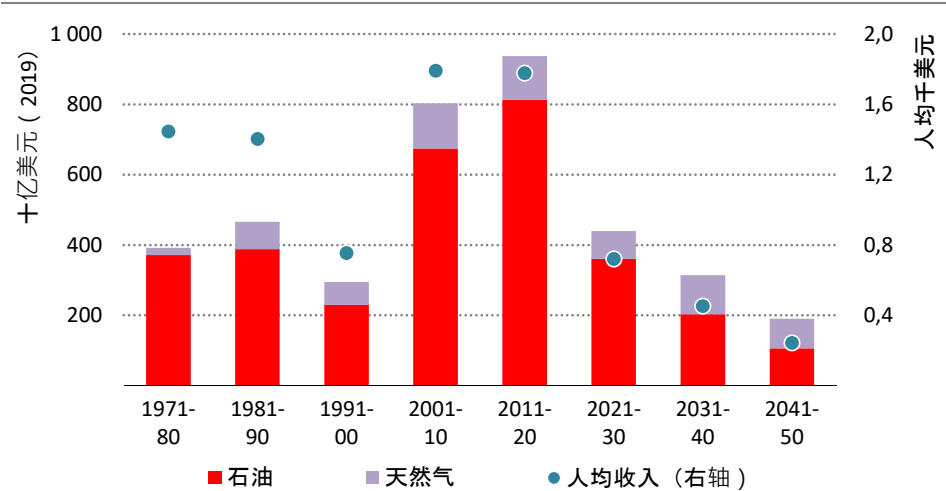
不同地区间的宏观经济影响差异巨大。化石燃料使用量和价格的下降将导致生产者经济体⁴ 的 GDP 下滑，在这些经济体中，石油和天然气的销售收入往往承担教育、卫生保健和其他公共服务的很大一部分公共支出。石油和天然气需求的下降，以及随之而来的国际油气价格的下跌，将导致生产者经济体的净收入下降至历史低点（图 4.4）。一些石油资源成本最低的国家【包括石油输出国组织（欧佩克）的成员】在这种情况下将获得更大的市场份额，但即便如此这些国家也会出现收入的大幅下降。为应对这些社会挑战，需要进行结构性改革，包括加速改革低效化石燃料补贴，以及加快使用碳氢化合物资源来生产低排放燃料（如氢和氢基燃料）的步伐（见 4.3.1）。

² 国际能源署的既定政策情景是对全球能源系统的预测，其依据是世界各国政府已经出台的政策和措施，以及官方目标和计划中已宣布的政策，如根据《巴黎协定》所提出的国家自主贡献（见第 1 章）。

³ 净零排放情景中包含了公共和私人投资增长与石油相关收入减少的一般均衡宏观经济影响估计，由国际货币基金组织使用其全球货币和财政综合模型（GIMF）提供相关数字。

⁴ 生产者经济体是石油和天然气的出口大国，它们依赖碳氢化合物收入为国家预算提供很大一部分资金，包括中东国家、俄罗斯和里海地区。

图 4.4 ▶ 净零排放情景下，生产者经济体的石油与天然气销售收入



国际能源署。保留所有权利。

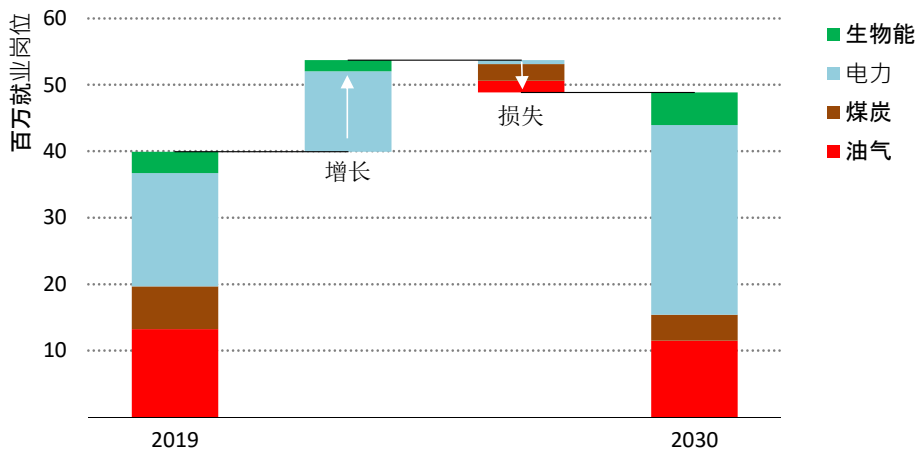
生产者经济体需要进行结构性改革并开发新的收入来源，
但这些举措不太可能完全弥补油气收入的大幅下降

净零排放情景的宏观经济影响有很大的不确定性。这些影响取决于众多因素，包括政府开支的融资方式、改善健康的益处、消费者账单的变化、消费者行为改变的广泛影响，以及能源创新加速可能带来的生产力溢出效应。尽管如此，这些影响很可能会低于气候变化所造成的损失估算 (OECD, 2015)。若转型能够协调有序地进行，也很可能不会对全球造成重大整体性金融冲击，但这需要政府、金融监管机构和企业部门的密切关注。

4.2.3 就业

净零排放情景中，随着对能源的投资和支出发生变化，能源部门的就业将相应产生显著转变。据我们估计，现在全世界大约有 4 000 万人口直接从业于石油、天然气、煤炭、可再生能源、生物能源和能源网络行业 (IEA, 2020b)。净零排放情景中，从现在到 2030 年，清洁能源的就业人数将增加 1 400 万人，而石油、天然气和煤炭燃料供应以及发电厂的就业人数将减少约 500 万人，工作岗位将净增接近 900 万 (图 4.5)。

图 4.5 ▽ 净零排放情景下，2019-2030 年全球能源部门就业情况



国际能源署。保留所有权利。

随着清洁能源部门的新增就业超过化石燃料部门流失的岗位，
从现在到2030年能源部门的总体就业人数将增加近900万人

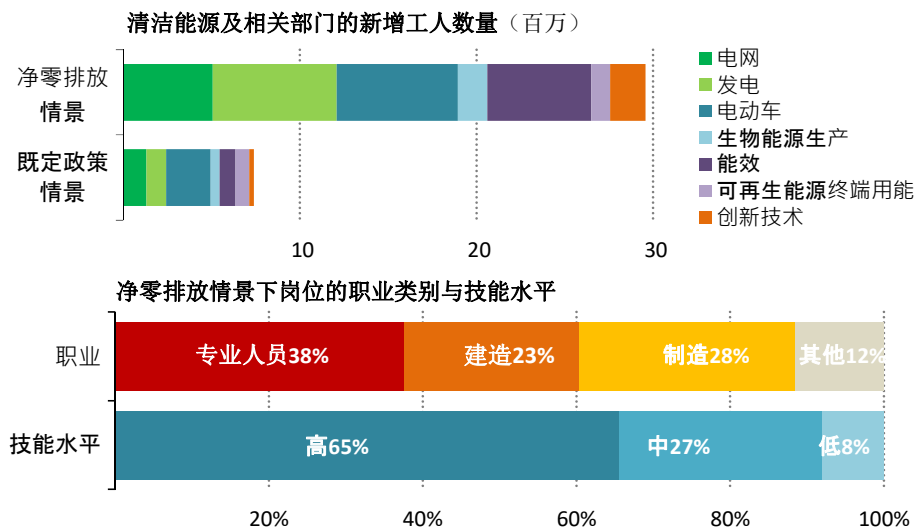
新增与流失的岗位不一定在同一地区，而且，清洁能源工作所需的技能组合可能无法从流失的岗位中直接转移。在严重依赖化石能源生产或转型活动的群体中，岗位流失将最为明显。即使直接流失的能源工作数量不多，对当地经济也可能产生巨大的冲击。为用公正、以人为本的方式管理这些转型，几乎定会需要政府的支持。在为此做好准备的过程中，需要更好地了解当前能源行业的就业情况。政府可以采取的一种有效措施是使用更详细的能源行业就业调查方法，如《美国能源和就业报告》中所使用的方法（NASEO and Energy Futures Initiative, 2021）。

除了净零排放情景中新增的 1 400 万个清洁能源岗位外，在高效电器、电动和燃料电池车以及建筑物改造与节能建筑方面的支出变化将创造更多的就业机会。这些变化将要求进一步增加 1 600 万名工人，也就是说，在净零排放情景中，到 2030 年清洁能源、能效和低排放技术领域将增加 3000 万名从业者（图 4.6）。⁵ 由于投资的注入，发电、电力网络、电动车制造和能源效率将跻身新增就业的行业之列。例如，净零排放情景中，太阳能和风能领域的工作岗位将是目前的 4 倍多。净零排放情景中，到 2030 年，这些部门中近三分之二的工作者将是高技能人才，并且大多数将需要大量培训。此外，随着能源投资总额增加一倍以上，相关领域将出现新的就业机会，例如批发贸易、金融和法律服务业。

在许多情况下，有可能将工人转移到同一企业的新产品生产线，例如，在汽车制造业中，当重新配置生产来制造电动车时。然而，提供产品和服务（例如将被电池等新部件所取代的内燃机）的专业化供应链企业将承担更大的风险。

⁵ 包括新岗位和让现有员工转产而填补的岗位。

图 4.6 ▶ 净零排放情景和既定政策情景下，清洁能源及相关部门 2030 年的新工人数量以及技能水平和职业占比



国际能源署。保留所有权利。

为满足对清洁能源、能效和低排放技术的更高需求，到2030年将需要约3000万新工人，其中高技能职位将占一半以上

注：EVs = 电动车。

与当今的情况相比，净零排放情景下创造的新工作往往更具地理灵活性并且分布也更加广泛，大约 40% 的岗位将靠近施工地点，例如，建筑物能效优化或风力涡轮机的安装，其余的岗位则与生产场所相绑定。如今的许多清洁能源技术（如电池和太阳能光伏板）的制造能力都集中在特定地区，尤其是中国。净零排放情景下，对清洁能源技术需求的快速增长将要求新的生产能力上线，这些生产能力可位于任何地区。率先行动的国家和企业可能将在响应快速增长的需求方面夺得战略先机。

4.3 能源产业

4.3.1 石油和天然气

净零排放情景中所设想的能源转型涉及石油和天然气生产的大幅收缩，这将对所有生产这些燃料的企业产生深远的影响。石油需求将从 2020 年的约 9 000 万桶/天下降到 2050 年的 2 400 万桶/天，与此同时，天然气需求将从 3.9 万亿立方米下降到约 1.7 万亿立方米。净零排放情景中，除了已经批准开发的油气田外，将无需再开拓新油气田，因此，将不需要进行化石燃料的勘探工作。这对企业的收益构成了明显威胁，但机遇也同时存在。油气工业的资源 and 技能可以与一些新技术相匹配，这些技术被用于为很可能是减排最困难的部门处理排放问题，以及生产一些在净零排放情景中需求快速增长

长的低排放液体和气体燃料（见第 2 章）。通过与政府及其他利益攸关方的合作，石油和天然气行业可以在大规模开发这些燃料和技术以及建立新商业模式方面发挥主导作用。

石油和天然气行业非常多样化，不同的企业在向净零排放转型的过程中可能会采取迥然不同的策略。但不管怎样，尽量减少核心油气作业的排放应是所有油气企业的首要任务。这包括处理作业过程中产生的甲烷排放（净零排放情景中，甲烷排放预计在 2020 至 2030 年间将下降 75%）和消灭燃除。企业还应尽可能使用可再生电力进行电气化作业，可以通过电网购买，也可以将离网的可再生能源并入上游设施或输送基础设施中。对于能够展示强有力的有效减排行动的生产者，可以令人信服地论证他们的石油和天然气资源应该比高排放的选择更受欢迎。

一些油气企业可能会选择成为“能源公司”，专注于低排放技术和燃料，包括可再生电力、电力配送、电动车充电和电池。若干对实现净零排放至关重要的技术，如 CCUS、氢能、生物能源和海上风电，都与油气企业的一些现有技能、能力和资源似乎特别匹配。

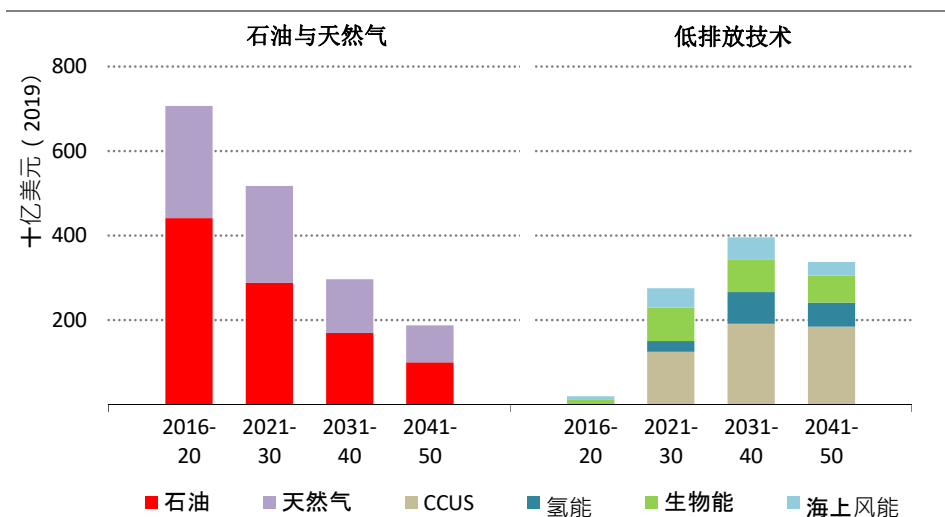
- **碳捕捉、利用和封存（CCUS）。**石油和天然气行业在开发和部署 CCUS 方面已经领跑全球。目前，在大规模设施中捕捉的 4 000 万吨二氧化碳中，约有四分之三来自石油和天然气作业，油气作业中通常会产生浓缩的二氧化碳流，相对容易捕获且成本效益高（IEA, 2020c）。石油和天然气行业也拥有大规模工程、管道、地表下与项目管理的技能和能力来处理大量的二氧化碳，并帮助扩大 CCUS 的部署。
- **低排放氢与氢基燃料。**石油和天然气企业可以通过多种方式对开发和部署低排放氢做出贡献（IEA, 2019a）。净零排放情景中，2050 年近 40% 的氢气是在配备了 CCUS 的设施中利用天然气制取的，这为各国和企业提供了一个以符合净零排放要求的方式利用其天然气资源的重要机遇。2050 年，氢气的总产出将达到 5.3 亿吨，其中约 30% 将被加工成氨和合成燃料（相当于约 750 万桶油当量/天）。生产所涉及的转化过程与石油和天然气在加工和精炼过程中所使用的技能及设备之间存在许多潜在的协同作用。在液体和气体的管道和船舶运输方面，石油和天然气企业也积累了长期的经验。
- **先进生物燃料和生物甲烷。**净零排放情景中先进生物燃料的生产将大幅增长，但这能否实现主要取决于持续的技术革新。许多油气企业在这些领域已经启动研发项目并可能成为领先生产商。作为一种低排放的天然气替代品，生物甲烷可以在大型集中式设施中生产，这可能与现有天然气生产商的知识和技术专长相匹配。（IEA, 2020d）。
- **海上风能。**一个标准的海上风电项目中约有 40% 的项目全寿命成本涉及与海上油气部门的重大协同作用（IEA, 2019b）。石油和天然气行业拥有相当多的海上工作经验，这些经验在海上风电场的地基和水下结构的建设中可能很有价值，特别是在安装和运行期间使用船舶的时候。海上风电场投入运营后，油气企业在维护安全标准方面的经验对海上风电场的维护和检查也会很有帮助。

石油和天然气企业有条件加速这些技术的开发和部署并取得领先的商业优势。在净零排放情景中，到 2030 年，对符合油气企业技能和专长的低排放技术的投资将超过对

传统石油和天然气业务的投资。2021 至 2050 年间，这些技术与传统油气业务的总资本支出将达到平均每年 6500 亿美元，略低于 2016 至 2020 年间对石油和天然气项目的年投资额（图 4.7）。

并非所有的石油和天然气企业都会选择进入其他类型的能源领域进行多元化发展。比如说，我们还远不能确定，国有石油企业的所有国是否会在企业的核心业务之外指示其进行多元化发展及开发低排放能源；其他企业可能决定只集中精力以尽可能清洁高效的方式供应石油和天然气，并将收入回报股东。然而，可以明确的是，无一家石油和天然气企业可以置身于净零排放情景的影响之外，并且，油气行业的所有部门都需要做出应对决策（IEA, 2020e）。

图 4.7 ▸ 净零排放情景下，石油和天然气以及为油气行业带来协同作用的低排放技术的年均投资额



国际能源署。保留所有权利。

到 2030 年，对符合油气企业技能和专长的低排放技术的投资将超过对传统业务的投资

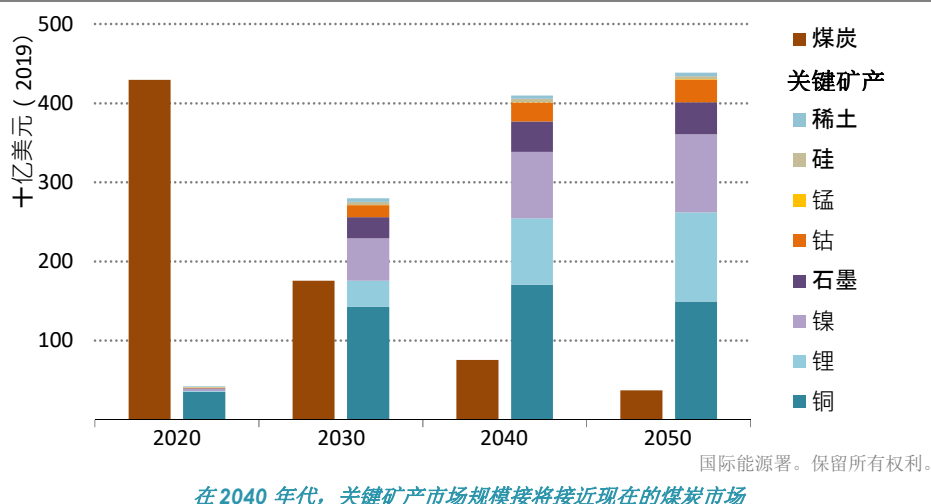
注：CCUS = 碳捕捉、利用和封存。

4.3.2 煤炭

根据净零排放情景的预测，煤炭使用的急剧下降将对采矿公司和拥有大量现有生产能力的国家的未来产生重大影响。2050 年，净零排放情景中约 4.7 亿吨煤当量的煤炭将用于配备了 CCUS 的设施中（2050 年全球煤炭需求的 80%），这将阻止需求的进一步下滑。然而，净零排放情景中不再需要新煤矿、扩建或延期现有煤矿。再培训和区域振兴计划在减少失业在当地的社会影响并助力工人和社区找到替代生计方面将发挥至关重要的作用。在受煤矿关闭影响最严重的地区，也可能有机会建设新的清洁能源设施，包括关键矿产的新加工设施。

不过，对于采矿企业来讲，净零排放情景中煤炭需求的萎缩可能会被其他原矿开采需求的增加所抵消，包括那些对许多清洁能源技术极其重要的原矿，如铜、锂和镍（IEA, 2021a）。在净零排放情景中，这些关键矿产的全球需求将迅速上升（图 4.8）。例如，到 2030 年，用于电池的锂的需求将增至目前的 30 倍，与此同时，对主要用于制造电动车发动机和风力涡轮机的稀土的需求将上升至目前的 10 倍。关键矿产资源与现有煤矿的所在地或国家不尽相同，但采矿企业的技能和经验在确保这些矿产的供应能以合理的价格满足需求方面起到至关重要的作用。到 2040 年代，这些矿产的全球市场规模将接近现在的煤炭市场。

图 4.8 ▽ 净零排放情景下，煤炭和部分关键矿产的全球价值



注：包括煤炭和用于清洁能源技术的部分关键矿产的总收入。关键矿产的价格是基于对成本增长的保守假设（从现在到 2050 年将上升约 10%-20%）。

4.3.3 电力

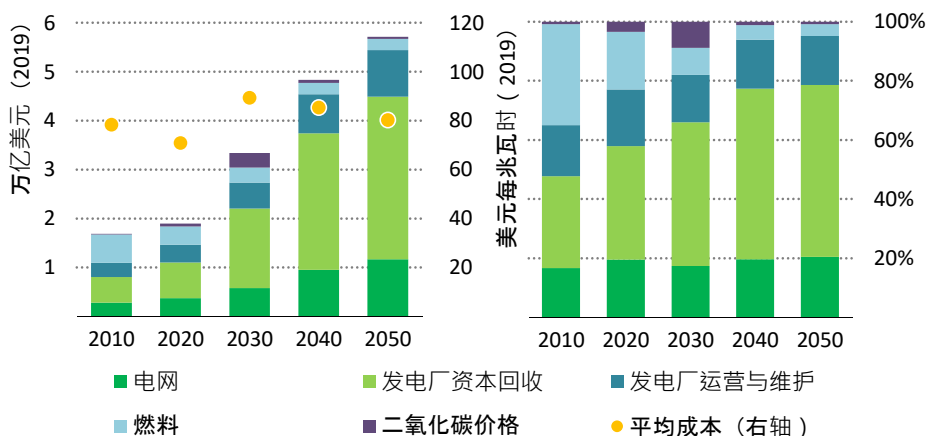
要实现净零排放，既要大规模扩展电力部门，以满足不断增长的全球经济的电力需求，也要进行终端用能从化石燃料向电气化的转型并发展电解制氢。净零排放情景中，在电力需求增加 1.5 倍有余的同时，行业的快速转型意味着从 2020 到 2050 年总电力供应成本将增加两倍，每单位发电量的平均成本将小幅提高（图 4.9）。

在最近趋势的基础上，电力供应行业的资本密集度将进一步提高。资本在总成本中的比例将从 2020 年的不到 60%（已经比 2010 年高出 10 个百分点）上升到 2050 年的约 80%。这一变化的主要原因是可再生能源的大幅增长，以及相应增加网络容量和灵活性资源（包括电池储能）的需要。在 2020 年代末和 2030 年代，随着现有的太阳能和风能容量达到运行寿命末期，其升级和替换也将提高资本需求。⁶ 净零排放情景中新

⁶ 它们通常在运行 25-30 年后需要更换，而许多常规水电、核电和煤电厂的运行时间要长得多，但需要对其定期增加投资。

增的核电容量将进一步加大资本支出。电力行业资本密集度的上升将使电网运营商更加重视对新投资风险的限制，也更注重确保每一年都要有充足的收入，以资助不断增长的投资需求——一些电网企业在 2020 年的经历凸显了这一点的重要性，由于新冠疫情的影响，当年电力需求低迷，一些企业因此陷入了财务困境（IEA, 2020f）。

图 4.9 ▸ 净零排放情景下，全球电力供应成本的组成部分



国际能源署。保留所有权利。

到2050年，电力系统的成本将增加两倍，使平均供应成本小幅提高；
可再生能源的大幅增长使该行业的资本密集更高

注：供电成本包括生产和向消费者传送电力的所有直接成本。电池储能系统包含在发电厂资本回收中。

可再生能源在发电结构中的比重不断攀升，对电力市场的设计将产生重大影响。当太阳能、风能、其他可变可再生能源和核能发电的份额达到较高水平时，边际成本为零的可用电力供应往往高于电力需求，从而导致电力批发价格为零甚至为负值。净零排放情景中，若不改变电力市场的设计，到 2050 年大约 7% 的风电和太阳能发电产出将超过可以消纳的范围（因而被弃用），而且，即使积极使用需求响应，一年中零价格的小时数在主要市场中的比重也将从现在的近乎为零上升到 30% 左右。如果可再生能源在发电结构中的比重按照净零排放情景的设想不断攀升的话，那么，对电力市场的设计进行重大改革，以便为包括电池储能和可调度发电厂等灵活性资源在内的投资提供信号，将是非常可取的举措。

用电的增加必然会提高相关成本。净零排放情景下，全球发电厂 2050 年的运营和维护成本将接近 1 万亿美元，是 2020 年的 2.5 倍。2020 年，化石燃料发电厂的维护费用为 1500 亿美元，可再生能源所需的维护费用与之接近，主要用于水力发电。到 2050 年，可再生能源的运营和维护成本将达到 7800 亿美元，其中大部分将用于满足规模大幅扩展的风能和太阳能光伏发电所需，仅海上风电就将占 900 亿美元。

电力行业中化石燃料使用的急剧减少和燃料价格的降低意味着与燃料和二氧化碳价格相关的成本将大大降低。这一现象延续了最近由许多市场中接近历史最低点的天然气

价格所推动的趋势。即使二氧化碳的价格随着时间的推移而上涨，电力的快速脱碳意味着燃料和二氧化碳占总成本的比重将不断下降，将从 2020 年的约四分之一减少到 2050 年的 5%。燃料成本的天平将偏向低排放能源，主要是核电和生物能源（包括结合 CCUS），不过仍有一些燃料成本与配备了 CCUS 的发电厂所使用的天然气和煤炭有关。

这种情况下的一项挑战是如何处理运行中的燃煤电厂。2020 年，全世界燃煤电厂和电热厂装机超过 2 100 吉瓦，其二氧化碳排放占有所有能源相关二氧化碳排放的近 30%。处理这些燃煤电厂的选择包括：对燃煤电厂进行 CCUS 技术、生物质或氨共燃改造；改变燃煤电厂用途，专注于提供灵活性；以及在可行的情况下，逐步淘汰燃煤电厂。净零排放情景下，所有无减排的燃煤电厂到 2030 年将在发达经济体中被逐步淘汰，到 2040 年将在新兴市场和发展中经济体中被淘汰。这样一来，燃煤电厂的排放量将从 2020 年的 9.8 吉吨下降到 2030 年的 3 吉吨，到 2040 年将降至仅为 0.1 吉吨（剩余排放量来自于配备了 CCUS 的燃煤电厂）。⁷

另一项挑战与所设想的产能退役规模及相关的场地修复有关，煤炭首当其冲。2020 至 2050 年间，燃煤电厂的退役速度将达到过去十年的近三倍。每个场地的停用工作往往能持续十年并牵涉大笔费用，还可能包括关闭矿场。某些情况下，在同一场地建设可再生能源项目可能具有经济吸引力，可以利用电网连接并降低修复成本。到 2050 年，数以千计的燃气和燃油发电厂也将退役，不过，这些电厂通常位于电网的战略性位置上并且许多可能将直接由电池储能系统取代。

发达经济体中存在着大量老化的核反应堆，尽管为它们进行过许多次使用寿命延期，反应堆的退役数量还是会增加。净零排放情景下，未来 30 年全球年均核电退役的数量将比过去十年高 60%。每个核退役项目都能持续数十年，成本从几亿美元到远远超过 10 亿美元（大型反应堆）不等（NEA, 2016）。

4.3.4 能源消耗行业

净零排放情景中的变革将对汽车制造行业及其材料和部件供应商产生巨大的影响。2020 年，内燃机传统车辆占全球轿车销量的约 95%，占全球卡车销量的近 100%。净零排放情景中，2030 年电动车将占全球轿车销量的约 60%，2040 年电动或燃料电池卡车将占重型卡车销量的 85%。净零排放情景下，车辆零部件供应商和车辆制造商都将重新装配工厂，在设计中融入电池和燃料电池并调整供应链，以最大限度地减少车辆生命周期的排放强度。这为重新设计现有零部件和制造工艺以提高效率并降低成本提供了机遇。

净零排放情景中电动车销量的快速增长要求立即扩增新电池供应链，以及充电和低排放燃料的加注基础设施。净零排放情景下，电池产能与 2020 年的不到 0.2 太瓦时相比，到 2030 年将增加到 6.5 太瓦时以上。扩大电池制造能力的任何延迟都将会对电动

⁷ 假设二氧化碳的捕集率为 90%，更高的捕集率在技术上是可能的，但会降低效率并增加成本（IEA, 2020g）。

车的推广产生不利的影响，并在成本降低方面拖慢净零排放情景中受益于类似制造工艺和专业知识（如燃料电池车和电解装置）的其他清洁能源技术的速度。

在航空和航运业，低排放液体燃料将对减排起到至关重要的作用。改用一些此类燃料对船舶设计的影响微乎其微：在航运中使用氢基或生物燃料只需改变马达和燃料系统，而生物煤油或合成煤油可以用在现有的飞机上。然而，净零排放情景中需要新的船舶燃料加注和加注基础设施，低排放燃料的使用也需要新的安全和标准化规范、许可程序、建设和设计，以及针对燃料生产与使用的国际规范、监督、报告及核查体系。

在重工业部门——钢铁、水泥和化学品——大多数深度减排的技术目前还未面市。净零排放情景中，材料生产商在政府分担风险机制的帮助下，将很快展示近零排放工艺并开始调整其现有的生产性资产。对跨国企业来讲，这包括制定技术转让战略，以便在各个工厂推广这些工艺。国际合作将有助于确保为各方提供一个公平的竞争环境。在国家内部，工作的重点将放在工业枢纽上，以便通过促进新基础设施（如二氧化碳运输和储存）和低排放能源供应的规模经济来加速多个工业部门的减排。

净零排放情景中，材料生产商将与政府合作，为用近零排放工艺所生产的材料创建国际认证体系，从而与传统材料相区分。材料购买商（如汽车制造商和建筑企业）将得以订立商业协议，以溢价购买近零排放材料。在大多数情况下，鉴于材料一般只占制造成本的一小部分，溢价对最终的产品价格影响不会很大 (Material Economics, 2019)。

4.4 公民

4.4.1 与能源有关的可持续发展目标

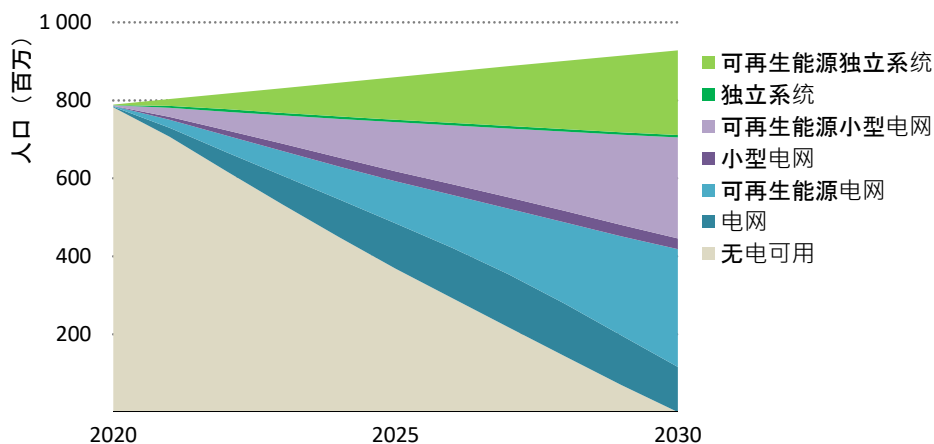
包容并以人为本的转型将是实现到本世纪中叶，全球快速、持续地共同走向净零排放的关键。净零排放情景将实现联合国与能源相关的可持续发展目标（SDG），即到2030年普及清洁现代能源（SDG 7.1）以及减少空气污染所造成的过早死亡（SDG 3.9）的目标。为实现净零排放情景中到2030年全面普及低排放电力和清洁烹饪解决方案的目标，要使用许多技术、方案和措施，这些也有助于减少家庭能源使用中的温室气体排放。

能源普及

2020年，世界范围内大约有7.9亿人无电可用，其中的大部分生活在撒哈拉以南非洲和发展中亚。还有大约26亿人无清洁烹饪选择：其中35%在撒哈拉以南非洲，25%在印度，15%在中国。无法获得能源不仅阻碍经济的发展，而且会对健康造成严重的伤害，并妨碍性别平等和教育的进步。⁸

⁸ 依赖传统方式使用生物质能烹饪的家庭，每天要花大约1.4小时捡柴和数小时的时间用低效炉灶做饭，这个负担主要由女性承担 (IEA, 2017)。

图 4.10 ▶ 净零排放情景下，新兴市场和发展中经济体中新增通电人口的入网类型



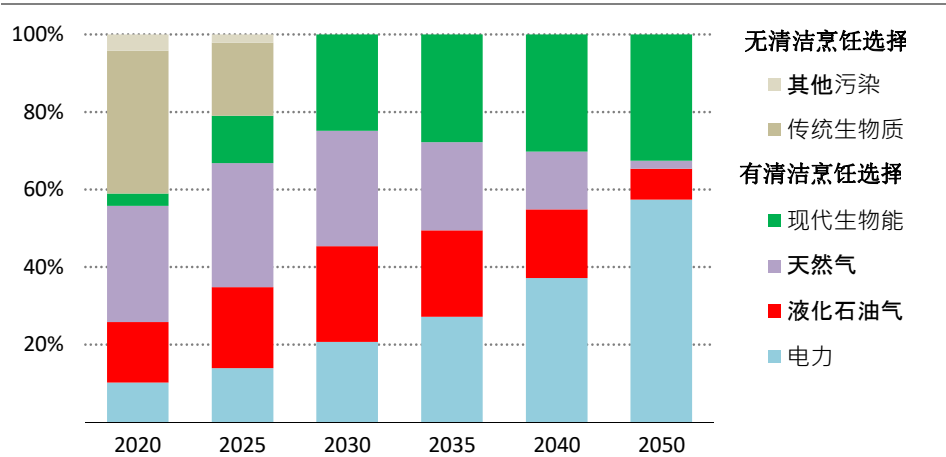
国际能源署。保留所有权利。

到2030年，新增通电人口中将有80%使用可再生能源电力并有刚过半数通过离网系统用电

到2030年，大约45%的无电可用的人口将通过接入主电网的方式来获得电力，其余则通过小型电网（30%）和独立解决方案（25%）得到供电（图4.10）。几乎所有的离网或小型电网解决方案都使用100%可再生能源。依靠柴油发电机的分散式系统（这种系统也被配置于一些并网系统中以弥补可靠性低的问题）后来将被逐步淘汰并由太阳能储能系统取代。实现电力的全面普及并不会导致全球排放量的大幅增加，2030年，二氧化碳的排放量将因此增加不到0.2%。实现电力的全面普及也将提高能效并加速器具的电气化，这对2030年后新兴市场和发展中经济体的建筑物减排将起到极其重要的作用。

在清洁烹饪方面，净零排放情景中到2030年，获得清洁烹饪方式的人口将有55%使用以现代生物质、沼气或乙醇为燃料的改良生物质炉灶，25%使用液化石油气，20%使用电炊具（图4.11）。液化石油气将是城市地区所采用的主要燃料，而改良炉灶则将是农村地区的主要选择。使用液化石油气将导致2030年的二氧化碳排放量略有增加，但由于以传统方法使用生物质所产生的甲烷、一氧化二氮和黑碳的排放量下降，总体温室气体净排放量还是会减少。此外，2030年后，使用从城市固体废弃物和其他可再生原料中以可持续方式生产的生物来源丁烷和丙烷（生物质液化石油气）可以使液化石油气日益脱碳。从技术潜力上讲，2050年非洲从城市固体废弃物中生产的生物质液化石油气可能足以满足超过7.5亿人的烹饪需求（GLPGP, 2020; Liquid Gas Europe, 2021）。

图 4.11 ▶ 净零排放情景下，新兴市场和发展中经济体使用主要烹饪燃料的人口比例



国际能源署。保留所有权利。

到2030年，传统生物质能将被以生物能源和液化石油气为主的现代能源所取代；
到2050年，电力、生物能源和生物质液化石油气将满足大部分的烹饪需求

注：现代生物能源包括改良炉灶、沼气和乙醇。液化石油气包括化石和可再生燃料。

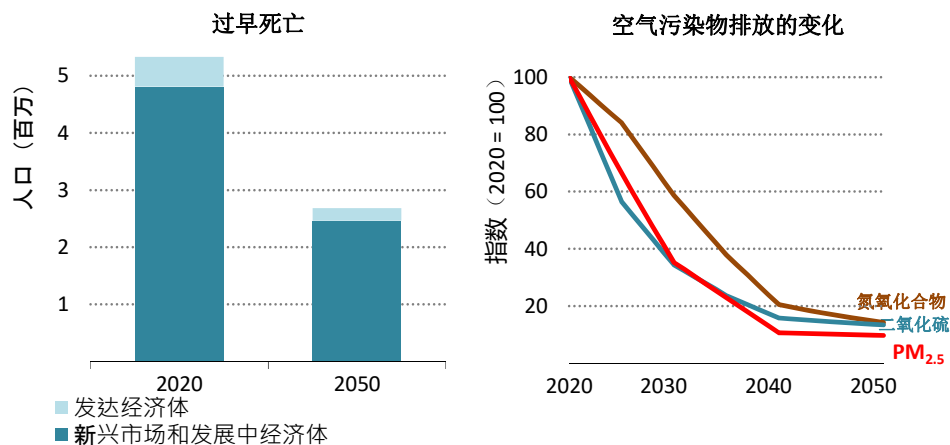
要实现到 2030 年清洁能源的全面普及，需要政府和捐助者将扩大普及放在复苏计划及方案的核心位置。这样做有多项好处：大量投资于能源普及项目将立即带动经济发展，创造当地就业机会，并通过卫生服务和食物链的现代化转型持久改善社会福祉。净零排放情景中，从现在到 2030 年，每年将有约 350 亿美元用于扩大低收入国家人民的电力普及，近 70 亿美元用于他们的清洁烹饪解决方案。

空气污染与健康

现在，全球 90% 以上的人口都暴露在空气污染中。2020 年，空气污染导致了约 540 万人过早死亡，削弱了经济生产力并给医疗保健系统带来了额外负担。这些死亡大多发生在新兴市场和发展中经济体中。其中，一半以上是由于暴露在室外空气污染中而死亡；其余则是因为呼吸了室内受污染的空气，其主要原因是以传统方式使用生物质进行烹饪和供热。

三种主要空气污染物——二氧化硫（SO₂）、氮氧化物（NO_x）和细颗粒物（PM_{2.5}）——与能源相关的排在净零排放情景中将迅速下降。2020 至 2050 年间，二氧化硫的排放量将下降 85%，主要归功于大规模淘汰燃煤电厂和工业设施。由于电力、氢能和氨能在交通运输部门的使用增加，氮氧化合物的排放量也将下降约 85%。发展中国家对清洁烹饪燃料的利用增加，加上工业和交通运输的空气污染控制措施，PM_{2.5} 的排放量将降低 90%（图 4.12）。净零排放情景中空气污染的减少将使 2050 年过早死亡的人数与 2020 年相比下降大约一半，相当于每年拯救约 200 万人的生命，其中约 85% 在新兴市场和发展中经济体中。

图 4.12 ▽ 净零排放情景下，全球过早死亡人数和空气污染物排放状况



国际能源署。保留所有权利。

主要空气污染物的减少意味着每年过早死亡的人数将减少 200 万人

来源：国际能源署基于国际应用系统分析研究所的数据所做的分析。

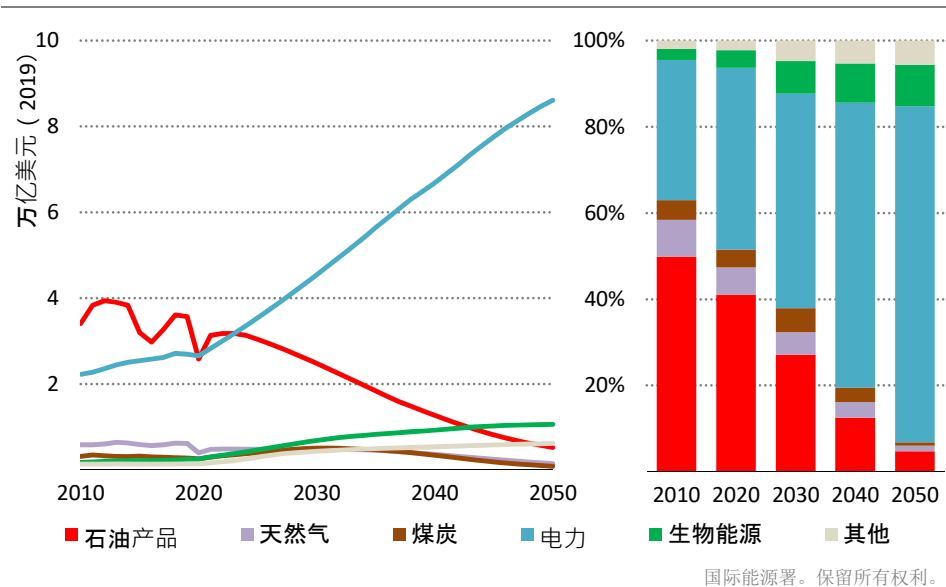
4.4.2 可负担性

能源总支出

能源的可负担性是政府、企业和家庭所关心的一个关键问题。全球的直接能源支出，即所有终端使用者所支付的燃料账单总额，与 2020 年的 6.3 万亿美元相比，到 2030 年将增加 45%，到 2050 年将增加 75%，这在很大程度上反映了该时期的人口与 GDP 增长。从能源支出在全球 GDP 中所占的比重来看，相关数据显得颇为不同：从现在到 2030 年，直接能源支出总额将保持在 8% 左右（与过去五年的平均水平相似），但随后将下降到 2050 年的 6%。这一下降将抵消很大一部分用于购买新的、能效更高的耗能设备的较高费用。

净零排放情景中能源支出的增加，有一部分与二氧化碳价格的上涨和化石燃料与电力消费补贴的取消有关。在净零排放情景中，终端使用者所支付的二氧化碳价格（碳税和交易计划）在高峰时，所产生的全球收入在 2030 年至 2035 年间将达到每年近 7000 亿美元，随后，由于总体排放量的减少，这一收入将稳步下降：这些收入可以回流到经济中或用于改善消费者福利，特别是为低收入家庭。净零排放情景中，化石燃料的消费补贴也将被逐步取消，许多此类补贴过度惠及了使用更多受补贴燃料的富裕阶层。逐步取消补贴将为消费者提供更高效的价格信号，并激发更多节能行动和提高能源效率的措施。取消补贴对低收入家庭的影响可以通过直接资助方案或其他对经济的总体负担较低的方式来抵消。

图 4.13 ▹ 净零排放情景下，不同燃料的全球能源支出



到2050年，能源支出总额将增加75%，主要用于电力

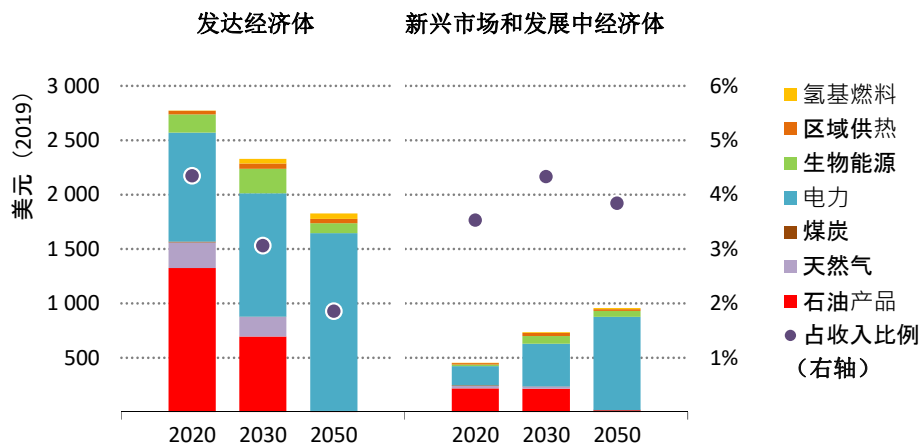
注：其他 = 氢基和合成燃料，以及区域供热。

净零排放情景中全球能源系统的转型推进了能源支出结构的重大转变。电力支出在 2020 年首次超过了石油产品的支出，达到 2.7 万亿美元（占能源支出总额的 45%），并将于 2050 年上升至 8.5 万亿美元以上（占能源支出总额的 80%）（图 4.13）。零售电价将平均增长 50%，对电力支出总额的上升起到了推动作用。几十年来，石油支出一直在整体能源支出中占据主导地位，2020 年代，石油支出将进入长期衰退期，其支出占比将从 2020 年的 40% 下降到 2050 年的仅占 5%。从长远来看，天然气和煤炭的支出也将下降，而低排放燃料支出的升高抵消了其影响。到 2040 年，生物能源的支出将达到每年约 9 000 亿美元，与此同时，包括氢基产品在内的其他低排放燃料将在市场上站稳脚跟，并最晚于 2050 年建立起每年价值约 6 000 亿美元的市场。

家庭能源支出

在净零排放情景中，家庭的直接能源支出，包括供热、制冷、电力和乘用车燃料，在可支配收入中的比重将下降，不过各国之间存在很大差异（图 4.14）。

图 4.14 ▶ 净零排放情景下，家庭年均能源支出



国际能源署。保留所有权利。

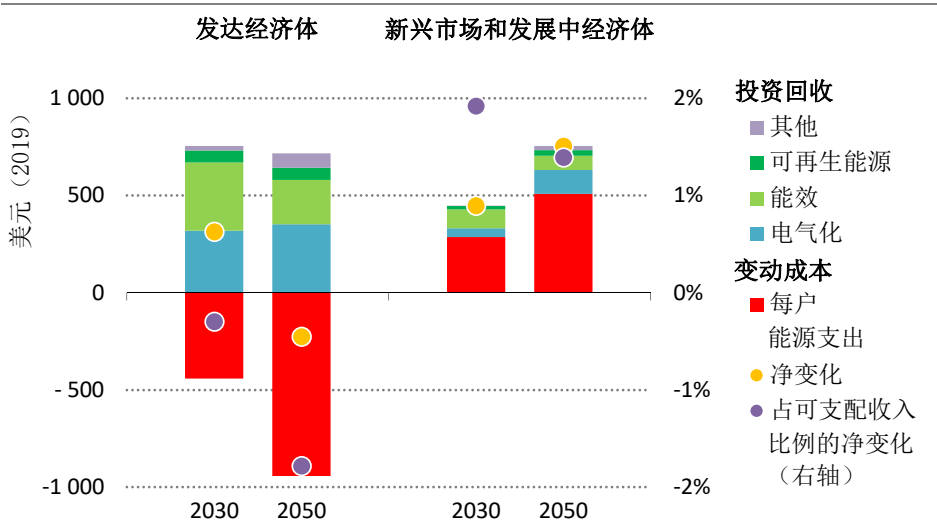
能源支出占家庭可支配收入的比例在新兴市场和发展中经济体中将保持稳定，而在发达经济体中将大幅下降

注：氢基燃料包括氢、氨和合成燃料。

在发达经济体中，由于大力推进能源效率以及成本效益高的电气化转型，年均能源支出将从 2020 年的约 2 800 美元下降到 2030 年的 2 300 美元。2020 年，石油产品占家庭能源支出的近一半，2030 年，其比重将下降到 30%，2050 年将降至几乎为零，原因是电动车的迅速流行和石油价格的下行压力。天然气费用目前占支出总额的约 10%，随着供热和烹饪的电气化转型，它在 2050 年也将降至几乎为零。电费在家庭燃料费用中的比重将从 2020 年的大约 35% 上升到 2050 年的 90%，家庭对电价和耗电量因此会更加敏感。收入的增加意味着家庭的能源支出占可支配收入的比例将从 2020 年的 4% 下降到 2050 年的 2%。

在新兴市场和发展中经济体中，对现代能源服务的需求将大幅增长，这与人口增多、经济增长、收入上升以及电力和清洁烹饪选择的全面普及有关。与发达经济体一样，电费将占 2050 年能源支出的绝大部分。使用更节能的电器和设备将抑制一些需求的增长，但在净零排放情景中，从现在到 2030 年家庭能源支出仍将增长 60% 以上，到 2050 年将增加一倍以上。然而，在新兴市场和发展中经济体中，能源支出占可支配收入的比例仍将维持在 4% 左右，而且能源使用的增加将带来巨大的经济和社会效益。

图 4.15 ▶ 净零排放情景下，家庭能源支出外加能源相关投资与 2020 年相比所发生的变化



国际能源署。保留所有权利。

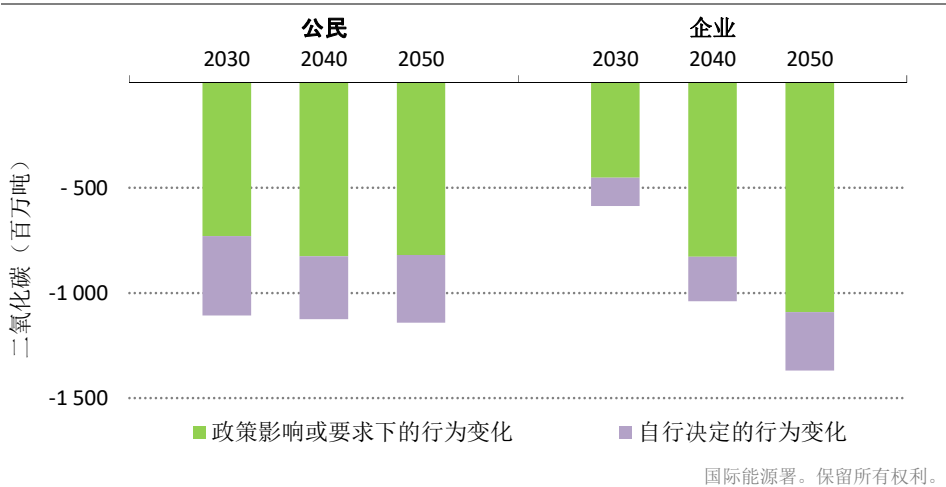
在新兴市场和发展中经济体中，家庭的能源支出总额将小幅增加，超过 90% 的额外收入仍可用于其他用途

考虑到对节能电器和电动车等耗电设备的额外投资，净零排放情景中 2050 年全球每户每天的能源外加相关投资的支出将比 2020 年高出 1.30 美元。该小幅增长意味着能源支出占可支配收入的比例在 2050 年较现在将更小，不过，各国所受的影响不尽相同。在发达经济体中，对电气化、能效和可再生能源的额外投资到 2030 年将达到每户约 750 美元，2050 年为 720 美元，该额外投资额将因能源支出的降低而被完全抵消（图 4.15）。在新兴市场和发展中经济体中，不断增长的一篮子能源服务意味着能源使用的增加，以及与能源有关的家庭总支出也会上升。额外的投资将缓和能源支出的变化，因此，与能源相关的总支出占家庭可支配收入的比重在 2030 年将比现在高出 2 个百分点，在 2050 年将比现在高出 1 个百分点。

4.4.3 行为改变

净零排放情景中，行为改变在减少能源需求和排放方面将起到重要作用，特别是在 2050 年减排技术选择有限的部门当中。虽然公民和企业是行为调整的主体，但这些变化大多是由政府的政策和投资促成的，在某些情况下，是法律或法规要求的。新冠疫情提高了人们对行为改变（如戴口罩、在家工作和上学）的潜在效力的普遍认识。这场疫情表明：如果人们知道改变是合乎情理的，就能迅速大规模地做出行为改变；政府要以可信的方式解释需要哪些改变以及为什么需要这些改变并提供明确的指导。

图 4.16 ▶ 净零排放情景下，公民和企业 在政策驱动和自行决定下改变行为所带来的减排量



通过行为改变而节约的排放中有四分之三是政府政策可以直接影响或规定的

在 2020 年至 2050 年间，净零排放情景中通过行为改变而节约的排放中，有四分之三是政府政策可以直接影响或规定的（图 4.16）。这些包括减排措施，如在大城市逐步淘汰污染性汽车和降低高速公路的限速。其余四分之一涉及自行决定程度较高的行为改变，如减少家庭和办公室对能源的浪费性使用，不过，即使是这些类型的改变，也可以通过宣传活动及其他手段来推行。在受政府政策直接影响或规定的减排中，大约 10%将要求增加或调整基础设施的投资。例如，要实现净零排放情景中从区域航班转向使用高速铁路，就需要在全球范围内到 2050 年建造约 17 万公里的新轨道（是 2020 年水平的三倍）。

净零排放情景中，公民和企业所做的行为改变在减排上将发挥大致同等的作用。大部分公路交通运输和家庭节能的变化将取决于个人，而私营部门在减少商业建筑的能源需求和提高制造业的材料利用效率方面将起到主要作用。企业也可以间接地影响行为改变，例如，提倡通勤员工使用公共交通或鼓励员工在家工作。然而，对个人和企业作用的简单区分掩盖了一个复杂的深层动态：公民作为能源相关产品和服务的消费者，最终将塑造企业的战略，但与此同时，企业也将通过营销和广告宣传来影响和创造消费需求。净零排放情景中，消费者与企业共同行动，一齐做出行为改变，政府为改变设定方向，并通过有效和持续的政策为其助力。

净零排放情景下，行为改变在不同地区的进展程度不同，反映出一系列地理和基础设施的制约以及现有的行为标准与文化偏好。在汽车拥有率或建筑内能源服务需求较低的国家，净零排放情景中发达经济体的许多行为改变将不适用或不恰当。因此，尽管 2020 年至 2050 年期间建筑和公路运输活动的增长约有 95%发生在新兴市场和发展中经济体，这些经济体将贡献因行为改变而节约的排放量的一半。虽然如此，新兴市场和 发展中经济体在材料利用效率和城市设计上仍面临很大的机遇，只有利用好这些机

遇，才能在经济发展和能源服务扩大的同时不增加排放。例如，在 2050 年水泥和钢铁生产的二氧化碳减排量中，将有 85% 源于新兴市场和经济体对材料利用效率的提高。

城市对于净零排放情景中的行为改变将起到重要作用。通过对生活方式选择的塑造和对日常行为的影响，城市设计可以减少高达 60% 的普通城市居民的碳足迹。例如，便利设施集群的紧凑型城市能够缩短平均行程；数字化可以推动共享出行成为满足一大部分新增服务需求的实际选择；城市绿色基础设施可以降低制冷需求 (Feyisa, Dons & Meilby, 2014)。

4.5 政府

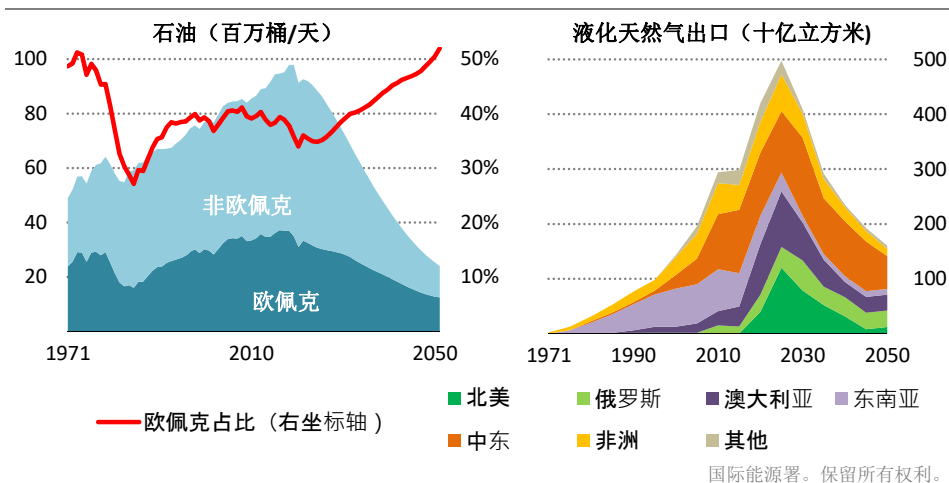
4.5.1 能源安全

能源安全是政府及其服务对象的一项重要考虑因素，实现净零排放的路径必须顾及能源安全。对能源安全的担忧历来与石油和天然气的供应有关。净零排放情景中石油与天然气需求的下降，以及能源多样性的增加，可能会减少一些风险，但它们并不会消失。此外，一些新的脆弱性可能出现，这些脆弱性与维持电力系统可靠、灵活和安全性的需要，以及对清洁能源技术所需的原矿的需求增加有关。提高能源效率仍然是增强能源安全的核心措施——即使在低排放发电快速增长的情况下，提高能源效率仍然是增强能源安全的核心措施。

石油与天然气安全

除已批准开发的油气田外，净零排放情景中不必再开发新油气资源，而且油气供应将越来越集中在少数低成本的生产商手中。就石油而言，欧佩克在全球石油供应中的份额将从近年来的约 37% 增至 2050 年的 52%，达到石油市场历史上的最高水平（图 4.17）。就天然气来说，地区间的液化天然气贸易未来五年内将在 2020 年的 4 200 亿立方米的基础上持续增加，但随后将下降到 2050 年的约 1 600 亿立方米。2050 年几乎全部的天然气出口都将来自于成本和排放量最低的生产商。这意味着与现在相比，2050 年确保充足的石油和天然气供应对全球能源系统顺利运作的重要性将在定量分析的层面下降，但这并不是说供应短缺或价格突然上涨的风险就必定会减少，而且供应短缺或价格突然上涨仍将对一些部门产生巨大的影响。

图 4.17 ▸ 净零排放情景下，不同地区的全球石油供应和液化天然气出口情况



*对欧佩克和其他受油气收入下跌影响的生产者经济体的依赖程度增加，
可能给消费国的供应安全带来风险*

即使减排政策的时间安排与目标明确，净零排放情景中的变化仍将对生产者和消费者双方都产生明显的影响。许多生产者经济体将看到石油和天然气收入下降到历史最低水平区间（见 第 4.2.2 节）。即使这些生产者增加市场份额并使经济和税收来源多元化，它们也很可能难以维持目前的基本开支水平。这有可能对社会稳定产生冲击，该冲击反过来又可能对油气向消费国的顺利输送造成潜在威胁。生产者经济体为争取市场份额而采取行动，或在管理财政平衡将面对极大压力的同时未能维持上游运营，都将可能导致市场动荡不安，大大加剧政策决策者所面临的任务的复杂性。

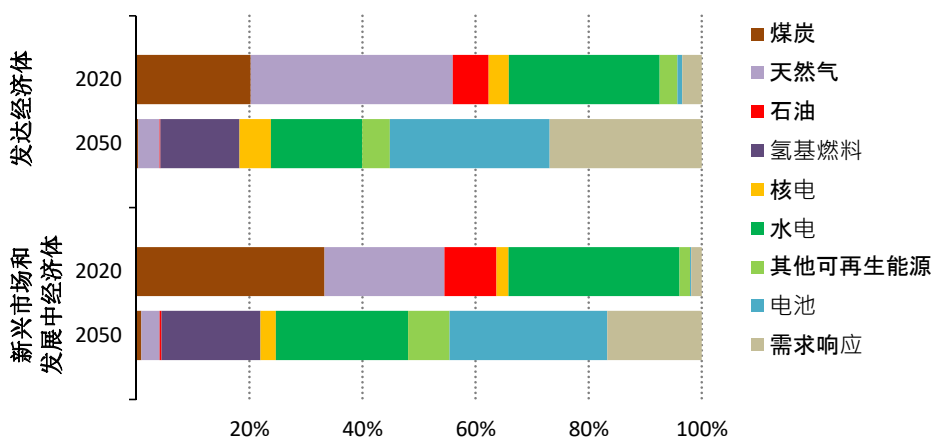
电力安全

净零排放情景下，所有部门将快速进行电气化，电力在终端消费总量中的份额也将相应增加，从 2020 年的 20% 增加到 2050 年的近 50%，这些都将使电力在世界能源安全中的核心地位更加明显（IEA, 2020h）。更加依赖电力对整体能源安全来说是一把双刃剑。对能源进口国来讲，一个好处是可以更加自给自足，因为净零排放情景中电力供应依赖国内能源的份额要比其他燃料高很多。然而，电力重要性的增强意味着任何电力系统的中断都将产生更大的影响。与管道和地下储存设施相比，电力基础设施往往更易受到极端天气事件等物理冲击的影响，而且气候变化很可能将给电力系统带来越来越大的压力，例如，更频繁的干旱可能会减少水力发电和热电厂冷却用水的供应。为减轻这些风险并维护电力安全，需要加强电力系统的韧性，可采取的措施包括制定更加有力的应急计划，依靠数字技术和物理系统加固来解决问题（IEA, 2021b）。

随着越来越多的发电厂、电网资产和储存设施将更加数字化的监测和控制手段纳入系统当中，网络安全问题将可能给电力安全带来更大的风险。政策决策者要发挥核心作用，确保电力的网络韧性得到增强，他们可以通过多种方式实现这一目标（IEA, 2021c）。

要维护电力安全，也有必要采取一系列措施来确保电力系统在任何时刻都具有灵活性、充足性和可靠性。随着可变可再生能源在发电结构中的比重上升，增强电力系统的灵活性就显得尤为重要。因此，净零排放情景下，在电力供应增加 1.5 倍有余的同时，电力系统的灵活性在全球范围内也将翻两番。⁹ 一系列灵活性资源（包括发电厂、储能和由电力网络支撑的需求响应系统）将被用于保障一年中不同天气条件和需求水平下的任何时刻的供需平衡。净零排放情景中灵活性的来源将发生重大转变，从使用燃煤和燃气电厂转变为使用可再生能源、氢能、电池储能和需求侧响应来提供灵活性（图 4.18）。

图 4.18 ▶ 净零排放情景下，电力系统灵活性的来源



国际能源署。保留所有权利。

为了满足四倍于小时级的灵活性需求，电池和需求响应将成为主要的灵活性来源

由于需求响应措施的应用，电力需求也将变得更加灵活，例如，将消费转移到可再生能源充足的时刻。传统的需求响应资源（如缓和工业活动）仍很重要，但新的需求响应领域（如电动车的智能充电）将为其提供重要的新型补充方式。¹⁰ 随着电动车的使用在净零排放情景中不断增加，电动车将为电力系统贡献总体灵活性中的很大一部分。虽然智能充电技术已经存在，但由于体制和监管方面的障碍，其推广至今一直缓慢；这些障碍将在净零排放情景中得到克服。还有一些措施将用来确保充电和其他灵活性资源的数字化不会损害网络安全，并且让潜在的社会认可问题得以解决。

净零排放情景下，能量存储也是灵活性的重要来源。电池储能系统的部署已经开始加快并为短时灵活性需求的管理做出贡献，但能否实现净零排放情景中所设想的大幅储能增长——在 2050 年达到 3 100 吉瓦（平均时长为 4 小时），将取决于是否能克服目

⁹ 这里的电力系统灵活性是根据小时级的爬坡需求来量化的，这只是灵活性的一个方面，灵活性还包括维持频率及其他辅助服务的更短时操作。

¹⁰ 智能充电器与一个中央平台共享实时数据，使系统运营商能够根据车辆在特定时间内所需电能、可用电能、批发电价、电网拥堵情况以及其他参数来优化充电配置。

前的监管和市场设计屏障。抽水蓄能发电是一种良好的在数小时和数天内提供灵活性的手段，而氢气则可能在时间更长的季节性储能中发挥重要作用，因为可以将它储存在经过改造的气体存储设施中，这些设施的容量比电池储能项目要高出几个数量级。

可调度电力对电力系统的安全转型至关重要，净零排放情景下，可调度电力将越来越多地来源于低排放能源。水电为目前许多电力系统贡献了很多大一大部分的灵活性，未来水电仍将如此，扩展抽水蓄能发电设施将特别受到重视。核电和地热电厂虽设计用于基荷发电，但在净零排放情景中也将贡献一定的灵活性，然而，这些资源的扩展受到了一些限制。因此，配备了碳捕捉设备或使用低排放燃料的热电厂就将起到重要作用，例如，在现有的燃煤电厂中使用可持续生物质或低排放氨，是一种令燃煤电厂能够继续在灵活性和产能充足性上做出贡献，同时减少二氧化碳排放的方式。一些保持电力系统稳定的额外措施也将有必要实施（专栏 4.1）。

专栏 4.1 ▶ 可变可再生能源占比高的电力系统的稳定性

稳定性是电力安全的一个关键特征。稳定性使系统能够保持平衡并抵御扰动（如发电机或电网的突然停摆）。从历史角度看，核电、水电和化石燃料等传统发电机一直是维持电力系统稳定的核心力量。在系统受到扰动时，它们用机器的旋转产生惯性，将储存的动能立即转化为电能。它们还能生成电压信号，帮助所有发电机保持同步。

相比之下，较新的技术（如太阳能光伏、风能和电池）是通过变换器与系统连接的。它们通常不会提供系统惯性并被设置为“电网跟随”单元，与常规发电机同步。随着基于变换器的资源，特别是可变可再生能源在电力系统中的份额大幅增加，维护系统的稳定性将需要新的方法。

关于可变可再生能源比例较高的系统的稳定性，相关的知识和研究在不断增加。例如，国际能源署与法国输电系统运营商 RTE 在最近的一项联合研究中，对法国纳入高比例可变可再生能源在技术上的可行条件做了分析 (IEA, 2021d)。基于这项研究的调查结果，可以得出：

- 确保净零电力系统稳定性的方式之一是：在可变可再生能源产出占比高的小时中，保持最低量的低碳技术常规发电量。这种维持稳定性的方法是以风能和太阳能占比高时弃风弃光为代价的。
- 可以升级并网导则，要求可变可再生能源和电池提供快速频率响应服务，从而帮助减少维持稳定性所需的常规发电量。
- 同步调相机可以在不发电的情况下增强电力系统惯性。该技术已在吉瓦级规模上于丹麦和南澳大利亚得到验证，但仍需在更大规模上获得经验。
- 构网型变换器能让可变可再生能源和电池产生电压信号，不过，对该方法的实践还局限于微电网和小岛屿，仍需在大型互联电网中取得经验。

为充分了解以上四种方法中每种方法的优点和方法组合的范围，以在保持电力安全的同时用成本效益最高的一组方法来实现净零排放，示范项目、利益攸关方协商和国际合作都将十分关键。

电力网络将为所有灵活性资源的使用提供支持和必要条件，在大范围内平衡供需。对电网进行及时投资以尽量减少拥堵并扩大供需平衡区域，对充分利用太阳能光伏和风能项目并确保电力供应的平价可靠而言至关重要。扩展长距离输电在净零排放情景中也将起到关键性作用，这是因为需求中心附近缺乏可用土地以及一些其他因素往往造成新的发电设施位于偏远地区。非常重要的一点是，新的输电系统在建设时要考虑到可变、双向操作，以便最大限度地利用现有的灵活性资源，而且，监管制度和市场安排要支持系统之间的灵活连接。互联的核心价值源于电力需求和风场类型的互补：太阳能光伏的产出在大范围内比风电具有更高的相关性。

净零排放情景中，对铜、锂、镍、钴和稀土元素等关键矿产的需求将大幅增加，这些矿产对许多清洁能源技术来说必不可少。几个潜在的薄弱环节可能会阻碍这些矿产的充分供应并导致价格波动 (IEA, 2021a)。如今，许多矿产的生产和加工业务高度集中在少数国家，使供应容易受到政治动荡、地缘政治风险和可能实行的出口限制的影响。在许多情况下，还存在对土地使用变化、稀缺水资源的争夺、腐败及政府资源滥用、工人伤亡，以及包括使用童工在内的侵犯人权的行为的担忧。新的关键矿产项目可能会有很长的筹备时间，因此，净零排放情景中需求的快速增长有可能导致供需之间的时机错配。国际贸易和投资体制对维持矿产供应的可靠性起着关键作用，但需要依靠政策支持和国际协调来确保严格的环境和社会法规得以实施。

4.5.2 基础设施

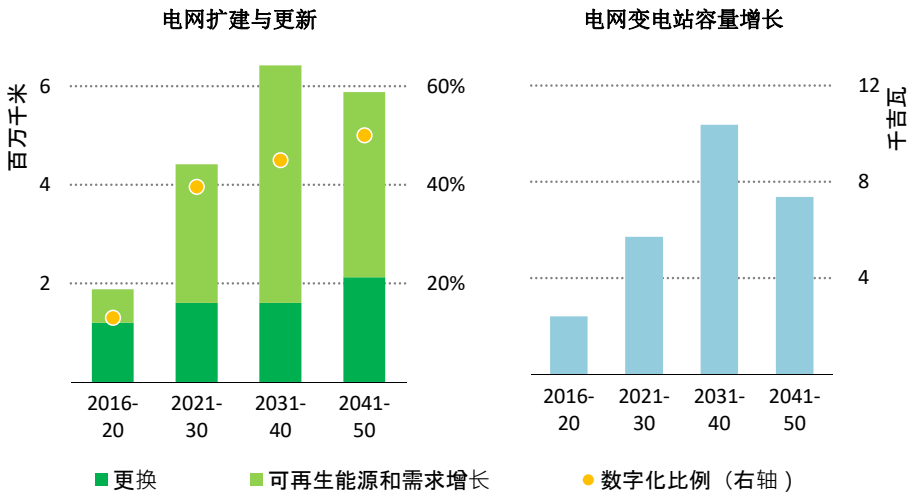
净零排放的实现需要大量的新基础设施以及对现有资产进行大规模改造。随着所有国家和地区进行系统的转变，从支持使用化石燃料和配送传统电力的系统转为主要依靠可再生能源和低排放燃料的系统，净零排放情景中能源基础设施的转型将会实现。在许多新兴市场和发展中经济体中，未来几十年内必然需要大量的基础设施建设，这为支持向净零排放经济的转变创造了机会之窗。在任何一个国家中，政府都将在基础设施的规划、融资和监管方面发挥核心作用。下面将讨论一些主要的基础设施组成部分：电力网络与电动车充电、低排放燃料与二氧化碳的管道系统，以及交通运输基础设施。

净零排放情景中，电力需求的快速增长和向可再生能源的转型要求对电力网络进行扩展和现代化升级（图 4.19）。这就需要急剧扭转最近的投资下降趋势，若非如此，几乎必然会导致净零排放所需的能源转型无法实现。此外，也需要修改电价设计和许可程序，以反映出电力供应和使用方面的根本变化。一些主要的考虑事项包括：

- **长距离输电。**净零排放情景下，可再生能源的大部分增长将来自于集中供电设施。然而，最好的太阳能和风能资源往往存在于偏远地区，这就需要新的输电连接。特高压直流系统将很有可能在支持长距离输电方面起到重要作用。
- **地区配电。**家庭能效的提高和屋顶太阳能光伏发电的更广泛使用意味着电力剩余将更加频繁，而电热泵和住宅电动车充电点将需要电力更加普及。这些发展共同表明，需要大幅增加配电网容量。
- **电网变电站。**太阳能光伏发电和风电的大规模扩张要求增设新的电网变电站：净零排放情景中到 2030 年，变电站的容量将增加 57 000 吉瓦以上，是目前全球容量的两倍。

- **电动车充电。**净零排放情景中，为支持电动车的扩增和高速公路长途驾驶，将建设新的大型公共充电网络，地点包括工作场所、高速公路加油站和住宅区。
- **网络数字化。**随着入网设备的使用大量增加，电网资产的数字化将为更灵活的电网运行、更好的可变可再生能源管理和更有效的需求响应提供支持。

图 4.19 ▸ 净零排放情景下，年均电网扩建、更换以及变电站容量增长的情况



国际能源署。保留所有权利。

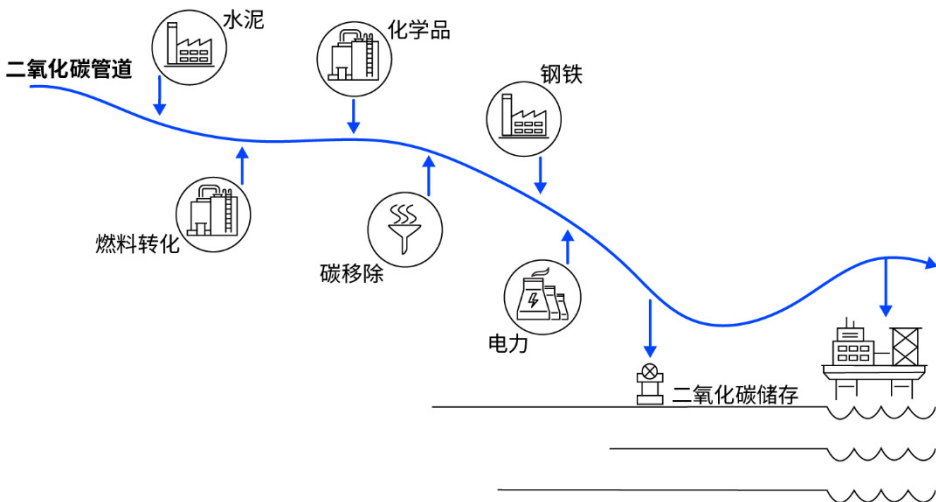
电网和变电站扩张的主要驱动力是可再生能源的大规模部署和终端用能的电气化，在扩张的过程中，基础设施的数字化比重将不断上升

注：这里的变电站容量假设有功功率等于视在功率。

净零排放情景下，管道设施继续在能源的传输和配送中发挥关键作用：

- 鉴于化石燃料将迅速衰落，净零排放情景中将不需要大量投资于建设新的石油和天然气管道。然而，需要投资将低排放液体及气体的生产与消费中心相连接，并改造现有管道及相关配送基础设施，用于低排放燃料的输送。一些低排放燃料，如生物甲烷和合成氢基燃料，可以利用未经任何改造的现有基础设施，但纯氢要求对现有管道加以改造。净零排放情景中，也需要新建氢气专用的基础设施，例如，用来将可再生资源丰富的偏远地区所生产的氢气运送到需求中心。
- 净零排放情景中 CCUS 的扩增要求对二氧化碳的运输和储存容量进行投资。到 2050 年，全球二氧化碳的捕获量将达到 7.6 吉吨，需要大量的管道和航运基础设施来将二氧化碳的捕捉设施与储存地点相连接。产业集群（包括港口）可以为二氧化碳管道和氢气基础设施在近期的建设提供最佳机遇，因为这些集群中使用新基础设施的不同行业将能够分担其前期投资需求（图 4.20）。

图 4.20 ▶ 产业集群中共享的二氧化碳管道图例



国际能源署。保留所有权利。

CCUS 和氢气等技术及其使能基础设施的部署将极大受益于产业集群的跨部门方式

在交通运输基础设施的转型中挑战与机遇并存。挑战的来源是：在基础设施的发展阶段，伴随经济的增长，能源密集度和碳强度可能增加。¹¹ 钢铁和水泥几乎是所有基础设施项目的两种主要元素，但它们在脱碳方面也是最具挑战性的两个部门。机遇的来源是：一些国家将有机会以符合净零目标的方式从零开始发展基础设施。当今正在经历快速城市化的国家，在部署电动车充电和低排放燃料加注系统的同时，可以设计和引导新的基础设施建设朝城市人口密度更高和大容量大众交通的方向发展。

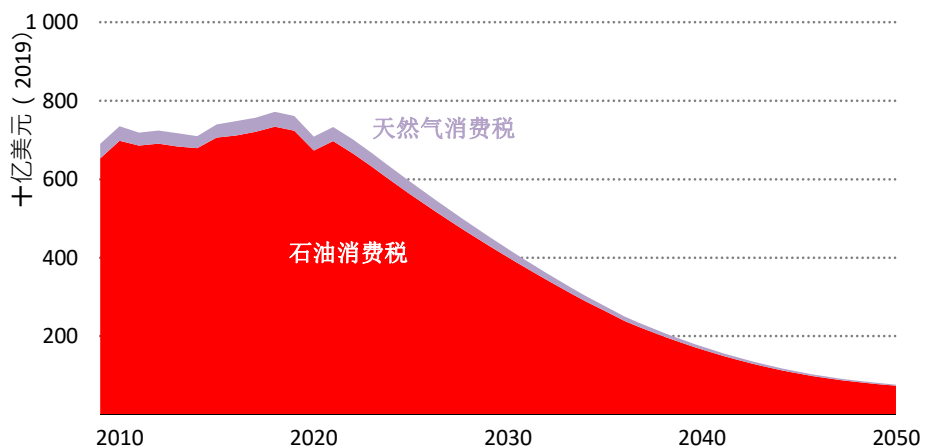
随着交通运输基础设施的发展，铁路将发挥重要作用。净零排放情景下，各个地区都将出现对高速铁路的大规模投资，用以取代长途汽车驾驶和短途航空。另外，在所有地区，大量投资将流向轨道、控制系统、铁道车辆现代化和联合货运设施，为准时制物流运作提高速度和灵活性，从而支持货运从公路到铁路的转变，特别是集装箱运输。

4.5.3 能源零售业的税收收入

要实现净零排放，就要急剧减少化石燃料的消费。鉴于燃料（如油基交通运输用燃料和天然气）通常是高额消费税或其他特别税的征税对象，其消费的减少将导致许多国家损失大额税收。近年来，与能源相关的税收在发达经济体中平均占政府总税收的 4% 左右，在新兴市场和发展中经济体中占 3.5%，但在一些国家中，相关税收的占比高达 10% (OECD, 2020)。

¹¹ 净零排放情景的模型包含了建设新增交通运输基础设施（道路、轿车和卡车）以及能源基础设施（如电厂和风力涡轮机）所需的额外的钢铁和水泥。

图 4.21 ▶ 净零排放情景下，全球石油和天然气零售业的税收额



国际能源署。保留所有权利。

石油和天然气零售业的税收急剧下滑

净零排放情景下，2020 至 2050 年间，石油和天然气零售业的税收将下降近 90%（图 4.21）。各国政府很可能需要依靠某种其他税收与公共支出改革相结合的方式进行补偿。实施一些专门针对能源部门的征税措施可能会有助益。然而，任何此类税收都需经过精心设计，以尽量减少对低收入家庭的影响，因为较贫困的家庭在电力和供热方面的支出占其可支配收入的比例更高。与能源相关的税收选择包括：

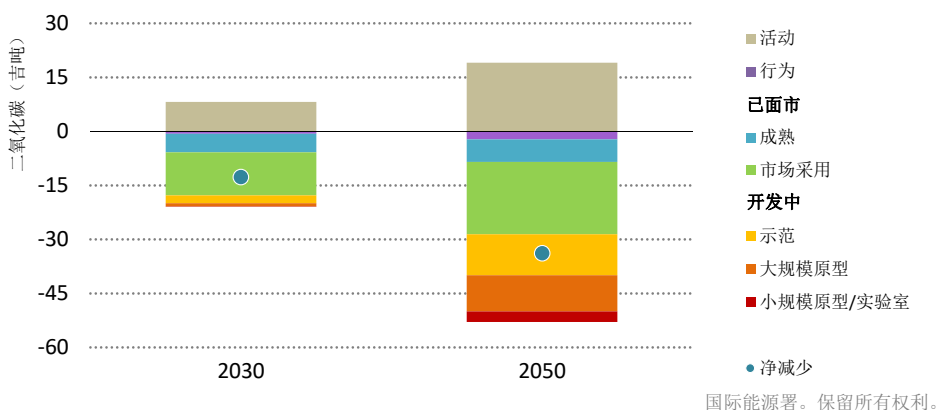
- **二氧化碳价格。**净零排放情景中，二氧化碳价格将在各地区推行，可以带来额外的收入来源，不过，不同国家和部门的推行程度会有所不同。在未来 15 年内，终端使用者和其他部门所支付的与油气燃料费有关的二氧化碳价格将创造更高的收入，足以超额弥补石油和天然气消费税的减少，但随着全球能源系统向净零排放的方向发展，这些收入也会下降。
- **道路费与交通阻塞费。**这些费用还有一个额外的好处，那就是抑制驾驶并鼓励转用其他低碳密集交通模式。
- **加大对电力的征税力度。**通过提高对所有电力销售的税率，可以大幅提高税收收入，特别是因为价格的大幅上涨往往对电力消费的影响不大。然而，这项措施可能会适得其反，因为该措施将降低电动车和热泵的成本效益，从而有可能拖慢它们的采用，不过，这一风险可以通过推行二氧化碳价格来减缓。

目前，大多数国家的天然气税率低于交通运输用燃料税率。推行并提高建筑内使用的天然气（主要用于供热）的二氧化碳价格，将加速能效的提高并增加政府收入，但需注意避免对低收入家庭产生过大的影响。对工业中使用的天然气征税将增强碳强度较低的燃料和技术（如氢气）的竞争力，但在缺乏协调的全球行动或碳税边境调整措施的情况下，这将有损可能损害能源密集部门的国际竞争力并有碳泄漏的风险。

4.5.4 创新

若不大大加快清洁能源的创新，将无法达成到 2050 年实现净零排放的目标。依靠市场上的现有技术，几乎可以实现净零排放情景中所要求的到 2030 年的全部减排量，使全世界有望到 2050 年实现净零排放。然而，2030 年后，要广泛使用目前仍处在研发阶段的技术，才能达成净零排放目标。2050 年，净零排放情景中约 50% 的二氧化碳减排量将源于目前处于示范或原型期的技术（图 4.22）。在重工业和长途交通运输等部门，这一比例甚至更高。为使净零排放所需的技术尽快进入市场，这十年内在创新方面做出巨大努力将必不可少。

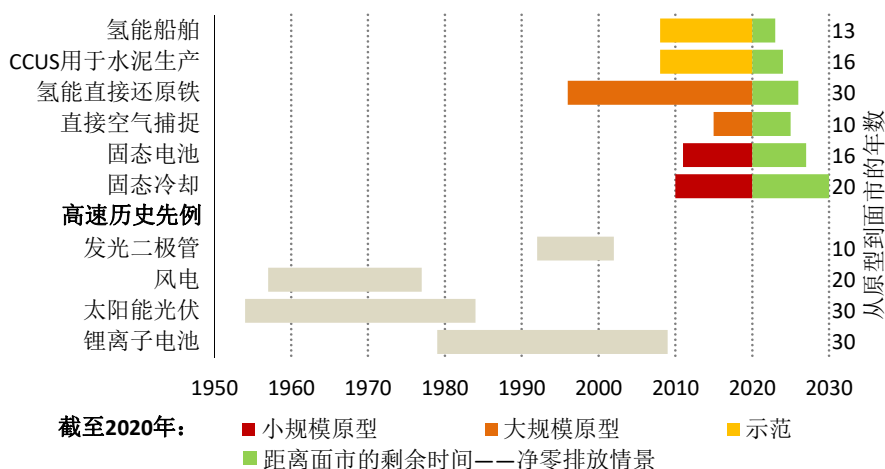
图 4.22 ▶ 净零排放情景下，不同成熟度的技术将带来的全球二氧化碳排放变化



虽然 2030 年的减排量将主要依靠市场上的现有技术，
目前还处于开发阶段的技术将贡献 2050 年减排量的近一半

在净零排放情景中，清洁能源早期技术的创新周期要远远短于历史上的典型先例，而且，大多数现在还没有进行大规模示范的清洁能源技术最迟将于 2030 年面市。这意味着从首个原型到进入市场的时间平均将比过去最迅速的能源技术开发快 20%，比太阳能光伏的开发快 40% 左右（图 4.23）。处于示范期的技术，如水泥生产中的 CCUS 或低排放氨燃料船舶，将在未来三到四年内进入市场。氢能炼钢、直接空气捕捉和其他处于大规模原型期的技术将在大约六年后进入市场，而大多数处于小规模原型期的技术（如固态无制冷剂冷却或固态电池）将在未来九年内面市。

图 4.23 ▶ 净零排放情景中部分技术从首个原型到进入市场的时间与历史先例



国际能源署。保留所有权利。

与过去最迅速的技术开发相比，开发周期将缩短约 20%

注：CCUS = 碳捕捉、利用和封存。

来源：国际能源署基于 Carbon Engineering, 2021; Greco, 2019; Tenova, 2018; Gross, 2018; European Cement Research Academy, 2012; Kamaya, 2011; Zemships, 2008 的分析。

如此大幅加快技术开发是一项宏伟的计划。它的实现要求尚未上市的技术在多种配置下和不同地区中迅速得到大规模示范。在净零排放情景中，大多数情况下这些示范项目将并行开展。这与技术开发的典型做法形成了鲜明的对比：典型做法通常是在不同条件下通过连续的示范项目来进行迁移学习，在广泛部署开始前树立信心。

要实现所需的加速，也要大幅增加对示范项目的投资。净零排放情景中，为在 2030 年前完成一系列示范项目，将尽快调动 900 亿美元，这将大大超过各国政府目前到 2030 年的大约 250 亿美元的预算。这些项目大多涉及终端用能的电气化、CCUS、氢能以及可持续生物能，主要应用于长途运输和重工业。

净零排放情景下，公共资金投入的增加将有助于应对首创项目的风险，也有利于撬动研发领域的私人投资。这对于近期的趋势是一个逆转：世界范围内在能源研发领域（包括示范项目）的政府支出占 GDP 的比重已经从 1980 年近 0.1% 的峰值下降到 2019 年的仅占 0.03%。公共资金的投入额也将与达到净零排放所需的创新更加一致。净零排放情景中，电气化、CCUS、氢能和可持续生物能将贡献从现在到 2050 年累积减排量的近一半。净零排放情景中，2030 至 2050 年间，仅仅三项技术就能对实现约 15% 的累积减排量起到极其重要的作用，它们是：先进的高能量密度电池、氢电解槽和直接空气捕捉。

净零排放情境下政府驱动创新

将新的能源技术推向市场经常需要几十年的时间，但到 2050 年在全球范围内实现净零排放的紧迫性意味着这一进程必须大大加快。经验表明，政府在缩短新技术进入市

场和普遍推广所需的时间方面起着至关重要的作用（IEA, 2020i）。政府的作用包括教育人民、资助研发、提供知识交流网络、保护知识产权、利用公共采购促进技术部署、助力企业创新、投资使能基础设施以及为市场和融资制定监管框架。

来自先行国家的知识转让也可以促进所需的加速，在新技术通常无法与现有技术相竞争的早期采用阶段，知识转让尤其重要。例如，就太阳能光伏而言，美国的国家实验室在其早期开发阶段发挥了关键作用；日本政府直接支持的项目为其最初的部署创造了市场利基；德国、意大利、西班牙、美国、中国、澳大利亚和印度的政府采购和激励政策促进了其全球市场的发展。锂离子电池最初的开发工作主要是由公共和私人研究在日本完成的，其第一个与能源相关的商业运作是在美国实现的，而今天的大规模制造主要在中国进行。

清洁能源技术所面临的许多最严峻的挑战可以借助更有针对性的方法来加快解决（Diaz Anadon, 2012; Mazzucato, 2018）。净零排放情景中，协调一致的政府行动将撬动私营部门的投资，并促进目前处于不同开发阶段的清洁能源技术的进步。

- 从现在到 2030 年，政府的行动重点是将零排放或低排放的新技术推向市场。例如，净零排放情景下，钢铁的生产将开始使用低排放氢能，规模将与传统钢铁厂相当；大型船舶将开始应用低排放氨燃料；而电动卡车将开始依靠固态电池运行。与此同时，对已经面市但尚未达到大众市场规模的低排放技术的部署也将迅速加快，通过在实践中学习和发展规模经济，这些技术的制造、建设和运营成本会随部署的加快而降低。
- 2030 至 2040 年，将整合技术进步以扩大新生的低排放技术的规模并扩展清洁能源的基础设施。届时，现在处于实验室或小规模原型期的清洁能源技术将开始商业化。例如，在水泥窑和用于高价值化学品生产的蒸汽裂解设施中，燃料将被电力取代。
- 2040 至 2050 年，今天还处于最初开发阶段的技术将在前景良好的利基市场中被采用。到 2050 年，现在处于示范或大规模原型期的清洁能源技术将成为购买和新装的主流选择，而且它们将在各地区与目前的传统技术相竞争。例如，超高能量密度电池将用于飞机的短途飞行。

4.5.5 国际合作

到 2050 年实现净零排放的路径上，需要各国政府间进行空前的国际合作。这不仅是指所有国家共同做出努力以实现净零目标，也是指所有国家以有效、互利的方式进行合作。实现净零排放对所有国家而言都极具挑战性，但低收入国家所面临的挑战将最为严峻，也最不易解决，在许多这样的国家，技术和财政支持对于确保关键减排技术和基础设施的早期部署将至关重要。若没有国际合作，到 2050 年排放量降至净零的目标将无法实现。

有四个方面的国际合作尤为重要（Victor, Geels and Sharpe, 2019）：

- **国际需求信号和规模经济。**在以往所见的许多关键能源技术的成本降低方面，国际合作都起到了关键的作用。国际合作能够加速知识转让并促进规模经济的发展，还可以帮助协调供需，使一个地区对清洁能源技术和燃料所创造的新需求与其他

地区的供应能力的发展保持一致。这些好处需要与创造国内就业和产业能力以及确保供应链韧性的重要性进行权衡。

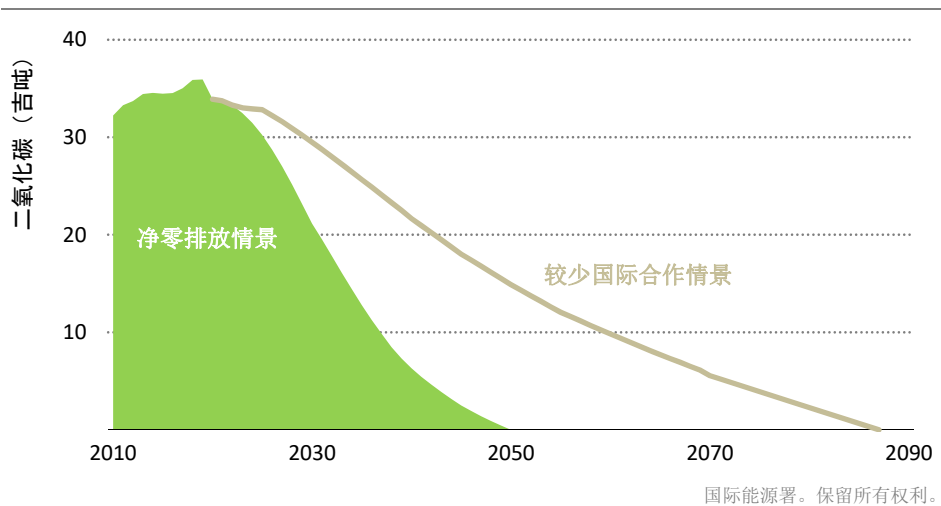
- **贸易与竞争力的管理。**跨国经营的产业需要标准化以确保共通性。过去，重工业等部门在创新和清洁能源技术的部署方面进展一直缓慢，受到国家政策不协调和国际商定标准缺失的制约。制定此类标准可以加速能源技术的开发和部署。
- **创新、示范与推广。**清洁能源技术的研发和专利申请目前集中在少数几个地区：2014 至 2018 年间，90%以上的清洁能源专利来自美国、欧洲、日本、韩国和中国。迅速将清洁能源技术的经验与知识推广到没有参与其初期开发的国家当中，并为新兴市场和发展中经济体的首创示范项目提供资金，将加快净零排放的进程。运用国际方案来为示范项目提供资金（特别是在技术庞大而复杂的部门当中）将加速创新的过程（IEA, 2020i）。
- **二氧化碳移除方案。**二氧化碳移除技术（如配备了 CCUS 的生物能源和直接空气捕捉）对于在全球范围内减少排放至关重要。这些方案的出资和认证需要国际合作，以便充分利用可能位于任何地区的适宜土地、可再生能源潜力以及存储资源。国际排放权交易机制能在以负排放抵消一些部门或地区的排放方面发挥作用，不过，任何此类机制都需要高度的协调性以确保市场的正常运作和诚信。

根据净零排放情景的假设，国际合作政策、措施和努力都将出台以克服以上提及的这些障碍。为探讨不采取这些手段将可能造成的影响，我们设计了一个*较少国际合作情景*（专栏 4.2）。该情景考量的问题是：如果各国将减缓气候变化的努力提高到净零排放情景中的水平，但合作框架并没有以同样的速度发展，将会产生怎样的结果。该情景表明，缺乏国际合作对创新、技术示范、市场协调并最终对排放路径都将产生重大影响。

专栏 4.2 ▶ 较少国际合作情景的构建

为构建*较少国际合作情景*，我们对技术和减排方案进行了评估，并按目前的成熟度以及国际合作对部署的重要性对其进行了分组。按照假设，市场中地位稳固且受国际合作影响小的成熟技术将沿着与净零排放情景中相同的部署路径发展。那些需要合作来实现规模化并避免重复、受国际贸易和竞争影响大、依赖大型高资本密集的示范项目，或者在创建市场拉力和标准化体系方面需要支持以确保共通性的技术和减排方案，根据假设都将部署得更加缓慢（Malhotra and Schmidt, 2020）。与净零排放情景相比，这些技术在发达经济体中的初步部署将推迟 5-10 年，而在新兴市场和发展中经济体中则要推迟 10-15 年。

图 4.24 ▶ 较少国际合作情景和净零排放情景下的二氧化碳排放量

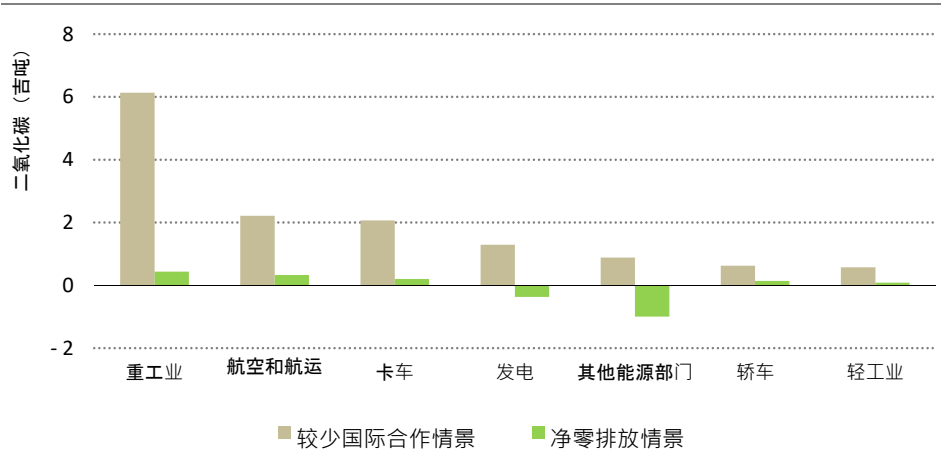


若没有国际合作，向净零排放的转型将被推迟几十年

薄弱的国际合作将减缓目前处于示范期的减排方案的部署（图 4.24）。重工业、卡车、航空、航运和二氧化碳移除等领域将受到影响。因此，能源转型的进程将是不均衡的。较少国际合作情景下，在接下来的 20 年中，发电、汽车、轻工业和建筑物的排放量将快速下降，但速度仍低于净零排放情景下的步伐。然而，其他领域的减排速度则要慢得多。2030 年代中期以后，与净零排放情景相比，世界范围内的减排速度将明显放缓，向净零排放的转型将推迟几十年。在 2050 年剩余的 15 吉吨二氧化碳排放量中，略高于 40%是在重工业当中，减排技术的示范和推广速度的放慢对重工业的影响尤为重大（图 4.25）。2050 年的剩余排放量中还有三分之一来自航空、航运和卡车。在这些领域中，先进的生物燃料、氢基燃料和高能量密度电池的规模化和推广速度下降，阻碍了减排的进展。在新兴市场和新兴经济体中的新项目部署上，没有国际合作的支持意味着该地区的减排与净零排放情景中的情况相比要慢得多。

该研究结果突显了政府加强国际合作的重要性。为加速创新和关键技术的示范，需要大力推进国际合作，特别是对首创项目成本通常较高的新兴市场和新兴经济体中的复杂技术而言，解决对国际贸易和竞争力的担忧也需要加强国际合作，以确保各方都能实现公正的转型。

图 4.25 ▶ 2050 年部分部门在较少国际合作情景和净零排放情景下的二氧化碳排放量



国际能源署。保留所有权利。

较少国际合作情景下，2050 年的二氧化碳排放集中在工业和交通运输部门

注：其他能源部门 = 燃料生产和直接空气捕捉。

附录

情景预测表格

表格的一般说明

本附录包括 2050 年净零排放情景的全球历史数据和预测数据，涉及以下数据集：能源供应、能源需求、总发电量和电力装机、化石燃料燃烧和工业过程产生的二氧化碳排放，以及部分经济和活动指标。

燃料和部门的定义见附录 C。表格中常用的缩略语包括：CAAGR = 年均复合增长率；CCUS = 碳捕捉、利用和封存。消耗化石燃料而不配备 CCUS 的设施被归入“无减排措施”类下。

在本报告的文本和表格中，四舍五入可能导致总数与各组成部分总和之间存在微小差异。增长率按年均复合计算，当基准年为零或数值超过 200% 时，标记为“n.a.”。不存在的数值标为“-”。

如需下载 Excel 格式的表格，请访问：iea.li/nzedata。

数据来源

情景预测的正式基准年是 2019 年，因为这是能源需求量和产量数据完整的最近一年。然而，我们在可以获得相关数据的情况下，使用了最新的数据，并在本附录中收录了对 2020 年能源产量和需求量的估计。对 2020 年的估计基于国际能源署《全球能源回顾》报告更新数据，数据来源包括向国际能源署能源数据中心提交的最新月度数据、国家行政部门发布的其他统计资料，以及国际能源署《市场报告》系列中涵盖煤炭、石油、天然气、可再生能源和电力等最新市场数据。

发电总装机的历史数据来自标普全球市场财智的世界电厂数据库（2020 年 3 月版）和国际原子能机构的 PRIS 数据库。

定义说明：A.1. 能源供应和转化表

能源供应总量（TES）等于发电和供热总量加上电力和热力以外的“其他能源部门”的能源供应量，再加上电力和热力以外的终端消费总量（TFC）。能源供应总量不包括来自热泵的环境热能，也不包括电力贸易。能源供应总量中的太阳能包括太阳能光伏发电量、聚光太阳能发电量和太阳能热力的终端消费量。能源供应总量中的其他可再生能源包括地热，以及用于发电和供热的海洋能（潮汐和波浪）。生产商品氢所需的能源投入（主要是天然气和电力），以及生产能源部门所使用的生物燃料（主要是固体生物质一次能源）的转化损失记入“其他能源部门”类别下的制氢和生物燃料生产项下。不可再生的废弃物和其他来源虽然没有逐项列出，但都包括在能源供应总量中。

定义说明：A.2. 能源需求表

构成终端消费总量（TFC）的部门包括工业（能源使用和原料）、交通运输、建筑物（住宅、服务和非特定用途）及其他（农业和其他非能源使用）。国际航海和航空舱载燃料需求包括在交通运输的总计中。

定义说明：A.3. 电力表

以太瓦时表示的发电量和以吉瓦表示的装机容量数据均按毛额提供（即包括发电厂的自用量）。预测的发电总装机为现有发电装机和新增装机的总和，减去退役装机。其他来源虽然没有逐项列出，但都包括在总发电量中。

定义说明：A.4. 二氧化碳排放表

二氧化碳总量包括化石燃料和不可再生废弃物燃烧及工业和燃料转化过程（过程排放）产生的二氧化碳排放量，以及二氧化碳移除量。报告中包括了三种二氧化碳移除方法：

- 捕捉和储存来自生物能源和可再生废弃物燃烧（通常是发电）的排放。
- 捕捉和储存来自生物燃料生产的排放。
- 捕捉和储存来自大气的二氧化碳，在报告中称为直接空气碳捕捉和封存（DACCS）。

前两个条目在报告中通常称为配备碳捕捉和封存的生物能源（BECCS）。请注意，从生物燃料生产和直接空气捕捉中捕获的部分二氧化碳被用于生产合成燃料，这部分不包括在二氧化碳移除量中。

捕获的二氧化碳总量包括由配备 CCUS 的设施（如发电或工业设施）捕获的二氧化碳和通过直接空气捕捉捕获的大气二氧化碳，但不包括捕获用于尿素生产的二氧化碳。

定义说明：A.5. 经济和活动指标

以每千瓦时二氧化碳千克数表示的排放强度是根据纯电厂和热电联产厂的电力数据计算的。¹

表格中使用的其他缩略语包括：PPP = 购买力平价；GJ = 吉焦；Mt = 百万吨；pkm = 乘客公里；tkm = 吨公里；m² = 平方米。

¹ 为了计算热电联产厂的电力排放，我们假设热电联产厂的产热效率为 90%，其余的燃料投入被分配用于发电。

表 A.1：能源供应和转化

	能源供应总量（艾焦）					占比（%）			CAAGR（%）	
	2019	2020	2030	2040	2050	2020	2030	2050	2020-2030	2020-2050
能源供应总量	612	587	547	535	543	100	100	100	-0,7	-0,3
可再生能源	67	69	167	295	362	12	30	67	9,3	5,7
太阳能	4	5	32	78	109	1	6	20	21	11
风能	5	6	29	67	89	1	5	16	17	9,6
水力	15	16	21	27	30	3	4	6	2,9	2,2
现代固体生物能源	31	32	54	73	73	5	10	14	5,3	2,8
现代液体生物能源	4	3	12	14	15	1	2	3	14	4,9
现代气体生物能源	2	2	5	10	14	0	1	3	10	6,4
其他可再生能源	4	5	13	24	32	1	2	6	11	6,7
生物质的传统使用	25	25	-	-	-	4	-	-	n.a.	n.a.
核能	30	29	41	54	61	5	8	11	3,5	2,4
无减排措施的天然气	139	136	116	44	17	23	21	3	-1,6	-6,6
天然气结合CCUS	-	1	13	31	43	0	2	8	37	16
石油	190	173	137	79	42	29	25	8	-2,3	-4,6
其中的非能源使用	28	27	32	31	29	5	6	5	1,4	0,2
无减排措施的煤炭	160	154	68	16	3	26	12	1	-7,9	-12
煤炭结合CCUS	0	0	4	16	14	0	1	3	60	22
电力和热力部门	233	230	240	308	371	100	100	100	0,4	1,6
可再生能源	36	38	107	220	284	17	44	77	11	6,9
太阳能光伏	2	3	25	61	84	1	10	23	24	12
风能	5	6	29	67	89	2	12	24	17	9,6
水力	15	16	21	27	30	7	9	8	2,9	2,2
生物能源	9	10	18	35	39	4	8	10	6,3	4,6
其他可再生能源	4	4	14	30	42	2	6	11	14	8,5
氢	-	-	5	11	11	-	2	3	n.a.	n.a.
氨	-	-	1	2	2	-	0	0	n.a.	n.a.
核能	30	29	41	54	61	13	17	16	3,5	2,4
无减排措施的天然气	56	55	49	4	2	24	21	0	-1,1	-11
天然气结合CCUS	-	-	1	5	5	-	1	1	n.a.	n.a.
石油	9	8	2	0	0	4	1	0	-12	-14
无减排措施的煤炭	102	100	30	0	0	43	12	0	-11	-34
煤炭结合CCUS	0	0	3	10	7	0	1	2	55	19
其他能源部门	57	57	61	76	91	100	100	100	0,7	1,5
制氢	-	0	21	49	70	0	35	77	66	23
生物燃料生产	5	6	12	15	12	10	20	13	8,3	2,7

表 A.2: 能源需求

	能源需求 (艾焦)					占比 (%)			CAAGR (%)	
	2019	2020	2030	2040	2050	2020	2030	2050	2020-2030	2020-2050
终端消费总量	435	412	394	363	344	100	100	100	-0,4	-0,6
电力	82	81	103	140	169	20	26	49	2,4	2,5
液体燃料	175	158	143	96	66	38	36	19	-1,0	-2,9
生物燃料	4	3	12	14	15	1	3	4	14	4,9
氢	-	-	1	3	5	-	0	1	n.a.	n.a.
合成油	-	-	0	2	5	-	0	1	n.a.	n.a.
石油	171	154	129	77	42	37	33	12	-1,8	-4,2
气体燃料	70	68	68	60	53	16	17	15	0,1	-0,8
生物甲烷	0	0	2	5	8	0	1	2	25	13
氢	0	0	6	12	20	0	2	6	54	20
合成甲烷	-	-	0	1	4	-	0	1	n.a.	n.a.
天然气	70	67	58	40	20	16	15	6	-1,4	-4,0
固体燃料	92	89	61	46	35	22	16	10	-3,6	-3,0
生物质	39	39	24	25	25	9	6	7	-4,8	-1,4
煤炭	53	50	38	21	10	12	10	3	-2,8	-5,3
热力	13	13	12	9	6	3	3	2	-1,2	-2,7
其他	3	3	7	11	15	1	2	4	8,2	5,2
工业	162	157	170	169	160	100	100	100	0,8	0,1
电力	35	35	47	62	74	22	28	46	3,0	2,5
液体燃料	31	31	31	27	23	20	18	15	-0,2	-0,9
石油	31	31	31	27	23	20	18	15	-0,2	-0,9
气体燃料	32	32	35	34	28	20	21	18	1,0	-0,4
生物甲烷	0	0	1	2	4	0	0	3	22	15
氢	-	0	3	4	5	0	2	3	44	15
无减排措施的天然气	32	32	30	22	9	20	18	6	-0,5	-4,0
天然气结合CCUS	0	0	1	5	7	0	1	4	38	18
固体燃料	58	52	51	40	30	34	30	18	-0,3	-1,9
生物质	10	9	15	19	20	6	9	13	5,2	2,8
无减排措施的煤炭	48	44	35	15	3	28	20	2	-2,3	-9,0
煤炭结合CCUS	0	0	1	5	7	0	1	4	91	31
热力	6	6	6	3	2	4	3	1	-1,2	-4,5
其他	0	0	1	3	4	0	1	2	33	14
钢铁	36	33	37	36	32	21	22	20	1,1	-0,2
化学品	22	20	26	26	25	13	15	15	2,7	0,7
水泥	12	16	11	11	10	10	7	7	-3,3	-1,3

表 A.2: 能源需求

	能源需求 (艾焦)					占比 (%)			CAAGR (%)	
	2019	2020	2030	2040	2050	2020	2030	2050	2020-2030	2020-2050
交通运输	122	105	102	85	80	100	100	100	-0,3	-0,9
电力	1	1	7	22	35	1	7	44	17	11
液体燃料	115	99	89	53	30	94	87	38	-1,0	-3,9
生物燃料	4	3	13	16	16	3	13	21	15	5,6
石油	111	96	76	35	9	91	74	12	-2,2	-7,4
气体燃料	5	5	6	10	15	5	6	18	2,1	3,7
生物甲烷	0	0	1	1	2	0	0	2	23	11
氢	0	0	1	6	13	0	1	16	92	34
天然气	5	5	4	2	0	5	4	-	-1,5	12
道路	90	81	73	57	50	77	72	63	-0,9	-1,6
乘用车	47	41	30	19	17	39	29	21	-3,1	-2,9
卡车	27	25	28	24	22	24	27	28	1,1	-0,4
航空	14	8	13	13	14	8	13	18	4,6	1,7
航运	12	11	11	10	10	10	11	12	0,4	-0,3
建筑物	129	127	99	89	86	100	100	100	-2,4	-1,3
电力	43	42	45	51	57	33	46	66	0,7	1,0
液体燃料	13	13	9	4	2	10	10	2	-3,2	-6,0
生物燃料	0	0	0	1	1	0	0	1	26	12
石油	13	13	9	4	1	10	9	1	-3,4	-7,7
气体燃料	30	28	23	13	6	22	23	7	-2,1	-4,9
生物甲烷	0	0	1	2	2	0	1	2	29	11
氢	-	0	2	2	2	0	2	2	103	27
天然气	30	28	19	7	1	22	20	1	-3,8	-12
固体燃料	34	34	10	7	6	27	10	7	-11	-5,5
现代生物质	5	5	9	7	6	4	9	7	6,9	0,9
生物质的传统使用	25	25	-	-	-	20	-	-	n.a.	n.a.
煤炭	4	4	1	0	0	3	1	0	-12	-21
热力	7	7	6	5	4	5	6	5	-1,2	-1,6
其他	2	3	5	8	11	2	5	12	7,1	4,8
住宅	91	90	67	59	58	71	67	67	-3,0	-1,5
服务	38	36	32	30	28	29	33	33	-1,2	-0,9
其他	22	23	22	20	18	100	100	100	-0,5	-0,9

表 A.3: 电力

	发电量 (太瓦时)					占比 (%)			CAAGR (%)	
	2019	2020	2030	2040	2050	2020	2030	2050	2020-2030	2020-2050
总发电量	26 922	26 778	37 316	56 553	71 164	100	100	100	3,4	3,3
可再生能源	7 153	7 660	22 817	47 521	62 333	29	61	88	12	7,2
太阳能光伏	665	821	6 970	17 031	23 469	3	19	33	24	12
风能	1 423	1 592	8 008	18 787	24 785	6	21	35	18	9,6
水力	4 294	4 418	5 870	7 445	8 461	17	16	12	2,9	2,2
生物能源	665	718	1 407	2 676	3 279	3	4	5	7,0	5,2
其中配有BECCS	-	-	129	673	842	-	0	1	n.a.	n.a.
聚光太阳能	14	14	204	880	1 386	0	1	2	31	17
地热	92	94	330	625	821	0	1	1	13	7,5
海洋能	1	2	27	77	132	0	0	0	28	14
核能	2 792	2 698	3 777	4 855	5 497	10	10	8	3,4	2,4
氢基	-	-	875	1 857	1 713	-	2	2	n.a.	n.a.
化石燃料结合CCUS	1	4	459	1 659	1 332	0	1	2	61	22
煤炭结合CCUS	1	4	289	966	663	0	1	1	54	19
天然气结合CCUS	-	-	170	694	669	-	0	1	n.a.	n.a.
无减排措施的化石燃料	16 941	16 382	9 358	632	259	61	25	0	-5,4	-13
煤炭	9 832	9 426	2 947	0	0	35	8	0	-11	-40
天然气	6 314	6 200	6 222	626	253	23	17	0	0,0	-10
石油	795	756	189	6	6	3	1	0	-13	-15

	电力装机 (吉瓦)					占比 (%)			CAAGR (%)	
	2019	2020	2030	2040	2050	2020	2030	2050	2020-2030	2020-2050
总装机容量	7 484	7 795	14 933	26 384	33 415	100	100	100	6,7	5,0
可再生能源	2 707	2 994	10 293	20 732	26 568	38	69	80	13	7,5
太阳能光伏	603	737	4 956	10 980	14 458	9	33	43	21	10
风能	623	737	3 101	6 525	8 265	9	21	25	15	8,4
水力	1 306	1 327	1 804	2 282	2 599	17	12	8	3,1	2,3
生物能源	153	171	297	534	640	2	2	2	5,7	4,5
其中配有BECCS	-	-	28	125	152	-	0	0	n.a.	n.a.
聚光太阳能	6	6	73	281	426	0	0	1	28	15
地热	15	15	52	98	126	0	0	0	13	7,4
海洋能	1	1	11	32	55	0	0	0	35	16
核能	415	415	515	730	812	5	3	2	2,2	2,3
氢基	-	-	139	1 455	1 867	-	1	6	n.a.	n.a.
化石燃料结合CCUS	0	1	81	312	394	0	1	1	66	25
煤炭结合CCUS	0	1	53	182	222	0	0	1	59	22
天然气结合CCUS	-	-	28	130	171	-	0	1	n.a.	n.a.
无减排措施的化石燃料	4 351	4 368	3 320	1 151	677	56	22	2	-2,7	-6,0
煤炭	2 124	2 117	1 192	432	158	27	8	0	-5,6	-8,3
天然气	1 788	1 829	1 950	679	495	23	13	1	0,6	-4,3
石油	440	422	178	39	25	5	1	0	-8,3	-9,0
电池储能	11	18	585	2 005	3 097	0	4	9	42	19

表 A.4：二氧化碳排放

	二氧化碳排放（百万吨）					CAAGR（%）	
	2019	2020	2030	2040	2050	2020-2030	2020-2050
二氧化碳总排放	35 926	33 903	21 147	6 316	0	-4,6	n.a.
燃烧活动（+）	33 499	31 582	19 254	6 030	940	-4,8	-11
煤炭	14 660	14 110	5 915	1 300	195	-8,3	-13
石油	11 505	10 264	7 427	3 329	928	-3,2	-7,7
天然气	7 259	7 138	5 960	1 929	566	-1,8	-8,1
生物能源和废弃物	75	71	- 48	- 528	- 748	n.a.	n.a.
工业中的移除量	1	1	214	914	1 186	75	28
生物燃料生产	1	1	142	385	553	68	24
直接空气捕捉	-	-	72	528	633	n.a.	n.a.
电力和热力部门	13 821	13 504	5 817	- 81	- 369	-8,1	n.a.
煤炭	10 035	9 786	2 950	102	70	-11	-15
石油	655	629	173	6	6	-12	-14
天然气	3 131	3 089	2 781	268	128	-1,0	-10
生物能源和废弃物	-	-	- 87	- 457	- 572	n.a.	n.a.
其他能源部门*	1 457	1 472	679	- 85	- 368	-7,4	n.a.
终端消费总量	20 647	18 928	14 723	7 011	1 370	-2,5	-8,4
煤炭	4 486	4 171	2 935	1 186	117	-3,5	-11
石油	10 272	9 077	6 973	3 242	880	-2,6	-7,5
天然气	3 451	3 332	2 668	1 453	303	-2,2	-7,7
生物能源和废弃物	75	71	40	- 70	- 176	-5,6	n.a.
工业*	8 903	8 478	6 892	3 485	519	-2,0	-8,9
钢铁	2 507	2 349	1 779	859	220	-2,7	-7,6
化学品	1 344	1 296	1 199	654	66	-0,8	-9,5
水泥	2 461	2 334	1 899	906	133	-2,0	-9,1
交通运输	8 290	7 153	5 719	2 686	689	-2,2	-7,5
道路	6 116	5 483	4 077	1 793	340	-2,9	-8,9
乘用车	3 121	2 747	1 626	547	85	-5,1	-11
卡车	1 835	1 721	1 614	891	198	-0,6	-6,9
航空	1 019	621	783	469	210	2,4	-3,5
航运	883	800	705	348	122	-1,3	-6,1
建筑物	3 007	2 860	1 809	685	122	-4,5	-10
住宅	2 030	1 968	1 377	542	108	-3,5	-9,2
服务	977	892	432	144	14	-7,0	-13
二氧化碳移除总量	1	1	317	1 457	1 936	79	29
二氧化碳捕获总量	40	40	1 665	5 619	7 602	45	19

*包括工业过程排放。

表 A.5：经济和活动指标

	指标					CAAGR (%)	
	2019	2020	2030	2040	2050	2020-2030	2020-2050
人口 (百万)	7 672	7 753	8 505	9 155	9 692	0,9	0,7
GDP (2019年, 十亿美元 · PPP)	134 710	128 276	184 037	246 960	316 411	3,7	3,1
人均GDP (2019年, 美元, PPP)	17 558	16 545	21 638	26 975	32 648	2,7	2,3
能源供应总量/GDP (吉焦/1 000美元, PPP)	4,543	4,578	2,973	2,164	1,716	-4,2	-3,2
终端消费总量/GDP (吉焦/1 000美元, PPP)	3,231	3,208	2,139	1,468	1,086	-4,0	-3,5
人均能源供应总量 (吉焦)	79,77	75,74	64,33	58,39	56,03	-1,6	-1,0
发电的二氧化碳强度 (千克二氧化碳/千瓦时)	0,468	0,438	0,138	-0,001	-0,005	-11	n.a.

	活动					CAAGR (%)	
	2019	2020	2030	2040	2050	2020-2030	2020-2050
工业生产							
初级化学品 (百万吨)	538	529	641	686	688	1,9	0,9
钢铁 (百万吨)	1 869	1 781	1 937	1 958	1 987	0,8	0,4
水泥 (百万吨)	4 215	4 054	4 258	4 129	4 032	0,5	0,0
交通运输							
乘用车 (十亿乘客公里)	15 300	14 261	15 775	19 159	24 517	1,0	1,8
卡车 (十亿吨公里)	26 646	25 761	38 072	49 756	59 990	4,0	2,9
航空 (十亿乘客公里)	8 506	5 474	10 271	11 573	14 566	6,5	3,3
航运 (十亿吨公里)	107 225	109 153	155 621	209 905	291 032	3,6	3,3
建筑物							
服务业楼面面积 (百万平方米)	49 670	49 825	58 867	68 576	78 157	1,7	1,5
住宅楼面面积 (百万平方米)	190 062	192 558	235 745	290 696	345 183	2,0	2,0
百万住户	2 095	2 116	2 435	2 765	3 051	1,4	1,2

技术成本

发电

表 B.1 ► 净零排放情景下，部分地区的发电技术成本

	融资利率 (%)	资本投入成本 (美元/千瓦)			容量系数 (%)			燃料、二氧化碳 及运维 (美元/兆 瓦时)			平准化电力成本 (美元/兆瓦时)		
	全部	2020	2030	2050	2020	2030	2050	2020	2030	2050	2020	2030	2050
美国													
核能	8.0	5 000	4 800	4 500	90	80	75	30	30	30	105	110	110
煤炭	8.0	2 100	2 100	2 100	20	n.a.	n.a.	90	170	235	220	n.a.	n.a.
燃气 CCGT	8.0	1 000	1 000	1 000	55	25	n.a.	50	80	105	70	125	n.a.
太阳能光伏	3.7	1 140	620	420	21	22	23	10	10	10	50	30	20
陆上风能	3.7	1 540	1 420	1 320	42	43	44	10	10	10	35	35	30
海上风能	4.5	4 040	2 080	1 480	42	46	48	35	20	15	115	60	40
欧盟													
核能	8.0	6 600	5 100	4 500	75	75	70	35	35	35	150	120	115
煤炭	8.0	2 000	2 000	2 000	20	n.a.	n.a.	120	205	275	250	n.a.	n.a.
燃气 CCGT	8.0	1 000	1 000	1 000	40	20	n.a.	65	95	120	100	150	n.a.
太阳能光伏	3.2	790	460	340	13	14	14	10	10	10	55	35	25
陆上风能	3.2	1 540	1 420	1 300	29	30	31	15	15	15	55	45	40
海上风能	4.0	3 600	2 020	1 420	51	56	59	15	10	5	75	40	25
中国													
核能	7.0	2 800	2 800	2 500	80	80	80	25	25	25	65	65	60
煤炭	7.0	800	800	800	60	n.a.	n.a.	75	135	195	90	n.a.	n.a.
燃气 CCGT	7.0	560	560	560	45	35	n.a.	75	100	120	90	115	n.a.
太阳能光伏	3.5	750	400	280	17	18	19	10	5	5	40	25	15
陆上风能	3.5	1 220	1 120	1 040	26	27	27	15	10	10	45	40	40
海上风能	4.3	2 840	1 560	1 000	34	41	43	25	15	10	95	45	30
印度													
核能	7.0	2 800	2 800	2 800	70	70	70	30	30	30	75	75	75
煤炭	7.0	1 200	1 200	1 200	50	n.a.	n.a.	35	50	75	65	n.a.	n.a.
燃气 CCGT	7.0	700	700	700	55	50	n.a.	45	45	50	55	60	n.a.
太阳能光伏	5.8	580	310	220	20	21	21	5	5	5	35	20	15
陆上风能	5.8	1 040	980	940	26	28	29	10	10	10	50	45	40
海上风能	6.6	2 980	1 680	1 180	32	37	38	25	15	10	130	70	45

注：CCGT = 联合循环燃气轮机；n.a. = 不适用。成本各组成部分和平准化电力成本的数字四舍五入。

来源：国际能源署的分析；国际可再生能源署可再生成本计算联盟；IRENA (2020)。

- 平准化度电成本的主要贡献因素为：隔夜资本成本；相对于最大额定容量的描述全年平均产出的装机容量系数（提供的是典型值）；燃料投入成本；以及运营和维护成本。假设太阳能光伏、陆上风能和海上风能的经济寿命为 25 年。
- 加权平均资本成本（WACC）反映了《2020 年世界能源展望》中对公用事业规模太阳能光伏的分析（IEA, 2020），以及《2019 年海上风电展望》中对海上风电的分析（IEA, 2019）。假设陆上风电的加权平均资本成本与公用事业规模太阳能光伏的相同。假设核电厂、燃煤电厂和燃气电厂具有同样的标准加权平均资本成本（7-8%，根据经济发展阶段而异）。
- 燃料、二氧化碳以及运维成本反映了预测中指定日期之后十年的平均值。
- 核能的资本投入成本代表的是新反应堆设计的“第 n 个此类”项目成本，与首个此类项目相比，成本已大幅降低。

电池和氢能

表 B.2 ▸ 净零排放情景下，电池生产和制氢技术的资本投入成本

	2020	2030	2050
用于交通运输的电池组（美元/千瓦时）	130 - 155	75 - 90	55 - 80
低温电解装置（美元/千瓦电）	835 - 1 300	255 - 515	200 - 390
天然气结合 CCUS（美元/千瓦氢）	1 155 - 2 010	990 - 1 725	935 - 1 625

注：CCUS = 碳捕捉、利用和封存。电解装置和用天然气结合 CCUS 制氢的资本投入成本是隔夜成本。

来源：国际能源署的分析。

定义

本附录提供了本报告所使用术语的一般信息，包括：单位和一般换算系数，燃料、工艺流程和部门的定义，区域和国家分组，以及缩略语和缩写。

单位

面积	km ²	平方公里
	Mha	百万公顷
电池	Wh/kg	每千克的瓦时数
煤炭	Mtce	百万吨煤当量（相当于 0.7 百万吨油当量）。
距离	km	公里
排放	ppm	百万分之（按体积计算）
	tCO ₂	吨二氧化碳
	Gt CO ₂ -eq	吉吨二氧化碳当量（使用不同温室气体的 100 年全球升温潜能值）
	kg CO ₂ -eq	千克二氧化碳当量
	g CO ₂ /km	每公里的二氧化碳克数
能源	kg CO ₂ /kWh	每千瓦时的二氧化碳千克数
	EJ	艾焦
	PJ	拍焦
	TJ	太焦
	GJ	吉焦
	MJ	兆焦
	boe	桶油当量
	toe	吨油当量
	ktoe	千吨油当量
	Mtoe	百万吨油当量
	MBtu	百万英热单位
	kWh	千瓦时
	MWh	兆瓦时
	GWh	吉瓦时
	TWh	太瓦时
燃气	bcm	十亿立方米
	tcm	万亿立方米
质量	kg	千克（1 000 千克=1 吨）
	kt	千吨（1 吨 x 10 ³ ）
	Mt	百万吨（1 吨 x 10 ⁶ ）

货币	Gt	吉吨（1 吨 $\times 10^9$ ）
	USD million	百万美元（1 美元 $\times 10^6$ ）
	USD billion	十亿美元（1 美元 $\times 10^9$ ）
	USD trillion	万亿美元（1 美元 $\times 10^{12}$ ）
	USD/tCO ₂	美元/吨二氧化碳
石油	kb/d	千桶/天
	mb/d	百万桶/天
	mboe/d	百万桶油当量/天
电力	W	瓦（每秒 1 焦）
	kW	千瓦（1 瓦 $\times 10^3$ ）
	MW	兆瓦（1 瓦 $\times 10^6$ ）
	GW	吉瓦（1 瓦 $\times 10^9$ ）
	TW	太瓦（1 瓦 $\times 10^{12}$ ）

能源的一般换算系数

		转换为				
		EJ	Gcal	Mtoe	MBtu	GWh
转换自	EJ	1	238.8×10^6	23.88	$9.47.8 \times 10^3$	2.778×10^5
	Gcal	4.1868×10^{-9}	1	10^{-7}	3.968	1.163×10^{-3}
	Mtoe	4.1868×10^{-2}	10^7	1	3.968×10^7	11 630
	MBtu	1.0551×10^{-9}	0.252	2.52×10^{-8}	1	2.931×10^{-4}
	GWh	3.6×10^{-6}	860	8.6×10^{-5}	3 412	1

注：桶油当量（boe）没有普遍接受的定义；通常使用的转换系数是每吨油当量（toe）为 7.15 到 7.40 桶油当量。

货币换算

汇率 (2019 年均值)	1 美元 (USD) 等于：
英镑	0.78
人民币	6.91
欧元	0.89
印度卢比	70.42
印度尼西亚卢比	14 147.67
日元	109.01
俄罗斯卢布	64.74
南非兰特	14.45

来源：经合组织国民账户统计：购买力平价和汇率数据集，2020 年 7 月。

定义

先进生物能源：是以非粮食作物为原料生产的可持续燃料，与化石燃料替代品相比，能够显著减少生命周期内的温室气体排放量，并且不与粮食和饲料作物直接竞争农业用地，也不会对可持续性产生不利影响。此处的定义与美国立法中“先进生物燃料”的定义不同，后者基于生命周期内温室气体减少 50%或以上，因此包括甘蔗乙醇。

农业：包括农场、林业和渔业使用的所有能源。

农业、林业和其他土地利用（AFOLU）排放：包括农业、林业和其他土地利用所产生的温室气体排放。

氨（NH₃）：是一种氮氢化合物。它可以直接作为燃料燃烧使用，也可以在燃料电池中使用，或作为氢载体使用。低碳燃料氨必须由低碳氢和通过哈伯法分离出的氮气制成，并且制造过程中的电力需求由低碳电力满足。

航空：这种交通运输方式包括国内和国际航班及其使用的航空燃料。国内航空包括在同一国家起落的航班，也包括军事目的航班。国际航空包括在出发地以外的国家降落的航班。

备用发电能力：连接到主电网的住户和企业可能也有备用的发电能力，在电网中断的情况下，备用发电能力可以提供电力。备用发电机通常以柴油或汽油为燃料，容量可以小到几千瓦。这种能力有别于未连入主电网的小型电网和离网系统。

生物柴油：相当于柴油，是由植物油和动物脂肪通过酯交换反应（将油中的甘油三酯进行转化的化学过程）制成的加工燃料。

生物能源：生物质原料和沼气所衍生的固体、液体和气体产品中的能量含量。包括固体生物质、液体生物燃料和生物气。

沼气：甲烷、二氧化碳和少量其他气体的混合物，由在无氧环境中厌氧消化有机物产生。

生物气：包括沼气和生物甲烷。

生物甲烷：生物甲烷是一种近乎纯净的甲烷来源，它通过沼气升级（移除沼气中存在的任何二氧化碳和其他污染物的过程）或固体生物质气化然后甲烷化来生产。也被称为可再生天然气。

建筑物：建筑物部门包括住宅、商业和机构建筑物以及非特定其他建筑物所使用的能源。建筑物能源使用包括空间加热和冷却、水加热、照明、电器和烹饪设备。

舱载燃料：包括国际航海舱载燃料和国际航空舱载燃料。

可信容量：电网需求高峰期间，连入电网的能够按预期可靠发电的那部分容量。

碳捕捉、利用和封存（CCUS）：将二氧化碳从燃料燃烧、工业过程的排放中，或直接从大气中捕捉的过程。捕获的二氧化碳排放物可以封存在陆地或海洋的地下地质构造中，或作为投入物或原料来生产产品。

清洁能源：包括可再生能源、能源效率、低碳燃料、核能、电池储存，以及碳捕捉、利用和封存。

清洁烹饪设施：与利用固体生物质的传统设施（如三石火）相比，清洁烹饪设施被认为是更安全、更高效、更环保的烹饪设施。主要是指改良的固体生物质炉灶、沼气系统、液化石油气炉灶、乙醇和太阳能炉灶。

煤炭：包括原煤（包括暗色褐煤、焦煤和蒸汽煤）和衍生燃料（包括型煤、褐煤型煤、焦炉焦、煤气焦、煤气厂气、焦炉煤气、高炉煤气和氧气炼钢炉煤气）。也包括泥炭。

聚光太阳能（CSP）：收集和汇聚太阳光，以产生高温热量来发电的太阳能热力/发电系统。

传统液体生物燃料：以粮食作物为原料生产的燃料。这些液体生物燃料通常被称为第一代生物燃料，包括甘蔗乙醇、淀粉基乙醇、脂肪酸甲酯（FAME）和纯植物油（SVO）。

分解分析：对综合指标进行分解的统计方法，用以量化导致综合指标变化的一组预先确定的因素的相对贡献。本报告采用对数平均迪氏指数（LMDI）分解法的加法指数分解。

需求侧集成（DSI）：包括两类措施：影响负荷形状的措施，如能效和电气化；以及管理负荷的措施，如需求侧响应。

需求侧响应（DSR）：描述了可以影响负荷曲线的措施，如在不影响电力总需求的前提下及时移动负荷曲线，或减载，如在短时间内中断需求或在一定时间内调整需求强度。

可调度发电：是指功率输出可以随时控制的技术（增加到最大额定容量或减少到零），以便使供需匹配。

电力需求：定义为总发电量减去自用发电量，加上净贸易额（进口额减去出口额），再减去输配电损耗。

发电量：定义为单纯发电厂或热电联产厂生产的电力总量，包括厂内自用发电量。也称为总发电量。

能源部门的二氧化碳排放：燃料燃烧产生的二氧化碳排放（不包括不可再生的废弃物）。请注意，燃料的逃逸排放、交通运输产生的二氧化碳、储存排放或工业过程排放不包括在内。

能源部门的温室气体排放：燃料燃烧产生的二氧化碳排放加上逃逸的和放空排放的甲烷，以及能源和工业部门的一氧化二氮（N₂O）排放。

能源服务：见“有用能源”。

乙醇：仅指生物乙醇。乙醇是通过发酵碳水化合物含量高的任何生物物质而产生的。如今，乙醇是用淀粉和糖制成的，但第二代技术将能够用纤维素和半纤维素制乙醇；纤维素和半纤维素是纤维状材料，是构成大多数植物物质的主要成分。

费托合成：生产合成燃料的催化生产过程。可以使用天然气、煤炭或生物物质作为原料。

燃气：包括天然气、生物气、合成甲烷和氢气。

地热：地热能是来自地球地表下的热能。水和/或蒸汽将地热能带到地表。根据其特点，地热能可用于加热和冷却，或者在温度足够的情况下用于产生清洁电力。

热力（最终用途）：可以从化石或可再生燃料的燃烧、直接地热或太阳能热力系统、放热的化学反应过程和电力（通过电阻加热，或可以从环境空气和液体中采集热量的热泵）中获取。这里指的是一系列广泛的最终用途，包括空间和水的加热、建筑物中的烹饪，以及工业中的脱盐和过程应用。不包括冷却应用。

热力（供应）：从燃料的燃烧、核反应堆、地热资源和太阳光的捕捉中获得。它可用于加热或冷却，或转化为机械能用于交通运输或发电。商业热力的销售情况在终端消费总量中报告，燃料投入分别划归于电力和热力部门项下。

氢：氢在能源系统中用于精炼碳氢化合物燃料，本身也是一种能源载体。它由其他能源产品制成，也用于化学品生产。氢作为一种能源载体，可以以碳氢化合物燃料为原料制成，或通过电解水产生，也可以燃烧或在燃料电池中用于发电和供热，应用范围广泛。低碳氢必须避免与化石制氢有关的排放（例如通过碳捕捉、利用和封存来避免）；如果采用水解制氢，则低碳氢要求电力输入必须是低碳电力。在本报告中，氢的最终消费包括对纯氢的需求，不包括同一实体在同一地点生产并消费的氢。对氨、合成碳氢化合物等氢基燃料的需求则另行考虑。

氢基燃料：包括氨和合成碳氢化合物（气体和液体）。在图表中，氢基是指氢和氢基燃料。

水力发电：假设效率为 100%，水力发电站发电的能量含量。不包括抽水蓄能和海洋能（潮汐能和波浪能）电厂的产出。

工业：工业部门包括制造业和建筑业使用的燃料。主要的行业分支包括钢铁、化学品和石化产品、水泥，以及纸浆及造纸。不包括将能源转化为其他形式或用于生产燃料的行业使用，此类使用在其他能源部门下另行报告。货物运输的燃料消费在交通运输部门项下报告，而非道路车辆的消费则在工业项下报告。

国际航空舱载燃料：包括交付给国际航空飞机的航空燃料。不包括航空公司用于其道路车辆的燃料。国内/国际的划分依据是起降地，而不是航空公司的国籍。许多国家在这一项中错误地排除了本国承运公司用于国际始发航班的燃料。

国际航海舱载燃料：包括交付给从事国际航行的各国船舶的燃料。国际航行可以在海洋、内陆湖泊和水路以及沿海水域进行。不包括从事国内航行的船舶的消费。国内/国际的划分依据是出发港和到达港，而不是船舶的旗帜或国籍。此项不包括渔船和军舰的消费，这类消费包括在居民、服务和农业项下。

投资：所有的投资数据和预测都反映了项目整个生命周期的支出，也就是说，资本支出计入发生的当年。石油、燃气和煤炭投资包括生产、转化和运输；电力部门投资包括各种燃料和技术的电网、小型电网和离网发电的整修、升级、新建和替换，以及输配电和电池储存投资。除非另有说明，投资数据均以 2019 年的美元实际价值呈现。

轻型车辆（LDV）：包括乘用车和轻型商用车（车辆总重<3.5 吨）。

液体生物燃料: 生物质或废弃原料衍生的液体燃料，包括乙醇和生物柴油。根据生产中使用的生物能源原料和技术，以及其各自的成熟度，液体生物燃料可以分为传统和先进液体生物燃料。除非另有说明，液体生物燃料均以汽油和柴油的能量当量体积表示。

液体: 包括石油、液体生物燃料（以汽油和柴油的能量当量体积表示）、合成油和氨。

低碳电力: 包括可再生能源技术、氢能发电、核电，以及配备碳捕捉、利用和封存的化石燃料发电厂。

低排放燃料: 包括液体生物燃料、沼气和生物甲烷，以及氢和以氢基燃料，这些燃料在使用时不会直接排放化石燃料的任何二氧化碳，在生产时排放量也很少。

海洋能: 指从潮汐运动、波浪运动或洋流中获得并用于发电的机械能。

商品氢: 一家公司为销售给其他公司而生产的氢；相当于终端消费总量中报告的氢。

小型电网: 连接若干住户或其他消费者的小型电网系统。

现代生物能源: 包括从可持续来源收获的现代固体生物质、液体生物燃料和生物气。不包括生物质的传统使用。

现代能源的普及: 包括普及住户所需的最低水平电力；普及住户所需的更安全、更可持续的烹饪和加热燃料以及炉灶；普及生产性经济活动所需的能源；以及普及公共服务所需的能源。

现代可再生能源: 包括除固体生物质传统使用以外的所有可再生能源的使用。

现代固体生物质: 指在改良炉灶中使用固体生物质，以及使用颗粒等加工生物质的现代技术。

天然气: 包括产生于矿床中的液态和气态燃气，主要成分为甲烷。包括碳氢化合物气田出产的仅以气态形式存在的“非伴生”气、与原油共存的“伴生”气，以及从煤矿回收的甲烷（煤矿瓦斯）。不包括天然气凝析液（NGLs）、人造煤气（由城市或工业废弃物或污水产生）以及放空排放或燃除的体量。立方米燃气数据以总热值表示，在 15.2、760 毫米汞柱条件（“标准条件”）下测量。吨油当量燃气数据以净热值表示，主要是为了便于与其他燃料进行比较。净热值和总热值之间的差异在于燃料燃烧过程中产生的水蒸气的汽化潜热（燃气的净热值比总热值低 10%）。

天然气凝析液（NGLs）: 在制造、净化和稳定天然气的过程中产生的液体或液化烃。天然气凝析液是在分离器、油田设施或燃气加工厂中作为液体回收的那部分天然气。天然气凝析液包括但不限于乙烷（从天然气流中移除出来的乙烷）、丙烷、丁烷、戊烷、天然汽油和凝析物。

管网燃气: 包括天然气、生物甲烷、合成甲烷和在燃气管网中混入的氢。

非能源使用: 用于化学原料和非能源产品的燃料。非能源产品的例子包括润滑剂、石蜡、沥青、柏油、煤焦油和木材防腐油。

核能: 指核电站发电的一次能源当量，假设平均转化效率为 33%。

离网系统: 为单个住户或消费者群体提供的独立系统。

海上风能：指安装在开放水域（通常为海洋）中的风力涡轮机所产生的电力。

石油：石油生产包括常规和非常规石油。石油产品包括炼厂气、乙烷、液化石油气、航空汽油、汽车汽油、航空燃油、煤油、汽油/柴油、重质燃料油、石脑油、油漆溶剂油、润滑油、柏油、石蜡、蜡和石油焦。

其他能源部门：涵盖转化行业对能源的使用，以及将一次能源转化为可用于最终消费部门的形式时的能源损失。包括煤气厂、炼油厂、高炉、焦炉、煤炭和燃气转化和液化、生物燃料生产以及氢和氢基燃料生产的能源损失。还包括在煤矿、油气开采、直接空气捕捉、生物燃料生产以及电力和热力生产中的工厂自用能源。转移和统计差异也包括在这一类别中。

发电：指发电厂、热力厂和热电联产厂的燃料使用。包括公用事业发电厂和生产自用燃料的小型厂（汽车生产厂）。

生产性使用：用于经济目的的能源：农业、工业、服务业和非能源使用。交通运输部门的一部分能源需求，如货运，也可以被认为是生产性使用，但在本报告中另归一类。

可再生能源：包括用于电力和热力生产的生物能源、地热、水力、太阳能光伏（PV）、聚光太阳能（CSP）、风能和海洋（潮汐和波浪）能源。

住宅：住户使用的能源，包括空间加热和冷却、水加热、照明、电器、电子装置和烹饪设备。

服务：酒店、办公楼、餐饮、店铺和机构建筑物（学校、医院、办公室等）等商业设施中使用的能源。服务业的能源使用包括空间加热和冷却、水加热、照明、设备、电器和烹饪设备。

页岩气：包含在页岩（一种常见岩石）中的天然气。页岩地层具有渗透率低的特点，与传统储层相比，气体在页岩中的流动能力受限较大。页岩气一般采用水力压裂法生产。

航运/航行：这个交通运输细分部门包括国内和国际航行及其对航海燃料的使用。国内航行包括货物或人员的内河运输和国内海上旅行（起点和终点在同一国家，途中不经停任何外国港口）。国际航行包括交付给任何国籍的、运输货物或乘客的商船（包括客船）在国际旅途使用的燃料量。

太阳能光伏（PV）：由太阳能光伏电池产生的电力。

固体生物质：包括木炭、薪柴、粪便、农业残余物、木材废料和其他固体废弃物。

蒸汽煤：主要用于生产热力或供应蒸汽的煤炭，通常用于电厂，有些情况下也用于工业。一般而言，蒸汽煤的质量不足以用于炼钢。这种质量的煤炭通常也被称为动力煤。

合成甲烷：低碳合成甲烷是由低碳氢和来自生物源或大气源的二氧化碳发生甲烷化而产生的。

合成油：通过费托转化或用合成气（氢气和一氧化碳的混合物）合成甲醇而生产的低碳合成油。

能源供应总量（TES）：仅代表国内需求，细分为电力和热力生产、其他能源部门，以及终端消费总量。

终端消费总量（TFC）：是指各终端用能部门的消费之和。终端消费总量细分为以下部门的能源需求：工业（包括制造业和采矿业）、交通运输、建筑物（包括住宅和服务）和其他（包括农业和非能源使用）。不包括国际航海和航空舱载燃料，但在世界层级上，此类燃料包括在交通运输部门内。

终端能源消费总量（TFEC）：是一个主要为跟踪联合国可持续发展目标 7.2 的进展而定义的变量。包含终端用能部门的终端消费总量（TFC），但不包括非能源使用。不包括国际航海和航空舱载燃料（世界层级除外）。通常，在计算可再生能源在终端能源消费总量中的份额（可持续发展目标指标 7.2.1）时，终端能源消费总量作为分母使用。

一次能源需求总量（TPED）：见“能源供应总量”

固体生物质的传统使用：指通过基本技术来使用固体生物质，如三石火，通常没有烟囱或烟囱作用较差。

交通运输：在一国领土内运输货物或人员所使用的燃料和电力，无论活动发生在哪一个经济部门。包括交付给公共道路车辆或轨道车辆的燃料和电力；交付给国内航行的船舶的燃料；交付给国内航空的飞机的燃料；以及通过管道运送燃料时消耗的能源。交付给国际航海和航空的舱载燃料仅在世界层级上报告，不包括在国内层级的交通运输部门中。

卡车：包括中型卡车（车辆总重 3.5-15 吨）和重型卡车（>15 吨）。

有用能源：是指提供给终端使用者满足其需求的能源。也称为能源服务需求。对大多数技术而言，由于在使用节点上存在转化损失，因此有用能源量低于相应的终端能源需求。使用电力的设备通常比使用其他燃料的设备具有更高的转化效率，即单位电力消耗可以提供较多的能源服务。

风能：风力涡轮机利用风的动能产生的电力。

木质能源作物：用于生物能源生产的木质生物质的短周期轮作，如柳树和芒草萌生林。

可变可再生能源（VRE）：指最大输出在任何时刻均取决于可再生能源资源可用性波动的技术。可变可再生能源包括广泛的一系列技术，如风力发电、太阳能光伏、江河水电、聚光太阳能（不包括热储存）和海洋能（潮汐和波浪）。

零碳就绪建筑物：零碳就绪建筑物是高效建筑，要么直接使用可再生能源，要么使用能够完全脱碳的能源供应，如电力或区域供热。

零排放车辆（ZEVs）：能够在运行时不排放二氧化碳尾气的车辆（电池电动车和燃料电池车）。

区域和国家组别

发达经济体：经合组织区域组，以及保加利亚、克罗地亚、塞浦路斯^{1,2}、马耳他和罗马尼亚。

非洲：北非和撒哈拉以南非洲区域组。

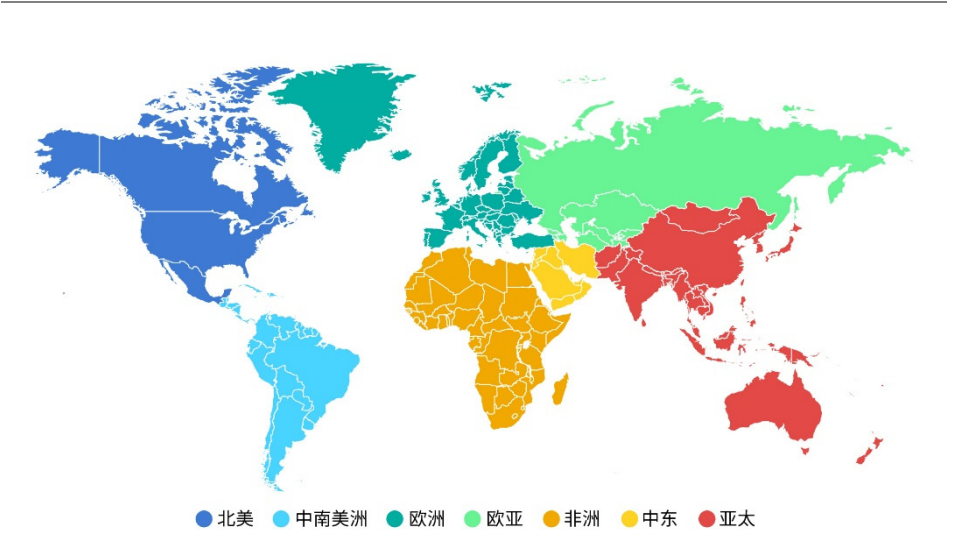
亚太：东南亚区域组，以及澳大利亚、孟加拉国、中国、印度、日本、韩国、朝鲜民主主义人民共和国、蒙古、尼泊尔、新西兰、巴基斯坦、斯里兰卡、中华台北以及其他亚太国家和领土。³

里海：亚美尼亚、阿塞拜疆、格鲁吉亚、哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦、塔吉克斯坦、土库曼斯坦和乌兹别克斯坦。

中南美洲：阿根廷、多民族玻利维亚国（玻利维亚）、巴西、智利、哥伦比亚、哥斯达黎加、古巴、库拉索、多米尼加共和国、厄瓜多尔、萨尔瓦多、危地马拉、海地、洪都拉斯、牙买加、尼加拉瓜、巴拿马、巴拉圭、秘鲁、苏里南、特立尼达和多巴哥、乌拉圭、委内瑞拉玻利瓦尔共和国（委内瑞拉），以及其他中南美洲国家和领土。⁴

中国：包括中国和中国香港。

图 C.1 ▶ 主要国家组别



注：本地图不影响任何领土的地位或主权，不影响国际边界的划定以及任何领土、城市或地区的名称。

发展中亚洲：除澳大利亚、日本、韩国和新西兰以外的亚太区域组。

新兴市场和发展中经济体：没有包括在发达经济体区域组中的所有其他国家。

欧亚：里海区域组和俄罗斯联邦（俄罗斯）。

欧洲：欧盟区域组，以及阿尔巴尼亚、白俄罗斯、波斯尼亚和黑塞哥维那、北马其顿、直布罗陀、冰岛、以色列⁵、科索沃、黑山、挪威、塞尔维亚、瑞士、摩尔多瓦共和国、土耳其、乌克兰和英国。

欧盟：奥地利、比利时、保加利亚、克罗地亚、塞浦路斯^{1,2}、捷克共和国、丹麦、爱沙尼亚、芬兰、法国、德国、希腊、匈牙利、爱尔兰、意大利、拉脱维亚、立陶宛、卢森堡、马耳他、荷兰、波兰、葡萄牙、罗马尼亚、斯洛伐克共和国、斯洛文尼亚、西班牙和瑞典。

国际能源署（IEA）：除智利、哥伦比亚、冰岛、以色列、拉脱维亚、立陶宛和斯洛文尼亚以外的经合组织区域组。

拉丁美洲：中南美洲区域组和墨西哥。

中东：巴林、伊朗伊斯兰共和国（伊朗）、伊拉克、约旦、科威特、黎巴嫩、阿曼、卡塔尔、沙特阿拉伯、阿拉伯叙利亚共和国（叙利亚）、阿拉伯联合酋长国和也门。

非经合组织：没有包括在经合组织区域组中的所有其他国家。

非欧佩克：没有包括在欧佩克区域组中的所有其他国家。

北非：阿尔及利亚、埃及、利比亚、摩洛哥和突尼斯。

北美洲：加拿大、墨西哥和美国。

经合组织（经济合作与发展组织，OECD）：澳大利亚、奥地利、比利时、加拿大、智利、哥伦比亚、捷克共和国、丹麦、爱沙尼亚、芬兰、法国、德国、希腊、匈牙利、冰岛、爱尔兰、以色列、意大利、日本、韩国、拉脱维亚、立陶宛、卢森堡、墨西哥、荷兰、新西兰、挪威、波兰、葡萄牙、斯洛伐克共和国、斯洛文尼亚、西班牙、瑞典、瑞士、土耳其、英国和美国。

欧佩克（石油输出国组织，OPEC）：阿尔及利亚、安哥拉、刚果共和国（刚果）、赤道几内亚、加蓬、伊朗伊斯兰共和国（伊朗）、伊拉克、科威特、利比亚、尼日利亚、沙特阿拉伯、阿拉伯联合酋长国和委内瑞拉玻利瓦尔共和国（委内瑞拉）。

东南亚：文莱达鲁萨兰国、柬埔寨、印度尼西亚、老挝人民民主共和国（老挝）、马来西亚、缅甸、菲律宾、新加坡、泰国和越南。这些国家都是东盟（东南亚国家联盟，ASEAN）的成员。

撒哈拉以南非洲安哥拉、贝宁、博茨瓦纳、喀麦隆、刚果共和国（刚果）、科特迪瓦、刚果民主共和国、厄立特里亚、埃塞俄比亚、加蓬、加纳、肯尼亚、毛里求斯、莫桑比克、纳米比亚、尼日尔、尼日利亚、塞内加尔、南非、南苏丹、苏丹、坦桑尼亚联合共和国（坦桑尼亚）、多哥、赞比亚、津巴布韦和其他非洲国家和领土。⁶

国家注释

¹ 土耳其的注释：本文档中有关“塞浦路斯”的信息指的是该岛屿的南部。岛上并没有同时代表土族塞人和希族塞人的单一机构。土耳其承认北塞浦路斯土耳其共和国（TRNC）。在联合国范围内找到持久公正的解决方案之前，土耳其保留其对“塞浦路斯问题”的立场。

² 经合组织成员国中所有欧盟成员国和欧盟的注释：联合国除土耳其以外的所有会员国承认塞浦路斯共和国。本文档中的信息涉及塞浦路斯共和国政府有效控制的地区。

³ 以下国家和地区没有单独的数据，对其进行了汇总估计：阿富汗、不丹、库克群岛、斐济、法属波利尼西亚、基里巴斯、澳门（中国）、马尔代夫、新喀里多尼亚、帕劳、巴布亚新几内亚、萨摩亚、所罗门群岛、东帝汶，以及汤加和瓦努阿图。

⁴ 以下国家和地区没有单独的数据，对其进行了汇总估计：安圭拉、安提瓜和巴布达、阿鲁巴、巴哈马、巴巴多斯、伯利兹、百慕大、博内尔、英属维尔京群岛、开曼群岛、多米尼克、福克兰群岛（马尔维纳斯）、法属圭亚那、格林纳达、瓜德罗普、圭亚那、马提尼克、蒙特塞拉特、萨巴、圣尤斯特歇斯、圣基茨和尼维斯、圣卢西亚、圣皮埃尔和密克隆、圣文森特和格林纳丁斯、圣马腾、特克斯和凯科斯群岛。

⁵ 以色列的统计数据由以色列有关当局提供并由其负责。经合组织和/或国际能源署使用这些数据并不影响国际法规定的戈兰高地、东耶路撒冷和西岸以色列定居点的地位。

⁶ 以下国家和地区没有单独的数据，对其进行了汇总估计：布基纳法索、布隆迪、佛得角、中非共和国、乍得、科摩罗、吉布提、斯威士兰王国、冈比亚、几内亚、几内亚比绍、莱索托、利比里亚、马达加斯加、马拉维、马里、毛里塔尼亚、留尼汪、卢旺达、圣多美和普林西比、塞舌尔、塞拉利昂、索马里和乌干达。

缩略语和缩写

AFOLU	农业、林业和其他土地利用
APC	已宣布承诺情景
ASEAN	东南亚国家联盟（东盟）
BECCS	配备碳捕捉、利用和封存（CCUS）的生物能源
BEV	电池电动车
CCUS	碳捕捉、利用和封存
CDR	二氧化碳移除
CFL	紧凑型荧光灯
CH ₄	甲烷
CHP	热电联产；有时也使用“联合发电”一词
CNG	压缩天然气
CO	一氧化碳
CO ₂	二氧化碳
CO ₂ -eq	二氧化碳当量
COP	缔约方会议（《联合国气候变化框架公约》，UNFCCC）
CSP	聚光太阳能
DAC	直接空气捕捉
DACCS	直接空气碳捕获和封存
DER	分布式能源资源
DSI	需求侧集成
DSO	配电系统运营商
DSR	需求侧响应
EAF	电弧炉
EHOB	超重油和柏油
ETP	能源技术展望
EU	欧洲联盟（欧盟）
EV	电动车
FCEV	燃料电池电动车
GDP	国内生产总值
GHG	温室气体
GTL	气变液
HEFA	氢化酯和脂肪酸
ICE	内燃机
IEA	国际能源署

IIASA	国际应用系统分析研究所
IMF	国际货币基金组织
IOC	国际石油企业
IPCC	政府间气候变化专门委员会
LCC	低 CCUS 情景
LDVs	轻型车辆
LCV	轻型商用车辆
LED	发光二极管
LNG	液化天然气
LPG	液化石油气
MEPS	最低能源性能标准
NDCs	国家自主贡献
NEA	核能署（经合组织下设的一个机构）
NGLs	天然气凝析液
NGV	天然气车辆
NOC	国家石油企业
NO_x	氮氧化合物
N₂O	一氧化二氮
NZE	净零排放情景
OECD	经济合作与发展组织（经合组织）
OPEC	石油输出国组织（欧佩克）
PHEV	插电式混合动力车
PLDV	轻型客车
PM	颗粒物
PM_{2.5}	细颗粒物
PPP	购买力平价
PV	光伏
R&D	研发
RD&D	研发和示范
SAF	可持续航空燃料
SDG	可持续发展目标（联合国）
SO₂	二氧化硫
SR1.5	政府间气候变化专门委员会《全球升温 1.5°C 特别报告》
STEPS	既定政策情景
T&D	传输和配送（输配）
TES	能源供应总量
TFC	终端消费总量
TFEC	终端能源消费总量
TPED	一次能源需求总量
UEC	单位能耗
UN	联合国

UNDP	联合国开发计划署
UNEP	联合国环境署
UNFCCC	《联合国气候变化框架公约》
UK	英国
US	美国
VRE	可变可再生能源
WEO	《世界能源展望》
WHO	世界卫生组织
ZEV	零排放车辆

参考文献

第 1 章：已宣布的净零承诺与能源部门

climatewatchdata (2021), <https://www.climatewatchdata.org/ndc-overview>.

European Commission (2018), 2018 - *Vision for a long-term EU strategy for reducing greenhouse gas emissions*, https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_en.

IEA (International Energy Agency) (2021), *Global Energy Review 2021*, <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2021>.

– (2020a), *Sustainable Recovery*, <https://www.iea.org/reports/sustainable-recovery/a-sustainable-recovery-plan-for-the-energy-sector>.

– (2020b), *World Energy Outlook 2020*, <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>.

– (2020c), *Energy Technology Perspectives 2020*, <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020>.

– (2020c), *World Energy Balances 2020 edition: database documentation*, http://wds.iea.org/wds/pdf/WORLDBAL_Documentation.pdf.

– (2020e), *Special Report on Clean Energy Innovation*, <https://www.iea.org/reports/clean-energy-innovation>.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2018), *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels*, IPCC, <https://www.ipcc.ch/sr15/>.

WRI and WBCSD (World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development) (2004), *The Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard*, WRI and WBCSD, Washington, DC, <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/ghg-protocol-revised.pdf>.

第 2 章：2050 年全球二氧化碳净零排放路径

Amann, M. et al.(2011), "Cost-effective control of air quality and greenhouse gases in Europe:Modelling and policy applications", *Environmental Modelling*, Vol 26, pp. 1489-1501.

Anderson et al.(2013), *Getting to know GIMF:The Simulation Properties of the Global Integrated Monetary and Fiscal Model*, International Monetary Fund, Washington, DC, <https://www.imf.org/external/pubs/ft/wp/2013/wp1355.pdf>.

Assemblée Nationale (2021), (Proposed law aiming to replace domestic flights by train), *PROPOSITION DE LOI visant à remplacer les vols intérieurs par le train*, https://www.assemblee-nationale.fr/dyn/15/textes/l15b2005_proposition-loi.

Aydin, E., D. Brounen and N. Kok (2018), "Information provision and energy consumption: Evidence from a field experiment", *Energy Economics*, Vol. 71, pp. 403-411., <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2018.03.008>.

Byars, M., Y. Wei and S. Handy (2017), *State-Level Strategies for Reducing Vehicle Miles of Travel*, <https://bit.ly/2LvA6nn>.

Climate Assembly United Kingdom (2020), *The path to net zero*, <https://www.climateassembly.uk/report/read/final-report.pdf>.

Convention Citoyenne pour le Climat (2021), (Proposals of the Citizens Climate Convention), *Les Propositions de la Convention Citoyenne pour le Climat*, <https://propositions.conventioncitoyennepourleclimat.fr/>.

DEFRA (UK Department for Environment, Food & Rural Affairs) (2012), *London congestion charge detailed assessment*, https://uk-air.defra.gov.uk/assets/documents/reports/cat09/0505171128_London_Congestion_Charge_Detailed_Assessment.doc.

European Commission (2021), *Urban Access Regulations in Europe*, <https://urbanaccessregulations.eu/countries-mainmenu-147>.

Frank, S. (2021), "Land-based climate change mitigation potentials within the agenda for sustainable development", *Environmental Research Letters*, Vol. 16/2, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abc58a>.

IEA (International Energy Agency) (2021), *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*, IEA, <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>.

– (2020a), *World Energy Balances 2020 edition: database documentation*, http://wds.iea.org/wds/pdf/WORLDBAL_Documentation.pdf.

– (2020b), *Outlook for Biogas and Biomethane: Prospects for organic growth*, <https://www.iea.org/reports/outlook-for-biogas-and-biomethane-prospects-for-organic-growth>.

– (2020c), *World Energy Investment, 2020*, <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2020>.

– (2020d), *Energy Technology Perspectives 2020: Special Report on Clean Energy Innovation*, <https://www.iea.org/reports/clean-energy-innovation>.

– (2019), *The Future of Rail*, <https://www.iea.org/reports/the-future-of-rail>.

IMF (International Monetary Fund) (2020a), *June 2020: A Crisis Like No Other, An Uncertain Recovery*, <https://www.imf.org/-/media/Files/Publications/WEO/2020/Update/June/English/WEOENG202006.ashx>

– (2020b), *World Economic Outlook Database*, April 2020 Edition, Washington DC.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2019), *Climate Change and Land: An IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems*, <https://www.ipcc.ch/srccl/>.

– (2018), *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development and efforts to eradicate poverty*, <https://www.ipcc.ch/sr15/>.

– (2014), *Climate Change 2014: Synthesis Report, Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>.

Jochem et al. (2020), "Does free-floating carsharing reduce private vehicle ownership? The case of SHARE NOW in European cities", *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 141, pp. 373-295, <https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.09.016>.

Laxton, D. et al. (2010), *The Global Integrated Monetary and Fiscal Model (GIMF) – Theoretical Structure*, International Monetary Fund, Washington, DC, https://www.imf.org/~media/Websites/IMF/imported-full-text-pdf/external/pubs/ft/wp/2010/_wp1034.ashx.

Martin, Shaheen and Lidiker (2010), "Carsharings impact on household vehicle holdings: Results for a North American shared-use vehicle survey", Presented at 89th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington DC, <https://doi.org/10.3141/2143-19>.

Newgate Research and Cambridge Zero (2021), *Net Zero Public Dialogue*, https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/969401/net-zero-public-dialogue.pdf.

Oxford Economics (2020), *Oxford Economics Global Economic Model*, (database), <https://www.oxfordeconomics.com/global-economic-model>, August 2020 update, Oxford.

TfL (Transport for London) (2021), *Congestion charge factsheet*, <https://content.tfl.gov.uk/congestion-charge-factsheet.pdf>.

Tools of Change (2014), *Stockholm's Congestion Pricing*, <https://www.toolsofchange.com/userfiles/Stockholm%20Congestion%20Pricing%20-%20FINAL%202014.pdf>.

UNDESA (United Nations Department of Economic and Social Affairs) (2019), *2019 Revision of World Population Prospects*, <https://population.un.org/wpp/>.

Wu, W. H. (2019), "Global advanced bioenergy potential under environmental protection policies and societal transformation measures", *GCB Bioenergy*, Vol. 11, pp. 1041-1055, <https://doi.org/10.1111/gcbb.12614>.

第3章：2050年各部门实现净零排放的路径

IEA (International Energy Agency) (2021a), *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*, <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>.

– (2021b), *Global EV Outlook 2020*, <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021>.

– (2020a), *The Oil and Gas Industry in Energy Transitions*, <https://www.iea.org/reports/the-oil-and-gas-industry-in-energy-transitions>.

– (2020b), *Energy Technology Perspectives 2020*, IEA, <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020>.

– (2019), *Nuclear Power in a Clean Energy System*, <https://www.iea.org/reports/nuclear-power-in-a-clean-energy-system>.

UNCTAD (United Nations Conference on Trade and Development) (2018), *Review of Maritime Transport 2018*, UNCTAD, https://unctad.org/en/PublicationsLibrary/rmt2018_en.pdf.

第4章：实现净零排放的更广泛影响

Carbon Engineering (2021), <https://carbonengineering.com/our-story/>.

Diaz Anadon, 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, pp. 1742-1756, <https://doi.org/10.1016/j.respol.2012.02.015>.

European Cement Research Academy (2012), *ECRA CCS Project: Report on phase III*, https://ecraonline.org/fileadmin/redaktion/files/pdf/ECRA_Technical_Report_CCS_Phase_III.pdf.

Feyisa, Dons & Meilby (2014), “Efficiency of parks in mitigating urban heat island effect: an example from Addis Ababa”, *Landscape and Urban Planning*, Vol. 123, pp. 87–95, <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.12.008>.

GLPGP (The Global LPG Partnership) (2020), *Assessing Potential for BioLPG Production and use within the Cooking Energy Sector in Africa*, <https://mecs.org.uk/wp-content/uploads/2020/09/GLPGP-Potential-for-BioLPG-Production-and-Use-as-Clean-Cooking-Energy-in-Africa-2020.pdf>.

Greco, A. et al. (2019), “A review of the state of the art of solid-state caloric cooling processes at room-temperature before 2019”, *International Journal of Refrigeration*, pp. 66-88, <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.06.034>.

Gross, R. (2018), “How long does innovation and commercialisation in the energy sector take? Historical case studies of the timescale from invention to widespread commercialisation in the energy supply and end-use technology”, *Energy Policy*, Vol. 123, pp. 682-299, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.08.061>.

IEA (International Energy Agency) (2021a), *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*, <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>.

– (2021b), *Climate Resilience*, <https://www.iea.org/reports/climate-resilience>.

– (2021c), *Enhancing Cyber Resilience in Electricity Systems*, <https://www.iea.org/reports/enhancing-cyber-resilience-in-electricity-systems>.

– (2021d), *Conditions and requirements for the technical feasibility of a power system with a high share of renewables in France towards 2050*, <https://www.iea.org/reports/conditions-and-requirements-for-the-technical-feasibility-of-a-power-system-with-a-high-share-of-renewables-in-france-towards-2050>.

– (2020a), *World Energy Investment, 2020*, <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2020>.

– (2020b), *Sustainable Recovery: World Energy Outlook Special Report*, <https://www.iea.org/reports/sustainable-recovery>.

– (2020c), *Energy Technology Perspectives: Special Report on Carbon Capture Utilisation and Storage*, <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions>.

– (2020d), *Outlook for Biogas and Biomethane: Prospects for organic growth*, <https://www.iea.org/reports/outlook-for-biogas-and-biomethane-prospects-for-organic-growth>.

– (2020e), *The Oil and Gas Industry in Energy Transitions*, <https://www.iea.org/reports/the-oil-and-gas-industry-in-energy-transitions>.

– (2020f), *World Energy Outlook 2020*, <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>.

– (2020g), *The Role of CCUS in Low-Carbon Power Systems*, <https://www.iea.org/reports/the-role-of-ccus-in-low-carbon-power-systems>.

– (2020h), *Power Systems in Transition*, <https://www.iea.org/reports/power-systems-in-transition/electricity-security-matters-more-than-ever>.

– (2020i), *Energy Technology Perspectives 2020: Special Report on Clean Energy Innovation*, <https://www.iea.org/reports/clean-energy-innovation>.

– (2019a), *The Future of Hydrogen*, <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>.

– (2019b), *Offshore Wind Outlook 2019*, <https://www.iea.org/reports/offshore-wind-outlook-2019>.

– (2017), *Energy Access Outlook 2017: from Poverty to Prosperity: World Energy Outlook Special Report*, <https://www.iea.org/reports/energy-access-outlook-2017>

Kamaya, N. (2011), "A lithium superionic conductor", *Nature Materials*, pp. 682-686, <https://doi.org/10.1038/nmat3066>.

Liquid Gas Europe (2021), *BioLPG:A Renewable Pathway Towards 2050*, <https://www.liquidgaseurope.eu/news/biolpg-a-renewable-pathway-towards-2050>.

Malhotra, A. and T. Schmidt (2020), "Accelerating Low-Carbon Innovation", *Joule*, pp. 2259-2267, <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.09.004>.

Material Economics (2019), *Industrial Transformation 2050:Pathways to Net-Zero Emissions from EU Heavy Industry*, University of Cambridge for Sustainability Leadership, Cambridge, United Kingdom.

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>.

NASEO and Energy Futures Initiative (2021), *United States Energy & Employment Report*, <https://www.usenergyjobs.org/>.

NEA (Nuclear Energy Agency) (2016), *Cost Benchmarking for Nuclear Power Plant Decommissioning*, <https://doi.org/10.1787/acae0e3b-en>.

OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) (2020), *Environmentally related tax revenue*, OECD Statistics, <https://stats.oecd.org/>.

– (2015), *The Economic Consequences of Climate Change*, <https://www.oecd.org/env/the-economic-consequences-of-climate-change-9789264235410-en.htm>.

Tenova (2018), HYL News, https://www.tenova.com/fileadmin/user_upload/HYL_News_-_December_2018.pdf.

Victor, D., Geels, F. and S. Sharpe (2019), *Accelerating the Low Carbon Transition:The case for stronger, more targeted and co-ordinated international action*, The Energy Transitions Commission, London.

Zemships (2008), *One Hundred Passengers and Zero Emissions:The first-ever passenger vessel to sail propelled by fuel cells*, <https://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.s>.

附录B：技术成本

IEA (International Energy Agency) (2020), *World Energy Outlook 2020*, <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>.

– (2019), *Offshore Wind Outlook 2019*, IEA, Paris, <https://www.iea.org/reports/offshore-wind-outlook-2019>.

IRENA (International Renewable Energy Agency) (2020), *Renewable Costing Alliance*, IRENA, Abu Dhabi, <https://www.irena.org/statistics>, accessed 15 July 2020.

Chinese translation of Net Zero by 2050 – A Roadmap for the Global Energy Sector

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.

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 - September 2021

Cover design: IEA

led