

能源转型中的 地缘政治

氢因素



© IRENA 2022

除非另有说明，本出版物中的材料可以自由使用、共享、复制、印刷和/或存储，前提是需恰当确认 IRENA 为资料来源和版权所有。本出版物中属于第三方的材料可能受单独的使用条款和限制的约束，在使用此类材料之前，可能需要获得这些第三方的相应许可。

引文：IRENA (2022), **能源转型中的地缘政治：氢因素**, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

ISBN： 978-92-9260-453-0

本文件为“Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor”的译本

ISBN: 978-92-9260-370-0 (2022)。如中文译本与英文原版的内容不一致，概以英文版为准。

下载地址：www.irena.org/publications

如需更多信息或提供反馈，请访问：info@irena.org

关于 IRENA

国际可再生能源机构 (IRENA) 是一个政府间组织，它负责为向可持续能源过渡的国家提供支持，充当国际合作的主要平台和卓越的中心，同时也是集合可再生能源相关政策、技术、资源和金融等全方位知识的资源库。IRENA 促进各种形式可再生能源的广泛应用和可持续使用，包括生物能、地热、水力发电、海洋能、太阳能和风能，追求可持续发展、能源获取、能源安全和低碳经济的增长与繁荣。

www.irena.org

免责声明

本出版物及所使用的资料均按“原样”提供。IRENA 已经采取了所有合理的措施，以验证本出版物中资料的可靠性。然而，IRENA、其任何官员、代理人、数据或其他第三方内容提供者均不提供任何明示或暗示的担保，且对使用本出版物或材料的任何后果不承担任何责任或法律责任。

本文中包含的信息不一定代表 IRENA 所有成员的观点。提及特定的公司或特定的项目或产品并不意味着 IRENA 认可或推荐这些公司或产品，认为其优先于未提及的类似性质的其他公司或产品。本文件中使用的名称和出现的材料并不意味着 IRENA 对任何地区、国家、领土、城市或地区或其当局的法律地位，或对其边境或边界的划定发表任何意见。

前言

可再生能源的加速部署推动了全球能源转型，其地缘政治影响颇为深远。IRENA 全球能源转型地缘政治委员会于 2019 年发布的报告《新世界》开启了对该领域的首次探索。该报告强调了新能源时代的到来将如何重塑国家/地区与社区之间的关系，并促成能效、安全、能源独立和繁荣的“新世界”。

在世界格局瞬息万变的大背景下，监控地缘政治驱动因素和转型的影响、紧跟发展步伐并在塑造未来方面发挥积极作用至关重要。2020 年，IRENA 大会要求该机构基于能源转型地缘政治合作框架*推进这项工作。最近全球对于氢的兴趣高涨，因而其被确定为需要进一步分析的重要领域。氢在过去曾数次引发众多关注，但其在全球能源话语中仍然属于小众市场。当前，针对氢的政策关注度达到了前所未有的程度，因为它在减排难度更高行业的脱碳进程中发挥了核心作用。

氢市场将如何发展、谁将成为市场领导者以及可能产生的地缘政治影响等问题仍然存在许多不确定性。撰写本报告时，IRENA 就这些不确定性将如何发挥作用展开了合理分析。这很大程度上将取决于政府制定的政策框架，包括他们基于全球性疫情导致的社会和经济后果、日益明显的气候影响以及缩小贫富差距的紧迫性等大背景下所选择的激励措施。

IRENA 在其《世界能源转型展望》中预计，到 2050 年，氢可以满足高达 12% 的最终能源消耗。为实现这一目标，必须合理确定优先事项，在市场开发和成本高昂的早期阶段更是如此。只有凭借透明可信的规则和标准以及超越国家、地区和行业界限的一致体系，才能确保氢对气候和发展做出积极贡献。尤为关键的是，通过国际合作，有可能将新兴的氢市场打造成分散化和包容的市场，为发达国家/地区和发展中国家/地区提供机会。

未来道阻且艰。例如，正值 2021 年 10 月联合国气候变化大会 (UN Climate Conference) 在格拉斯哥开幕之际，一场能源危机席卷了全球能源市场。石油和天然气价格的波动引发了一系列紧急措施，旨在减少对全球生产者和消费者的影响。这些事件都明确地提醒着人们化石燃料在能源地缘政治中持续占据中心地位。同时也强调了转向更具弹性能源系统的紧迫性，这与《巴黎气候协定》(Paris Agreement) 与《2030 年可持续发展议程》(Agenda 2030) 中规定的气候和发展要求相一致。

今天，各国政府遇到了千载难逢的机会，有可能将氢塑造为解决这些问题的关键，即为支持能源转型的市场设计做出贡献、避免既有限制和低效、减少不平等现象以及影响地缘政治结果，向更清洁和更公平的能源系统迈进。我们面临的挑战很多，但同时机会也很多。希望本报告能够帮助政策制定者和利益相关方在未来几年有效地驾驭未知、降低风险并克服障碍。



**Francesco
La Camera**

国际可再生能源机构
总干事

* IRENA 合作框架是公共、私人和其他参与者交流经验、深化分析工作并促进能源转型国际合作的平台。

目录

前言	03
致谢	09
政策研究综述报告	10

01

引言	18
1.1 清洁氢迎来曙光	18
1.2 清洁氢的地缘政治意义	21
1.3 本报告目标	22

02

氢在能源转型中的角色	24
2.1 什么是氢?	24
2.2 主要生产途径	26
2.3 氢的应用和发展重点	29
2.4 扩大氢能规模所面临的障碍	31
2.5 国际氢贸易前景	33

03

重新绘制地缘政治版图	38
3.1 政策先行者和领先市场	39
3.2 新一批型能源出口国	45
3.3 化石燃料生产国的转型路径	49
3.4 新兴技术领导者的崛起	55
3.5 拥有丰富可再生能源国家/地区的产业发展	65





04	贸易、安全和相互依存	68
	4.1 新的贸易地理	70
	4.2 制定游戏规则	74
	4.3 氢外交	76
	4.4 政治关系的转变	78
	4.5 加强能源安全	81
	4.6 贸易风险和脆弱性	85
05	地缘政治不稳定的根本原因以及氢在解决相关问题中的作用	92
	5.1 社会政治转型	93
	5.2 气候变化、水资源压力和粮食不安全性	96
	5.3 氢与发展中国家/地区	102
06	政策考量和前进方向	104

参考资料	108
------------	-----

图片列表

图 S.1	2020 年至 2050 年能源商品贸易价值的变化	11
图 S.2	不断扩大的氢贸易路线、计划和协议网络	12
图 S.3	清洁氢的政策重点	14
<hr/>		
图 1.1	2050 年预计全球氢需求	20
图 2.1	2020 年氢气消耗量	25
图 2.2	氢生产的选定颜色代码类型	26
图 2.3	清洁氢的潜在用途	29
图 2.4	清洁氢的政策重点	30
图 2.5	制定氢政策和战略的主要障碍	32
图 2.6	全球太阳能技术潜力	33
图 2.7	全球风能技术潜力	34
图 2.8	考虑体积和距离时不同运输方式的成本效率	35
图 2.9	不断扩大的氢贸易路线、计划和协议网络	37
图 3.1	氢能战略和编制中的战略，2021 年 10 月	39
图 3.2	2021-2030 年平均每年可能投入氢项目的资金	42
图 3.3	截至 2021 年 11 月的清洁氢项目和投资	43
图 3.4	到 2050 年生产低于 1.5 美元/kg 绿色氢的技术潜力（以 EJ 为单位）	45
图 3.5	成本假设对特定国家/地区氢生产的影响	47
图 3.6	2019 年主要化石燃料净出口国的搁浅资产风险	50
图 3.7	专家看法：氢能战略及其对油气生产商产生的影响	51
图 3.8	专家看法：未来氢收入和市场结构	54
图 3.9	绿色氢价值链中的技术领导机会	55
图 3.10	2010-2020 年氢相关专利族的地理分布	56
图 3.11	2010-2020 年氢技术发明流	58
图 3.12	2050 年氢相关设备和部件的预计市场潜力	59
图 3.13	根据投资计划预估的 2021-2024 年全球电解槽生产容量	61
图 3.14	2016-2020 年根据采用地区划分的燃料电池销售额	63

图片列表 (续)

图 4.1	IRENA 成员看法：到 2030 年氢对外交政策产生的影响.....	69
图 4.2	2020 年至 2050 年能源商品贸易价值的变化.....	70
图 4.3	全球天然气输送管道地图.....	73
图 4.4	现在和未来可能沿非洲横贯公路覆盖非洲大陆的氢路线.....	75
图 4.5	截至 2021 年 11 月公布的特定国家/地区的双边贸易协定和谅解备忘录.....	77
图 4.6	全球已宣布的最大的 20 个千兆级绿色氢项目.....	87
图 4.7	电解槽关键材料的顶级生产商.....	91
图 5.1	专家看法：到 2050 年氢对于特定可持续发展成果产生的影响.....	93
图 5.2	绿色氢可能比蓝色氢更便宜的国家/地区（按年计算）.....	94
图 5.3	与当今特定行业相比的 2050 年制氢用水量（十亿立方米）.....	98
图 5.4	水资源压力水平热点图.....	99



© Diolk Klaisa/porn/istock



表格列表

表 2.1	主要电解槽技术对比	28
表 3.1	大型电解制氢厂的历史实例	60
表 3.2	产业选址经济学	66
表 5.1	气候变化威胁稳定性的七种方式	96

文本框列表

文本框 1.1	本报告使用的关键术语	19
文本框 1.2	IRENA 1.5°C 情景中到 2050 年氢使用情况的主要预测	23
文本框 2.1	什么是电解槽?	28
文本框 2.2	氢调查中的地缘政治	32
文本框 2.3	船舶运输氢的三种主要方式	36
文本框 3.1	早期应用者? 部分领先国家和地区的氢能愿景	40
文本框 3.2	非洲的氢能项目	44
文本框 3.3	资本成本假设对于氢贸易预测的重要性	46
文本框 3.4	从能源进口国转向能源出口国? 具备绿色氢出口潜力的特定化石燃料进口国的氢活动	48
文本框 3.5	转向氢能战略? 特定化石燃料出口国的氢能战略	52
文本框 4.1	非洲航运业的基础设施机会	72
文本框 4.2	氢外交的兴起	79
文本框 4.3	缓解氢贸易的量价风险: 液化天然气市场发展的经验教训	86



致谢

本报告在伊丽莎白出版社 (Elizabeth Press) 的指导下编写, 其还编写了综述和政策考虑。作者包括 Thijs Van de Graaf (IRENA 顾问和主要作者)、Herib Blanco、Emanuele Bianco 和 Waiman Tsang。Rabia Ferroukhi 和 Dolf Gielen 提供了专家指导和监督。

来自 IRENA 的以下同事也做出了宝贵贡献: Roland Roesch、Francisco Boshell、Francesco Pasimeni、Paul Komor、Anastasia Kefalidou、Claire Kiss、Emanuele Taibi、Ute Collier、Kathleen Daniel、Imen Gherboudj、Barbara Jinks、Jeffrey Lu、Stefano Marguccio 和 Kelly Rigg (IRENA 顾问)。

许多政府官员和国际专家也给出了意见, 并审查了报告草稿。他们的意见和建议极具价值。这些人员包括 Ronnie Belmans (天主教鲁汶大学 (KU Leuven))、Leonardo Beltrano (哥伦比亚大学全球能源政策中心 (Columbia Center on Global Energy Policy))、Peter Betts、Kingsmill Bond (Carbon Tracker)、Hugo Brouwer (荷兰外交部 (Ministry of Foreign Affairs, Netherlands))、Melinda Crane、Matthias Deutsch (Agora 能源转型论坛 (Agora Energiewende))、Gonzalo Escribano (埃尔卡诺皇家研究所 (Real Instituto Elcano))、Han Feenstra (荷兰经济事务和气候政策部 (Ministry of Economic Affairs and Climate Policy, Netherlands))、Lisa Fischer (第三代环保主义组织 (E3G))、Gniewomir Flis (Agora 能源转型论坛)、Jonathan Gaventa (第三代环保主义组织)、Hans Olav Ibrek (挪威外交部 (Ministry of Foreign Affairs, Norway))、Ruud Kempener (欧盟委员会能源总司 (Directorate-General for Energy, European Commission))、Holger Klitzing (德国联邦外交部 (Federal Foreign Office, Germany))、James Mnyupe (纳米比亚总统办公室 (Office of the President, Namibia))、Paul Munnich (Agora 能源转型论坛)、Alejandro Nuñez-Jimenez (哈佛大学 (Harvard University) 和苏黎世联邦理工学院 (ETH Zurich))、Indra Overland (挪威国际事务研究所 (NUPI))、Karsten Sach (德国环境部 (Ministry for the Environment, Germany))、Beatrix Schmuelling (阿拉伯联合酋长国气候变化与环境部 (Ministry of Climate Change and Environment, United Arab Emirates))、Griffin Thompson (芝加哥洛约拉大学 (Loyola University Chicago))、Nikos Tsafos (战略与国际研究中心 (CSIS))、Tatiana Ulkina (意大利国家天然气管网公司 (SNAM))、Coby van der Linde (荷兰国际关系研究所 (Clingendael))、Kirsten Westphal (H2Global Stiftung)、Ralf Vermeer (荷兰外交部) 和 Frank Wouters (信实工业 (Reliance Industries))。本报告还受益于 IRENA 的能源转型地缘政治合作框架, 该框架曾两次开会讨论该主题。

此外还有许多专家参与调查, 这些调查为报告的编写提供了重要信息和宝贵意见。这些专家包括ⁱ Marco Baroni、Erin M. Blanton、Noam Boussidan、James Bowen、Michael Bradshaw、Andy Calitz、Kilian Crone、Fernando de Sisternes、Christian Downie、Reshma Francy、Julio Friedmann、Arunabha Ghosh、Marco Giuli、Chris Goodall、Maria A. Gwynn、Lior Herman、Wouter Jacobs、Sohbet Karbuz、Thierry Lepercq、Robin Mills、Eleonora Moro、Monica Nagashima、Michel Noussan、Mostefa Ouki、Jorge Pena、Cédric Phillibert、Rainer Quitzow、Aurangzeb Qureshi、Alison Reeve、Baris Sanli、Massimo Santarelli、Roberto Schaeffer、Daniel Scholten、Rossana Scita、Radia Sedaoui、Adnan Shihabeldin、Tom Smolinka、Alexandre Szklo、Rudiger Tscherning、Frank Umbach、Paul van Son、Ad van Wijk 和 Cyril Widdershoven。

Stephanie Clarke、Daria Gazzola、Nicole Bockstaller 和 Damian Brandy 提供了出版、传播和编辑支持。本报告由 Steven B. Kennedy 进行书稿编辑。由 weeks.de Werbeagentur GmbH 完成平面设计。

IRENA 感谢德国联邦外交部和挪威外交部的慷慨支持, 进而促成了本报告的产生。

i 此处为本人已同意列出的专家姓名。

政策研究 综述报告

由于其规模及对世界各地既有的社会经济、技术和地缘政治趋势所产生的深远影响，当前正在进行的能源转型前所未有。可再生能源和能源效率当前处于影响深远的全球能源转型前沿。这种转型并非燃料的替代；而是向不同系统的转变，同时伴随着相应的政治、技术、环境和经济破坏。本报告解决的核心问题在于，氢是否、并在多大程度上以及以何种方式会加剧还是会减轻这些破坏。

到目前为止，氢仍是清洁能源难题中缺失的一环，未来几年可能会进一步对能源价值链造成影响。气候变化所导致的迫切需求一直是重新关注氢政策的主要驱动力。根据 IRENA 的 1.5°C 情景设想，到 2050 年，清洁氢¹可满足高达 12% 的最终能源消耗。其中大部分氢将由可再生能源生产，其余部分则来自天然气以及碳捕获和储存。

氢可能会影响能源贸易的地理分布，进一步推动能源关系区域化。尽管可再生能源成本会不断下降，但氢的运输成本较高，新兴的地缘政治地图可能会显示能源关系区域化程度的不断提高。每个国家/地区都可以利用可再生能源，可以通过输电电缆将可再生电力出口到邻近国家/地区。此外，氢可以推动通过管道和航运进行更远距离的可再生能源运输，进而释放偏远地区未开发的可再生能源资源。经过技术改造，一部分现有的天然气管道可以重新用于氢的输送。

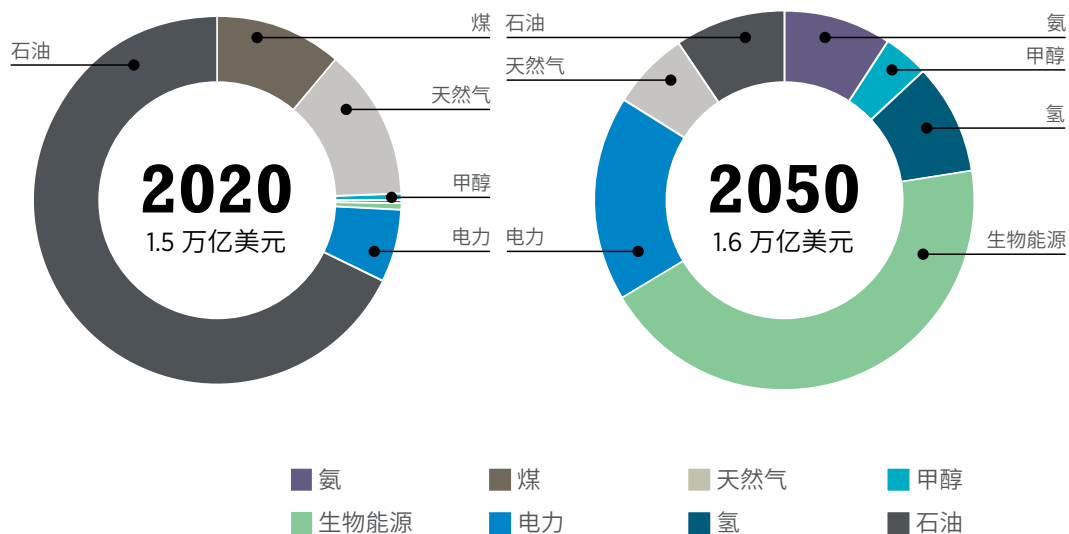
拥有大量低成本可再生能源的国家/地区可能会成为绿氢的生产者，同时引发相应的地缘经济和地缘政治后果。对于拥有丰富的可再生能源资源、太阳能或风电场空间、水源以及向大型需求中心出口能力等最佳组合的地区，绿氢可能是最经济的选择。而利用这些因素成为氢生产和使用中心的地区可能会出现新的电力节点。

与石油和天然气相比，氢的生产经营将更具竞争力，但利润更低。清洁氢不会产生可与当今石油和天然气那样高的利润。氢是一种转化而非提取业务，并且有潜力在诸多地方进行颇具竞争力的生产。这将限制获取类似化石燃料产生经济地租的可能性，而目前这些地租约占全球 GDP 的 2%。此外，随着绿氢的成本下降，新的多元化参与者将进入市场，进一步提高氢的竞争力。

1 本报告将绿氢和蓝氢统称为“清洁氢”。另请参见图 2.2。

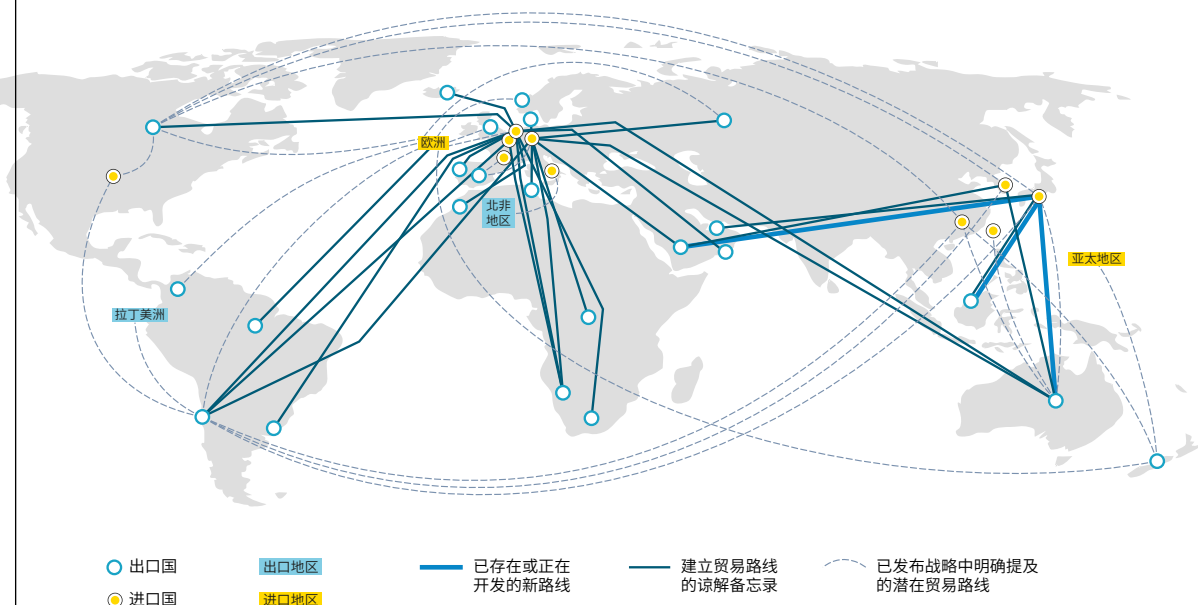


图 S.1 2020 年至 2050 年能源商品贸易价值的变化



氢贸易和投资流动将催生新的相互依存模式，同时推动双边关系的转变。一系列快速增长的双边交易表明，这些不同于 20 世纪基于碳氢化合物的能源关系。30 多个国家和地区制定了包括进出口计划在内的氢能战略，这表明跨境氢贸易将大幅增长。那些传统上没有能源交易的国家/地区正在建立以氢相关技术和分子为中心的双边关系。随着国家之间的经济联系发生变化，其政治动态也会随之改变。

图 S.2 不断扩大的氢贸易路线、计划和协议网络



地图来源：Natural Earth，2021 年

注：此图片信息基于撰写本文时政府文件中所包含的信息。

免责声明：此地图仅用于说明用途。此地图上显示的边界和名称并不意味着 IRENA 认可或接受。

氢外交正在成为部分国家/地区经济外交的标准配置。通常将氢的利用视为能源安全和国家整体恢复力的要素之一，对于其他解决方案不可行或不经济的行业而言尤其如此。希望成为进口商的国家/地区已经在实施专门的氢外交。德国和日本一直是这方面的开拓者，其他国家/地区也紧随其后。一些可能的出口国正在制定类似战略，将许多包括氢（尤其是绿氢）的战略置于最高外交层次水平。

化石燃料出口国认为清洁氢在推动实现经济多元化方面颇具吸引力。许多当前出口国正在转向清洁氢以发展新的出口产业。他们可以充分利用已建立的能源基础设施、熟练的劳动力和现有的能源贸易关系。尽管蓝氢似乎也是一种自然选择，但许多化石燃料生产国家/地区也具备充足的可再生能源潜力，可直接转向绿氢。阿拉伯联合酋长国的氢领导路线图明确采用双重方法，其他几个国家/地区如澳大利亚、阿曼和沙特阿拉伯也在探索这一路线。尽管如此，由于氢无法弥补收入损失，化石燃料生产商应继续制定广泛的经济转型战略。



生产绿色电力（进而生产大量绿氢）的技术潜力超过全球预计需求若干个数量级。许多国家/地区已表明了成为氢出口国的雄心，进而限制了出口集中在几个国家的可能性。从其战略和不断增长的双边交易判断，即使是智利、摩洛哥和纳米比亚等能源净进口国似乎也在准备成为绿氢的出口国。然而，氢的供应将受到资金投入速度和生产成本的限制，在长期市场不确定的情况下这一现象将更为明显。

非洲、美洲、中东和大洋洲具备最高的绿氢生产技术潜力。然而，生产大量低成本绿氢的能力差异巨大。各国家/地区必须根据更广泛的社会和经济优先事项制定战略，如能源系统脱碳或解决能源获取和贫困问题的能力，这是全球 80 多个国家/地区普遍面临的问题。获取丰富的可再生能源是清洁能源竞赛中的有利条件，但只有这些可能还不够。还有许多其他因素也在发挥作用，包括现有的基础设施和当前的能源结构、资本成本以及获得必要技术的机会。技术潜力的实现还取决于政府支持、投资环境和政治稳定等软因素。

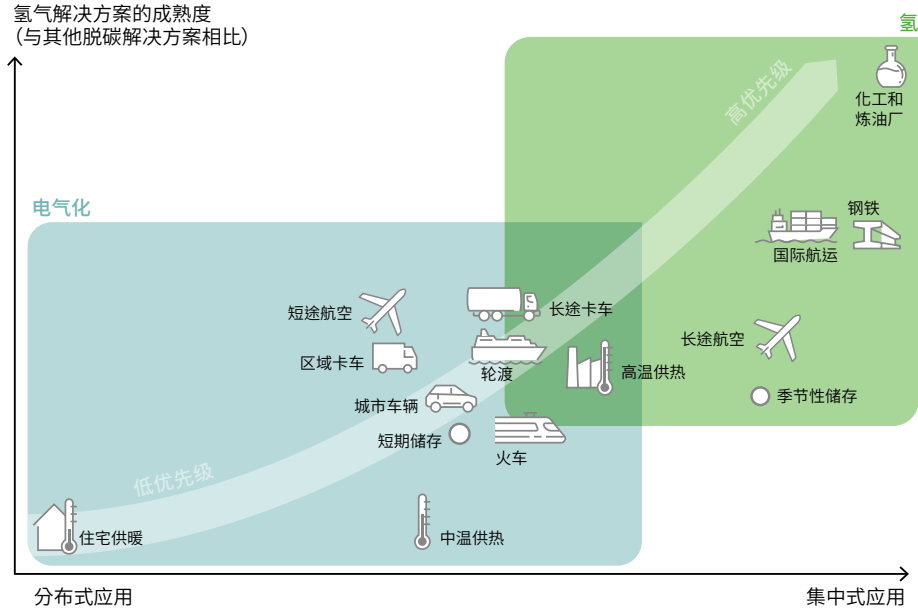
较高的项目融资成本并不一定会对风险较高的国家/地区的投资造成阻碍。上游石油和天然气行业表明，只要收入潜力充足，存在风险的国家/地区仍会获得投资。这同样适用于具有低成本绿氢潜力的国家/地区。当然，这同时也是限制因素。由于在这些地区开展业务存在巨大风险，处于动荡中的国家/地区不太可能实现投资机会，尽管其中部分国家/地区潜力巨大。



21 世纪 20 年代可能会成为争夺技术领先地位的时代，因为随着不断学习和所需基础设施的扩展，成本可能会急剧下降。清洁氢的地缘政治可能会分为数个阶段展开。预计到本世纪末，绿氢将开始在成本方面与蓝氢展开竞争。在中国（低成本的电解槽）或巴西和印度（可再生能源价格低廉而天然气价格相对较高）等国家/地区，竞争发生的时间可能更早。2021 年天然气价格飙升期间，整个欧洲的绿氢已经比灰氢更加实惠。但具体发展很大程度上将取决于可预测的需求，没有替代品、减排难度较高的行业更是如此。

图 S.3 清洁氢的政策重点

氢气解决方案的成熟度
(与其他脱碳解决方案相比)



来源：IRENA（即将发布-b）。

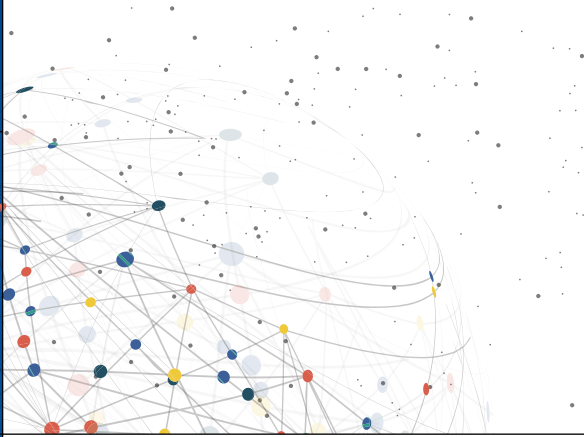
到 21 世纪 30 年代，氢相关的跨境贸易将随着绿氢成本竞争力的提升而增加。在许多脱碳情景中，需求将从 2035 年开始井喷。IRENA 预计到 2050 年，生产出的绿氢中，有三分之二将在当地使用，三分之一用于跨境贸易。管道，包括经过改造的天然气管道可能将推动一半的贸易往来。另一半将以氢衍生物的形式使用船装载，最具代表性的衍生物为氨。

中短期内，一些国家和地区可以保持技术领先地位，同时为不断增长的市场制定规则。在氢价值链中抢占一席之地有助于提高经济竞争力。直接经济利益较高，市场潜力巨大。从长远来看，具备充足可再生能源潜力的国家/地区可发展绿色工业化，利用其潜力吸引能源密集型产业。

设备制造提供了在未来几年乃至几十年中获取价值的机会。氢价值链涉及业务广泛，可再生能源需要大量投资。在这一价值链上，预计到本世纪中叶电解槽市场潜力为 500-600 亿美元，燃料电池市场潜力为 210-250 亿美元。中国、欧洲和日本在电解槽的生产和销售方面取得了极大的领先优势，但当前市场仍处于起步阶段且规模相对较小。创新和新兴技术能够改变当前的制造业格局。

任何形式的氢都有助于增强能源的独立性和弹性，但大部分益处来源于绿色氢。当前，氢可以通过三种主要方式加强能源安全：1) 减少进口依赖，2) 缓解价格波动，以及 3) 应用多元化资源提高能源系统的灵活性和弹性。上述大多数益处都与绿氢相关。相反，蓝氢将遵循天然气市场模式，进而导致进口依赖和市场波动。此外，绿氢的预期成本降低意味着针对基于化石燃料的供应链投资，尤其是计划持续运营多年的资产最终可能搁浅。

氢和可再生能源技术所需的原材料可能会引发人们对材料安全的更多关注。尽管目前大多数矿物和金属的地质供应充足，但由于需求迅速增长以及采矿和精炼项目的前置时间较长，市场势必趋紧。相对较小的供应或需求变化就可能会导致价格大幅波动。这种波动可能会通过氢供应链产生影响，影响设备总体成本以及矿工和原材料出口商的收入。在考虑超出已知风险的潜在风险时，由 COVID-19 引起的供应链问题也值得关注。



氢贸易流武器化或卡特化的概率较小。这是因为氢气可以通过许多主要能源生产，并且可以在全球范围内的许多地方生产。事实上，它是一种制成品，而非原材料或能源。因此，绿色能源贸易流不太可能像石油和天然气那样容易受到地缘政治影响。也就是说，特别是在氢贸易早期阶段可能会出现供应短缺，此时供应商的数量有限，大多数贸易仍然受到双边协议的约束。

制定氢贸易相关规则、标准和治理手段将对确定由哪些技术主导未来市场产生重大影响。清洁氢市场的成功取决于有能力制定一致和透明的规则、标准和规范，进而推动其在各国、各地区和各行业的部署。标准旨在提高各种商品和服务的质量、安全性和互操作性。与此同时，标准不同则可能会减缓进展同时导致市场分割，引发监管竞争并设置贸易壁垒。标准制定可能将成为地缘政治竞争或国际合作的舞台。最终，所有参与者都可以从一致且透明的全球系统中获益。

为了监测和管理氢对气候变化的贡献，需要以透明、可信的国际体系为基础的来源保障证书。排放测量方式透明化将必不可少。若氢能战略延长化石燃料的使用并对能源效率和电气化产生阻碍，则存在众所周知的碳锁定风险。稳健和深思熟虑的政策框架有助于确保氢有效地支持减少温室气体的排放。

早期的价格透明化有助于支持全球氢市场的快速发展。新兴市场的货币和定价机制可能会产生相当大的地缘政治影响。随着市场不断扩大，所选货币将成为全球基准。该货币相关国家将在一定程度上免受进口成本波动导致的风险敞口。例如，可能成为主要进口市场之一的欧盟希望以欧元计价未来的氢进口业务。此外，为碳定价可能有利于使绿色氢与灰色氢甚至最终与化石燃料竞争，甚至成为必不可少的策略。从这个意义上说，氢可能会卷入更广泛的碳贸易战。

投资决策是一个长期过程，搁浅资产的风险极高，因此应以长期思维评估固定基础设施。今天围绕能源基础设施的每一项投资和规划决策都应该考虑到：脱碳经济的地理区位可能与当前的合理情况大相径庭。终端使用的大规模电气化将重塑需求。在供应侧，可再生能源制氢可能会在目前油气田以外的地方生产。虽然部分现有基础设施可以重新利用，但一开始就应考虑其技术挑战和经济成本。

帮助发展中国家/地区及早部署氢技术有助于提高所有人的能源安全，同时防止全球脱碳鸿沟进一步扩大。多元化的氢市场将有效降低供应链风险，同时增强所有人的能源安全。获得技术、培训、能力建设和负担得起的资金将是支持实现氢的全部潜力以使全球能源系统脱碳，并促进全球稳定和公平的几个关键要素。建立氢贸易关系将为诸多方面开辟新的可能性，如建立当地氢价值链、刺激绿色产业以及在可再生能源丰富的国家/地区创造就业机会等。

特别是在未来几年，全球的努力目标应该集中在提供最具直接优势和实现规模经济等应用方面。优先考虑最适合或唯一适合氢能的应用更有可能实现成本效益，并且不太容易受到新兴市场风险的影响。示例之一可能是在已经使用氢气的工业应用中支持并加速向绿色氢的转化，例如精炼工业以及氨和甲醇的生产。

根据其开发方式，氢可能对可持续发展产生积极和消极影响。“人类安全”的概念经常被用来描述气候变化、贫困和疾病威胁等造成地缘政治不稳定的根源，这些威胁可能破坏国家/地区内部和国家/地区之间的和平与稳定。展望未来，重要的是要更好地了解全球威胁和脆弱性的多维性质，以预见和化解大规模部署氢可能带来的某些风险。



第1章

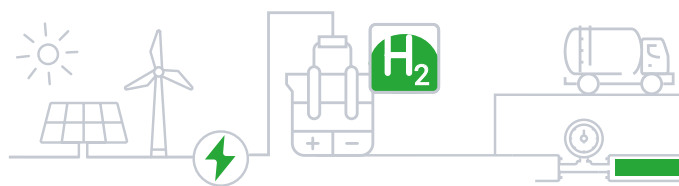
引言

1.1 清洁氢迎来曙光

近年来，人们将氢作为清洁能源难题中潜在的缺失环节提上议事日程。现在，越来越多的国家/地区制定了国家氢能路线图或氢能战略，而相当大一部分的 COVID-19 疫情刺激和恢复基金被专门用来加快氢能的发展。在格拉斯哥举行的 2021 年联合国气候变化大会 (COP26) 上，32 个国家/地区和欧盟 (EU) 同意共同努力加速推进清洁氢的开发和利用（文本框 1.1），并确保“到 2030 年在全球范围内提供负担得起的可再生和低碳氢”（《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC)，2021 年）。



© atk work / shutterstock.com



01



文本框 1.1

本报告使用的关键术语

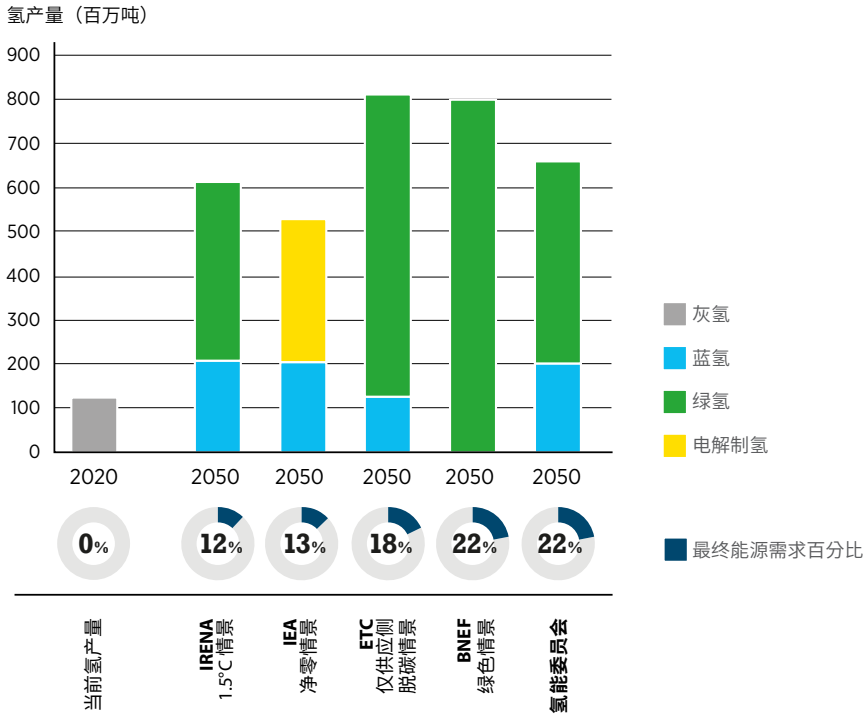
- **清洁氢**是指绿色氢和蓝色氢。尽管这两种类型的氢都可能在能源转型中发挥作用，但就本报告而言，蓝氢是概念化的“清洁”，其甲烷排放量极低且碳捕获率超高。
- **低碳氢**是指不符合上述排放标准的蓝氢，以及未脱碳电网供电的电解制氢。
- **氢衍生物**是指氢可以转化成的下游分子（例如氨、甲醇、合成燃料）。当这些产品由电解氢生产时，它们被称为“Power-to-X”产品。
- **合成燃料**是指由氢和碳生产的各种气体和液体燃料，包括合成煤油、合成柴油等。通过电解制氢时，也将这些燃料称为“动力燃料”或“电子燃料”。由于他们可以用于传统发动机和燃料供应基础设施，因此可以用作“即用”燃料。

过去，氢曾引发数波关注，但并未产生显著影响。这次情况则大不相同，主要源于两个因素。首先，全球各国政府都支持到本世纪中叶实现净零排放的目标（Black 等人，2021 年）。有合理的机会将全球升温限制在 1.5°C，这是 2015 年《巴黎气候协定》中规定的目标，要求到 2050 年实现净零排放（政府间气候变化专门委员会 (IPCC)，2021 年）。为此，所有经济部门，包括解决方案有限的重工业和长途运输部门都需要减少排放。氢已成为这些部门减少排放的关键选择。

其次，可再生能源和电解装置成本的大幅下降正在提高“绿色”氢的经济吸引力，即通过可再生能源电力驱动的水电解法生产氢。风能和光伏 (PV) 太阳能等波动性可再生能源份额的不断增长也创造了对灵活性和储存的需求，而氢有助于提供相关需求。因此，绿氢将有助于补充和扩展正在进行的可再生能源电力革命。

鉴于这些因素，现在预计氢和氢基燃料将在 2050 年满足相当大比例的最终能源需求，尽管当前其份额为零（图 1.1）。所有这些预测显示，将完全淘汰当前的（基于化石燃料的）“灰色”氢生产，而将绿氢作为主要的生产途径，“蓝色”氢则作为基于化石燃料的碳捕获和储存 (CCS) 的补充。

图 1.1 2050 年预计全球氢需求



来源：彭博新能源财经 (BloombergNEF)(2021a)；能源转型委员会 (ETC) (2021 年)；氢能委员会 (Hydrogen Council) (2021 年)；IRENA(2021a)；国际能源署 (IEA)(2021a)。

注：国际能源署指的是“基于化石燃料的 CCUS”（碳捕获、利用和储存）以及“基于电解”的氢。氢能委员会预计 60-80% 的氢气生产将基于可再生能源，其余则基于“低碳”来源，后者定义为“由碳足迹低于规定阈值的不可再生能源生产的氢气”。当前的氢气生产包括其他过程中产生的副产品。





© Jayjune69/shutterstock.com



1.2 清洁氢的地缘政治意义

建立全球清洁氢价值链将推动地缘经济和地缘政治的转变。最值得注意的是，绿氢正在成为潜在的游戏规则改变者，以推动减少排放、实现气候中和、同时不会阻碍经济和社会发展。

经济利益极高。当前氢的年销售额约为 1,740 亿美元，已经超过液化天然气 (LNG) 的年贸易价值。² 即使氢的使用仅限于工业流程和长途运输，其市场潜力仍然巨大。一家使用氢而非化石燃料还原铁的钢铁厂每年将使用约 30 万吨氢，吸收 5 吉瓦 (GW) 电解槽产生的氢（可行使命伙伴关系 (Mission Possible Partnership)，2021 年）。目前全球电解槽的产能刚刚超过 0.3 GW。据主要投资银行称，到 2050 年，全球氢的销售额可能达到 6,000 亿美元（金融时报 (Financial Times)，2021 年），未来 30 年，绿氢价值链创造的投资机会可能高达 117 万亿美元，³ 涵盖从专用可再生能源产能和电解槽到交通基础设施的方方面面（高盛集团 (Goldman Sachs)，2020 年）。

氢的变革性影响将会超出预计的市场价值。最好是将其视为一种通用能源载体，以此促进许多不同行业和部门的创新。其地缘政治影响可能会遵循蒸汽动力、电力或内燃机模式。这些技术以各自不同的方式改变了我们现代文明赖以运转的机器和燃料。在此过程中，它们还影响了人类生活的方方面面、改变了全球贸易格局，并塑造了全球力量平衡。尽管这些技术为人类带来了诸多益处，但这些益处并未公平分配。进而给社会带来了新的界外效应和全球挑战。

2 2019 年全球液化天然气贸易额为 1,430 亿美元（联合国商品贸易统计数据库 (UN Comtrade)，2021 年）。

3 包括可再生能源、氢气发电厂、电解槽和改造后的天然气管道。

与这些划时代的技术相比，清洁氢的影响可能会更小，但我们也不应过快忽视。在氢 (H_2) 的简单化学式背后，是用于生产、运输、转化和使用氢的整个基础设施系统。这一系统可以在以往相互独立的电力、热力和交通运输能源部门之间建立新的联系。它可以推动形成超越传统行业界限的伙伴关系。更重要的是，推动清洁氢作为主要能源载体可能会破坏当前的能源价值链，为更多国家/地区发挥重要作用创造机会。最终，它甚至可能带来工业活动的全新经济地理格局。

清洁氢的地缘政治可能会分为不同阶段展开。21 世纪 20 年代可能是争夺技术领先地位的时代，此时成本大幅下降，所需基础设施迅速扩展。在许多地方，到 2030 年，绿氢将在成本方面与蓝氢展开竞争 (IRENA, 2020a)。在许多脱碳情景中，需求将从 2035 年开始井喷 (世界能源理事会 (World Energy Council), 2021 年)。尽管最初的贸易路线建立时间可能更早，但氢及其衍生物的国际贸易在此期间可能会显著增长 (Ram 等人, 2020 年)。



1.3 本报告的目标

本报告就清洁氢价值链发展的地缘政治驱动因素及潜在后果展开了全面分析。

本报告所围绕的一个中心主题是“破坏”这一概念。我们正在经历着经济和社会诸多方面的变革，包括能源系统、气候变化、技术轨迹、地缘政治关系以及贸易和投资。鉴于政治、技术、环境和经济系统所面临的动荡，本报告研究的核心问题是氢是否以及在何种程度上加剧或减轻了相关破坏，以及谁可能因这些发展受益或处于不利地位。本报告的目标不仅是描述氢如何破坏未来的能源系统，而且还提供相关见解，帮助各国家/地区和利益相关者针对这种正面或负面的破坏做好准备。

清洁氢可能发展的途径仍然涉及许多不确定性。因此，本报告是一个具有探索性质的前瞻性评估实践。我们以国际可再生能源机构 (IRENA) 以其《世界能源转型展望》(WETO) 中所述的 1.5°C 情景作为分析基线 (文本框 1.2) (IRENA, 2021a)。然而，本报告不仅关注已确定氢途径的地缘政治影响，而且还关注不同参与者积极尝试塑造多种氢发展潜在途径的方式。

我们还进行了两项调查为本报告中的分析提供信息 (文本框 2.2)。一项是针对 IRENA 成员进行的民意调查，⁴ 另一项则针对专题专家小组。本报告还吸收了 IRENA 已经从技术、经济和政策角度就氢和相关主题开展的大量工作。并进一步借鉴全球专家的工作，例如参与 IRENA 能源转型地缘政治合作框架的专家。

本报告反映了 2019 年全球委员会报告 (IRENA, 2019a) 涵盖的许多关键主题，包括技术领先、能源安全和不断变化的贸易模式等。报告概述了政府和其他参与者的政策考虑，以帮助减轻地缘政治风险并充分利用机遇。

文本框 1.2

IRENA 1.5°C 情景中到 2050 年氢使用情况的主要预测

- 氢及其衍生物占最终能源使用量的 12% 和二氧化碳 (CO₂) 减排量的 10%。它们在钢铁、化工、长途运输、航运和航空等脱碳难度较大的能源密集型行业中发挥着重要作用。氢还有助于平衡可再生能源的供需，并用于长期的季节性储能。
- 需要约 5000 GW 的氢电解槽容量，而当前仅为 0.3 GW。
- 生产氢的电力需求接近 21000 太瓦时 (TWh)，几乎等于当前全球电力消耗水平。
- 到 2050 年，绿色氢及其衍生物的生产将消耗总电力需求的 30%。
- 总产量中至少三分之二是绿氢，其余则为蓝氢。



4 2021 年 7 月实施调查时，IRENA 成员包括 164 个国家和欧盟。

第 2 章

氢在能源转型中的角色

2.1 什么是氢？

氢是宇宙中最古老、最轻以及含量最丰富的元素。它天然存在于许多化合物中，例如水和化石燃料。

氢主要用作（石油）化学工业的原料：原油精炼、氨合成（主要用于化肥生产）以及生产用于包括塑料在内的各种产品的甲醇。

全球生产约 1.2 亿吨氢，其中三分之二是纯氢，三分之一是与其他气体的混合物（IEA，2019a）。中国是全球最大的氢生产国和消费国（图 2.1）。每年生产近 2,400 万吨纯氢，占全球专用产量的近三分之一。

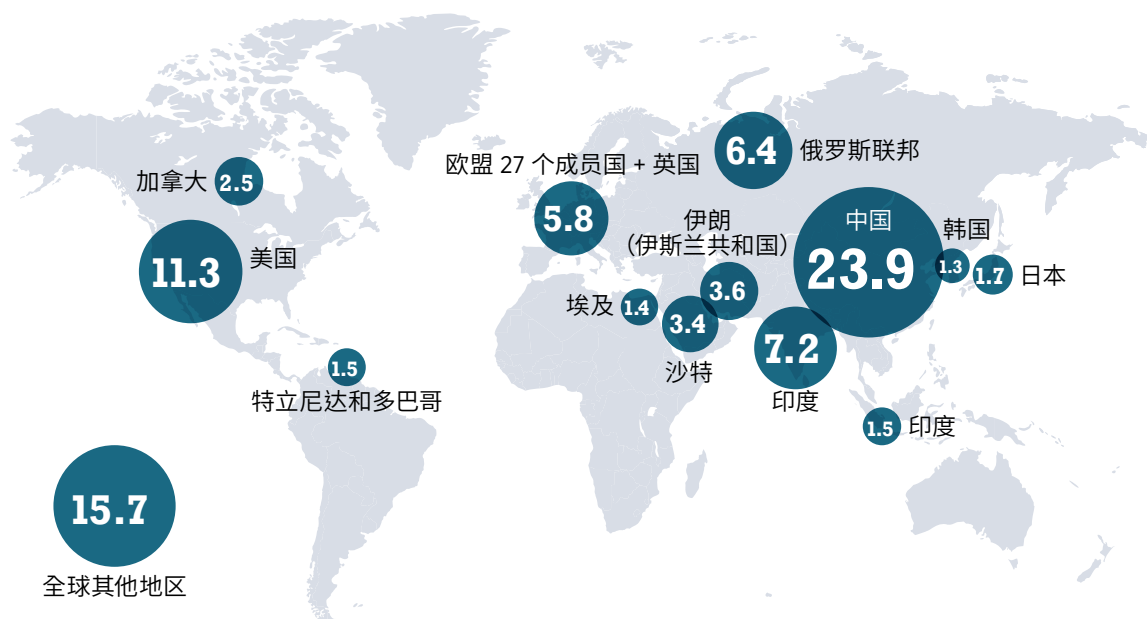
氢也可以用作燃料。燃烧时可产生超过 1000°C 的热量，且不会排放 CO₂。⁵ 此外，氢也可用于燃料电池，与氧气发生化学反应产生电力，且不会排放任何污染物或温室气体。这种化学反应产生的唯一副产品是水蒸气。

5 虽然燃烧氢不会排放任何 CO₂，但它会排放一氧化二氮，一种主要的空气污染物。





图 2.1 2020 年氢气消耗量 (百万吨/年)



地图来源: Natural Earth, 2021 年

注: 数值来源于当前氨、甲醇、精炼和用于制钢厂直接还原铁的生产。

免责声明: 此地图仅用于说明用途。此地图上显示的边界和名称并不意味着 IRENA 认可或接受。

2.2 主要生产途径

尽管地球上的氢含量非常丰富，但它并非自然地以其纯净形式大量存在。地下没有可提取的大量氢气沉积物。⁶ 氢几乎只存在于化合物中，尤其是水分子（氢和氧）和化石燃料（氢和碳）。可以通过这些化合物释放氢，但这一过程需要能量。

颜色代码系统通常用于指代不同的氢气生产方法（图 2.2）。目前大多数氢是使用化石燃料生产的“灰色”氢，最常见的方法是天然气的蒸汽甲烷重整或煤的气化。⁷ 这些基于化石燃料的生产方法占当今氢气供应的 95%，会产生大量的 CO₂ 足迹，与实现净零排放目标相悖。

图 2.2 氢生产的选定颜色代码类型

	灰氢	蓝氢	绿氢
生产工艺	重整或气化	碳捕获重整或气化	电解
能源来源	化石燃料 	化石燃料 	电解 
来自生产工艺的预估排放量	重整：9 - 11 ^b 气化：18 - 20	0.4-4.5 ^c	0

注：a) CO₂-eq/kg = 每千克二氧化碳当量；b) 对于灰氢，蒸汽甲烷重整过程中的假设甲烷泄漏量为 2 kg CO₂-eq/kg。c) 蓝氢的排放假设范围为 98% 和 68% 的碳捕获率以及 0.2% 和 1.5% 的甲烷泄漏率。

6 地壳中可以找到一些氢气囊。这种纯气体被称为天然氢或金氢，理论上可通过与石油和天然气类似的方式提取。一些公司正在法国、马里和美国等地勘探此类资源。然而，这种类型的氢仍然是一种地质奇观，属于不可再生能源（Prinzhofer、Cissé 和 Diallo，2018 年；Zgonnik，2020 年）。

7 这一类别有时进一步分为“灰色”天然气、“棕色”褐煤和“黑色”烟煤。然而，本报告中的灰色一般是指以化石燃料为基础生产的氢。

当前正在考虑应用清洁生产形式替代灰色氢的两条主要路径：绿色氢和蓝色氢。绿制氢与净零排放目标完全一致。它依赖于一项众所周知的技术，即基于可再生电力驱动的水电解技术（文本框 2.1）。当前使用可再生能源制氢的产量有限，但随着全球增强对其潜力的关注，这种情况将发生变化。

蓝氢使用化石燃料应用 CCS 生产。针对灰氢生产设施的 CCS 改造使继续使用这些资产成为可能，同时有助于减少温室气体排放。然而，蓝氢依赖于化石气体，这造成了上游或中游的甲烷泄漏风险，而甲烷是相比 CO₂ 影响更大的一种温室气体。因此，仅在甲烷泄漏排放量不超过 0.2%⁸ 且碳捕获率接近 100% 的情况下，才能确保蓝氢的温室气体排放量极低。这一比率仍有待进行大规模论证（Bauer 等人，2021 年；Howarth 和 Jacobson，2021 年；IEA，2021b；IRENA，2020b；Saunio 等人，2016 年）。

蓝氢的部署还存在其他限制。由于使用化石燃料面临价格波动，例如 2021 年末世界许多地区特别是亚洲和欧洲价格飙升，（Collins，2021a），并且不支持确保气候变化应对能力或能源安全的目标。它还增加了 CO₂ 的运输和储存成本，且还需要监测储存的 CO₂。

但是，如果蓝氢满足严格的排放标准，则可以在中短期内扩大氢气产量并有效推动价值链中相关基础设施和技术的发展。此外，蓝氢能够为氢市场提供额外的灵活性。然而，从长远来看，绿氢是一种零碳解决方案，因此应该是我们的最终选择。

还有一些其他用于制氢的低碳途径。一种选择是“绿松石色”氢，它依赖于甲烷（天然气）的热解，不会排放 CO₂。这一过程产生的唯一副产品是固体材料“炭黑”，此方法当前已具备相应市场，虽然规模较小。另一种选择是核电产生的“粉色”氢。第三种是使用 CCS 的生物质气化，这会导致 CO₂ 的负排放。本报告中并未涉及这些类型的氢，而是优先考虑更先进的生产方法。



8 该阈值符合油气行业气候倡议组织 (Oil and Gas Climate Initiative) 设定的目标 (Agora, 2021 年)。

文本框 2.1

什么是电解槽？

电解是通过水和电制氢的化学过程。电解槽 — 可以将水分解成氧气和氢气的装置，于 200 多年前发明。

目前有多种水电解槽技术。其中四种方式颇具前景：碱性、质子交换膜 (PEM)、固体氧化物电解槽 (SOEC) 和阴离子交换膜 (AEM)。所有已安装的电解槽容量都使用碱性或 PEM 技术。AEM 电解槽技术相对较新，部署有限；其潜在优势在于它不使用贵金属，并且使用的膜相比 PEM 技术使用的膜更加便宜。

表 2.1 主要电解槽技术对比

类型	商业现状	优缺点
碱性	成熟	<ul style="list-style-type: none"> • 简单的系统设计。 • 具备现有供应链的其他应用，可以扩大规模。 • 动态响应较慢；不太适合波动性可再生能源 (VRE)。
质子交换膜 (PEM)	商业化，快速增长	<ul style="list-style-type: none"> • 需要铂和铱。当前的全球铱产量可支持每年部署高达 3-7.5 GW。 • 动态响应更快；非常适合 VRE 和电压调节。
固体氧化物电解槽 (SOEC)	示范工厂	<ul style="list-style-type: none"> • 无循环（上升或下降）；非常适合恒定基本负荷制氢。
阴离子交换膜 (AEM)	有限部署	<ul style="list-style-type: none"> • 不使用任何贵金属。 • 使用的膜相比 PEM 使用的膜便宜。

来源：IRENA (2020a, 2020b)。

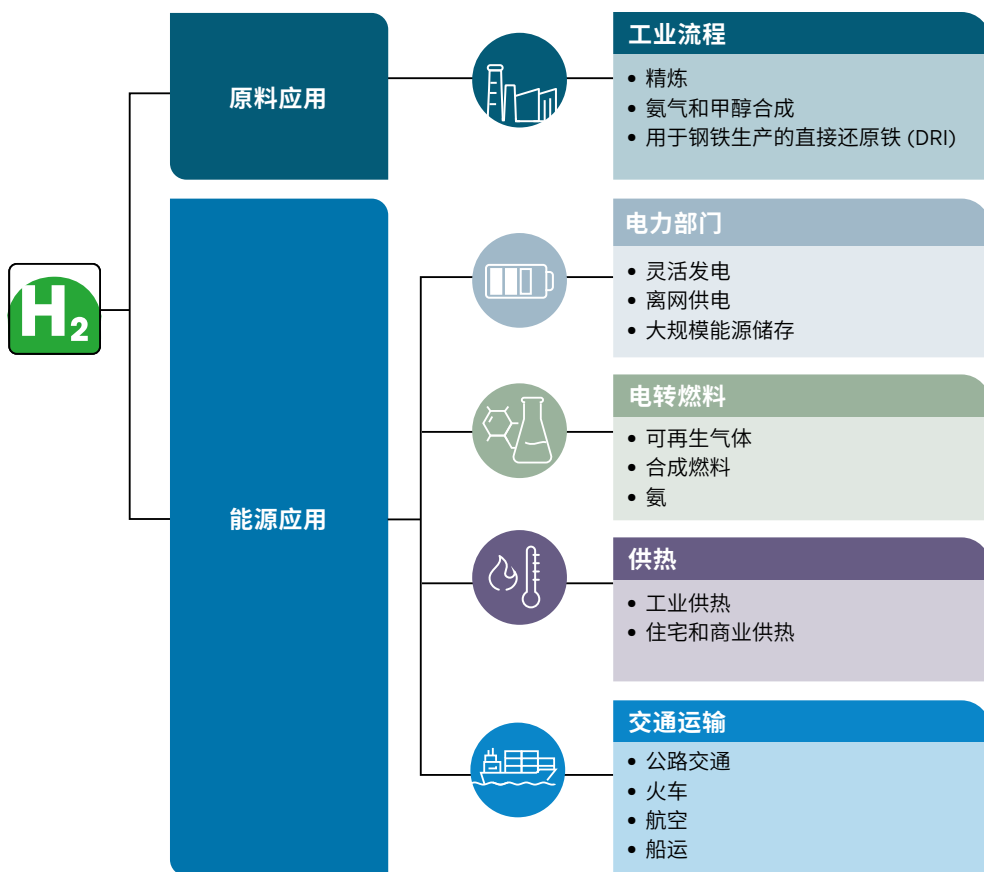
2.3 氢的应用和发展重点

氢是一种多功能的能源载体，适用于许多应用。

图 2.3 显示了氢的潜在用途，其中部分用途可以提供氢的早期需求并帮助行业起飞。



图 2.3 清洁氢的潜在用途



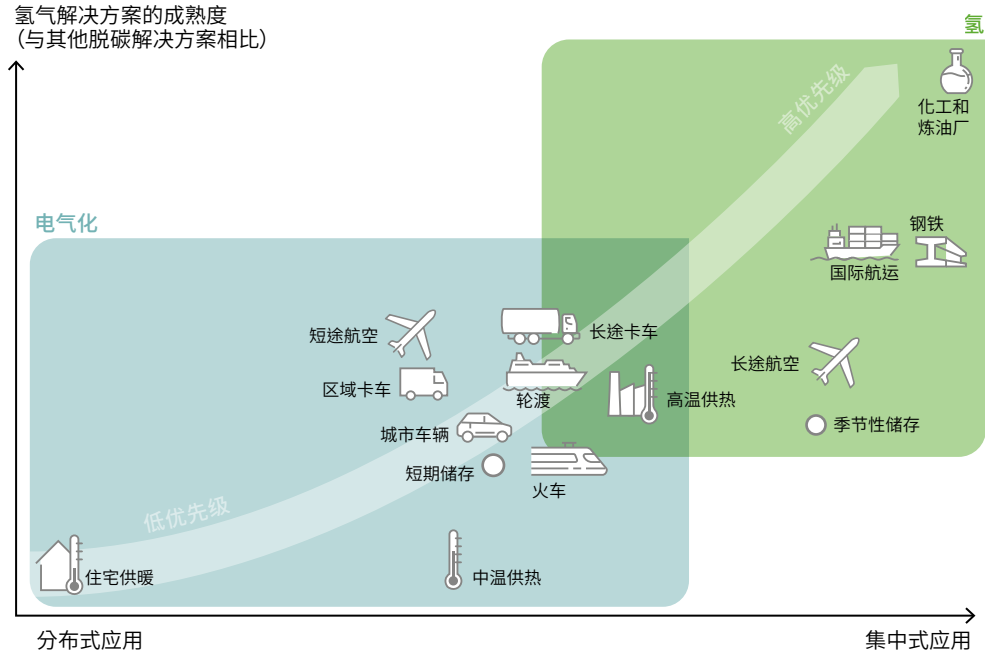
来源：IRENA (2020b)。

脱碳战略需要严格管理，以确保选择的技术和解决方案实现最有效的部署。因此，广泛的选择要求确定氢能够提供的最大价值用途。其生产、运输和转换需要能源，进而提高了整体需求。不加以区分的使用会拖慢能源转型，同时削弱发电部门在脱碳方面做出的努力。因此，最好将氢用于当前没有可行性替代解决方案的应用。图 2.4 根据应用规模和氢解决方案的成熟程度，比较了可能的最终用途与基于电力的解决方案。应该对更成熟和更集中的氢气解决方案给予政策关注。这种关注可能涉及专项的研究、规划和支持政策（IRENA，即将发布-b）。

向真正可持续的经济转变不仅仅涉及转换能源和保持当前的能源系统；还必须开发更加有效、公正和公平的能源使用方式。这样做有助于减少许多最终用途中不必要的能源消耗，同时改变当前以持续增加消费为基础的经济社会。例如在重工业中，通过更有效地重复使用钢铁、铝和塑料，可以减少 40% 的 CO₂ 排放（Lovins, 2021a）。另一示例是在可能的情况下从短途航班向电气化火车的模式转变，从而减少需求。

图 2.4 清洁氢的政策重点

氢气解决方案的成熟度
(与其他脱碳解决方案相比)



来源：IRENA（即将发布-b）。

2.4 扩大氢能规模所面临的障碍

当前阻碍清洁氢对能源转型做出更大贡献的障碍如下：

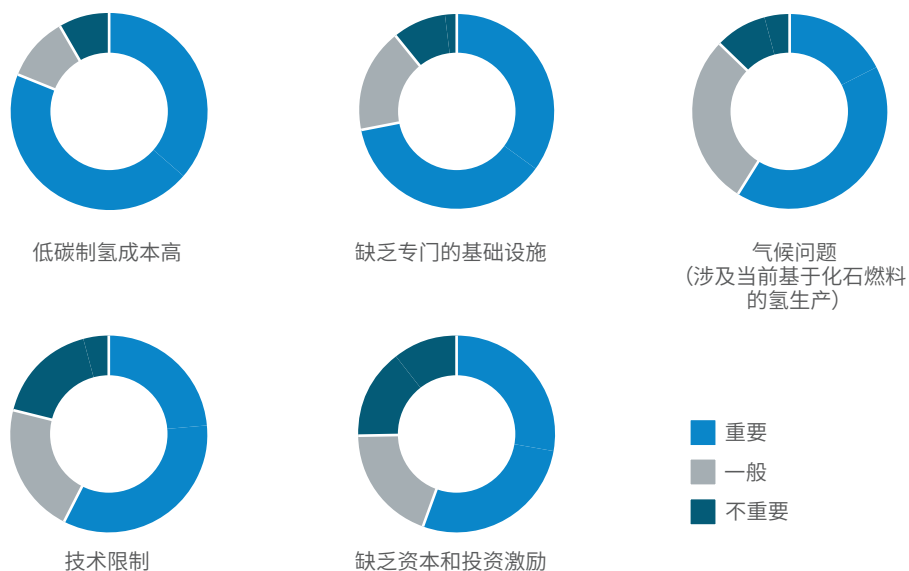
- **成本：**相较于高碳燃料，清洁氢，特别是绿氢的成本仍然很高。不仅生产成本高，运输、转化和储存氢气的成本也非常高。将清洁氢技术应用于最终用途的价格可能极其高昂，而且 CCS 尚未大规模部署。
- **技术成熟度：**氢价值链中的部分脱碳所需技术的成熟度仍然较低，需要进行大规模验证。例如，目前还没有现成的专用氢气运行的燃气轮机，而在海上贸易方面，能够运输液态氢的原型船还只有一艘。
- **效率：**在价值链的每个阶段，包括生产、运输、转化和使用等，氢气的生产和转化都会产生巨大的能源损失。此外，能源密集型的蓝氢生产还增加了整体能源需求。
- **可再生电力的充足程度：**到 2050 年，使用电解槽制氢的能耗可能接近 21000 TWh — 几乎相当于当前全球生产的电力（IRENA, 2021a）。随着越来越多的最终用途部门实现电气化，缺乏足够的可再生电力可能会成为绿氢生产所面临的瓶颈。
- **政策和监管的不确定性：**尽管 140 多个国家/地区已承诺在未来几十年内实现净零排放，但实现这些目标的速度尚不明晰。大规模的开发和部署需要稳定的长期政策框架提供支持。
- **标准和认证：**各国缺乏制度化的机制来追踪任何氢的生产和消费并确定其特征（例如来源和生命周期排放）（IRENA, 2020b; IRENA, IEA 和 21 世纪的可再生能源政策网络 (REN21), 2020 年）。⁹ 此外，最终能源消费总量的官方统计数据中并未将氢计算在内，清洁氢针对减排贡献的经济价值也尚未得到认可。
- **鸡和蛋的问题：**在建设必要的氢基础设施方面，面临先有鸡还是先有蛋的问题。如果没有需求，对可能降低成本的大规模生产的投资风险太大，但如果没有规模经济，该技术的成本又太高。



© King Ropes Access/shutterstock.com

9 追踪原产地和生命周期排放机制通常被称为“来源保障”认证制度。被视为制定绿氢政策的支柱 (IRENA 2020b)。

图 2.5 制定氢政策和战略的主要障碍



来源：IRENA 成员国调查，2021 年

文本框 2.2 氢调查中的地缘政治



我们针对已引起广泛兴趣且迅速发展新兴主题设计了两项自愿调查，以收集政策制定部门和行业专家的反馈，为观察氢行业的发展提供基准。

第一项调查的重点是收集各国/地区意见，以更深入了解国家/地区计划，以及氢作为能源转型中的角色所面临的相关驱动因素和障碍。当时将该调查分发给 IRENA 的成员国、当时有 164 个国家和欧盟。共收到来自 37 个成员国的 48 份回复。

第二项调查针对专题专家（有目的抽样），以收集更多的技术观点。第二项调查涉及 162 名专家，收到了 78 份回复。我们对收到的回复进行了分析和汇总。本报告中提供了部分调查结果。完整的调查结果可通过数字附件获得。

2.5 国际氢贸易前景

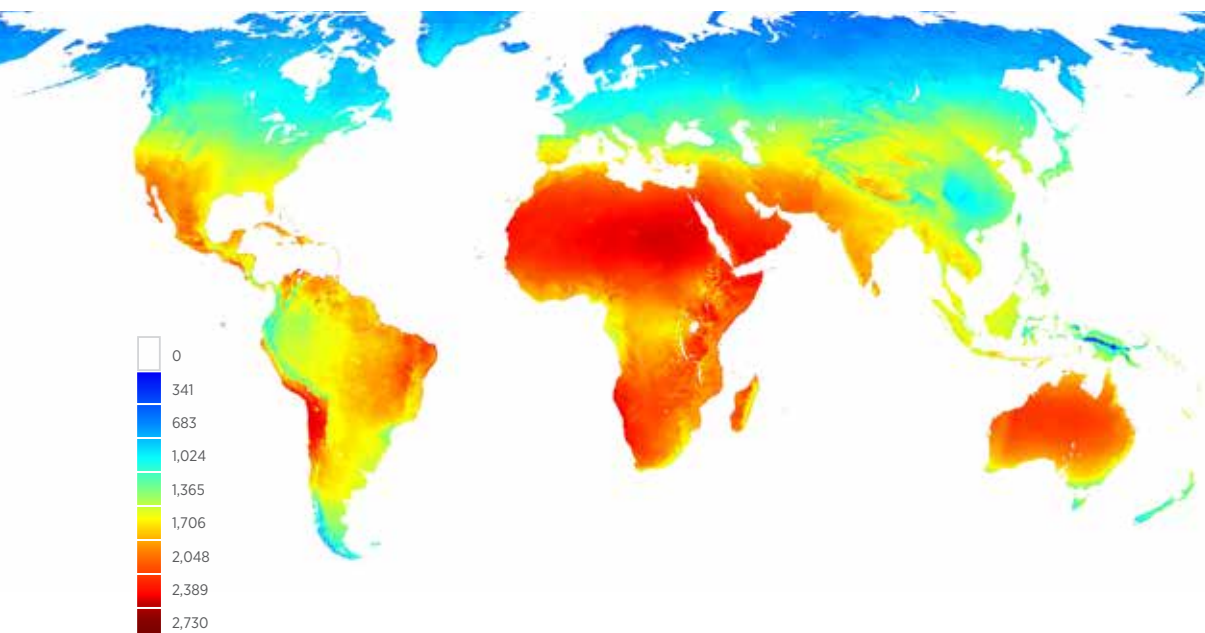
目前，氢还是一项非常本地化的行业。大约 85% 的氢在工厂内现场生产和消费，而非通过更广阔的市场买卖（IEA，2019a）。即使出售，由于物流困难和成本高昂，通常也不会进行远距离运输。

随着时间的推移，氢可能会成为一种国际贸易商品。绿氢为“运送阳光”提供了额外手段，即跨境运输太阳能和其他可再生能源。生产绿氢的最大成本组成部分是电力成本（IRENA，2020a）。由于可再生能源的平准化成本在不同地区之间存在显著差异，氢的价格也会有所不同。¹⁰ 绿氢的最经济生产地将是具备丰富可再生资源（图 2.6 和图 2.7）、土地丰裕、水资源充足以及能够向大型需求中心运输和出口能源能力等条件的最佳组合地区。

¹⁰ 地区间差异主要由 i) 资源质量；ii) 可再生能源和电解槽的资本成本（CAPEX）；iii) 加权平均资本成本（WACC）定义。

随着不断部署更多容量和经验的积累，最后两项将随着时间的推移而变化（IRENA，即将发布-a）

图 2.6 全球太阳能技术潜力

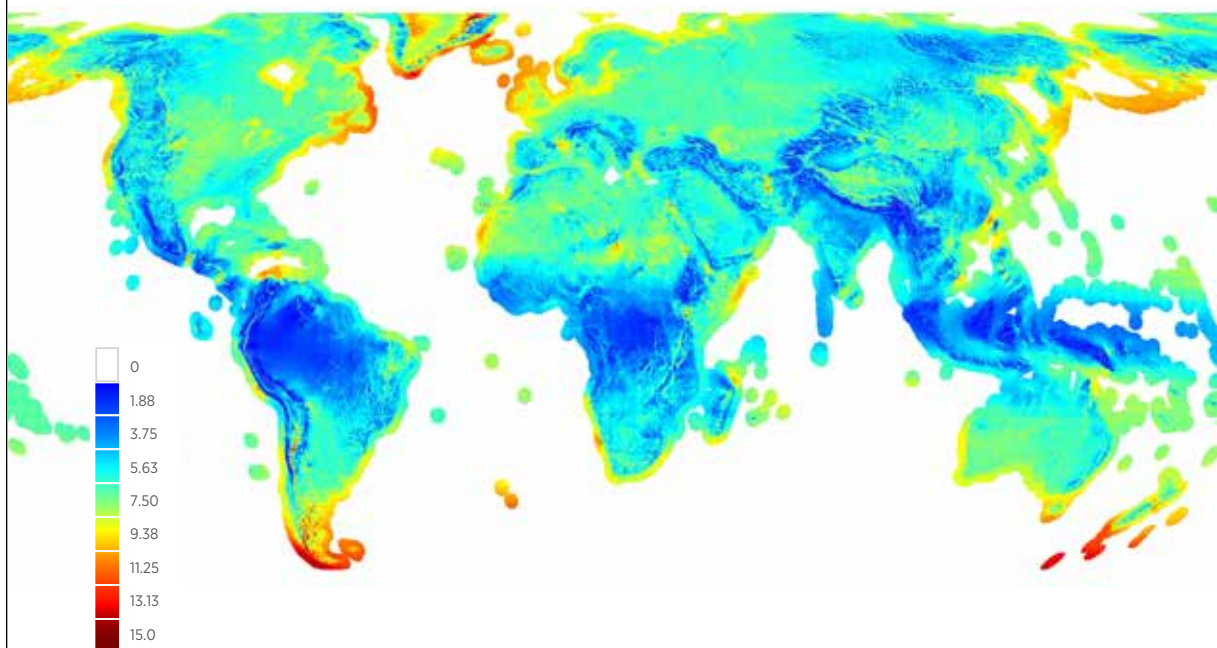


© IRENA (2022)，来源：Vortex（2021年）

注：全球年平均水平辐照量 (kWh/m²)。也可通过 IRENA 全球可再生能源地图集 (IRENA Global Atlas for Renewable Energy) 网络平台查看。

免责声明：此地图仅用于说明用途。此地图上显示的边界并不意味着 IRENA 认可或接受。

图 2.7 全球风能技术潜力



© IRENA (2022), 来源: Vortex (2021 年)

注: 100 米高度处年平均风速 (m/s)。也可通过 IRENA 全球可再生能源地图集 (IRENA Global Atlas for Renewable Energy) 网络平台查看。

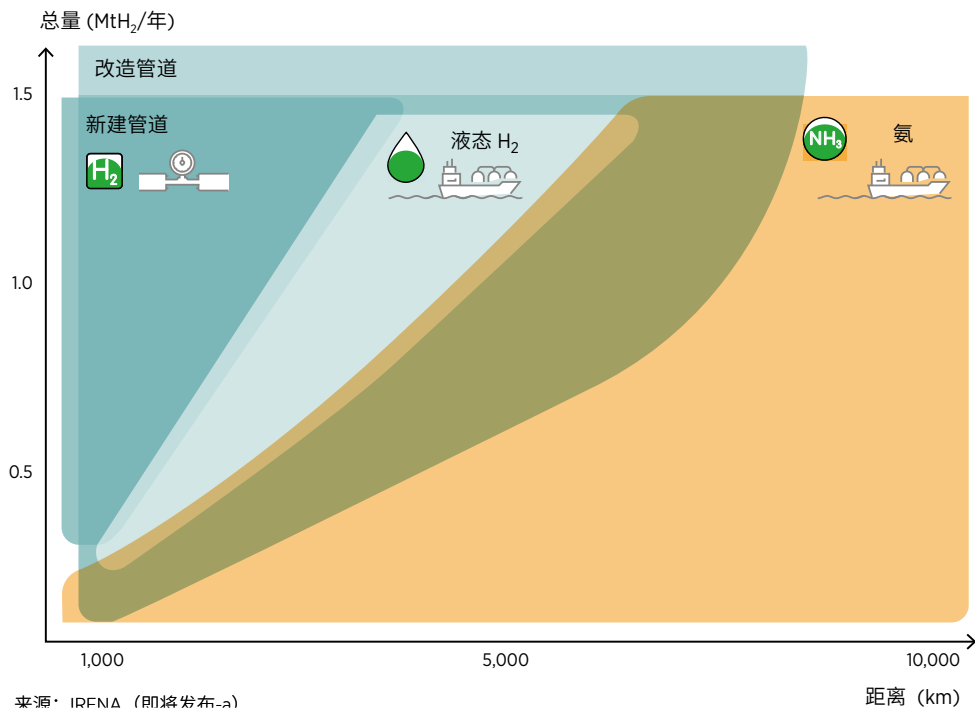
免责声明: 此地图仅用于说明用途。此地图上显示的边界并不意味着 IRENA 认可或接受。

跨境运输氢有两种主要方式: 管道和船舶。¹¹ 距离和体积决定了使用哪种方式最便宜 (图 2.8)。例如, 如果体积小 (例如每年 30 万吨氢), 距离在 1,500km 以下时使用管道运输可能比船运更加便宜。如果体积较大 (例如每年 150 万吨氢), 在距离不超过 4,000km 的情况下新建氢气管道将是最具成本效益的选择。若可以选择改造后的天然气管道,¹² 则它在 8,000km 距离以内是最具有成本效益的选择。从这些距离的角度来看, 连接纳米比亚温得和克和南非约翰内斯堡需要一条约 1,500km 的管道。连接加拿大多伦多与墨西哥墨西哥城需要一条长约 4,000km 的管道。从智利到日本的航运距离约为 17,000km。

11 理论上而言, 卡车也是一种运输选项。然而, 卡车运输仅适用于少量氢的运输 — 例如加氢站的供应。在实践中, 管道和船舶是长距离散装货物的运输工具。

12 利用已有的燃气管网, 只要其材料与氢兼容, 且燃气输送需求正在减少², 可同时用来增加氢能运输。管道改造相比新建管道可能便宜 65-94%。

图 2.8 考虑体积和距离时不同运输方式的成本效率



西北欧、俄罗斯联邦（俄罗斯）和美利坚合众国（美国）运营着约 4,600km 的专用氢气输送管道。欧洲当前正在制定主干管道系统计划，称为“氢气主干”（Gas for Climate, 2021a）。也可以简单地通过电缆传输可再生电力，并在线路末端将其转化为氢气。最佳解决方案究竟是管道还是电缆取决于几个因素，包括所需的最终产品、地形和距离等。

在无法选择管道的情况下，通过船舶运输氢气在技术上是可行的。由于氢气的体积能量密度低，¹³ 最好在装船之前将气态氢转化为能量密度更高的液氢。通过船舶运输氢气可使用多种载体（文本框 2.3），但氨是最有前景的选择。它已经是一种国际贸易商品，2020 年其贸易量约为 1,800 万吨（约占全球产量的 10%）（Atchison, 2021 年）。

¹³ 每立方米 3 千瓦时 (kWh/m³)，正常条件下的甲烷为 10 kWh/m³。

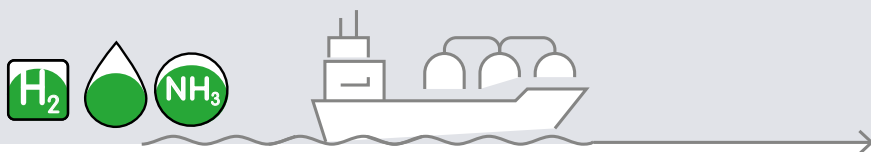
文本框 2.3

船舶运输氢的三种主要方式

液氢。氢分子必须在港口码头冷却至 -253°C，然后才能装载至高度绝缘的油轮上。液化过程将消耗初始氢能的 25-35%。目前仅有一艘远洋船舶可运输纯氢，即由 Kawasaki 在 2019 年底建造的 Suiso Frontier，于 2021 年底首航前往澳大利亚（Harding, 2019 年）。

液态有机氢载体 (LOHC)。一系列不同的有机化合物可通过化学反应吸收和释放氢。可将 LOHC 作为氢的储存和运输介质，它能够在未冷却的情况下以液体形式运输。LOHC 与原油和石油产品非常相似，因此现有的石油运输基础设施甚至可用于运输 LOHC（Niermann 等人，2019 年）。

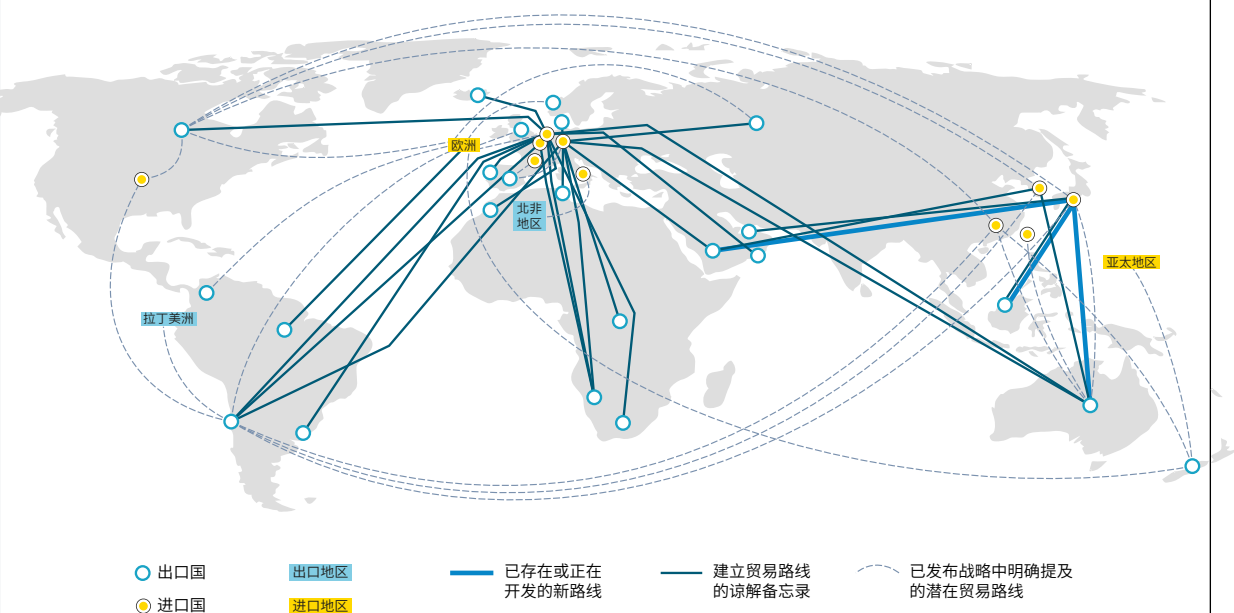
氨。仅需使用电、水和空气，氢通过与空气中的氮反应便可转化为氨。氨的能量密度远远高于氢，这意味着最终有更多的能源用于交易。氨的国际贸易流现已成熟，可以充分利用。它目前用作原料，最常见的用途是制造化肥。它还可以用作脱碳燃料，例如在航运业和发电中的应用。其缺点是，氨有毒并且是氮氧化物排放的潜在来源，一旦发生泄漏则可能会带来不利影响。



氢气运输成本仍然很高，但随着规模经济发展、项目风险降低和技术的改进，成本将有望降低。相较于绿氢，蓝氢可能更快实现贸易规模化，因为它当前生产成本较低，并且可利用现有天然气基础设施。由于规模经济的改善和扶持政策的推出，预计到 2030 年绿氢贸易的规模会有所增长，这将有助于降低生产成本。

IRENA 分析表明，到 2050 年，大约三分之一的绿氢将实现跨境交易（IRENA，即将发布-a）。这一比例略高于现行全球天然气的交易份额（24%）。到 2050 年，大约一半的氢贸易可能通过管道进行，包括重新利用现有的天然气管道。另一半将通过长途船舶以氨的形式运输。这种情况类似于天然气，分为区域管道贸易（2020 年为 48%）和全球 LNG 贸易（52%）（BP，2021 年）。各个国家/地区已经在缔结双边协议，为新的氢贸易关系铺路（图 2.9）。

图 2.9 不断扩大的氢贸易路线、计划和协议网络



地图来源：Natural Earth，2021 年

注：此图片信息基于撰写本文时政府文件中所包含的信息。

免责声明：此地图仅用于说明用途。此地图上显示的边界和名称并不意味着 IRENA 认可或接受。

第3章

重绘地缘政治版图

氢可能会改变全球力量平衡，改变国家和地区在国际体系中的相对定位。本章明确了哪些国家是政策先行者、未来的氢出口国以及新兴技术领导者。本章还讨论了化石燃料生产国/地区的立场，随着全球朝着净零经济发展，这些国家/地区可以利用氢对冲部分转型风险。本章还介绍了氢如何促进能源密集型产业向可再生能源热点地区转移，这些地区可能会成为绿色工业化的发展之地。



© Imaginima / iStockphoto.com

03

3.1 政策先行者和领先市场

越来越多的国家/地区和公司正在就清洁氢技术的领导地位展开激烈竞争。本部分将讨论用于确定政策领跑者和潜在领先市场的三个指标：国家氢能战略、投资以及实地项目。

2017 年时，只有一个国家也就是日本制定了国家氢能战略。今天，30 多个国家/地区已经制定或正在制定氢能战略（图 3.1），这表明全球对发展清洁氢价值链的兴趣日益浓厚。

图 3.1 已有和正在编制中的氢能战略，2021 年 10 月



来源：彭博新能源财经 (2021b) 和 WEC (2021 年)。地图来源：Natural Earth, 2021 年

免责声明：此地图仅用于说明用途。此地图上显示的边界和名称并不意味着 IRENA 认可或接受。

这些策略的范围和细节存在极大差异。文本框 3.1 描述了一些国家和地区的愿景和关注重点，这些国家和地区因为市场规模大，而且/或者氢能规划宏伟，可能成为氢的早期领先市场。一旦这些大型市场的战略和计划得以实施，便具备相应能力制定标准和其他游戏规则。

文本框 3.1

先行者？部分领先国家和地区的氢能愿景

中国：中国的年度氢消费量超过 2,400 万吨，是全球最大的氢能用户和生产国。主要基于煤的氢生产占中国煤炭消费量的 3-5%¹⁴。自 2019 年以来，中国在建绿氢项目数量已达到 30 多个。其于 2016 年发布的首个氢能路线图侧重于氢能在交通运输中的应用（技术路线图战略咨询委员会和中国汽车工程学会 (SAE-China)，2016 年）。中国拥有约 8,400 辆燃料电池电动汽车 (FCEV)，其 FCEV 车队规模位居全球第三（仅次于韩国和美国），并且在燃料电池卡车和公共汽车处于领先地位 (IEA, 2021c)。在当前五年计划（2021-2025 年）中，氢是中国未来的六大产业之一（美国安全与新兴技术中心 (CSET)，2021 年）。尽管该国尚未制定国家氢能战略，但当前已有 16 个省市启动了以氢为特色的五年计划。

欧盟：欧盟 (EU) 于 2020 年 7 月发布了氢能战略。将氢确定为实现欧洲绿色协议的关键优先事项。该战略重点关注可再生能源制氢。其中包括到 2030 年在欧盟安装 40 吉瓦的可再生氢电解槽这一目标（欧盟委员会 (European Commission)，2020a）。欧盟渴望成为清洁氢方面的产业领导者。为实现这一目标，它发起了清洁氢联盟 (Clean Hydrogen Alliance) 倡议。预计部分欧盟国家将成为大型氢进口国；其他成员国则有望成为出口国或中转枢纽。

印度：印度于 2021 年 8 月启动了国家氢能计划 (National Hydrogen Mission)，其目标是成为“全球绿氢生产和出口中心”。总理纳伦德拉·莫迪 (Narendra Modi) 认为，绿氢对于到 2047 年实现能源独立取得“突飞猛进”的发展而言至关重要 (Recharge News, 2021a)。印度政府正在考虑强制要求炼油厂和化肥厂使用部分绿氢。氨是化肥生产的关键原料，印度是全球最大的氨进口国，2019 年的进口额为 12.7 亿美元（联合国商品贸易统计数据库 (UN Comtrade)，2021 年）。

¹⁴ 数字 3% 以如下方式估算得出：中国生产 2,400 万吨氢，其中 62% 基于煤生产。生产 1 千克 (kg) 氢大约需要 8 kg 煤。因此，用于制氢的煤炭总消耗量为 1.1904 亿吨，占 2019 年煤炭总消耗量（38 亿吨）的 3%。数字 5% 来源于 Brasington (2019 年)。



日本：日本是 2017 年首个制定了国家氢能战略的国家。它的目标是在所有经济领域广泛使用氢，成为全球首个“氢社会”（日本经济产业省 (METI)，2017 年）。其计划得到了政府对氢技术和基础设施的大量投资支持。2020 年，日本针对氢和燃料电池业务的投资约为 6.7 亿美元（日本环境部，2020 年），并设定了到 2030 年实现 800,000 辆 FCEV 和 900 个加氢站的目标（CSIS，2021 年）。当前日本正在制定氢的长期供应协议，例如引领液化天然气贸易的相关协议（METI，2017 年）。

韩国：2019 年韩国的氢能路线图将氢确定为经济增长和创造就业的引擎。该国力求在生产和部署 FCEV 以及用于发电的大型固定式燃料电池方面成为全球领导者（CSIS，2021 年）。到 2020 年，已部署了约 1 万辆载客 FCEV，超出所有其他国家/地区（E4Tech，2021 年）。作为绿色新政 (Green New Deal) 的一部分，政府目标是到 2025 年这一数字增加到 20 万（财政经济部 (MOEF)，2020 年）。韩国还计划到 2030 年使用氢为该国 10% 的城市、县和城镇供电，到 2040 年将此比例提升至 30%（《韩国先驱报》(Korea Herald)，2019 年）。政府预计氢在 2050 年将成为该国最大的单一能源载体，占总体能源消耗的三分之一（Recharge News，2021b），当前正在与包括澳大利亚和沙特阿拉伯在内的各个供应国探索氢的进口。

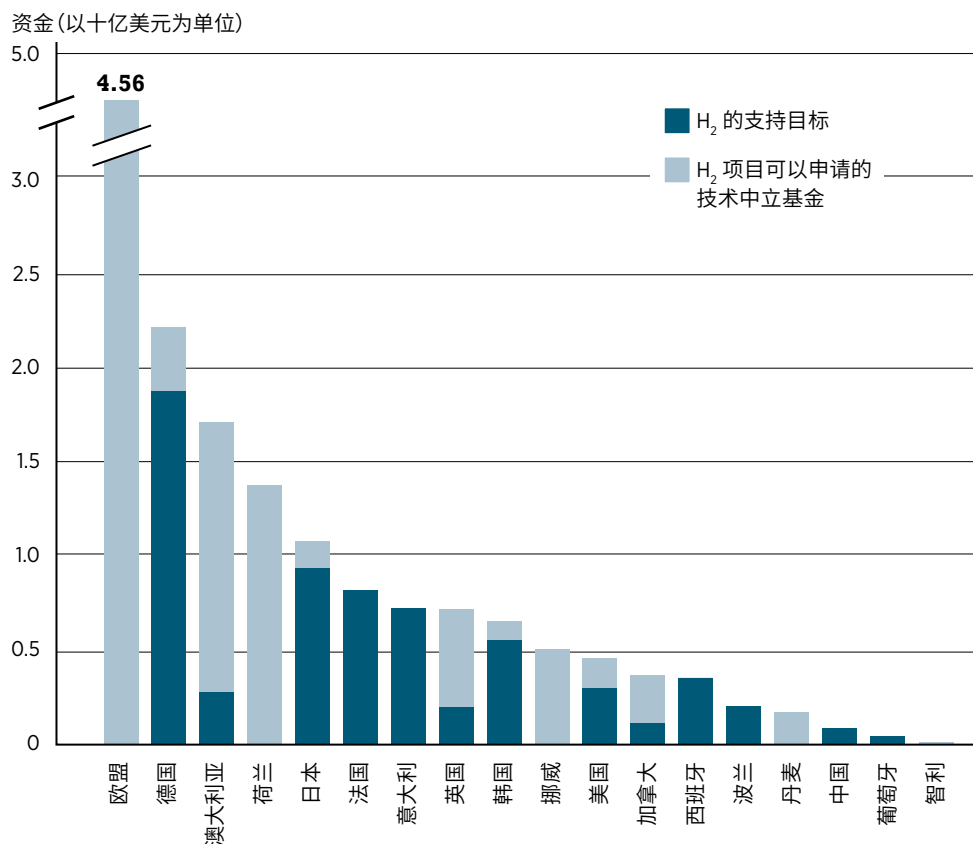
美国：美国是世界第二大氢消费国和生产国，占全球需求的 13%。截至 2020 年，美国是全球最大的 FCEV 市场，在加利福尼亚州的领导下，通过清洁能源汽车奖励计划 (Clean Vehicle Rebate Program) 为该行业提供了近十年的支持。2021 年 11 月，美国签署了《基础设施投资和就业法案》(Infrastructure Investment and Jobs Act) 并使其成为法律。该法案为加速清洁氢技术的发展投入了 95 亿美元。美国还启动了 Hydrogen EarthShot 计划支持清洁氢项目。该项目设定了雄心勃勃的“111 目标”：10 年内将清洁氢的成本降低至每 1 千克 1 美元的价格。



COVID-19 疫情加剧了清洁氢领跑国之间的竞争，因为许多国家/地区认识到了氢对于应对气候变化和疫情后经济复苏的双重挑战至关重要。各国/地区已指定将很大部分的刺激资金用于氢项目，将氢引入地缘经济竞争领域。

到 2021 年 8 月上旬，各国政府已拨出至少 650 亿美元用于未来十年有针对性地支持清洁氢，其中法国、德国和日本做出了最坚决的承诺（图 3.2）。这些支持金额相当可观，但与 2017 年 6,340 亿美元的能源部门补贴相比则相形见绌，后者 70% 的资金用于支持化石燃料（IRENA 2020c）。

图 3.2 2021-2030 年平均每年可能投入氢项目的资金

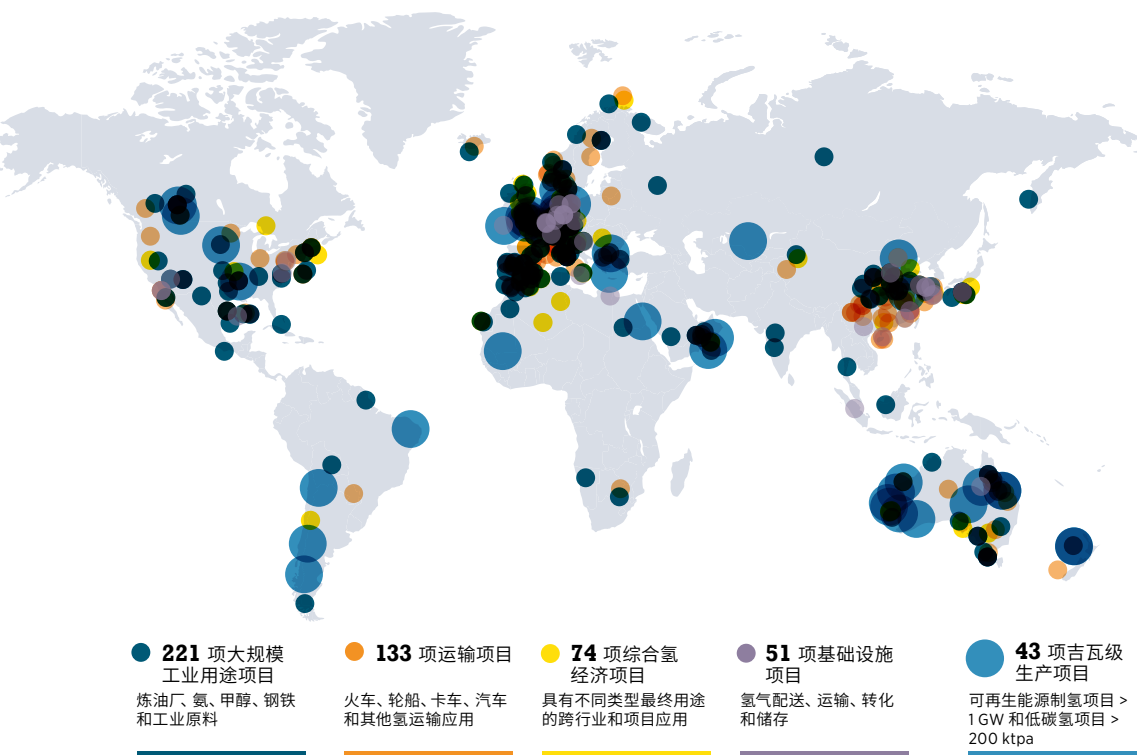


来源：彭博新能源财经 (2021b)。

注：该图提供了截至 2021 年 8 月 5 日特定国家/地区对氢的支持情况简介。其中显示自那时以来已经宣布或正在讨论的支持机制，例如美国提出的氢生产税收抵免（美国国会，2021 年）。

在这些国家计划和支持方案的推动下，近年来针对清洁氢的投资开始激增（图 3.3）。截至 2021 年 11 月，全球宣布的 2030 年前实施的氢项目投资总计 1,600 亿美元，其中一半投资计划用于使用可再生能源和电解生产绿氢（氢能委员会，2021 年）。

图 3.3 截至 2021 年 11 月的清洁氢项目和投资



来源：氢能委员会（2021 年）。地图来源：Natural Earth，2021 年

注：该图仅描述了大型项目，包括 2030 年之后试运行的项目。不包括 1,000 多个小型项目及项目建议。GW = 吉瓦；H₂ = 氢；ktpa = 千吨/年

免责声明：此地图仅用于说明用途。此地图上显示的边界并不意味着 IRENA 认可或接受。

到 2021 年 10 月，全球已宣布的电解槽项目容量已超过 260 GW，若得以实施，到 2030 年将新增 475 GW 的风能和太阳能光伏发电容量（IEA，2021d）¹⁵。与 2020 年安装的 0.3 GW 电解槽相比，这无疑是巨大增长，但离到 2050 年平均每年必须安装 160 GW 容量以实现 1.5°C 的升温限制目标仍相去甚远（IRENA，2021a）。

在全球约一半已宣布的兆瓦级项目中，欧洲正处于蓬勃的发展势头，这主要得益于其雄心勃勃的脱碳政策、国家战略以及政府的大力支持。紧随欧洲之后的是亚洲（占已宣布项目的 23%）和北美（13%）。预计最大的清洁氢容量将来自欧洲和大洋洲，到 2030 年，这两个地区的总产能所占比例将超过一半，其中大部分来自可再生能源。此外还宣布了以非洲、拉丁美洲、中东和大洋洲的氢出口为重点的吉瓦级项目（文本框 3.2）。

15 部分计入 260 GW 的项目仅处于概念阶段。

文本框 3.2

非洲的氢能项目

非洲巨大的可再生能源潜力，及其自 20 世纪初使用上一代电解槽的经验已经引发国际投资者的关注，并且已经宣布了几个相关的绿氢项目。

埃及和津巴布韦已经安装超过 100 兆瓦 (MW) 的电解槽。2021 年 12 月，埃及宣布了一个新的 100 MW 生产绿氢的项目。

2021 年 5 月，可再生能源开发公司 CWP Global 与**毛里塔尼亚**政府签署了一项谅解备忘录，目标是开发 16 吉瓦 (GW) 的电解项目，与 45 GW 的可再生能源项目配套。该项目的总成本预计为 400 亿美元（《能源之声新闻》(Energy Voice)，2021 年）。毛里塔尼亚还授予 Chariot 独家开发权（一家活跃于巴西、摩洛哥和纳米比亚的石油和天然气公司），以开发高达 10 GW 的海上和陆上风能用于生产绿氢，该项目可能引领非洲首个海上风电场的开发（Recharge News，2021c）。

COP26 气候峰会上，**纳米比亚**政府宣布选择 HYPHEN Hydrogen Energy 作为绿氢项目的优先竞标者。该项目的第一阶段将实现 2 GW 的可再生能源发电容量，以及生产绿氢以转化为氨的电解槽产能。21 世纪 20 年代后期项目的进一步扩展阶段将使总投资价值提高至 94 亿美元，几乎与纳米比亚目前的 GDP 持平。一旦建成，该综合设施将拥有 5 GW 的可再生能源发电容量和 3 GW 的电解槽容量，剩余的电力容量将输送至纳米比亚电网，还有可能输入区域电力池。该项目将使用淡化水，其中部分水供应给吕德里茨附近社区（Engineering News，2021 年）。

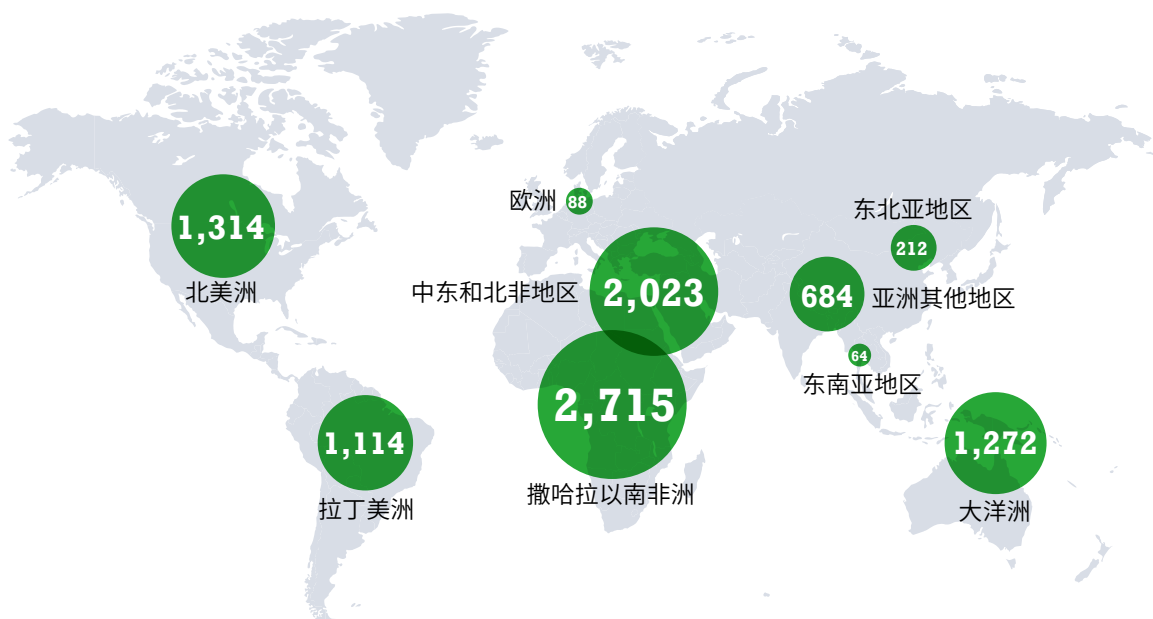


3.2 新一批能源出口国

具备较高可再生能源潜力和低电力成本的国家和地区可以利用其资源成为绿氢的主要生产国。不同地区生产大量低成本绿氢的能力差异巨大。非洲、美洲、中东和大洋洲是技术潜力最大的地区；欧洲、东北亚和东南亚用于生产绿色氢的资源则较少（图 3.4）。各国的可再生技术潜力并非决定其是否能够成为绿氢主要生产国的唯一因素。许多其他因素也在发挥作用，包括现有的基础设施和“软因素”（例如政府支持、商业大环境、政治稳定性）以及当前的能源结构和行业（例如可再生能源计划、对氢的潜在需求）。



图 3.4 到 2050 年生产低于 1.5 美元/kg 绿氢的技术潜力（以 EJ 为单位）



来源：IRENA（即将发布-a）。地图来源：Natural Earth，2021 年

注：2050 年资本支出 (CAPEX) 假设如下：光伏太阳能：225-455 美元/kW；陆上风能：700-1070 美元/kW；海上风能：1275-1745 美元/kW。加权平均资本成本：基于 2020 年的值，未考虑跨地区技术风险。技术潜力根据土地可用性计算，已将禁区排除在外（保护区、森林、永久湿地、农田、城市地区、5% [PV] 和 20% [陆上风能] 的坡地、人口密集区域）。分析中并未考虑水的可用性。EJ = 焦耳；kW = 千瓦。

免责声明：此地图仅用于说明用途。此地图上显示的边界和名称并不意味着 IRENA 认可或接受。

预测未来绿氢进口国和出口国的方法之一是比较其国内生产潜力与预计到 2050 年的氢需求和进口成本¹⁶。可以确定三组国家/地区。第一组包括可发展成为出口国的低成本绿氢生产国家/地区。他们可以利用其可再生能源市场吸引针对绿氢生产的投资。澳大利亚、智利、摩洛哥和西班牙是绿氢的净出口国。第二组包括在绿氢方面能够自给自足的国家/地区。这些国家/地区具备足够的生产潜力满足自身需求，无需依靠进口。其中包括中国和美国。第三组包括需要进口以满足国内需求的国家/地区，例如日本、韩国以及欧洲和拉丁美洲的部分地区。

当然，这些市场潜力巨大，只是缺乏技术、专有知识和当地能力，因此随着大规模投资开发新的可再生能源市场和氢能基础设施，这种情况可能会发生显著变化。

关键的未知因素之一是资本成本（加权平均资本成本或 WACC），目前各国之间差异较大（文本框 3.3）。

¹⁶ 模型中的关键参数是蓝氢和绿氢的国内生产潜力和价格，以及蓝氢和绿氢的进口成本（其本身是生产、（再）转化和运输成本的函数）（IRENA，即将发布-a）。

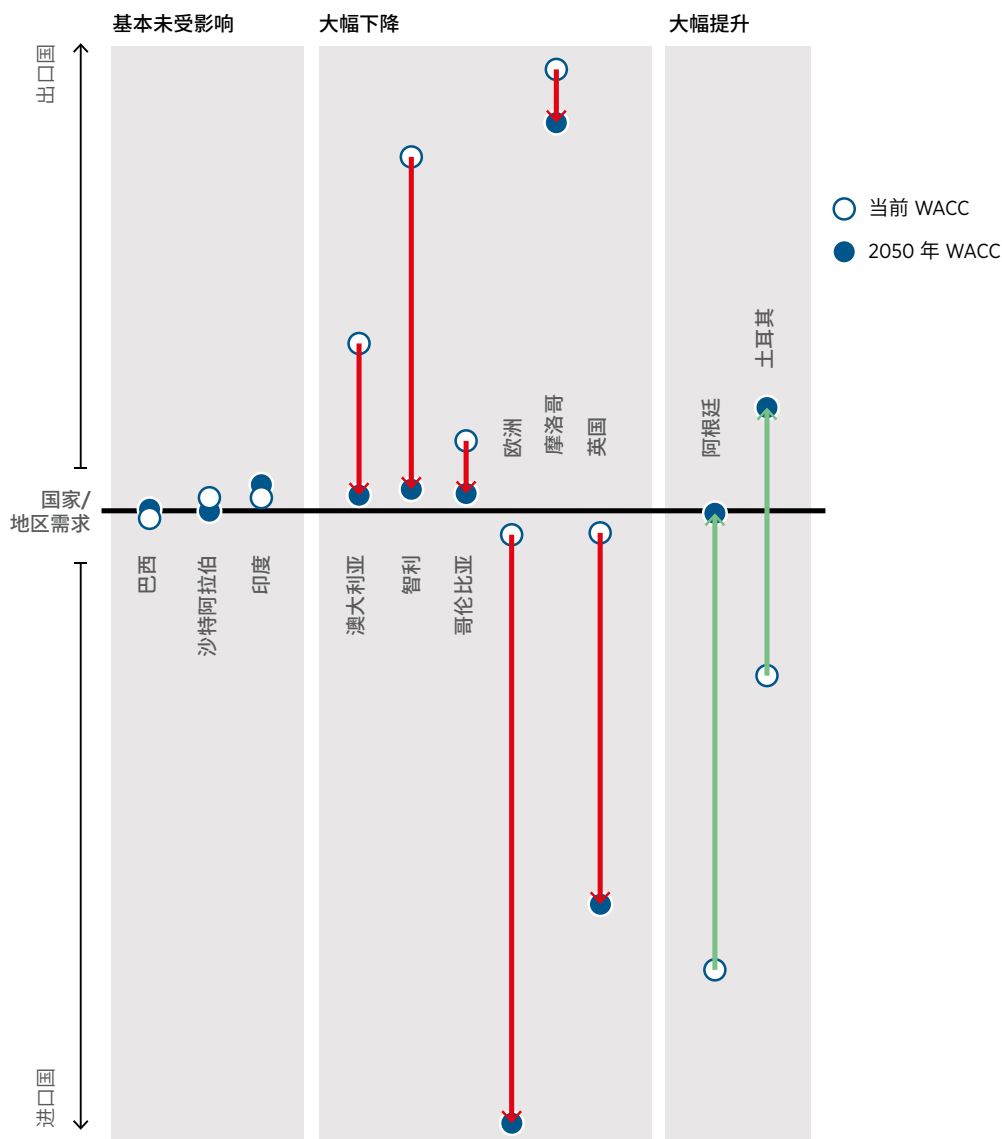
文本框 3.3

资本成本假设对于氢贸易预测的重要性

迈入可再生能源主导的未来，能源成本将由资本成本主导。通常情况下的谨慎做法是假设当今全球各地的资本成本差异将持续到 2050 年（Egli、Steffen 和 Schmidt，2019 年）。然而，如果人们假设这些差异是均匀分布的（Bogdanov，2019 年），那么情况就会完全发生变化（图 3.5）。拉丁美洲、中东和土耳其将成为绿氢出口国而非进口国，而西班牙将朝着相反的方向发展。澳大利亚和智利等当前 WACC 较低国家/地区的出口潜力将遭到严重削弱，而欧盟和德国的进口需求将大幅上升。

WACC

图 3.5 成本假设对特定国家/地区氢生产的影响



注：该图显示了以乐观情况下的 2050 年资本支出假设为基础，2050 年按地区或国家划分的绿色氢的产量和需求量：光伏太阳能：225-455 美元/kW；陆上风能：700-1,070 美元/kW；海上风能：1,275-1,745 美元/kW；电解槽：130 美元/kW。绿氢的生产基于对可用于太阳能光伏和风能的土地评估。需求符合 1.5°C 情景。生产量和需求量使用对数函数将不同数量级放在相似规模之内。这使得轴无量纲：可以将其解释为指数而非能量流。

“2050 年 WACC” 假设未来世界风险无处不在。“当前 WACC” 是指所有地区具备不同的 WACC，就像现在一样。

专家表示，到 2050 年，澳大利亚、智利、摩洛哥、沙特阿拉伯和美国最有可能成为主要的清洁氢生产国（参见附件中的图 B.3）。其中一些国家，即澳大利亚、沙特阿拉伯和美国是目前的能源出口国。尽管这些国家即将进入竞争更加激烈的市场，但由于几乎任何地方都可以生产绿氢，他们可以继续作为能源出口国。智利、摩洛哥和纳米比亚等其他国家/地区目前是能源净进口国¹⁷。对于他们而言，充足的可再生能源潜力开辟了新的可能性，绿氢的转型代表着命运的彻底逆转。成功成为绿氢和衍生燃料主要出口国的国家/地区也将在地缘战略重要性的背景下获益（文本框 3.4）。

17 智利目前能源进口需求约为 65%，摩洛哥为 91%，纳米比亚为 74%（世界银行 (World Bank)，未注明日期-a）。

文本框 3.4

从能源进口国转向能源出口国？

具备绿氢出口潜力的某些化石燃料进口国的氢活动

智利：智利于 2020 年启动了绿氢战略。其目标是到 2025 年达到 5 GW 的电解槽容量，到 2030 年将此数字增加到 25 GW，到 2030 年生产全球最便宜的氢，到 2040 年成为全球三大氢燃料出口国之一（智利戈比诺，2020 年）。据估计，到 2030 年，该国可能出口价值 300 亿美元的绿氢及其衍生物（Mander，2020 年）。由于因为该地区具备极高的可再生能源潜力，氢能在拉丁美洲引起了越来越多的关注。该区域几个国家/地区已经发布或正在制定国家氢能战略和路线图（图 3.1）。

摩洛哥：摩洛哥于 2019 年成立了国家氢能委员会，并于 2021 年 1 月发布了绿氢能路线图。路线图中提到，氢是国民经济中的关键增长部门。到 2030 年，该国预计本地氢市场规模将达到 4 太瓦时 (TWh)，出口市场规模将达到 10 TWh，二者共需要建设 6 GW 新的可再生能源容量，同时将支持创造超过 15,000 个直接和间接工作岗位（MEM，2021 年）。



3.3 化石燃料生产国的转型路径

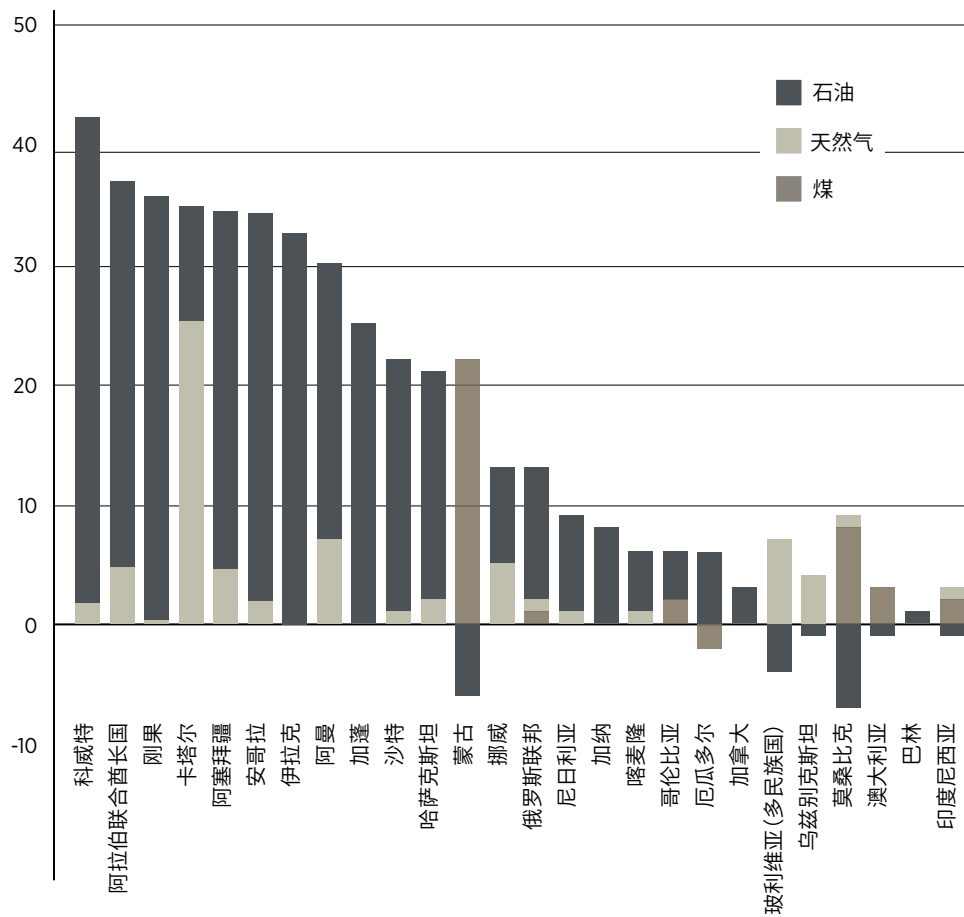
能源转型将对化石燃料生产国产生显著影响：大部分石油、天然气和煤炭储量极有可能永远不会经历开采和货币化。2020 年的 COVID-19 疫情期间，这些影响的预兆非常明显，当时价格下跌和需求暴跌使所有石油和天然气储量价值减少约四分之一（IEA，2020 年）。尽管随着能源转型的推进，低成本生产国的市场份额可能会增加，但由于预计整体市场将会萎缩，他们的收入可能仍然会大幅下降（IEA，2021a）。当前几家石油和天然气生产国的主权信用评级已经下调。2015 年至 2020 年间，化石燃料净出口与国内生产总值 (GDP) 比率最高的 20 个国家/地区（图 3.6）的信用评级净下调中位数为 1.6（惠誉评级 (Fitchratings)，2021 年）。随着脱碳的不断深入，生产国将不得不采取措施使其经济摆脱对石油和天然气的依赖。

纳米比亚：该国大量的太阳能和风能资源吸引了投资者的关注。政府将绿氢和绿氨确定为新兴出口机会（纳米比亚政府，2021 年）。该国成立了国家绿色氢能委员会，并任命了绿氢专员。政府还在考虑建立风力涡轮机叶片制造厂、绿色钢铁厂和氨肥生产线（Weidlich，2021 年）。相对于纳米比亚的经济情况而言，上述拟议项目规模庞大，表明了国民经济中绿氢的变革潜力（Geingob，2021 年）。



图 3.6 2019 年主要化石燃料净出口国的搁浅资产风险

净出口收入占 GDP 的比重 (%)



来源：联合国商品贸易统计数据库（2021 年）和世界银行（未注明日期-b）

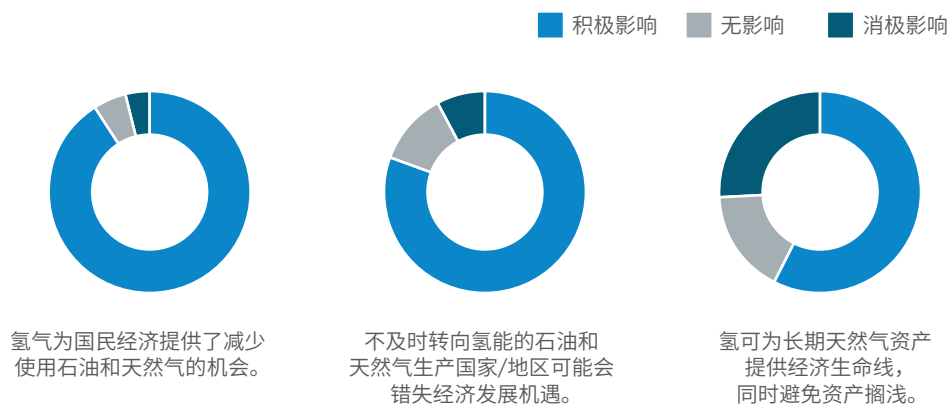
注：2019 年布伦特原油价格（国际基准）为平均每桶 64 美元。2010-2020 年价格为平均每桶 76.2 美元（美国能源信息署 (EIA)，未注明日期）。

随着主要出口市场转向低碳和零碳燃料及能源载体，清洁氢为石油和天然气出口国实现经济多元化提供了颇具吸引力的过渡路径（图 3.7）。利用已建立的能源出口基础设施（港口、管道和储存设施）；熟悉生产、转换、处理能源燃料和气体的熟练劳动力；以及现有的能源贸易关系，石油和天然气生产国可以顺利地 toward 产氢国过渡。

在 COP26 气候峰会之前，澳大利亚、俄罗斯、沙特阿拉伯和阿拉伯联合酋长国等一些出口国实施了净零目标。清洁氢是实现相关目标的重要途径。部分化石燃料生产国，例如澳大利亚、加拿大、哥伦比亚、挪威、俄罗斯和英国等已经或正在积极准备制定国家氢能战略。

化石燃料出口国战略经常提到氢为新出口产业的发展提供的机会（文本框 3.5）。部分国家/地区支持“技术中立”方法，并明确了将蓝氢包括在内的可能性（例如澳大利亚、加拿大和挪威）。澳大利亚和加拿大详细规定了将化石燃料生产的氢视为“清洁”能源的预期或必要碳捕获率，并将其设定为 90% 或以上（Longden 等人，2022 年）。

图 3.7 专家看法：氢能战略及其对油气生产商产生的影响



来源：IRENA 专家调查（请参见文本框 2.2）

文本框 3.5

转向氢能战略？

部分化石燃料出口国的氢能战略

澳大利亚：澳大利亚的目标是到 2030 年成为清洁氢生产和贸易的“主要全球参与者”；该国认为氢是其“下一个大量出口的能源”。到 2030 年，该国希望成为全球面向亚洲市场出口氢的前三大出口国之一（澳大利亚政府，2019 年）。澳洲政府现已投资超过 10 亿美元刺激国内氢能产业，包括共同赞助七个氢能枢纽（澳大利亚政府，2021 年）。澳大利亚政府仍将继续生产蓝氢，同时当前有九个千兆瓦级绿氢项目正在规划或开发之中。此外，澳大利亚还与德国、日本和新加坡等潜在出口市场达成了交易协议。

加拿大：加拿大的相关战略提出了新的出口机会，并指出该国完全有能力成为“全球领先的清洁燃料出口国”（加拿大政府，2020 年）。加拿大的目标是到 2050 年成为全球三大清洁氢生产商之一。尽管加拿大对许多生产路径持开放态度，但其战略提到了最终需要过渡到使用越来越大比例的可再生能源或零排放的生产方法，同时还特别提到该国的大型水电容量。

挪威：挪威是欧洲的主要天然气出口国，主要通过管道满足欧洲约四分之一的天然气需求。挪威能源公司 Equinor 目前正在研究将天然气输送到德国或荷兰的可能性，在这两个地方天然气可以转化为蓝氢。然后，氢将进入德国杜伊斯堡的一家钢铁厂，再将二氧化碳运回北海挪威大陆架的海床下储存（Equinor 和 OGE，2019 年）。

阿曼：阿曼正在制定国家氢能战略，目标是到 2040 年建立以氢为中心的社会。该国还计划成为绿色氢或绿色氨的大型出口国。此外，阿曼当前已经宣布了几个千兆瓦级项目，所有项目都利用中部区丰富的太阳能和风能资源，并瞄准阿拉伯海港 Duqm 进行出口。其中最大的项目将由 25 GW 容量的太阳能和风能供电（Argus，2021 年）。

俄罗斯：俄罗斯的目标是成为全球最大的清洁氢出口国之一，以蓝氢为主。用总理米哈伊尔·米舒斯京（Mikhail Mishustin）的话来说，“氢能将有效降低我们失去能源市场的风险”（俄罗斯政府，2021 年）。俄罗斯的目标是到 2030 年占据全球氢市场的 20%，这将超过它当前在天然气市场中的份额（俄罗斯新闻社（RIA Novosti），2021 年）。到本世纪中叶，俄罗斯预计出口高达 5,000 万吨氢，这导致年度预算增加 230-1,000 亿美元（Patonia，2021 年）。



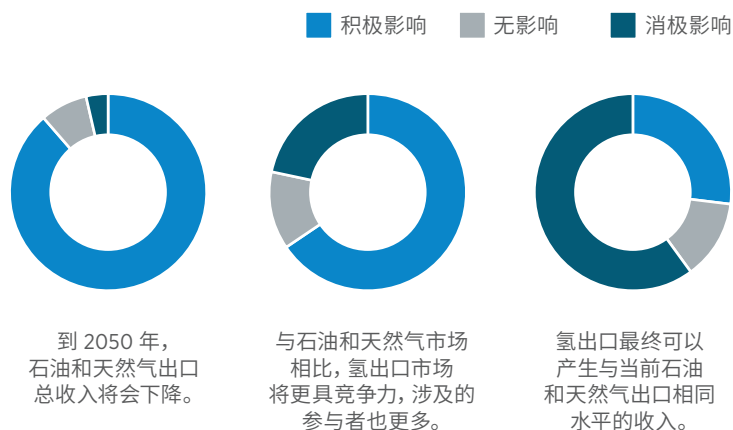
沙特阿拉伯：2020年7月，沙特阿拉伯宣布建设太阳神绿色燃料项目，计划投资50亿美元、完全由太阳能和风能提供电力的绿氢和绿氨工厂。该工厂预计将于2025年在规划中的大城市Neom开始投产，该城市位于沙特阿拉伯与埃及和约旦接壤的红海沿岸（HELIOS，未注明日期）。沙特阿美（Saudi Aramco）收购了全球第三大氨出口商沙地阿拉伯基本工业股份有限公司（Saudi Basic Industries Corporation）70%的股份（沙特阿美，2020a）。沙特阿美于2020年9月向日本运送了第一批蓝氨，用于发电（沙特阿美，2020b）。沙特能源部长阿卜杜勒阿齐兹·本·萨勒曼王子在2020年底的新闻发布会上表示，他的国家“必定会成为地球上最大的氢出口国”（Ratcliffe、El Wardany 和 Martin，2020年）。

阿拉伯联合酋长国（阿联酋）：阿联酋于2021年11月发布的氢能路线图旨在将该国打造成蓝氢和绿氢出口方面的领导者。其目标是到2030年占据全球低碳氢市场25%的份额。当前已通过主要利益相关企业实施超过七个项目，包括由阿布扎比国家石油公司（ADNOC）、阿布扎比国家投资者穆巴达拉开发公司（Mubadala）和国有控股公司ADQ组成的阿布扎比氢联盟。ADNOC已与日本（ADNOC，2021a）、马来西亚（ADNOC，2021b）和韩国（ADNOC，2021c）建立了合作伙伴关系，旨在共同探索氢贸易方案，且现已售出四批蓝氨测试货船（阿联酋通讯社（Emirates News Agency），2021年）。



蓝氢生产路线可能会吸引天然气储存成本低廉的国家/地区。部分石油和天然气出口国，例如澳大利亚以及北非和波斯湾一些阳光充足且多风的国家/地区也可能成为颇具竞争力的绿氢生产国。预计到 2050 年，石油和天然气出口总收入将大幅下降。尽管跨境氢贸易可能会显著增长，但专家们预测氢产生的收入可能与当前石油和天然气的收益相当（图 3.8）。因此，不能将氢视为一种新的零碳版本石油。与石油和天然气不同，氢是一种转化业务而非提取业务，这可能会限制经济租金收入（伦敦大学学院 (UCL)，未注明日期）。与石油和天然气相比，氢相关业务将更具竞争力，涉及的参与者也更多。随着绿氢的成本下降，新的多元化参与者将进入氢市场。

图 3.8 专家看法：未来氢收入和市场结构



来源：IRENA 专家调查（请参见文本框 2.2）

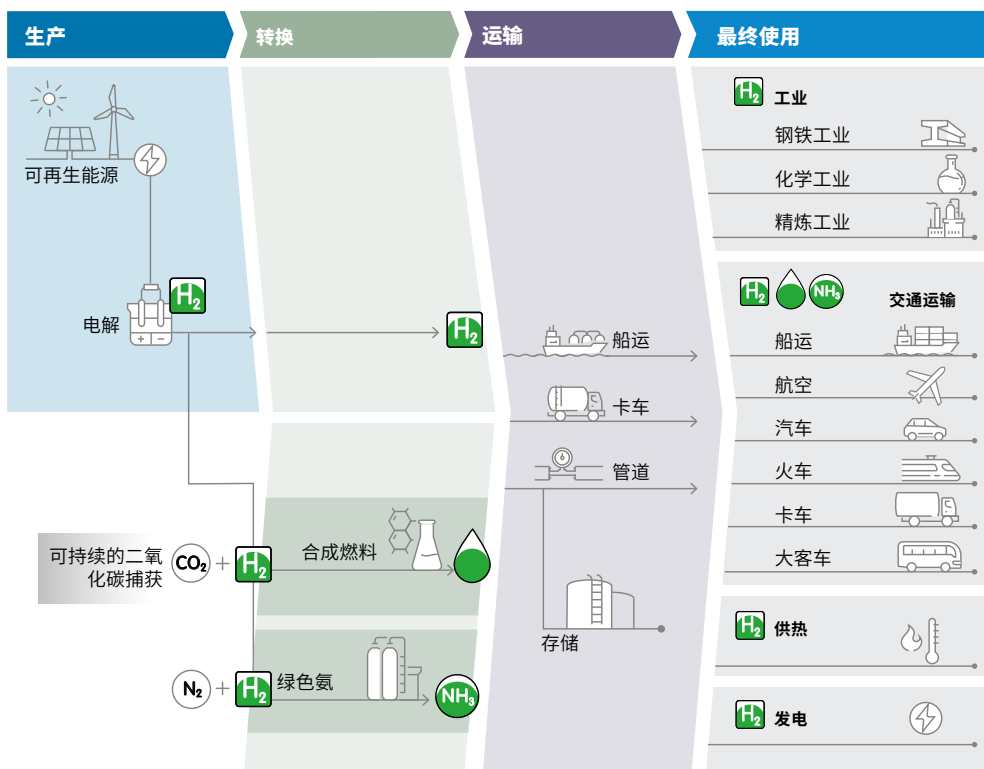


3.4 新兴技术领导者的崛起

过去几年中，零碳解决方案的发展速度超出预期，成为创造和破坏财富的新来源（Systemiq，2020 年）。在清洁氢等气候安全能源技术价值链中占有一席之地，将有效提高一个国家/地区的经济竞争力、国家安全性和能源独立性。

技术领导力可能会围绕氢价值链的诸多方面发展。对于渴望出口氢或其衍生物的国家/地区而言，技术所有权存在较大差异，这可能会对其左右标准和运营框架的能力产生一定影响。例如，澳大利亚、加拿大和沙特阿拉伯在 2010 年至 2020 年间开发了数百项发明（IRENA INSPIRE webtool，2021 年）。哥伦比亚、埃及、摩洛哥、阿曼和阿拉伯联合酋长国的类似活动则相对较少（在此期间，它们每个国家/地区都提交了最多三项与氢相关的专利）。各国可以通过多种方式在价值链的每个环节发挥主导作用（请参见附件中的图 B.8）。本部分重点介绍创新和制造。

图 3.9 绿氢价值链中的技术领导机会



来源：IRENA (2020b)。

注：CO₂ = 二氧化碳；N₂ = 氮气。

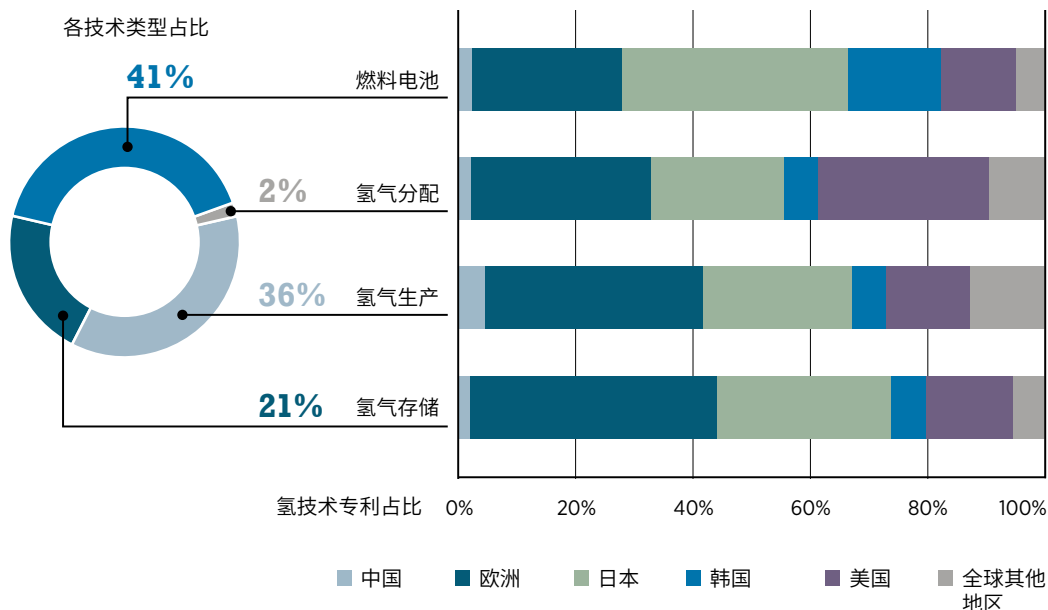
创新领导国

氢技术以及公司的格局仍在不断变化；新的政策重点触发了氢价值链的创新。要评估各国在清洁氢创新竞赛中的定位，必须查看两个指标：研发 (R&D) 支出和专利。

经济合作与发展组织 (OECD) 国家历来占据了全球氢研发支出的大部分比例，中国也正在迅速追赶，2019 年其政府的氢研发支出增长了六倍 (IEA, 2021c)。氢的公共资金都平均分配给了燃料电池和其他应用 (IEA, 2021c)。如果最近的氢研发增长水平得以持续，政府的支持可能会恢复到 2000 年代后期以来的最高水平。

OECD 国家拥有氢领域的绝大多数专利。日本主导燃料电池研究，拥有近 40% 的专利；欧洲则在制氢（主要是电解槽）和储氢技术方面处于领先地位 (图 3.10)。燃料电池约占所有氢相关专利的 41%，但近年来增长最快的领域是生产和储存等其他领域。诸如国内附加值等利益将取决于知识产权的集中地。

图 3.10 2010-2020 年氢相关专利族的地理分布



来源：IRENA INSPIRE webtool。

注：由于专利申请过程的早期阶段处于保密状态，2020 年的专利数据尚不完整。分析侧重于排名前五的参与者及其专利局。将在世界知识产权组织 (World Intellectual Property Organization) 提交的专利申请分配至相应受理局。专利族中的申请人和专利局分配相同份额。氢技术由根据合作专利分类体系的子类别专利代码定义，该专利代码涉及开发减少能源生产、传输或分配相关的温室气体排放等实用技术，并且特别提到了氢 (Y02E60/34 分配、Y02E60/50 燃料电池、Y02E60/36 生产和 Y02E60/32 储存)。

通过查看氢相关发明受到保护的地区可以了解技术领导者正考虑将其商业化的地区（图 3.11）。2010-2020 年，欧洲和美国是氢相关发明受到高度保护的两个地理区域。大多数欧洲发明（60%）在欧洲市场受到保护；其他发明在其他地区也受到保护，特别是在美国，欧洲发明约占所有专利的 20%。尽管日本的发明数量最多（占总数的 36%），但极少发明在日本受到保护，这表明其技术能力很高，但市场机会较少。随着国际技术合作伙伴关系增加，日本可能会成为技术领导国，甚至是氢净进口国。

中国则处于另一极端情况：受到中国国家知识产权局保护的发明中，超过 90% 来源于国外。过去十年，中国作为制造业中心一直具备较高的市场吸引力，这一趋势可能会持续下去。

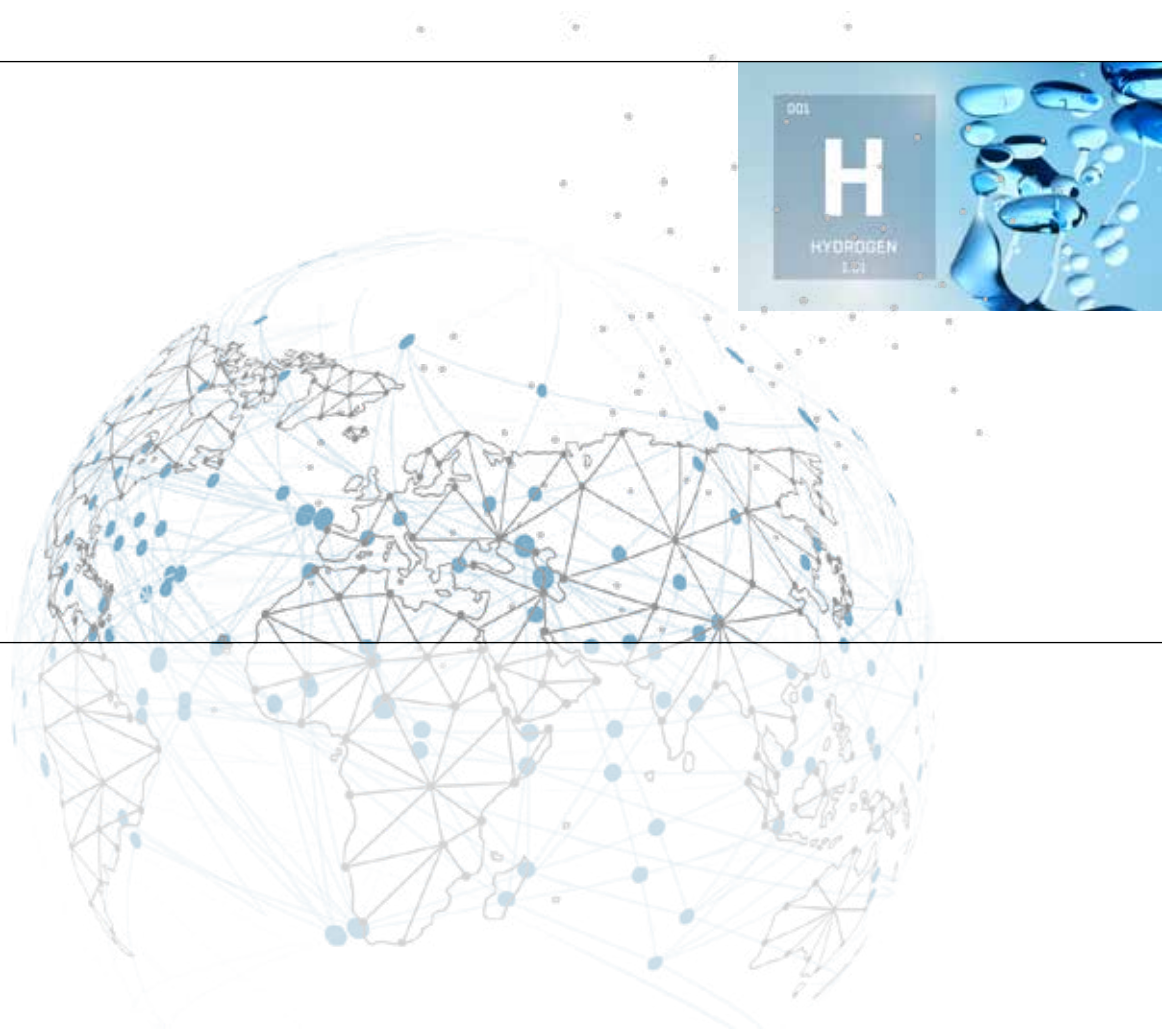
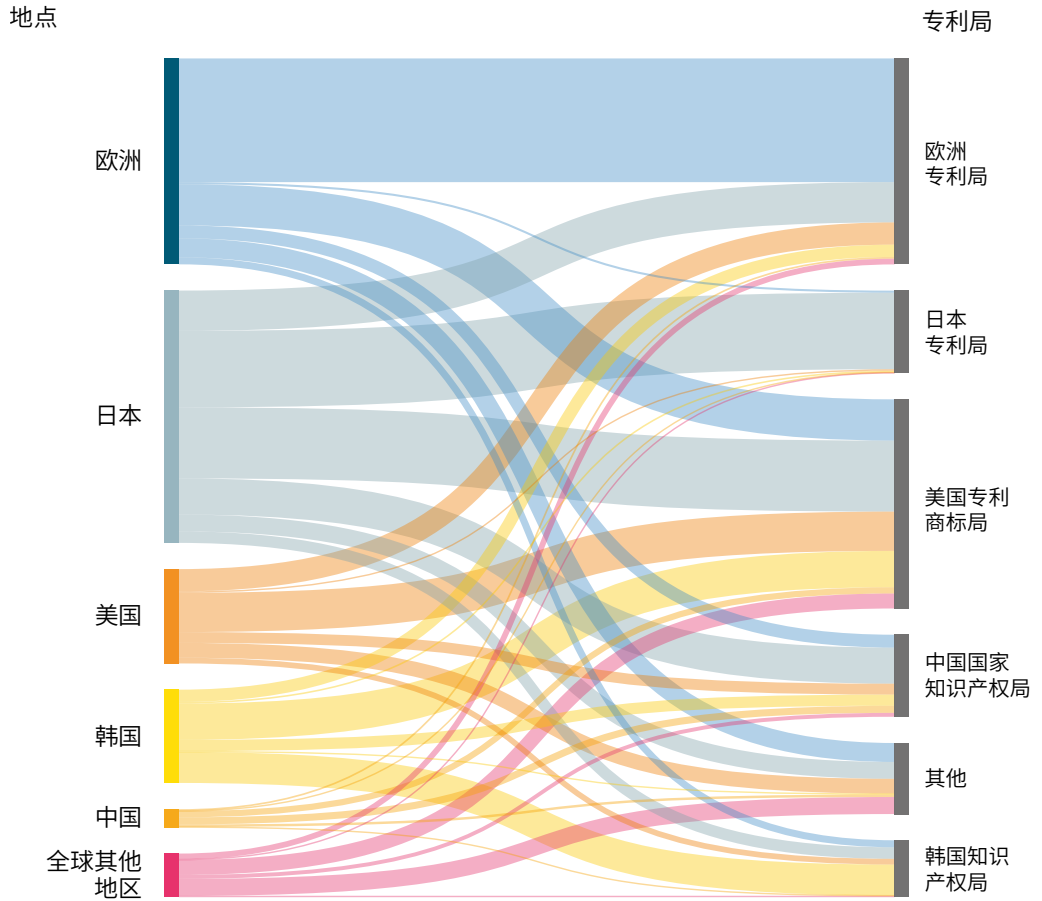


图 3.11 2010-2020 年氢技术发明流



来源: [IRENA INSPIRE webtool](https://public.tableau.com/app/profile/irena.resource/viz/IRENA_INSPIRE_Hydrogen_Patents/HydrogenTech)。

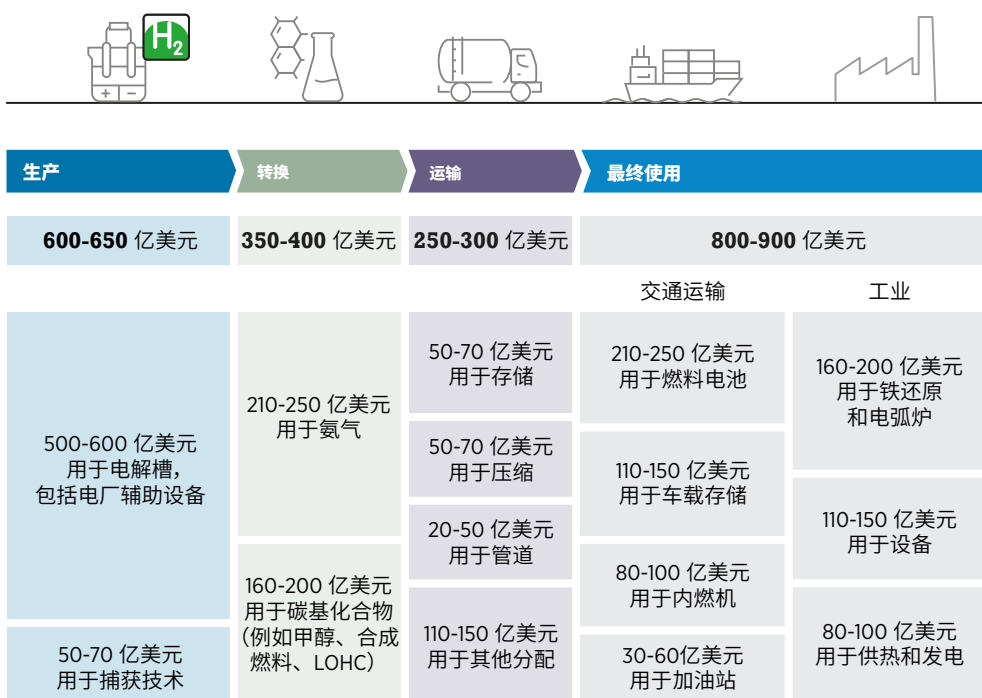
注: 从开发氢相关技术的国家/地区 (左侧) 到相关技术受到保护的市場 (右侧) 的发明流。

请通过以下链接获取更多信息: https://public.tableau.com/app/profile/irena.resource/viz/IRENA_INSPIRE_Hydrogen_Patents/HydrogenTech

设备制造

氢相关设备的新兴市场高度复杂且分散。针对所有相关技术的全面讨论不属于本报告范围之内。本部分重点介绍氢价值链中的两个关键硬件部分：电解槽和燃料电池。这两款设备为各国和各大公司提供了在未来几年甚至几十年中获取价值、并确立自己作为行业领导者的最大机会。预计到本世纪中叶，电解槽市场潜力为 500-600 亿美元，燃料电池市场潜力为 210-250 亿美元（图 3.12）。这两项技术相比价值链其他部分的技术更为成熟。在 IRENA 的专家调查中，电解槽的战略意义超出了氢价值链的任何其他部分，而燃料电池对技术领先而言至关重要（请参见附件）。

图 3.12 2050 年氢相关设备和部件的预计市场潜力



来源：Ludwig 等人（2021 年）。

注：LOHC = 液态有机氢载体。

电解槽

电解槽的应用已经持续几十年时间。20 世纪建造了几座容量超过 100 兆瓦 (MW) 的碱性水电解槽 (表 3.1)，通常建在可以提供廉价电力的水电大坝附近。可再生能源制氢主要用于生产肥料。事实上，20 世纪 60 年代以前，在欧洲销售的大部分化肥都来自挪威 Rjukan 和 Vemork 的水电电解和氨生产 (Philibert, 2017 年)。因此，电解技术对于食品生产至关重要¹⁸。

18 第二次世界大战前夕，电解技术对军事变得至关重要。Rjukan 工厂是 20 世纪 30 年代首家以工业量级生产重水 (氘) (水电解的副产品) 的工厂。由于氘可用于发展核武器，该地点成为二战期间的战略热点。

表 3.1 大型电解制氢厂的历史实例

工厂地点 (国家, 城市)	容量 (MW)	试运行年份
 挪威 (Rjukan)	165	1929 年
 加拿大 (Trail)	90	1939 年
 挪威 (Trail)	160	1953 年
 印度 (Nangal)	125	1958 年
 秘鲁 (Cuzco)	25	1958 年
 埃及 (Aswan)	160	1960 年
 津巴布韦 (Que Que)	95	1974 年

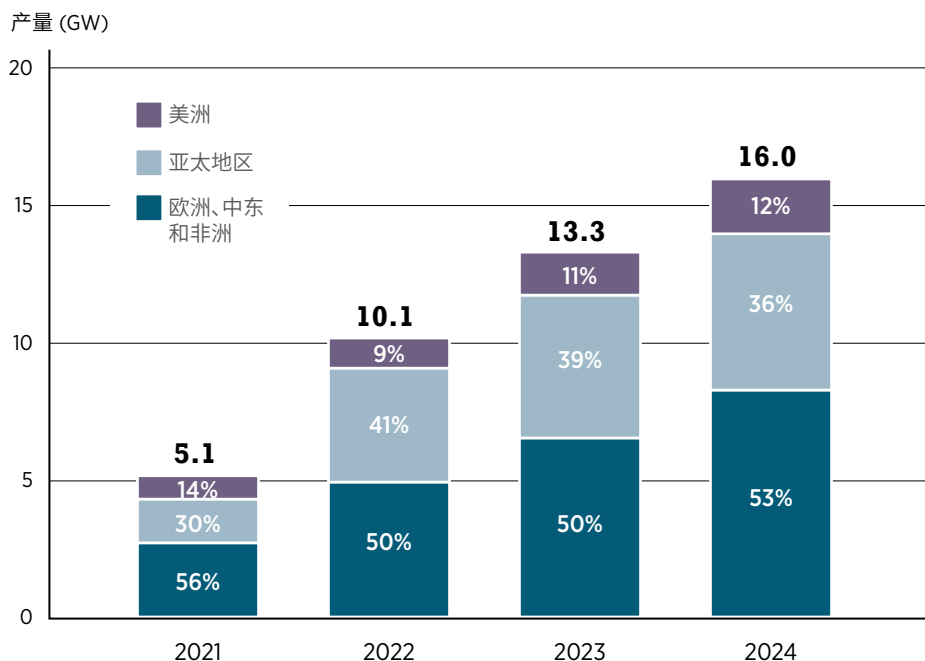
来源: Smolinka、Günther 和 Garcke (2011 年) ; Godula-Jopek (2015 年) 。

注: 除秘鲁工厂以外, 所有工厂都已关闭或改用化石燃料。

尽管人类在水电解系统方面拥有超过 100 年的经验，并且已在全球安装数千座设施，但直到 2014 年，描述该行业的关键词仍然是小型和分散（燃料电池与氢能企业联盟 (FCH JU)，2014 年）。尽管技术已相对成熟，但电解制氢无法与化石燃料竞争（Godula-Jopek，2015 年）。

可再生能源电力成本的下降以及将全球排放量减少到净零的需求带来了全新机遇，正在推动电解槽行业的复兴。2018 年，全球电解槽年制造产能约为 135 MW（IRENA，2020a）。预计到 2024 年将增至 16 GW（图 3.13）。澳大利亚、法国、印度、意大利、挪威、西班牙和英国已经宣布投入几家千兆瓦级工厂（即具备千兆瓦生产能力的工厂）用于大规模生产电解槽（IRENA，2021b；Bullard，2021 年；《布里斯班时报》(Brisbane Times)，2021 年；《共和国报》(La Repubblica)，2021 年）。预计通过大规模制造和全自动生产线，类似规模的项目将实现规模经济，进而大幅降低电解氢的成本。

图 3.13 根据投资计划预估的 2021-2024 年全球电解槽制造产能



来源：彭博新能源财经 (2021b)。

注：AMER = 美洲；APAC = 亚太地区；EMEA = 欧洲、中东和非洲。

欧洲历来在电解槽制造业中占据绝对领导地位。即使在今天，大约一半的电解槽制造商都位于欧洲，其组件供应商也大多位于欧洲（弗劳恩霍夫太阳能研究所 (Fraunhofer ISE)，2020 年）。根据公布的投资计划，预计未来几年欧洲、中东和非洲 (EMEA) 的电解槽制造容量将达到全球一半比例（请参加图 3.13）¹⁹。欧洲氢能战略明确表明其目标是保持该地区在电解槽制造方面的竞争优势²⁰。以德国为中心的欧洲太阳能光伏产业曾一度在欧洲占据巨大优势，但之后由于中国太阳能组件价格下降而崩溃，欧洲强烈希望新兴氢能产业能够避免重蹈覆辙（Amelang，2020 年）。

尽管欧洲拥有最大的生产能力，但中国才是电解槽出货量的领先国（彭博新能源财经，2021b）。中国的电解槽相比欧洲也更加便宜。据报道，中国制造商能够以 300 美元/千瓦的价格生产标准碱性电解槽，比西方制造的同类机器便宜 75%（彭博新能源财经，2021b）。几家公司（主要来自西方）当前正在投资更多创新技术，例如质子交换膜、固体氧化物和加压碱性电解槽。这些技术虽然昂贵，但具有相对优势。例如，质子交换膜电解槽比标准碱性电解槽更紧凑，更适合用于波动性可再生能源的电力生产²¹。

中国、欧洲和日本公司在电解槽的生产和销售方面取得了极大的领先优势，但当前市场仍处于起步阶段且规模相对较小。为满足预期激增的清洁氢需求，氢生产工厂将从兆瓦级向千兆瓦级转变，市场份额可能会随之迅速转移。创新和新兴技术也可能会重塑电解槽市场和当前的制造格局。



19 到目前为止，欧洲在这一领域的生产能力最强。另一项估计是，到 2025 年，欧洲的电解槽制造能力将上升至约 18 GW（Gas for Climate，2021b）。

20 欧盟的氢能战略指出，欧洲对可再生氢的偏好“建立在欧洲电解槽生产方面的产业实力基础之上”，并且“欧洲在清洁氢技术生产方面具备高度竞争力，并且能够从清洁氢作为能源载体的全球发展中获益”（欧盟委员会，2020a）。

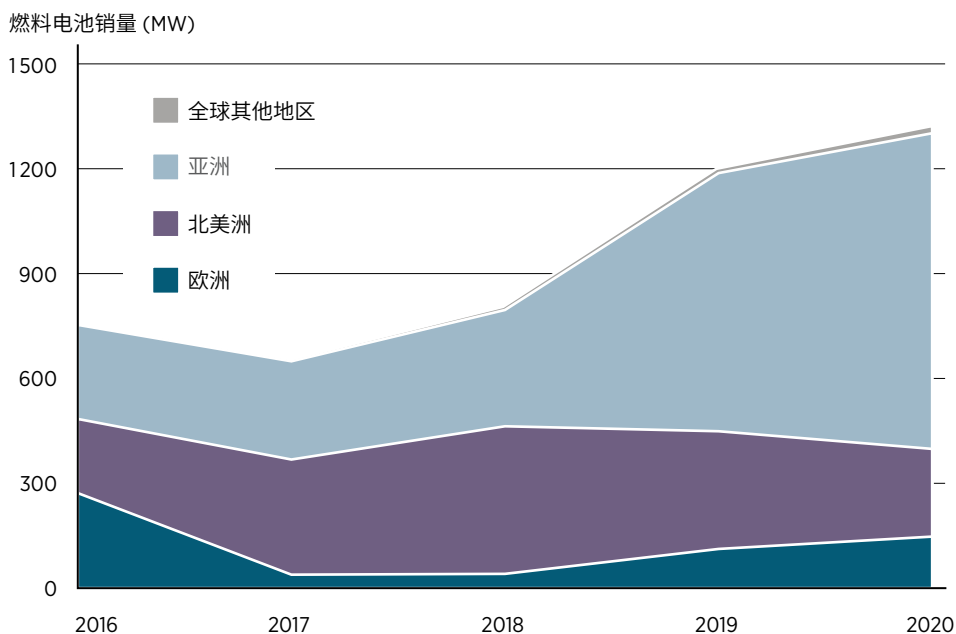
21 这些差异对于大型项目而言可能微不足道，或者可以通过工程和电池解决方案克服（Wang，2021 年）。

燃料电池

燃料电池是使用电化学方式将氢转化为电能的装置。它们本质上是反向工作的电解槽：不是使用水和电制氢，而是使用氢和空气制造电力和水²²。燃料电池可以部署在固定应用中（例如大型发电厂）；还可应用于运输行业，例如燃料电池电动汽车、卡车、公共汽车、叉车、渡轮和轮船以及飞机等。

历史上来看，氢的政策支持大多都是针对燃料电池电动汽车和加氢站（IRENA，2020b）。2008年至2020年间，汽车燃料电池的成本下降约70%（Kleen和Padgett，2021年），一旦扩大生产规模，预计成本将进一步降低。然而，全球燃料电池的出货量还在以相对温和的速度增长。2020年，全球销售的燃料电池容量为1.3 GW。大部分容量应用于亚洲的汽车、公共汽车和卡车（图3.14）；2020年售出约8,000辆燃料电池电动汽车（FCEV）（E4Tech，2021年）。尽管这是有记录以来的最高数字，但与同年全球售出的300万辆电动汽车相比，数量仍然较低（IEA，2021e）。

图 3.14 2016-2020 年根据采用地区划分的燃料电池销售额



来源：E4Tech（2021年）。

22 一种电解槽，固体氧化物电解槽，基本上是反向运行的固体氧化物燃料电池。

尽管如此，部分国家/地区仍在许多最终用途领域努力推进燃料电池的发展。中国的目标是到 2030 年投入运营一百万辆 FCEV；日本已安装 40 万个住宅燃料电池系统，目标是到 2030 年达到 530 万；韩国目标是到 2040 年生产 15 GW 燃料电池用于发电（其中 7 GW 用于出口）；欧洲某个公司联盟承诺到 2030 年部署高达 10 万辆氢燃料电池重型卡车。加州的官方目标是到 2025 年建成 200 个加氢站（加州空气资源委员会 (CARB)，2019 年），其愿景文件预计到 2030 年将有多达 1,000 个类似加氢站为一百万辆燃料电池汽车提供服务（CACFP，2018 年）。

与电解槽相比，燃料电池在能源转型中的作用仍在继续发展。未来几年，燃料电池的创新可能会改变市场以及人们的关注重点。但无论如何，其整体市场规模可能小于电解槽。



© Tremino/stockphoto.com



H₂



© Nguyen Quang Ngoc Tonkin/shutterstock.com



3.5 拥有丰富可再生能源国家/地区的产业发展

几个世纪以来，能源获取一直是决定产业活动地点的主要因素。从 12 世纪的中国宋朝到工业革命期间的英国，再到 20 世纪的美国中西部上部，钢铁工业总是出现在能够获取煤炭和铁矿石的地区（Lovins, 2021b）。煤炭体积大、重量重且运输成本高。因此，相较于将煤炭运输到钢铁生产地，在煤炭储藏地生产钢铁然后运输钢铁效率更高（McWilliams 和 Zachmann, 2021 年）。

煤炭资源丰富的地区往往会吸引更广泛的产业。18 世纪 70 年代，亚当·斯密在《国富论》中观察到“整个英国的制造商将自己主要限制在煤炭国家/地区”（Smith, 1776 年）。一位经济历史学家评论说，“众所周知，英国工业革命地图就是煤田地图”（Pollard, 1981 年）。自 19 世纪以来货运成本大幅下降，工业区才能够不再依赖于靠近自然资源而独立存在，人们将这种现象称之为“距离的死亡”（Glaeser 和 Kohlhase, 2004 年）。

全球能源转型将改变能源捕获、转换和分配来源。在净零碳排放的未来，能源获取将主要取决于可再生电力来源以及由可再生能源电力生产的燃料（氢、氨等）。这种转变是否会与产业向可再生能源丰富的地区普遍迁移齐头并进将取决于三个关键因素：可再生能源成本的特定地点差异、能源运输成本以及现有产业设施和集聚区的粘性（McWilliams 和 Zachmann, 2021 年）。

有许多因素都会推动产业生产选址，包括人力资本、基础设施和劳动力成本等，但能源成本可能会发挥决定性作用。对于钢铁、化工、石化、有色金属和陶瓷材料等能源密集型行业而言，能源和化石燃料原料的投入成本在总生产成本中的所占比例极高（Moya Rivera 和 Boulamanti, 2016 年）。随着越来越多的国家/地区致力于实现净零经济并实施碳定价等减碳政策，化石燃料的投入成本将进一步增加。因此，为了保持竞争力，许多相关行业需要考虑获得低成本的清洁能源。

尽管全球范围内的可再生能源的成本都在下降，但各国和地区之间的差异仍然显著。例如，许多热带发展中国家/地区在太阳能方面具有天然的竞争优势²³。不同地区的资本成本可能相差三倍以上，甚至可能高达六倍以上。因此，部分国家/地区在使用太阳能技术方面已经享有三比一的成本优势，若拥有最佳地理位置，这一比例可能还要高出很多²⁴。无论是电力还是氢能，运输可再生能源的成本仍然相对较高。最便宜的能源运输方式是通过材料和产品的形式运输。因此，对于可再生资源过剩的地区而言，可再生能源潜力为其成为绿色工业化区域创造了绝佳的竞争优势。

当能源成本的减少超过额外运输成本时，工业搬迁才有意义。搬迁可能使铝、氨、铁、航空燃料和甲醇等商品受益（表 3.2）。

23 “发展中国家/地区”的定义没有得到普遍认可。本报告中，这些国家/地区被世界银行定义为低收入和中等收入国家/地区。

24 计算基于 2020 年印度 0.055 美元/千瓦时和马萨诸塞州（美国）0.190 美元/千瓦时的商业部门太阳能光伏发电成本（IRENA, 2021c）。

表 3.2 产业选址经济学

	2021 年全球 生产容量 (Mt/yr)	生产价格 (USD/t)	2030 年绿色 产品价格 (USD/t)	运输成本 (参考) (USD/t)	搬迁的能源 成本效益 (USD/t)
原铝	65	2,500	2,500	70-100	425
氨	200	250-400	600	100	340
水泥	2,900	20	100	50	20
铁	1,389	300-500	400-600	15-50	115
航空燃料	250	300-500	1000	50	600
甲醇	100	410-520	600	100	375
氢	120	800	1500	1,500	1,500

来源：Gielen 等人（2021 年）。

注：能源成本效益的计算方法是能源强度乘以每单位能源的节约成本。运输成本数据来源于最近的市场调查。数字为参考数据；它们往往会根据供需情况出现波动。能源成本收益为电力 0.03 美元/千瓦时，热能 5 美元/千兆焦耳；氢能 1.5 美元/千克。t = 吨。



有许多基于获得廉价能源的产业搬迁示例。20 世纪 70 年代石油危机之后，日本逐步淘汰了铝冶炼厂并转向进口。铝冶炼厂通常位于拥有大量低成本电力的水电站附近，分布在加拿大、冰岛、莫桑比克、挪威、俄罗斯、苏里南、塔吉克斯坦和委内瑞拉玻利瓦尔共和国等地。在挪威、中东和俄罗斯，氨工厂位于低成本的天然气来源附近。再例如，在澳大利亚、智利、阿曼和沙特阿拉伯的偏远地区，风能和太阳能生产成本极低地区正在规划建设可再生合成氨工厂（Gielen 等人，2021 年）。

当然，未来的选址并非通过一张空白地图即可做出决定，它们也不仅仅依赖于廉价能源。现有的产业集群和集聚区可能会抗拒变革并表现出对原有路径的依赖性。例如，欧洲大多数低碳钢厂都位于现有的产业集群之内（McWilliams 和 Zachmann，2021 年）。此外，各国/地区希望在保留其产业基础的同时寻找使污染行业脱碳的方法。

然而，在可再生能源丰富的国家/地区建立新的生产设施并不一定意味着关闭其他地方的工厂。相反，许多现有产业仍然具备增长空间。到 2050 年，全球每年约有 2 亿吨的预期钢铁需求无法通过改造现有生产基地满足（Bataille 等人，2021 年）。拥有铁矿石和廉价可再生能源的国家/地区将面临新的机会，可建立更多的清洁生产设施²⁵。

此外，部分无法获得廉价可再生能源的国家/地区将能够保留下游产业，正如没有石油资源的国家/地区也可以拥有大型石化产业一样。但一些能源密集型产业可能会转移到低成本可再生能源盈余的国家/地区，出口商品或半成品（直接还原铁等）然后在其他国家/地区进行精加工。例如，澳大利亚目前向中国的燃煤高炉出口铁矿石，中国高炉的钢铁产量占全球一半的比例（Lovins，2021b）。鉴于澳大利亚拥有巨大的可再生能源潜力，完全可将其从出口焦炭和铁矿石转向出口基于可再生氢的直接还原铁（Gielen 等人，2020 年）。

25 氢基炼钢需要高品位铁矿石球团作为原料。当前生产的高品位矿石数量有限，主要分布在美洲、欧洲和中东，巴西、印度、俄罗斯和南非也均拥有优质储量。澳大利亚是全球最大的铁矿石生产国，然而其矿石品位较低。澳大利亚铁矿石生产商需要精炼其产品，确保其适用于氢基炼钢，这可能会进一步提高生产成本（彭博新能源财经，2021c）。

第 4 章

贸易、安全和相互依存

当氢成为国际贸易商品，氢产业将吸引越来越多的国际投资。随着这些新的贸易和投资流的出现，全球相互依存的模式将不同于 20 世纪以碳氢化合物为基础的能源关系。这种转变将改变能源贸易的格局以前没有参与过能源交易的国家/地区有机会建立以氢相关技术和氢分子为中心的双边能源关系。随着国家之间的经济联系发生变化，其政治关系也会随之改变。国际氢市场的出现极有可能重塑外交政策，并带来双边关系和联盟的转变（图 4.1）。

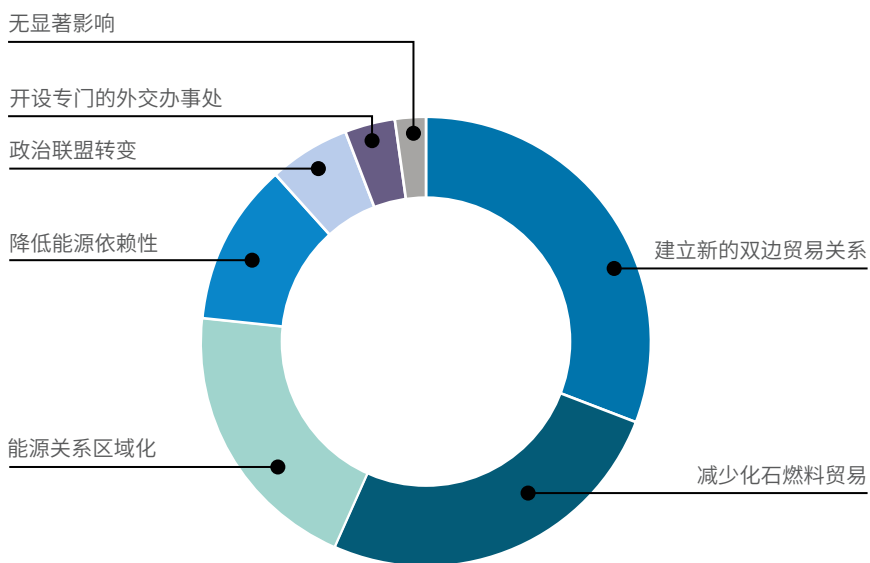


© imaginima/istockphoto.com

04



图 4.1 IRENA 成员国观点：到 2030 年氢对外交政策产生的影响



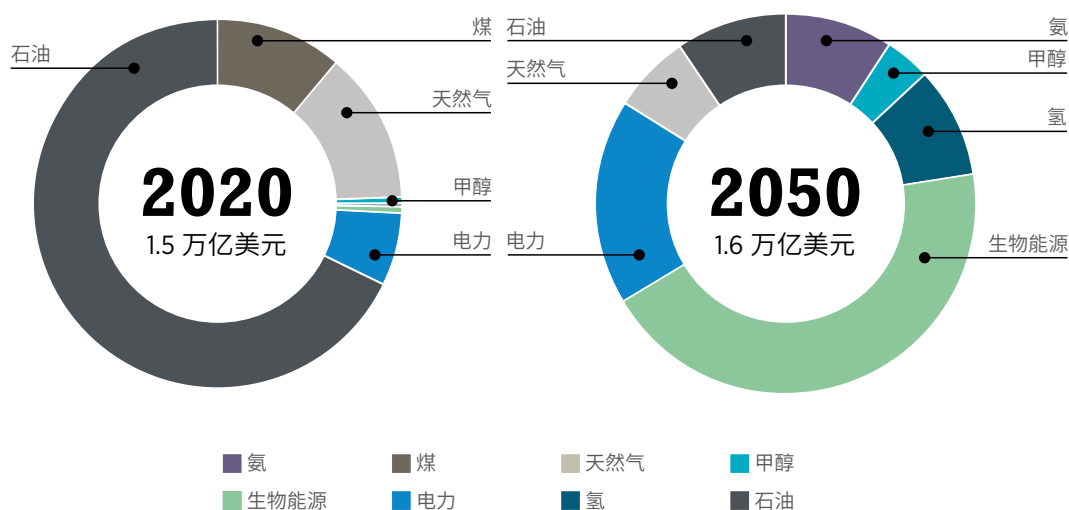
来源：IRENA 成员调查，2021 年（请参见文本框 2.2）。

受访者可以选择多个选项。图表显示了投票比例。

4.1 新的贸易地理

需要在更广泛的能源转型背景下评估清洁氢对全球能源贸易的影响。从化石燃料到可再生能源的转变将从根本上改变能源贸易的性质和地理分布。能源资源贸易将逐步转向能源技术及相关零部件和原材料贸易（IRENA，2019a）。因此，化石燃料贸易值²⁶将会下降，而电力、氢和富氢燃料的贸易价值则会上升（图 4.2）。

图 4.2 2020 年至 2050 年能源商品贸易价值的变化



26 此处价值还包括社会、政治和地缘战略影响等。



能源关系可能趋向于区域化，进而改变地缘政治版图。每个国家/地区都可以部署可再生能源，通过输电电缆将可再生电力出口到邻近国家/地区。此外，清洁氢可以推动通过管道和航运进行的远距离可再生能源运输，释放偏远地区之前尚未开发的再生资源。然而，运输成本可能会推动氢的双重市场的出现：一个是通过管道进行交易的区域市场，另一个则是氨、甲醇和其他液体燃料的全球市场。换言之，氢最终进行交易的市场相比石油和天然气市场极有可能更加多样化和区域化。

目前氢的使用集中在工业沿海地区，是全球许多炼油厂和化工厂的所在地。这些港口形成了充分规模化利用清洁氢的理想跳板。随着时间的推移，它们可能会发展成为进出口中心以及为海运部门提供燃料的储存场所。这些港口以及氢价值链上活动集中的其他区域（有时称为“氢谷”）后期可能通过氢运输建立联系。这些港口还可能成为重要节点，加氢站网络将从这些节点沿着主要的货运通道分布。

可以重新利用部分现有的天然气输送管道（通过技术改造）来输送氢。如图 4.3 所示，现有天然气输送管道的地图表明，即使大规模应用绿氢，潜在的跨境连接也仍然可能保留。显然，所有地区的天然气管道覆盖情况并不平均。东亚、欧亚大陆和北美密集的管道网络与其他大陆相对稀疏的网络形成鲜明对比，撒哈拉以南非洲则几乎完全没有此类基础设施。然而，非洲巨大的可再生能源潜力为非洲大陆向净零世界的迈进开辟了全新机遇（文本框 4.1）。

文本框 4.1

非洲航运业的基础设施机会

非洲拥有巨大的可再生能源潜力，可用于满足不断增长的海上贸易需求。2019 年，非洲海上贸易总量为 7.62 亿吨，约占全球总量的 7%（联合国贸易和发展会议 (UNCTAD)，2020 年）。在海运贸易方面，尼日利亚约占近三分之一，其次是摩洛哥和南非。展望 2050 年，更高收入、经济增长和更多人口可能导致海运增长为当前价值的 11 倍甚至更多（Khalili 等人，2019 年）。即使考虑到能源效率和船舶能耗可能降低 45%（IRENA，2021d），合成燃料的电力需求也有可能达到 500 TWh。从这个角度来看，2019 年非洲的全部电力需求约为 700 TWh（IEA，2019b）。更高消耗的电解需求将达到 100 GW 至 350 GW（具体取决于所使用的可再生电力类型），且有可能触发 2,000-4,000 亿美元的投资。

航运业新燃料加注设施与港口改造、出口设施建设同步推进。当前针对这方面的行动已经开始。2021 年 11 月，纳米比亚港务局与鹿特丹港签署谅解备忘录，旨在建立绿氢贸易路线。该港口的目标是到 2050 年进口 20 MtH₂，而纳米比亚已经计划开发一个 0.3 MtH₂ 项目，2026 年开始出口。南非欧盟商会 (European Union's Chamber of Commerce and Industry) 的伙伴增长计划 (Partners for Growth Programme) 评估了氢出口潜力，包括潜在数量、成本和市场等（Roos 和 Wright，2021 年）。根据评估结果，2021 年 10 月启动了一项可行性研究，评估 Boegoebaai 作为绿氢和氨出口中心的潜力。这将成为该地区工业活动的补充，并证明目前正在评估中的港口建设的合理性。



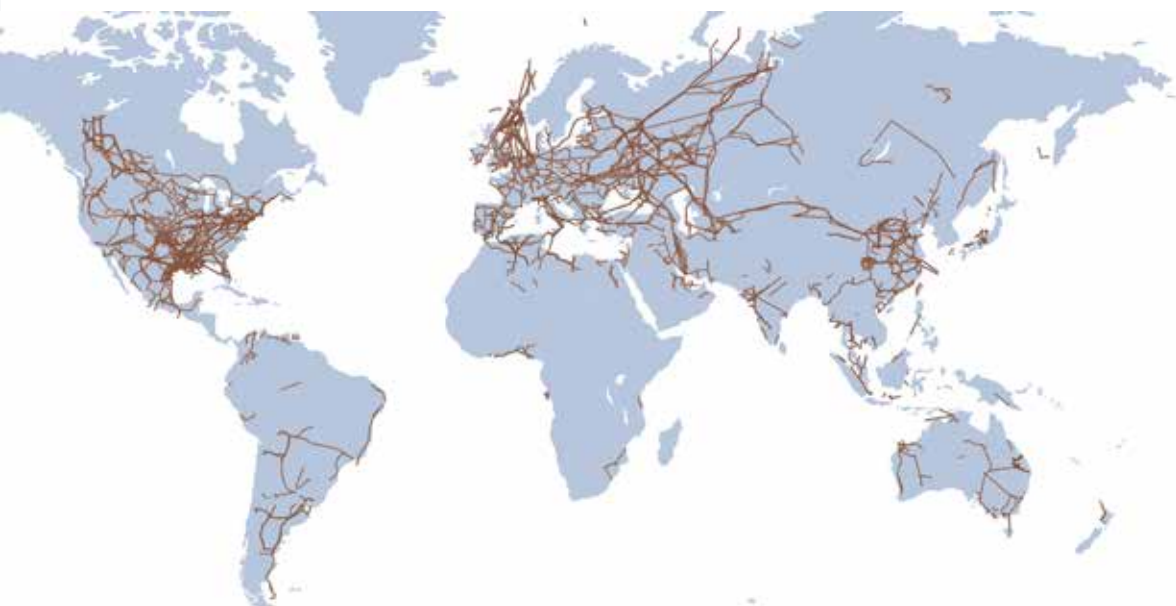
©AvigatorPhotographer/istockphoto.com



©fivepointsix/istockphoto.com

任何关于能源基础设施的决定都不应忽视的事实是，脱碳经济中的基础设施地理分布可能与今天的情况大相径庭。例如在供应侧，可能会在与当今油气田不同的地点生产可再生氢（Muttitt 等人，2021 年）。相反，最终用途的显著电气化将重塑需求规模和范围。每一个新的投资决策都将影响长期的项目实施，因此应该使用面向未来的逻辑评估固定的管道基础设施。例如，今天已建造的任何天然气管道基础设施都应该“重新利用”以输送氢和生物甲烷等清洁燃气。这种重新利用的方式会带来技术挑战和经济成本，规划投资时应充分考虑这些因素。

图 4.3 全球天然气输送管道地图



来源：绿色信息网络 (GreenInfo Network) 和全球能源监测组织 (Global Energy Monitor) (2021 年)。

地图来源：Natural Earth, 2021 年

免责声明：此地图仅用于说明用途。此地图上显示的边界并不意味着 IRENA 认可或接受。

氢贸易为新的区域性和跨区域合作提供了绝佳机会。例如，有助于推动欧洲和北非之间（van Wijk 和 Wouters, 2021 年）、澳大利亚和印太地区之间（Bowen, 2021 年）或整个非洲大陆内部的区域性氢贸易（图 4.4）。

氢还有助于塑造未来的海上贸易联系。部分公司和政府目前已经在规划国际价值链和航线。2019 年 12 月，全球出现了首次跨洋运输氢，一艘满载在文莱生产并转化为甲基环己烷的油轮启航前往日本川崎市港口。同月，川崎重工推出了“Suiso Frontier”，这是第一艘从澳大利亚到日本试运液态氢的专用船。2020 年 9 月，第一批由氢转化的“蓝氨”货物从沙特阿拉伯运往日本，并用于发电²⁷。这些试验和示范项目预示着能源贸易新时代的到来。

4.2 制定游戏规则

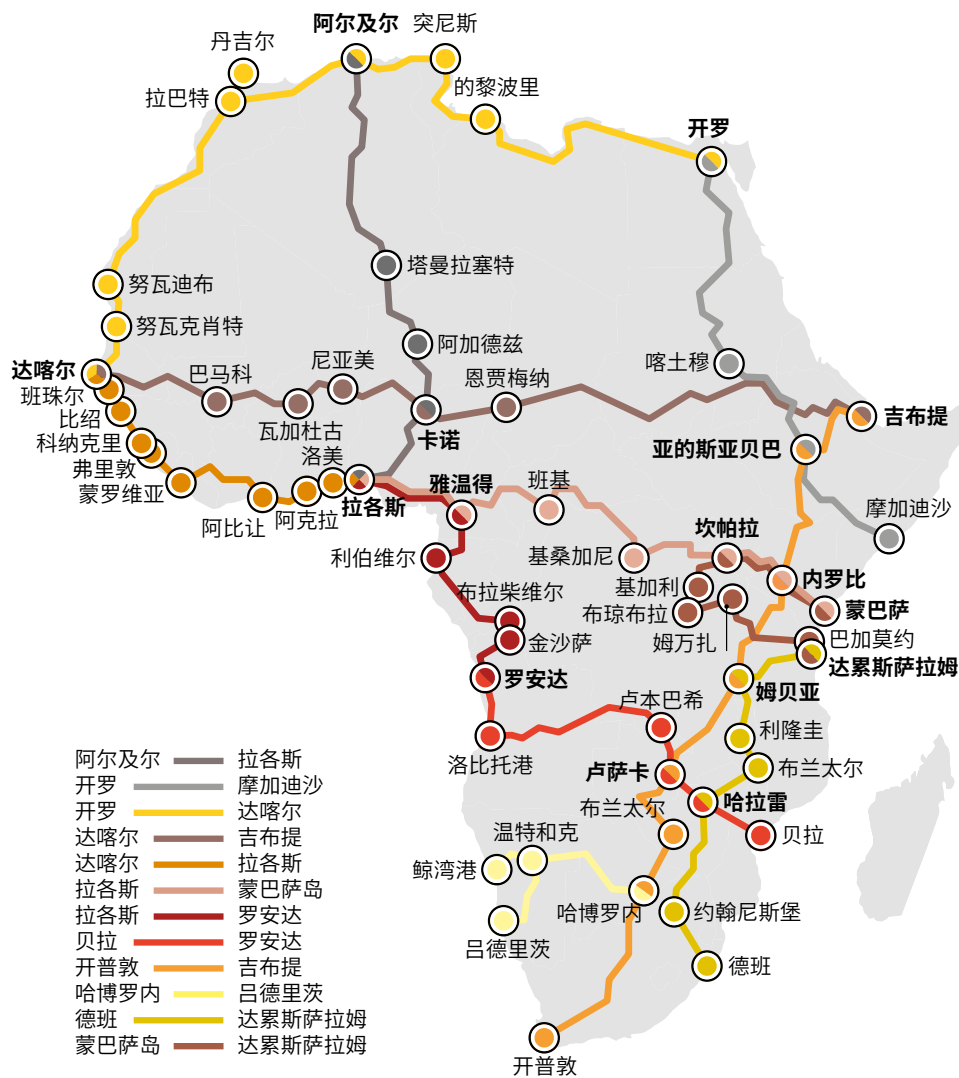
氢不仅会改变能源基础设施和贸易流；它还需要新的规则、标准和治理方式（Grinschgl、Pepe 和 Westphal, 2021 年）。这些规则的制定可能成为地缘政治竞争或国际合作的舞台。尽管定义通用规则看起来只是一项固有的技术活动，但它有助于确定主导未来市场的技术并为掌握这些技术的参与者带来回报。标准旨在提高各种商品和服务的质量、安全性和互操作性。然而，不一致的标准可能会分裂市场、激起监管竞争并导致设置贸易壁垒（IRENA 2020b；IRENA, 2021b）。

氢要为气候议程做出贡献，就必须了解其碳足迹和可持续性影响。需要通过认证带来足够的可靠性、透明度和独立审计标准。这可以通过证书或“来源保障”认证制度来实现。虽然不同地区已经制定多种方案²⁸，但全球性标准尚未建立。此外，现有方案在如何定义可持续性以及沿供应链划定排放核算边界方面存在较大差异（Abad 和 Dodds, 2020 年）。国际合作对于确保术语和数据的一致性至关重要，以确保认证制度转换的透明度和一致性。

27 由于捕获的 CO₂ 用于生产甲醇和提高石油采收率，因此这种氢气货物的碳足迹意义重大。

28 其中包括欧盟的 CertifHy、澳大利亚的试点项目以及国际氢能经济和燃料电池伙伴计划（International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy）以及其他组织国际层面的方法学进展等（IRENA, 2020b）。

图 4.4 现在和未来可能沿非洲横贯公路覆盖非洲大陆的氢路线



来源：非洲氢能合作伙伴关系 (African Hydrogen Partnership) (2019 年)。

地图来源：Natural Earth, 2021 年

免责声明：此地图仅用于说明用途。此地图上显示的边界和名称并不意味着 IRENA 认可或接受。

在这些讨论中，地缘政治动机显得尤为突出。各国/地区都需要制定标准以保持其竞争优势。例如，仅涵盖生产过程产生排放的氢认证方案可能没有考虑到运输过程中产生的排放，并且更有可能受到远离消费者市场的生产商青睐（White 等人，2021 年）。同样，对于拥有大量天然气储量和完整运输系统的国家/地区而言，则可能对有利于蓝氢生产途径或仅关注碳而非甲烷排放的温室气体排放阈值更为宽松。即使包括甲烷排放，各国/地区也可能针对测量方法或数值施加影响。例如，天然气生产商可在生产过程中自行报告甲烷排放量，这有可能导致漏报（Piria 等人，2021 年）。

国际交易的氢的货币单位和定价机制则是另外一些重要因素。国际氢贸易中的价格发现特质（例如枢纽、基准、定价机制）和合同类型（长期、照付不议或不同的模式）围绕着许多未知因素²⁹。全球指数使用的货币相关性在于，其使用可以提高一方在氢燃料以外交易谈判中的影响力。随着市场不断扩大，所选货币将定位为全球基准。指定一种货币有助于减少特定货币对之外的进口成本风险。例如，可能成为主要进口市场之一的欧盟希望以欧元计价未来的氢进口业务（欧洲委员会，2020a）。欧盟委员会坚信，此举将使欧盟不易受到“第三国/地区在域外实施单边制裁”的影响（欧盟委员会，2021 年）。

为碳定价可能有利甚至是必要的，从而使绿氢与灰氢甚至最终与化石燃料竞争。从这个意义上说，氢可能会卷入更广泛的碳贸易战。例如，针对上游甲烷泄漏的严格监管可能会成为蓝氢生产商与寻求清洁氢的进口地区之间产生摩擦的根源。欧盟提出的碳边界调整机制可能会引起国际摩擦，因为它们可能会损害非欧盟国家受到贸易影响的碳密集型产业³⁰。

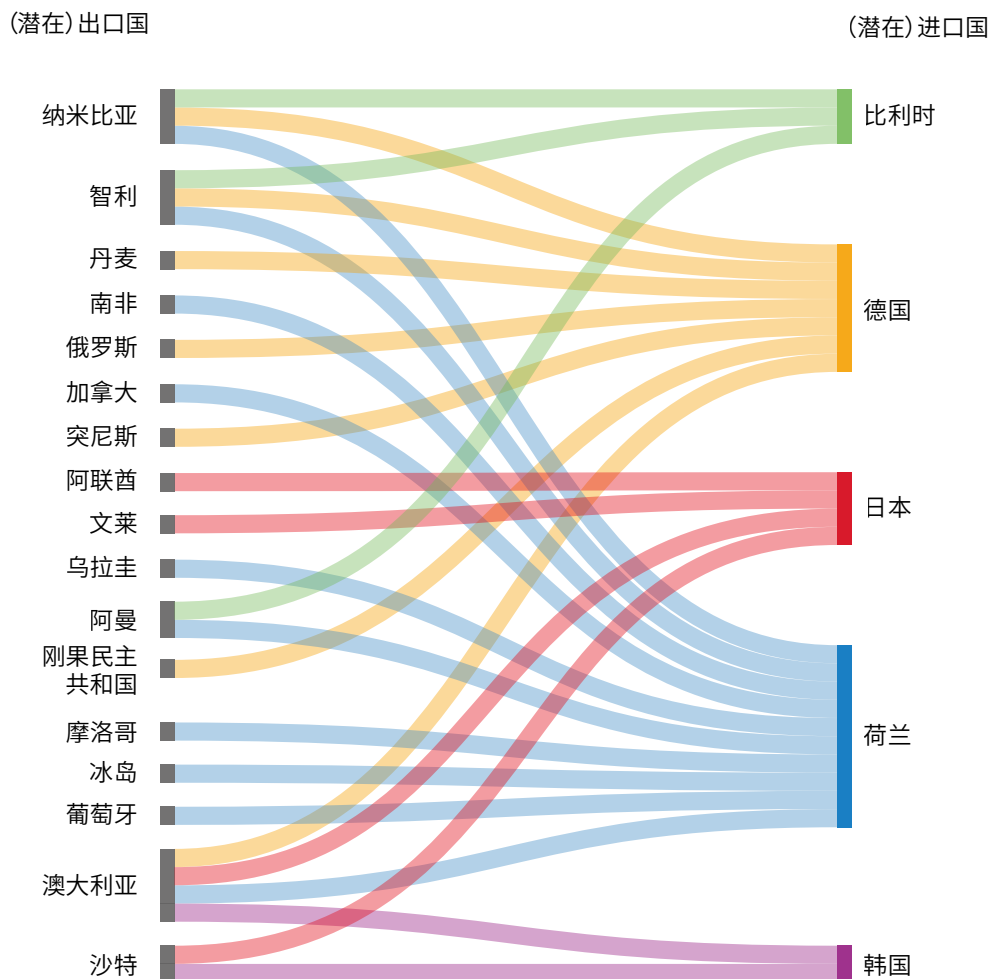
4.3 氢外交

与早期的液化天然气 (LNG) 行业一样，许多政府正在制定双边交易和协议以建设和运营基础设施，进而促进跨境氢贸易的发展。这些交易范围涉及可行性研究到意向书、谅解备忘录、能源合作伙伴关系，甚至试运等。包括加拿大、智利、德国、意大利、日本和西班牙在内的几个国家已在其国家战略中明确提及了潜在的双边氢贸易关系。随着时间的推移，这些新兴交易和愿景可能开辟出新的能源贸易关系、航道以及贸易路线（图 4.5）。

29 普氏能源资讯 (S&P Global Platts) 已经在六个不同国家/地区制定了电解氢和气基氢（不使用 CCS）的价格基准。目前为止，基准均以欧元和美元计价（普氏能源资讯，未注明日期）。市场形成的第一步通常是双边协议或区域市场，之后才会出现更具流动性、更广泛的市场（den Ouden，2020 年）。同样，欧洲能源交易所 (EEX) 电力和天然气交易所也计划在 2022 年推出价格指数；它将反映受进出口协议管辖的场外交易市场和双边贸易（路透社 (Reuters)，2021 年）。该指数将以欧元计价。

30 欧盟的初步提案涵盖氢和电力进口，但不包括氢 <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/TXT/?uri=CELEX%3A52021PC0564>。

图 4.5 截至 2021 年 11 月公布的特定国家/地区的双边贸易协定和谅解备忘录



注：该图仅基于公开公告涵盖与氢贸易相关的协议，并非完整数据。不包括私人协议和专门针对技术合作的协议。
MOU = 谅解备忘录。

其中部分新兴双边氢交易涉及已建立能源贸易关系的国家/地区。例如，日本已经从沙特阿拉伯进口原油，两国目前都在考虑扩大蓝氨相关的贸易关系。然而，其他双边交易并不符合现有的能源贸易流。例如，德国与摩洛哥、纳米比亚与荷兰、新西兰与大韩民国之间的双边交易和对话便是如此。能否实现所有氢贸易路线尚有待观察，但当前已具备形成全新能源地缘政治地图的潜力。

一些希望进口氢和相关零碳燃料的国家目前已经在开展氢外交（文本框 4.2）。德国和日本是建立全新氢贸易关系的开拓者，其他国家/地区也正在效仿。氢外交可能会成为一些国家/地区经济外交的固定内容。

4.4 政治关系的转变

国家之间的贸易和投资关系与更广泛的政治考虑事项相互交织。经济关系的变化会对政治关系产生影响（反之亦然），氢以及其他清洁燃料市场的出现可能会导致国家/地区之间政治关系和联盟的转变。

石油和天然气市场的贸易关系主要受到地理因素影响：碳氢化合物储量仅集中在少数几个国家/地区。与此同时，全球 80% 的人口生活在化石燃料净进口国（IRENA, 2019a）。相比之下，每个国家/地区都拥有可再生能源资源，尽管世界各地风的强度和太阳辐射度质量的确有所不同，而其他可再生能源如水电或地热能在某些地区则更为普遍。可再生能源无处不在，各国都可能在未来的清洁燃料市场上选择适合自己的贸易伙伴（Grimm 和 Westphal, 2021 年）。然而，各国/地区将可再生能源潜力转化为能源生产的能力取决于其产业能力以及支撑可再生能源领域创新的知识产权。这些能力相对集中在少数几个国家/地区。这预示着，大多数国家/地区依赖从这些国家/地区进口光伏电池板、风力涡轮机和其他设备。因此，可再生能源的贸易关系在很大程度上受到国家产业政策的影响。此外，公司战略将选择某些国家/地区作为区域或全球的供应中心。



©ake1150sb/istockphoto.com



©nd3000/istockphoto.com

文本框 4.2

氢外交的兴起

一些国家/地区已经在寻求外交途径推进其氢能战略。

德国已与澳大利亚、智利、摩洛哥、纳米比亚、突尼斯和乌克兰等广泛的潜在供应国/地区达成双边氢协议。德国联邦外交部正在设立专门的氢外交办公室，与其在罗安达（安哥拉）、阿布贾（尼日利亚）、莫斯科（俄罗斯）、利雅得（沙特阿拉伯）和基辅（乌克兰）的大使馆建立联系。凭借这些新的办事处，德国打算支持就全球氢市场的地缘政治影响进行国际对话。德国还向 H2Global 基金会 (H2Global Foundation) 拨款近 10 亿欧元，该基金会由德国工业的 16 家主要参与者成立，旨在鼓励绿氢及其衍生物的市场快速增长。H2Global 基金会的任务是在国外购买绿氢或氢衍生物，并在年度拍卖中进行转售。这笔资金将用于弥补氢衍生产品的购买价格与国内销售价格之间的差额。³¹

日本外交官和工业相关企业正在与澳大利亚、文莱、挪威、沙特阿拉伯和其他国家/地区就建立氢贸易价值链进行接触。日本的国际氢能战略旨在确保绿色燃料的新进口流量，进而在发电领域与 LNG 竞争，在运输领域与汽油竞争。还有一个补充目标是向海外销售日本的低碳技术和专有技术 (Nagashima, 2018 年)。

其他国家/地区也正在效仿。**荷兰**是首个任命专门氢能特使的国家 (2019-2021 年)。荷兰政府将智利、纳米比亚、葡萄牙和乌拉圭等作为潜在供应商。**韩国**与沙特阿拉伯和新西兰签订了协议。**比利时的**工业企业正在寻求将智利、纳米比亚和阿曼作为大规模的氢进口国，而**新加坡**则正在研究拉丁美洲氢供应路线的可行性。这些新兴的双边交易也属于全球最佳制氢地点竞赛的一部分 (Radowitz, 2021 年)。

氢外交包括两种方式，寻找出口商以及寻找潜在客户。例如，**智利**的国家氢能战略提到将开展“绿氢外交”，以在国际上将自己定位为清洁燃料和能源载体来源。智利认为，该国将利用其在国际平台中的参与度及其“与 171 个国家的外交关系”来释放其氢出口潜力并吸引外国投资 (智利能源部 (Chilean Ministry of Energy), 2020a)。智利于 2020 年举办了绿氢峰会 (智利能源部, 2020b)，另一潜在出口国**阿曼** 2021 年也随之效仿³²。

31 基于拍卖机制通过氢中介公司来匹配供需，该中介公司与供应方签订长期购买合同，与需求方签订短期销售合同。联邦政府将拨付资金弥补成本缺口。借助 H2Global 的支持，运营商和投资者可获得发展大容量电解能力所需的规划和投资保障，这是因为他们能够以反映成本的价格与有偿付能力的合同合作伙伴签订长期购买协议，并以此为基础建立商业和融资模式。(德国联邦经济和能源部 (BMWi), 2021 年)

32 www.greenhydrogensummitoman.com/index.php

氢贸易流也可能引发新的战略思考。随着一些国家和地区开始大量进口氢，出口国的战略重要性将逐步增加。新的氢生产中心和航运路线也将作为国家安全和国防组织制定战略规划的重要信息。

还将出现新的机遇，帮助塑造新生的氢市场以推动可持续发展。例如，德国已经与几个非洲国家/地区合作探索和发展氢经济，利用非洲大陆的资源潜力推动可持续经济发展（H2Atlas，2021年）。

在全球许多具备生产廉价、清洁氢的良好条件的国家/地区中，潜在的进口商可以从中选择已经与之建立密切联系的国家/地区。这些国家也可以选择利用清洁氢的需求建立新的联盟。地理因素仍将发挥重要作用，因为并非每个国家/地区都能生产用于出口的低成本氢，而且长途运输成本可能仍然高昂。一些国家/地区只是缺乏资源禀赋（可再生能源潜力、空间、土地、水资源等），而另一些国家/地区则与主要需求中心的地理距离较远。

在此背景下，支持具有丰富潜力的发展中国家发展氢能产业有助于实现多重目标。由于并非所有国家/地区都具备相等能力以规模化和竞争性方式开发其可再生能源潜力，或者获得仍然集中在少数地方的技术，因此建立氢贸易关系将有效推动围绕获得技术、知识和资本的合作。这将为诸多方面开辟新的合作可能性，如建立当地价值链、刺激产业以及在可再生能源丰富的国家/地区创造就业机会等。因此，清洁氢也可以成为推动公平的途径。

针对清洁氢日益增长的兴趣正在促进国际伙伴关系和网络的建立。新的联盟当前已经以多方利益相关者伙伴关系和产业联盟的形式在全球各地涌现（Ghosh 和 Chhabra，2021年）。长远来看，随着能源贸易流发生变化，安全伙伴关系也会随之改变。美国页岩气的繁荣推动其与中东石油部分脱钩，这可能会预示发展清洁氢将带来的某些变化。例如，即使仍然与来自波斯湾和更广泛中东地区的清洁氢、氨和其他燃料的运输相关，霍尔木兹海峡等关键石油运输路线对全球能源安全的重要性仍有可能降低。





© Imaginima / iStockphoto.com



© 1001Love / iStockphoto.com

4.5 加强能源安全

人们通常将氢视为解决能源安全问题的潜在补救措施。20 世纪 70 年代的油价冲击和 2000 年代初的石油价格峰值推动了人们最早对氢产生兴趣，这也是形势使然。清洁氢可以通过三个主要方式加强能源安全：1) 减少进口依赖，2) 缓解价格波动，以及 3) 提高能源系统的灵活性和适应性。上述大多数益处都与绿氢相关，而非蓝氢。其中诸多益处只有在市场成熟时才会显现。

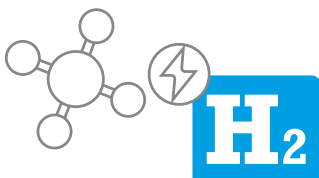
能源安全不仅限于可用性和可负担性，还包括可持续性和公平性。例如，从大部分人口难以获得电力或电网仍然严重依赖化石燃料的国家/地区进口可再生氢这一计划可能有助于提高进口商的能源安全，但难以称其为“绿色”或“可持续”的方式。第 5 章将深入探讨氢对可持续性发展的贡献。

能源安全也需要结合气候变化的实际影响进行考虑。这并非小事，因为能源基础设施越来越容易受到气候变化的影响。例如，据估计，全球一半的 LNG 工厂面临破坏性气旋的“极高风险”，同时约 35% 的炼油厂位于高风险地区。全球许多液化天然气工厂和炼油厂都位于沿海地区，长时间面临被猛烈风暴潮和沿海洪水摧毁的风险（国际能源署，2021f）。虽然氢能够提高燃料多元性和系统的抗风险能力，但氢设施，特别是低洼沿海地区的氢生产设施，仍有可能容易受到如风暴、洪水和干旱气候变化的影响。

减少进口依赖

以国内资源替代进口资源，氢有助于减少对能源进口的依赖。若能够利用当地的风能、太阳能、水力、生物质能或地热能生产氢，能源安全则将进一步提高，乃至取代进口燃料。这有助于将国内能源消耗与世界市场的变幻莫测脱钩，同时降低国家能源进口费用（Steinberger-Wilckens 等人，2017 年）。IRENA 的 1.5°C 情景设想，到 2050 年，生产的三分之二的绿氢将在当地使用，而非跨境交易（IRENA，即将发布-a）。

如果以天然气为原料生产氢，天然气进口规模则有可能进一步增长。决定通过天然气生产氢的非产气国最终可能会通过管道或 LNG 终端进口与以前数量相等的天然气³³。当然，天然气出口商可以转而直接出口蓝氢。从进口国的角度来看，以上路线都未给能源安全方程式带来重大转化。若继续依赖容易受到地缘政治和市场波动影响的商品，现有的进口依赖将会持续甚至进一步加强。



³³ 使用进口天然气生产氢也可能导致出现 CO₂ 逆向贸易流，可能需要将其运回枯竭的天然气或石油田储存，这为价值链增加了更多的复杂性。例如，沙特阿拉伯和韩国之间的 LPG-for-CO₂ 项目，或涉及挪威能源公司 Equinor、德国最大的天然气管道运营商 OGE 和德国钢铁生产商蒂森克虏伯的“H2morrow”项目（Ratcliffe、Kim 和 Park，2021 年；欧洲开放电网公司（Open Grid Europe），2021 年）。

平抑价格波动

可再生氢有助于保护大型工业承购商免受化石燃料价格波动的影响。众所周知，化石燃料市场具有周期性，价格会随着时间的推移出现大幅波动。2021年秋季和冬季的情况充分说明了这一点，当时全球各个市场的天然气以及一小部分电力价格升至创纪录高位，导致化肥制造等能源密集型行业暂时缩减生产（Paulsson 和 Durisin，2021年）。

相比之下，基于可再生能源的电力越发倾向于通过长期电力购买协议 (PPA) 购买，拍卖形式使价格具有竞争力。根据投标人策略，他们可能决定通过延迟与零部件和设备供应商签署采购协议来承担商品市场波动的风险，或通过是在拍卖时签署协议将这种风险转嫁给供应商。到目前为止，学习曲线、技术和工艺改进以及规模经济导致的成本下降比商品价格的波动更为显著。因此，投标人通常会在预期成本更低和利润率更高的情况下进行投标，这意味着他们也承担了相应风险³⁴。这使得 PPA 成为在减少燃料价格波动风险方面颇具吸引力的选择，这种风险不仅源于商品波动，还包括冲突、事故或其他原因。因此，扩大使用绿氢相关的燃料组合可推动化肥、航空和海运等行业的价格更加稳定。

尽管如此，化石燃料价格的波动部分由该行业的投资周期引起，这有时会导致供需不平衡。由于其固定资产和高资本密集度，绿氢或氨气生产也是如此。在绿氢供应不足的情况下，产能的提高可能会有所滞后。



34 拍卖设计非常灵活，可根据具体的国家/地区情况和目标，将风险分配给不同的市场参与者。

提高灵活性和弹性

氢还可能为未来几十年内实现深度电气化的能源系统带来灵活性和弹性。需要认真规划提出部署氢能的最佳方式。例如，电解槽可以部署在可再生能源比例高的地区，以及多余电力无法通过输电线路传输或储存在电池中的地区（例如智利北部或北海的海上风电生产）（IRENA, 2021b）。虽然国内电解目标可能有助于推进能源安全和产业政策目标，但政府不希望阻碍减缓气候变化的目标或转移对其他优先事项的关注，例如能源普及。

氢真正的竞争优势在于其长时间大容量储能独特能力。随着清洁氢逐步在某些最终用途中取代化石燃料，氢储存对能源安全而言可能会越发重要，与当今许多地区的天然气储存类似。然而，天然气储存和氢储存之间存在差异。天然气的储存主要是为了满足季节性需求变化。相比之下，氢需求可能更加稳定，至少在氢市场规模不断扩大的最初几年，大部分需求可能来自工业客户（主要是钢铁、氨和高价值化学品）³⁵。

由于绿氢由波动性可再生能源生产，氢储存将主要用于满足供应而非需求变化。这可能也是将氢储存设施选址在靠近生产地点而非需求地点的原因。将生产和储存都设在出口国可能会导致进口国缺乏缓冲能力，进而无法解决潜在供应中断的能源安全问题。当然，储存地点的确切位置也将取决于是否有合适的地下结构。

目前长期储存氢最具前景的选择是盐穴³⁶。可将当前用于储存天然气的盐穴转化为储存纯氢。然而，由于氢的能量密度低于天然气，改造后的天然气储存场地只能容纳原始能量体积 24% 左右的氢（GIE 和 Guidehouse, 2021 年）。也就是说，维持当前的能量储存容量需要四倍于当前场所的面积区域。全球范围内，仅有六个盐穴储存氢：三个位于英国的提赛德，还有三个位于美国的德克萨斯州。要增加氢的地质储存就必须认真规划，因为部分储存地点可能会在过渡时期甚至长期用于储存甲烷、生物甲烷甚至 CO₂。

氢还有助于提高偏远社区的抗风险能力，如深山中的村庄和远离大陆的岛屿。这些社区面临着独特的能源安全挑战。他们通常高度依赖外部化石燃料，并且其电网规模很小，而且经常依靠柴油发电机作为备用电源。然而，某些偏远和岛屿社区有着一些世界上最好的可再生能源资源（IRENA, 2016a）。在这里，氢通常也和电池结合使用，进一步增强其抗风险能力。例如在奥克尼群岛的苏格兰小群岛上，风能和潮汐能通过两个水电解装置转化为氢。然后通过氢为当地学校、港口建筑、多艘渡轮和燃料电池车辆提供热量和电力（FCH JU, 未注明日期）。

35 将氢应用于供暖和发电高峰可能会相应增加氢需求的季节性和波动性，进而会加大储存需求。

36 氢还可以储存在其他类型的地下结构层（例如含水层、岩洞、枯竭的石油和天然气田）以及地上储罐、管道或容器之中（Caglayan 等人，2020 年）。

4.6 贸易风险和脆弱性

将氢作为能源载体引入可能会增加能源安全风险，涉及国际交易的氢及其衍生物尤其如此。预计到 2050 年，氢在脱碳能源系统中的作用仍将小于当前的化石燃料。因此，贸易风险将仅限于少数行业。本部分将讨论全球氢供应链中可能存在的三个脆弱性因素：1) 国家/地区投资风险，2) 技术故障和政治动荡，以及 3) 获得氢相关技术的关键原材料。

投资风险

氢贸易基础设施建设会给供应链双方都带来风险。鉴于氢贸易价值链的高资本密集度，降低相应投资风险可能需要大型财团、高水平的国家参与和国际协调。如文本框 4.3 所示，LNG 市场的发展历史可能在这方面具有指导意义。

从出口商的角度来看，收入安全至关重要。没有可靠的收入来源，就不可能收回建设氢项目所产生的前期资本支出。收入必须足以支付电解槽（绿氢）、天然气重整器（蓝氢）、太阳能和风能公园（绿氢）、天然气储存设施（蓝氢）以及运输和储存基础设施的成本。

澳大利亚、中东、北非和南部非洲以及南美洲的氢出口项目计划如雨后春笋般不断涌现。这些项目背后的计划携手设想为全球市场生产数百万吨清洁氢和氢衍生物。这些计划的未来充满了不确定因素，因为全球对清洁氢的需求刚刚出现，销售竞争将异常激烈。渴望成为氢出口国的国家/地区名单数量远远多于计划进口的国家/地区。

从准备依赖进口的买家角度来看，供应安全至关重要。他们需要确信，氢出口国将拥有足够的可再生能源发电装机容量可用于电解制氢。一些目标远大的氢出口国正面临国内不断增长的电力需求。以中东和北非为例，人们通常将其视为氢及其衍生物的潜在供应商。到 2050 年，该地区的人口预计将翻一番（UN，2019 年）；电力需求预计将因此出现激增。这便对可再生能源提出了较高要求，预计可再生能源在满足激增电力需求的同时，还将取代现有的化石燃料发电机组，并为电解槽提供电力，为出口市场生产氢。



投资的不确定性也危及着能源安全。虽然目前已经宣布了许多千兆瓦级的氢出口项目，但由于包括许可程序在内的几个因素影响，这些项目可能会有所延误。例如，2021年6月，澳大利亚政府以环境为由拒绝了建设全球最大的绿色能源出口项目计划，即所谓的亚洲可再生能源中心 (Asian Renewable Energy Hub) 计划 (Smyth, 2021年)。

更高的投资风险转化为更高的整体项目融资成本，但这些并不一定会阻碍投资。上游石油和天然气行业表明，一旦收益明确，投资就会跟进，即使高风险国家/地区也是如此。例如2021年5月，一家澳大利亚可再生能源系统开发商与毛里塔尼亚政府签署了400亿美元的谅解备忘录，旨在建成全球最大的绿氢项目 (图4.6)。尽管毛里塔尼亚在脆弱国家指数排行上被评级为“高度警告”，但仍签署了该协议。(和平基金会 (Fund for Peace), 2021年)

文本框 4.3

缓解氢贸易的量价风险： LNG 市场发展的经验教训

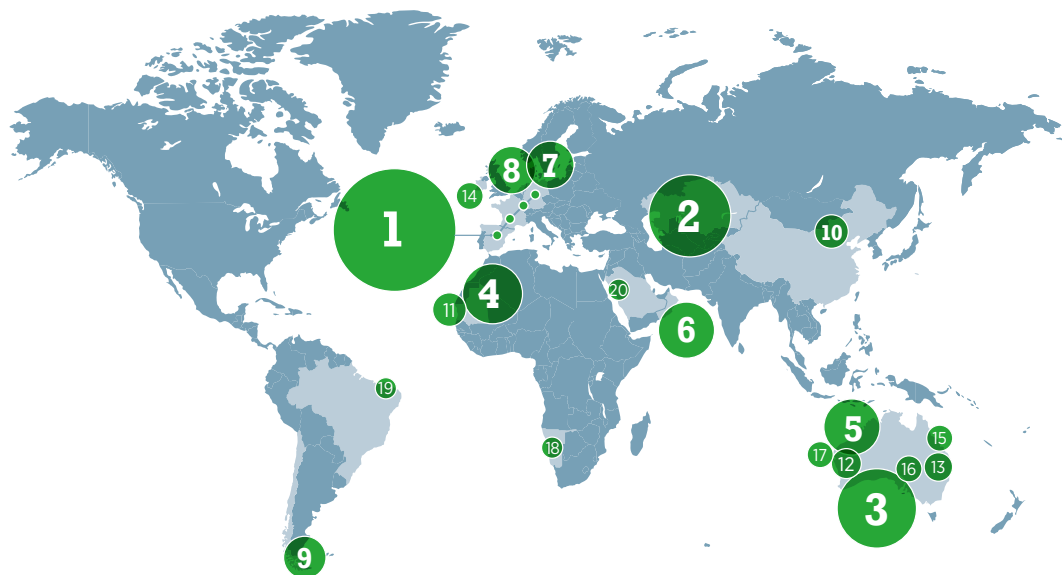
在发展初期，液化天然气 (LNG) 行业面临的困境与氢出口商相同，即如何降低出口商的价格风险和买家的购量风险。这些市场基于双边长期合同 (20年或更长时间) 的有担保承购方获得早期供应，该合同具有三个关键特征 (能源宪章秘书处 (Energy Charter Secretariat), 2007年)。

首先，它们包括“照付不议”条款，无论是否的确需要，购买者都将按最低水平进行保底支付。其次，合同采用“重置价值”定价体系，LNG 的价格不以生产成本、运输成本、利润率等为基础，而是与竞争燃料的价格挂钩 (一般石油)。第三，合同包括“目的地条款”，阻止买方将购买的 LNG 转售给第三方。

由于这些条件的存在，LNG 的早期贸易路线通常称为“浮动管道”，因为它们包括在指定 LNG 出口和进口终端之间来回穿梭的专用油轮。这种方式旨在分担风险。它消除了 LNG 买方对供应安全的担忧，同时为 LNG 卖方带来了可接受的投资回报。近年来，LNG 贸易变得更加灵活，短期合同和现货交易应用有所增长。

日本在建立可交易的 LNG 市场方面发挥了先锋作用。自1969年首次从阿拉斯加进口 LNG 以来，日本一直是这一燃料的最大买家 (2021年上半年由中国取代)，并塑造了 LNG 的市场结构。称为日本原油混合物的价格指数现在已成为亚洲 LNG 市场的标准配置，而亚洲也是迄今为止最大的区域 LNG 市场 (Koyama, 2021年)。

图 4.6 全球已宣布的最大的 20 个千兆瓦级绿氢项目



- | | | |
|----|---------------------------------------|-------|
| 1 | HyDeal Ambition 项目 (67GW) | 西欧 |
| 2 | 未命名 (30GW) | 哈萨克斯坦 |
| 3 | 西部绿色能源中心项目 (28GW) | 澳大利亚 |
| 4 | AMAN 项目 (16GW) ^a | 毛利塔尼亚 |
| 5 | 亚洲可再生能源中心项目 (14GW) | 澳大利亚 |
| 6 | 阿曼绿色能源中心项目 (14GW) ^a | 阿曼 |
| 7 | AquaVentus 项目 (10GW) | 德国 |
| 8 | NorthH2 项目 (10GW) | 荷兰 |
| 9 | H2 Magallanes 项目 (8GW) | 智利 |
| 10 | 北京京能项目 (5GW) | 中国 |
| 11 | Project Nour 项目 (5GW) ^a | 毛利塔尼亚 |
| 12 | HyEnergy 零碳氢项目 (4GW) ^a | 澳大利亚 |
| 13 | 太平洋太阳能制氢项目 (3.6GW) | 澳大利亚 |
| 14 | Green Marlin 项目 (3.2GW) | 爱尔兰 |
| 15 | H2-Hub Gladstone 项目 (3GW) | 澳大利亚 |
| 16 | Moolawatana 可再生氢项目 (3GW) ^a | 澳大利亚 |
| 17 | Murchison 可再生氢项目 (3GW) | 澳大利亚 |
| 18 | 未命名 (3GW) | 纳米比亚 |
| 19 | Base One 项目 (2GW) ^a | 巴西 |
| 20 | Helios 绿色燃料项目 (2GW) | 沙特 |

注：大小是指电解槽容量。基于已公布计划的信息。

a. 基于与类似规模方案比较来预估的电解槽容量。

免责声明：此地图仅用于说明用途。此地图上显示的边界并不意味着 IRENA 认可或接受。地图来源：Natural Earth, 2021 年

外国投资者愿意承担的风险程度有限。处于动荡中的国家/地区可能在氢和氢衍生物方面拥有最佳潜力（Ram 等人，2020 年），但由于在其脆弱的政治环境和安全条件下开展业务存在巨大风险，因而在不久的将来挖掘这一潜力的可能性尚小。

技术故障和政治混乱

能源供应可能因各种类型的故障而中断：技术故障（设备或基础设施故障）、人为故障（错误、事故或恶意行为）或自然故障（飓风、地震或洪水）等。氢基础设施故障所导致的中断后果可能更为严重，因为氢具备独特特性，需要特殊处理以确保安全³⁷。然而，氢相关的安全风险是众所周知的，可以通过实施国家和国际标准、协议以及措施来减轻这些风险。

当国家试图利用能源贸易和相互依存的关系作为地缘战略目的的强制性工具时，就会出现另一种形式的破坏。历史上曾有多相关例子，一些国家通过操纵能源流（出口抵制或进口禁令）、能源价格（盟友享受折扣）或能源基础设施（建设新的石油和天然气管道）以实现外交政策目标（Van de Graaf 和 Sovacool，2020 年）。大多数此类“能源治国之道”示例都与原油和天然气有关。

不能排除未来各国/地区成功利用氢出口或进口进行政治敲诈或勒索的可能性。能源治国之道的先决条件是存在不对称独立性，在这种情况下，其中一方会比另一方更容易破坏二者的关系。因为它可以迅速求助于其他贸易伙伴，或者拥有大量缓冲能源（例如紧急储备）（Keohane 和 Nye，2001 年）。在国际氢贸易初期，贸易伙伴的数量会很少。供应商和客户都可能会签订固定的双边长期合同。由于可能缺乏流动性市场，对进口或出口的任何干扰都会让另一方不适。

然而，类似于历史上的化石燃料联盟，如七姐妹等氢能卡特化（垄断联盟）出现的可能性较小。有效卡特化的先决条件是少数生产商控制相当大的市场份额；他们必须能够设定和执行生产配额、控制产能扩张同时限制新生产者的入局。此外，还必须限制相关产品的短期替代品。这些条件的缺失阻碍了天然气市场的卡特化（Jaffe 和 Soligo，2006 年）。而氢因素情景下任何条件都无法满足。

世界上许多地方都具备生产氢的条件。事实上，它是一种制成品，而非原材料或能源。这使得无法阻止新的参与者进入该行业，而该因素是形成卡特化的关键条件。此外，许多国家/地区已经表达了成为氢及其衍生燃料出口国的宏大目标，进而限制了出口集中的机会。

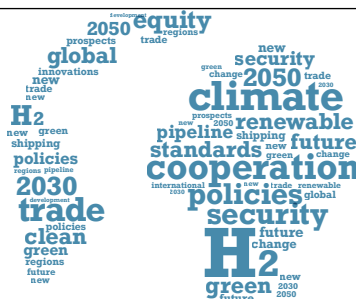
37 氢的易燃浓度范围较广，部分氢衍生物可能会对健康造成危害。

获取关键原材料

制氢技术以及其他几种可再生能源技术都需要原材料，因此讨论范围也将扩展到“材料安全”。用于燃料电池和储氢技术的原材料大约包括 30 种（欧洲委员会，2020b）。虽然目前大多数矿物和金属的地质供应充足，但随着需求迅速增长以及采矿和精炼项目的前置时间较长，市场势必趋紧。同时，可能还会出现其他技术，以在关键材料的可用数量上与氢竞争。即使有些国家能够自己生产氢并由此提高能源独立性，他们也仍有可能需要依赖少数别的国家提供必要的原材料。技术创新、能源效率、回收和循环经济概念对于缓解矿产和金属瓶颈而言至关重要。

氢的快速增长将会支撑起对用于电解槽的镍和钴以及用于燃料电池的铂族金属的需求不断加大。（IEA，2021g）。氢将推动部署更多太阳能和风能等可再生能源技术，还将与新的输电线路和安装电池齐头并进，进而增加对这些技术中使用的矿物的需求。

不同类型的电解槽和燃料电池对材料的要求各有不同。当今主导市场的碱性电解槽依赖于通常并未受到重视的材料，例如钢和镍（HyTechCycling，2020 年）。相比之下，聚合物-电解质膜电解槽和固体氧化物电解槽似乎会引发更为严重的关键材料依赖性问题。用于聚合物电解质膜电解槽的铂和铱是全球最稀缺以及排放最密集的一种金属。其供应也高度集中，南非供应全球超过 70% 的铂和超过 85% 的铱（图 4.7）（Minke 等人，2021 年）。目前尚未发现或预见铱的替代品（Kiemel 等人，2021 年）。



© metamorworks / stockphoto.com

当今铂族金属的主要用途之一是用于汽车行业。内燃机催化剂使用铂、钯和铑这三种金属来减少二氧化硫和一氧化二氮的排放。电池驱动的电动汽车兴起减少了这一需求。铂行业寄希望于聚合物电解质膜电解槽和燃料电池的兴起能够使铂的需求恢复至从前的水平。固体氧化物电解槽目前尚处于实验室规模，但有望提高效率以减少电力消耗，推动形成更高的供应集中度；几乎 95% 用于固体氧化物电解槽的关键材料全部来源于中国（图 4.7）（IRENA，2020a）。固体氧化物燃料电池也面临同样的局势。

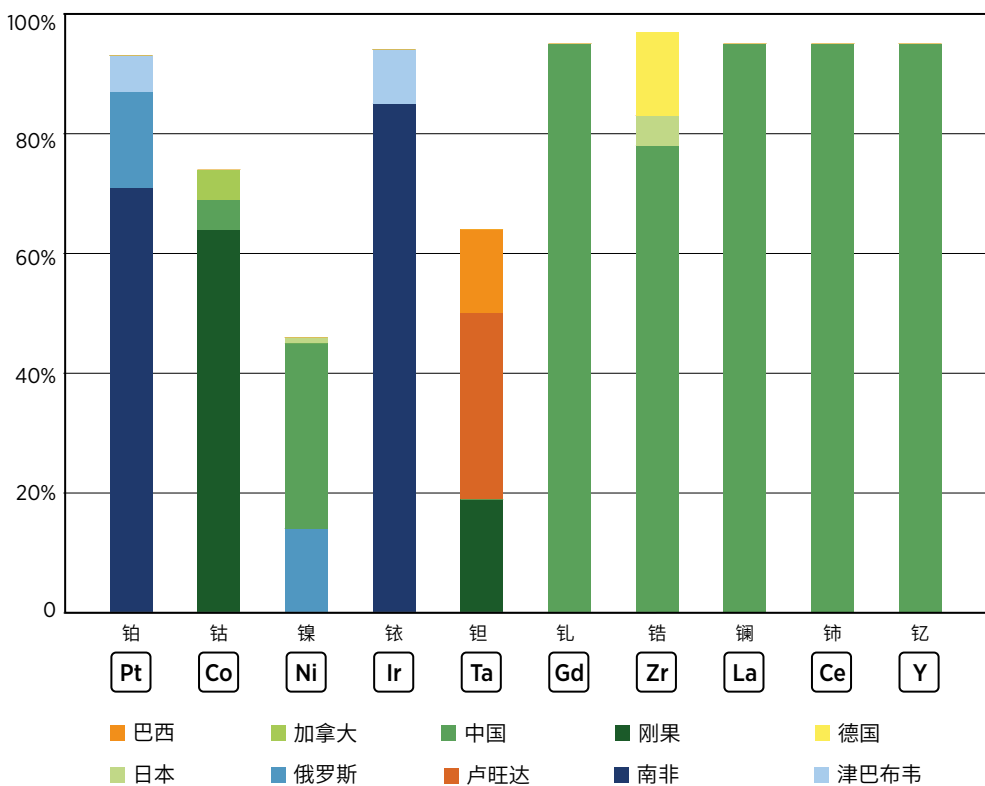
需要注意的是，许多相关材料的市场在短期内都不具备流动性，并且缺乏弹性。这意味着相对较小的供需变化可能导致较大的价格波动。例如，过去 20 年中，铂价格的波动达到了 4 倍，钯价格的波动高达 15 倍，铑价格的波动甚至高达 70 倍（Platinum Matthey，未注明日期）。这些价格波动可能会在氢供应链中引发反应，影响电解槽等关键设备的总体成本，同时影响矿工和原材料出口商的收入。

©Phawat/shutterstock.com



图 4.7 电解槽关键材料的顶级生产商

全球矿业供应比例 (%)



来源：IRENA (2020a)。



©Evgeny_V/shutterstock.com

第 5 章

地缘政治不稳定的根本原因以及氢在解决相关问题中的作用

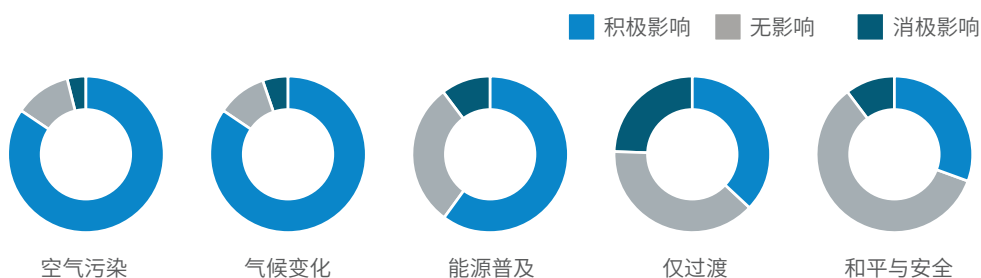
当今的世界互联互通，描述地缘政治变化时必须考虑全球威胁和脆弱方面的广泛性和多维性特质。人们经常使用“人类安全”这一概念用来描述地缘政治不稳定的根源。这一概念超越了对国家安全的军事威胁，将安全议程扩展至包括气候变化、贫困和疾病等非传统威胁方面，这些因素可能会破坏国家/地区内外部的和平与稳定。联合国大会 (United Nations General Assembly) (2012 年) 批准了这一原则，以此为联合国提供相关信息，推动和平建设、人道主义援助和可持续发展等领域的工作。

17 个可持续发展目标 (SDG) 反映了人类安全的多维性质。根据其开发方式，氢可能对可持续发展结果产生既有积极的也有消极的影响 (图 5.1)。



05

图 5.1 专家看法：到 2050 年氢对于特定可持续发展成果产生的影响



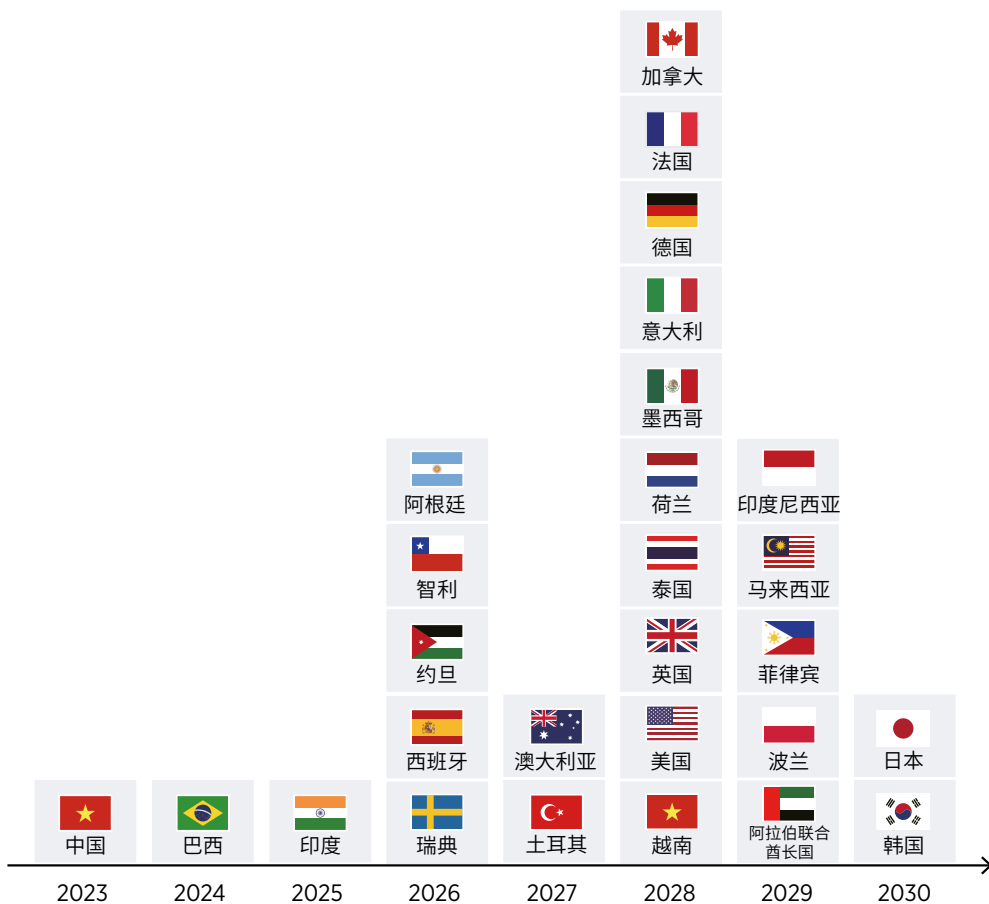
来源：IRENA 专家调查（文本框 2.2）

5.1 社会政治转型

全球能源转型所导致的社会和经济后果可能产生地缘政治连锁反应。为确保能源转型的公平性和包容性，政策制定者必须关注其对就业和产业发展的影响以及其包容程度。一方面，IRENA 预计从 2030 年开始，仅电解槽就可以直接刺激全球创造 200 万个工作岗位，届时劳动力预计达到 1.37 亿（IRENA 和国际劳工组织 (ILO)，2021 年）。另一方面，氢可能会导致搁浅资产的风险增加，从而对某些行业造成破坏性影响。人们有时将蓝氢描绘成安全选择，因为它允许生产国将天然气资源和管道货币化，从而避免资产搁浅。然而，随着绿氢的预期成本降低，再加上更为严格的气候缓解政策出台，意味着针对基于化石燃料（蓝氢或灰氢）的供应链投资，尤其是计划持续运营多年的资产最终可能搁浅。

IRENA 预计到 2030 年，绿氢的成本将低于蓝氢成本（IRENA，2020a）。这一情况可能在部分国家/地区更早发生，例如拥有廉价电解槽的中国，以及可再生能源价格低廉而天然气价格相对较高的巴西和印度（图 5.2）。

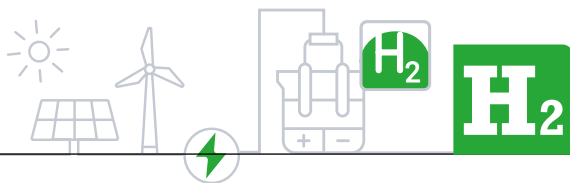
图 5.2 绿氢可能比蓝氢更便宜的国家/地区（按年计算）



来源：彭博新能源财经 (2021d)。

注：图片基于彭博新能源财经的乐观碱性电解槽成本情景分析；可再生能源和电解槽容量的一对一规划；以及 20 年天然气价格展望平均值。

H₂



另一资产搁浅风险出现在氢价值链的最终使用环节。清洁氢有望在钢铁、水泥和化工等重工业中发挥重要作用。这些行业现有设施的典型使用寿命为 30 至 40 年，其中大多数都在其生命周期内经历了重大翻新 (IRENA, 2020b)。若新建的工厂和设备都使用化石燃料运行，则将产生数十亿吨温室气体排放，且有可能在实现净零的过程中搁浅。2050 年之前的投资周期所剩无几，因此未来重新利用现有工厂至关重要。

各国之间的合作对于及时传播清洁技术非常关键，重工业和交通运输行业更是如此。例如，协助发展中国家/地区部署氢项目可能有助于停止而非新增化石燃料的使用。就工业国家/地区而言，通过用于未来经济的净零兼容解决方案取代老化的基础设施可能是更好的选择。

氢也可以作为公平过渡方案的一部分支持工业发展以及再转换技术，这涉及到能源密集型工业园区和港口。例如，西班牙跨国电力公司伊比德罗拉 (Iberdrola) 已开始在西班牙普埃尔托利亚诺建造一座工业用绿氢工厂，该地之前是一个产煤镇 (伊比德罗拉，未注明日期)。鹿特丹港目前是化石燃料的主要枢纽，其愿景是成为清洁氢枢纽，连接高压电缆到北海的海上风电场，并建立新的贸易路线以进口氢和氢衍生物 (鹿特丹港务局 (Port of Rotterdam Authority), 2020 年)。



5.2 气候变化、水资源压力和粮食的不安全性

气候相关的安全风险

十多年来，全球广泛认为气候变化是潜在的“威胁倍增器”，加剧了现有的冲突和不安全来源（联合国大会，2009年）。七国集团（G7）在其2015年报告“新的气候和平（*A New Climate for Peace*）”（Adelphi 等人，2015年）中识别除了未来几十年对国家和社会稳定构成严重威胁的七种复合性气候脆弱风险（表 5.1）。其范围涉及当地资源竞争加剧、食品价格波动以及越发缺乏安全性的生计和移民问题。

表 5.1 气候变化威胁稳定性的七种方式

威胁	描述
当地资源竞争	在缺乏有效的争端解决办法的情况下，随着自然资源压力增加，竞争可能导致局势不稳乃至暴力冲突。
生计不安全和移民问题	气候变化将使依赖自然资源谋生人群的不安全感增加，可能会迫使他们移民或将目光转向非正规和非法收入来源。
极端天气事件和灾难	极端天气事件和灾害将加剧脆弱局势，还有可能增加特定人群尤其是受到冲突影响国家/地区人群的脆弱性和不满情绪。
食品价格和供应波动	气候变化极有可能扰乱许多地区的粮食生产，增加价格和市场波动，进而引发抗议、暴乱和内战等风险。
跨界水资源管理	跨界水资源管理经常是导致紧张局势出现的根源。随着需求不断增长以及气候变化对可用性和质量的影响，用水竞争可能会导致现有治理结构压力进一步增加。
海平面上升和海岸退化	海平面上升甚至会在淹没低洼地区之前威胁到该地区人们的生存能力，从而导致社会混乱、流离失所和大量移民。此外，海洋边界和海洋资源相关分歧可能有所增加。
气候政策的意外影响	随着全球更广泛地实施气候适应和减缓政策，意外负面影响的风险也会增加，对于脆弱的环境而言则尤其显著。

来源：Adelphi 等人（2015年）。

清洁氢对于实现深度脱碳和避免气候变化失控至关重要。通过减少气候变化造成的威胁，清洁氢可有助于推动地缘政治的稳定性。考虑到甲烷存在泄漏风险以及二氧化碳捕获率缺乏相关标准，针对蓝氢推出良好政策越发重要。氢气一旦泄漏到大气中将增加甲烷和臭氧含量，因而会间接导致全球变暖，是仅次于二氧化碳的有害温室气体。然而，这种影响不应放大。据估计，100年内由氢造成全球变暖的可能性不到甲烷的四分之一。³⁸ 尽管如此，根植于透明可信的国际体系的来源保障证书仍然至关重要，它可有效监测和管理氢在减缓气候变化努力中的贡献。

水资源压力

水资源压力将对人类和环境福祉构成直接威胁。它还能够推动大规模移民，同时引发冲突。这些冲突可能以跨界冲突的形式在不同层面爆发，涉及社区层面（当地社区可能被迫争夺稀缺的淡水储备）到国际层面（联合国粮食及农业组织（FAO），2020年）。超过20亿人生活在面临水资源压力的国家（联合国教科文组织（UNESCO），2021年）。由于气候变化、经济模式和人口增长，缺水问题可能会进一步恶化。

氢的生产需要大量（纯）水作为原料。随着气候变化的影响继续加剧水资源压力，越来越多的国家/地区可能需要考虑是否适合长期制氢。到2050年，IRENA的1.5°C路径预计需要4.09亿吨绿氢，每年需要大约70-90亿立方米（m³）水资源——该数字小于当前淡水消耗量的0.25%（世界银行，未注明日期-c）。此外，生产路径的选择也非常重要，因为绿氢的水足迹相比蓝氢要小。在运营阶段，太阳能光伏和风能技术的耗水量远远低于火力发电，进而减小了日益受限的水资源所面临的压力（IRENA，2015年）。例如，IRENA针对中国和印度的国家自主贡献（Nationally Determined Contribution）（NDC）承诺分析发现，扩大可再生能源、尤其是太阳能光伏和风能以及改进的冷却技术，到2030年可分别将发电的取水强度降低42%和84%（IRENA，2018b；IRENA，2016b）。在海湾合作委员会（Gulf Cooperation Council）（GCC）地区，到2030年实现可再生能源部署目标和计划可将用于发电和相关燃料的取水量减少11.5万亿升，即17%（IRENA，2019b）。

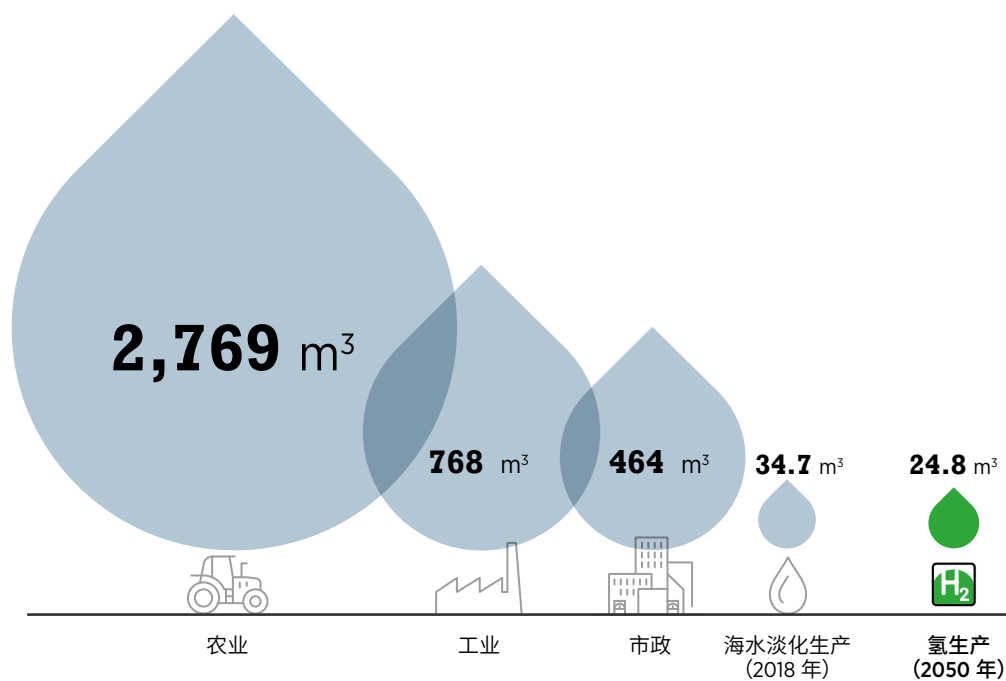


© iStockphoto.com

38 100年内氢的全球变暖潜势估计为1.9-4.7，而甲烷则为21.2-37.2（Field和Derwent，2021年）。

投资者已将目光投向了拥有最佳太阳能光伏和风能资源的地点，旨在开发绿氢项目。问题是阳光充足的地点往往也是最为干燥的地点。70%以上的规划电解槽项目将位于水资源紧张的地区，例如澳大利亚、智利、阿曼、沙特阿拉伯和西班牙等（图 5.4）。因此，超过 85% 的规划绿氢项目可能需要通过海水淡化取水（Rystad，2021 年）。海水淡化将使每千克氢的成本增加 0.02-0.05 美元（Blanco，2021 年；Caldera 和 Breyer，2017 年）。当前大多数商业规模的海水淡化都由化石燃料提供动力。

图 5.3 与当今某些行业相比的 2050 年制氢用水量（十亿立方米）

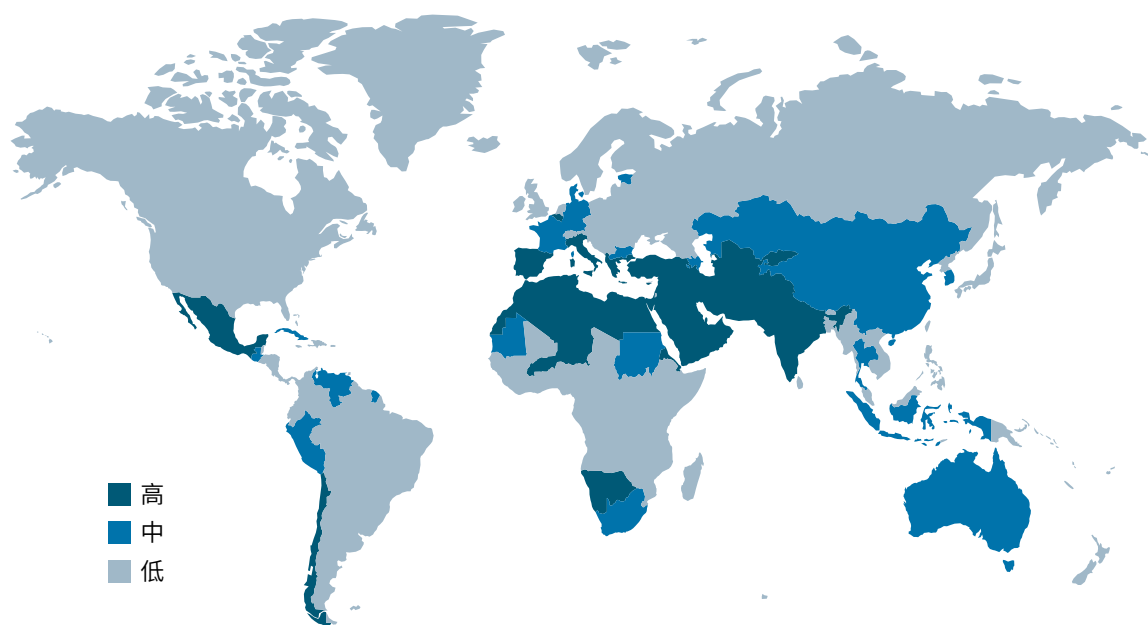


来源：Blanco（2021 年）

注：该图仅考虑用水量，不考虑取水量。取水量包括直接返回至取水水体中的水。消耗包括任何转化为另一种形式或未返回原始水体的水。尽管氢在燃料电池中燃烧或使用产生时产生的大部分水都能够回收，但通常不会将其返回至原始水体中，因此会将其视为消耗掉的水（Beswick、Oliveira 和 Yan，2021 年）。

绿氢可以代表改善水安全的机会。海水淡化成本对于农业或小型工业等部门而言可能过于高昂，因此水的供应至关重要。绿氢脱盐增加了 1-2% 的能源消耗和生产成本，其中电力消耗是决定性因素。因此，绿氢将刺激海水淡化行业，进而大规模扩大海水淡化产能。这同时也能增加用于电解以外其他用途的淡水供应，或降低海水淡化成本（IRENA，2020a）。然而应该指出的是，海水淡化厂会生产富含盐和化学物质的盐水，因此将其返回大海可能会造成相应的生态影响。

图 5.4 水资源压力水平热图



来源：基于 Rystad Energy RenewableCube（2021 年）。

地图来源：Natural Earth，2021 年

免责声明：此地图仅用于说明用途。此地图上显示的边界并不意味着 IRENA 认可或接受。

土地和食物冲突

全球所有工业氨的生产都使用氢作为原材料。氨是合成肥料的主要成分，为世界作物产量作出了大部分贡献。这些氢基肥料当前支撑着全球约一半的人口生存（Ritchie，2017年）。若没有氢，则农业生产率将大幅下降，危及数百万人的粮食安全。

目前除了使用氢生产合成肥料，尚未出现真正的替代方案，氢通常来源于天然气和煤炭，未使用碳捕获和储存技术。因此，清洁氢的预期繁荣可能有助于全球食品供应链脱碳。一定程度上而言，它有助于增加市场上的氢供应，也能够加强全球粮食安全。

这些影响对于撒哈拉以南非洲尤其重要，2018年，该地区的化肥消耗不到每公顷20千克（kg/ha），数量低于农业部门需求的两到三倍（世界银行，未注明日期-d）。化肥使用不足导致土壤养分耗尽、农业生产力低下、人均耕地进一步减少。非洲大陆的氨主要来自阿尔及利亚、埃及和尼日利亚的天然气。同时，通过已宣布的埃及、毛里塔尼亚、摩洛哥和纳米比亚等地项目，该地区也可以通过太阳能和风能以颇具竞争性的方式生产氨（文本框3.2）。明确重点也非常关键，各地在出口氨之前应该先满足国内需求。





清洁氢的出现也可能对全球粮食价格产生影响。像印度计划的那样，针对化肥生产商实施绿氢配额可能有助于扩大绿氢的生产。然而，仍应认真监测对于粮食安全的影响。目前天然气成本占氮肥生产可变投入成本的 60-80%（欧盟委员会，2019 年）。若天然气价格出现波动，化肥价格也将随之波动。2021 年秋季这种效应便得以充分显现，当时天然气价格飙升迫使一些化肥生产商部分或完全减产（Thapliyal, 2021 年）。

土地影响方面，某些地区对建设基于可再生能源的大型电解装置存在部分限制，例如人口密度较高或存在竞争性活动或功能的地区（例如农业或保护区）。然而，对土地影响最为深远的将是建造巨大风能和太阳能光伏发电厂以提供足够的可再生能源电力和绿氢的需求。澳大利亚西部绿色能源中心（Western Green Energy Hub）的一个项目将覆盖 15,000 平方千米的土地（约为比利时或莱索托面积的一半），用于生产出口绿氢和氨。在无人居住的沙漠和海上地区开发可再生能源设施可以降低土地使用竞争的风险，毛里塔尼亚的 Nour 风能太阳能氢项目便是示例，该项目可能推动非洲首个海上风电场的开发（Collins, 2021b）。

5.3 氢与发展中国家/地区

许多国家/地区长期以来一直认为最便宜和最容易获得的发展路线是化石燃料，特别是基于煤炭的化石燃料。煤炭供应全球三分之一以上的发电厂，在钢铁等行业也发挥着关键作用。对于几个发展迅速的国家而言，过去几年和几十年来，煤炭一直是支撑经济增长的燃料。例如中国，2020 年煤炭占其总发电量的 61%，而在印度，71% 的电力供应依赖煤炭（Ember，未注明日期-a；Ember，未注明日期-b）。水泥、钢铁和化工等能源密集型行业当前仍然依赖化石燃料。

过去十年中，更廉价的可再生能源的出现使 20 世纪的依赖性燃料开始面临挑战。太阳能光伏、风能和电池等可再生能源技术成本的下降正在开辟新的发展路径。可再生能源现在是最便宜的发电形式，在 2020 年缺乏资金支持的情况下，其成本低于 61% 的现有燃煤电厂（IRENA，2021e；Lovins，2021a）。因此，发展中国家的电力系统迎来了跨越化石燃料的独特机会。部分国家/地区已经或者即将转向可再生能源路径，以供应全部或大部分的电力需求增长（Bond 等人，2021 年）。

我们有充分理由相信，跨越化石燃料的部门将不仅仅限于电力部门。例如，正如印度和非洲大力发展二轮和三轮电动汽车那样，一些国家和地区可以直接转向应用电动汽车。清洁氢可以扩大选择范围，实现多部门的跨越。

仅是作为化肥中的氨的生产原料，许多发展中国家/地区在制氢方面已拥有几十年经验。一些国家/地区正努力抓住机会在新的领域试点氢项目。印度尼西亚、南非和特立尼达和多巴哥开始为电信塔安装基于甲醇或氨的燃料电池，通常用于取代柴油发电机作为备用系统（Romer，2011 年）。中国、哥斯达黎加和马来西亚已经推出了燃料电池巴士（De Sisternes、Fernando 和 Jackson，2020 年）。印度正在考虑强制炼油厂和化肥厂使用部分绿氢（Verma，2021 年）。



发展中国家/地区仍需建设基础设施，包括道路、房屋、学校、工厂、污水处理系统和电力系统。这需要大量能源和排放密集型材料，而这些材料通常依赖进口。满足这些需求将使跨越式发展带来的益处倍增。

清洁氢可为绿色钢铁等大宗商品的生产和使用提供新的工业机会。即使是全球最贫穷的一些国家/地区也有机会利用其可再生能源潜力在当地生产绿氢，进而创造经济机会，同时提高能源安全。只有通过国际努力引导资源、共享技术和转让专有技术，这一潜力才能得以实现。

如果氢有助于减少温室气体排放并为当地发展和经济增长做出贡献，则全球都将受益于发展中国家/地区和新兴经济体发展氢能产业。世纪之交以来，发展中国家/地区的能源消耗几乎翻了一番；当前发展中国家/地区和新兴经济体的能源需求占全球一半以上（BP，2021年），³⁹ 尽管其人均消费量仍远低于发达国家/地区，并且数百万人仍然无法获得基本的能源服务。

然而，就目前而言，能源转型技术对许多发展中国家/地区而言成本过于昂贵。因此，富裕国家/地区能够负担得起清洁氢的研究、开发和部署，而贫穷国家/地区则不能，二者之间的差距可能不断扩大，进而阻碍公平公正的能源转型。

帮助发展中国家/地区尤其是最不发达国家/地区尽早应用氢技术有助于防止全球脱碳鸿沟扩大。获得（专利）技术、培训、能力建设和负担得起的资金将成为实现氢的全部潜力以使全球能源系统脱碳并促进稳定和公平的关键。这不仅涉及公平问题。多元化的氢市场将为贸易与合作创造新的机会、有效降低供应链风险，同时增强所有人的能源安全。



© marchmeena29/istock.com

39 基于 OECD 和非 OECD 国家/地区的一次能源消费数据。

第 6 章

政策考量和 前进方向

全球能源转型地缘政治委员会在 2019 年报告中表示，可再生能源转型后的世界将与以化石燃料为基础的世界截然不同（IRENA，2019a）。报告还指出，能源转型的确切范围和速度无法预测。氢的兴起便是有力例证。几年前，人们还将氢视为全球能源对话中的利基市场。今天，它已成为减排难度较高行业脱碳战略的核心焦点，越来越多的国家/地区和行业寄希望于该因素的广泛应用。

能源转型的许多方面仍在不断发展。可再生能源的份额正在不断增长，随之而来的是系统性的变革。最终用途的显著电气化当前正在重塑需求规模和范围。氢的最终角色尚未确定，大部分氢仍由化石燃料生产。绿色制氢将蓬勃发展，在今天的油气田以外地区也是如此。氢市场的发展可能会带来不同的经济、社会、环境和地缘政治影响。尽管存在许多未知因素，但到 2030 年氢部署应该会取得重大进展，以满足到 2050 年实现脱碳能源系统这一目标。下面是为政策制定提供信息的一些考虑因素。



06

氢属于更大规模能源转型蓝图的一部分，不应以孤立的方式追求氢的开发利用战略。

各国/地区应仔细评估如何将氢融入其整体经济、社会、环境和政治战略。各国/地区努力寻求自己在新能源经济中的定位时，必须考虑的因素包括其能源部门的成熟度、当前的经济竞争力水平以及做出每项选择的潜在社会经济影响。例如，拥有丰富可再生能源资源和廉价电力的国家/地区可能会选择使用电解技术保持绿氢的成本竞争力。其他情况下，政策制定者可能会认为，重点关注支撑能源转型的其他技术更有价值（IRENA，2020b）。

能源转型正在促使供应商、供应路线以及可供进口的能源载体种类多元化发展。因此，必须认真评估基础设施的计划和投资，因为这些决策将长期实施，而且搁浅资产的风险和成本较高。例如，管道基础设施应该能改造用于输送氢和生物甲烷等绿色气体。并且一开始就应考虑到这种改造相关的技术挑战和经济成本。

对于氢应用规模的快速扩大以及氢对脱碳工作的长期贡献而言，合理确定其发展重点至关重要。

特别是在近期，全球的努力目标应该集中在提供最直接优势和实现规模经济等应用方面。在早期阶段，氢贸易可能会围绕双边协议展开，存在某一方违约风险。优先考虑最适合氢的需求量大的应用会更有可能实现成本效益，并且不太容易受到新兴市场相关风险的影响。示例之一可能是在已经使用氢的工业应用中支持并加速向绿氢的转化，例如精炼工业以及氨和甲醇的生产（IRENA，2020b）。

应先审慎评估用于生产用途的可再生能源产生的电力，然后再转用于绿色制氢（IRENA，2020b）。否则，不加选择地使用绿氢可能会拖慢能源转型，并导致电力结构中重新纳入更多化石燃料。如果各国重点发展可再生能源用于绿氢出口，若无法遵循额外性原则，也可能会阻碍向目前缺少能源国家扩大能源供应的进展。



© peshkov/istock

国际合作必不可少，共同推动形成透明化、具有一致标准和规范的氢市场，为气候变化作出有意义的贡献。

清洁氢可能会成为解决深度脱碳难题的重要组成部分，反之，通过为国家和地区扩大积极的经济和政治机会并最大限度地减少气候风险和损失，将会有助于地缘政治稳定。但是，若氢能战略延长了对化石燃料的需求和供应，并对能源效率和电气化产生阻碍，则存在碳锁定风险。针对蓝氢方面则需要有认可的碳捕获和甲烷排放阈值，以确保蓝氢对脱碳做出有意义的贡献。

如何确定排放的透明度对国际氢市场的正常运作至关重要。清洁氢市场的成功取决于有能力制定一致和透明的规则、标准和规范，进而推动其在各国、各地区和各行业的部署。相关规定的制定可能会成为地缘政治的竞争舞台，但强有力的国际合作和建设性的政治和经济参与则可以带来诸多益处。IRENA 通过制定绿氢合作框架 (Collaborative Framework on Green Hydrogen) 为此类合作提供了一把有用的全球保护伞。

支持发展中国家提升可再生能源和绿氢应用将有效实现能源体系脱碳，并且可促进全球公平性和稳定性。

多元化的氢市场将为贸易与合作创造新的机会、有效降低供应链风险，同时增强各国的能源安全。各国/地区将可再生能源潜力转化为能源生产的能力取决于制造所需设备的能力以及支撑创新的知识产权。目前，制造能力仅集中于少数几个国家/地区。这意味着，大多数国家/地区都依赖从相对较少的地区进口设备。为确保地缘政治稳定，实现公正的能源转型，未来的进口国应推动多元化，让可再生能源资源丰富的发展中国家能够建立起本国的价值链，形成创造就业机会的绿色产业。获得技术、培训、能力建设和负担得起的资金将是支持实现氢的全部潜力以使全球能源系统脱碳，并促进全球稳定和公平的几个关键要素。

可通过减少许多最终用途的不必要能源消耗降低地缘政治风险。

朝着真正可持续发展的产业转变不仅仅涉及能源转换，还要求我们开发出公平、公正使用能源的有效方法。这包括减少许多最终用途中不必要的能源消耗，同时改变以持续增加消费为基础的系统。例如，向脱碳能源系统转变的过程中，各国/地区可能会生产氢以提高其能源独立性，但仍要依赖少数国家提供生产所需材料。创新、效率、回收和循环经济都将有助于缓解矿产和金属瓶颈方面的担忧。但从长远来看，减少需求对于材料安全而言至关重要。

政策制定者应充分考虑氢开发对可持续发展的更广泛影响，确保取得积极、持久的成果。

人们经常引用“人类安全”这一概念描述地缘政治不稳定的其中一个根源。正如《2030年可持续发展议程》和17个可持续发展目标所述，该概念将安全议程扩大到包括贫困和疾病等威胁，这些因素可能会破坏国家/地区内外部的和平与稳定。根据其开发方式，氢可能对可持续发展结果产生积极或消极影响。例如，从技术角度来看，人们通常不会将应用氢所需的水视为部署障碍。然而，气候变化正促使现在看来颇具前景的制氢地点的水风险增加。若能更深入了解全球威胁和脆弱的多维性质，便有可能预见和化解大规模应用氢可能带来的某些风险。

今天，各国政府有了独一无二的机会来塑造氢时代的到来、避免现有系统的缺陷和低效，并影响地缘政治的结果。显然，逐步扩大氢能技术应用的规模将会颠覆部分经济和政治联盟以及伙伴关系。若以审慎方式加以开发利用，这些能源技术还将提供机会展示颠覆性的积极力量、增强国家和地区主权、弹性和合作。随着清洁氢燃料竞赛加速，化石燃料的使用经验可能仍然具有指导意义。政策制定者也可以借鉴氢能领域先驱者的经验教训，复制其成功的实践做法。最重要的是，未来日子里，国际合作对于有效应对未知因素、减少风险和克服障碍至关重要。

参考资料

Abad, A.V. and P.E.Dodds (2020), “Green hydrogen characterisation initiatives: Definitions, standards, guarantees of origin, and challenges (绿色氢表征计划: 定义、标准、来源保障和挑战)”, *Energy Policy*, Vol. 138, 111300.

Adelphi, International Alert, Woodrow Wilson International Center for Scholars, and European Union Institute for Security Studies (2015), *A New Climate for Peace: Taking Action on Climate and Fragility Risks (新的气候和平: 采取行动应对气候和脆弱性风险)*.

ADNOC (2021a), “ADNOC and three Japanese companies to explore hydrogen and blue ammonia opportunities (ADNOC 及三家日本公司探索氢和蓝色氨相关机遇)”, Abu Dhabi National Oil Company, Abu Dhabi, www.adnoc.ae/en/news-and-media/press-releases/2021/adnoc-and-three-japanese-companies-to-explore-hydrogen-and-blue-ammonia-opportunities.

ADNOC (2021b), “ADNOC and PETRONAS sign comprehensive strategic framework agreement (ADNOC 和马来西亚国家石油公司 (PETRONAS) 签署全面战略框架协议)”, Abu Dhabi National Oil Company, Abu Dhabi, www.adnoc.ae/en/news-and-media/press-releases/2021/adnoc-and-petronas-sign-comprehensive-strategic-framework-agreement.

ADNOC (2021c), “ADNOC and Korea’s GS energy explore opportunities to grow Abu Dhabi’s hydrogen economy and carrier fuel export position (ADNOC 与韩国 GS 能源公司共同探索发展阿布扎比氢经济和载体燃料出口地位的相关机遇)”, Abu Dhabi National Oil Company, Abu Dhabi, www.adnoc.ae/en/news-and-media/press-releases/2021/adnoc-and-koreas-gs-energy-explore-opportunities.

African Hydrogen Partnership (2019), *Green African Hydrogen Operational Planning (非洲绿色氢能运营规划)*, www.afr-h2-p.com/documents, (accessed 13 January 2022).

Agora (2021), *12 insights on hydrogen*, Agora Energiewende and Agora Industry (关于氢、Agora 能源转型论坛和 Agora 产业的 12 项见解), www.agora-energiewende.de/en/publications/12-insights-on-hydrogen-publication/.

Amelang, S. (2020), “Europe vies with China for clean hydrogen superpower status (欧洲与中国争夺清洁氢超级大国地位)”, Clean Energy Wire, www.cleanenergywire.org/news/europe-vies-china-clean-hydrogen-superpower-status.

Aramco (2020a), “Aramco completes its acquisition of a 70% stake in SABIC from the Public Investment Fund (PIF) (沙特阿美通过公共投资基金 (PIF) 完成沙特基础工业公司 (SABIC) 70% 的股权收购)”, www.aramco.com/en/news-media/news/2020/saudi-aramco-completes-acquisition-of-70-percent-stake-in-sabic.

Aramco (2020b), “World’s first blue ammonia shipment opens new route to a sustainable future (全球首批蓝色氨运输开辟了通往可持续未来的全新途径)”, www.aramco.com/en/news-media/news/2020/first-blue-ammonia-shipment.

Argus (2021), “Oman signs land deal for new green hydrogen plant (阿曼签署土地交易用于建设新的绿色氢工厂)”, www.argusmedia.com/en/news/2247165-oman-signs-land-deal-for-new-green-hydrogen-plant.

Atchison, J. (2021), “Ammonia infrastructure: panel wrap-up from the 2020 Ammonia Energy Conference (氨基础设施: 2020 年氨能会议小组总结)”, 22 January, www.ammoniaenergy.org/articles/ammonia-infrastructure/.

Bataille, C. et al. (2021), *Global Facility Level Net-Zero Steel Pathways: Technical Report on the First Scenarios of the Net-Zero Steel Project (全球工厂级别净零钢铁路径: 净零钢铁项目首个情景技术报告)*, Institute for Sustainable Development and International Relations, Paris, http://netzerosteel.org/wp-content/uploads/pdf/net_zero_steel_report.pdf.

Bauer, C. et al. (2021), *On the climate impacts of blue hydrogen production (蓝色氢生产相关的气候影响)*, <https://doi.org/10.33774/CHEMRXIV-2021-HZ0QP>.

Beswick, R.R., A.M. Oliveira and Y. Yan (2021), “Does the green hydrogen economy have a water problem? (绿色氢经济是否存在水资源问题?)”, *ACS Energy Letters*, Vol. 6, No. 9, pp. 3167-3169.

Black, R. et al. (2021), *Taking Stock: A global assessment of net zero targets (盘点: 针对净零目标的全球评估)*, Energy & Climate Intelligence Unit and Oxford Net Zero, London.

Blanco, H. (2021), “Hydrogen production in 2050: How much water will 74 EJ need? (2050 年的氢生产: 74 EJ 需要使用多少水?)” *Energy Post*, <https://energypost.eu/hydrogen-production-in-2050-how-much-water-will-74ej-need/>.

BloombergNEF (2021a), *New Energy Outlook 2021 (2021 年全新能源展望)*, Bloomberg New Energy Finance, London.

BloombergNEF (2021b), *2H 2021 Hydrogen Market Outlook: China Drives a Gigawatt (2021 年下半年氢能市场展望: 中国推动发展千兆瓦级市场)*, Bloomberg New Energy Finance, London.

BloombergNEF (2021c), *Decarbonizing Steel: A Net Zero Pathway (钢脱碳: 净零路径)*, Bloomberg New Energy Finance, London.

BloombergNEF (2021d), *Green Hydrogen to Start Undercutting Blue by Mid-2020s* (到 21 世纪 20 年代中期, 绿色氢的价格开始低于蓝色氢), Bloomberg New Energy Finance, London.

BMW (2021), “Minister Altmaier: ‘Making further progress on international market ramp-up for green hydrogen’ (Altmaier 部长: ‘进一步推动绿色氢国际市场发展’)”, Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action, Press Release, 14 June, www.bmw.de/Redaktion/EN/Pressemitteilungen/2021/06/20210614-new-funding-instrument-h2global-launched.html, (accessed 13 January 2022).

Bogdanov, D., M. Child and C. Breyer (2019), “Reply to ‘Bias in energy system models with uniform cost of capital assumption (‘统一资本成本假设下能源系统模型中的偏差’ 回复)” . *Nature Communication*, Vol. 10, 4587, <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12469-y>.

Bond, K. et al.(2021), *Reach for the sun: The emerging market electricity leapfrog* (转向获取太阳能: 新兴市场电力跨越), Carbon Tracker.

Bowen, J. (2021), *Fuelling Cooperation: The Indo-Pacific Hydrogen Transformation* (推动合作: 印太地区氢能转化), Perth USAsia Center.

BP (2021), Statistical Review of World Energy 2021 (2021 年世界能源统计年鉴), BP, London, www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf.

Brasington, L. (2019), “Hydrogen in China (中国的氢能)” Cleantech Group, www.cleantech.com/hydrogen-in-china/.

Brisbane Times (2021), “Fortescue unveils plan for world-leading green hydrogen hub in Qld (Fortescue 公布位于昆士兰州的全球领先绿色氢枢纽计划)”, 10 October, www.brisbanetimes.com.au/ (subscription required).

Bullard, N. (2021), “A gigafactory for hydrogen could be a game changer (超级制氢工厂的出现可能会改变游戏规则)”, Bloomberg, www.bloomberg.com/news/articles/2021-07-01/a-gigafactory-for-hydrogen-could-be-a-game-changer, (subscription required).

CAFCP (2018), *The California Fuel Cell Revolution (加州燃料电池革命)*, California Fuel Cell Partnership, July, p. 24.

Caglayan, D.G. et al.(2020), “Technical potential of salt caverns for hydrogen storage in Europe (欧洲盐穴储氢技术潜力)”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 45, No.11, pp. 6793-6805.

Caldera, U., and C. Breyer (2017), “Learning curve for seawater reverse osmosis desalination plants: Capital cost trend of the past, present, and future (反渗透海水淡化厂的学习曲线: 过去、现在和未来的资本成本趋势)”, *Water Resources Research*, Vol. 53, No. 12, pp. 10523-10538.

CARB (2019), *2019 Annual Evaluation of Fuel Cell Electric Vehicle Deployment & Hydrogen Fuel Station Network Development* (2019 年燃料电池电动汽车部署及氢燃料站网络发展年度评估), California Air Resources Board, July, p. 89.

Chilean Ministry of Energy (2020a), *National Green Hydrogen Strategy (国家绿色氢能战略)*, Government of Chile, Santiago, https://energia.gob.cl/sites/default/files/national_green_hydrogen_strategy_-_chile.pdf.

Chilean Ministry of Energy (2020b), “Chile 2020: Green Hydrogen Summit - Highlights (智利 2020 年: 绿色氢能峰会 - 亮点)”, Government of Chile, Santiago, https://energia.gob.cl/sites/default/files/giz_green_hydrogen_summit.pdf.

Collins, L. (2021a), “Green hydrogen now cheaper to produce than grey H2 across Europe due to high fossil gas prices (由于化石天然气价格高昂, 当前在欧洲生产绿色氢比灰色氢便宜)”, *Recharge*, www.rechargenews.com/energy-transition/green-hydrogen-now-cheaper-to-produce-than-grey-h2-across-europe-due-to-high-fossil-gas-prices/2-1-1098104.

Collins, L. (2021b), “New 10GW green hydrogen project in Mauritania could include Africa’s first offshore wind farm (毛里塔尼亚新的 10GW 绿色氢能项目可能包括非洲首个海上风电场)”, *Recharge*, www.rechargenews.com/energy-transition/new-10gw-green-hydrogen-project-in-mauritania-could-include-africas-first-offshore-wind-farm/2-1-1074316.

CSET (2021), *Outline of the People’s Republic of China 14th Five-Year Plan for National Economic and Social Development and Long-Range Objectives for 2035 (中华人民共和国国民经济和社会发展“十四五”规划纲要和 2035 年远景目标)*, Center for Security and Emerging Technology, Georgetown University, Washington, D.C., https://cset.georgetown.edu/wp-content/uploads/t0284_14th_Five_Year_Plan_EN.pdf.

CSIS (2021a), *Hydrogen Economy Roadmap of Korea (韩国氢经济路线图)*, Center for Strategic and International Studies, www.csis.org/analysis/south-koreas-hydrogen-industrial-strategy.

CSIS (2021b), *Japan’s hydrogen industrial strategy (日本氢工业战略)*, Center for Strategic and International Studies, www.csis.org/analysis/japans-hydrogen-industrial-strategy.

den Ouden, B., (2020), *A Hydrogen Exchange for the Climate (推动气候发展的氢交换)*, Dutch Ministry of Economic Affairs and Climate Policy, www.government.nl/documents/reports/2020/09/24/a-hydrogen-exchange-for-the-climate.

E4Tech (2021), *The Fuel Cell Industry Review 2020* (2020 年燃料电池产业回顾), www.fuelcellindustryreview.com, (accessed 13 January 2022).

Egli, F., B. Steffen, B. and T.S.Schmidt (2019), Bias in energy system models with uniform cost of capital assumption (统一资本成本假设下能源系统模型的偏差). *Nature Communication*, Vol. 10, 4588. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12468-z>.

EIA (n.d.), "Europe Brent spot price FOB (dollars per barrel) (欧洲布伦特原油 FOB 现货价格 (美元/桶))", Energy Information Administration, Washington, D.C., www.eia.gov/dnav/pet/hist/rbrteD.htm.

Ember (n.d.-a), "China was the only G20 country to see large increase in coal generation in 2020 (中国是 2020 年唯一一个煤炭发电量大幅增长的 G20 国家)", <https://ember-climate.org/global-electricity-review-2021/g20-profiles/china/>.

Ember (n.d.-b), "India's wind and solar generation tripled since 2015 (印度的风能和太阳能发电量自 2015 年以来已增长两倍)", <https://ember-climate.org/global-electricity-review-2021/g20-profiles/india/>.

Emirates News Agency, 2021, "UAE announces Hydrogen Leadership Roadmap, reinforcing Nation's commitment to driving economic opportunity through decisive climate action (阿联酋宣布氢能领导路线图, 加强国家通过实施果断气候行动推动经济机会的承诺)", www.wam.ae/en/details/1395302988986, (accessed 13 January 2022).

Energy Charter Secretariat (2007), "Putting a price on energy: International pricing mechanisms for oil and gas (能源定价: 石油和天然气的国际定价机制)". Energy Charter Treaty, Brussels. www.energycharter.org/what-we-do/trade-and-transit/trade-and-transit-thematic-reports/putting-a-price-on-energy-international-pricing-mechanisms-for-oil-and-gas-2007/.

Energy Transition Commission (2021), Making the Hydrogen Economy Possible: Accelerating Clean Hydrogen in an Electrified Economy (使氢经济成为可能: 在电气化经济中加速清洁氢的应用), The Making Mission Possible Series, ETC, www.energy-transitions.org/publications/making-clean-hydrogen-possible/.

Energy Voice (2021), "CWP signs \$40bn MoU with Mauritania on green hydrogen" (CWP 与毛里塔尼亚就绿色氢能源签署金额为 400 亿美元的谅解备忘录), 31 May, www.energyvoice.com/renewables-energy-transition/hydrogen/africa-hydrogen/326911/cwp-mou-mauritania-hydrogen/.

Engineering News (2021), "Namibia selects preferred bidder for pioneering \$9.4bn green hydrogen project (纳米比亚为 94 亿美元开创性绿色氢项目选择优先投标人)", 5 November, www.engineeringnews.co.za/article/namibia-may-launch-second-green-hydrogen-bidding-process-in-early-2022-2021-11-23.

Equinor and OGE (2019), *The potential of hydrogen for decarbonization of German industry* (氢能在德国工业脱碳中的潜力), Equinor and Open Grid Europe, www.equinor.com/content/dam/statoil/documents/climate-and-sustainability/H2morrow-The%20Potential-of-Hydrogen-for-Decarbonization-of-German-Industry.pdf.

European Commission (2021), *The European economic and financial system: fostering openness, strength and resilience* (欧洲经济和金融体系: 培养开放性、实力和适应性), 19 January, Brussels.

European Commission (2020a), *A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe* (气候中性的欧洲氢能战略), 8 July, Brussels, https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/hydrogen_strategy.pdf.

European Commission (2020b), *Critical Raw Materials for Strategic Technologies and Sectors in the EU: A Foresight Study* (欧盟战略技术和部门的关键原材料: 前瞻性研究), Joint Research Centre, European Commission, Brussels, <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/42881>.

European Commission (2019), "Fertilisers in the EU: Prices, trade, and use (欧盟肥料: 价格、贸易和使用)", *EU Agricultural Market Briefs*, No. 15, June, https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/food-farming-fisheries/farming/documents/market-brief-fertilisers_june2019_en.pdf.

FAO (2020), *The State of Food and Agriculture 2020. Overcoming water challenges in agriculture* (2020 年粮食和农业状况: 克服农业用水挑战), Food and Agriculture Organization, Rome, <https://doi.org/10.4060/cb1447en>.

FCH JU (2014), *Study on Development of Water Electrolysis in the EU* (欧盟电解水发展研究), Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, [www.fch.europa.eu/sites/default/files/FCHJUElectrolysisStudy_FullReport%20\(ID%20199214\).pdf](http://www.fch.europa.eu/sites/default/files/FCHJUElectrolysisStudy_FullReport%20(ID%20199214).pdf).

FCH JU (n.d.), *Discover New FCH JU Project Big Hit: Orkney Islands- A Model Hydrogen Territory* (发现新的 FCH JU 大热门项目): 奥克尼群岛 — 氢能示范地区), Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, www.fch.europa.eu/news/discover-new-fch-ju-project-big-hit-orkney-islands-model-hydrogen-territory.

Field, R. A., and R.G.Derwent (2021), "Global warming consequences of replacing natural gas with hydrogen in the domestic energy sectors of future low-carbon economies in the United Kingdom and the United States of America (英国和美国未来低碳经济体国内能源部门使用氢替代天然气所导致的全局变暖后果)", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 46, No. 58, pp. 30190-30203.

- Financial Times (2021)**, “The race to scale up green hydrogen (扩大绿色氢竞赛)”, Financial Times, 8 March, www.ft.com/content/7eac54ee-f1d1-4ebc-9573-b52f87d00240, (accessed 13 January 2022).
- Fitchratings (2021)**, *Climate Change “Stranded Assets” Are a Long-Term Risk for Some Sovereigns* (气候变化“搁浅资产”是部分主权国家面临的长期风险), 15 February, www.fitchratings.com/research/sovereigns/climate-change-stranded-assets-are-long-term-risk-for-some-sovereigns-15-02-2021.
- Fraunhofer ISE (2020)**, “HySpeedInnovation: A joint action plan for innovation and upscaling in the field of water electrolysis technology (HySpeedInnovation: 水电解技术领域创新升级联合行动计划)”, www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/News/Position-Paper-HySpeedInnovation.pdf.
- Fund for Peace (2021)**, *Fragile States Index Annual Report 2021* (2021年脆弱国家指数年度报告), Fund for Peace, Washington, D.C., <https://fragilestatesindex.org/wp-content/uploads/2021/05/fsi2021-report.pdf>.
- Gas for Climate (2021a)**, *Extending the European Hydrogen Backbone* (扩展欧洲氢能主干网), https://gasforclimate2050.eu/sdm_downloads/extending-the-european-hydrogen-backbone/.
- Gas for Climate (2021b)**, *Market State and Trends in Renewable and Low-Carbon Gases in Europe* (欧洲可再生能源和低碳气体的市场状况及趋势), www.europeanbiogas.eu/wp-content/uploads/2021/12/Gas-for-Climate-Market-State-and-Trends-report-2021.pdf.
- Geingob, H. G. (2021)**, “Namibia is poised to become the renewable energy hub of Africa (纳米比亚有望成为非洲的可再生能源中心)”, World Economic Forum, 3 October, www.weforum.org/agenda/2021/10/namibia-is-positioned-to-become-the-renewable-energy-hub-of-africa/.
- Ghosh, A. and S. Chhabra (2021)**, *Speed and Scale for Disruptive Climate Technologies: Case for a Global Green Hydrogen Alliance* (颠覆性气候技术的速度和规模: 全球绿色氢联盟案例), GCF-CEEW Report, Global Challenges Foundation, Stockholm.
- GIE & Guidehouse (2021)**, “Picturing the value of underground gas storage to the European hydrogen system (描绘地下储气库对于欧洲氢能系统的价值)”, June, www.gie.eu/gie-presents-new-study-picturing-the-value-of-underground-gas-storage-to-the-european-hydrogen-system/.
- Gielen, D. et al. (2021)**, “EU’s carbon border adjustment mechanism lacks the detail to drive industry’s relocation near clean energy (欧盟碳边界调整机制缺乏推动产业向清洁能源附近转移的具体措施)”, *Energy Post*, 15 June, <https://energypost.eu/eus-carbon-border-adjustment-mechanism-lacks-the-detail-to-drive-industrys-relocation-near-clean-energy/>.
- Gielen, D. et al. (2020)**, “Renewables-based decarbonization and relocation of iron and steel making: A case study (基于可再生能源的钢铁生产脱碳和搬迁: 案例研究)”, *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 24, No. 5, pp. 1113-25.
- Glaeser, E. L. and J.E.Kohlhase (2004)**, “Cities, regions and the decline of transport costs (城市、地区和运输成本的下降)”, in *Fifty Years of Regional Science*, pp. 197-228, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Gobierno de Chile (2020)**, “Estrategia Nacional De Hidrógeno Verde [National Green Hydrogen Strategy] (国家绿色氢能战略)”, November, https://energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia_nacional_de_hidrogeno_verde_-_chile.pdf.
- Godula-Jopek, A. (2015)**, “Introduction (简介)”, in *Hydrogen Production by Electrolysis*, pp. 15, Wiley-VCH, Weinheim.
- Goldman Sachs (2020)**, *Green Hydrogen: The Next Transformational Driver of the Utilities Industry* (绿色氢: 公用事业行业的下一个转型驱动力), Goldman Sachs, New York, 22 September, www.goldmansachs.com/insights/pages/gs-research/green-hydrogen/report.pdf.
- Government of Australia (2021)**, “Future hydrogen industry to create jobs, lower emissions and boost regional Australia (未来的氢工业将创造就业机会、降低排放并推动澳大利亚偏远地区的发展)”, Media release, www.minister.industry.gov.au/ministers/taylor/media-releases/future-hydrogen-industry-create-jobs-lower-emissions-and-boost-regional-australia.
- Government of Australia (2019)**, *Australia’s National Hydrogen Strategy* (澳大利亚的国家氢能战略), www.industry.gov.au/data-and-publications/australias-national-hydrogen-strategy.
- Government of Canada (2020)**, *Canada’s Hydrogen Opportunity* (加拿大的氢能机会), p. 86.
- Government of Namibia (2021)**, “Pillar 2: Economic advancement. Activity 2: Investigate the feasibility of green hydrogen and ammonia as a transformative strategic industry (支柱 2: 经济发展. 活动 2: 研究绿色氢和绿色氨作为变革性战略产业的可行性)”, <https://hpii.gov.na/activities/activity-2-investigate-the-feasibility-of-green-hydrogen-and-ammonia-as-a-transformative-strategic-industry/>.
- GreenInfo Network and Global Energy Monitor, (2021)**, https://greeninfo-network.github.io/fossil_tracker/(accessed 13 January 2022).

Grimm, V. and K. Westphal (2021), “The focus on green hydrogen slows down climate protection (对于绿色氢拖慢气候保护进程的重点关注)”, SWP Point of View, www.swp-berlin.org/en/publication/climate-purists-only-want-green-hydrogen-that-is-a-mistake, (accessed 13 January 2022).

Grinschgl, J., J.M.Pepe and K. Westphal (2021), “Eine neue Wasserstoffwelt: Geotechnologische, geoökonomische und geopolitische Implikationen für Europa”, [A new hydrogen world: geotechnological, geoeconomic and geopolitical implications for Europe] (一个全新的氢能世界: 对欧洲的岩土技术、地缘经济和地缘政治影响)”, SWP Aktuell, 8 December.

H2Atlas Africa (2021), *Atlas of green hydrogen generation potentials in Africa* (非洲绿色氢生产潜力图集), www.h2atlas.de (accessed 13 January 2022).

Harding, R. (2019), “Japan launches first liquid hydrogen carrier ship (日本首艘液态氢运输船启航)”, *Financial Times*, 11 December, www.ft.com/content/8ae16d5e-1bd4-11ea-97df-cc63deld73f4, (subscription required).

HELIOS (n.d.), “Fostering cleaner energy for our planet (为我们的星球发展更加清洁的能源)”, www.heliindustry.com/project/.

Howarth, R.W. and M.Z.Jacobson (2021), “How green is blue hydrogen? (蓝色氢有多环保?)” *Energy Science & Engineering*, Vol. 9, Issue 10, pp. 1676-1687, <https://doi.org/10.1002/ESE3.956>.

Hydrogen Council (2021), *Hydrogen for Net Zero: A Critical Cost-Competitive Energy Vector* (净零氢: 颇具成本竞争力的关键能源载体), <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2021/11/Hydrogen-for-Net-Zero-Full-Report.pdf>.

HyTechCycling (2020), *Assessment of critical materials and components in FCH technologies* (评估 FCH 技术中的关键材料和组件), <http://hytechcycling.eu/wp-content/uploads/d2-1-assessment-of-critical-materials-den-components-in-fch-technologies.pdf>.

Iberdrola (n.d.), “Iberdrola builds the largest green hydrogen plant for industrial use in Europe (Iberdrola 建造欧洲最大的工业应用绿色氢工厂)”, www.iberdrola.com/about-us/lines-business/flagship-projects/puertollano-green-hydrogen-plant.

IEA (2021a), *Net Zero by 2050, A Roadmap for the Global Energy Sector* (到 2050 年实现净零排放, 全球能源部门路线图), International Energy Agency, Paris, https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf.

IEA (2021b), *Methane Tracker 2021 – Analysis* (2021 年甲烷追踪 — 分析), IEA, Paris, www.iea.org/reports/methane-tracker-2021.

IEA (2021c), *Global Hydrogen Review 2021* (2021 年全球氢能回顾), IEA, Paris, www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021.

IEA (2021d), “Could the green hydrogen boom lead to additional renewable capacity by 2026? (到 2026 年绿色氢热潮能否带来额外的可再生能源产能?)”, IEA, Paris, 1 December, www.iea.org/articles/could-the-green-hydrogen-boom-lead-to-additional-renewable-capacity-by-2026.

IEA (2021e), *Global EV Outlook 2021* (2021 年全球电动汽车展望), IEA, Paris, www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021.

IEA (2021f), *World Energy Outlook 2021* (2021 年世界能源展望), IEA, Paris, www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021.

IEA (2021g), *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions* (关键矿物在清洁能源转型中的作用), IEA, Paris.

IEA (2020), *World Energy Outlook 2020* (2020 年世界能源展望), IEA, Paris, www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020.

IEA (2019a), *The Future of Hydrogen: Seizing today's opportunities* (氢的未来: 抓住现有机遇), IEA, Paris.

IEA (2019b), *Africa Energy Outlook 2019 – World Energy Outlook Special Report* (2019 年非洲能源展望 — 世界能源展望特别报告), IEA, Paris, www.iea.org/reports/africa-energy-outlook-2019.

IPCC, (2021), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis* (2021 年气候变化: 物理学基础). *Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.

IRENA and ILO (2021), *Renewable Energy and Jobs – Annual Review 2021* (可再生能源与就业 — 2021 年年度回顾), International Renewable Energy Agency, International Labour Organization, Abu Dhabi, Geneva.

IRENA, IEA, REN21 (2020), *Renewable energy policies in a time of transition: Heating and cooling* (转型时期的可再生能源政策: 供暖和制冷), IRENA, Abu Dhabi.

IRENA INSPIRE webtool (2021), <http://inspire.irena.org/Pages/home.aspx> (accessed 13 January 2022).

IRENA (forthcoming-a), *Global hydrogen trade to meet the 1.5 °C climate goal: Part II – Technology review of hydrogen carriers* (实施全球氢贸易以实现 1.5°C 气候减排目标: 第二部分 - 氢载体的技术审查), IRENA, Abu Dhabi.

IRENA (forthcoming-b), *Green hydrogen for industry: A guide to policy making* (应用于工业用途的绿色氢: 政策制定指南), IRENA, Abu Dhabi.

IRENA (2021a), *World Energy Transitions Outlook* (世界能源转型展望), IRENA, Abu Dhabi.

IRENA (2021b), *Green Hydrogen Supply: A Guide to Policy Making* (绿色氢的供应: 政策制定指南), IRENA, Abu Dhabi.

IRENA (2021c), *Renewable Power Generation Costs in 2020* (2020 年使用可再生能源发电的成本), IRENA, Abu Dhabi.

IRENA (2021d), *A pathway to decarbonise the shipping sector by 2050* (到 2050 年航运业实现脱碳的路径), IRENA, Abu Dhabi.

IRENA (2021e), “Majority of new renewables undercut cheapest fossil fuel on cost (大多数新的可再生能源成本比最便宜的化石燃料价格更低)”, 22 June, www.irena.org/newsroom/pressreleases/2021/Jun/Majority-of-New-Renewables-Undercut-Cheapest-Fossil-Fuel-on-Cost.

IRENA (2020a), *Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal* (降低绿色氢的成本: 扩大电解槽的部署以满足 1.5°C 气候目标), IRENA, Abu Dhabi.

IRENA (2020b), *Green Hydrogen: A Guide to Policy Making* (绿色氢: 政策制定指南), IRENA, Abu Dhabi.

IRENA (2020c), *Energy subsidies: Evolution in the global energy transformation to 2050* (能源补贴: 到 2050 年全球能源转型的演变), IRENA, Abu Dhabi.

IRENA (2019a), *A New World: The Geopolitics of the Energy Transformation* (新世界: 能源转型中的地缘政治), IRENA, Abu Dhabi.

IRENA (2019b), *Renewable Energy Market Analysis: GCC 2019* (可再生能源市场分析: 2019 年 GCC 地区), IRENA, Abu Dhabi.

IRENA (2018a), *Renewable Power-To-Hydrogen - Innovation Landscape Brief* (可再生能源制氢 - 创新格局简介), IRENA, Abu Dhabi.

IRENA (2018b), *Water Use in India's Power Generation: Impact of Renewables and Improved Cooling Technologies to 2030* (印度发电用水量: 到 2030 年可再生能源和改进制冷技术的影响), IRENA, Abu Dhabi.

IRENA (2016a), *A Path to Prosperity: Renewable Energy for Islands* (繁荣之路: 岛屿上的可再生能源), IRENA, Abu Dhabi.

IRENA (2016b), *Water Use in China's Power Sector: Impact of Renewables and Cooling Technologies to 2030* (中国电力部门用水量: 到 2030 年可再生能源和制冷技术的影响), IRENA, Abu Dhabi.

IRENA (2015), *Renewable Energy in the Water, Energy and Food Nexus* (水、能源和食物关系中的可再生能源), IRENA, Abu Dhabi.

Jaffe, A.M. and R. Soligo (2006), “Market Structure in the New Gas Economy: Is Cartelisation Possible? (新天然气经济中的市场结构: 是否存在卡特尔化可能性?)” *In Natural Gas and Geopolitics: From 1970 to 2040*, pp. 439-464, Cambridge University Press, New York.

Japan Ministry of Environment (2020), *Summary of Japan's hydrogen strategy* (日本氢能战略概要), www.env.go.jp/seisaku/list/ondanka_saisei/lowcarbon-h2-sc/PDF/Summary_of_Japan's_Hydrogen_Strategy.pdf.

Keohane, R.O. and J.S.Nye (2001), *Power and Interdependence* (权力与相互依存) (3rd ed.), Longman, New York.

Khalili S., (2019), “Global Transportation Demand Development with Impacts on the Energy Demand and Greenhouse Gas Emissions in a Climate-Constrained World (全球运输需求发展对气候约束世界的能源需求以及温室气体排放的影响)”, *Energies*, Vol. 12, No. 20, 3870. <https://doi.org/10.3390/en12203870>.

Kiemel, S., et al.(2021), “Critical materials for water electrolysers at the example of the energy transition in Germany (以德国能源转型为例的水电解槽关键材料)”, *International Journal of Energy Research*, Vol. 45(7), pp. 9914-9935.

Kleen, G. and E. Padgett (2021), *Durability-adjusted fuel cell system cost* (调整耐久性后的燃料电池系统成本), US Department of Energy, 8 January, www.hydrogen.energy.gov/pdfs/21001-durability-adjusted-fcs-cost.pdf.

The Korea Herald (2019), “S. Korea to build 3 hydrogen-powered cities by 2022 (韩国将于 2022 年之前建成 3 座氢动力城市)”, 10 October, www.koreaherald.com/view.php?ud=20191010000806, (accessed 13 January 2022).

Koyama, K. (2021), “China replaced Japan as world's largest LNG importer in 1st half of 2021: A Japanese perspective on the international energy landscape (2021 年上半年中国取代日本成为全球最大液化天然气进口国: 从日本视角看国际能源格局)”, 26 July, Institute of Energy Economics, Japan.

La Repubblica (2021), “Snam, Alverà guarda al futuro: dalla Gigafactory allo stoccaggio” [Snam, Alverà looks to the future: From Gigafactory to storage] (Snam, Alverà 的未来展望: 从千兆级别工厂到储存方式), https://finanza.repubblica.it/News/2021/11/29/snam_alvera_guarda_al_futuro_dalla_gigafactory_allo_stoccaggio-101/.

Longden, T., et al. (2022), “‘Clean’ hydrogen? – Comparing the emissions and costs of fossil fuel versus renewable electricity based hydrogen (‘清洁’ 氢? — 比较化石燃料与基于氢的可再生能源电力的排放和成本)”, *Applied Energy*, Vol. 306, Part B, 118145, www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261921014215#s0010.

Lovins, A. (2021a), “Profitably decarbonizing heavy transport and industrial heat: transforming these ‘harder-to-abate’ sectors is not uniquely hard and can be lucrative (推动重型运输和工业供热部门脱碳盈利: 改造这些“减排难度较高”部门并非特别困难, 并且可能有利可图)”, RMI Innovation Center, Basalt, CO, www.rmi.org/profitable-decarb/.

Lovins, A. (2021b), “Decarbonizing our toughest sectors – profitably (推动我们最艰难的行业脱碳 — 有利可图)”, *MIT Sloan Management Review*, 4 August, <https://sloanreview.mit.edu/article/decarbonizing-our-toughest-sectors-profitably/>.

Ludwig, M., (2021), The Green Tech Opportunity in Hydrogen (氢的绿色技术机遇), April 12, www.bcg.com/en-in/publications/2021/capturing-value-in-the-low-carbon-hydrogen-market.

Mander, B. (2020), “Chile seeks to turn solar boom into green hydrogen bonanza (智利希望将其太阳能热潮转变为绿色氢的繁荣情景)”, *Financial Times*, 31 August, www.ft.com/content/16481d72-1495-4b24-9c59-97ea9a856cc1, (subscription required).

McWilliams, B. and G. Zachmann (2021), “A new economic geography of decarbonisation? (脱碳的新经济地理学?)”, Bruegel, 8 November, www.bruegel.org/2021/11/a-new-economic-geography-of-decarbonisation/#:-:text=The%20interactive%20map%20allows%20users,encouraged%20to%20experiment%20for%20themselves.

MEM (2021), Green Hydrogen Roadmap (绿色氢路线图), Ministry of Energy, Mining, and Environment, Government of Morocco, www.mem.gov.ma/Lists/Lst_rapports/Attachments/36/Feuille%20de%20route%20de%20hydrog%C3%A8ne%20vert.pdf.

METI (2017), *Basic hydrogen strategy (基本氢能战略)*, Ministry of Economy, Trade and Industry, Government of Japan, 26 December, www.meti.go.jp/english/press/2017/pdf/1226_003b.pdf, (accessed 13 January 2021).

Minke, C. et al. (2021), “Is iridium demand a potential bottleneck in the realisation of large-scale PEM water electrolysis? (铱需求是否为实现大规模 PEM 水电解应用的潜在瓶颈?)”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 46, Issue 46, pp. 23581-23590.

Mission Possible Partnership (2021), *Net Zero Steel: Sector Transition Strategy (净零钢铁: 行业转型战略)*, October 2021.

MOEF (2020), *Korea’s green new deal (韩国的绿色新政)*, Ministry of Economy and Finance, www.greenclimate.fund/sites/default/files/event/koreas-green-new-deal-moef-international-conference-green-new-deal.pdf.

Moya Rivera, J. and A. Boulamanti (2016), *Production Costs from Energy Intensive Industries in the EU and Third Countries (欧盟和第三国能源密集型产业的生产成本)*, EUR 27729, JRC100101, Publications Office of the European Union, Luxembourg, <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/7e4fe297-084c-11e6-b713-01aa75ed71a1/language-en>.

Muttitt, G. et al. (2021), *Step off the gas: International public finance, natural gas and clean alternatives in the Global South (停止使用天然气: 发展中国家国际公共财政、天然气和清洁能源替代)*, International Institute for Sustainable Development, June.

Nagashima, M. (2018), *Japan’s hydrogen strategy and its economic and geopolitical implications (日本的氢能战略及其经济和地缘政治影响)*, French Institute of International Relations (IFRI), October, www.ifri.org/sites/default/files/atoms/files/nagashima_japan_hydrogen_2018_.pdf.

Niermann, M. et al. (2019), “Liquid organic hydrogen carriers (LOHCs)—techno-economic analysis of LOHCs in a defined process chain (液态有机氢载体 (LOHCs) — 特定工艺链中 LOHC 的技术经济分析)”, *Energy and Environmental Science*, Vol. 12, No. 1, pp. 290-307.

Open Grid Europe (2021), *H2morrow: Act today to be greenhouse gas neutral by 2050 (H2morrow: 今天即刻采取行动, 到 2050 年实现温室气体中和)*, <https://oge.net/en/us/projects/our-hydrogen-projects/h2morrow>.

Patonia, A. (2021), “Hydrogen: Savior or boondoggle for Russia? (氢能: 俄罗斯的救星还是幻想?)” 18 August, www.gmfus.org/news/hydrogen-savior-or-boondoggle-russia.

Paulsson, L. and M. Durisin (2021), “Energy crunch hits pig slaughter and fertilizers in risk to food (能源紧缩影响生猪屠宰场和肥料, 进而对食物构成威胁)”, *Bloomberg*, 17 September, www.bloomberg.com/news/articles/2021-09-17/europe-s-energy-woes-hit-fertilizers-in-another-threat-to-food, (subscription required).

Philibert, C. (2017), Renewable Energy for Industry: From Green Energy to Green Materials and Fuels (工业可再生能源: 从绿色能源到绿色材料和燃料), *IEA Insights Series*, OECD/IEA, Paris, https://iea.blob.core.windows.net/assets/48356f8e-77a7-49b8-87de-87326a862a9a/Insights_series_2017_Renewable_Energy_for_Industry.pdf.

Platinum Matthey, (n.d.), <http://www.platinum.matthey.com/prices/price-charts>.

Pollard, S. (1981), *Peaceful Conquest: The Industrialization of Europe (和平征服: 欧洲的工业化) - 1760-1970*, Oxford University Press, Oxford.

Port of Rotterdam Authority (2020), “Hydrogen vision (氢能愿景)”, 7 May, www.portofrotterdam.com/sites/default/files/2021-06/hydrogen-vision-port-of-rotterdam-authority-may-2020.pdf.

Piria, R. et al.(2021), “Critical review of the IPHE working paper ‘Methodology for determining the GHG emissions associated with the production of hydrogen’ (针对 IPHE 工作文件“确定氢生产相关温室气体排放的方法”的批判性评论)”, Adelphi and Öko Institut e.V., www.adelphi.de, (accessed 13 January 2022).

Prinzhofer, A., C.S.T.Cissé and A.B.Diallo (2018), “Discovery of a large accumulation of natural hydrogen in Bourakebouougou (Mali) (在Bourakebouougou (马里) 发现大量天然氢)”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 43, No. 42, pp. 19315-19326.

Radowitz, B. (2021), “Germany eyes world’s cheapest green hydrogen from Namibia amid global ‘race for best sites’ (全球“最佳地点竞赛”中, 德国重点关注来自纳米比亚的全球最便宜的绿色氢)”, *Recharge News*, 25 August.

Ram M. et al.(2020), *Powerfuels in a Renewable Energy World - Global volumes, costs, and trading 2030 to 2050 (可再生能源世界中的动力燃料 — 2030 年至 2050 年的全球数量、成本和贸易)*, LUT University and Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Lappeenranta, Berlin.

Ratcliffe, V., S. El Wardany and M. Martin (2020), “Saudi Arabia aims next to be largest hydrogen exporter (沙特阿拉伯的目标是成为最大的氢出口国)”, *Bloomberg*, 18 November, www.bloomberquint.com/business/biggest-in-oil-saudis-aim-next-to-be-largest-hydrogen-exporter.

Ratcliffe, V., S. Kim and K. Park (2021), “Saudi Arabia to ship gas to South Korea and take CO₂ back (沙特阿拉伯将向韩国运送天然气并带回二氧化碳)”, *Bloomberg*, 3 March, www.bloomberg.com/news/articles/2021-03-03/saudi-arabia-to-ship-gas-to-south-korea-and-take-back-the-co2, (subscription required)

Recharge News (2021a), “Modi pledges massive green hydrogen ‘quantum leap’ to Indian energy independence (莫迪承诺通过绿色氢“突飞猛进”的大规模发展实现印度能源独立)”, 16 August, www.rechargenews.com/energy-transition/modi-pledges-massive-green-hydrogen-quantum-leap-to-indian-energy-independence/2-1-1052701.

Recharge News (2021b), “‘Our largest energy source’: South Korea plans 40 foreign hydrogen bases to meet vast future demand (‘我们最大的能源来源’: 韩国计划在国外建立 40 个氢基地以满足未来的巨大需求)”, 1 December, www.rechargenews.com/energy-transition/our-largest-energy-source-south-korea-plans-40-foreign-hydrogen-bases-to-meet-vast-future-demand/2-1-1110526.

Recharge News (2021c), “New 10GW green hydrogen project in Mauritania could include Africa’s first offshore wind farm (毛里塔尼亚新的 10 GW 绿色氢能项目可能包括非洲首个海上风电场)”, 28 September, www.rechargenews.com/energy-transition/new-10gw-green-hydrogen-project-in-mauritania-could-include-africas-first-offshore-wind-farm/2-1-1074316.

Reuters (2021), “Deutsche Boerse’s EEX to launch hydrogen index in 2022 (德国证券交易所 EEX 将于 2022 年推出氢指数)”, www.reuters.com/business/sustainable-business/exclusive-deutsche-boereses-eex-launch-hydrogen-index-2022-2021-11-24/.

RIA Novosti (2021), “Не только газ: Россия нашла новый способ заработать на Европе” [Not only gas: Russia has found a new way to make money on Europe] (不仅仅是天然气: 俄罗斯找到了在欧洲获利的全新方法), <https://ria.ru/20210505/vodorod-1729501925.html>.

Ritchie, H. (2017), “How many people does synthetic fertilizer feed? (合成肥料养育了多少人口?)”, *Our World in Data*, 7 November, <https://ourworldindata.org/how-many-people-does-synthetic-fertilizer-feed>, updated 30 April 2020.

Romer, R. (2011), “Fuel cell systems provide clean backup power in telecom applications worldwide (燃料电池系统为全球电信应用提供清洁的备用电源)”, *2011 IEEE 33rd International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, pp. 1-2, doi: <https://doi.org/10.1109/INTLEC.2011.6099732>.

Roos, T. and J. Wright (2021), *Powerfuels and Green Hydrogen (动力燃料和绿色氢)*, EU-South Africa, www.euchamber.co.za/wp-content/uploads/2021/02/Powerfuels-Summary-Report-South-Africa-EU-SA_Partners-for-Growth-Final-28-Jan-2021.pdf.

The Russian Government (2021), “Agenda: Draft hydrogen energy development concept, federal support for the regions (议程: 氢能发展概念草案, 联邦对各地区的支持)”, <http://government.ru/en/news/42970/>, (accessed 13 January 2022).

Rystad Energy RenewableCube, (2021), “Green hydrogen projects will stay dry without a parallel desalination market to provide fresh water (如果没有平行的海水淡化市场提供淡水, 绿色氢项目将面临相应挑战)”, Press Release, September 27, www.rystadenergy.com/newsevents/news/press-releases/green-hydrogen-projects-will-stay-dry-without-a-parallel-desalination-market-to-provide-fresh-water, (accessed 13 January 2022).

S&P Global (n.d.), *Hydrogen Price Assessments (氢能价格评估)*, S&P Global Platts.London.

Saunois, M. et al.(2016), “The global methane budget 2000-2012 (2000-2012 年全球甲烷预算)”, *Earth System Science Data*, Vol. 8, No. 2, pp. 697-751. <https://doi.org/10.5194/essd-8-697-2016>.

De Sisternes J., J. Fernando and C.P.Jackson (2020), *Green Hydrogen in Developing Countries (发展中国家/地区的绿色氢)*, World Bank Group, Washington, D.C., <http://documents.worldbank.org/curated/en/953571597951239276/Green-Hydrogen-in-Developing-Countries>.

Smith, A. (1776), *The Wealth of Nations (《国富论》)*, W. Strahan and T. Cadell, London.

Smolinka, T., M. Günther and J. Garche (2011), *Stand und Entwicklungspotenzial der Wasserelektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff aus regenerativen Energien [Status and development potential of electrolysis for the production of hydrogen from renewable energy] (可再生能源电解制氢现状及发展潜力)*, Fraunhofer ISE, www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2020/09/nw-studie-wasserelektrolyse-2011.pdf.

Smyth, J. (2021), “Green groups fume as Canberra rejects world’s biggest renewables project (堪培拉拒绝全球最大的可再生能源项目, 绿色组织怒不可遏)”, *Financial Times*, 21 June, (accessed 13 January 2022).

Steinberger-Wilckens, R. et al.(Eds.)(2017), *The Role of Hydrogen and Fuel Cells in Delivering Energy Security for the UK (氢和燃料电池在为英国提供能源安全方面的作用)*, H2FC Supergen, London.

Strategy Advisory Committee of the Technology Roadmap and the Society of Automotive Engineers of China (SAE-China) (2016), *Hydrogen Fuel Cell Vehicle Technology Roadmap (氢燃料电池汽车技术路线图)*, https://static1.squarespace.com/static/5b7d93fe0dbda3ea011485b9/t/5d93c88ef490cb28e94bd655/1569966226975/FCV+Tech+Roadmap_China.pdf.

Systemiq (2020), *The Paris Effect: How the Climate Agreement is Reshaping the Global Economy (巴黎效应: 气候协议如何重塑全球经济)*, https://www.systemiq.earth/wp-content/uploads/2020/12/The-Paris-Effect_SYSTEMIQ_Full-Report_December-2020.pdf.

Thapliyal, D. (2021), “Fertilizers and the cross-commodity impact of record high gas prices (创纪录的高昂油价对化肥和跨商品的影响)”, Independent Commodity Intelligence Services, www.icis.com/explore/resources/news/2021/10/05/10686659/topic-page-fertilizers-in-the-cross-commodity-impact-of-record-high-gas-prices.

UCL (n.d.), “Economic rents (经济租金)”, University College London, www.ucl.ac.uk/bartlett/public-purpose/research/economic-rents.

UN Comtrade (2021), <https://comtrade.un.org/data>.

UN General Assembly (2009), *Climate change and its possible security implications (气候变化及其可能带来的安全影响)*. Report of the Secretary-General, 11 September United Nations, New York.

UN (2019), *World Population Prospects 2019 (2019 年世界人口展望)*, United Nations, New York.

UNCTAD, (2020), *Review of Maritime Transport (海洋运输回顾)*, 2020, United Nations Conference on Trade and Development, https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2020_en.pdf.

UNESCO (2021), *The United Nations World Water Development Report 2021: Valuing Water (2021 年联合国世界水资源开发报告: 重视水资源)*, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Paris.

UNFCCC (2021), “COP26 world leaders summit- statement on the breakthrough agenda (COP26 世界领导人峰会 — 关于突破性议程的声明)”, *UN Climate Change Conference UK 2021*, United Nations Framework Convention on Climate Change, <https://ukcop26.org/cop26-world-leaders-summit-statement-on-the-breakthrough-agenda/>.

US Congress (2021), *H.R.5376 – Build Back Better Act (重建更好的行为模式)*, www.congress.gov/bill/117th-congress/house-bill/5376/text.

Van de Graaf, T. and B.K.Sovacool (2020), *Global Energy Politics (全球能源政策)*, John Wiley & Sons.

van Wijk, A. and F. Wouters (2021), “Hydrogen-The Bridge Between Africa and Europe (氢 — 非欧之间的桥梁)”, in Weijnen M.P.C., Z. Lukszo and S. Farahani (Eds.)*Shaping an Inclusive Energy Transition*, Springer, Cham, https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-030-74586-8_5.

Verma, N. (2021), “India to require refiners, fertiliser plants to use some green hydrogen (印度要求炼油厂、化肥厂使用部分绿色氢)”, *Reuters*, August 10, (accessed 13 January 2022).

Vortex (2021a), “Global annual average global horizontal irradiation (全球年平均辐照水平)”, *IRENA Global Atlas*, <https://globalatlas.irena.org/workspace>.

Vortex (2021b), “Global annual average wind speed at 100 m height (100 米高度处年平均风速)”, *IRENA Global Atlas*, <https://globalatlas.irena.org/workspace>.

Wang, X. (2021), “Alkaline vs. PEM: Breaking electrolyzer technologies myths (碱性与 PEM 电解槽：打破电解槽技术的传说)”, 28 July, *Bloomberg*, (subscription required).

WEC (2021), “National hydrogen strategies (国家氢能战略)”, *World Energy Council*, London, www.worldenergy.org/assets/downloads/Working_Paper_-_National_Hydrogen_Strategies_-_September_2021.pdf.

Weidlich, B. (2021), “Namibia optimistic about new green hydrogen industry (纳米比亚对新的绿色氢能产业保持乐观态度)”, 8 November, <https://namibian.org/news/economics/namibia-optimistic-about-new-green-hydrogen-industry>.

White, L.V. et al.(2021), “Towards emissions certification systems for international trade in hydrogen: The policy challenge of defining boundaries for emissions accounting (制定国际氢贸易排放认证体系：定义排放核算边界的政策挑战)”, *Energy*, Vol. 215, 119139.

World Bank (n.d.-a), “GDP (current, US\$) (国内生产总值 (现价以美元计算))”, World Bank, Washington DC, <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.CD>.

World Bank (n.d.-b), “Energy imports, net (% of energy use), World Development Indicators (能源进口, 净额 (占能源使用的百分比), 世界发展指标)”, <https://data.worldbank.org/indicator/EG.IMP.CON.S.ZS>.

World Bank (n.d.-c), “Annual freshwater withdrawals, total (billion cubic meters) (年度淡水取水总量 (十亿立方米))”, <https://data.worldbank.org/indicator/ER.H2O.FWTL.K3>.

World Bank (n.d.-d), “Fertiliser consumption (kilograms per hectare of arable land) (化肥消耗量 (千克每公顷耕地))”, <https://data.worldbank.org/indicator/AG.CON.FERT.ZS>.

World Energy Council (2021), *Hydrogen on the horizon: Hydrogen demand and cost dynamics (未来的氢：氢能需求和成本动态)*, World Energy Council, September 2021, www.worldenergy.org/publications/entry/working-paper-hydrogen-demand-and-cost-dynamics.

Zgonnik, V. (2020), “The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review (天然氢的出现与地球科学：综合评论)”, *Earth-Science Reviews*, Vol.203, 103140.



能源转型中的地缘政治

氢因素

在线访问出版物和附件：



www.irena.org

ISBN: 978-92-9260-453-0