

绿色氢能及相关商品贸易 的潜力

除非另有说明，本出版物中的资料可自由使用、共享、复制、再制作、印刷和/或存储，但需注明IRENA为资料来源和版权所有。本出版物中归第三方所有的资料可能受单独的使用条款和限制约束，并在使用此类资料前需获得这些第三方的适当许可。

引用：IRENA (2025), *绿色氢能及相关商品贸易的潜力分析*, 国际可再生能源署, 阿布扎比。

ISBN : 978-92-9260-672-5

关于IRENA

国际可再生能源署 (IRENA) 是一个支持各国向可持续能源未来过渡的政府间组织，也是国际合作的主要平台、卓越中心和政策、技术、资源与可再生能源知识的宝库。IRENA促进各种可再生能源（包括生物质能、地热能、水电、海洋能、太阳能和风能）的广泛采用和可持续利用，以实现可持续发展、能源安全、低碳经济增长和繁荣。

www.irena.org

致谢

此报告由丹尼尔·萨利姆、弗朗西斯科·加法罗（国际可再生能源署）和希马利·塔尔瓦尔（前国际可再生能源署）撰写。国际可再生能源署的同事诺雷拉·康斯坦丁斯库、詹姆斯·沃克、路易斯·贾尼尼奥（前国际可再生能源署）、阿诺·凡·登·博斯、卡兰·科查尔、迪皮提·希德汉蒂、阿德里安·冈萨雷斯、Yong · 陈（前国际可再生能源署）、帕特里夏·怀尔德、斯特凡诺·蒋和阿布杜拉·法哈德也提供了宝贵的输入。

该报告还受益于外部专家的宝贵输入和评论：埃马纽埃尔·塔比（场能源）、赫里布·布兰科（国际能源署）、赖纳·兰茨（世界贸易组织）、尼哈尔·伊尔马兹（世界贸易组织）、埃米尔·科拉克（阿格拉工业）、莱安德罗·扬克（阿格拉工业）、约瑟夫·科栋尼尔（经济合作与发展组织）、萨米·拉姆达尼（法国国际关系与战略研究所）和肯德尔·埃斯迈杰（欧洲委员会）。

该报告由justin french-brooks进行了校对编辑，paul komor提供了技术审阅。francis field、stephanie clarke和daria gazzaola提供了编辑与通讯支持。图形设计由nikolaj holm sloth和lene søberg（phoenix design aid）提供。

国际可再生能源机构对欧洲委员会为实施IFRET项目提供的慷慨支持和资金贡献表示衷心感谢。



**Funded by
the European Union**

若需更多信息或提供反馈：publications@irena.org

该报告可在以下网址获取：www.irena.org/publications

免责声明

本出版物及其中包含的材料按“原样”提供。国际可再生能源署已采取一切合理预防措施来核实本出版物中材料的可靠性。然而，国际可再生能源署或其任何官员、代理人、数据或其他第三方内容提供者均不提供任何形式的保证，无论是明示的还是暗示的，并且对使用本出版物或其中包含的材料造成任何后果概不负责。

此处包含的信息不一定代表IRENA全体成员的观点。提及特定公司或某些项目或产品，并不意味着IRENA优先认可或推荐它们，而不是未提及的类似性质的其他公司或项目或产品。此处采用的设计称谓和材料呈现方式，不表明IRENA对任何地区、国家、领土、城市或区域的法定地位，或对其当局，或对边界或边界的划定有任何意见的表达。

| 3

图例

图1 成本优化模型方法论.....13

图2 到2050年贸易满足全球需求的比例，相同WACC情景15

图3 2050年全球贸易流量，相同WACC情景.....16

图4 2050年商品全球贸易流量，相同WACC情景.....18

图5 净进口者和出口者.....19

图6 本地生产和商品进口的平衡.....20

图7 万亿美元基础设施需求.....21

图8 2050年全球贸易流量，差异化WACC情景.....22

图9 2050年全球商品流动，差异化WACC情景.....23

图10 净进口商和出口商（差异化WACC情景）.....24

图11 交易百分比 – 相同WACC情景与差异化WACC情景.....25

图12 比较净进口国和净出口国.....26

图13 2050年相同WACC情景下的潜在供应商及其2024年占全球GDP的份额.....28

图14 到2050年作为能源供应商的潜在新进入者在相同WACC情景中及其2024年全球石油和天然气出口份额.....29

图15 2050年差异化WACC情景下作为能源供应商的潜在新进入者及其2024年全球石油和天然气出口份额.....29

图16 氢气和相关商品的需求中由进口满足的百分比.....30

图A1 绿色氢和相关商品的需求估计（Mt H-eq/年）
2
在 2050.....3

图A2 生物成因碳源.....34

图A3 预计2050年铁矿石流量。.....34

图A4 用于直接还原铁生产的电力和氢气需求。.....35

图A5 电解质和氢气需求用于生产E-甲醇.....35

图A6 2050年差异化WACC情景的假设.....36

图A7 模型范围.....36

缩写

CH ₃ OH	甲醇
DAC	直接空气捕捉
DRI	直接还原铁
H ₂	氢气
IRENA	国际可再生能源机构
kg	千克
kW	千瓦
千瓦时	千瓦时
LOHC	液体有机氢载体
MBtu	百万英热单位
Mt	百万吨
Mt H ₂ -neq	百万吨氢当量
兆瓦时	兆瓦时
PV	光伏
SAF	可持续航空燃料
t	吨
TW	太瓦
TW·h	太瓦时
VRE	可再生能源
WACC	资本加权平均成本

执行摘要

这项分析旨在使用成本优化方法，探讨到2050年绿色氢气的贸易及其相关商品（如氨、电甲醇和直接还原铁（DRI）的技术经济潜力。它基于IRENA在2022年关于氢气贸易的工作，并整合了反映市场动态和政策发展的更新假设。

该分析超越了仅限于氢气的贸易，将其范围扩展到由此产生的其他绿色商品。它包括35个全球地区，并考虑了可再生能源潜力、基础设施成本和特定商品的约束。

该分析比较了两种主要情景：“相同资本加权平均成本（WACC）情景”，其中所有国家具有相同的资本加权平均成本（WACC），以及“差异化WACC情景”，其中每个国家的WACC不同。它包括对相关参数的敏感性分析，例如可再生能源发电和电解槽的资本成本以及运输成本。

使用具有相同和不同WACC的场景允许评估融资条件如何影响贸易竞争力，并将其影响与地理和资源相关的优势（如可再生能源潜力和土地及水资源可用性）分离开来。

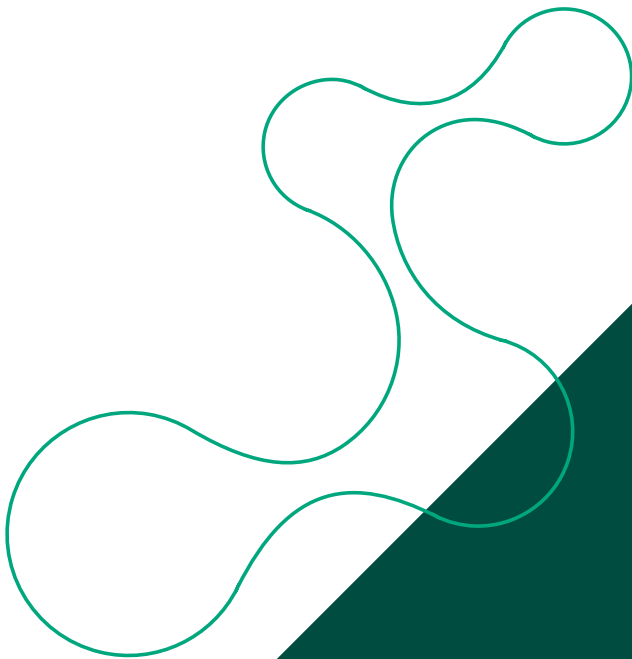
这项分析基于一项成本优化评估，该评估考虑了自然资源禀赋和地理位置。它并未直接考虑一个国家内部的政治稳定性、经济发展或内部制度框架等要素。因此，结果应始终被解释为纯粹的技经潜力，需要嵌入到更广泛的微观和宏观经济、政治、社会和制度背景中。

根据分析结果，到2050年，每种绿色商品的需求交易百分比各不相同，从氨的30%和甲醇的18%到纯氢的14.4%和直接还原铁的14%。由于运输成本较低和效率更高，绿色商品的交易形式将占预计总等效绿色氢气贸易的73%至80%。分析还表明，在整个氢气价值链中需要基础设施。预计投资约为2.49万亿美元，其中包括4.7太瓦（TW）的可再生能源装机容量、2.1太瓦（TW）的电解槽和0.9太瓦小时（TWh）的电池储能。

在同等的WACC情景下，拉丁美洲、中东、北非、撒哈拉以南非洲地区预计将成为主要出口地区，基于其丰富的自然资源。在考虑不同国家的WACC（差异化WACC情景）下，澳大利亚、中国和美利坚合众国预计将处于出口前沿。无论融资条件成本如何，欧洲、日本、东南亚和韩国是可以通过进口绿色氢及其衍生品来满足部分需求地区的。

分析强调需要加强国际合作和政策促进绿色氢经济。可再生能源基础设施投资应与国家氢战略保持一致，但优先考虑电气化、能源获取和基本服务等领域。为促进全球贸易，认证和其他框架需要标准化。

这项分析强调了绿色氢能贸易在全球脱碳和经济发展中的重要性。然而，要实现这一潜力需要协调的政策行动、基础设施投资以及潜在合作伙伴之间的国际合作。该分析所得的见解有助于制定政策和投资策略，以实现公正、包容的能源转型目标。该分析确定了潜在的新的氢能供应国，突显了各国能源来源多样化和提升能源安全的机会。



简介

全球能源格局正在经历一场变革性转变，其驱动力在于迫切需要缓解气候变化，同时确保能源供应安全可靠。国际可再生能源署（IRENA）的1.5°C情景，在其《世界能源转型展望》（IRENA，2024a）中，展现了一条与实现《巴黎协定》目标相一致的能源转型路径。它确定了一组解决方案，这些方案可以扩大规模，以安全可靠的方式将全球温度上升限制在2050年的1.5°C以内。

可再生能源、提高能源效率和广泛电气化是实现2050年1.5°C目标的基石（IRENA，2024a）。绿色氢能，¹通过可再生能源驱动的电解水产生的绿氢，也将发挥至关重要的作用，连接不同的能源子部门。为了实现脱碳目标，与目前可忽略的水平相比，绿氢的使用需要大幅增加（IRENA，2024a）。

除了作为能源载体的作用外，绿色氢气还可以作为清洁原料，在可再生能源和碳密集型工业流程之间建立桥梁。绿色氢气有可能在更广泛能源系统的脱碳以及钢铁和化工等难以减排的行业中发挥关键作用（IRENA，2024b）。

绿色氢能的主要成本构成是电力供应（IRENA，2022a，2023），这很大程度上取决于现有可再生能源资源的质量，以及建设和可再生能源发电设施的资金和财务成本。绿色氢能及其衍生物的交易²能够促进从资源丰富的地区获取更经济实惠的低碳燃料和原料，支持全球脱碳努力。贸易还可以通过减少对化石燃料的依赖，并通过可再生能源资源的更广泛可获得性，多样化能源供应商和贸易路线，来增强能源安全性和弹性。

绿色氢及其商品贸易可以通过为消费地区提供获取价格合理的绿色氢及其衍生物的机会，来增强消费地区的工业竞争力。同时，它也能支持生产地区的经济发展和多元化。通过为各国提供从资源丰富地区以成本效益的方式获取绿色商品的机会，其中生产成本可以更低（国际可再生能源机构和国际贸易组织，2023年），贸易也有助于避免地方低效的过度建设。

发展中国家和新兴经济体是拥有丰富的优质可再生能源资源和生产绿色氢及其产品所必需的原料的重要国家群体。绿色氢及其产品的出口——如果战略规划以确保 electrification、energy access 和 essential services 等优先领域不受影响——可以呈现

¹ 在此报告中，“绿氢”指的是仅使用可再生能源发电资源通过电解产生的氢气。“清洁氢”指的是低或零温室气体（GHG）排放的氢气；该定义包括由天然气制取且具有碳捕获的“蓝氢”。

² 除其他外：氨、e-甲醇和合成燃料，以及使用绿氢生产的低碳材料，例如用于炼钢的直接还原铁（DRI）。

一个可持续增长和公正包容性转型的机会，有助于实现联合国设立的可持续发展目标。

创造绿色氢能及相关产品稳定需求的条件——以及为它们的生产、储存、运输和贸易发展所需的配套设施——需要强有力的政策支持。精心设计的政策对于促进氢经济的发展至关重要，否则其可能发展极其缓慢（联合国工业发展组织³，2024）。政策涵盖整个价值链，等并且可以通过优化的关税、税收制度、认证计划、国际合作伙伴关系以及采购实践和碳定价方案（IRENA和WTO，2024）来支持其发展。

越来越多的国家正在制定绿色氢能战略和政策，以实现其脱碳的雄心和目标。截至2024年10月，约有56个国家、西非经济共同体（ECOWAS）和欧盟³已制定专门的氢能政策，全球46个国家已建立国家（及超国家）战略，8个国家已制定低碳氢（IRENA，2024c）的开发和部署路线图。与此同时，至少还有21个国家正在参与制定自己的战略和路线图（IRENA，2024c）。此外，像欧盟碳边境调节机制（CBAM）这样的监管措施通过为嵌入排放定价，积极激励清洁氢能和绿色产品的生产与出口。

这些政策和国家级战略的重点因各国自然资源禀赋、经济、产业以及在全球绿色商品市场中的具体政治优先事项而异，各国将自己定位为进口国、出口国或枢纽，并提出战略伙伴关系以支持其目标（IRENA，2024）。等

通过分析绿色氢气的潜在全球贸易模式以及一组相关的商品，本报告旨在为符合新兴全球市场并促进公平包容参与的国家或区域战略和政策进一步发展做出贡献。该分析基于IRENA在2022年（IRENA，2022a，2023）开展的工作，为基于氢气的商品（即绿色氨、e甲醇和DRI）的可能贸易模式增加了展望，近年来，这些商品在支持难以减排行业脱碳中的重要作用日益凸显（Brown，2025；碳氢化合物工程，不详；经合组织，2025；标普全球，2022）等

分析结果有助于初步识别潜在的绿色氢和关联商品贸易伙伴及其在不同情景下的预期流量。结果表明，基于可再生资源可用性、相关预期成本以及关键原材料的可用性，某些地区可能在生产这些绿色商品方面更具竞争力。分析还概述了在假设条件下所需的基础设施投资。

本报告的结构如下：第2节介绍了技术方法，以及支持本分析模型的假设；第3节介绍了贸易前景和分析的主要发现；第4节对发现进行了进一步讨论，并提供了分析的关键见解。

³ 它指的是欧盟的27个成员国

如何解释这项研究的结果

这项分析完全基于绿色氢和相关商品部门的供应成本优化，考虑了自然资源禀赋和地理位置。它不考虑能源安全限制、政治稳定或经济发展等因素，这些因素也可能影响贸易前景（IRENA，2022a，2023）。

该分析采用预先设定的场景，用于绿色氢气的需求、商品需求以及可再生能源和其他基础设施（电解槽、运输、商品生产工厂）的成本，基于国际可再生能源署（IRENA）的先前工作以及最近的市場趋势和预期。它专门关注通过可再生能源电解产生的氢及其衍生的商品，不考虑与其他产品或路径的替代或竞争。

虽然这项工作的结果可以支持识别国家和地区进出口角色，并支持制定安全的供应贸易伙伴关系和多元化策略，但它们只能被视为在理想化条件下的技术经济潜力。为了支持稳健的氢能政策和策略的发展，这项分析中识别的潜力必须嵌入到一个更广泛的能源规划过程中，该过程要考虑特定的微观和宏观经济、政治、社会 and 制度维度。

第二节

工作范围和方法

这项分析为贸易提供了展望⁴ 到2050年实现绿色氢和基于氢的绿色商品的生产，在预期的绿色氢价值链推广和建立之后。这种方法旨在提供前瞻性见解，以指导基础设施、国际合作、潜在贸易伙伴关系、投资需求以及公平价值链发展的决策。

分析采用IRENA于2022年（IRENA, 2022a, 2023）为发表而开发的扩展版最低成本模型进行，增加了基于绿氢甲醇和直接还原铁（DRI）的贸易。重要的是要注意，这是一项纯粹的技术经济分析，基于成本最小化均衡模型。它未考虑能源安全、政治稳定或经济发展等因素。因此，该分析结果应始终纯粹基于技术经济潜力进行解读，并嵌入更广泛的政治、社会和制度背景下。

优化模型的范围涵盖可再生能源发电、通过电解生产氢气及其转化为所包含的商品。储存和运输成本也纳入分析中⁵ 运输成本仅考虑技术方面；与贸易政策相关的成本，如关税和认证成本，不包括在内。

开发太阳能和风能产能以生产绿色氢气的潜力基于（IRENA, 2022a, 2023）的资源评估。在每个建模区域，该潜力受适宜土地和电解用水可用性的限制。此外，为了优先利用电力部门的可再生能源，根据IRENA的1.5°C情景中预期用于其他电力用途的安装容量，氢气生产发电安装潜力被降低（IRENA, 2022a, 2023）。基于剩余的可再生能源潜力，优化过程中计算了专门满足电解槽需求所需的可再生能源发电容量。该计算考虑了按区域资源质量，并根据先前工作开发的（IRENA, 2022a, 2022b, 2023）数据集进行。

大宗商品的贸易流动主要由本地和外部生产的成本差异、区域需求、以及运输载体和商品的运输成本决定。该模型分为全球35个地理节点，其中包括G20国家和选定的非G20国家⁶。那些可以在氢及其商品交易中发挥重要作用的国家分别表示。其余国家按地理位置进行汇总（其余）。例如亚洲，拉丁美洲其他地区（IRENA, 2022a, 2023）。

⁴ 在此报告中，贸易被理解为绿色氢气和相关商品的跨境交换。

⁵ 该分析不包括开发新港口所需的投资。相反，它假设使用现有港口，重点关注航运船队的基础设施增强以及相关的仓储和处理设施。

⁶ 哥伦比亚，智利，乌克兰，西班牙，葡萄牙和摩洛哥。

对于此项分析，绿色商品被假定为可通过绿氢脱碳、替代碳基氢原料或碳密集型流程的部门和应用的产品及最终用途。在分析中，三种绿色商品（氨，⁷ e-甲醇⁸ 和 DRI）是 *即* 已考虑。所有其他商品或最终用途均归入氢气需求之下。同时纳入了用于生产绿色商品的原料可用性约束，并使用了该模型中的地理粒度。

在报告中，每种绿色商品的数量以百万吨氢当量（Mt H-eq）表示。在某些情况下，这也被称为嵌入氢。

²

在过去的几年里，关于绿氢的故事已经从被认为是一种可以替代整个能源系统中化石燃料的广义清洁能源载体，演变为被认识到是一种用于难以减排部门的最后一英里脱碳的战略解决方案，在这些部门中，电气化在物理上或经济上并不可行。同时，降低成本和部署的进展比预期的要慢，导致对需求预测进行了修订（BloombergNEF，无日期；Wood Mackenzie，无日期）。这项分析试图通过将假设的绿氢需求与近期研究相结合来捕捉这种状况。该分析假设在主要情景下，到2050年的总需求估计为2.6亿吨（Mt）。该值是根据2024年在建模地区对关键商品和潜在用途的基准需求水平，结合到2050年的预期增长计算得出的。

为了满足一个国家或地区的氢需求，氢可以通过管道以压缩氢的形式运输，或通过三种液体载体，即液态有机氢载体（LOHC）、液氢和氨进行运输。商品以其原始形式进行运输。

应用建模框架允许将氢气进口到进口国当地生产商品。运输、转换和生产过程中的相关成本和效率参数被纳入其中。

可以在图1中找到建模框架的概述。模型输入包括：太阳能和风能资源潜力和质量、每种商品的重氢需求量、原材料可用性、基础设施成本、效率，以及经济因素，如资本加权平均成本（WACC）。然后，这些输入参数被优化模型用来确定潜在的贸易伙伴、每个地区的商品生产量、贸易流量和投资需求。本报告的附录提供了更详细的建模框架和本工作所使用的假设说明。

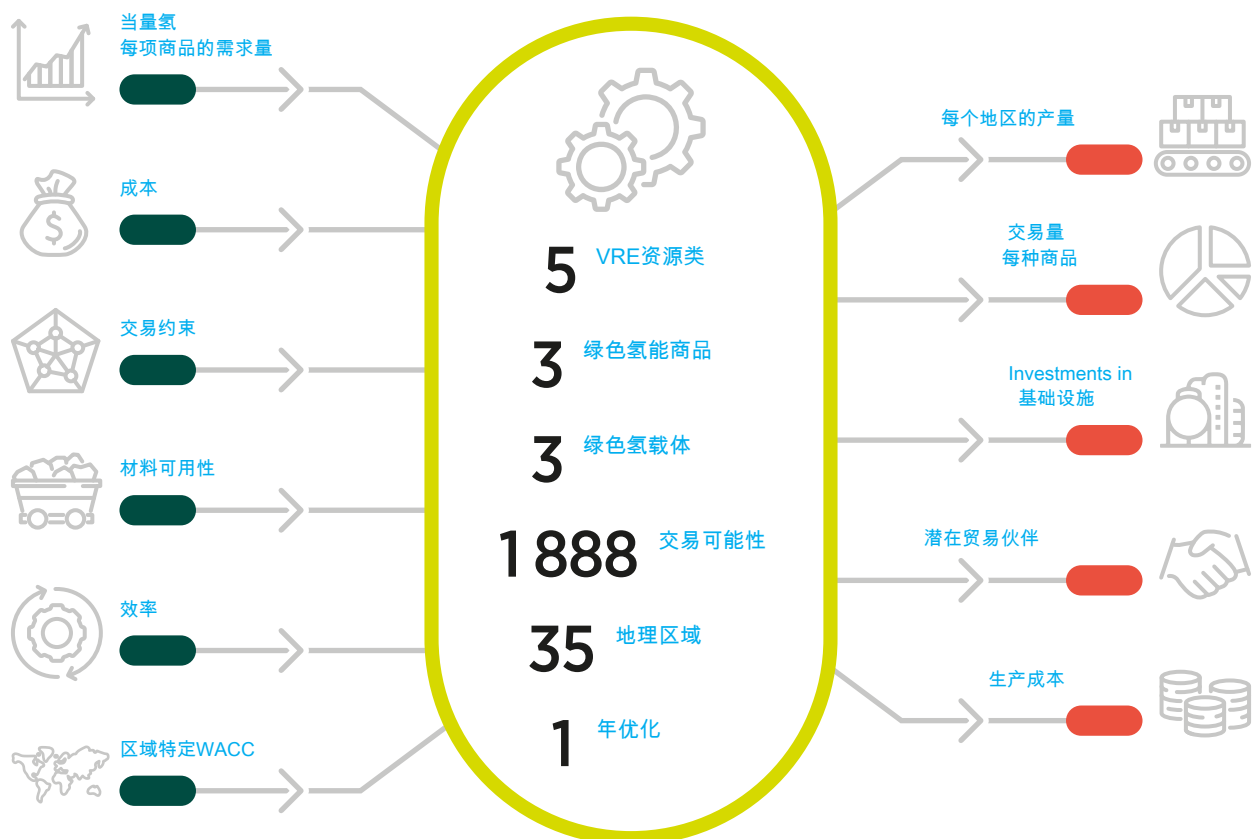
该分析考虑了两种主要情景：一种是根据（IRENA，2022a，2023）的假设，将风险特征和WACC按国家或地区区分的情景，称为差异化WACC情景；另一种是假设所有国家具有相同的WACC，称为相同WACC情景。

在相同的加权平均资本成本（WACC）情景下，决定贸易流动的生产成本差异完全由资源质量和资本成本驱动。这使得可以识别出在绿色氢及其衍生物的生产和出口方面具有更高竞争力的地区。相比之下，差异化WACC情景采用地区特定的加权平均资本成本值，能够更细致地了解贸易前景和各地区基于其当前位置的经济演变。

⁷ 在氨的情况下，它既被视为一种具有自身需求的商品，用于交通运输和化学行业，也被视为一种长距离运输氢气的载体。

⁸ 在此分析中，仅考虑使用生物成因碳或直接空气捕获碳生产的甲醇的需求。

图1 成本优化模型方法



注意：VRE = 可再生能源。

为了评估贸易前景的其他可能性，分析了若干敏感性。这些敏感性包括发电、运输和电解槽更为保守的成本假设。敏感性分析用于为投资成本设定上下限，并分析预测贸易流量的变化，突显区域经济状况、技术演进和投资风险如何塑造全球贸易格局。⁹

⁹ 在本报告中，灵敏度被平等地应用于所有分析区域。

氢气贸易模式

利用前面介绍建模框架和假设，本节展示了分析结果，并展望了到2050年绿氢和绿商品贸易的可能模式。

该分析比较了两个主要情景，它们的主要区别在于资本成本的假设。在相同的WACC情景中，所有国家都拥有相等的加权平均资本成本（WACC），消除了它对结果的影响。在第二个情景中，WACC根据IRENA先前工作中的考虑值按国家不同而有所差异（IRENA, 2022c）。

A. 相同的WACC情景

本场景考虑了成本降低的乐观预期，如(IRENA, 2022c)中对于发电、运输和气体转换工厂所述。¹⁰ 它假设全球资本成本的精确值为5%，以消除差异化资本成本的影响。

由于所有国家和地区使用相同的加权平均资本成本，竞争力来源于拥有最佳的可再生资源，以及铁矿石（用于生产直接还原铁）和生物碳（用于生产甲醇）等材料的供应，或者整体具有竞争力的当地投资成本。同时，靠近潜在需求中心也发挥着重要作用，并且由于氢和商品的运输成本较低，提供了竞争优势。

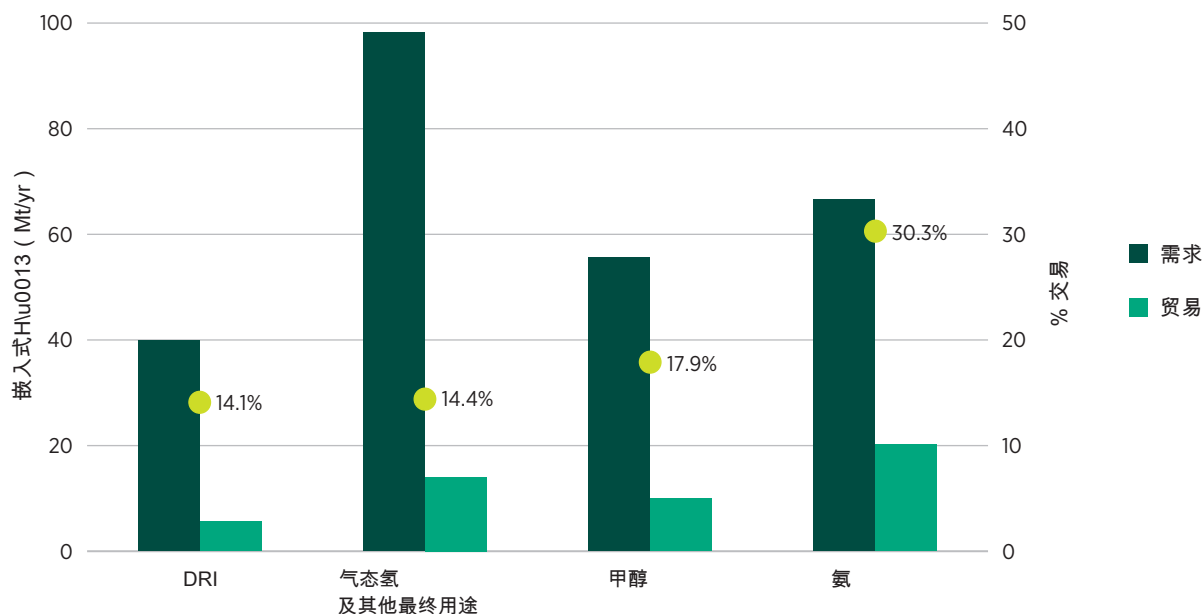
在相同的WACC情景下，交易中的绿色氢和相关信息商品的总交易量预计约为绿色氢和相关信息商品总需求的20%（每年53 Mt H₂-eq）。

²
(260百万吨当量每年)在2050年。
²

图2显示了到2050年绿色商品需求的交易百分比。对于氨，全球需求的约30%进行交易，而70%的需求由国内生产在本国或地区内满足。在甲醇的情况下，交易量约为18%，而82%的需求通过当地生产得到满足。对于DRI，氢当量的贸易量约为14%，而86%的需求在当地生产。交易的气体氢量约为总需求的14.4%；大部分此类贸易将通过天然气管道进行。

¹⁰ 例如，假设太阳能光伏发电的资本成本在225-455美元/千瓦之间，电解槽的成本在215-391美元/千瓦之间。

图 2 2050 年贸易满足全球需求的百分比，相同 WACC 场景



注释：Mt/yr = 百万吨/年；WACC = 加权平均资本成本。

图3和图4（其中图4分别展示了每种商品）说明了在相同WACC情景下的预期全球贸易流模式。不同商品形式的等效氢流用独特的颜色表示：氨用深绿色，甲醇用黄色，直接还原铁用红色，压缩氢用天蓝色，液氢用浅绿色，液态有机氢载体用深蓝色。线条的粗细代表绿色商品流的体积，单位为百万吨氢（lohc）。线性等效符号，内部有正方形的圆圈代表绿色商品供应的来源，内部有交叉的圆圈代表绿色商品需求。大多数国家被表示为累积区域，以简化贸易流的展示。

在同一WACC情景下，拉丁美洲、中东、北非和撒哈拉以南非洲预计在全球出口地区中排名靠前。对绿氢及其商品需求较高的主要国家和地区是中国、欧洲¹¹，印度，日本，中东，韩国，东南亚和美国。尽管中国、印度和美国对氢及其商品有很高的需求，但由于资源的可用性，这三个国家在净贸易方面正变得越来越自给自足，从而减少了交易氢商品的机会。此外，欧洲、日本、韩国和东南亚很可能成为氢商品的巨大进口市场，因为进口和本地生产之间存在巨大的成本差异。

以商品形式进行的氢气贸易几乎占总体等效氢气贸易的72%。在下文中，将探讨每种商品和终端用途——气态氢、氨、甲醇和DRI——的定位。由于效率显著降低，液氢或LOHC的运输仅在亚洲少数情况下具有成本效益，因此在此不详细讨论。

压缩气体氢 欧洲和北非的管道代表 The flows of 通过

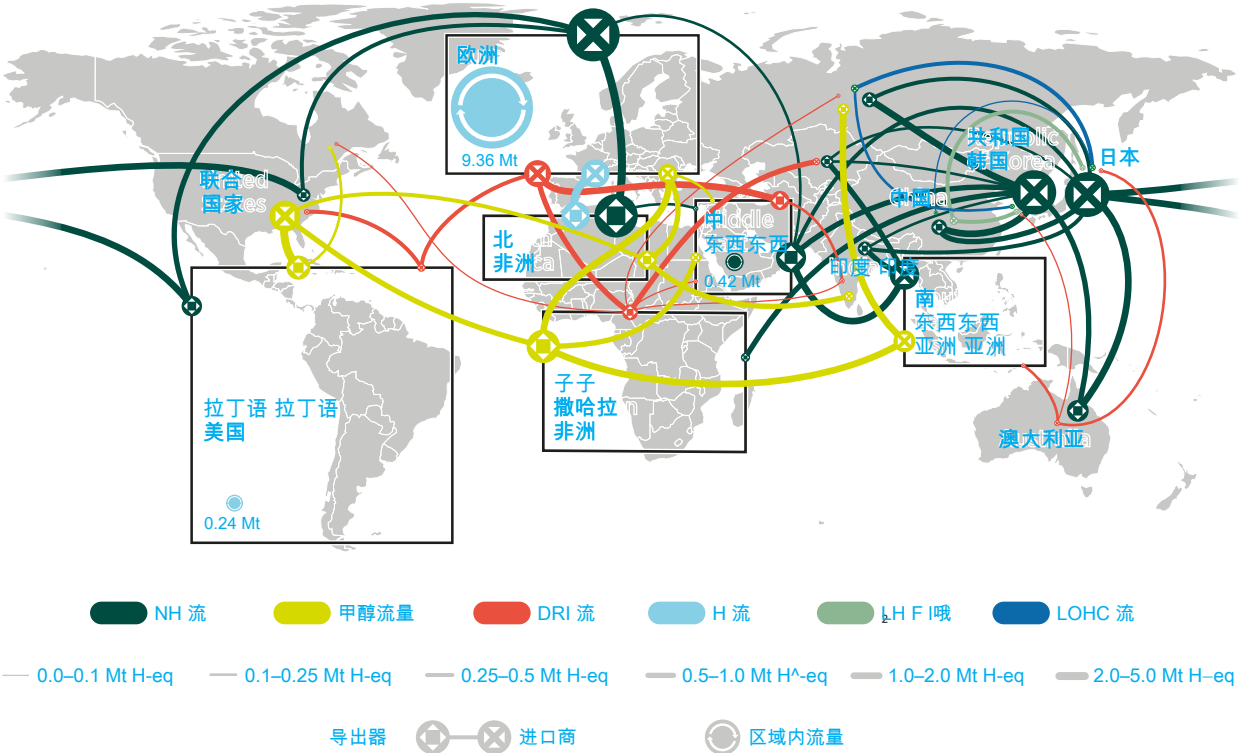
多数¹² 在全球压缩氢气贸易中，在相同的WACC情景下的份额。这包括欧洲区域内生产的当地气体氢流动，通过现有的综合系统流通。

¹¹ 所有欧洲国家，包括欧盟27国、英国和其他非欧盟的欧洲国家。

¹² 需要注意的是，由于分析中的粒度限制，区域内部流动可能无法完全捕捉。

管道网络。压缩氢气从北非出口到欧洲以及欧洲国家之间的出口量分别为3.25 Mt和9.36 Mt。除欧洲外，拉丁美洲国家之间也存在一些贸易，但规模较小，占比很小¹³ 在压缩氢气总贸易中的占比。

图3 2050年全球贸易流量，相同WACC情景G



注意：NH = 氨；H = 压缩气体氢；MeOH = 甲醇；DRI = 直接还原铁；LOHC = 液体有机氢载体；LH = 液态氢。

线段的厚度表示绿色商品流的体积，单位为Mt H-eq。带方形内的圆圈代表绿色商品供应的来源，而带有十字的圆圈代表商品需求。大多数国家都分布在区域中以展示贸易流量。1 Mt H-eq 等于 5.67 Mt 的氨，8 Mt 的甲醇和 16 Mt 的 DRI。

免责声明：此地图仅用于说明目的。此地图上显示的边界和名称并不表示 Irenà 对任何地区、国家、领土、城市或地区的地位，或其当局，或对其边界或边界的划定，不作任何意见的声明。

对氨，非洲、澳大利亚、拉丁美洲和西亚是主要出口国，而欧洲、日本、韩国和东南亚是主要进口国。与其他三种绿色商品相比，本研究分析的氨预计将是交易最活跃的；其需求的近30%将通过贸易得到满足。

需要注意的是，该分析不包括开发新港口所需的资金。¹⁴ 相反，它假设使用现有港口，重点关注航运船队和相关仓储和处理设施的基础设施升级。欧盟考虑的港口有阿尔赫西拉斯、汉堡、里斯本、里窝那、布列塔尼莫尼和鹿特丹。对于俄罗斯联邦和美利坚合众国，各选择了两个港口，以确保广泛的地理接入，使最短的距离得以考虑。

¹³ 0.24Mt在相同的WACC情形下和2.13Mt在不同的WACC情形下。
¹⁴ 分析不考虑开发新端口，以便能够观察到分析的粒度，如前几节所述。

对 **甲醇**，生物碳的可用性和相关成本在不同国家和地区被纳入分析（见图A2）（IRENA，2022a，2023）。尽管与氢气相比，碳成本是绿色甲醇总生产成本较小的贡献者，但它们对甲醇贸易流量仍然有显著影响。一些可再生能源丰富的国家在生物碳资源上面临压力。在这种情况下，与其通过相对昂贵的直接空气捕获（DAC）工艺在当地生产甲醇，从低成本国家进口甲醇似乎更经济。根据结果，美国预计将从拉丁美洲进口甲醇，欧洲将从非洲进口，东南亚将从非洲和俄罗斯联邦进口。

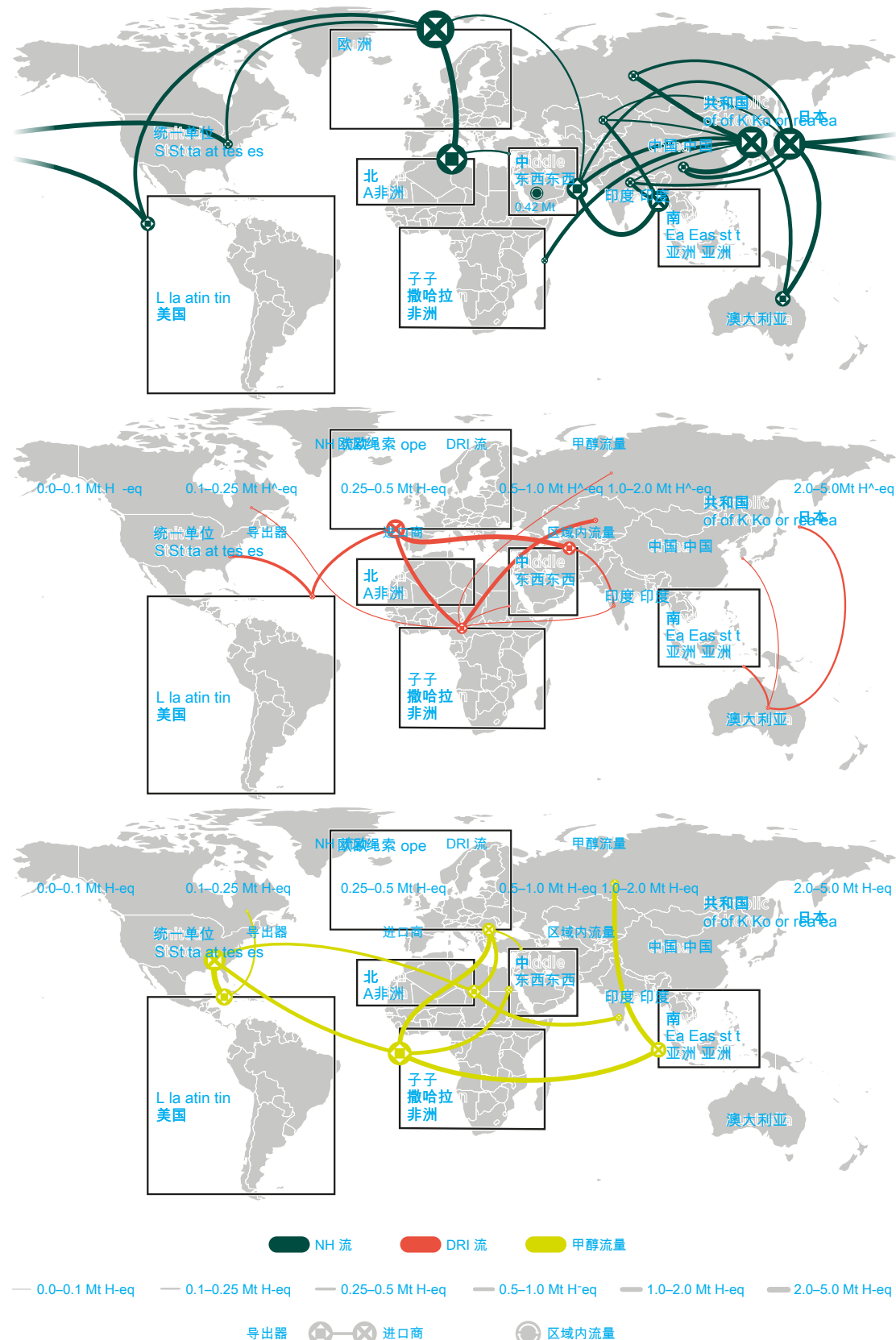
参考 使用绿色氢气的DRI 南美洲、中东和撒哈拉以南非洲预计将成为主要的出口地区。尽管铁矿石成本预计在总DRI生产成本中所占的比例低于氢气，但它们对DRI贸易流量仍具有重大影响。预计南美洲和撒哈拉以南非洲将具有大量的铁矿石流动（见图A3），而中东将进口铁矿石并利用其低成本氢气生产DRI。撒哈拉以南非洲拥有本地铁矿石，有潜力生产DRI并出口到潜在需求中心，而中东将从澳大利亚和撒哈拉以南非洲进口铁矿石以生产DRI并出口到邻近的需求中心。正如附录中简要解释的那样，值得注意的是，在分析DRI贸易时，铁矿石的质量也已得到考虑（S&P，2021；S&P Capital IQ Pro Global Metals & Mining，无日期）。来自相同WACC情景的结果表明，对于欧盟而言，在这种情况下，通过直接进口满足大部分DRI需求可能更具成本竞争力，同时会进口一部分铁矿石用于本地DRI生产。

如前文所述，地缘政治、社会经济考量及其他因素将是塑造贸易伙伴关系的关键因素。若不考虑这些因素，仅从成本优化的角度出发，相同 WACC 情景下的结果表明，建立欧盟-北非进出口联系具有潜力。在全球范围内，欧盟预计将是氢气和商品的最重要需求中心之一，而北非预计将成为欧盟的重要贸易伙伴（出口方）。根据相同 WACC 情景下的结果，北非（包括阿尔及利亚、埃及、利比亚、摩洛哥和突尼斯等国家）到 2050 年有望为欧盟提供约 18% 的绿色氢气及相关商品。北非可能出口约 9 百万吨 H-eq¹⁵ – 约 5 万吨 H-当量以氨形式存在，3.2 万吨以压缩氢存在和 0.8 万吨

² H-eq 以甲醇的形式。欧盟的其他潜在重要出口商包括
² 拉丁美洲、中东、撒哈拉以南非洲和美利坚合众国。

¹⁵ 1 Mt H-eq 等于 5.67 Mt 氨，8 Mt 甲醇和 16 Mt 直接还原铁。

图4 2050年商品全球贸易流量，相同WACC情景



注意：NH = 氨（深绿色）；DRI = 直接还原铁（红色）；MeOH = 甲醇（黄色）。

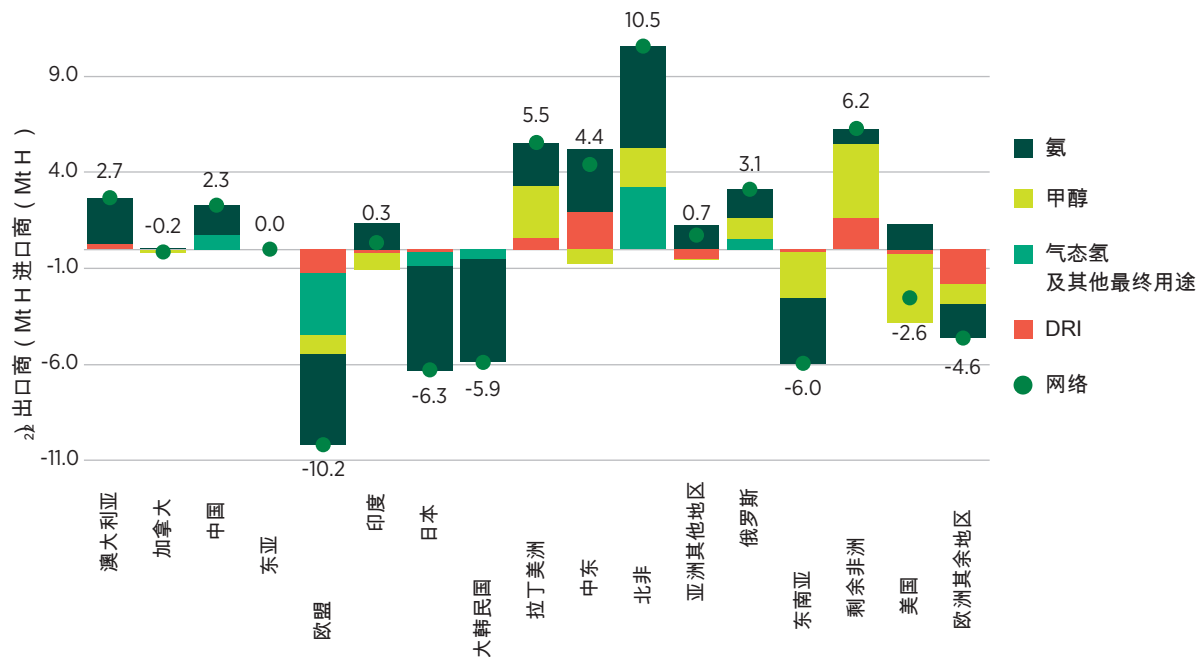
线段的厚度表示绿色商品流的体积，单位为Mt H-eq。带方形内的圆圈

代表绿色商品供应的来源，而带有十字的圆圈代表商品需求。1 Mt H-eq 等于 5.67 Mt 的氨，8 Mt 的甲醇和 16 Mt 的 DRI。

免责声明：本地图仅为说明目的而提供。图中所示的边界和名称不表示IRENA对任何地区、国家、领土、城市或地区的地位，或其当局，或对其边界或边界的划定所持的任何意见。

图5说明了该国或地区预计是否为氢和商品的整体净出口国或净进口国。根据假设所有国家采用相同WACC的相同WACC情景的结果，拉丁美洲、中东、北非和撒哈拉以南非洲预计将成为绿色氢和商品的主要净出口国，而欧盟、日本、韩国和东南亚预计将成为主要净进口国。值得注意的是，作为出口国或进口国的净状态可能与所有绿色商品的状态不一致。例如，考虑中东的例子。中东会以甲醇的形式进口其需求的一部分，会出口大量的绿色DRI和氨，使其成为绿色氢的净出口国。¹⁶

图5 净进口国和出口国



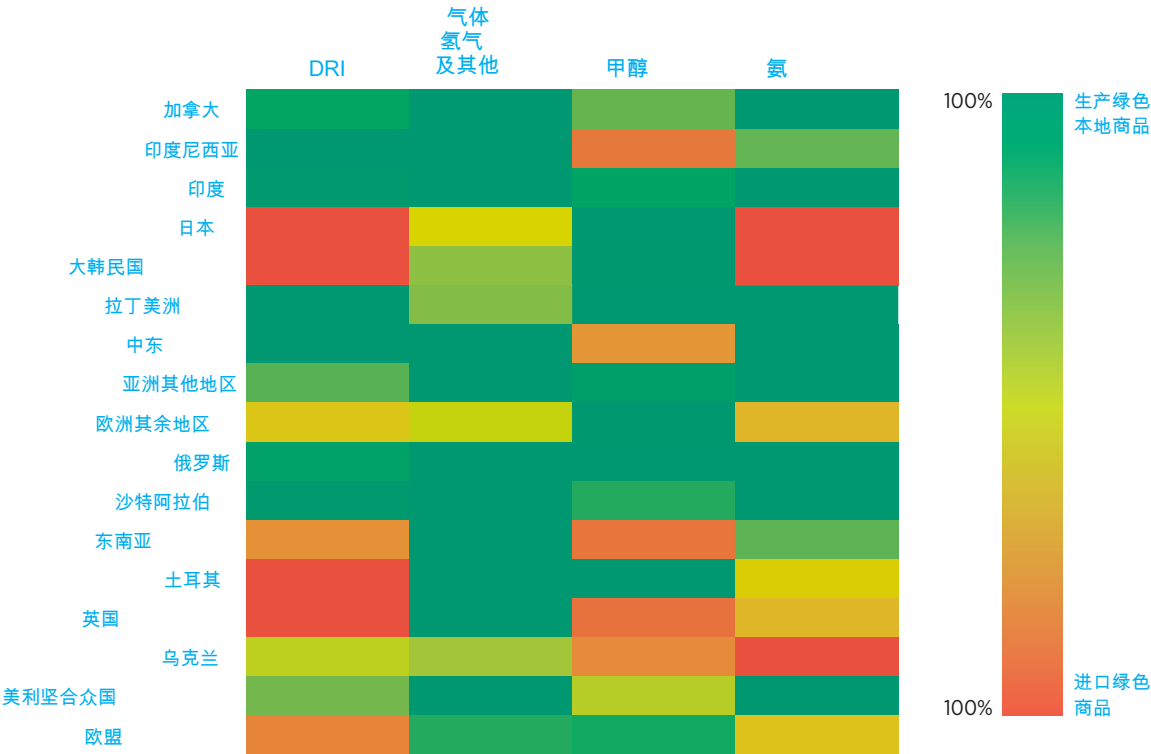
注意：DRI = 直接还原铁；Mt H = 百万吨氢气。2

图6显示了所有进口氢气（以本报告分析的商品形式）的国家和地区的每种绿色商品的本地生产和进口程度。一些国家和地区的期望是发展成为自给自足和出口。它们包括阿根廷、澳大利亚、巴西、中国、智利、哥伦比亚、墨西哥、摩洛哥、北非、大洋洲、南非、撒哈拉以南非洲，并且不包括在图中。

在图中，颜色的强度与每种绿色商品氢当量的本地生产程度（绿色）和进口程度（红色）相关联。它显示了某种绿色商品氢当量总需求中有多少比例进行交易。一些国家对某种绿色商品的自我供给，与其他绿色商品的进口，受到前面几节讨论的几个因素的影响。

¹⁶ 用更深入的分析方法来理解结果非常重要，尤其是由于结果基于全球成本优化方法。一个国家或地区进口一种商品并出口其他商品可能会受到几个特定地区因素的影响。尽管中东拥有良好的可变可再生能源（VRE）资源，但它被认为受生物碳来源的可用性限制，这导致它从撒哈拉以南非洲进口低成本甲醇——这个地区在VRE资源和生物碳来源都十分丰富。

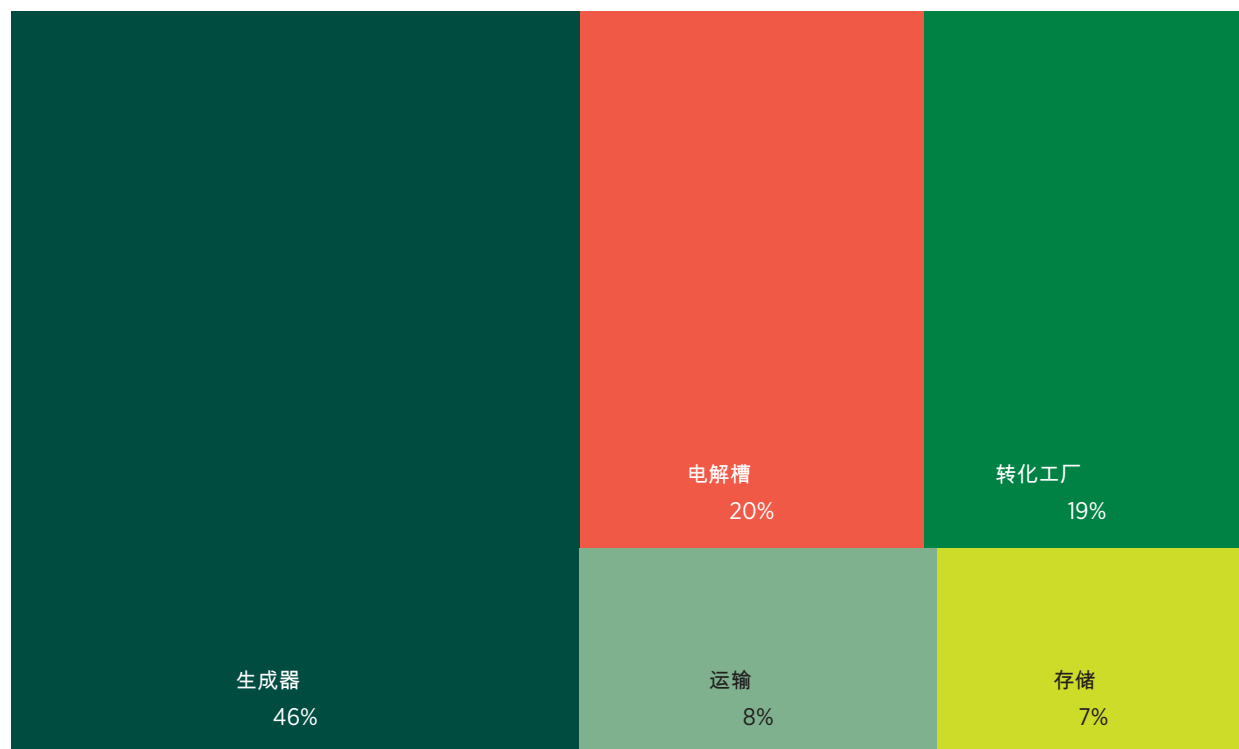
图6 商品本地生产和进口平衡



注意： 自给自足和出口国/地区不包括在图中。它们是阿根廷、澳大利亚、巴西、中国、智利、哥伦比亚、墨西哥、摩洛哥、北非、大洋洲、南非和撒哈拉以南非洲。

交易绿色氢气和相关商品涉及在整个价值链中构建基础设施，从发电和电力存储，到电解，一直到运输（通过管道和船舶），氢气存储和转化工厂（见图7）。在假设条件下，基础设施必须从今天几乎为零增长，以在2050年满足估计的绿色氢气及商品需求量260 Mt H-eq。根据分析结果，大约需要投资²需要2.49万亿美元的资金来建设基础设施。这项投资与4.7太瓦的可再生能源装机容量（主要是光伏[光伏]）相关，2.1太瓦的电解槽和0.9太瓦时的电池储能。

图7 基础设施需求 (以万亿美元计) I



注意：发电机 = 可再生能源设施，如太阳能光伏和风能；转化工厂 = 将氢气转化的设施 G 转化为其他形式，如氨、甲醇、液氢和 LOHC，并将这些载体重新转换回氢气。它还包括使用氢气生产绿色 DRI 的设施的组件；DRI = 直接还原铁。

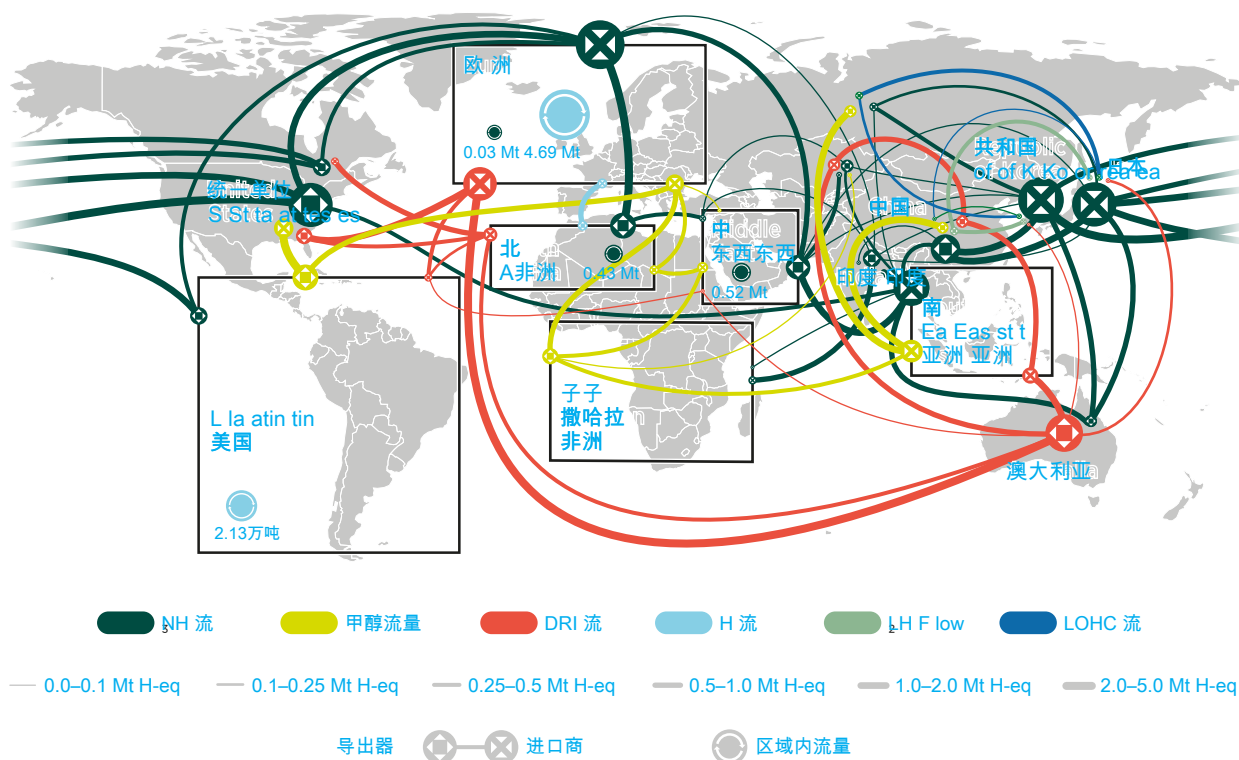
B. 差异化WACC情景

绿色氢能项目需要高额的资本支出，要求进行大量的前期投资。加权平均资本成本 (WACC) 直接影响融资这些投资的成本，并在决定绿色氢能与商品生产的竞争力方面发挥着关键作用。在相同的WACC情景下，假设所有国家都具有5%的相同WACC。相比之下，本情景考虑了所分析国家不同的WACC (见附录中的A5)，根据 (IRENA, 2022c) 中分析的因素，与其预期的风险特征相一致。

因此，在可再生能源相对匮乏的地区，低成本资本环境下的制氢可以更具竞争力。因此，在这种情景下，这些国家会生产更多用于国内的氢和相关产品，而不是依赖进口。与此同时，在本地资源可用性相似的国家中，融资条件更好的国家的出口则尤为突出。

图8和图9 (其中图9单独显示了每种商品) 展示了差异化WACC情景下的全球贸易流模式。与相同WACC情景相比，拥有良好VRE资源和大型经济体 (如澳大利亚、中国和美国) 预计将成为绿色氢及其商品的主要出口国。

图 8 2050 年全球贸易流，差异化 WACC 情景



注意：NH = 氨；H = 压缩气体氢；MeOH = 甲醇；DRI = 直接还原铁；LOHC = 液体

有机氢载体；LH = 液态氢。

线段的厚度表示绿色商品流的体积，单位为Mt H-eq。带方形内的圆圈

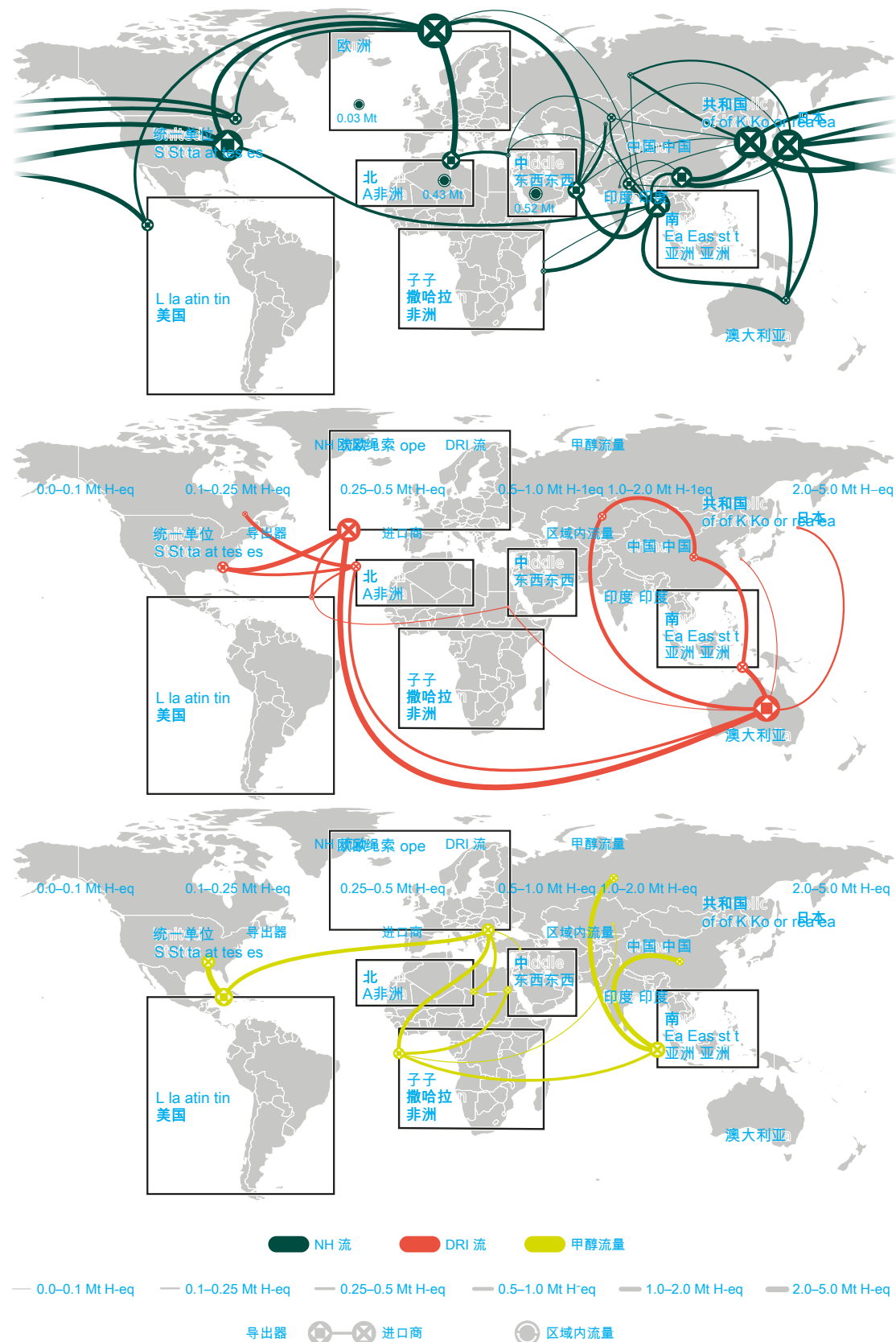
代表绿色商品供应的源头，而带有十字的圆圈代表商品需求。大多数国家都分布在区域中以展示贸易流。

免责声明：本地图仅为说明目的而提供。图中所示的边界和名称不表示IRENA对任何地区、国家、领土、城市或地区的地位，或其当局，或对其边界或边界的划定所持的任何意见。

关于 **氨**，中国，以及美国将会是主要的出口国。对于北非来说，这是因为其与欧洲的需求地距离较近，并且假设像摩洛哥这样的某些国家在资本成本方面具有与其他潜在提供者相比的竞争力。美国将成为主要的出口国，向日本，韩国以及欧洲出口大量氨。对于欧洲来说，北非和美国可能是氨的最重要贸易伙伴。**甲醇** 预计将是非洲、中国、拉丁美洲和俄罗斯联邦。可能形成的显著潜在贸易伙伴关系包括美国与拉丁美洲、东南亚与中国和俄罗斯联邦，以及欧洲与拉丁美洲和非洲。

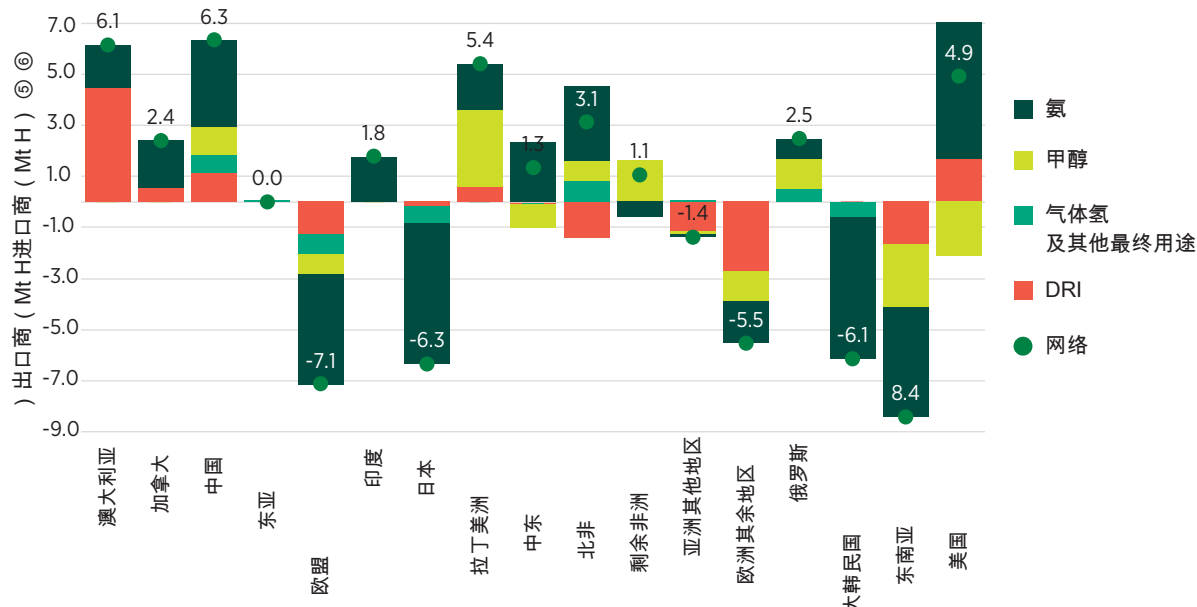
对 **使用绿色氢气的DRI**，澳大利亚将成为最大的出口国，其次是美国和中国。澳大利亚、中国和美国凭借其较低的资本成本和材料可得性，超越了中东和撒哈拉以南非洲的竞争优势，利用其铁矿石供应生产直接还原铁，并将其出口到需求中心。在这种情况下，澳大利亚和美国将代表约80%的绿色氢气生产的直接还原铁总出口量。在中东成为直接还原铁最大出口国的情况下，如今它已成为一个自给自足的地区，通过本地生产直接还原铁来满足当地需求，同时从非洲和澳大利亚进口铁矿石。

图9 2050年全球商品流量，不同WACC情景



参考图10，澳大利亚、中国和美国预计将是绿色商品等效氢的主要净出口国。

图10 净进口国和出口国（差异化WACC情景）



注意：DRI = 直接还原铁；Mt H = 百万吨氢气。2

C. 结果与敏感性比较综述

绿色商品交易的比例，以氢当量计，取决于多个因素，其中WACC假设对每种商品的影响不同。在 DRI，成交量 增加从 14%

在同一WACC情景下 到21% 在差异化WACC情景中。在差异化WACC情景中，澳大利亚和美国等更稳定的经济体变得更具有成本效益，导致DRI生产从非洲和中东地区转移。在差异化WACC情景中，澳大利亚向中东地区出口大量铁矿石以加工生产出口到欧洲的DRI的量减少。这部分被转移到了澳大利亚，直接生产DRI并出口到欧洲，而没有将中东作为DRI生产中心的中间步骤。与相同WACC情景相比，铁矿石流动减少，而DRI贸易流动更占主导地位，DRI与铁矿石贸易比例从1:4增加到1:2.2。

从相同WACC情景到差异化WACC情景，交易量 气体氢

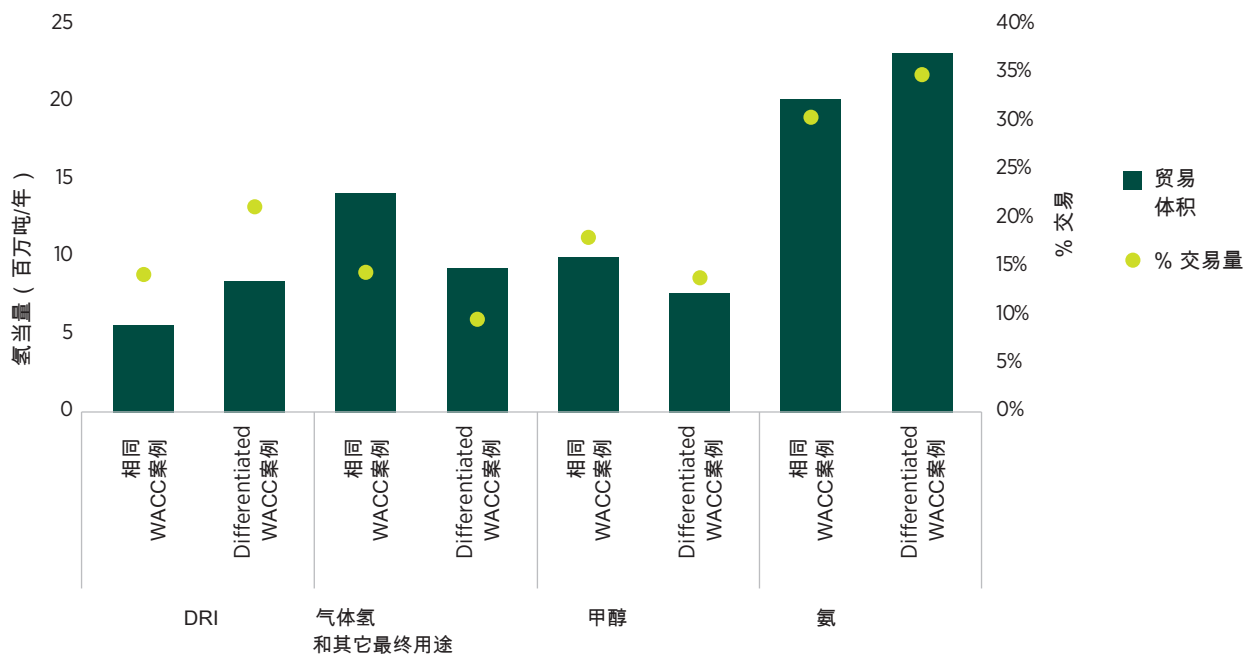
减少至 14%至9%。 大部分压缩氢气贸易预计将发生在欧洲内部、欧洲与北非之间以及拉丁美洲内部。在差异化的WACC情景中，北非生产气态氢与欧洲生产之间的成本差异减少，导致欧洲当地绿色氢气生产增加。这导致从北非到欧洲的压缩氢气流减少，从而减少了以压缩氢气形式进行的整体贸易百分比。

甲醇 交易量从下降 18%至14% 在同一WACC情景和差异化WACC情景之间。北非和撒哈拉以南非洲在甲醇生产中的比较成本优势显著降低。由于引入了新的甲醇供应商中国，它向东南亚而非撒哈拉以南非洲出口，因此贸易比例的减少相对较小。另一

百分比贸易下降的原因是美国当地甲醇生产的增加，减少其甲醇进口。

氨 交易量从增加 30%至35% 在相同的加权平均资本成本情景和差异化的加权平均资本成本情景之间。在相同的加权平均资本成本情景中满足当地需求的一些国家和地区，甚至出口氨，在差异化的加权平均资本成本情景中开始发现从加拿大和美国进口更便宜的氨更为经济。这导致氨的总交易百分比增加。

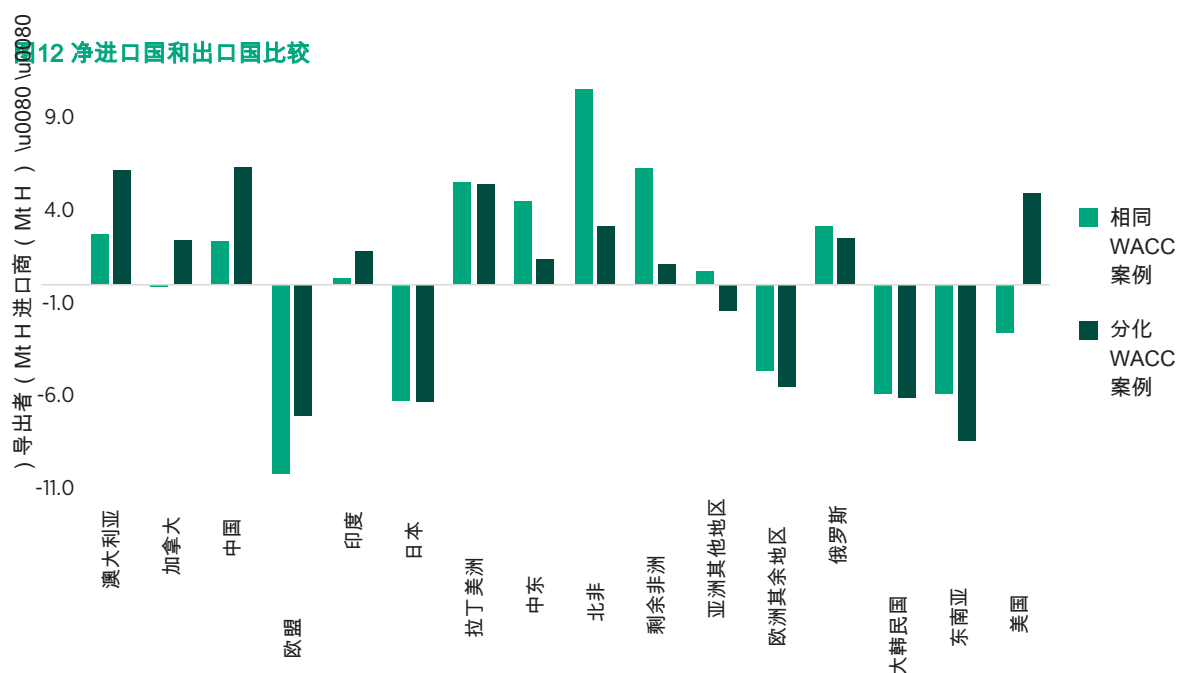
图11 交易百分比——相同WACC情景与差异化WACC情景



注意：DRI = 直接还原铁；Mt/yr = 百万吨/年；WACC = 加权平均资本成本。

在差异化WACC情景中，氢当量前三大净出口国是 **澳大利亚，中国，和 美国**，而在相同的WACC情景下，它们是 **非洲，拉丁美洲和中东**。本地生产在某些主要网络进口地区（如欧盟）增加，降低这些国家和地区由进口满足的需求百分比，并且全球氢及其相关商品的整体贸易量略有减少。

例如，在相同的10.2 Mt WACC情景下，对欧盟的净进口量变为7.1 Mt。欧盟绿色氢和相关商品部门的本地产量占比显著增加，仅约19%的需求通过进口满足。



注释：Mt H = 百万吨氢气；WACC = 加权平均资本成本。²

除了两种主要情景（相同WACC和差异化WACC），在发电、运输和电解槽的成本降低方面采用了乐观假设之外，该分析还考虑了 **敏感度** 为了这些参数进一步评估研究结果，更全面地处理研究，涵盖潜在的不确定性。

这些敏感性包括对两种情景下的发电、运输和电解槽的保守成本假设。保守的运输和电解槽假设使这些步骤的成本大致翻倍，同时保持对剩余值的乐观预期（单个变化）。保守 **即** 发电考虑光伏约20%和风能约10%的高资本支出。

With the **保守的一代** 成本敏感性，净贸易量在同一WACC情景下提高了11%，在差异化WACC情景下提高了6%。VRE发电的保守成本假设增加了潜在需求中心的本地生产成本，导致成本差异加大，并导致增量需求通过低成本供应得到满足，从而导致更多氢气和商品交易。

尽管总体成本更高，但在具有灵敏度相近的相同WACC情景下，对总体贸易流量没有显著影响 **保守式电解槽** 成本。

With **保守运输** 在相同WACC情景下，成本敏感度和净贸易量降低了25%，在差异化WACC情景下降低了19%。对于运输的保守成本假设降低了将绿色氢气和相关商品进口到潜在需求中心的成本差异，这导致了当地生产的增加和氢气及商品流动的减少。

在相同WACC情景下，进行了一项额外的敏感性分析，应用了8%的WACC假设。结果表明，氢气和商品贸易的整体量略有减少。然而，在该敏感性分析中，氨气贸易略有增加，一些国家表现出更高的氨气出口量，并出现了一些新的氨气贸易路线。

第四章

关键洞察

这项分析全面考虑了潜在的贸易方案，以满足氢相关绿色商品的需求，无论是通过纯氢在进口地区生产商品，还是通过氢基商品本身。远距离运输气态绿色氢可能存在技术挑战，并且只有在少数特定地区才被证明是具有成本效益的；相反，这些商品通常更容易进行跨洲运输。因此，在所分析的场景下，商品的交易可能会 **更经济实惠** 并且比纯氢更容易发生，在假设条件下，有73-80%的贸易以商品形式发生，有20-27%以纯氢形式发生。这表明，在氢气生产之外，开发一个部门供应链的额外阶段，交易基于氢的商品将是有利的。

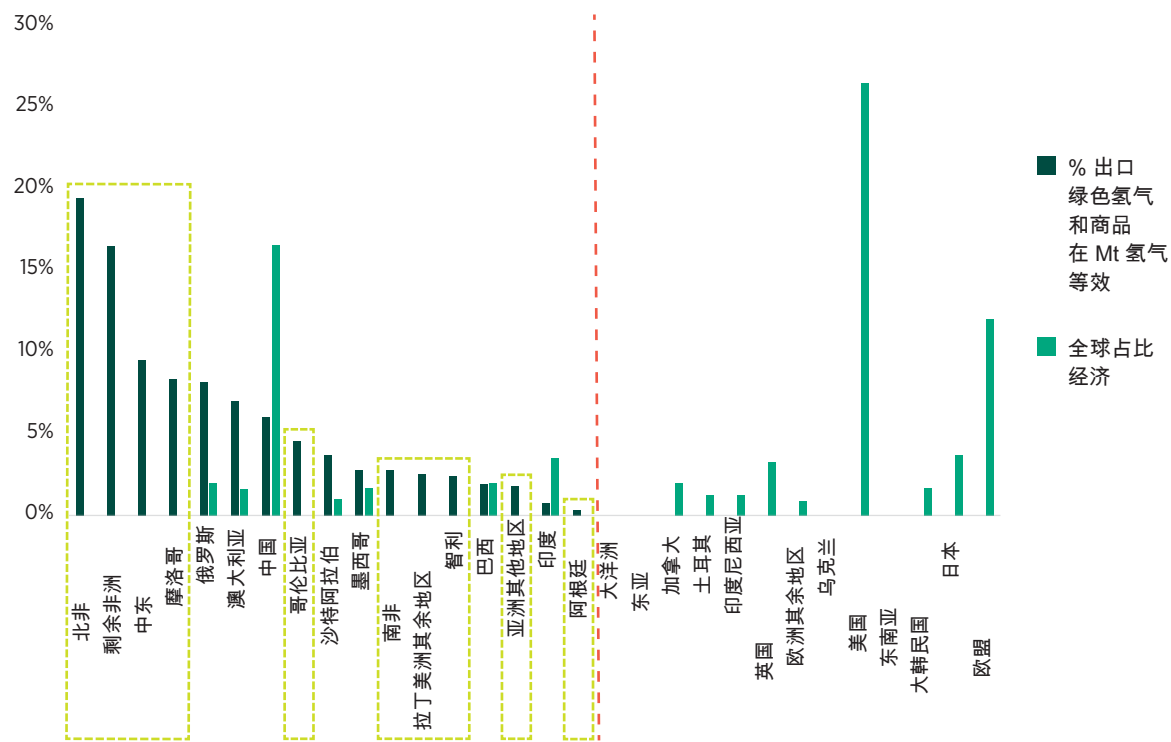
在这个背景下，政策制定者采取措施为绿氢和相关商品创造稳定需求，并使绿色商品的国际市场得以发展，这是至关重要的。因此，认证计划可能越来越多地被要求来保证基于氢的商品的特性，而不仅仅是为了绿氢本身。监管框架可能会演变，以针对绿色氨和绿色甲醇的生产建立与温室气体排放强度相关的具体要求（IRENA，2024d）。

发展绿色氢经济可能带来的好处可能超越脱碳的关键目标。如果战略规划确保优先领域（如电气化、能源获取和基本服务）不受影响，绿色氢和相关商品贸易将能极大地支持实现目标。 **公正且包容的能源转型** 特别是从全球南方的角度来看。许多发展中国家拥有优质的可再生资源，如果他们能够以有竞争力的利率获得融资，这将使它们能够以低于发达国家的成本生产绿色氢气。发展氢气贸易基础设施为发展中国家提供了在全球贸易中处于领先地位的机会，促进经济发展并增加其对全球经济的贡献。这也有助于这些国家在发展氢气基础设施的同时，建立强大的电力基础设施，作为一项额外的益处。

在图13中，相同WACC情景下的交易结果被映射到各国当前在全球经济中的百分比份额上。在图的左侧，虚线框内全球经济份额相对较低的国家和地区（**小于2%**）被发现在全球氢气和相关商品贸易中贡献显著。非洲和拉丁美洲，在相同WACC假设下，可能成为绿色氢气及其商品的主要出口国。非洲和拉丁美洲在全球经济中的份额约为8.5%；然而，根据上一节的结果，在相同WACC假设下，它们有可能在全球氢气贸易中扮演供应角色，贡献约62%。可以通过国际合作、风险缓解和融资工具为这些地区提供发展氢气基础设施的推动力，以降低资本成本，并结合战略定义的扩张政策，尽可能充分地利用可再生资源潜力，而不影响优先领域，如提供基本服务。

贸易也可以使资源相对匮乏的发达地区受益。像日本这样的国家，可能没有本地生产低成本氢气的资源，可以通过进口低成本氢气及相关商品为其先进工业带来好处。

图13 到2050年在相同WACC情景下的潜在供应商及其在2024年的全球GDP份额



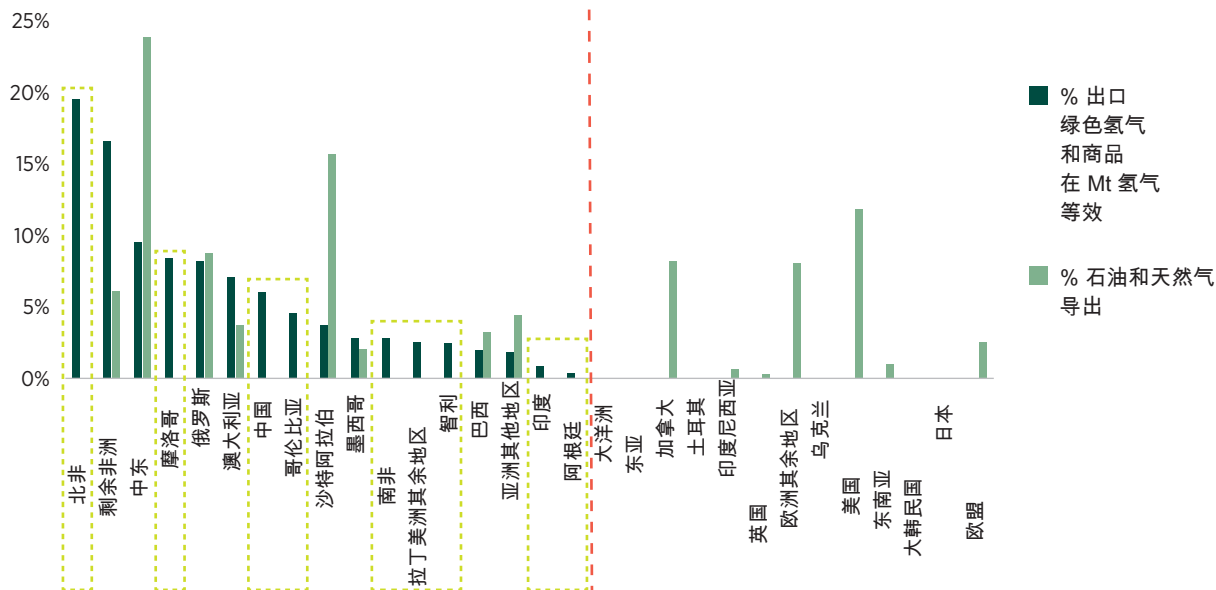
注意：为简化起见，全球经济体中份额低于2%的国家和地区被认为拥有可以忽略不计（0）的份额；GDP=国内生产总值；Mt=百万吨；WACC=资本加权平均成本。

绿色氢经济的发展也具有支持国家实现他们的潜力 **能源安全目标** 这可以从两个角度来看：对化石燃料进口的依赖降低，以及全球市场上增加能源供应商的机会。

发展中地区如非洲和拉丁美洲可以利用其丰富的可再生能源潜力，减少对石油和天然气进口的依赖，以满足其能源需求，同时实现能源供应多样化。此外，氢及其相关产品的贸易发展也可以被视为各国多样化供应选择的机会。分析中识别出的潜在贸易流表明，可能率先成为绿色氢气供应国的国家与当前石油和天然气的供应大国有所不同。

在图14中，相同WACC情景下的贸易结果被映射到当前主要的石油和天然气出口国的数据上（世界银行，无年份a，无年份b；世界主要出口，无年份）。在图的左侧，虚线框内拥有相对较低石油和天然气出口份额的国家和地区（小于2%）在全球当前格局中，它们被发现对全球氢气和商品交易有显著贡献。拉丁美洲和北非的某些国家，以及中国，被确定为能源出口商名单中预计的新进入者。这表明各国有可能多样化其供应选择，并变得更加能源安全。

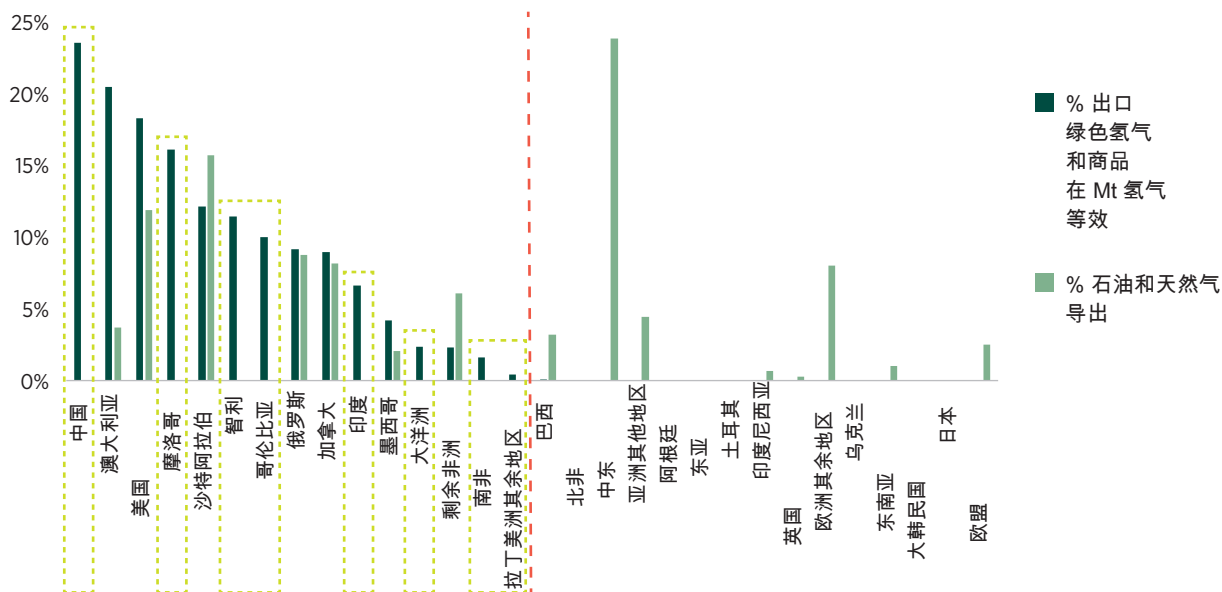
图14 2050年作为能源供应商的潜在新进入者在相同WACC情景下的全球石油和天然气出口份额在2024年



注意：为了简化，在当前全球格局中，石油和天然气出口占比低于2%的国家和地区被认为拥有可以忽略不计（0）的份额。

图15展示了差异化WACC假设对相同WACC假设得出的洞察的影响。差异化WACC情景的交易结果映射到全球石油和天然气贸易的当前主要出口商上。预期新进入者的名单再次表明了各国多样化其供应选择并变得更加能源安全的机会，相对于之前的案例有所变化。中国和印度，以及来自非洲和拉丁美洲的某些国家，再次被确定为能源出口者名单中的预期新进入者。然而，北非（不包括摩洛哥）作为一个地区没有被显示在图的左侧。

图15 2050年 differentiate WACC 情景下作为能源供应商的潜在新进入者的全球油气出口份额2024

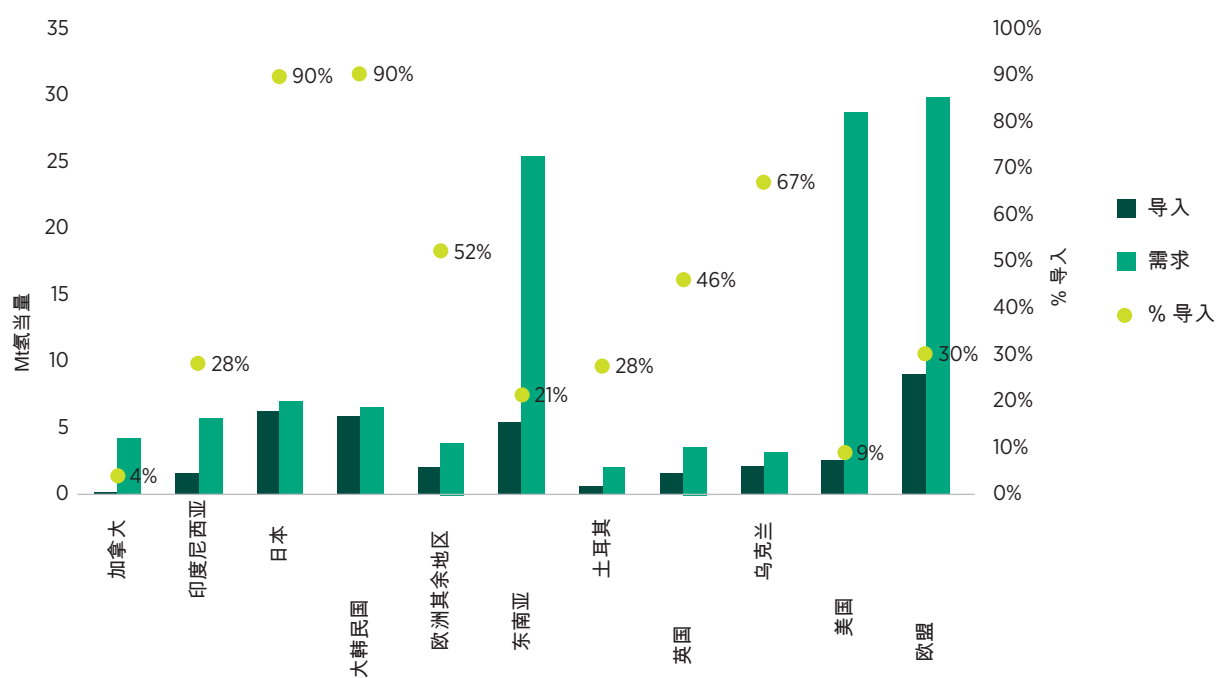


注意：为了简化，当前全球格局中石油和天然气出口份额小于2%的国家和地区被认为拥有可忽略（0）的份额；Mt=百万吨；WACC=资本加权平均成本。

加权平均资本成本（wacc），依赖于国家或地区的风险特征，显著影响绿色氢气和相关商品贸易前景。然而，不同国家wacc随时间的演变情况也存在不确定性。一些有助于降低国家（特别是氢气和绿色商品）wacc的因素包括通过联合项目或合作协议进行技术转让、能力建设以及使用国际融资工具（irena, 2022b）。为了实现公正和包容的能源转型并推动公平的全球进步，需要**全球努力和国际合作**，以改善具有较高WACC的地区和国家的金融成本。

这项分析的结果也强调了需要**政策定制化和地方基础设施发展的重要性**。大约 20% 的总氢气当量需求预计将通过国际贸易得到满足，而需求的大部分（约 80%）将在本地得到满足。这表明，通过强有力的政策和投资举措建立本地基础设施的价值，并得到强大的金融工具的支持。

图16 进口满足氢气和相关商品需求的比例



注意：Mt=百万吨。

也要强调的是，进口和本地生产的百分比份额在不同国家和地区之间存在差异，这突显了定制政策和计划的需求。例如，参考图16，那些可能进口其绿色氢气和相关商品90%的国家，如日本和韩国，可能需要不同于欧盟和加拿大（分别期望进口份额约为30%和4%）的不同政策。

附录

本研究基于扩展国际可再生能源署（IRENA）的全球氢气贸易成本优化模型（IRENA, 2022c）进行。该模型本身未考虑政治稳定或经济发展等因素，这些因素可能会影响贸易前景。地缘政治关系、贸易壁垒和其他约束可以通过专门设计的约束从外部纳入模型。

对于这项分析，绿色商品被定义为可用于使用绿氢替代碳基氢原料或碳密集型工艺进行脱碳的行业和应用的产物及最终用途。在这项分析中，三种绿色商品，即氨、甲醇和直接还原铁（DRI）被考虑在内，所有其他商品或最终用途均归入氢气需求。

甲醇可以通过多种生产方法生产，包括生物质、天然气和氢气。在本分析中，仅考虑基于氢气的生产方法（电解甲醇[电甲醇]）¹。使用氢气作为原料，被认为。考虑到e甲醇生产中碳的可用性。对于e甲醇生产，碳可以来自生物来源或直接空气捕获（DAC）。根据IRENA的估计，不同类型来源（发酵、沼气、纸浆、造纸、生物垃圾焚烧等）的生物碳的预期可用数量及其各自成本被包括。（国际可再生能源机构，2023年），如图A2所示。除了生物碳²，世界能源转型展望来源，DAC也包含在内，其成本远高于生物碳。在建模框架中，生物碳的交易是不允许的。

对于基于绿色氢气的钢铁生产，炼钢用直接还原铁和铁矿石的流向被视为根据地理区域¹可用性（标普，2021年；标普资本IQ专业全球金属与采矿，不适用）如图A3所示。铁矿石质量因国家而异，由此产生的对铁处理步骤（如球团机）的要求，通过成本差异的包含而反映出来。重要的是要强调，铁矿石的交易也包括在模型框架中。这是为了评估满足绿色直接还原铁（DRI）需求哪种更具经济性：是直接进口，还是分别进口铁矿石和绿色氢气，并在当地生产绿色DRI。

根据当前预测，预计到2050年，每个地理节点的氢气当量需求为氢气和绿色商品。氢气和绿色商品的总全球需求估计为260 Mt H-eq。绿色氢气和绿色商品需求的细分

² 国家和地区的分布如图A1所示。欧盟的需求与欧盟区域能源转型展望（IRENA，2025年）一致。

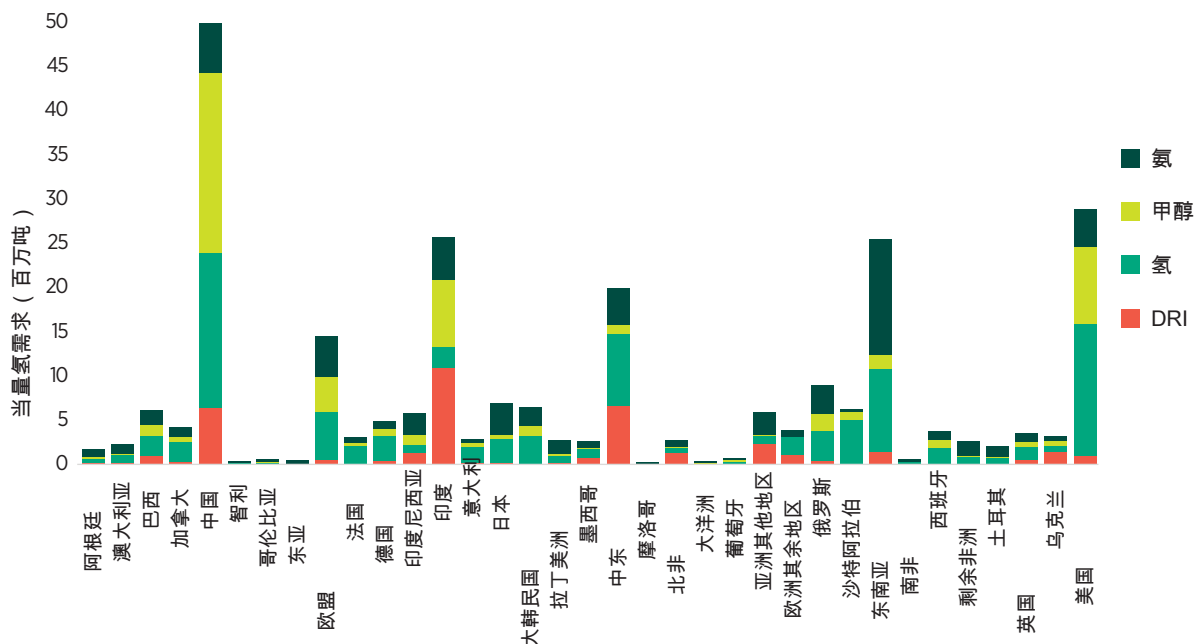
下表展示了模型中实现的主要假设。

主题	假设
商品和承运人包含在模型优化生产和贸易	• 压缩氢气 • 液化氢 • 液体有机载氢体 (LOHC) • 氨 • 甲醇 • DRI. 模型的作用范围如图A7所示。
时间范围	该模型仅关注2050年单一年投资情景。
地理学表示	该模型粒度涵盖G20国家、在氢能贸易中具有重要意义的重点国家 (包括哥伦比亚、智利、摩洛哥、葡萄牙、西班牙和乌克兰), 以及八个汇总地区代表其余世界。¹⁷到
需求	在1.5°C情景下, 2050年每项商品的总全球需求量, 以Mt H计_{2-neq}: • 氨: 66.7百万吨 (欧盟为7.6百万吨) • 乙醇: 55.5百万吨 (欧盟为6.7百万吨) • DRI: 39.9 Mt (14.1 Mt for the European Union) • 氢气: 9.81Mt (欧盟1.5Mt) 每个氢气品种按国家/地区的需求分解基于修订估计 (IRENA正在进行的工作), 如图A1所示。对于欧盟, 需求是与IRENA欧盟展望2025年 (IRENA, 2025年) 一致 该方法论专注于估计绿色氢气和衍生商品的需求关键工业和交通部门, 即: 航运、航空、高附加值化学品、化肥和钢。用于国家和区域层面氢气需求估计所采用的方法论框架基于IRENA 2022年分析中使用的方法, 进行了少量修改以反映更新数据和假设。到 2050 年, 每个部门的最终能源需求预测, 以及高层关于生产途径中绿氢份额的假设, 与近期文献和情景研究。使用这些输入, 绿色氢需求的有益估计已在1.5°C情景下为每个建模的国家/地区开发了到2050年的方案。 氢能在道路运输 (不包括重型车辆)、铁路运输等领域的需求建筑物和精炼业已被排除在此分析之外, 因为它们预计的氢气需求是被认为不重要。重要的是要注意, 这项研究不会评估潜在竞争在多种不同的氢气 (以及衍生商品) 生产路线 (例如, 绿色、蓝色、灰色、青金石也不考虑基于氢的商品的替代品。估计仅限于对绿氢的需求和绿氢衍生的商品。此外, 电力部门的氢气消耗——尤其是季节性储能——由于需要集成燃气和电力系统建模, 这超出了...本研究范围。因此, 预计电力部门的氢气使用量为约21 EJ/年 (相当于1.75亿吨氢气), 根据IRENA (2022年) 的数据, 尚未已纳入需求计算。
交易氨	该模型仅考虑进口端氨重新转换为氢气, 并排除钢铁和甲醇的再转化。 • 模型中隐含考虑了氮成本 • 运输成本与IRENA全球氢气贸易分析2022 (IRENA, 2022c) 中的相同。
DRI交易	• 所采用的工艺流程如图A4所示。天然气输入未进行建模。 • 对于每生产一吨DRI, 假设需要投入60.5公斤的氢气输入。所有贸易流在结果部分中呈现的, 包括对于DRI的, 都是以等效氢形式表示的 (以Mt H为单位)_{2-neq}.

¹⁷ 撒哈拉以南非洲, 中东其他地区, 北非, 亚洲其他地区, 东南亚, 欧洲其他地区, 欧盟其他地区, 拉丁美洲其他地区, 大洋洲。

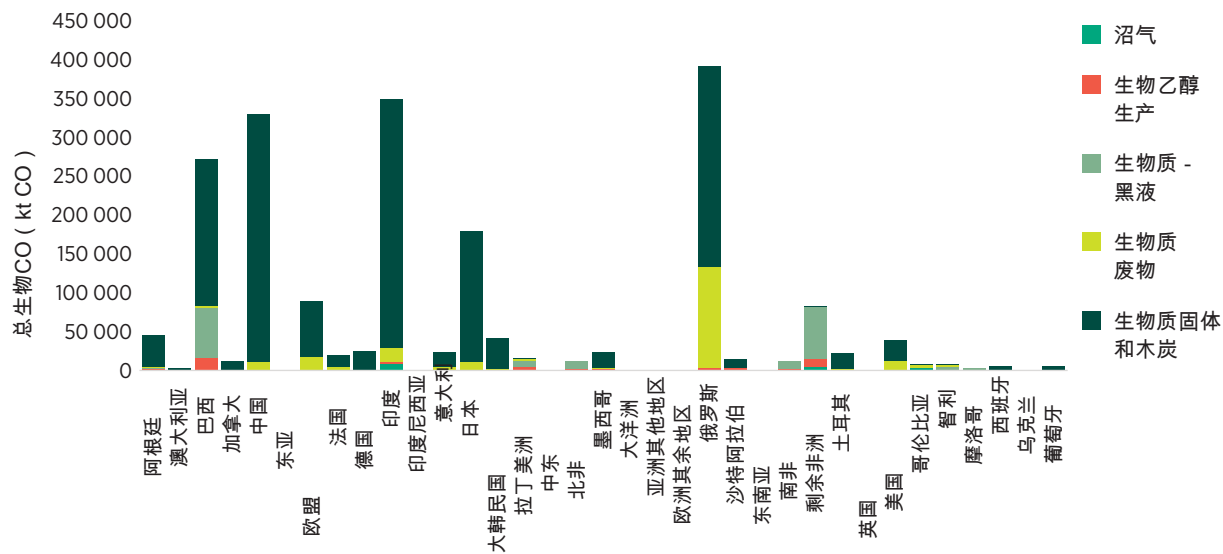
主题	假设
铁矿石流量	- 预计到2050年的铁矿石流量根据现有矿山的产量进行估算，记录铁矿石品位和不同产品。当前矿山生产的输出已经根据矿山生产历史下降率进行调整以考虑下降率下降。估算还包括关键计划铁矿石项目和扩建的产出。 - 对铁矿石的成本假设在地区间是均匀的，因为它是国际贸易的商品。然而，在将中等级别铁矿石与高等级别铁矿石进行比较时，会考虑溢价。品位铁矿石，以及与其他类型铁矿石产品相比的球团矿。 - 来自（IRENA，2022a；S&P，2021；S&P Capital IQ Pro Global Metals & Mining，n.d.）的铁矿石流动数据是用于DRI出口国家的，如图A3所示。
交易 甲醇	- 所考虑的生产过程如图A5所示。未对水输入进行建模。 - CO₂作为输入的可用性如图A2所示。 - 生物来源CO₂的潜在可用性 每个国家的生物质转化为了能源使用（生物质能）从IRENA的世界能源转型展望中的生物质能流2024 1.5°C场景（DES）。乙醇和沼气的生产作为副产品产生高生物成因CO₂浓度，以及其他类型生物质的燃烧用于热能和电力释放生物成因CO₂，如果被捕获，可以本地使用或运送到另一个生产甲醇的网站。 - 对于每个国家，考虑以下生物能源载体：生物乙醇（生产）、沼气（生产）、黑液（燃烧）、木炭（燃烧，假设只有70%被燃烧）到2050年实现集中化位置），固体生物质和生物废弃物（燃烧）。注意，实现这些在e甲醇站点可用的流需要大量规划（政策、基础设施等）。可能需要与其他用途竞争（例如碳移除、CCU、化学工业、食品&饮料和其他电子燃料（如e-SAF）。
成本	资本性支出假设根据国家/地区、考虑2050年的情况而有所不同，从（IRENA, 2022c）的乐观成本假设线 - 太阳能光伏（PV）：225-455美元/千瓦 - 陆上风电：700-1,070美元/kW - 海上风电：1,275-1,745美元/千瓦 - 电解槽：215-391美元/千瓦 对于相同的WACC情景，假设值为5%。对于不同的WACC情景，参见图A6。

图A1 绿色氢和相关商品的需求估计（Mt H-eq/年）
在 2050



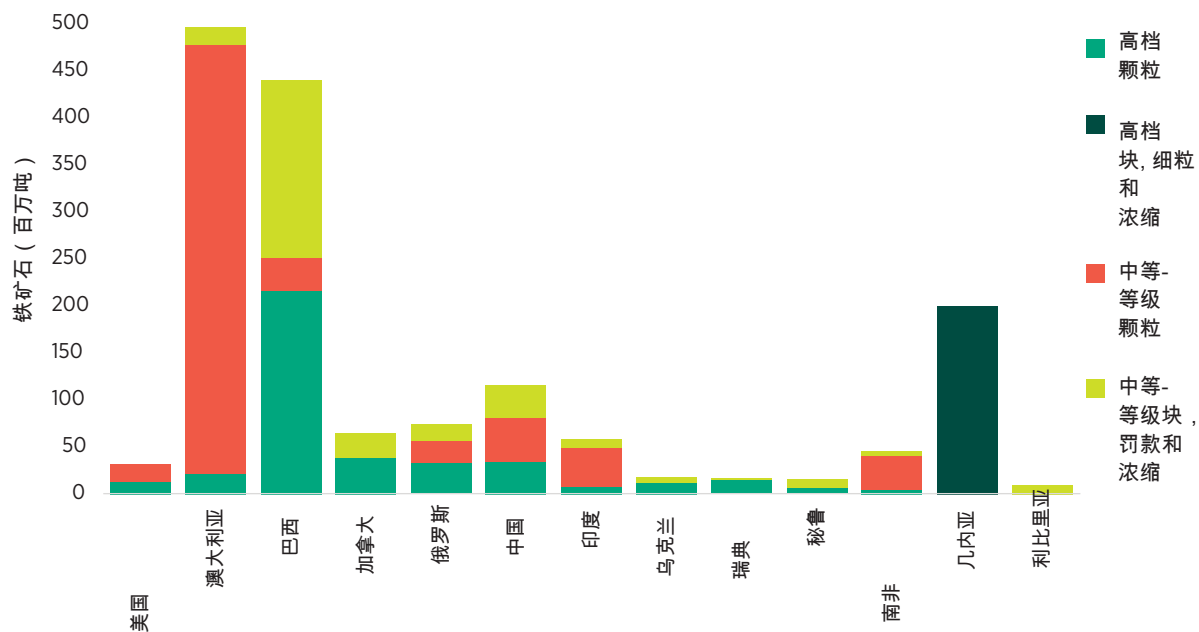
备注：DRI为直接还原铁；Mt为一百万吨。

图A2 生物碳源



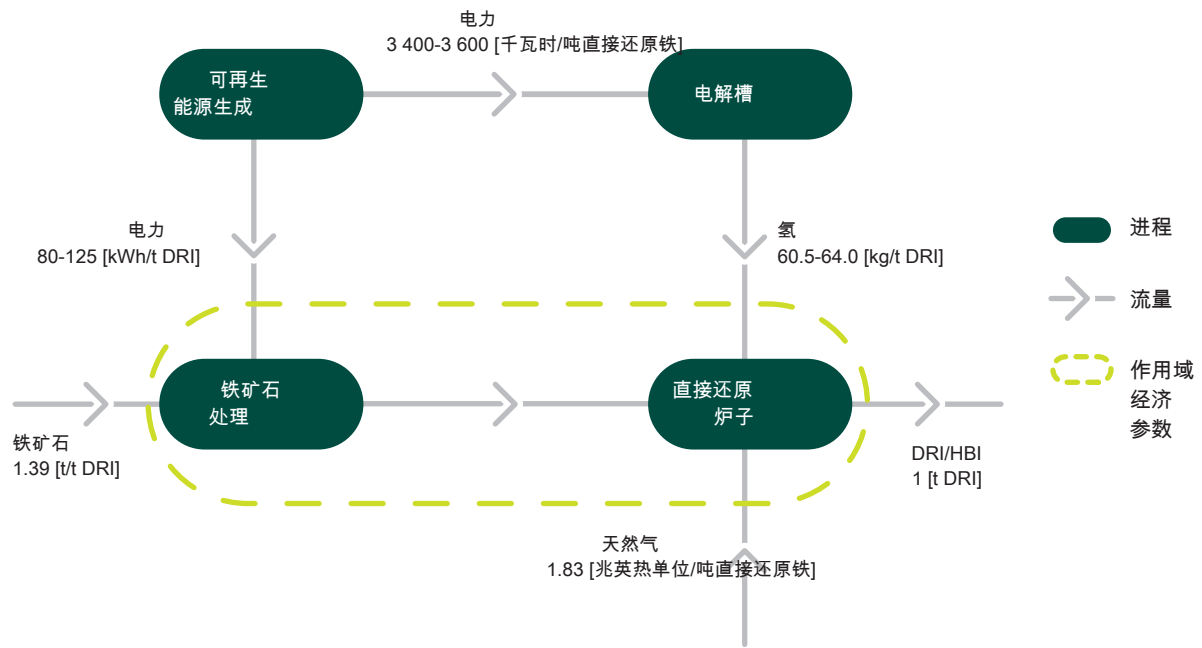
注释: CO₂ = 二氧化碳; kt = 千吨。

图A3 2050年估计的铁矿石流量



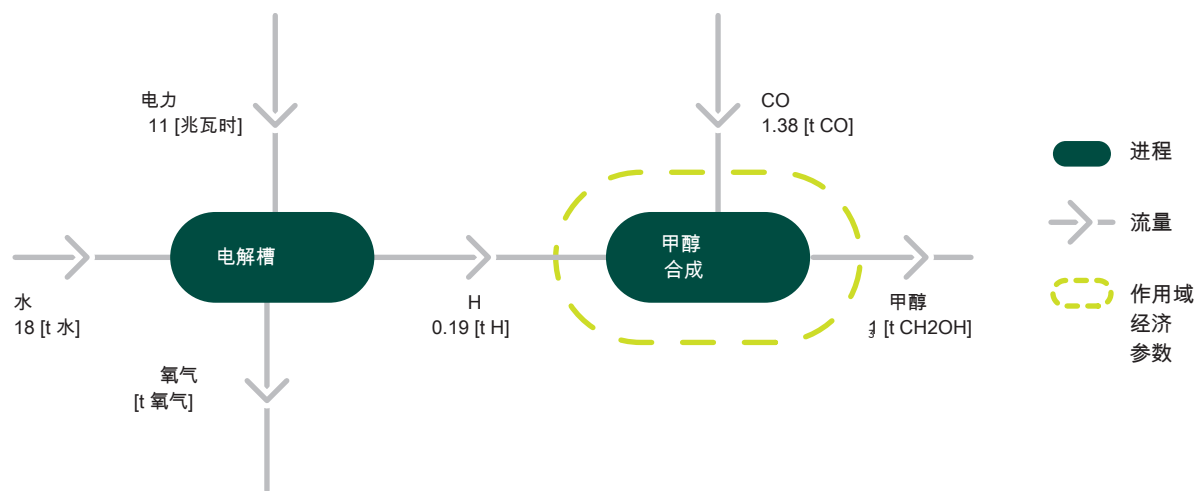
注意: Mt=百万吨。

图A4 DRI生产所需电力和氢气



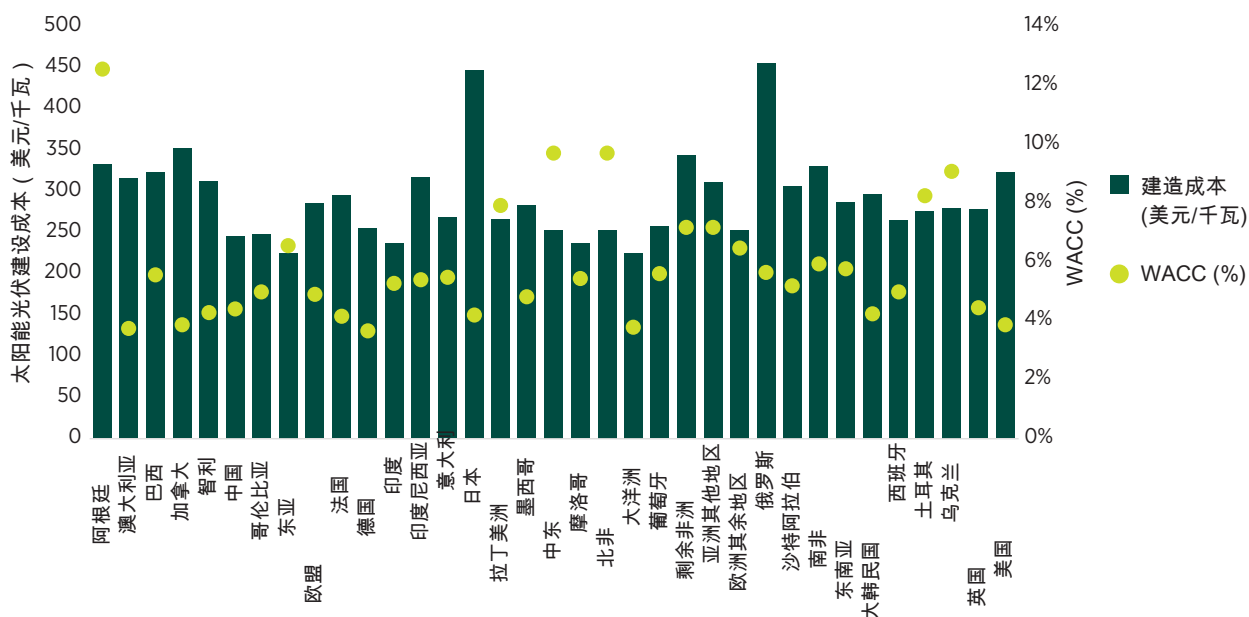
注意：kg = 千克；kWh = 千瓦时；MBtu = 百万英热单位；t = 吨。

图A5 电和氢气对甲醇制乙醇的需求



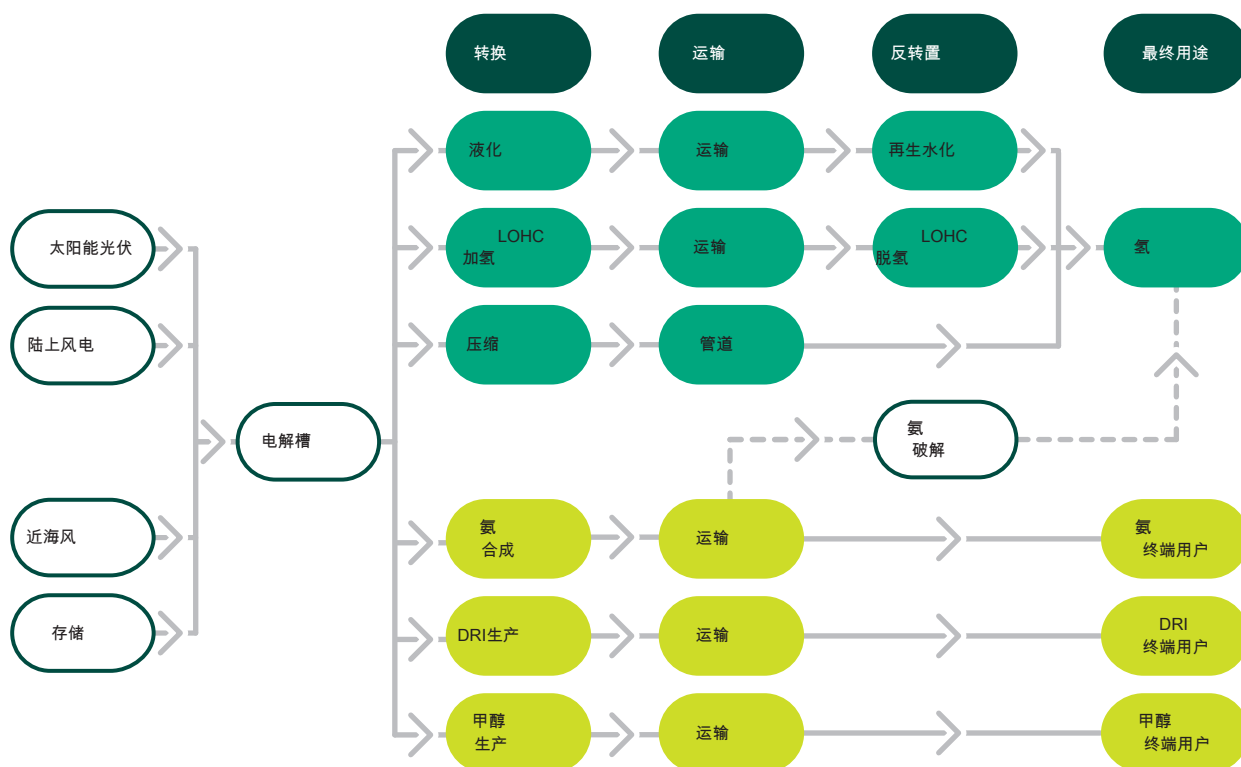
注意：CH₂OH = 甲醇；MWh = 兆瓦时。

图A6 2050年差异化WACC情景的假设



备注：kW = 千瓦；USD = 美元；WACC = 加权平均资本成本。

图A7 模型范围



参考文献

彭博新能源财经 (n.d.), , <https://about.bnef.com/insights/clean-energy/氢能供应展望-2024-现实检查/>

布朗, T. (2025), \"极简甲醇经济作为高电气化场景的填补方案\" 等
在国际能源研讨会, 奈良 <https://nworbmot.org/energy/brown-iew25.pdf>

碳氢化合物工程 (无日期) 可再生甲醇: 为减排提供动力难以消除
, https://www.hydrocarbonengineering.com/special-reports/01042025/renewable-methanol-部门解决难以减排行业的脱碳问题/?utm_source=ChatGPT.com

IRENA (2022a), ,国际可再生能源 世界能源转型展望 2022 : 1.5°C路径
机构, 阿布扎比, <https://www.irena.org/publications/2022/Mar/World-Energy-Transitions-Outlook-2022>

IRENA (2022b), 全球氢能贸易将助力实现1.5°C气候目标: 第三部分 - 绿氢成本和
,国际可再生能源机构,阿布扎比, [www.irena.org/publications/2022/may/ 潜力全球氢气贸易-成本](http://www.irena.org/publications/2022/may/潜力全球氢气贸易-成本)

IRENA (2022c), 全球氢气贸易将达成1.5°C气候目标: 第一部分 - 2050年贸易展望
,国际可再生能源机构,阿布扎比, [www.irena.org/Publications/2022/Jul/ 前进的方向全球氢气贸易展望](http://www.irena.org/Publications/2022/Jul/前进的方向全球氢气贸易展望)

IRENA (2023), ,国际可再生能源 世界能源转型展望2023 : 1.5°C路径
机构, 阿布扎比, www.irena.org/Publications/2023/Jun/世界能源转型展望2023

IRENA (2024a), ,国际可再生能源 全球能源转型展望2024 : 1.5°C路径
机构, 阿布扎比, www.irena.org/Publications/2024/Nov/世界能源转型展望2024 .

IRENA (2024b), ,国际 使用可再生能源脱碳难创减部门: 七国集团的前景
可再生能源署, 阿布扎比 www.irena.org/Publications/2024/Apr/利用可再生能源实现难以减排的行业脱碳-G7的展望

IRENA (2024c) , , 国际可再生能源机构, 阿布扎比 绿色氢能战略: 设计指南
达希 <https://www.irena.org/Publications/2024/Jul/Green-hydrogen-strategy-A-guide-to-design>

IRENA (2024d), 全球绿氢衍生物贸易: 监管、标准化趋势
,国际可再生能源机构,阿布扎比, [https://www.irena.org/ 和认证出版物/2024/10/全球绿色氢衍生物贸易-监管、标准化和认证趋势](https://www.irena.org/出版物/2024/10/全球绿色氢衍生物贸易-监管、标准化和认证趋势)

IRENA (2025), ,国际可再生能源署, 区域能源转型展望: 欧盟
阿布扎比 www.irena.org/publications/2025/jun/区域能源转型展望欧盟

IRENA和WTO (2023) , 国际贸易与绿氢: 支持全球向
,世界贸易组织和国际可再生能源机构,日内瓦和 低碳经济
阿布扎比, www.irena.org/publications/2023/dec/international-trade-and-green-hydrogen-supporting-the-global-transition-to-a-low-carbon-economy

IRENA和WTO (2024) , *促进可再生氢及其衍生商品的国际贸易*
国际可再生能源机构 ; 世界贸易组织 , 阿布扎比 ; 日内瓦 , www.irena.org/ 出版/2024/Nov/使能全球可再生氢
及其衍生商品贸易

OECD (2025), 第174号, 组织 *氢在钢中 : 应对排放和应对产能过剩*
经合组织 [https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/ reports/2025/03/hydrogen-in-steel_f4d15f8d/7e2edc69-en.pdf?utm_source=chatgpt.com](https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2025/03/hydrogen-in-steel_f4d15f8d/7e2edc69-en.pdf?utm_source=chatgpt.com)

标普 (2021年) , "中国脱碳化下高品质铁矿石供应将难以满足需求 : MI", 标普全球 <https://www.spglobal.com/commodity-insights/en/news-research/latest-news/metals/060821-high-grade-iron-ore-supply-to-struggle-to-meet-demand-as-china-decarbonizes-mi>

S&P Capital IQ Pro 全球金属与采矿 (n.d.), "铁矿石成本" <https://www.spglobal.com/market-intelligence/en/solutions/products/resources/capital-iq-pro-metals>

标普全球 (2022年) , "直接还原铁成为钢铁脱碳的获胜者" https://www.spglobal.com/commodity-insights/en/news-research/blog/metals/062222-dri-steel-decarbonization-direct-reduced-iron?utm_source=chatgpt.com

UNIDO, (2024), 等 *为可持续工业发展提供绿色氢能 : 为发展中国家提供政策工具包*
联合国工业发展组织, 国际可再生能源署 国家
和德国发展与环境研究所, 维也纳和阿布扎比 www.irena.org/ 出版/2024/Feb/绿色氢能对于可持续工业发展-为发展中国家提供政策工具包

Wood Mackenzie (无日期), www.woodmac.com 氢能战略规划展望

世界银行 (n.d.a) , "天然气出口 (天然气) \", [https://wits.worldbank.org/trade/comtrade/](https://wits.worldbank.org/trade/comtrade/en/country/ALL/year/2023/tradeflow/Exports/partner/WLD/product/271121) 世界银行
en/country/ALL/year/2023/tradeflow/Exports/partner/WLD/product/271121

世界银行 (无日期b) , "天然气出口 (液化) ", [https://wits.worldbank.org/trade/](https://wits.worldbank.org/trade/comtrade/zh/country/ALL/year/2023/tradeflow/Exports/partner/WLD/product/271111) 世界银行
comtrade/zh/country/ALL/year/2023/tradeflow/Exports/partner/WLD/product/271111

世界顶级出口 (n.d.), "石油出口", [https://www.worldstopexports.com/worlds-](https://www.worldstopexports.com/worlds-top-oil-exports-country/) 世界主要出口商品
top-oil-exports-country/

