



加速化工行业低碳转型之： 实现绿氨经济性的可行路径

执行摘要





关于落基山研究所(RMI)

落基山研究所(RMI)是一家于1982年创立的专业、独立、以市场为导向的智库，与政府部门、企业、科研机构及创业者协作，推动全球能源变革，以创造清洁、安全、繁荣的低碳未来。落基山研究所着重借助经济可行的市场化手段，加速能效提升，推动可再生能源取代化石燃料的能源结构转变。落基山研究所在北京、美国科罗拉多州巴索尔特和博尔德、纽约市及华盛顿特区和尼日利亚设有办事处。

加速化工行业低碳转型之：实现绿氨经济性的可行路径



中国石油和化学工业联合会氢能产业专业委员会
CPCIF Committee of Hydrogen Energy

关于中国石油和化学工业联合会氢能产业专业委员会

中国石油和化学工业联合会氢能产业专业委员会（简称“石化联合会氢能专委会”）于2021年成立，旨在广泛联系国内外氢能全产业链相关单位，倡导行业自律，促进行业技术革新和转型升级，为相关主管部门制定产业政策提供支撑和建议，做好行业发展的组织协调和服务工作，推动石化化工和氢能产业高质量协同发展。

作者与鸣谢

作者

落基山研究所 (RMI)

李婷
李抒苒
王珮珊
薛雨军
李浩然

石化联合会氢能专委会

孙伟善
李永亮
李淼
朱晓丽
贾奕宸

联系方式

李抒苒, sli@rmi.org

引用建议

落基山研究所, 石化联合会氢能专委会, 加速化工行业低碳转型之: 实现绿氨经济性的可行路径, 2024,
<https://rmi.org.cn/insights/green-ammonia-report/>

RMI 重视合作, 旨在通过分享知识和见解来加速能源转型。因此, 我们允许感兴趣的各方通过知识共享 CC BY-SA 4.0 许可参考、分享和引用我们的工作。 <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>
除特别说明, 本报告中所有图片均来自iStock。

鸣谢

感谢落基山研究所的高硕、刘琦宇、李君、刘雨菁、王喆和郝一涵在报告撰写过程中给予的宝贵建议。

本报告作者特别感谢以下专家对报告撰写提供的洞见与建议:

李全伟 东华工程科技股份有限公司
刘思明 石油和化学工业规划院
苏建英 中国氮肥工业协会

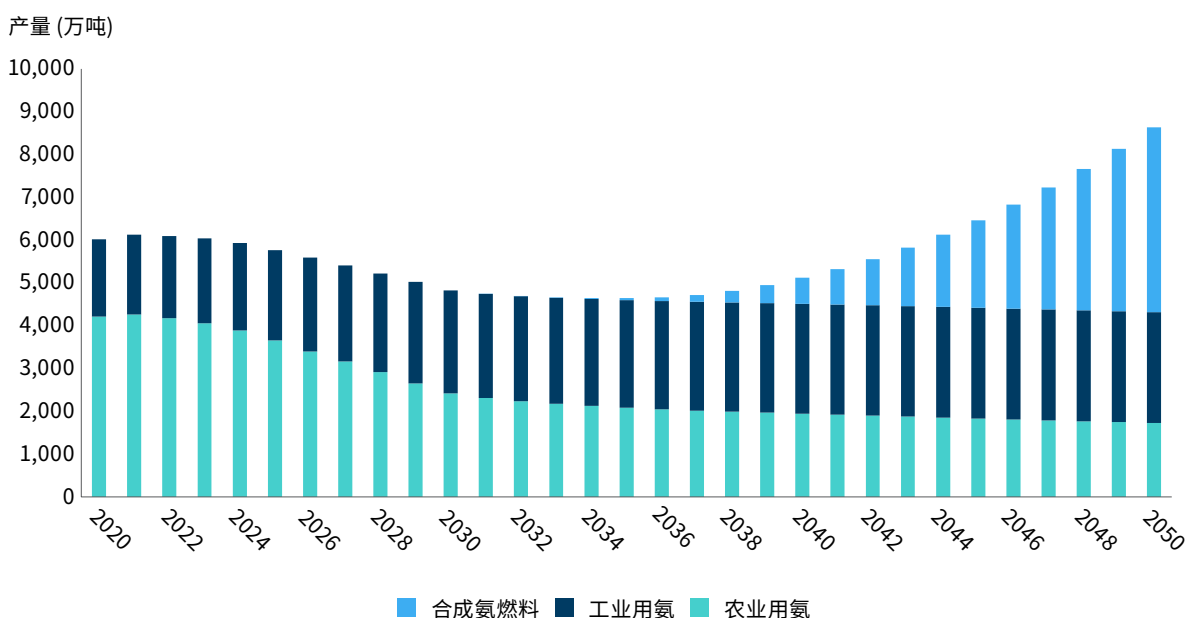
本报告所述内容不代表以上专家和所在机构的观点。

执行摘要

合成氨在农业、工业、能源等多个领域具有广泛应用。预计到 2050 年，我国合成氨的需求量将增长至目前的 1.5 倍，当前以煤为主高碳的合成氨生产方式亟需转型。

合成氨是重要的基础化工产品，在农业、工业等场景中具有广泛用途。目前，合成氨的主要用途集中在农业领域，全球 70% 以上的合成氨用于生产氮肥，以保障粮食供应。同时，合成氨作为一种新兴的能源，也在航运、电力等场景中具有巨大的应用前景。预计到 2050 年，作为能源用的合成氨有望占到总合成氨需求量的一半，将成为航运和电力领域碳减排的重要力量ⁱ。

图表 ES 1 我国合成氨供需总量及消费结构展望



当前，合成氨的生产主要依赖于以煤和天然气为原料的传统路径，碳强度和能耗均处于较高水平。在全球合成氨生产中，以煤为原料的约占 19%，天然气占据更大比例，约为 78%。在我国，煤制合成氨产能占比达 75% 以上，单位产品能耗及碳排放均高于全球平均水平。其中，煤制合成氨碳强度约为 4.4–4.8 吨 CO₂/吨氨，为天然气制合成氨的两倍以上。

从绝对量看，我国是全球最大的合成氨生产国与消费国。2022 年，我国合成氨产量约 5321 万吨ⁱⁱ，占全球总产量的 30%。2020 年，合成氨行业所产生的直接排放达 2.19 亿吨ⁱⁱⁱ，约占我国碳排放总量的 2.2%，占化工行业碳排放总量近 1/5，排放规模在众多化工品中处于前列。同时，合成氨是许多化工产品的基础原料，通过减少合成氨生产过程中的碳排放，可以显著降低化工产品的整体碳足迹，推动行业的低碳转型与可持续发展。因此，合成氨行业的低碳转型不仅对我国化工行业的绿色发展至关重要，同时也对全球化工行业的低碳转型具有重要意义。

ⁱ 落基山研究所，碳中和目标下的中国化工零碳之路，2022，<https://rmi.org.cn/wp-content/uploads/2022/04/final-RMI-%E5%8C%96%E5%B7%A5%E6%8A%A5%E5%91%8AChina-Chemicals-Decarbonization-CN-Full-Web-0909.pdf>

ⁱⁱ 国家统计局，<https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01&zb=A0E0H&sj=2022>

ⁱⁱⁱ 熊亚林，刘玮，高鹏博等，“双碳”目标下氢能在我国合成氨行业的需求与减碳路径，2022，<https://esst.cip.com.cn/CN/PDF/10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0364?token=3ad32ad293a74aeb8091a97770a0e702>

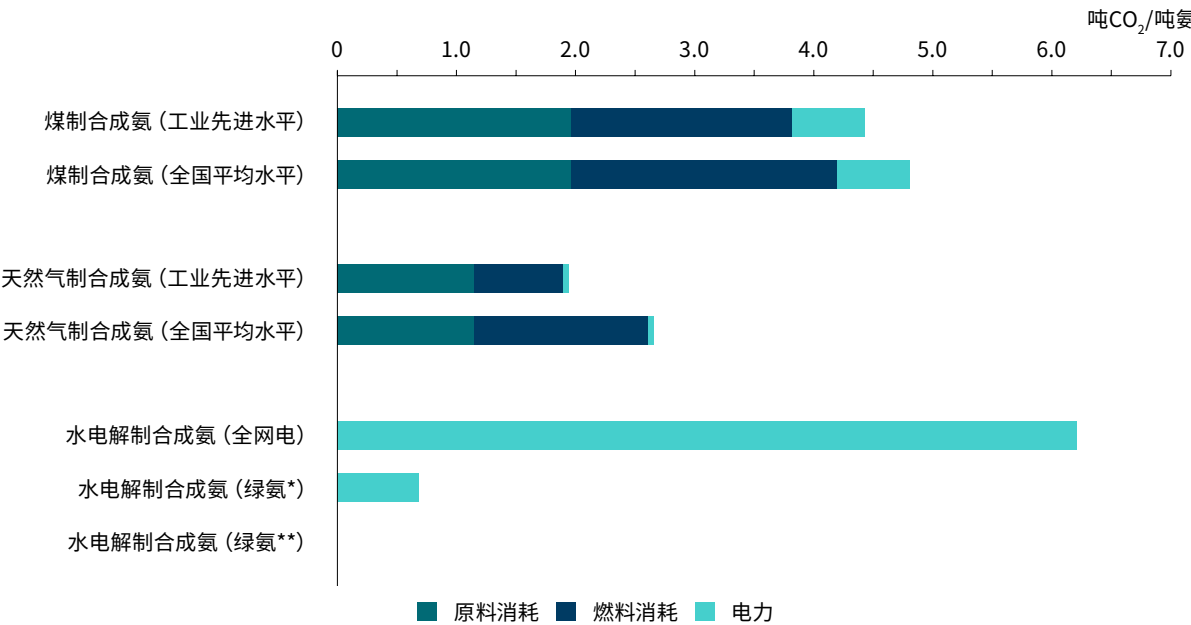
以可再生能源电解水制取的绿氢作为替代原料、燃料，可使合成氨生产的碳强度降低85% 以上。

合成氨生产中，原料和燃料相关碳减排可占 85% 以上，而基于可再生能源电解水制取绿氢的生产，是实现大幅度降碳的重要路径。首先，从原材料角度来看，氨的组成仅包含氢和氮，通过使用可再生能源电解水提供氢源，可以有效避免化石燃料制氢过程中产生的二氧化碳排放；其次，在氨的合成过程中，通过电气化和使用清洁电力，可替代传统的煤电和煤制蒸汽，进一步实现碳减排。

用绿氢和由空气中空分得到的氮气合成的绿氨受到越来越多关注，有望成为未来重要的清洁原料和能源，为多个行业的脱碳提供解决方案。目前，我国正积极推进合成氨行业的低碳转型，国家发改委、工信部、生态环境部等多部门相继发布了多项政策文件，如《合成氨行业节能降碳改造升级实施指南》和《工业领域碳达峰实施方案》，明确了在 2025 年前后实现行业碳排放控制的具体目标。国家在“十四五”规划中提出了构建可持续化工产业的目标，鼓励合成氨行业逐步转向基于绿氢等的低碳生产路径。风电、光伏等可再生能源的快速发展使我国初步具备进一步发展绿氢的技术基础和资源条件。在政策和市场推动下，绿氨项目正在快速铺开，新项目选址从以往的近煤炭基地向近可再生资源富集地区转变，正在形成“绿电 - 绿氢 - 绿氨”的新产业链。据不完全统计，我国已公布的绿氨项目产能合计已超过 1300 万吨。

在“绿电 - 绿氢 - 绿氨”链条中，电力的清洁程度是决定合成氨碳强度的关键。例如，若在电解水制氢和氨的合成两个工段中均采用网电，则生产的氨的碳排放为 6.2 吨 CO₂/ 吨氨，甚至显著高于煤制合成氨的单位碳强度；若仅在水电解工段采用绿电，合成工段采用网电，则碳排放强度可下降约 85%，达到 0.7 吨 CO₂/ 吨氨；若在两个工段均采用绿电实现完全电气化，可达到 100% 降碳的效果，实现绿氨的零碳生产。

图表 ES 2 合成氨主要生产路径的碳强度对比



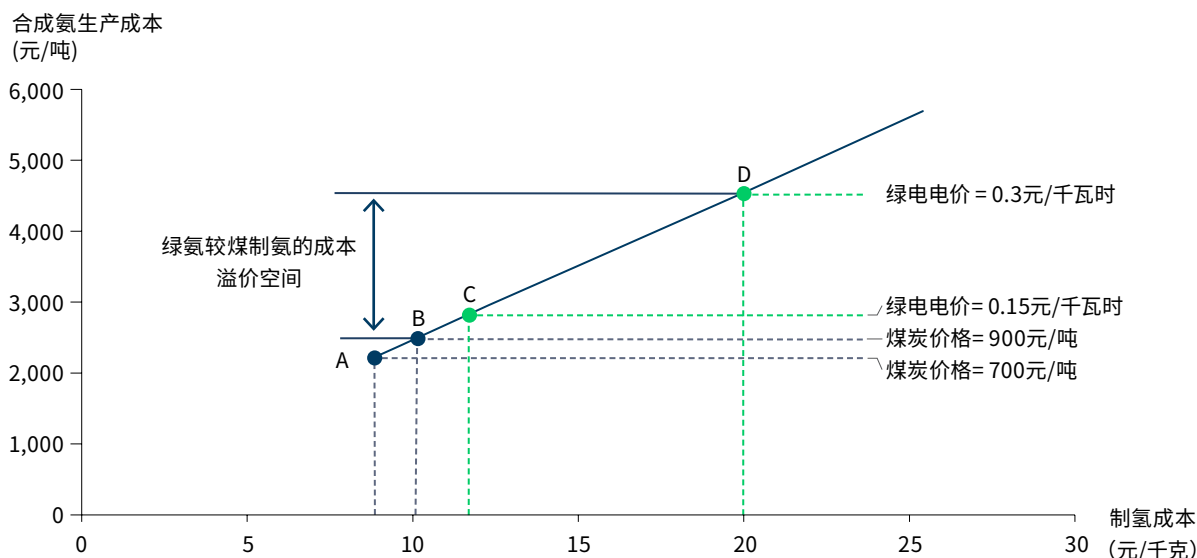
注：绿氨 * 指用绿氢制合成氨，仅制氢环节全部使用绿电，合成环节仍用网电

绿氨 ** 指制氢环节和合成环节的所有用电均来自绿电

然而,当前绿氨成本约为煤制合成氨的 1.2-2.1 倍,绿氨的进一步发展和规模化仍面临挑战。

目前,我国大部分合成氨是基于以煤为原料的生产路径,当原料煤的成本在 700-900 元 / 吨之间时,对应生产合成氨的成本在 2200-2500 元 / 吨之间。与煤制合成氨相比,绿氨生产中可再生能源发电综合成本(以下简称为绿电电价)较高,当绿电电价在 0.15-0.3 元 / 千瓦时之间时,绿氨成本在 2920-4600 元 / 吨之间,是煤制合成氨成本的 1.2-2.1 倍。

图表 ES 3 灰氨与绿氨生产成本对比



说明: 1. 假设煤制合成氨以并网常稳态每年运行 8000 小时; 2. 假设绿色合成氨以离网常稳态每年运行 3905 小时, 风光打捆出力小时数以内蒙古为参考。离网常稳态无需配储, 因此为理想情景。3. 绿电电价为综合电力成本。

可再生能源发电的波动性使其难以直接与基于传统 Haber-Bosch 反应的合成氨连续生产工艺适配。应对波动性的解决方案主要有两种: 一种是并网常稳态方案, 即利用从电网购电补足可再生能源发电不足部分, 保证合成氨装置在满负荷状态下稳定运行; 另一种是离网多稳态方案, 即通过在绿氨生产系统中配备一定规模的储能和储氢装置, 且动态优化合成氨装置的负荷使装置按照多个稳态负荷方案运行, 属于柔性合成氨工艺。当采用离网多稳态的技术路径时, 以风光资源优势地区^{iv}为例, 当绿电电价为 0.25 元 / 千瓦时, 绿氨成本约为 4800 元 / 吨, 其中为波动性电源提供调节能力的储能、储氢成本约占总成本的 15-20%。

^{iv} 以内蒙古鄂尔多斯地区为例, 光伏发电年利用小时数为1600小时, 风力发电年利用小时数为2305小时, 风光总出力为3905小时。合成氨装置设计规模为20万吨/年, 年运行时间8000小时。离网情景配套储氢规模为35万标方的低压储罐(10兆帕以下), 平均利用率80%, 平均储氢时间1天。

要助力绿氨在农业、航运、电力等应用场景中逐步实现平价，需要政策支持、下游溢价支付意愿、碳市场价格信号等多因素协同的作用。

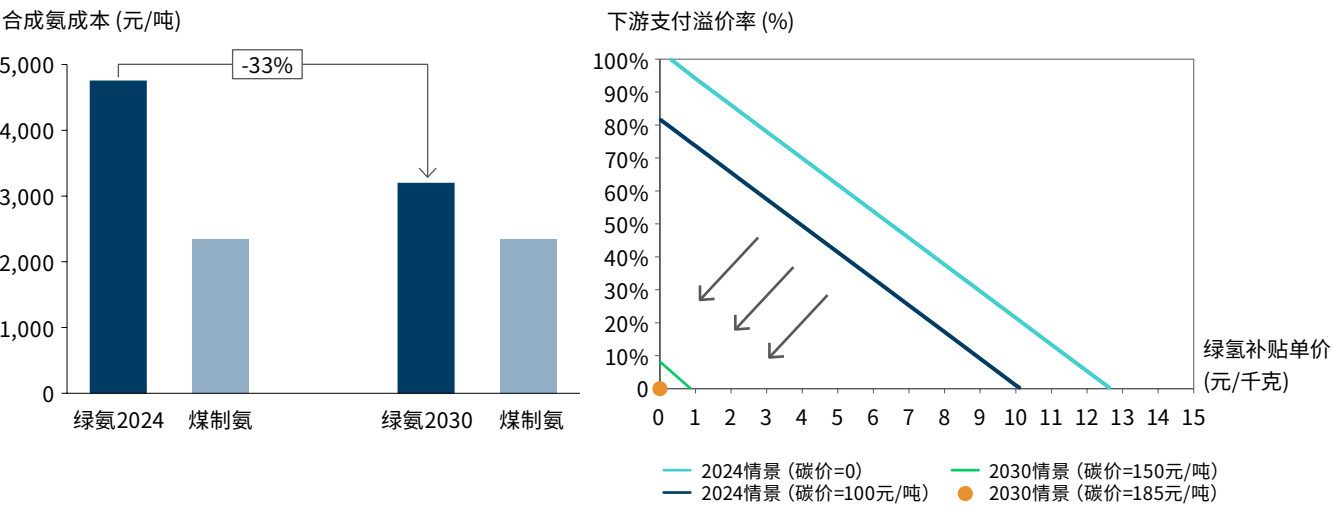
从具体的应用场景看，绿氨在既有农业场景，以及发电、航运等新兴场景中的应用，不同程度地面临与传统路径相比成本过高的问题。本报告以上述离网多稳态方案制绿氨并进行应用为例，根据在不同应用场景中实施绿氨替代的成本情况，尝试分析在技术不断提升的情况下所需政策、碳市场以及买方支付溢价水平等推动手段随时间的变化趋势，以期为有效地帮助弥合成本差距，推动绿氨的快速部署与发展提供方案参考。

农业应用

农业是合成氨行业的传统应用场景，在目前合成氨下游需求中占比为 70%。当前，离网多稳态方案制绿氨的成本约为 4800 元 / 吨，是煤制氨的 2 倍。随着可再生能源发电、电解水制氢、储能、储氢等环节的技术进步与转换效率的提升，2030 年绿氨生产成本有望下降 33%，并可在 2040-2045 年间与煤制合成氨实现平价。

农业关系到粮食安全,要在该领域推动成本较高绿氨的应用,需要早期借助政策支持开启市场。随着绿氨的成本下降,补贴需要有合理的退坡和退出机制,转为由碳市场等市场化手段推动转型。例如,在当前技术水平下,在碳价为 0-100 元 / 吨之间时,要实现平价,需要约 10-12 元 / 千克的绿氢补贴政策。到 2030 年,若合成氨能够被纳入碳市场并且碳价高于 185 元 / 吨时,补贴可以完全退出且下游无需支付溢价时即可实现绿氨平价,实现从政策支持主导到以市场为主导的转变。

图表 ES 4 农业场景中绿氨路径和传统路径的成本趋势(左)与政策、市场手段对实现平价的作用(右)

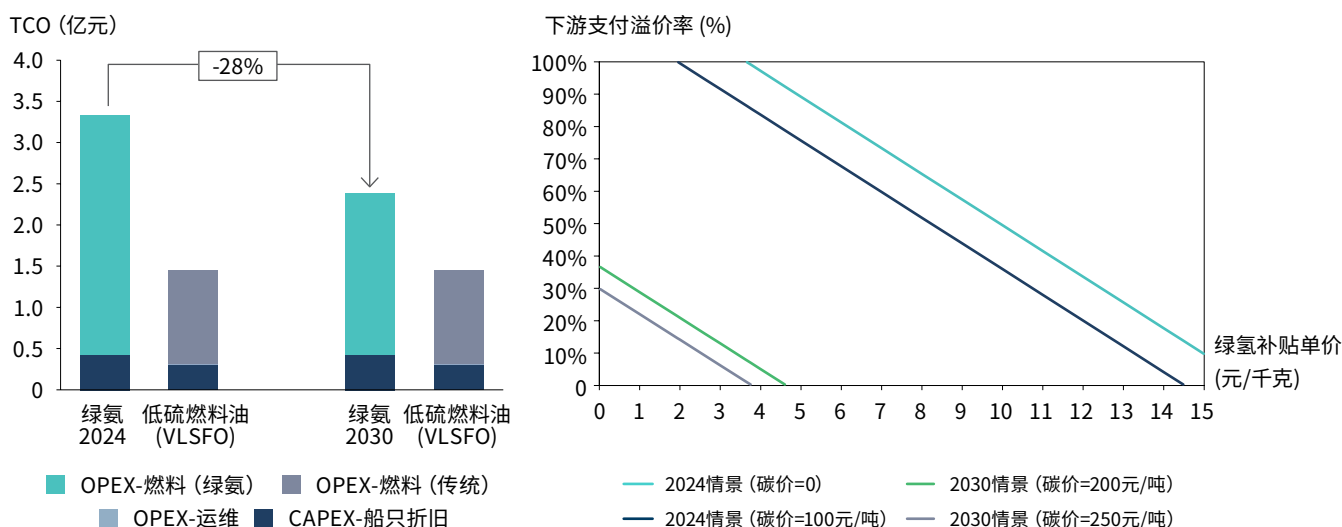


船运燃料

在全球船运业的脱碳图景中，以绿氨、绿醇为代表的清洁船用燃料受到广泛关注，是船运业脱碳的重要抓手。当前，氨燃料电池船只总拥有成本（TCO）为 3.33 亿元，是传统低硫燃料油（VLSFO）船只的 2.3 倍，液化天然气（LNG）船只的 2 倍^v。随着绿氨燃料成本的下降，2030 年和 2050 年氨燃料电池船只 TCO 可下降至 2.38 亿元和 1.66 亿元，并最终在 2050 年前后实现与 LNG 船只成本持平，但仍高于 VLSFO 船。

加快绿氨相关标准和认证的国际互认和衔接能够使作为下游的船运业具有更强的绿色溢价支付意愿，从而推动绿氨在船运领域规模化。尽管目前成本高昂，但绿氨对船运脱碳的重要性使得船运业主有可能在早期承担较高的绿色溢价助推氨动力船的运营。在当前情景下，当碳价为 0–100 元 / 吨之间时，下游需要支付 115%–130% 的绿色溢价才能实现氨动力船只与 VLSFO 船只的平价，到 2030 年，当碳价为 200–250 元 / 吨时，需要支付的溢价水平降至 30%–40%。2024 年 7 月，在符合欧盟可再生能源指令（RED II）的绿氨认证下，全球首个绿氨定价在德国的氢衍生物进口计划中产生，中标的绿氨价格较传统合成氨溢价超过 1.9 倍。共建全球绿氨市场对于合成氨行业的低碳转型至关重要，科学、严谨、有效且国际互认衔接的标准体系构建将大大助力可获得差别化溢价的绿氨市场形成。

图表 ES 5 船燃场景中绿氨路径和传统路径的成本趋势(左)与政策、市场手段对实现平价的作用(右)



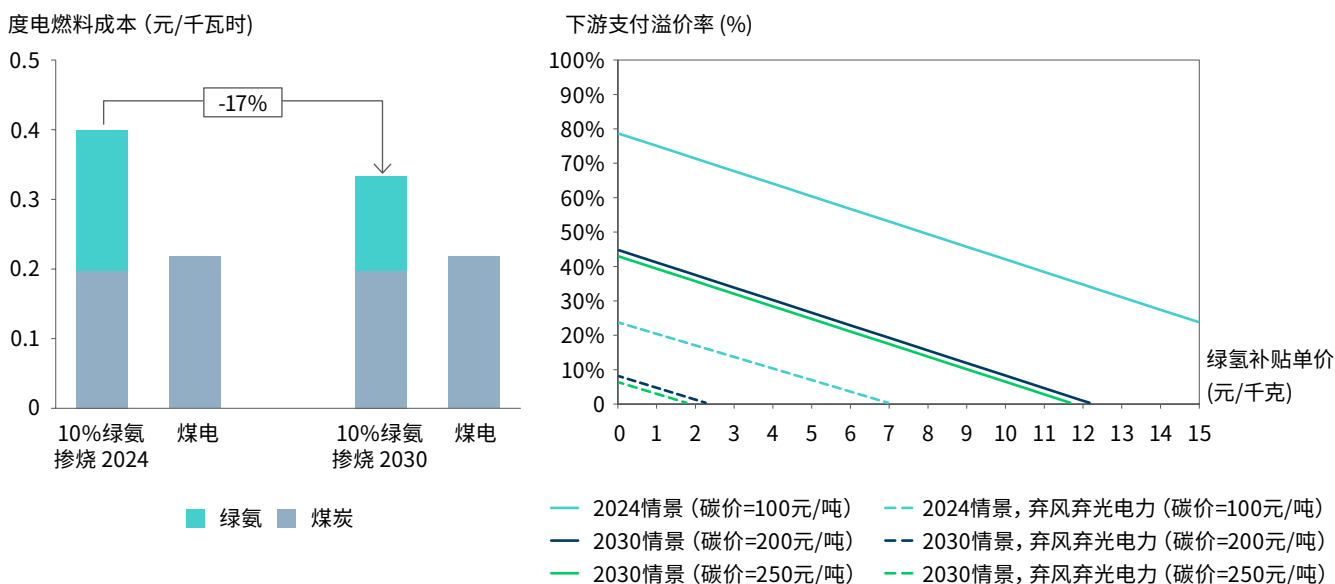
^v 以 16,000TEU 集装箱货轮为例，功率约为 160MW，船只寿命为 25 年。低硫燃料油、液化天然气和绿氨的当前价格分别为 4544、6000、4753 元 / 吨，燃料热值分别为 40.2、46.7、11MMBtu/t。

掺氨发电

掺氨发电是《煤电低碳化改造建设行动方案（2024–2027 年）》提出的生物质掺烧、绿氨掺烧、碳捕集利用与封存三大煤电低碳发电技术路线之一，在发电行业碳减排的过程中，绿氨掺烧可为存量煤电机组的运行贡献一定的减排潜力。以政策中建议的 10% 绿氨掺烧比例计算（假设为热值替代比例），若使用可再生电力生产的绿氨，在 2024、2030 和 2050 年的度电燃料成本分别为 0.40、0.33 和 0.28 元 / 千瓦时，均高于煤电的度电燃料成本（0.22 元 / 千瓦时），且难以在 2050 年前实现平价。

通过可再生富余电力的低价优势降低绿氨生产成本是掺氨发电领域实现平价的关键。当前，尽管电力行业已被纳入碳市场，实现掺氨发电与煤电平价仍需要依靠较大的绿氢补贴力度（大于 15 元 / 千克）或下游溢价水平（80%）推动，即使到 2030 年对补贴的需求仍高达 12 元 / 千克，平价难以实现。不过，若能利用可再生富余电力，则能显著降低对降本手段的需求。如图表 ES6 所示，既定技术成本和碳价假设之下，使用可再生富余电力制绿氨与传统路径的成本差异进一步缩小，对于补贴和下游支付溢价比例的需求也同步降低（在右图中向左下方移动）。当可再生富余电力成本为 0 时，当前和 2030 年实现掺氨发电平价对绿氢补贴的需求能分别降低至 7 元 / 千克和 2 元 / 千克，显著降低平价难度。

图表 ES 6 发电场景中掺氨路径和传统路径的成本趋势(左)与政策、市场手段对实现平价的作用(右)



行动建议

合成氨行业的低碳发展不仅对于整体化工行业的转型至关重要，也对其应用场景涉及的多个行业的低碳转型具有重要意义。一方面，绿氨作为绿氢的重要衍生物，可以通过绿电 - 绿氢 - 绿氨的转化链路解决可再生能源的储运消纳问题，助力可再生能源系统与传统电力系统的耦合；另一方面，作为重要的基础化学品和能源载体，绿氨的发展将为下游化肥、航运、发电等相关行业提供可行的绿色转型路径，从而贡献于工业、交通、电力等领域的脱碳路径与前景。由于可再生电力成本高、合成氨连续生产需要与可再生能源发电波动相适应等因素，当前绿氨的生产成本相比传统路线仍偏高。创新成本分摊机制，并充分发挥技术迭代、政策支持、碳市场以及下游支付溢价等的作用，是绿氨加速实现平价的关键。

基于此，本报告从以下三大维度提出行动建议：

政策层面：制定绿氨产业发展支持政策并尽快将绿氨纳入绿色能源体系，在供给侧畅通绿电 - 绿氢 - 绿氨链路，在消费侧培育绿氨在农业、航运、电力等场景中的应用。

- 尽快研判并将绿氨纳入绿色能源相关政策体系和战略中，为绿氨作为新兴能源的应用创造有利条件。制定绿氨产业发展支持政策，发挥国内相关上下游产业一体化和应用场景丰富且具有一定规模的优势，坚持以市场化手段优先的方式，引导并推动绿氨产业发展。
- 区域和项目规划强调因地制宜，结合自身工业基础逐步推进绿电、绿氢、绿氨的部分和高比例替代。新建绿氨项目应尽可能靠近风电光伏基地，为获得低成本的可再生电力供应创造条件。对于已有的煤制、气制合成氨装置，鼓励绿氨的逐步掺入，实现从灰氨到绿氨的过渡。
- 针对特定应用场景制定支持方案，并确保跨场景政策衔接。例如，在关乎粮食安全的农业场景中，初期不应过多强调下游承担溢价，可以考虑设置适宜的补贴引入机制，以及与技术迭代成本下降相匹配的补贴退出机制，实现从补贴驱动向市场驱动的转变。对于平价时间较晚但脱碳需求较高的航运场景，需要引导相关方进行长期市场培育，综合协调政策支持、碳市场和绿色溢价等手段在短、中、长期的协调。

行业层面：推动绿氨标准认证体系及其国际互认衔接，共建全球市场，同时积极推进柔性合成氨、分布式合成氨等技术和模式的创新和突破。

- 尽早建立绿氨、绿色化肥、绿色燃料等标准与认证体系，推动其与国际标准的互认和对接，参与并贡献于全球绿氨市场的形成与发展。促进基于碳减排属性的差异化市场的形成，提高绿氨产业链上下游各利益相关方对绿色溢价的认可度，力争对绿氨生产和利用过程中实现的碳减排形成市场机制激励。
- 在技术创新方面，通过推进新型催化剂、低温低压合成方法以及柔性工艺等技术的发展，提升绿氨行业整体技术水平，以更好地适应高比例可再生能源供电生产。在模式创新方面，除了传统的集中式发展模式外，积极探索并因地制宜地实践分布式绿氨生产模式。

企业层面：设定明确的转型目标和绿氨发展规划，强化产业链协作，锚定早期绿氨下游应用机会。

- 在内部发展规划方面，开展企业层面和主要工序层级的碳排放摸底，配合行业目标设定自身减碳战略及目标，积极为纳入国家碳市场做好准备。同时，对于现有合成氨产能，通过实施清洁能源替代、开展绿电绿证交易、建设可再生能源发电项目等方式推进低碳转型，并在人才储备方面进行配置。
- 对外合作方面，积极与发电企业、氨存储与运输、化肥生产企业、港口等建立早期的合作伙伴关系，通过促成长期采购协议和创新合作模式，推动绿氨产业链发展。

落基山研究所, 石化联合会氢能专委会, 加速化工行业低碳转型之: 实现绿氨经济性的可行路径, 2024,
<https://rmi.org.cn/insights/green-ammonia-report/>

RMI 重视合作, 旨在通过分享知识和见解来加速能源转型。因此, 我们允许感兴趣的各方通过知识共享
CC BY-SA 4.0 许可参考、分享和引用我们的工作。 <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>



除特别说明, 本报告中所有图片均来自iStock。



RMI Innovation Center
22830 Two Rivers Road
Basalt, CO 81621

www.rmi.org



石化联合会氢能专委会
北京市朝阳区亚运村街道安慧里四
区十六号楼中国化工大厦7层

www.cpcif.org.cn

© 2024年12月, 落基山研究所版权所有。
Rocky Mountain Institute和RMI是落基山研究所
的注册商标。