

氢和氨在应对净零排放挑战中的作用

概要

氢和氨在使用过程中不会产生碳排放，因此在净零经济中潜力十分巨大。这两种都属于多功能型燃料，生产及使用方式多种多样，包括可再生能源生产以及难以进行脱碳的应用领域，例如重型运输、工业和热能，以及能源的储存和运输。这两种燃料已广泛应用于工业和农业，但目前的生产模式所产生的温室气体足迹依然很高。无论是现有还

是新型应用，均可以通过生产脱碳而实现显著的温室气体减排。然而，这两种燃料目前都面临一定的挑战，有待技术进步才能解决，包括燃料的生产、储存和使用，特别是实现生命周期净零排放的成本。对于氢和氨在具体实践中，可能会对哪些领域产生关键影响的确定，仍需进一步的研究、开发、示范和部署。

思路

- 氢和氨有潜力成为具有竞争力的净零能源来源和多种应用的能源载体。为了更准确地评估这种潜力，需要进行研究、开发、示范和部署。
- 应优先在重工业和重型车辆、铁路、航运以及能源储存等具有很大潜力成为领先的低成本低碳替代方案的行业进行氢和氨示范工作。
- 在工业合作伙伴集群进行大规模示范工作，通常是最具成本效益的方式，其中最适合的通常为港口地区，尤其是进行了海上风电集成的港口地区。
- 在基础设施等方面开展国际合作，有助于在当前试点项目的基础上发展本文提出的成果，同时应充分结合推动进一步创新的研究成果。

1. 氢和氨的现状

1.1 背景

氢是宇宙中含量最多的元素，也是公认的能源载体。氢可用于运输、热能、电力和能源储存，而且，使用过程中不会排放温室气体，因此在净零经济中具有巨大的潜力。氨是氢和氮的化合物，也是一种强大的零碳燃料。

1.2 氢和氨的传统生产与使用

目前最常用的制氢工艺是蒸汽甲烷重整 (SMR)，产物称为“灰”氢¹。每年用于制造灰氢的天然气和煤炭量分别约为全球的 6% 和 2%²。纯氢的全球产量中约有 51% 用于炼油厂（例如用于去除燃料中的硫等杂质），而用于氨合成的比例约为 43%³。其他应用则使用氢气作为一种气体混合物成分，包括工业应用和化学制造中所用甲醇的生产，以及使用电弧炉工艺对铁进行还原，从而实现钢铁的生产。纯氢的需求量每年约达 7000 万吨 (MtH₂/yr)，相比 20 世纪 70 年代增长了三倍³。

氢是最轻的一种元素，体积能量密度较低，难以储存和运输，在许多实际应用中均需进行压缩或液化处理。这些需求均意味着，如今氢气的生产通常需要就近完成。然而，美国墨西哥湾沿岸地区、德国和比荷卢三国等国家均有专门的氢气管道网络^{4,5}。

氨是通过哈伯法 (Haber-Bosch) 工艺，利用氮气及氢气在高温高压的条件下及催化剂的作用下产生的气体⁶。氨最为常见的用途是生产化肥、用作制冷剂，以及制造塑料及其他产品。

氨 (NH₃) 的体积能量密度比氢高，方便储存和运输。全球的氨产量约为 175Mt/yr⁶。

如今的 SMR 和哈伯法都依赖于对天然气和煤炭等化石燃料的使用。氢生产每年排放 8.3 亿吨 CO₂ (MtCO₂/yr)，而氨生产为 420MtCO₂/yr，加起来约占年度全球温室气体 (GHG) 排放的 2%^{7,8,9}。

1.3 氢和氨的安全性及环境因素

氢和氨都会引发一些需要进行管理的安全问题。氢气的闪点很低，相比汽油低很多，例如，在 -43°C 下¹⁰。但是其在空气中需要达到较高浓度 (4%，而汽油只需达到 1.6% 的浓度) 才能燃烧，而且密度低，空气扩散率高，因此弥散迅速，从而可以降低风险^{11,3}。在设计氢气系统时，十分必要的一点就是保持空气流通，同时还要进行泄漏检测。

氨气具有腐蚀性和毒性，在标准条件下，高蒸气压会导致风险增加。不过，氨气在达到一定浓度后，便很容易通过气味觉察出来，然而此时的浓度远未达到产生持久性健康危害的浓度⁶。虽然氢气和氨气已在多种行业安全使用了数十年，但对于新的应用领域而言，仍需重新进行测试。

从环境角度出发同样需要对氨气的新应用领域进行评估，因为氨基肥料会通过氧化亚氮产生 GHG 排放，而且还会产生过量的氮，从而导致生物多样性下降，此外，氨气还会与其他污染物反应形成颗粒物，进而造成空气污染。研究表明，氢气对气候或臭氧层的影响非常小¹²。

对于两种情况而言，即便有些看法并未反映出真实的风险，公众接受度都会面临一定的挑战。

2. 氢和氨的低碳生产与使用

氢和氨为低碳能源的供应创造了机会，能推动 2050 年净零排放目标的实现。然而，根本任务是实现这两种物质的脱碳生产，因为目前其生产均为重工业生产，行业层面的碳足迹远大于几个单独 G7 国家的碳足迹，而这还仅限于目前的应用领域¹³。

2.1 低碳制氢

制氢的方法有多种，每种方法的碳足迹各不相同。图 1 显示了制氢的低碳选项。

蓝氢

“蓝”氢是采用 CO₂ 捕集和封存技术 (CCS) 由化石燃料（通常为天然气）制成的。可以使用传统的 SMR 技术，而目前正在探索新型技术，包括自热转化 (ATR)，即通过引入氧气燃烧部分原料而非单独燃烧天然气来提供能量¹⁴。虽然这项技术无法完全实现净零目标，但据估计，碳排放的捕集率可高达 95%¹⁵。当然，具体还要取决于 CCS 的发展与部署。目前，还在探索多种变化形式，包括新型膜、溶剂、吸附剂和催化剂¹⁶。

甲烷是一种强效温室气体，因此必须小心预防，同时要回收任何上游甲烷泄漏。

蓝氢目前已经大规模运行，例如，在美国德克萨斯州的 Air Products Steam Methane Reformer、加拿大阿尔伯塔的 Shell Quest CCS 设施¹⁷，以及法国杰罗姆港的 Air Liquide 设施¹⁸。

绿氢

“绿”氢是利用可再生能源，通过电解分离出水中的氢，从而实现零碳的一种制氢方式。目前最成熟的技术为碱性电解槽，但对于间歇式可再生能源的应用而言效果不佳。聚合物电解质膜 (PEM) 电解槽属于较新的技术，对可再生能源的波动反应迅速，处于早期部署阶段。固体氧化物电池电解槽 (SOEC) 的工作温度相对更高，发展尚不成熟，但效率可能更高。绿氢依赖可再生能源，因此可能会受到可再生能源水平的限制。例如，如果目前全球使用的所有氢均依赖于电解生产，那么每年将需要 3600 太瓦时 (TWh) 的电量，这个数字比欧盟的总发电量还要多³。

其他制氢途径

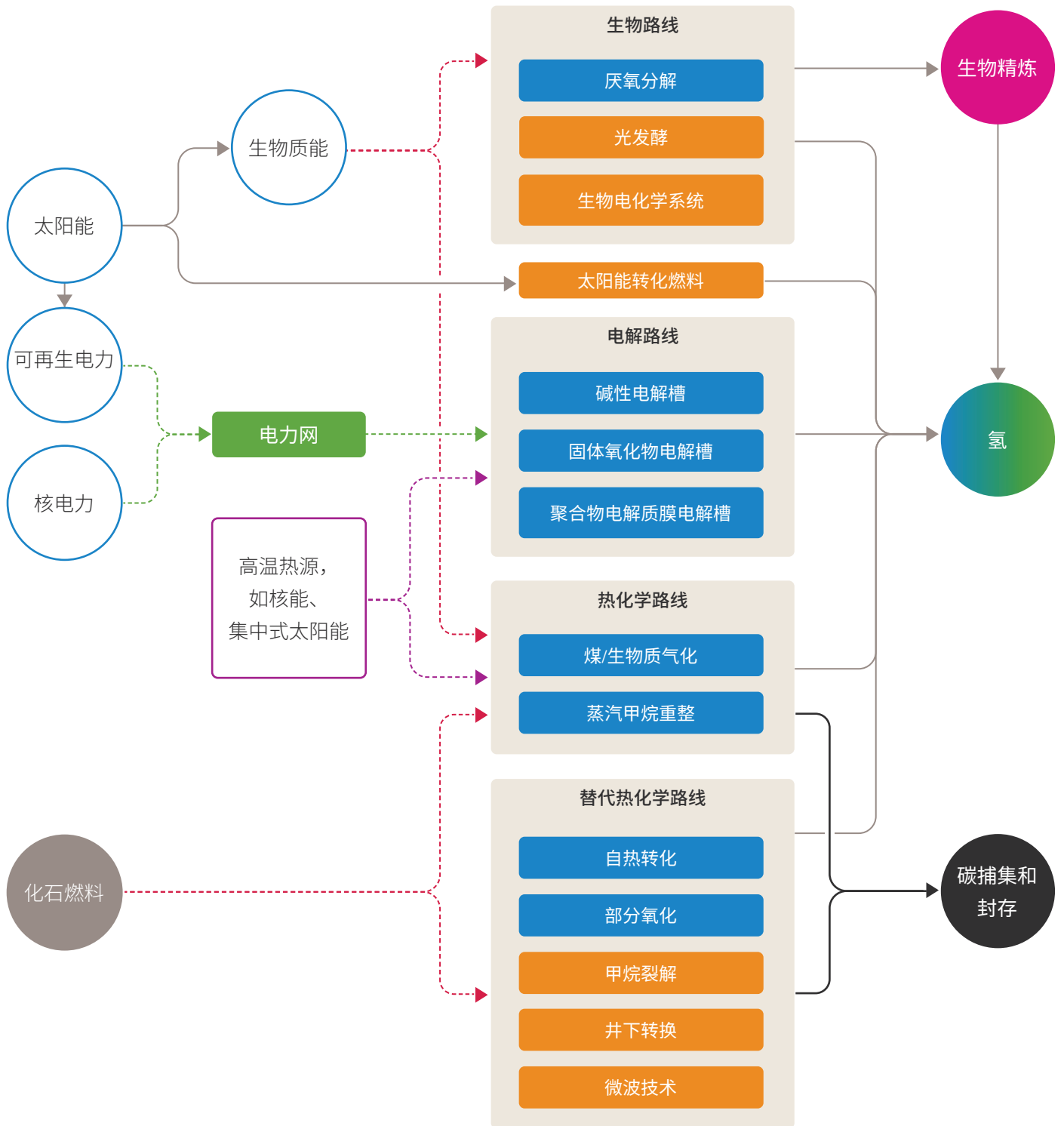
其他可能途径包括通过甲烷热解制成的“蓝绿”氢——在无氧环境中进行加热，这个过程产生的副产物是固体碳而非 CO₂¹⁹，以及使用核能进行电解产生的“粉红”氢。核电也可以提供零碳热，既可以进行高温蒸汽电解（热效率更高），也可以利用 CCS 满足 SMR 的高温要求。

其他途径包括生物方法，即基于厌氧分解变化而产生较低操作温度，以及“太阳能转化燃料”，即直接利用太阳能将水分解为氢和氧。

“绿”氢是利用可再生能源，通过电解分离出水中的氢，从而实现零碳的一种制氢方式。

图 1

低碳氢制取方案原理示意图¹。



图例

■ 现行方法 ■ 未来方法 - - - 原料 — 其他途径 - - - 电途径 — 碳途径 - - - 热途径

2.2 低碳制氨

通过采用目前的哈伯法工艺，利用煤炭制取的氨称为“棕氨”，而使用天然气制取的氨则称为“灰氨”。由蓝氢和绿氢产生的氨分别称为蓝氨和绿氨。如果要将排放降至最低，则需要可再生电力作为哈伯法工艺制取蓝氨和绿氨的能量来源（图 2）。

2.3 低碳氢和氨的应用

对于电力、运输、热能和能源储存净零目标的实现而言，氢和氨可谓潜力巨大。然而，在实际中，某些应用领域可能在不同时间范围内都有更适合的替代技术，而且成本也更低，例如轻型车辆的电池和住宅供暖的热泵。

例如，英国气候变化委员会 (Climate Change Committee) 发布的《第六次碳预算》(Sixth Carbon Budget)“平衡路径”场景设想到 2035 年绿氢或蓝氢的总容量将扩大到相当于目前电力领域的近三分之一，并推广到不太适合电气化的领域，特别是工业和航运领域²⁰。

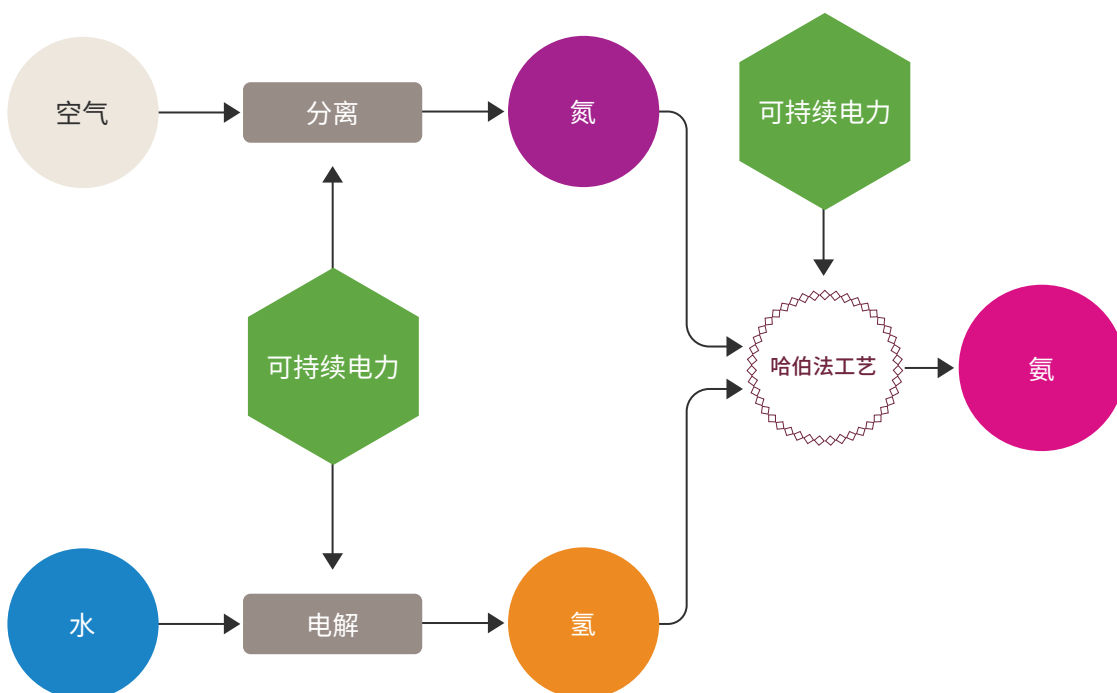
诸多应用领域均涉及结合氢氧（空气来源）的燃料电池，无需燃烧即可制取清洁的电能、热能和热能。2019 年，燃料电池的产量突破了 1 千兆瓦 (GW) 大关，预计将像锂离子电池一样，转向量产“千兆瓦工厂”，从而继续大幅降低单位成本^{21, 22}。

氨的体积能量比氢高，一些特定应用领域已开始考虑使用氨（图 3）。在必要情况下，可以在运输后将氨进行“裂解”，分解为氢或者氨氢混合物。同时，也可以直接用于高温固体氧化物燃料电池发电。

对于电力、运输、热能和能源储存净零目标的实现而言，氢和氨可谓潜力巨大。

图 2

基于电解水制氢和哈伯法工艺完全脱碳的绿氨生产原理示意图⁶。



工业

氢在工业中具有广泛的潜在应用。当前应用领域包括合成氨、甲醇和钢铁的提炼和生产，在使用绿氢或蓝氢的情况下，便可以减少或消除这些领域的碳足迹。

除了当前应用之外，零碳氢还可以用于高温热源以及还原和反应过程。一份英国报告指出，到 2040 年，制造业中大约 40% 的化石燃料均将被氢取代²³。瑞典的一家商用钢厂首次将氢用于炼钢生产的高温加热²⁴。在工业中，氢还可用于高温过程燃烧，而且已用于精炼中的硫回收²⁵。

重型公路车辆

目前，重型车辆的电池能量密度无法提供远程解决方案，而氢燃料电池或氢源燃料则提供了一种低碳替代方案。

丰田 (Toyota)、康明斯 (Cummins) 以及尼古拉 (Nikola) 等制造商均已提出了一些氢动力行动计划^{26,27,28}。现代 (Hyundai) 汽车公司针对瑞士客户生产了一系列 400 公里左右的氢动力卡车²⁹。

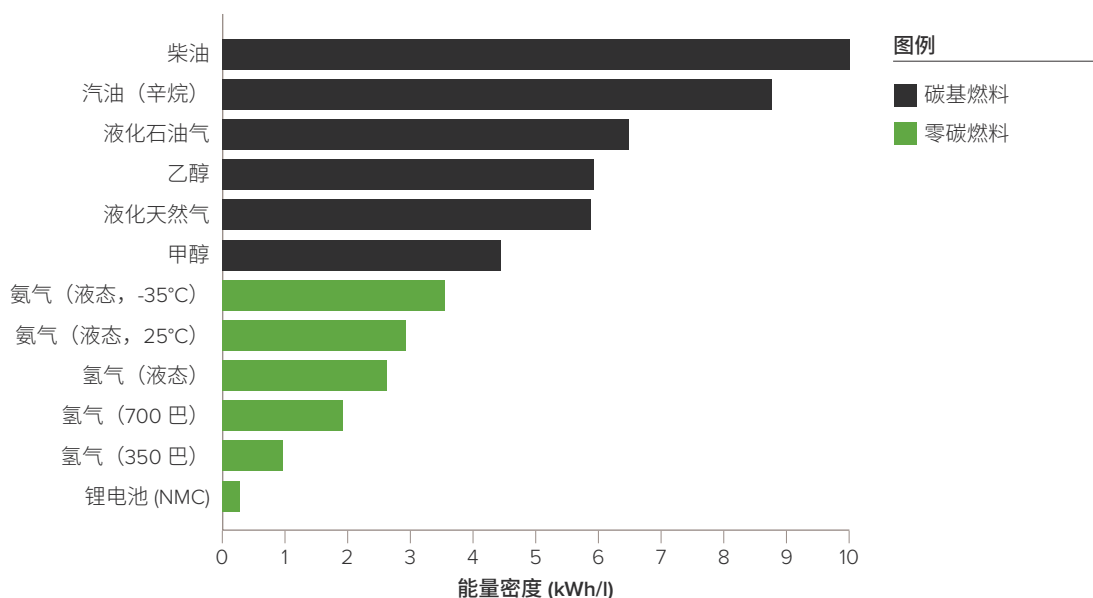
轻型公路车辆

目前，纯电动汽车 (BEV) 相比燃料电池汽车 (FCEV) 更加经济实惠，而且技术已经成熟，因此，氢燃料汽车在汽车市场的发展前景并不明朗。据估计，全球道路上大约有 2.5 万辆 FCEV，而 BEV 的数量则超过了 700 万^{30, 31}。然而，从长远来看，若 FCEV 的生命周期排放量低于 BEV、行驶里程更长，而且在卡车和公交车中的使用能够形成大规模的供应链，那么 FCEV 在未来也有可能大行其道。

截至 2020 年，氢燃料汽车持有量最高的国家为美国，其次为中国、韩国和日本²⁷。

图 3

多种燃料选择的体积能量密度⁶。



叉车可谓是氢燃料电池的一大利基市场。目前，氢燃料叉车的数量已超出氢燃料小型汽车，投入使用的约有 3 万辆。燃料电池叉车续加燃料简单，无空气污染，适合仓库使用³²。

海运

国际海事组织的目标是在 2030 年需要将国际航运碳排放强度至少降低 40%，而低碳氨是实现这一目标强有力的候选燃料，因此对所有海运国家/地区而言均裨益无穷³³。目前，为了确保以氨为燃料运行的大型燃料电池能够安全有效地为舰载系统提供电力，已陆续开展一些项目。具体包括计划对日本的一艘大型散货船安装氨燃料系统，以及在世界上最大的滚装邮轮——挪威彩色幻想号上安装氨燃料系统试航计划^{34, 35}。

铁路

德国已投入运行氢燃料电池驱动列车，荷兰和英国等国家也在开展试验。对于未实现电气化铁路建设的路线，氢燃料列车可谓是零碳之选³。而在此方面所面临的挑战包括储存问题，因为燃料需求量大约是柴油的 8 倍，而如果使用电解燃料，对可再生能源的需求又很高³⁶。

航空

航空工业也在探索氢和氨燃料的使用。例如，空中客车 (Airbus) 正在计划开发混合氢飞机，通过改装的燃气涡轮发动机燃烧氢提供动力³⁷。

与此同时，英国的一个项目正在探索一种新型技术，希望将部分绿氨分解成氢气，制造出一种混合燃料，通过稳定燃烧模拟航空燃料，从而使现有的引擎和飞机实现零排放燃料的使用³⁸。

合成燃料

通过费托合成过程，将捕集的 CO₂ 与氢气进行反应而生产出用途广泛的合成燃料。这种燃料

可能会成为航空机队的一种低碳型普适性替代燃料，以及卡车或船舶的一种可选方案³⁹。

储存与运输

氢气可以在地下洞室中以气态形式进行压缩，也可以进行液化处理，或者（对于无人机之类的小型应用）结合到金属氢化物等固态材料中。储存时，氢必须以气体形式压缩至大气压的 350 至 700 倍左右，或以液体形式低温冷却至 -253°C⁴⁰。氨的密度相比较较大，只需压缩至大气压的 10 倍或冷却至 -33°C⁶。氨作为原料广泛用于矿物肥料，因此储存技术的发展已相对成熟。

氢和氨都是应对电力需求季节性变化的首选，也可以作为可再生能源间歇性发电的短期后备之选。此外，还可以将氢或氨用于将太阳能和风能充足地区的可再生能源所产生的能源输送到数千公里外的需求中心。

电力

氢或氨还可以使用燃料电池或者驱动涡轮机进行发电^{41, 42}。目前已开始规划使用燃料电池的千兆瓦级发电厂工作，而较小规模的发电厂已在数据中心完成试验⁴³。

还可以从天然气中捕集 CO₂，将剩余的氢气直接在涡轮机中燃烧发电。然而，这一过程需要对设备和工艺进行更改，虽然制造商正在开发可充氢的涡轮机，但这种技术尚未得到大规模应用^{44, 39}。

阳光和风能充足的地区，包括许多低收入国家，可以将所产生的能源以氢或氨的形式储存起来，用于多种用途，从工业和交通运输到用于紧急服务的电力和偏远地区的能源供应等方面⁴⁵。

氢和氨都是应对电力需求季节性变化的首选，也可以作为可再生能源间歇性发电的短期后备之选。

截至 2021 年，已有 30 多个国家/地区发布了氢路线图，各国政府承诺要投放 700 多亿美元的公共资金。

住宅供暖

同时，氢也是住宅建筑供热的一种可能途径，可以完全或部分取代天然气，尽管就规模而言可能存在相当大的挑战。每户的锅炉和炊具改装费用估计在 2000 至 4000 英镑之间⁴⁶。氢气还会导致钢管及铁管脆化，不过英国等国家正在研究钢管材质的转换，从金属改装为塑料⁴⁷。纯氢试验项目包括荷兰鹿特丹的一座公寓楼，以及德国霍尔兹威克德的住宅^{48, 49}。其他项目则是将氢气和天然气混合用于住宅供暖，在意大利的萨莱诺 (Salerno) 达到了 10%，在英国的基尔 (Keele) 达到了 20%^{50, 51}。英国计划扩大氢供暖与烹调试验的规模，在 2023 年扩大到一个社区，2025 年扩大到一个村庄，2030 年扩大到一座城镇⁵²。住宅供热的主要竞争技术是热泵。

2.4 当前发展

自 2015 年《巴黎协定》签署以来，公共和私营部门的活动激增。

政府策略

截至 2021 年，已有 30 多个国家/地区发布了氢路线图，各国政府承诺要投放 700 多亿美元的公共资金⁵³。例如，欧盟战略预期在 2050 年，氢能满足大约四分之一的能源需求⁵⁴。英国和德国政府的计划均包括在 2030 年之前，将低碳氢产能扩大到 5 GW⁴⁹。

在交通工具方面，中国的目标是在 2030 年之前，生产 100 万辆氢燃料汽车，建立 1000 个燃料补给站，这也是加州设立的目标^{3, 55}。韩国的发展路线是，在 2040 年之前生产 600 万辆 FCEV，同时建立 1200 个燃料补给站⁵⁶。

私营部门投资

同时，氢气还掀起了一股新的商业热潮。2017 年，为了聚集相关企业，氢气理事会正式成立，发展至今成员已达到了 100 多家。

近年来，私营部门交易量激增。例如，总部位于加拿大的燃料电池龙头企业氢燃料电池公司 (Hydrogenics) 于 2019 年被康明斯 (Cummins) 收购⁵⁷；总部位于英国的电解槽领先制造商 ITM Power 筹集了 1.72 亿英镑投资利用可再生能源开发氢气⁵⁸；总部位于英国的 Ceres Power 主营燃料电池堆开发制造工作，目前已吸引到了博世 (Bosch) 和潍柴动力 (Weichai Power) 的投资^{59, 60}。

大型项目

计划中的蓝氢项目包括在公共部门扶持下，公司集团之间开展合作，围绕的问题主要是拥有产业集群的港口和海底储存通道。这类项目包括英国提出的净零提赛德 (Net Zero Teesside)、零碳亨伯 (Zero Carbon Humber) 和 HyNet 项目，而共同的最终计划是将英国工业排放脱碳率提高到近 50%，并在北海和爱尔兰海下进行储存^{61, 62}。

目前已有几大千兆瓦级绿氢项目正式宣布，包括荷兰 8800 万欧元的 Heavenn 项目，英国的 Gigastack 项目，以及荷兰-佛兰德北海港口产业集群的 SeaH2Land 项目^{63, 64, 65}。

其他项目计划将绿氢转换为氨进行出口。在澳大利亚西海岸，价值 360 亿美元的亚洲可再生能源中心 (Asian Renewable Energy Hub) 项目将面向澳大利亚和亚洲出口市场生产绿氢和氨气^{66, 67}。该项目位于红海沿岸的沙特阿拉伯新未来城 (Neom)，耗资 50 亿美元，将利用 2 GW 的碱性电解槽厂生产氢气，将其转换为 1.2Mt/yr 的绿氨，出口后再转化为氢气⁶⁸。

3. 进展空间与部署机会

随着成本的下降、效率的提高以及各个领域不断推出的最佳解决方案，氢气和氨气的潜力将随之增加。

3.1 成本

预测表明，随着 CCS 和电解槽技术的进步以及工业学习速度的加快，绿氢和蓝氢在未来十年竞争力可能会明显增加⁶⁹。欧盟估计，目前灰氢的生产成本为 \$1.80/kg，蓝氢的生产成本为 \$2.40/kg，绿氢的生产成本为 \$3.00–6.60/kg。如需提高蓝氢相比灰氢的竞争力，需将碳价格控制在 €55-90 t/CO₂ 范围内^{65, 70}。另一组预测估计，到 2030 年，可再生氢的生产成本可能会下降到 \$1.40–2.30/kg，部分地区的绿氢和灰氢将在 2028 年左右达到成本平价，而其中的一大关键要素就是可再生电力成本⁵⁰。

传统的“棕”氨生产仍然是最便宜的方式，成本在每公吨 \$280 以内，不过，若仅捕集工艺排放，蓝氨几乎可以与之竞争。绿氨的成本会受当地可再生能源成本的影响，因此差别很大，在太阳能和风能资源充裕的地区，甚至可以和蓝氨相媲美。

3.2 示范及部署策略

人们普遍认为，在可能的情况下，最佳的使用方式就是直接使用可再生电力，但在没有直接出路的情况下，将其转化为氢气可能是最行之有效的办法。

对于氢而言，生产地最常用的方法就是直接使用，而如果不能立即或现场使用，则可以储存起来，通过管道运输、液化处理或者通过船舶或管道拖车运输用于电力。如果仍不可行，可以将其转化为氨或其他载体进行运输，之后再转化为氢。如果不进行再转化，氨可以直接用于传统的化肥和制冷用途。氨气专家还强调，氨气的密度和“可燃性”比较特殊，适合直接用作运输燃料或储存介质。

低碳氢的优点在于可减少目前使用（氨的生产、精炼和化学品）的碳足迹。接下来最有可能的应用包括发电及重型运输车辆的燃料电池和工业直接燃氢释放热能；其次是长期能源储存、住宅供暖以及合成液体燃料的生产。

对于氢或氨被认为是最佳方式的地方，短期投资可侧重于开展示范项目和基础设施试验来扩大规模，可以通过挑战资金或经费进行激励。对于具有增长条件的情况，例如工业港口附近和卡车车队，可以迅速开展示范项目。蓝氢可能在短期内发展迅猛，特别是对于资金由企业集群和公共部门共享的情况。而对于绿氢，则需要扩大生产规模并持续发展电解槽系统。

对于具有增长条件的情况，例如工业港口附近和卡车车队，可以迅速开展示范项目。

3.3 研发重点工作

为了充分发挥氢和氨的潜力，推动净零目标的实现，需要应对诸多研究挑战，再大规模进行开发以及示范工作。重点工作内容：

- 电解槽是绿氢研究的关键组成部分，因此属于重点研究内容。开发改良电极以及新型催化剂和膜可以降低成本。
- 固体氧化物电解槽需要在高温环境下工作，潜在效率高，因此也属于重点研究内容。
- 有一组有趣的技术可以在不需要电力的情况下直接分解水，包括太阳能转化燃料和利用光子减少 CO₂（转化为 CO）。
- 通过电化学法等将氮直接还原为氨是哈伯法工艺的替代方法，也是基础研究中的一大重要挑战。
- 加强燃料电池研发工作，降低成本，发展可回收技术。

- 为了最大限度提高效率和使用寿命，需要对所有能量转换途径进行研究。在催化、电催化、膜、电化学和电化学工程等领域均存在基础进展的空间。
- 目前，部分燃料电池和电解槽技术开始使用铂和铱氧化物，而这进一步引发了矿物可用性和成本问题。
- 因此需要找到一种综合方法，兼顾整个生命周期、确定系统不同部分之间的相互作用，同时充分利用协同作用。
- 此外，还需要具备资质的各级技术人员负责这类技术的开发、制造、安装和安全维护。政策制定者现在可以采取行动，鼓励这类能力，纳入其“STEM”议程内容。

总结

氢和氨是实现净零能源组合的关键要素，特别是在能源密集型地区。但这并非唯一的选择，如果决策者希望确定氢和氨与替代方案相比的全部可能性，则需要加快研究、开发和示范项目的工作进程。

本简报只是探讨科学技术在全球实现净零排放和适应气候变化中作用的系列简报中的一篇。世界各国都在制定各自在 2050 年之前实现净零的路线图，该系列简报旨在就科学所能有助于理解和采取行动的 12 个方面，为各国决策者献计献策。

要观看完整系列内容，请访问 royalsociety.org/climate-science-solutions

要查看简报编著人，请访问 royalsociety.org/climate-solutions-contributors

本文中的文本根据《创作共用署名许可协议》(Creative Commons Attribution License) 条款授权使用，该协议允许在注明原作者和出处来源的前提下，进行无限制使用。许可协议访问网址：creativecommons.org/licenses/by/4.0

发布日期：2021 年 6 月 DES7639_4 © The Royal Society

参考文献

1. The Royal Society. 2018 Options for producing low-carbon hydrogen at scale. 参见 <https://royalsociety.org/topics-policy/projects/low-carbon-energy-programme/hydrogen-production/> (访问日期 2020 年 12 月 10 日)。
2. The International Energy Agency. Hydrogen 参见 <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/hydrogen> (访问日期 2020 年 12 月 10 日)。
3. The International Energy Agency. 2019 The Future of Hydrogen. 参见 <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen> (访问日期 2020 年 12 月 10 日)。
4. US Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. Hydrogen Pipelines. 参见 <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-pipelines> (访问日期 2020 年 12 月 12 日)。
5. Ausfelder F *et al.* 2017 Energy Storage as Part of a Secure Energy Supply. *ChemBioEng Reviews* **4**, 144–210. (doi:10.1002/cben.201700004)
6. The Royal Society. 2020 Ammonia: zero-carbon fertiliser, fuel and energy store. 参见 <https://royalsociety.org/topics-policy/projects/low-carbon-energy-programme/green-ammonia/> (访问日期 2020 年 12 月 12 日)。
7. Organisation for Economic Co-operation and Development. OECD Statistics Greenhouse gas emissions. 参见 https://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=AIR_GHG (访问日期 2020 年 12 月 12 日)。
8. Liu X, Elgowainy A, Wang M. 2020 Life cycle energy use and greenhouse gas emissions of ammonia production from renewable resources and industrial by-products. *Green Chem.* **22**, 5751–5761. (doi:10.1039/d0gc02301a)
9. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency. 2020 Trends in Global CO₂ and Total Greenhouse Gas Emissions. 参见 https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2020-trends-in-global-co2-and-total-greenhouse-gas-emissions-2020-report_4331.pdf (访问日期 2020 年 12 月 12 日)。
10. Nazir H *et al.* 2020 Is the H₂ economy realizable in the foreseeable future? Part III: H₂ usage technologies, applications, and challenges and opportunities. *International Journal of Hydrogen Energy* **45**, 28217–28239. (doi:10.1016/j.ijhydene.2020.07.256)
11. World Economic Forum. 2019 Hydrogen power is safe and here to stay. 参见 <https://www.weforum.org/agenda/2019/04/why-don-t-the-public-see-hydrogen-as-a-safe-energy-source/> (访问日期 2020 年 12 月 12 日)。
12. Department for Business, Energy & Industrial Strategy. 2018 Hydrogen for Heating: Atmospheric Impacts. 参见 https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/760538/Hydrogen_atmospheric_impact_report.pdf (访问日期 2020 年 12 月 15 日)。
13. Union of Concerned Scientists. 2020 Each Country's Share of CO₂ Emissions. 参见 <https://www.ucsusa.org/resources/each-countrys-share-co2-emissions> (访问日期 2020 年 12 月 15 日)。
14. The Chemical Engineer. 2019 Clean Hydrogen Part 1: Hydrogen from Natural Gas through cost effective CO₂ capture. 参见 <https://www.thechemicalengineer.com/features/clean-hydrogen-part-1-hydrogen-from-natural-gas-through-cost-effective-co2-capture/> (访问日期 2020 年 12 月 15 日)。
15. Johnson Matthey. Blue Hydrogen <https://matthey.com/en/markets/energy-generation-and-storage/hydrogen/low-carbon-hydrogen> (访问日期 2020 年 12 月 15 日)。
16. Yan Y *et al.* 2020 Process simulations of blue hydrogen production by upgraded sorption enhanced steam methane reforming (SE-SMR) processes. *Energy Conversion and Management* **222**, 113144. (doi:10.1016/j.enconman.2020.113144)
17. Global CCS Institute. 2020 The Global Status of CCS Report 2020. 参见 <https://www.globalccsinstitute.com/resources/global-status-report/> (访问日期 2020 年 12 月 15 日)。
18. Air Liquide. Cryocap CO₂ cold capture system. 参见 <https://www.airliquide.com/magazine/cryocap-co2-cold-capture-system-unlike-any-other-in-the-world> (访问日期 2020 年 12 月 15 日)。
19. Sánchez-Bastardo N, Schlögl R, Ruland H. 2020 Methane Pyrolysis for CO₂-Free H₂ Production: A Green Process to Overcome Renewable Energies Unsteadiness. *Chemie Ingenieur Technik* **92**, 1596–1609. (doi:10.1002/cite.202000029)
20. Climate Change Committee. 2020 Sixth Carbon Budget. 参见 <https://www.theccc.org.uk/publication/sixth-carbon-budget/> (访问日期 2020 年 12 月 21 日)。
21. E4tech. 2020 Fuel Cell Industry Review 2019 – The Year of the Gigawatt. 参见 <https://www.e4tech.com/news/2018-fuel-cell-industry-review-2019-the-year-of-the-gigawatt.php> (访问日期 2020 年 12 月 21 日)。
22. Green Car Congress. TECO 2030 aims to build hydrogen fuel cell Gigafactory in Norway. 参见 <https://www.greencarcongress.com/2021/02/20210218-teco.html> (访问日期 2020 年 12 月 21 日)。
23. Element Energy. 2018 Industrial Fuel Switching Market Engagement Study. 参见 https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/824592/industrial-fuel-switching.pdf (访问日期 2020 年 12 月 22 日)。
24. Recharge News. 2020 'World first' as hydrogen used to power commercial steel production. 参见 <https://www.rechargenews.com/transition/world-first-as-hydrogen-used-to-power-commercial-steel-production/2-1-799308> (访问日期 2020 年 12 月 22 日)。
25. Duiker Combustion Engineers. Ammonia combustion equipment. 参见 <https://duiker.com/solutions/renewable-fuels/ammonia-combustion-equipment/> (访问日期 2020 年 12 月 22 日)。
26. Toyota. 2020 Toyota moves closer to production with next generation fuel cell electric technology for zero-emissions heavy duty trucks. 参见 <https://global.toyota/en/newsroom/corporate/34464066.html> (访问日期 2021 年 4 月 20 日)。
27. Cummins. Trucks: designed to deliver. 参见 <https://www.cummins.com/new-power/applications/trucks> (访问日期 2021 年 4 月 20 日)。
28. Nikola. 参见 <https://nikolamotor.com/about> (访问日期 2021 年 4 月 20 日)。
29. Reuters. 2020 Hyundai delivers first fuel cell trucks to Switzerland. 参见 <https://www.reuters.com/article/hyundai-switzerland-hydrogen-trucks/hyundai-delivers-first-fuel-cell-trucks-to-switzerland-idINKBN26S1FM> (访问日期 2020 年 12 月 23 日)。
30. The International Energy Agency. 2020 Advanced Fuel Cells Technology Collaboration Programme. 参见 https://www.ieafuelcell.com/fileadmin/publications/2020_AFCTCP_Mobile_FC_Application_Tracking_Market_Trends_2020.pdf (访问日期 2020 年 12 月 23 日)。
31. The International Energy Agency. 2020 Global EV Outlook 2020. 参见 <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020> (访问日期 2020 年 12 月 23 日)。

32. Autocar. 2020 Hydrogen cars explained: the technology targeting a fuel-cell future. 参见 <https://www.autocar.co.uk/car-news/features/hydrogen-cars-explained-technology-targeting-fuel-cell-future#:~:text=It's%20estimated%20that%20there%20are,the%20next%20decade%20or%20two>。(访问日期 2020 年 12 月 23 日)。
33. International Maritime Organization. Reducing greenhouse gas emission from ships. 参见 <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Reducing-greenhouse-gas-emissions-from-ships.aspx> (访问日期 2020 年 12 月 23 日)。
34. NYK Line. 2020 Joint R&D Starts for Practical Application of Ammonia-fueled Tugboat. 参见 https://www.nyk.com/english/news/2020/20200903_01.html (访问日期 2020 年 12 月 23 日)。
35. Ayval T, Edman Tsang SC, Van Vrijaldenhoven T. 2021 The Position of Ammonia in Decarbonising Maritime Industry: An Overview and Perspectives: Part I: Technological advantages and the momentum towards ammonia-propelled shipping. *Johnson Matthey Technology Review* **65**, 275–290.(doi:10.1595/205651321x16043240667033)
36. The Engineer. 2021 Comment: why hydrogen trains will be a rare sight in the UK. 参见 <https://www.theengineer.co.uk/comment-hydrogen-trains-uk/> (访问日期 2021 年 4 月 20 日)。
37. Airbus. ZEROe Towards the world's first zero-emission commercial aircraft. 参见 <https://www.airbus.com/innovation/zero-emission/hydrogen/zeroe.html> (访问日期 2021 年 1 月 5 日)。
38. Ammonia Energy Association. 2020 Zero emission aircraft: ammonia for aviation. 参见 <https://www.ammoniaenergy.org/articles/zero-emission-aircraft-ammonia-for-aviation/> (访问日期 2021 年 1 月 5 日)。
39. The Royal Society. 2019 Sustainable synthetic carbon based fuels for transport. 参见 <https://royalsociety.org/topics-policy/projects/low-carbon-energy-programme/sustainable-synthetic-carbon-based-fuels-for-transport/> (访问日期 2021 年 1 月 5 日)。
40. US Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. Hydrogen Storage. 参见 <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage#:~:text=Hydrogen%20can%20be%20stored%20physically,pressure%20is%20E%88%92252.8%C2%BC>。(访问日期 2021 年 1 月 5 日)。
41. US Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. Hydrogen: A Clean, Flexible Energy Carrier. 参见 <https://www.energy.gov/eere/articles/hydrogen-clean-flexible-energy-carrier> (访问日期 2021 年 1 月 5 日)。
42. GE Gas Power. Hydrogen fueled gas turbines. 参见 <https://www.ge.com/power/gas/fuel-capability/hydrogen-fueled-gas-turbines> (访问日期 2021 年 1 月 7 日)。
43. Microsoft. 2020 Microsoft tests hydrogen fuel cells for backup power at datacenters. 参见 <https://news.microsoft.com/innovation-stories/hydrogen-datacenters/> (访问日期 2021 年 1 月 7 日)。
44. Drax. 2020 Could hydrogen power stations offer flexible electricity for a net-zero future? 参见 <https://www.drax.com/technology/could-hydrogen-power-stations-offer-flexible-electricity-for-a-net-zero-future/> (访问日期 2021 年 1 月 7 日)。
45. World Bank Group. 2020 Green Hydrogen in Developing Countries. 参见 <http://documents1.worldbank.org/curated/en/953571597951239276/pdf/Green-Hydrogen-in-Developing-Countries.pdf> (访问日期 2021 年 1 月 7 日)。
46. Climate Change Committee. 2018 Hydrogen in a low-carbon economy. 参见 <https://www.theccc.org.uk/wp-content/uploads/2018/11/Hydrogen-in-a-low-carbon-economy-CCC-2018.pdf> (访问日期 2021 年 1 月 7 日)。
47. Energy Networks Association. 2020 Replacing Britain's old gas pipes and laying the foundations of a zero-carbon gas grid. 参见 <https://www.energynetworks.org/newsroom/replacing-britains-old-gas-pipes-from-safeguarding-the-public-to-laying-the-foundations-of-a-zero-carbon-gas-grid> (访问日期 2021 年 1 月 7 日)。
48. DNV Oil and Gas. 2020 Heating Dutch homes with hydrogen. 参见 <https://www.dnv.com/oilgas/perspectives/heating-dutch-homes-with-hydrogen.html?cookie-consent=1> (访问日期 2021 年 1 月 7 日)。
49. BDR Thermea Group. 2021 BDR Thermea joins pioneering test of hydrogen energy in Germany. 参见 <https://www.bdrthermeagroup.com/en/stories/bdr-thermea-joins-pioneering-test-of-hydrogen-energy-in-germany> (访问日期 2021 年 4 月 12 日)。
50. Snam. Snam and Hydrogen. 参见 https://www.snam.it/en/energy_transition/hydrogen/snam_and_hydrogen/ (访问日期 2021 年 1 月 7 日)。
51. HyDeploy. 参见 <https://hydeploy.co.uk/> (访问日期 2021 年 1 月 7 日)。
52. UK Government. 2020 The Ten Point Plan for a Green Industrial Revolution. 参见 <https://www.gov.uk/government/publications/the-ten-point-plan-for-a-green-industrial-revolution/title> (访问日期 2021 年 1 月 7 日)。
53. Hydrogen Council. 2021 Hydrogen Insights: A perspective on hydrogen investment, market development and cost competitiveness. 参见 <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2021/02/Hydrogen-Insights-2021-Report.pdf> (访问日期 2021 年 3 月 4 日)。
54. European Commission. 2020 Hydrogen Roadmap Europe. 参见 https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/Hydrogen%20Roadmap%20Europe_Report.pdf (访问日期 2021 年 1 月 12 日)。
55. California Fuel Partnership. 2018 The California Fuel Cell Revolution. 参见 <https://cafcp.org/sites/default/files/CAFCR.pdf> (访问日期 2021 年 1 月 12 日)。
56. The International Energy Agency. 2020 Korea Hydrogen Economy Roadmap 2040. 参见 <https://www.iea.org/policies/6566-korea-hydrogen-economy-roadmap-2040> (访问日期 2021 年 1 月 12 日)。
57. Cummins. 2019 Cummins closes on its acquisition of Hydrogenics. 参见 <https://www.cummins.com/news/releases/2019/09/09/cummins-closes-its-acquisition-hydrogenics> (访问日期 2021 年 1 月 15 日)。
58. Burges Salmon. 2020 ITM Power closes £172 million fundraise – the third largest raise on AIM in 2020. 参见 <https://www.burges-salmon.com/news-and-insight/press-releases/itm-power-closes-172-million-fundraise-the-third-largest-raise-on-aim-in-2020/> (访问日期 2021 年 1 月 15 日)。
59. Bosch. 2020 Bosch to strengthen strategic collaboration with fuel cell expert Ceres Power by increasing its stake. 参见 <https://www.bosch-presse.de/pressportal/de/en/press-release-206400.html> (访问日期 2020 年 1 月 15 日)。
60. Ceres Power. 2018 Strategic Partnership with Weichai Power. 参见 <https://www.ceres.tech/news/strategic-partnership-with-weichai-power/> (访问日期 2020 年 1 月 15 日)。
61. Zero Carbon Humber. 2020 Leading energy companies form partnership to accelerate the development of offshore transport and storage infrastructure for carbon emissions in the UK North Sea. 参见 <https://www.zerocarbonhumber.co.uk/news/northern-endurance-partnership/> (访问日期 2020 年 1 月 18 日)。
62. HyNet North West. 参见 <https://hynet.co.uk/> (访问日期 2021 年 1 月 18 日)。
63. European Commission. 2020 Hydrogen Energy Applications for Valley Environments in Northern Netherlands. 参见 <https://cordis.europa.eu/project/id/875090> (访问日期 2021 年 1 月 18 日)。

64. Gigastack. 2020 Industrial Scale Renewable Hydrogen Project Advances to Next Phase. 参见 <https://gigastack.co.uk/news/industrial-scale-renewable-hydrogen-project-advances-to-next-phase/> (访问日期 2021 年 1 月 18 日)。
65. SeaH2Land. Summary. 参见 <https://seah2land.nl/en/summary> (访问日期 2021 年 4 月 12 日)。
66. Recharge News. 2020 Growing ambition: the world's 20 largest green-hydrogen projects. 参见 <https://www.rechargenews.com/energy-transition/gigawatt-scale-the-worlds-13-largest-green-hydrogen-projects/2-1-933755> (访问日期 2021 年 1 月 18 日)。
67. The Asian Renewable Energy Hub. 参见 <https://asianrehub.com/about/> (访问日期 2021 年 1 月 18 日)。
68. Air Products. 2020 Air Products, ACWA Power and NEOM Sign Agreement for \$5 billion Production Facility in NEOM Powered by Renewable Energy for Production and Export of Green Hydrogen to Global Markets. 参见 <https://www.airproducts.com/company/news-center/2020/07/0707-air-products-agreement-for-green-ammonia-production-facility-for-export-to-hydrogen-market#/> (访问日期 2021 年 1 月 18 日)。
69. European Commission. 2020 A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe. 参见 https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/hydrogen_strategy.pdf (访问日期 2021 年 2 月 1 日)。
70. Ember. Daily EU ETS carbon market price. 参见 <https://ember-climate.org/data/carbon-price-viewer/> (访问日期 2021 年 2 月 1 日)。