



清洁氢能共享基础设施

对清洁氢发展问题的研究通常集中于 **底线**。

生产端。为储存和运输而建设和使用的基建需要更多关注。需要评估的议题包括系统设计、运营、集成和所有权；市场设计和治理；以及规划。本篇Live Wire考察了关于氢能枢纽基建的案例研究和文献，重点强调了共享基建的优势。考虑到氢能生产和基建的广泛性，重点放在可再生氢能的生产上，用于国内使用，以及转化为氨气后用于出口。

因此，世界银行正收到越来越多的与氢能基础设施和氢能枢纽相关的请求。这包括为出口氢或氢衍生物（如氨）而扩建或开发港口或港口码头，以及巴西、印度050公里塔尔与氢能基础设施相关的投资总额可能基础设施投资5至5万亿美元之间（氢能委员会 2022年；帕拉迪诺 2023年；ESMAP等人 2024年）。活动范围从法律和监管框架的评估到技术经济研究和基础设施投资的融资。

到2050年的氢气整体投资需求高度不确定，因为其规模和时间取决于许多因素。这些因素包括电解槽、光伏和风电项目、储能和运输基础设施、以及终端用资产的单位资本成本如何随着部署和规模下降；全球生产和需求如何以及在哪里随时间增长；以及不同应用之间的分配——所有这些都带有重大的不确定性。

这个Live Wire使用“可再生氢”和“低碳氢”这两个术语来指代人们有时称之为“绿色”和“蓝色”的氢气。可再生氢由可再生电源生产。低碳氢由化石燃料生产，并结合了碳捕获与封存（CCS）。“清洁氢”则用于统称两者。

这期快讯由世界银行的能源部门管理援助计划编制，以支持氢能发展伙伴关系。H4D

它由来自全球近50家合作伙伴组织组成。它协助将低碳氢纳入其长期脱碳战略的国家。作者为ESMAP的一名能源专家拉斐尔·本。

多尔夫·吉伦，世界银行能效与气候变化部门（ESMAP）氢能负责人，以及托马斯·詹金，世界银行能效与气候变化部门（ESMAP）顾问和约翰霍普金斯大学兼职讲师。

基础设施为什么重要？

基础设施规划是可再生氢和氨增长的关键

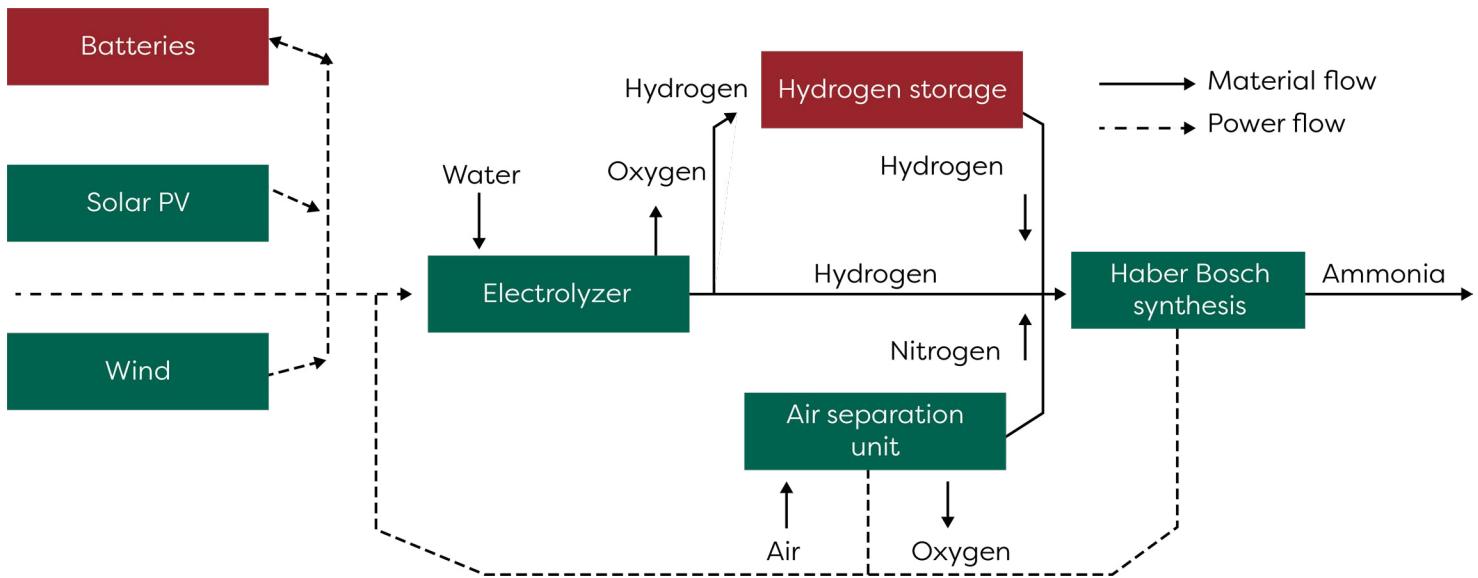
用于将氢气转化为氨气的可再生能源项目通常由图1所示要素组成。可再生能源和氨气的生产及出口的关键组件包括这些组件，以及运输和港口相关的基础设施。这些设施包括发电站；电解装置，利用电将水分解为氢气和氧气；氢气储存设施，用于平衡可变氢气生产，从而为氨气装置提供稳定供应（图1）；海水淡化厂和供水管道，用于缺乏清洁水的地区；氨气装置，包括低温液氨储存罐（假设氢气被转化为氨气）；以及港口设施。

这些氢气生产设施的具体配置、相对尺寸和位置将因项目而异，并根据考虑未来扩展的最低成本系统优化（Armijo and Philibert 2020; Campion et al. 2024）来确定。

仅举一例，决策必须在以下两种方案中选择：将电解装置建于港口附近，并通过电力传输系统连接到可再生能源发电站；或者靠近可变可再生能源（VRE）源进行制氢，然后建设并使用氢气管道将氢气输送到港口附近的氨厂。图2展示了多种可能的配置方案。

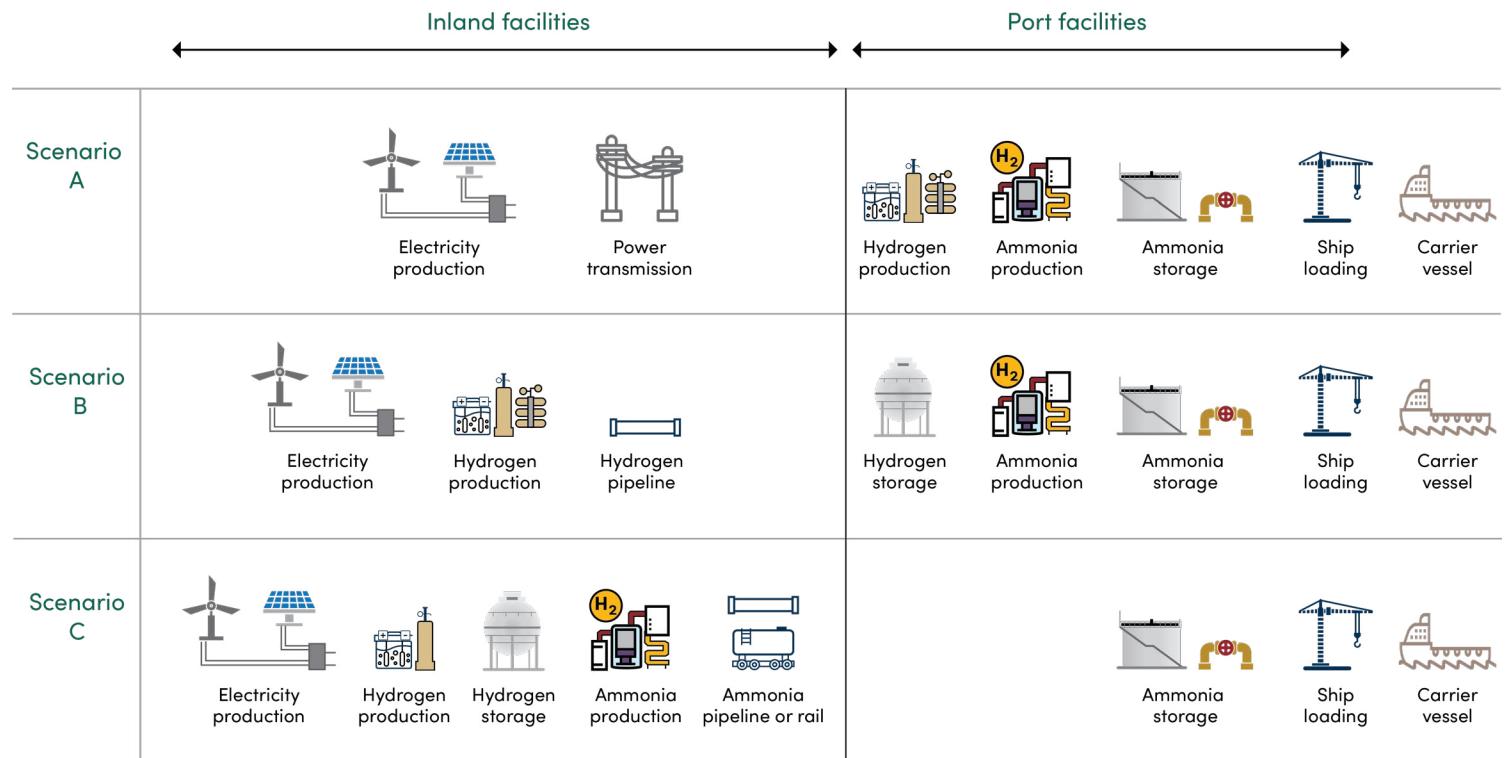
场景A展示了远程光伏和风力项目将电力传输到附近的港口设施以生产氢气和氨，而场景B中，氢气在VRE发电场附近生产，然后通过管道以压缩气体的形式转运到港口。场景B还可能需要现场存储来平衡供需，以及从近海附近的脱盐工厂输水的管道。在场景C中，氢气在VRE发电场附近转化为氨；然后以液态形式通过管道或铁路转运。这些场景的变体可能涉及接入电网以补充光伏和风能；港口或附近也可能提供电网接入。在某些情况下，如果盐洞或其他地下存储可用，场景可能会修改为包括季节性氢存储（Nayak-Luke 2020；DNV 2022）。

图1。使用可再生电力生产氢气和氨



注意：储能和氢储存在红色中显示。在没有电网连接或无法获得所谓的基本负荷可再生能源——如地热或水力发电等持续可靠的能源来源的情况下，这些是必需的，以使氨厂能够以较高的容量因子运行。PV = 光伏。

图2. 三种可能的可再生氢和氨生产及运输路线



对于未并网的可再生氢能项目，光伏和风电项目的组合额定容量（兆瓦）相对于电解装置的容量可能经常过大。相对于电解装置容量的VRE（非常规可再生能源）过大的目的是通过提高电解装置的容量因子来降低氢气的交付成本。权衡之处在于消纳，除非多余电力被储存。过大的程度将取决于地点和资源，x1.2到x2.0的范围相当常见（Armijo和Philibert 2020；LBST 2022）。

在更大批量的货物（Salmon, Bañares-Alcántara, 和Nayak-Luke 2021）上

对于一个每年出口120万吨液氨的示范性港口码头（相当于每年210,000吨），冷藏液氨储存 公吨H²

储罐的容量可设计为15至30天的储存量，并能容纳约与载运船舶相当的两倍体积（DNV 2022；Elishav等人2021；Goff 2020）。在这种情况下，基于平均日产量，15天的储存量将需要

³（关于一个或多个总容积约为80,000立方米（55,000公吨液氨）的储罐）。此类出口终端可能由总容积为40,000立方米的承运船舶服务。³ 每两周出现一次（Goff 2020）。

在港口设施中，液氨（温度为-33°C）可以被转移到码头或泊位的装卸臂上，或者转移到海上单个系泊点，该系泊点通过海底管道与岸边相连。具有实心码头或栈桥的码头更昂贵，但可以通过设计用于多种商品的进出口来提供灵活性。更高的利用率也可以降低装卸的平准化成本，因为泊位和其他港口设施的固定成本被分摊

1. 该说明性示例遵循戈夫（2020）中类似的方法，但适用于一个年制氢和氨出口量较小的植物和港口。

图3. PECEM港口和港口基础设施



来源：PECEM 2023 和 PECEM 复合体 (<https://www.complexodopecem.com.br/informacoes>)。TMUT = 多功能终端。

五个案例研究突出了基础设施在可再生氢气枢纽中的重要性

在36个国家 (Mission Innovation 2024) 有超过90个氢能枢纽正在开发中。鉴于这些项目的具体设计细节各不相同且发展迅速，这里提供来自巴西、南非、埃及、毛里塔尼亚、智利北部和智利南部的研究案例并非全面，尽管它们具有启发性。²

案例研究1：PECEM氢能枢纽，巴西东北部

佩塞姆工业和港口综合体 (Complexo Industrial e Portuário do Pecém) 包括一个工业区、深水港和出口加工区 (图3)。³ The

复杂的，面积达190平方公里 (19,000公顷)，是由巴西塞阿拉州 (70%) 和鹿特丹港 (30%) 合资拥有的。其商业优势包括靠近深水航道以处理大型船舶；现有的港口基础设施；扩建空间；铁路连接；以及地方工业基础，包括现有的水泥、钢铁、铁和陶瓷工厂，以及与国家电力电网 (PECEM 2021, 2023) 的连接。扩建计划包括在2号码头建设新的氨出口泊位，以及在一个多功能终端建设用于进口项目设备 (如电解槽和光伏及风电项目设备) 的设施。

共用共用基础设施承诺重要效益。在PECEM，这体现在以下共用计划中：氢及其衍生物的储存；装卸设施；管道和水 (废水再利用、海水淡化和原水)；以及一座500千伏的变电站，提供3吉瓦的电网连接。

2. 这些案例研究以及文献综述中提供的信息，代表了一个动态领域的一个快照。3. 本案例研究主要总结了Fabio Grandchamp (COO, 巴西PECEM综合设施) 在2023年10月24日在智利圣地亚哥举行的第二次“发展用氢”(H4D)合作伙伴会议上所提供的信息；<https://www.complexodopecem.com.br/institucional/>。

PECEM的雄心是成为巴西的主要可再生能源氢气枢纽，并通过鹿特丹成为对欧洲的主要出口商。港口综合体已与国家和国际清洁氢气开发商签署了谅解备忘录，以投资工业区，以及该区内的几项土地租赁预合同，这些预合同可能释放高达100亿美元的私人资本，用于未来十年清洁氢气和衍生品的投资。预计首批项目将于2026年达到财务 closure，并于2029年投入运营。

世界银行的贷款为2号泊位的两个新专用泊位和多用途码头提供资金，以及一条连接出口加工区氨气生产与港口2号泊位（约12公里）的公用事业走廊和管道。

PECEM成功的关键决定因素包括：

- 3 可再生能源的可用性和电网接入⁴
- 3 可用于发展发电和氢气生产、储存和运输的基础设施的用地可用性
- 3 税收政策与激励措施，包括一个出口加工区
- 3 一个预先批准的环境许可证
- 3 熟练劳动力

本地市场机会，包括使用可再生氢气制造氨、甲醇、可持续航空燃料、燃料、钢铁、化工产品、肥料和大豆。

案例研究 2：南非弗里波特萨尔达纳

弗里波特萨兰德拉工业开发区是南非首个包含商业港内空间的特殊经济区，而非邻港。⁵ 港口是最大的和最深的天然港口

4. 近几个月来，由于电网容量不足，巴西东北部的所有氢能项目都被拒绝接入电网。正在评估需要哪些投资来增加容量。这个案例说明了基础设施规划和投资对及时推广氢能的重要性。

5. <https://www.thedtic.gov.za/sectors-and-services-2/industrial-development/special-economic-zones/>。该案例研究总结了Patrick Lakabane在2023年10月24日在智利圣地亚哥举行的第二次H4D伙伴关系会议上所介绍的信息。

南半球，能够容纳和服务各种船舰。它位于开普敦以北约60海里处。该地区通过海运、陆运、铁路和空中运输均可轻松获得。自由港萨尔达尼亞由国家贸易、工业和竞争部以及西开普省政府共同支持和资助（自由港萨尔达尼亞 2023, 2024）。

该区域的主要优势包括：

- 3 太阳能和风能资源非常好，并且有大量可用的土地
- 3 一个海洋和能源服务及工程中心
- 3 已建立且潜在高度适合的港口基础设施，以支持氢及其衍生物的出口，并为船舶提供燃料加注地点
- 3 萨尔丹哈湾市政当局在港口10公里范围内建设并运营海水反渗透海水淡化厂的许可，日处理量为25,000公吨或年处理量为870万公吨
- 3 本地内需与出口需求潜力
- 3 其氢气生产的潜在下游用户，包括阿塞勒米塔尔南非公司、MyCity公交、港口设备和国土车辆
- 3 获取专业技能人才。

萨尔达纳呈现了与PECEM相似的早期优势。这是一个绝佳的地点，具有转化价值潜力（位于制造业集群的中心），拥有多个市场和支援性的公共部门生态系统。

可行性研究将集中于催化投资者、为公共部门准备性提供的共享基础设施解决方案，以及私营部门和公共部门发展的协调（Freeport Saldanha 2023）。

案例研究 3：苏伊士运河经济区 (SCZONE)，埃及

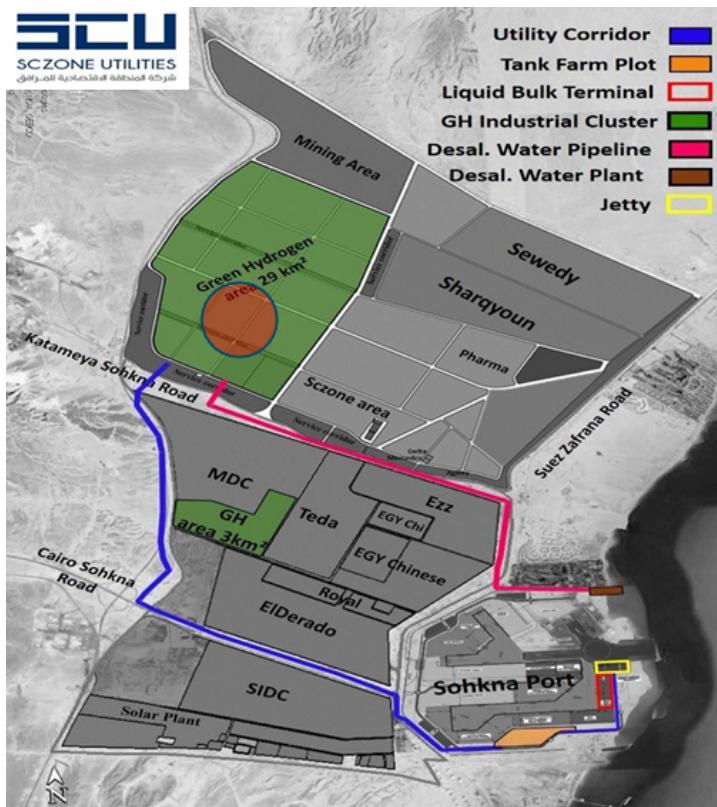
战略性地位于苏伊士运河，SCZONE包罗

⁶ 索恩娜 穿过四个工业园区和六个海港。集群位于红海的西侧，可再生H₂

6. 该案例研究大量参考了塞尤斯运河经济区阿迈德·萨德于2023年10月24日在智利圣地亚哥举行的第二次为发展制氢伙伴关系会议（H4D）上所做的演示（SCZONE 2023）。

图4. 埃及索科纳的SCZONE

氢气生产集群和港口的潜在布局，展示潜在共享设施，包括中央变电站的使用



来源：SCZONE 2023。

在苏伊士运河入口以南。与索昆纳SCZONE工业区共同规划的设施可能包括（图4）：

- 3 具有第一阶段产能的苦咸水淡化厂
- 3 到2026年每天，计划扩大四倍 250,000 m³
- 3 电解槽公共区域
- 3 功能走廊，其运行模型考虑了三种场景，基于开发者的偏好和可行性
- 3 液体散货码头和浮筒
- 3 储油库，与公用走廊具有相似的所有权和运营模式
- 3 基于初始需求或多个小型变电站的单一可扩展变电站
- 3 天然气网络，液化空气准备好提供共享气体解决方案，专注于氮气生产对氨生产的集成。

案例研究4：毛里塔尼亚氢能枢纽

拥有大西洋的入海口，优异的太阳能和风能潜力，以及靠近欧洲主要市场，将毛里塔尼亚置于发展大规模可再生能源和氢能项目的有利地位。开发这一潜力可以多样化该国的经济，创造就业机会，并使毛里塔尼亚成为可再生氢能和可持续能源领域的重要参与者。

该国计划发展可再生氢能项目，以生产用于出口和国内使用的氢气和氨（ESMAP/JESA 2025）。据称有四个正在开发的项目需要电解装置容量近 10 吉瓦，可再生资源容量与电解装置的比例约为 2:1，预计年产量可达近 600 万吨氨。

在这个规模上建设和运营项目将需要广泛的基础设施建设。政府、私营投资者和国际股东之间密切合作的必要性意味着其中大部分基础设施需要共享使用。正如最近一项研究（ESMAP/JESA 2025）所言：

毛里塔尼亚绿色氢能战略所需的基础设施是其雄心勃勃的能源转型骨干。努瓦克肖特和努阿迪布等港口需要进行重大升级以适应大规模氢能出口，而公路和铁路网络必须发展以高效连接生产区与出口枢纽。为了满足氢能生产的工业规模需求，关键设施如供水的海水淡化厂和用于可再生能源集成的扩展现有电网至关重要。

支持在此规模下生产氢气和氨气所需的关键活动包括：（1）延长努瓦克肖特和努阿迪布港口的码头长度并加深泊位和/或进港航道的吃水深度；（2）加强、拓宽和延伸公路网络，以允许卡车运输可再生氢能装置的关键部件；（3）扩大铁路网络，将氢气生产设施与出口港口连接起来；（4）提升电网容量并扩大可再生能源的整合规模，以满足氢气生产的需求；（5）建设海水淡化设施，以确保可靠的水供应（ESMAP/JESA 2025）。

一个以里程碑为导向的方法将优先考虑近期投资，用于升级道路和港口基础设施、与氨气出口相关的建设项目，以及公私合作伙伴关系以利用投资并降低财务风险。该方法将强调生态友好型建设和社区参与（ESMAP/JESA 2025）的重要性。

智利的绿色氢能国家战略旨在到2030年创建至少两个氢谷，部署250吉瓦的电解槽产能（智利能源部2020年）。一项最新研究（LBST 2022）强调，枢纽站点的选择应基于现有基础设施 H

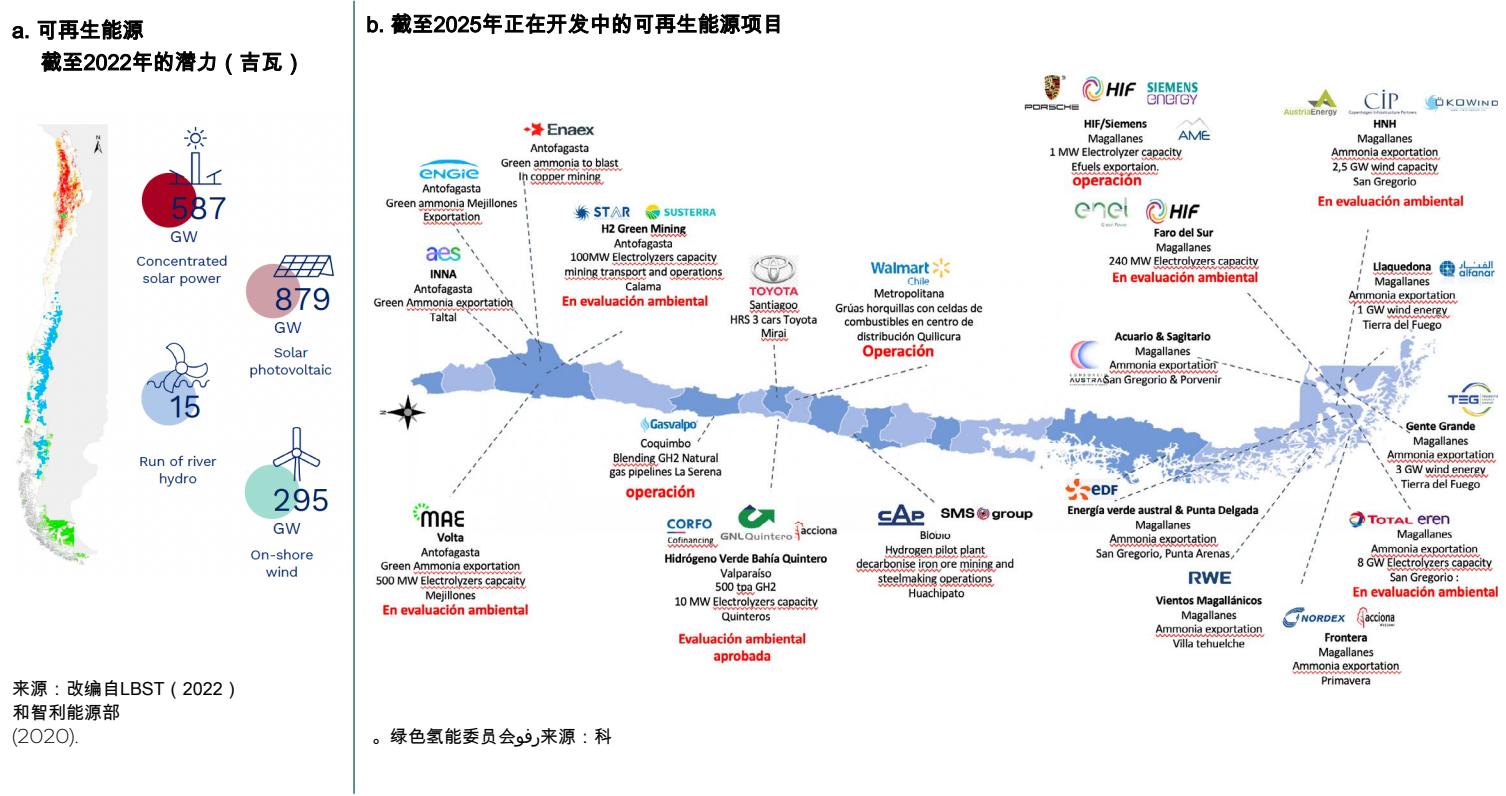
² (例如港口)、靠近国内需求、与现有产业的协同效应以及当地能力(熟练工人的可用性),以及其他因素。它确定了两个关键区域用于枢纽发展:北部的安托法加斯塔地区,因其卓越的太阳能潜力,以及南部的马格达莱纳地区,该地区具有显著的内陆风能潜力。

案例研究 5：智利南部的可再生氢能中心

智利独特的太阳能和风能资源促成了氢能枢纽发展的浓厚兴趣。这些枢纽将使智利成为低成本的可再生氢和氢衍生物出口国，并在特定领域生产和使用氢，以提供低碳能源，例如用于生产可再生能源氢和化肥用的氨、矿山爆破用的硝酸铵，以及与天然气混合以及交通应用（智利能源部 2020 年；LBST 2022 年）。

图5显示了北部安托法加斯塔地区和南部麦哲伦地区的太阳能和风能资源潜力（单位：吉瓦），以及智利正在开发的可再生氢能项目的位置和规模（智利能源部2020年；科尔福绿色氢能委员会2025年）。

图 5. 智利可再生能源潜力以及截至 2025 年正在开发的可再生氢能项目位置



LBST研究指出，如果氢气和氨气的生产按预期发展，现有基础设施将不得不大幅扩展。特别是，电网需要增长以传输所需的可再生电力到枢纽。

安托法加斯塔地区（智利北部）

LBST 2022研究基于其现有基础设施（港口设施、铁路连接、靠近太阳能和风能资源、电网容量）以及其他因素（国内需求、熟练的劳动力以及拟议的可再生氢能项目的位置和规模），将安托法加斯塔地区的梅希洛内斯港确定为基础氢能中心的最佳潜在港口位置。注意到梅希洛内斯满足所有主要标准，该研究还强调这仅是一项初步评估，而不是仍需进行的“详细和彻底的评估”。

图6展示了梅吉隆斯湾的私有和公共所有码头航空图。

2024年，安加莫斯港的多用途码头卸载了科布伦公司的霍利圣托风电场的1260个部件。智利最大的风电场（装机容量为860兆瓦）位于安托法加斯塔大区的塔尔特尔省。⁷

智利所有进口氨目前都通过enaex码头运输，但额外的港口能力将变为

7. <https://www.colbun.cl/en/corporate/press-room/news-and-press-releases/2024/06/03/puerto-angamos-culmina-la-descarga-del-parque-eolico-horizonte-de-colbun-un-hito-para-la-energia-renovable-en-chile-y-latinoamerica>

图6. 梅吉隆斯湾的港口码头，2021年



在国家和电力脱碳计划下，现有热电厂正被报废。

2025年4月，北部粒矿终端（TGN）和梅希约内斯港口综合体（CPM）新建了一个铜精矿出口终端，投资额为1.3亿美元。该项目增加了原终端（自2011年起运营）的航运能力，并将允许每年转移高达400万吨的铜精矿，标志着港口行业在创新和可持续性方面的重要里程碑。其技术的结合使其在全球独一无二。⁸

一项正在考虑的计划是在H Mejillones工业园区开发共享基础设施，²构想是一个公用码头，连接不同所有者的光伏发电厂，以及氢气和氨气生产工厂。

一个新建氢气和氨工业园区、一个码头泊位和一条液氨管道的潜在位置正在进行分析（GIZ 2024）。目前尚不清楚一个港口是否足以满足安托法加斯塔地区的需要，因为一些项目距离梅吉尔尼翁非常远。

无论如何，利益相关者之间的合作对于支持规模扩大、创新以及满足未来需求都将至关重要（智利TNO 2024）。

港口牡蛎综合体（CPM）似乎致力于提供存储和出口可再生氨所需的设施。CPM目前正在更新其总体规划，并探索建设新的液体散货码头和改造现有设施的可能性。此外，它正寻求与开发商合作，建立高效的出口渠道。最后，CPM可能会为25亿美元的伏尔塔项目（智利TNO 2024）提供后勤支持。

马加兰斯地区（智利南部）

智利南部的马加兰德斯地区拥有丰富的陆上风能资源和大量正在发展的可再生氢能项目。该地区的港口通过麦哲伦海峡与太平洋和大西洋相连。现有的基础设施较少。

8. <https://mejillones.com/es/cpm/inauguran-nuevo-terminal-portuario-para-embarcar-concentrados-de-cobre-con-una-inversion-de-us-130-millones/>

在大洋洲地区比在安托法加斯塔地区更少。特别是，该地区拥有有限的淡化、港口和电力基础设施（LBST 2022）。⁹

马多内斯（蓬塔阿雷纳斯）和拉雷多（黑色角）可能成为该地区首个为可再生能源氢能项目卸货的港口设施。这两个港口都已有初步卸货风机的经验。2025年7月，马多内斯为Total Energies的智利火地岛里奥库伦风电项目卸载了两台风机（4.5兆瓦）

¹⁰ 拉雷多已卸载了三台风力涡轮机（阿根廷）。佩克特风电场（2.5兆瓦）和三个用于卡博黑洛风电场（3.45兆瓦）。主机托管将需要调整或扩建终端，以允许电解设备和大型风力涡轮机叶片的进口（BN美洲2024），并使最先进项目的建设能够继续前进，其例子将在下文更详细地讨论。

3 麦哲伦计划 最大的计划项目是H

²（总厄伦）。该项目位于圣格雷戈里奥附近，计划建设10吉瓦的风能装机容量、8吉瓦的电解槽、一个海水淡化厂、一个氨厂，以及一个用于出口可再生氢气的港口码头。预计每年47,000吉瓦时的发电能力将每年生产800,000公吨的氢气，用于转化为4,400,000公吨的氨气进行出口，氢气生产将于2027年启动（阿奇森2021）。

3 环境影响评价中，港口总规格表明该项目将有三个停泊位

¹¹ 其中两个将被配备在圣格雷戈里奥湾的码头。用于处理货物进口、远洋船舶向浅水驳船的转运，以及未来氨的出口。平台朝陆侧将专门用于卸货。一旦材料和物资的进口完成，泊位将被重新用于氨的出口。

9. https://www.acades.cl/wp-content/uploads/2025/04/Catastro_ACADES_09-04-25.pdf
 10. <https://www.epaustral.cl/iniciamos-inedito-movimiento-de-aerogeneradores-desde-terminal-mardones-a-tres-puentes-en-punta-arenas/> 11. <https://www.sea.gob.cl/portal-de-participacion-ciudadana-y-consul-ta-indigena/proyecto/proyecto-de-produccion-de-hidrogeno>

✓ 哈鲁鬼e燃料工厂 (HIF) 利用风能和电解来生产可再生氢气。该工厂使用生物质来源的CO₂，并将其与氢气结合生产e燃料，包括合成汽油和液化气。这些e燃料将通过持续地再利用和循环CO₂使现有基础设施低碳化 (HIF 2024a)。该试验工厂配备3.4兆瓦风力涡轮机和1.2兆瓦电解工厂，于2023年底开始出口e汽油。商业规模的卡博黑洛设施计划每年生产17.3万吨e甲醇和7万吨e汽油 (HIF 2024b)。

3 HNH能源项目计划在圣格雷戈里奥附近的一个终端生产和出口可再生氨。建设将于2027年启动，商业运营将于2030年开始。第一阶段包括一个海水淡化厂；194个风机的陆上风电场，发电1.4吉瓦；氢气和氨的生产工厂；一个氨储存设施；以及一个多功能港口，其海港可供其他市场参与者使用。每年预计生产的27万吨氢气将被转化为大约130万吨氨 (EQS 2024)。

公共私营伙伴关系在开发共享氢能港口终端和其他促进氨生产与出口的基础设施方面的重要性，通过几项最近的协议得到了说明。

公私合伙在开发共享氢气港码头和其他基础设施以促进氨的生产和出口（同时最大限度地利用现有基础设施）方面的重要性，体现在国家石油公司 (ENAP) 与几家国际能源公司签订的几项近期协议中。

2023年4月，ENAP与Total Eren、HIF Chile和HNH能源签署了一份协议，旨在将拉雷多海事港基础设施转变为一个氢能工业枢纽，以便进口设备。该项目的预计投资成本为6000万至7000万美元 (ENAP 2024)。

2023年7月，ENAP与六家国际能源公司——FreePower集团、EDF、智利HIF、HNH能源、RWE和智利Total Eren——签订了一份单独协议，将格雷戈里奥港打造为马加兰斯地区最大的工业综合体，并促进氨和其他氢衍生物的生产和出口。估计投资额为7亿至9亿美元，包括储存 (ENAP 2024)。

在第一阶段，该协议将进行可行性研究，以开发一个新的海上码头用于卸载设备以及成品的新储存和出口设施 (氢能中心2023)。

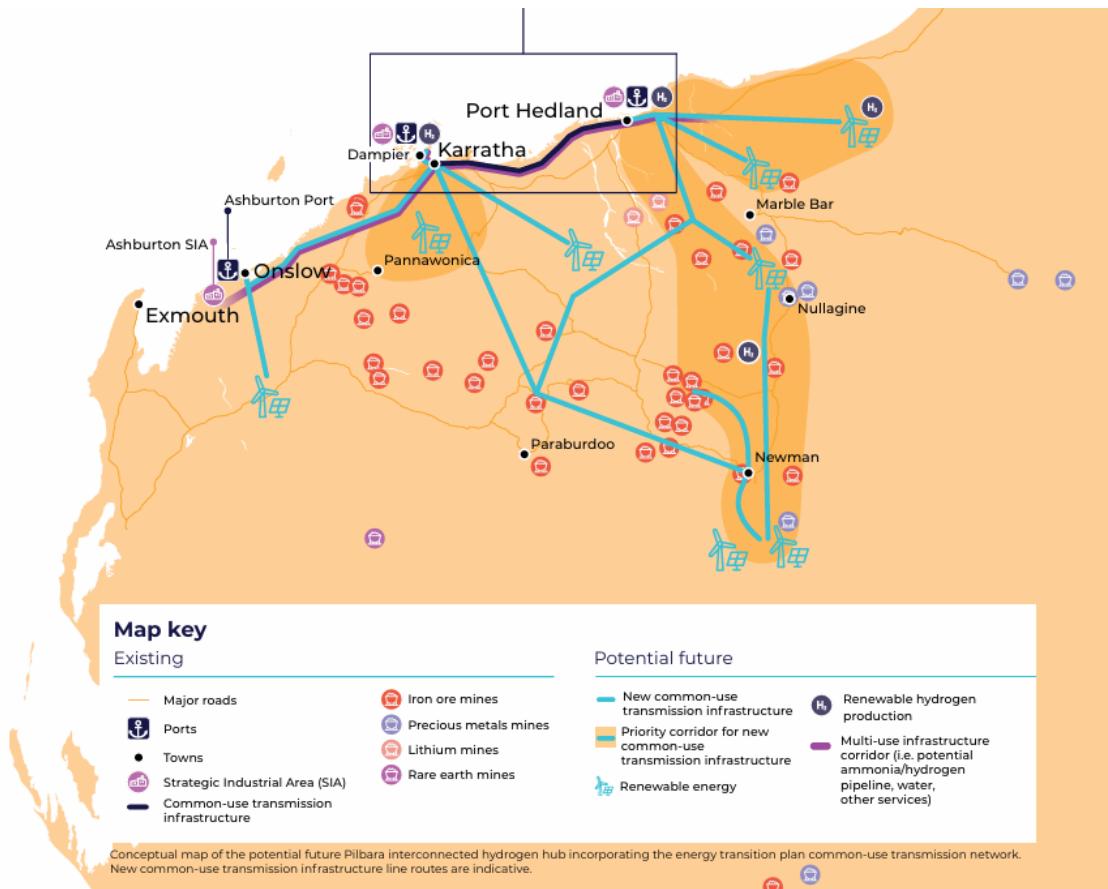
我们学到了什么？

世界各地正出现一些可再生能源基础设施项目的常见做法

存储和运输资产，包括港口设施，通常受益于共享使用。资源共享可以通过提高资产利用率和避免不必要的重复来降低成本。多个较小的用户可以产生建立基础设施所需的需求。规模对许多类型的能源基础设施都很重要。特别是，资本支出随规模迅速下降 (Khan, Young, and Lantz 2021; DeSantis et al. 2021)。通过这种方式，高容量氢气管道和电力传输线路可以建成，以连接可再生氢气项目与终端用户，或者一个电气变电站可能能够为靠近港口的工业园区中的多个电解装置提供服务 (GIZ 2024)。基础设施的跨领域共享也可能实现。例如，电力传输提供商拥有和运营的光纤网络过剩容量可能被电信或互联网服务提供商使用。¹² 共用基础设施也可能减少与部署可再生氢项目相关的环境足迹。对于这些

12. <https://blogs.worldbank.org/en/ppps/infrastructure-sharing-energy-and-digital-development-takeaways-cross-sectoral-cooperation?form=MG0AV3>.

图7. 潜在皮尔巴拉互联氢能枢纽的概念图，包括新的通用输电基础设施



Western Australia DJTSI 2024

原因、共享使用乃至开放访问都是铁路、管道、电力输送、码头和仓储资产使用的常见商业模式。

氢能中心通常被规划为“生产者、用户和可再生氢气出口商共同选址的地点，通过协调多用户基础设施来提高竞争力、吸引投资”（西澳大利亚州DJTSI 2024），并共享基础设施和专业知识，以推动产业发展规模化。其益处包括降低生产成本、鼓励创新、提升技能和培训投入（澳大利亚DCCEEW 2024）。图7展示了西澳大利亚州皮尔巴拉地区（DJTSI 2024）用于电力传输和多用户管道（氢气、氨、水及其他服务）的通用基础设施概念图。

“氢能枢纽通常会规划为‘生产者、用户和可再生氢气出口商集中地，以通过协调多用户基础设施来提升竞争力并吸引投资’（西澳大利亚州DJTSI 2024），并合作共享基础设施和专业知识，以使该产业规模化。”

利用氢能基础设施共享以实现规模经济通常包含在许多可再生能源氢能项目的建模方法和可行性研究中。例如，一项关于挪威清洁氢能出口经济性的最新研究 (Svendsmark、Straus和del Granado 2024) 权衡了氢能技术投资的关键因素以及风电场和电网的产能扩张。该研究发现，关键因素是确定生产地点以及距离和运输方法到市场。

所有权是另一个问题。 第三方可能拥有共享使用协议所涵盖的部分仓储、运输、转换和港口设施。他们可能根据收费的过路费协议为多个用户提供服务，其中费用是容量固定支付（用于收回资本）和基于实际使用的可变支付的结合。在这种安排下，基础设施所有者在商品向下游移动时不会取得商品所有权，从而避免了商品价格风险 (DNV 2022 ; GIZ 2024)。

在完全集成模式下，相比之下，发电、电解、运输、转换、存储和港口操作的基础设施可能全部由一家合资企业拥有和运营。集成模式的主要优势在于较低的收入风险可以允许更高的债务水平和更低的资本成本 (DNV 2022)。对于一些大型可再生氢项目，发电资产的所有权可能与氢气生产、氨转换以及一些港口设施相结合。

在这些极端之间存在一系列半整合模型（具有多种合同结构），在这些模型中，电力、氢气生产、运输、氨生产以及仓储和港口设施的所有权可以以各种方式划分，包括单一所有者可能仍然使用过路费安排来更好地分配某些基础设施资产的成本。合同结构将取决于价值链上的所有权结构，这可能因不同国家和地区的枢纽而有显著差异。

随着氢能枢纽和合作伙伴关系的演变，计划可能会改变。例如，虽然澳大利亚可再生能源枢纽的一些早期计划建议氢

并且氨气可能在光伏和风电场附近生产，然后使用靠近发电场的专用系泊点出口，更近期的信息表明采用分阶段方法，涉及更广泛地使用共享基础设施，包括：(1) 使用一条新的330千伏输电线路将光伏和风电场连接到现有的皮尔巴拉电网和霍普顿港（大约270公里东）；(2) 之后在发电场附近生产氢气，并通过管道将其输送到霍普顿港供当地使用或转化为氨气出口。这种分阶段方法提供了灵活性，允许在前几年输出电力和氢气的混合物，当时氢气的需求可能相对较低，同时也在后期几年提供了将电解水制氢厂连接到电网以改善利用率的潜力。¹³

前述案例研究和相关文献中关于可再生氢项目和发展枢纽的 emerging practices 的部分进一步亮点，展示在框 1 中。

本节中重点突出的一些建议不一定适用于所有可再生氢气或基础设施项目。例如，一个关键项目和基础设施决策是电解装置是否应位于或靠近氨厂或港口，或靠近可再生资源。一些针对特定项目的研究建议将电解装置靠近港口附近的氨设施 (GIZ 2024)，而另一些研究则建议氢气可以在靠近能源产地处生产，并通过管道输送到转换设施和港口 (Rouwendhorst 2023 ; ENGIE-YARA 2020 ; ENAEX-ENGIE 2023)，后者可能是由于大规模长距离管道运输氢气的成本低廉 (De Santis 等人 2021 年)。正确的答案因具体情况而定，并取决于许多因素，包括地理位置、现有基础设施的状况（包括附近的港口），以及规划者、监管者或投资者就共享基础设施做出的任何决策。其他相关因素包括短期和长期规模和战略目标（如与澳大利亚可再生能源枢纽相关的内容所述）。

13. BP近期宣布退出AREH项目。然而，根据Laity (2025) 的说法，其他合作伙伴正在与西澳大利亚州政府合作推进下一阶段的发展。

框1. 新兴可再生能源氢能项目和发展枢纽的一些关键特征

- 丰富的可再生能源资源和土地可用性。理想情况下，地点应相对靠近一个多功能港口或一个新港口码头潜在的选址。
 - 获取大量的淡水，或者开发所需的海水淡化厂和管道的能力。
 - 接入或开发多功能港口和仓储的潜力，能够处理为建设可再生氢能项目所需的进口，以及出口氨和其他氢衍生物。
 - 访问或愿意建设转化设施和相关储存设施，要出口氨或其他氢衍生物。
 - 本地市场需求机会，以补充可再生氢和氢衍生物的出口发展，例如用于生产氨、甲醇、钢铁和采矿炸药的行业用户。
 - 基础设施资源共享服务于产业用户集群，以提升资产利用率、降低风险和减少基础设施成本。这些资产可能包括水、管道、海水淡化厂、储存设施、航运码头、装卸设施、铁路网络和输电线路。
 - 共享基础设施资产，以降低生产可再生能源氢及其衍生物的私人投资风险，并提高其财务可行性。
- 共享基础设施可以降低资本需求，减少运营和财务风险，并使项目对私人融资更具吸引力。
- 多伙伴间的公共与私营部门合作，以共享基础设施的开发和使用。合作伙伴包括政府、产业、研究机构和国际组织。这种合作通常会为政府带来经济效益，例如创造就业机会和增加收入。
 - 利用现有基础设施，并在此基础上进行建设，例如终端、存储、电力传输、版本设施，以及铁路和公路连接。这可能尤其在中期阶段有价值，此时氢气交易量较低但正在增长。
 - 获取专业技能人才。
 - 资助研究以建立可行性和分析替代发展路径和模式，包括(1)面对不确定性的灵活性，关于供给的规模、位置和增长需求随时间变化；以及(2)所有权和业务模型替代方案，包括共享基础设施。
 - 监管条件、激励措施和其他政府政府活动支持发展，大型可再生能源制氢及基础设施项目-ects。需要考虑的方面可能包括(1)特殊经济特区及类似实体；(2)流-许可流程的lining；(3)清晰和统一安全和环境标准；(4)补贴进行试点项目以获取知识和经验加快商业项目的部署；与(5)对可再生能源枢纽基础设施的详细研究专业设计。法规的清晰度降低风险和不确定性并降低投资障碍。
 - 进入地下氢存储，如季节性储存用盐穴——如有可用。由于光伏和风电的可变性，储能能帮助匹配供需并增加氢气生产的容量因子，弹药-nia转换，以及使用港口设施和其他基础设施资产。
 - 在港口接入电网，在风能和光伏发电不足时为电解提供电力。虽然这可能提高容量因子，但需要考虑权衡——例如，电网电力可能更昂贵，并可能减少基于避免温室气体排放的激励措施。

更广泛地说，关于存储、运输和转换基础设施规模的决策相互依存，包括与所有权和共享使用相关的那些决策。实现最低的氢气平准化成本需要优化所有资产，但需要注意

必须将规划未来需求增长以及相关产能扩张的需求，作为设计过程的一部分进行仔细考虑。鉴于这种复杂性，参考近期可行性研究、分析和项目设计（Armijo and Philibert 2020; Campion et al. 2023）是很有用的。

参考文献

阿米约，朱利安，和塞德里克·菲利贝尔。2020。“基于可变太阳能和风能的绿色氢气和氨的灵活生产：智利和阿根廷的案例研究。”*国际氢能杂志* 45 (3): 1541–58.

阿罗约，阿尔瓦罗。2021。“梅希略湾的太阳能制氢基础设施和服务平台。”在国际研讨会“从太阳能光伏到太阳能氢能”上的演讲，5月26日。<https://mejillones.com/wp-content/uploads/2021/08/Seminario-Internacional-H2-rev.pdf>。

阿奇森，朱利安。2021。“每年440万吨可再生能源氨气在智利。”氨能协会，2021年12月6日。<https://ammoniaenergy.org/articles/4-4-million-tonnes-per-year-renewable-ammonia-in-chile/>.

澳大利亚气候变化、能源、环境与水资源部 (DCCEEW)。2024年。“建立区域氢能枢纽。”2024年12月28日访问。<https://www.dcceew.gov.au/energy/hydrogen/building-regional-hydrogen-hubs>。

巴德、奥姆和奥卢塞贡·托莫莫韦。2024。“美国氢能治理策略、政策措施和监管框架综述。”*国际氢能杂志* 78 (8月): 1363–81.

BN美洲。2024。“智利发展绿色氢能：研究报告识别进口物流空白。”BN Americas, 2024年11月21日。<https://www.bnamicas.com/en/features/chile-green-hydrogen-push-study-identifies-import-logistics-gaps>.

坎皮昂，尼古拉斯，劳尔·Gutierrez-Alvarez，何塞·托马斯·Figueroa Brice，和玛丽·明斯特。2024年。“集中式太阳能光热在离网绿氢和氨生产中的潜在作用。”*可再生能源* 236 (十二月): 121410。

陈，佩吉舒玲，方红军，侯赛因·恩沙耶伊，张伟，石文明，阿布杜萨米·纳吉，宫崎隆，曲卓华，杨再利。2023。“港口促进国际氢能贸易准备情况综述。”*国际氢能杂志* 48 (46): 17351–69.

智利TNO。2024。“在梅吉尔翁斯建立氢能枢纽的发展路径。”内部文件R11621，8月29日。

智利能源部。2020年。“国家绿色氢能战略。”智利能源部，智利政府，圣地亚哥，智利。https://energia.gob.cl/sites/default/files/national_green_hydrogen_strategy_-_chile.pdf。

德桑蒂斯，丹尼尔，布萊恩·D·詹姆斯，卡西迪·H·霍辛斯，吉纳维芙·索尔，和马克西姆·柳博夫斯基。2021。“不同载体长距离输能的成本。”*isScience* 24 (12): 103495.

DNV (Det Norske Veritas)。2022。一个氢气出口项目的预可行性研究：最终报告。报告编号10302204-ESZA-R-03。美国华盛顿特区：美洲开发银行。https://energia.gob.cl/sites/default/files/2022_-_dnv_-_hydrogen_export_terminals_in_chile.pdf.

伊萊沙夫，O.，B.莫謝維茨基·里斯，A.瓦萊拉·梅迪納，和G.S.格拉德。2021年。“氨的储存和分配。”在*绿色氨作为能源载体的技术与经济挑战*，由Agustin Valera-Medina和René Banares-Alcantara编辑，85–103。

ENAELEX-ENGIE. 2023. “HyEx: 绿色氨。”演讲，2023年2月。<https://www.ammoniaenergy.org/wp-content/uploads/2023/02/Project-Features-Fe-b-2023-speaker-slides.pdf>.

ENAP (国家石油公司)。2024年。“ENAP向博里克总统展示绿色氢能进展。”新闻稿，2024年6月27日。<https://www.enap.cl/sala-de-prensa/enap-presents-progress-in-green-hydrogen-to-president-boric>.

ENGIE-YARA. 2020. *ENGIE-YARA皮尔巴拉区可再生能源氢气和氨部署 YURI 阶段 0：可行性研究公共报告*，2020 年 10 月。<https://arena.gov.au/assets/2020/11/engie-yara-renewable-hydrogen-and-ammonia-deployment-in-pilbara.pdf>.

EQS. 2024. “奥地利能源国际股份公司凭借智利迄今为止规模最大的绿氢/绿氨项目实现关键里程碑。”<https://www.eqs-news.com/news/corporate/austriaenergy-international-gmbh-er-reicht-mit-chiles-bislang-groesstem-gruen-wasserstoff-gruen-ammoniak-projekt-entscheidenden-meilenstein-erfolgreiche-einreichung-zur-umweltvertraglichkeitspruefung/ba73d27b-e5f3-42f5-9b07-901892d75e4b>.

esmap (能源部门管理援助计划)、经济合作与发展组织、全球基础设施和氢能理事会。2024年。“为发展扩大氢能融资。”华盛顿特区：世界银行。<http://documents.worldbank.org/curated/en/099022024121527489>.

ESMAP/JESA. 2025. *毛里塔尼亚氢能基础设施研究 (摘要)* 内部文件。

弗里波特·萨拉丹哈。2023。“构建支持氢经济的设施。”帕特里克·拉克巴内在萨拉丹哈GH2中心：圣地亚哥市，智利，圣迭戈市，2023年10月25日的演讲。

GIZ (德国国际合作署)。2024。
太阳能氨池智利：安托法加斯塔地区 (智利) 可持续绿色氢/氨植物池发展概念 四月。德国波恩和埃施本：GIZ。

戈夫，迈克尔。2020。“氨作为能量载体的分配。”*氨能源会议2020*上的演示，2020年11月16日至20日。<https://ammoniaenergy.org/wp-content/uploads/2020/12/Michael-Goff.pdf>.

HIF (高度创新燃料)。2024a。“用可再生能源为世界供能。”https://hifglobal.com/docs/default-source/default-document-library/rs_hif_023_24.pdf?sfvrsn=9ff21add_2.

HIF. 2024b. “HIF 全球选择 Techint E&C 承担智利首个大规模 eFuels 项目工程设计。”新闻稿，3月4日。https://hifglobal.com/docs/default-source/documentos-noticias/chile/hif-techint-eng-v-04032023.pdf?sfvrsn=d092477a_1.

氢能中心。2023。“智利—ENAP与六家能源公司签订协议，以建设该国规模最大的绿氢基础设施。”氢能中心，2023年8月23日。<https://hydrogen-central.com/chile-enap-signs-agreement-six-energy-companies-generate-largest-green-hydrogen-infrastructure-development-in-the-country/>.

氢能理事会/麦肯锡。2021。 *氢能洞察：氢能投资、市场发展与成本竞争力视角* 比利时：氢能委员会。<https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2021/02/氢能洞察2021.pdf>.

氢能委员会/麦肯锡。2022。 *全球氢流：氢贸易作为高效脱碳的关键推动力* 比利时：氢能委员会。<https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2022/10/Global-Hydrogen-Flows.pdf>.

卡恩、穆罕默德·阿德南、卡梅隆·杨和戴维·B·莱泽尔。2021年。“氢气管道的技术经济性。”
迁移加速器技术简介 1 (2): 1-40. <https://transitionaccelerator.ca/wp-content/uploads/2023/06/The- Techno-Economics-of-Hydrogen-Pipeline-s-v2.pdf>.

莱蒂，爱德华。2025。“英国石油公司退出澳大利亚主要绿色氢气和可再生能源项目，进行战略调整。” *H2 查看*，7月24日。

LBST (路德维希-伯尔科-系统技术)。2022。智利“氢能中心”的发展路径。对美洲开发银行的专长，项目编号：RG-T3725。最终报告4月14日。慕尼黑奥特布伦嫩：LBST。https://energia.gob.cl/sites/default/files/financial_report_v1-1_2022-04-14.pdf。

创新使命。2024。“创新使命氢谷平台”。<https://h2v.eu/>。

纳亚克-卢克，R. M.，C.福布斯，扎克塞拉罗，R.巴纳雷斯-阿尔坎塔拉和凯文亨德里克雷因霍斯特鲁文豪斯特。2020。“氨的生产、储存和分配的技术经济方面。”在 绿色氨作为能源载体的技术与经济挑战，由 R. Bañares-Alcántara 和 A. Valera-Medina 编辑，191–208。英国：Elsevier Science。

诺特布姆，西奥，和赫拉克勒斯·哈拉兰比德斯。2023年。“港口作为绿色氢能中心：欧洲的进展、机遇和挑战。” *海事经济学与物流* 25 (1): 1–27。

帕拉迪诺，卡米拉。2023。“Lex in Depth: 绿色氢经济带来的惊人成本。”
金融时报，5月28日。<https://www.ft.com/content/6e22930b-a007-4729-951f-78d6685a7514>。

帕帕迪亚斯，狄奥尼修斯 D.，和拉杰什 K. 阿卢瓦利亚。2021年。“氢气的批量储存。” *国际氢能杂志* 46 (70): 34527–41。

pecem 2021.“pecem简报”.<https://www.complexo-dopecem.com.br/wp-content/uploads/2022/10/Pecem-factsheet-2021-Eng.pdf>.

PECEM. 2022。“PECEM简报。”https://www.portofrotterdam.com/sites/default/files/2022-10/pecem-industrial-and-port-complex_0.pdf.

PECEM. 2023。“PECEM。”由 Fabio Grandchamp 在智利圣地亚哥举行的第二次为发展制氢 (H4D) 合作伙伴会议上所作的演讲，2023年10月24日。

现在可再生能源。2021年。“Total Eren研究智利10 GW风电的巨大绿色项目。”现在可再生能源。H

² 12月2日。<https://renewablesnow.com/news/total-eren研究智利10吉瓦风电的巨型绿氢项目-763962/>.

Rouwenhorst, Kevin. 2023. “HyEx: 从智利沙漠制氨。” 氨能协会，2023年3月8日。<https://ammoniaenergy.org/articles/hyex-ammonia-from-the-chilean-desert/>.

萨尔蒙、尼古拉斯、雷内·巴纳雷斯-阿尔坎塔拉和理查德·奈亚克-卢克。2021。“优化绿色氨分配系统用于洲际能源运输。” *isScience* 24 (8).

SCZONE (苏伊士运河经济区)。2023年。“SCZONE：绿色氢及其衍生物：生态系统、愿景与未来方向。”艾哈迈德·萨德在第2届发展用氢 (H4D) 伙伴关系会议上的发言，智利圣地亚哥，2023年10月24日。

斯文德斯马克，埃里克，朱利安·斯特劳斯，和佩德罗·克雷斯波·德尔·格兰亚多。2024。“发展氢能中心：价格、风能和基础设施投资的作用在 H 的

² 挪威北部。 *应用能源* 376 (A部分) : 124130。

澳大利亚西部州 DJTSI (就业、旅游、科学和创新部)。2024年。“澳大利亚西部的可再生能源氢能战略 2024–2030年。”https://www.wa.gov.au/system/files/2024-10/00410_hydrogen_strategy_web.pdf。

活线 2025/140.“使用清洁氢气脱碳氨和氮肥”，由拉斐尔·本、桑塔努·塔伦·查克拉博蒂和道尔夫·基伦撰写。

活线 2025/142.“氢及其主要衍生物的安全性问题：为政策制定者进行的文献综述”，作者卡门·孔德·帕德拉维拉。