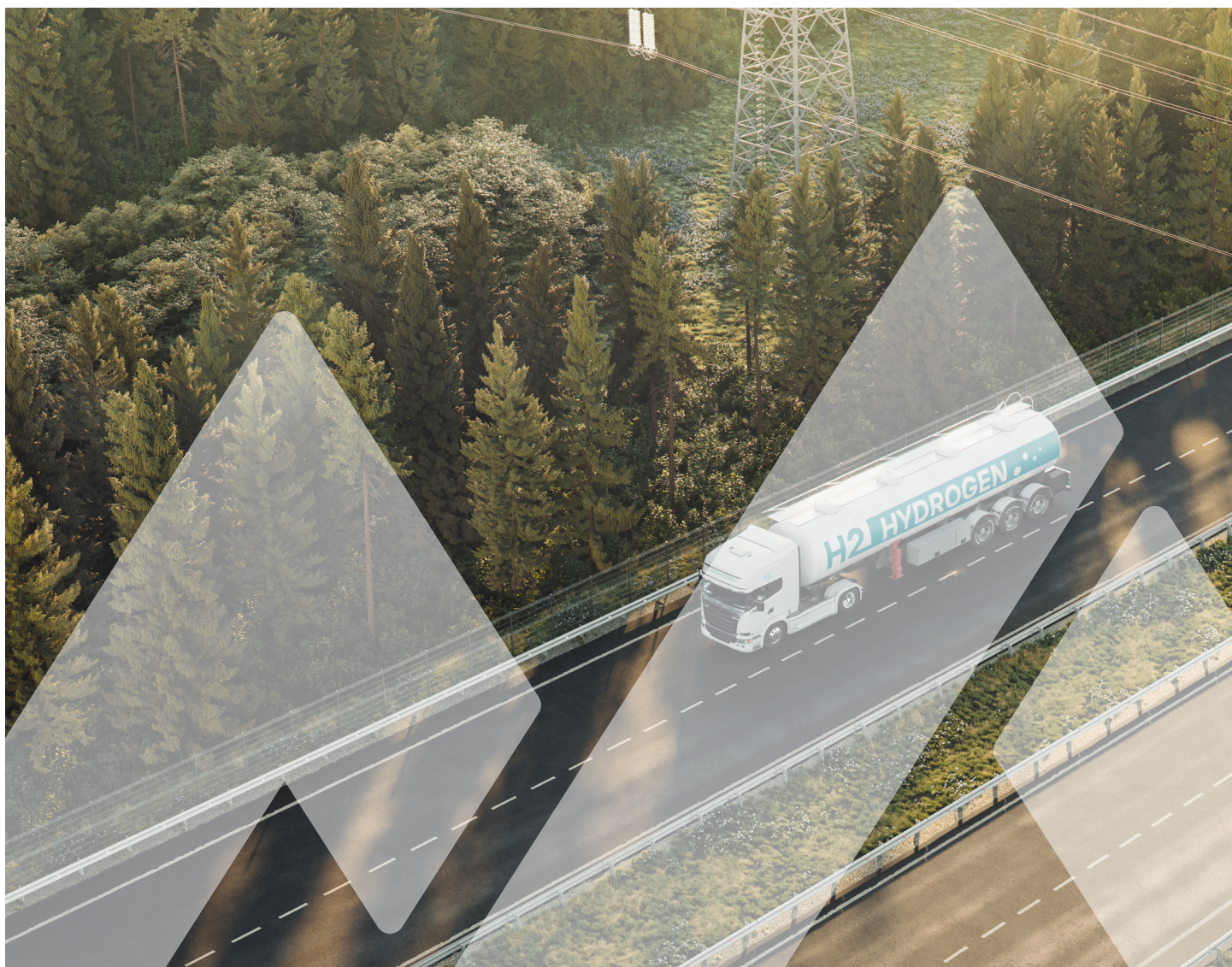




以工业场景为基础的氢燃料电池 重卡可行性及实践案例





关于落基山研究所 (RMI)

落基山研究所(Rocky Mountain Institute,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。

作者与鸣谢

作者

李婷, 刘琦宇, 王喆, 朱凌琪

*除非另有说明, 所有作者均来自落基山研究所。
作者姓名按姓氏首字母顺序排列。

联系方式

刘琦宇, qliu@rmi.org

引用建议

李婷, 刘琦宇等, 以工业场景为基础的氢燃料电池重卡可行性及实践案例, 2024

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/>

除特别注明, 本报告中所有图片均来自iStock。

鸣谢

感谢山西晋南钢铁集团和佛山环境与能源研究院对本报告提供的宝贵支持与意见。

特别感谢能源基金会(中国)对本报告的支持。

此外, 我们也对向本研究提供意见和建议的来自企业和研究机构的专家表示诚挚的感谢。

目录

摘要	6
(一)研究背景与意义	7
1.1 重卡零碳转型的重要意义	7
1.2 氢燃料电池重卡在转型中的作用	7
1.3 氢燃料电池重卡推广应用现状	8
1.4 氢燃料电池重卡的推广难点	10
1.5 氢燃料电池重卡应用案例分析的意义	11
(二)案例选择和分析方法	12
2.1 案例选择及背景	12
2.2 案例分析方法	12
(三)晋南钢铁及佛山氢燃料电池重卡案例分析	14
3.1 案例基本情况介绍	14
3.2 氢燃料电池重卡成本经济性	15
3.3 氢燃料电池重卡碳排放水平	19
(四)主要结论	22
(五)未来氢燃料电池重卡发展路径及行动建议	27
参考文献	29

摘要

在经济发展和人民生活水平不断提高等因素的影响下，交通行业的能源消耗和碳排放水平在一定时期内将持续呈现稳定增长的趋势。目前，我国机动车总保有量中，重型卡车的数量仅占不到5%，却贡献了道路交通领域近一半的碳排放，是未来交通行业实现全面零碳转型的重点领域。

纯电动和氢燃料电池是重型卡车领域脱碳的两类最主要技术路线，在双碳目标、1+N政策框架和各地方具体政策规划的支持下，纯电动重卡和氢燃料电池重卡在销量上已经呈现快速增长的趋势。由于技术特性和成本存在差异，两种技术路线可能将分别在不同的运营场景中占据主导地位，其中氢燃料电池重卡由于运载效率更高、续航潜力更大，且与工业制氢、用氢领域结合更为紧密，在工业企业原材料和产品运输车辆以及未来长途干线运输场景的零碳转型进程中将发挥更大的作用。

在当前技术发展阶段和市场环境下，氢燃料电池重卡仍然面临车辆购置成本较高、氢气价格相对昂贵、氢气供给能力较为有限、加氢基础设施布局不完善以及不同种类氢气碳减排效果有待明确等问题。为了更加精准地定位氢燃料电池重卡适用的场景以及加速其推广应用的解决方案，落基山研究所对晋南钢铁和佛山市两个氢燃料电池重卡应用的案例进行了系统性分析，深入解析了车辆成本经济性及其影响因素、不同氢能来源的减排效果以及车辆在两个案例中的应用表现，对氢燃料电池重卡未来推广应用的方向和重点行动方案进行了总结和提炼。

本研究主要得出了以下主要结论和建议：

- 当前氢燃料电池重卡在技术和性能上具备完成工业场景中短途运输的能力，但成本经济性和减排能力仍然存在较大提升空间；
- 工业场景是当前实现氢燃料电池重卡推广应用最适宜的场景，也是向全运输场景扩展和规模化重要基础；
- 车价、氢价、氢气供给能力是决定氢燃料电池重卡未来推广进程的三大关键要素；
- 绿氢是氢燃料电池重卡具备零碳属性的必要条件；
- 研究制定以工业场景为基础，逐步向中长途货运场景拓展的氢燃料电池重卡推广应用路线图是加速其推广应用的核心；
- 在完善氢燃料电池重卡车辆相关配套激励政策的同时，从工业行业的角度提供更多减排目标和促进机制有助于提升企业使用氢燃料电池重卡的积极性；
- 持续强化绿氢及其产业链的发展并优化布局氢气“储、运、加”基础设施体系是增强氢燃料电池重卡综合竞争力的重要支撑。

(一) 研究背景与意义

1.1 重卡零碳转型的重要意义

重型卡车是指车和货物总质量在14吨以上的大型载货汽车，主要应用于公路货物运输。截至2023年，我国重卡保有量约为900万辆，¹ 占全国机动车保有量的2%左右，² 但重卡的二氧化碳排放量已经达到了3.6亿吨，占道路交通总排放的40%。³

随着经济快速发展和人民生活水平的逐步提升，重卡承担的道路运输需求将持续增加。根据落基山研究所的一项针对1.5度温控情景的重卡零排放转型路径研究，我国道路货运需求预计将从2020年的6万亿吨公里增长到2050年的11万亿吨公里，⁴ 假设重卡将承担其中约80%的份额，⁵ 到2050年时，重卡将承担约9万亿吨公里的货运周转量，碳排放量将达到约6.6亿吨。因此，通过新能源替代等方式实现重卡的零碳转型对于我国碳中和目标的实现至关重要。

根据中国汽车工程学会和工信部等单位联合编写的《汽车产业绿色低碳发展路线图1.0》预测，⁶ 到2030年，零碳重卡的市场渗透率将提升至25%，到2050年时零碳重卡将成为重卡市场发展主体，进一步明确了重卡零碳转型的前景和目标。

1.2 氢燃料电池重卡在转型中的作用

除了减少无效运输量、提升车辆燃油经济性等减排措施外，使用新能源替代传统柴油是实现重卡零碳转型的最主要解决方案。考虑到不同技术路线的减碳潜力和可行性，纯电动重卡和氢燃料电池重卡是目前行业中主流的两种技术路线。

纯电动重卡（含充电和换电）主要指使用锂电池作为主要能源载体的重卡。在我国新能源汽车和动力电池产业快速发展的推动下，纯电动重卡在技术上已经初步成熟，并且在续航里程能力和车辆价格持续优化的推动作用下，纯电动重卡已逐步规模化并成为我国新能源重卡市场的主流技术。然而由于电池组的重量较大，续航能力相对有限，且充换电基础设施成本较高，纯电动重卡目前的主要应用场景仍然局限在港口、矿山、工业园区内部及短途固定线路运输上。

氢燃料电池重卡主要指使用氢气作为燃料，通过燃料电池将氢气中的化学能转化为电能提供动力的重卡。由于氢能的质量能量密度较大，质量较轻，氢燃料电池重卡的理论续航能力强于当前技术水平下的纯电动重卡。然而考虑到氢能产业的发展仍在相对初级阶段，氢燃料电池重卡的车辆成本较高，且氢能的供给能力和价格也尚不具备竞争优势，目前其推广应用也仍然集中在工业场景中固定路线原材料和产品运输等场景上，且对于加氢站和燃料电池示范城市群等配套政策的依赖程度较大。

与纯电动重卡相比，氢燃料电池重卡的优势在于其长途运输场景下的更高的运载效率和更强的续航能力，未来随着氢能技术发展和基础设施逐步完善，氢燃料电池重卡在长距离干线运输场景中承担更重要的角色，成为重卡零碳转型的重要解决方案之一。

1.3 氢燃料电池重卡推广应用现状

从2017年中国重汽推出我国第一辆氢燃料电池码头牵引车HOVA,⁷到2023年我国一跃成为全球最大氢燃料电池汽车的消费市场,⁸我国整个氢燃料电池汽车产业的诞生和迅速发展离不开多层次、多维度的产业政策扶持。

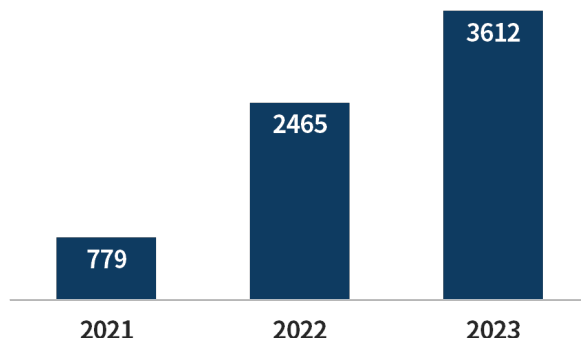
宏观来看,国务院于2012年下发的《节能与新能源汽车产业发展规划(2012-2020)》和国务院办公厅于2020年印发的《新能源汽车产业发展规划(2021-2035)》两份文件为包括氢燃料电池汽车在内的多种新能源汽车种类指明了发展方向,并在“蓝天保卫战”和整体经济结构向绿色低碳化转型的大背景下,将新能源汽车确定为了支撑我国汽车工业产业升级的重要抓手和实现与可再生能源产业协同发展的关键举措。

具体政策层面,氢燃料电池汽车的推广一方面需要相关制造产业不断推动技术的研发和突破,另一方面也需要成熟的氢能上下游产业来为其注入源源不断的动力。2020年9月,五部委联合下发了《关于开展燃料电池汽车示范应用的通知》(后称“通知”),⁹要求建立五大燃料电池汽车示范城市群,并以此为基础构建燃料电池汽车产业链、探索有效商业模式、促进技术创新应用,明确我国氢燃料电池汽车市场将以中远途、中重型商用车为推广重点。2022年3月,国家发改委印发了《氢能产业发展中长期规划(2021-2035年)》,¹⁰明确氢能在我国能源体系中的角色定位和在绿色低碳转型过程中的支撑作用,强调以可再生能源制氢和清洁氢为核心的发展方向,并提出到2025年燃料电池汽车保有量达到约5万辆的目标。氢能产业是氢燃料电池汽车的重要支撑,在国家政策的指导下,各地方也已相继出台氢能产业发展规划。据落基山研究所统计,截至2024年3月,已有25个省份(含自治区、直辖市)相继发布了50余项省级氢能专项规划,且有10个省份(含自治区、直辖市)发布了20余个氢燃料电池汽车产业发展行动方案。

在市场与政策的协同作用下,氢燃料电池汽车的产业政策将攻克关键核心技术作为发力点之一,近年来在技术、性能等方面实现了突破式发展。其中《通知》特别强调要求申报城市群必须在示范期间,完成燃料电池汽车搭载的基础材料、关键零部件技术的突破和产业化,并着重强调了电堆、膜电极等亟待攻破的关键技术难点。^{11,12}根据我国工信部近期的公开披露信息,2023年燃料电池系统成本已经下降到3000元/千瓦,相比2020年下降超过80%;同时电堆体积功率密度达到了每升4000瓦,比2020年提升了35%。¹³

目前,我国已经成为全世界最大的氢燃料电池汽车消费市场,并孵化出了亿华通、重塑、国鸿氢能等多个掌握氢燃料电池核心技术的企业,也一定程度上促进了宇通、飞驰、一汽解放等多个氢燃料电池汽车国产整车品牌的发展。过去的几年中,氢燃料电池重卡市场份额实现了快速增长,初步形成了产业化应用的格局。2020年时,全国氢燃料电池重卡销售量不足20辆。2023年的重卡市场中,氢燃料电池重卡已经占到了新能源重卡市场份额的10.57%,2023年全年累计销量为3612辆。¹⁴(图表1)

图表1 氢燃料电池重卡近三年国内销量(辆)¹⁵



燃料电池汽车示范城市群进展与成效

已通过国家批复的五大燃料电池汽车示范城市群有：京津冀城市群、上海城市群、广东城市群、河北城市群、河南城市群，共包含41座城市，形成了“3+2”的示范格局。在示范期中，五部委将根据燃料电池汽车推广应用、关键零部件研发产业化和氢能供应三部分对示范应用进行积分考核，并以考核结果进行“奖惩扣罚”。其中，每1积分等于10万元国家奖励，单个城市群整车及关键零部件应用可获得最多15000积分，加氢站及基础设施可获得最多2000积分，合计17000积分，中央奖励资金池共计17亿元。对于超额完成任务的城市，奖励资金可最多上浮10%。在为期四年的示范期（即2021年至2025年）内，五大城市群需推广燃料电池汽车超过35000辆，建设加氢站超500座。

根据中汽中心所统计的燃料电池城市群实际推行状况，截至2023年8月，燃料电池汽车累计产量19968辆，上险量达17499辆，其中主要推广车型为重型货车，占比达到50%；加氢站累计建成407座，投入运营269座。¹⁶从车辆应用场景来看，推广车辆主要以大宗物资运输、渣土运输、城市物流配送、物流运输、冷链物流、市政环卫、牵引接驳、港口运输、矿场运输、混凝土搅拌车、自卸车等为主。¹⁷财政部等部委已于2024年年初对燃料电池汽车示范城市群第一年度（2021至2022年度）的工作情况完成考核评价，并拨付第一批中央财政奖励资金。¹⁸

分区域来看，上海城市群凭借长三角地区的产业优势形成商用车为主，乘用车并行的发展路径，其推广量居于首位。京津冀城市群凭借第一批示范城市群的先发优势，且得益于冬奥会的契机，推广任务完成较好。河南和河北城市群凭借本地的钢铁产业基础及副产氢资源，形成了以大企业引领的商业模式，带动了氢燃料电池车的推广。广东城市群作为我国氢能产业发展的排头兵，尽管存在区域内氢气供需不平衡问题，但总体来看仍较好的完成了推广目标。在第一批城市群推广应用效果的影响下，山西、四川、重庆（成渝氢走廊）等省市和地区也在积极推进氢燃料电池汽车推广应用相关行动，并争取纳入第三批国家级燃料电池汽车示范城市群。^{19,20}（图表2）

图表2 五大燃料电池汽车示范城市群氢燃料电池汽车推广现状²¹

	氢燃料电池汽车 累计推广数量 (辆)	加氢站数量 (座)	氢气供应量 (万吨/年)	氢气价格 (元/千克)
京津冀	2508	30	6	30-40
上海	4000	26	N/A	40-60
广东	3200	56	2.7	50-60
河北	1136	18	3.2	£35
河南	1289	28	N/A	£35

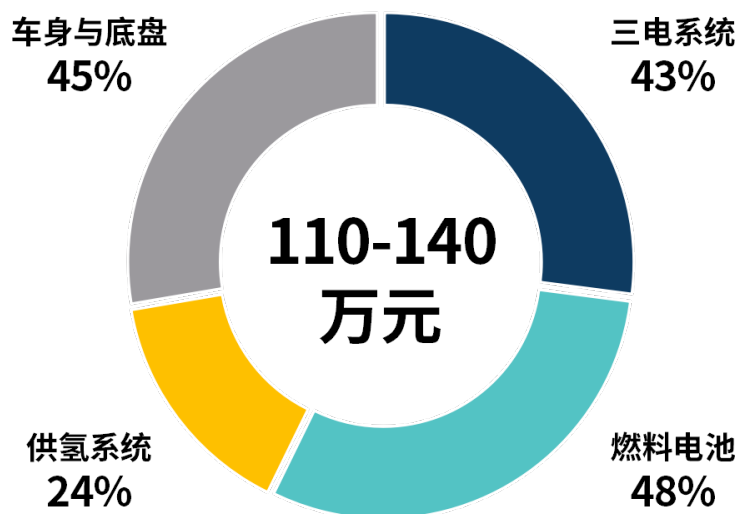
1.4.氢燃料电池重卡的推广难点

虽然氢燃料电池重卡在技术特性上具备长距离运输的潜力，但其成本经济性竞争力不足，氢气储运和加注相关基础设施短缺以及氢气供应稳定性较差等三方面挑战已经成为了氢燃料电池重卡规模化推广应用的主要难点。

成本经济性

首先，从成本经济性上看，氢燃料电池重卡目前在购置成本和使用成本上都存在一定的劣势。一方面，氢燃料电池重卡的燃料电池系统和储氢瓶等设施的价格仍然相对较高，导致车辆整体购置成本远高于同等规格的柴油重卡。以49吨级重卡为例，氢燃料电池重卡的市场公开售价在110万元至140万元之间，^{22,23}约为同等规格柴油重卡价格的4倍。²⁴ 近年来燃料电池关键零部件经历了一定的技术和产能升级，总体成本有所下降（图表3），但是氢燃料电池重卡的非动力系统部件制造成本仍然偏高。²⁵不过，关键原材料催化剂、质子交换膜、储氢瓶所用的碳纤维等核心技术正处于自主研发和突破阶段，整车成本仍有较大下探空间，整体的生产成本有望触及规模效益下的降本加速点。²⁶

图表3 49吨级氢燃料电池重卡制造成本拆分²⁷



另一方面，由于氢气价格较高，氢燃料电池重卡的运营成本相比柴油重卡同样不具有竞争力。传统意义上，氢气作为原料主要用于工业生产，将工业领域生产的氢气用于氢燃料电池汽车不仅会增加氢气供给压力，也为氢气的储运提出了更高的要求，提高了氢气在氢燃料电池汽车应用端的成本。中国氢价指数统计显示，2022年，燃料电池汽车示范城市群所覆盖地区的泵端氢价平均保持在55元/千克左右（不含补贴及奖励价格），非示范城市群的价格全年在73元/千克左右。²⁸即使按照示范城市群所要求的35元/千克氢价计算，氢燃料电池重卡的百公里燃料成本仍然约为柴油重卡的2倍。ⁱ

氢气储运和加注等基础设施

从基础设施上看，氢气的储运和加注是实现氢燃料电池重卡有效推广应用的重要基础。由于氢能产业的发展仍然处于初级阶段，氢能的储运和加注设施的管理规范和布局规模都尚不完备。考虑到氢气易挥发、易燃、易爆的特性，大部分地区仍然按照“危险化学品”来进行管理，增加了氢气储运和加注设施投资和运营的难度。ⁱⁱ此外，各地存在管理政策不统一、主管机构不明确的情况，进而导致补贴支持政策滞后、审批管理机制不健全等问题，一定程度上限制了产业发展速度。另一方面，目前加氢站的投资建设成本仍然较高，在没有明确大规模氢燃料汽车推广应用的情况下，加氢站的推广建设进度较慢，增加了氢燃料电池重卡的应用的成本和难度。

氢气供应

最后，氢燃料电池重卡的氢能供给存在一定的短缺风险。受原材料价格波动、生产工艺等因素影响，氢气的供应存在高度不稳定性。当前氢燃料电池重卡高度依赖的工业副产氢受主产品生产计划和其他下游应用竞争的影响，终端供氢不仅价格起伏较大，供给也时而短缺。当前已经建好的加氢站存在着因“缺氢”而无法正常运转的情况，进一步抬高了氢燃料电池重卡的使用难度。

1.5 氢燃料电池重卡应用案例分析的意义

为了更有效地应对上述挑战，在加大研发力度提升技术的可用性、降低氢能和氢燃料电池系统成本的同时，从现有实际使用场景出发，系统性分析氢燃料电池重卡的技术适用性、车辆应用性能表现以及购置和使用等环节的成本经济性，并以此为基础定位氢燃料电池重卡应用的主要挑战和难点，是明确其推广应用路径和方法的重要基础。

从案例和场景来看，工业已经成为了氢燃料电池重卡应用的主要场景。工业发展燃料电池重卡具备多种优势：钢铁、化工等重工业企业本身具备一定的氢能供给能力；工业园区内车辆加氢更为便利；原材料和产品的运输半径较为适合；以及我国对于工业行业二氧化碳减排的要求更为严格，促使更多的企业主动考虑通过多种方式实现全范围减排。因此，以工业场景为起点、逐步建立市场发展基础、推动相关技术和基础设施完善，有可能是推动氢燃料电池重卡发展和普及的有效路径。本文将围绕工业场景，具体分析不同应用环境和因素对氢燃料电池重卡应用效果的影响，从而确定最有利的市场推广路径。

ⁱ按照氢燃料电池重卡每百公里氢耗10千克、燃油重卡每百公里油耗32.5升、氢气价格35元/千克、柴油价格6.5元/升计算。

ⁱⁱ近期海南、内蒙古、河北、吉林等四个省份已经率先出台松绑制氢端管理办法，允许非化工园区的绿氢生产不需取得危化品安全许可。

(二) 案例选择和分析方法

2.1 案例选择及背景

为了确定有利氢燃料电池重卡发展的应用场景，更直观地对比不同产业环境、应用场景、氢能来源、配套设施以及政策环境下的氢燃料电池重卡运营效果，为其下一阶段的加速推广应用提供更明确的建议，本研究选取了晋南钢铁和佛山作为主要案例分析对象。晋南钢铁位于山西省临汾市，其氢气主要来自钢铁焦化过程中的副产氢，且晋南正在积极布局离网光伏用于未来绿氢的供给；佛山市氢气主要来自周边区域化工生产的副产氢，并通过车辆运输至佛山市进行加注，同时佛山市也已经出台了若干政策支持氢能和氢燃料电池汽车产业的发展。（图表4）

图表4 两个案例的特点对比

	晋南钢铁厂	广东佛山市
氢源	厂内副产氢	省内副产氢和灰氢
应用场景	厂区内短倒	物流与城市市政
车辆补贴	无补贴	国补+地补
配套产业	无	设备制造企业积累雄厚
配套基建	厂内加氢站	市内加氢网络
基建补贴	无	国补+地补

2.2 案例分析方法

为了系统性评估上述两个案例中氢燃料电池重卡运营的效果及可行性，分析与工业场景相结合对于加速氢燃料电池重卡推广应用的作用，从而定位对政策和行业的建议，本研究采用了定性案例梳理加定量双维度指标评估的分析方法，结合案头数据分析和利益相关方调研访谈，对晋南钢铁和佛山这两个案例进行了综合解析。

其中，案例梳理主要对两个案例的地方政策环境、基本的工业和氢能产业发展情况、氢能的来源和大致成本、以及氢燃料电池重卡应用的基本现状等进行了汇总和对比，为指标体系量化分析提供了基础。双维度指标评估部分将氢燃料电池重卡运行的成本经济性和碳排放水平作为两个核心维度，以此分析当前工业场景下氢燃料电池重卡运营的性能表现及与柴油重卡存在的差异。

在成本经济性维度上，氢燃料电池重卡成本主要包括车辆购置成本、加氢等使用成本及运营维护成本，其中氢气的成本在不同应用场景下区别较大，与其生产方式、运输距离和加氢站规模位置等都有一定的关系，是影响氢燃料电池重卡应用综合应用成本高低的主要因素。本研究将基于晋南钢铁和佛山两个案例，对氢气的制、储、运各环节以及加氢站建设和运营等具体影响因素进行逐一分析（图表5），结合两个案例中车辆实际运行数据和能耗统

计来计算氢燃料电池重卡运营的成本经济性,并与相同场景下的柴油重卡进行对比。

在碳排放维度上,不同来源氢气的生产方式不同,其排放水平也存在一定的差异。不仅如此,行业企业在副产氢碳排放计算方法选择上存在一定争议,本研究将对系统扩展法和替代法核算氢气碳排放的结果,确保一致性和可比性。同时,由于氢燃料电池重卡应用过程中的排放主要来自氢气生产过程,本研究将不考虑相关储运基础设施和加氢站建设等环节产生的碳排放。

图表5 车用氢涉及的关键环节



(三) 晋南钢铁及佛山氢燃料电池重卡案例分析

3.1 案例基本情况介绍

晋南钢铁

晋南钢铁集团是一家集钢铁、焦化、高端化工、新能源为一体的企业。晋南钢铁依靠自身钢焦融合、钢化联产的产业优势和丰富、廉价的氢气资源，将氢能产业确定为公司的核心战略发展方向之一，也因此被山西省政府确定为首批氢能产业链“链主”企业ⁱⁱⁱ。

交通运输是晋南钢铁确定的氢能综合利用的主要场景之一。晋南钢铁希望通过以氢燃料电池重卡替代柴油重卡的方式，在实现交通运输脱碳减排、满足环保绩效评级和超低排放改造要求的同时，带动自身氢能产业发展，并辐射带动上下游企业对氢能的综合利用。在晋南，除了部分煤炭、铁矿石等原料是通过铁路运输外，其他原材料和产品都基本通过重型卡车运输，日常运转重卡超过千辆，因此重卡零碳转型对晋南整体节能降碳意义重大。

晋南钢铁厂工业流程本身对氢气有一定的应用，包括与钢铁生产相关的高炉富氢冶炼、富氢烧结、直接还原铁，以及与化工生产相关的乙二醇制取等。在钢铁生产中的焦化流程会产生大量副产焦炉煤气，氢气含量高达61.7%。根据本研究实地调研，来自焦炉煤气的副产氢总产量每年约为7.3万吨。为了最大化应用焦炉煤气资源，晋南钢铁投资购置了乙二醇生产设备，将焦炉煤气用于化工生产，在分离焦炉煤气的甲烷成分和其他杂质后，提纯后的99.9%浓度氢气可以生成高附加值乙二醇。

然而，受到市场价格和原料成本波动的影响，乙二醇市场存在不确定性，经济效益有限，无法完全消纳副产氢资源。因此，晋南钢铁进一步规划了氢燃料电池重卡应用，将其作为下游氢能产业的重要一环。由于交通用氢对氢气的纯度要求较高，焦炉煤气的副产氢需要经过进一步的提纯，才能再用作氢燃料电池重卡的燃料。

此外，晋南还计划利用光伏生产绿氢，以此扩充氢气供给能力。晋南钢铁与中国华能合作计划建设1300MW光伏“发电+制氢”项目，一期300MW已于2023年1月并网运行，剩余的装机容量仍在规划当中。一期项目共计300MW光伏装机，年发电量可达4.2亿度，每年可生产绿氢约0.8万吨。若剩余规划容量在2025至2030年逐步实现并网发电，绿氢产能将在2030年达到4万吨/年。

2022年8月，晋南钢铁与美锦能源、一汽解放等企业的首批300辆氢燃料电池重卡完成交付，在2023年6月，晋南再次投运了100辆。在没有政策补贴支持的条件下，截至2023年12月，晋南钢铁已经先后投运了400辆氢燃料电池重卡，主要用于场内短倒。^{29,30}晋南还配套建设了1座日加氢能力6吨的加氢站，为我国最大的加氢站，目前每日加氢车次约230次，未来还计划将加氢能力扩充至9吨，可日加注500辆汽车。总体而言，晋南钢铁已经在不依赖补贴的情况下初步实现了氢能重卡的大规模、常态化应用，取得了不错的应用效果。

ⁱⁱⁱ根据山西省政府办公厅2023年7月发布的《山西省重点产业链“链主”企业遴选及管理办法》，“链主”指在优势基础产业链上拥有核心优势地位的企业，对产业链资源配置、技术产品创新和产业生态构建等具有重大影响，并有意愿增强本省产业链的稳定性和竞争力。

佛山

与晋南钢铁的案例有所不同，佛山市氢燃料电池重卡应用并不是以重点工业企业的低碳转型为主要驱动力，而是充分依托当地相对完善的氢能产业和氢燃料电池汽车支持政策体系，以及基础较为雄厚的氢燃料电池技术和研发实力来开展氢能汽车应用。

在政策方面，佛山是我国氢能产业发展政策扶持的重点城市之一。从2020年开始，广东省和佛山市先后出台了《广东省加快氢燃料电池汽车产业发展实施方案》、³¹《广东省加快建设燃料电池汽车示范城市群行动计划（2022-2025年）》、³²《广东省燃料电池汽车加氢站建设管理暂行办法》、³³《佛山市南海区推进氢能产业发展三年行动计划（2022—2025年）》以及《佛山市能源发展“十四五”规划》等政策文件。^{34,35}这些政策分别从区域性氢能产业的建设和、氢燃料电池车辆的商业化推广、加氢站建设运营补贴和土地审批等方面为氢燃料电池车的发展提供了政策支持。2021年，佛山牵头启动了燃料电池汽车示范应用的广东城市群项目，进一步加速了广东省和佛山市氢燃料电池汽车推广应用的进程。

在政策的大力扶持下，佛山已成为我国重要的氢燃料电池生产和研发中心，其氢能产业已有多年发展历史，诞生了一大批知名氢燃料电池和整车制造企业，如飞驰汽车、国鸿氢能等。2022年，佛山飞驰汽车以512辆的累计销量夺得全国氢燃料电池重卡年销量冠军，市场份额达21%。³⁶其次，佛山本地拥有完善且规模庞大的氢能产业链，2022年，佛山已引入30家氢气生产商，32家储氢企业，15家运氢企业，28家燃料电池公司和100多家氢能应用企业。³⁷

在政策和技术产业的双重支持下，佛山市氢燃料电池汽车推广应用的效果逐步显现。截至2023年7月，佛山已有公交车约1500辆，物流车约400辆，市政环卫车约70辆。而氢燃料电池重卡则主要以环卫车和渣土车为主，行驶范围可覆盖佛山全市，每天运行里程最高可达200-300公里。佛山市车用氢气的来源以广东地区的石化企业的工业副产氢和气体企业生产的灰氢为主，仅有少部分为本地制得的灰氢氢气。截止2023年底，全市共建加氢站38座，可基本覆盖市域内加氢需求。³⁸

不过，近年来佛山市周边氢气价格始终保持在高位，氢燃料电池车辆的购置速度已经呈现出放缓的迹象，且出现了部分车辆闲置的情况，为氢燃料电池重卡在佛山的大规模推广应用增加了新的挑战。

3.2 氢燃料电池重卡成本经济性

如前文所述，成本经济性是影响氢燃料电池重卡推广应用进度的最重要因素之一。为了更加清晰地观察晋南钢铁、佛山案例中氢燃料电池重卡的成本经济性现状，研究团队计算了两个案例中当前运营氢燃料电池重卡的总拥有成本，并与柴油重卡和纯电动重卡进行了对比。其中，总拥有成本的组成部分主要包括车辆购置成本、柴油、电或氢能等燃料成本、运营维护费用、保险和路桥费、充电或加氢站建设成本及充电或加氢站运营成本^{iv}，考虑到重卡目前的使用寿命通常为10年，本研究中的车辆生命周期以10年为标准进行计算^v。

在晋南钢铁的案例中，研究团队通过调研了解到，企业采购的车辆品牌主要包括飞驰、一汽、柳工等，车型以49吨半挂车为主，车辆价格约为130万元。目前车队使用副产氢的泵端价格大约为25元/千克，车辆百公里耗氢量约12公斤。由于目前车辆主要用于原材料、产品运输等厂内短倒运输，氢燃料电池重卡的日均行驶距离约为100-120公里，厂区内加氢站的建设成本约为5000万元，包含8个加氢枪口，当前日最大加氢能力约为6吨。

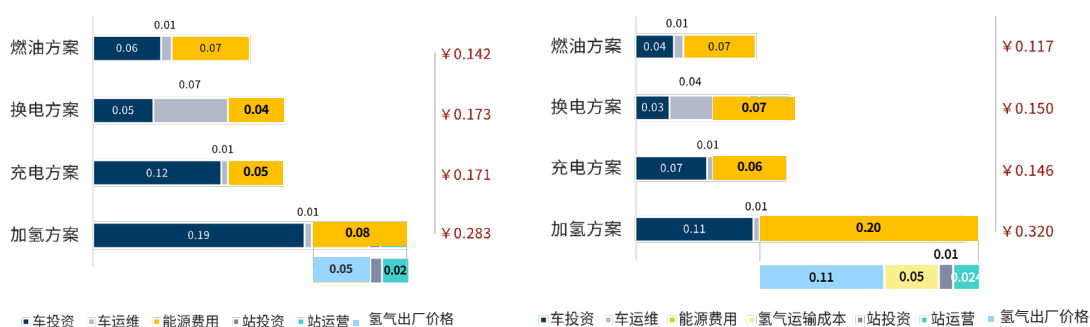
^{iv} 因为选择燃油重卡的用车主体并不需要自行建加油站，因此计算中不考虑加油站的相关成本。

^v 根据现行的《机动车强制报废标准规定》，重型载货车辆的使用年限为15年。因技术差异等不可知性，本篇报告的车辆使用寿命周期统一取10年。

而佛山的案例中，由于佛山的氢燃料电池重卡用氢主要来自周边化工企业的副产氢，氢气的运输成本高于晋南钢铁案例，目前氢价大约为每公斤50-75元。

为了便于对比氢燃料电池重卡、纯电动重卡（充电及换电方案下）、柴油重卡的成本经济性差异，研究团队分别计算了同类型场景下不同重卡的成本经济性。（图表6）

图表6 晋南(左)与佛山(右)氢燃料电池重卡单位周转量成本(元/吨公里)^{vi}



从图中可以看出，晋南钢铁和佛山案例中氢燃料电池重卡的单位周转量成本均远高于柴油重卡和电动重卡。其中，车辆的购置成本和氢气本身的能源费用是占氢燃料电池重卡单位周转量成本的90%以上，且由于目前加氢基础设施的布局仍然不完善，多数企业在使用氢燃料电池重卡进行运输的过程中需要自行投资建设加氢站，如果将这部分成本合并到加氢总成本当中，氢燃料电池重卡不仅在车辆购置阶段成本明显高于柴油和电动重卡，在综合用能和运营成本方面也没有明显的优势。

从上述分析中可以看出，氢燃料电池重卡不仅车辆购置成本高企，且在此基础上，氢气较高的成本还推高了氢燃料电池重卡运营阶段的成本，导致车辆无法像纯电重卡一样，通过运营成本的优势收回前期投资成本。本文将从制氢、储运氢和加注三个环节分析氢气成本较高的主要成因。

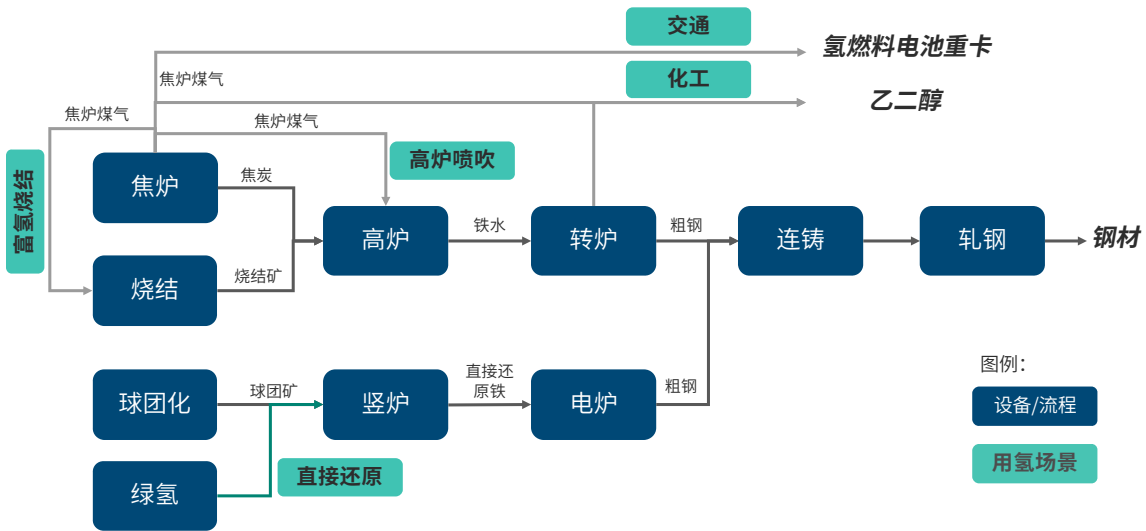
制氢环节

制氢成本是氢气成本中最主要的部分。为了实现氢气的低碳、低成本供应，目前大多数氢燃料电池重卡会优先选择使用工业副产氢，并以灰氢和绿氢等作为补充。晋南钢铁和佛山两个案例中氢燃料电池重卡所使用的氢气来源均主要为工业副产氢，但由于副产氢来源行业和生产过程有所不同，两个案例中副产氢的成本和碳排放也存在一定的差异。

晋南钢铁案例中，车辆使用的氢气来自焦化流程产生的焦炉煤气（图表7），副产氢总产量每年约7.3万吨。其中约2万吨被用于高炉富氢冶炼、富氢烧结、直接还原铁等炼钢流程，剩余氢气主要用作化工原料以及氢燃料电池重卡的氢源。

^{vi} 晋南钢铁案例的计算假设车队规模400辆，单车日行驶距离120公里。佛山案例的计算假设车队规模100辆，单车日行驶距离200公里。

图表7 晋南钢铁用氢流程图



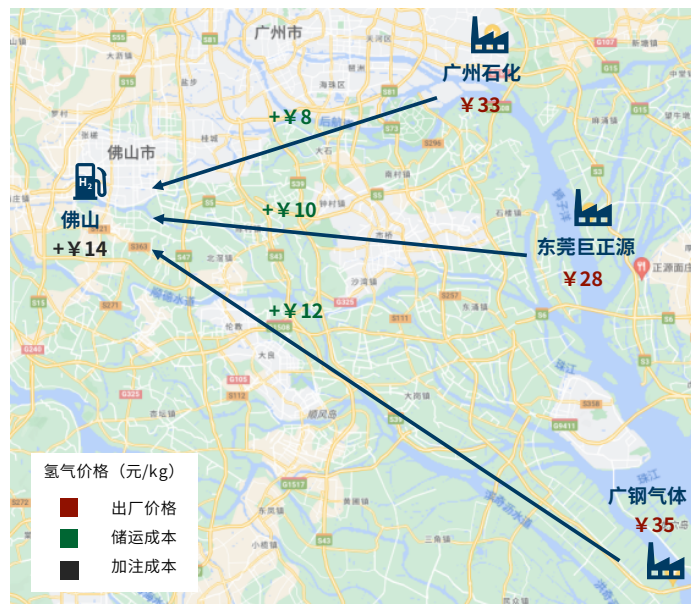
由于副产氢是焦化流程的副产品，在进行财务核算时，上游生产成本通常不会被计入副产氢中，因此副产氢成本主要是提纯等处理过程的成本。最终的出厂价格通常由当地氢气市场情况或者买卖双方商议决定。研究团队通过访谈了解到，晋南钢铁案例中，氢燃料电池重卡所使用的副产氢经过提纯后的站前价格大约为15元/kg。与晋南钢铁案例类似，佛山氢燃料电池重卡目前所使用的氢气同样是以副产氢为主。由于佛山当地工业生产企业相对较少，且当地氢燃料电池交通体系需氢量较大，佛山市氢燃料电池重卡的氢气来源主要是粤港澳大湾区内的广州石化、巨正源等多个工业企业的副产氢。在副产氢市场呈现供不应求的情况下，最终成交的市场价格也相对较高，目前在每公斤26元至35元之间随供需情况波动。

储运环节

氢气是一种小分子气体，具有低密度、高压力和易泄露等特点，因此储运难度和成本都相对较高。目前，通过管束车搭载钢制无缝大容积气瓶是最主流的氢气运输方式，具备灵活、方便、快捷等优势，但是运送效率相对较低，低压情况下，单车单次运氢量仅占车辆总运输质量的1%~2%，单车运氢量不超过500kg，且运输成本随距离增加，相对更适合短距离运输。³⁹

晋南钢铁的案例中，氢气生产和加氢基础设施的位置都位于晋南钢铁的园区内，运输距离较近，储存和运输的成本相对较小，可以忽略不计。佛山市的氢气主要来自周边城市的化工企业，需要使用管束车进行运输。(图表8)根据调研，目前佛山氢燃料汽车所用氢气的运输距离一般在60-100公里，单次运输量约为300kg，氢气的储运价格约为8-12元/kg。

图表8 佛山市氢气供应情况



加注环节

在被送至加氢站后，氢气还要经过储存和加压才能最终加注车辆，这个过程相对复杂，其成本会反映在最终氢价上。加氢站的成本主要包括投资建设成本和运营费用，其中投资建设成本主要由加氢站的类型、效率和规模决定，而运营成本则包括日常的运营维护、人工等。

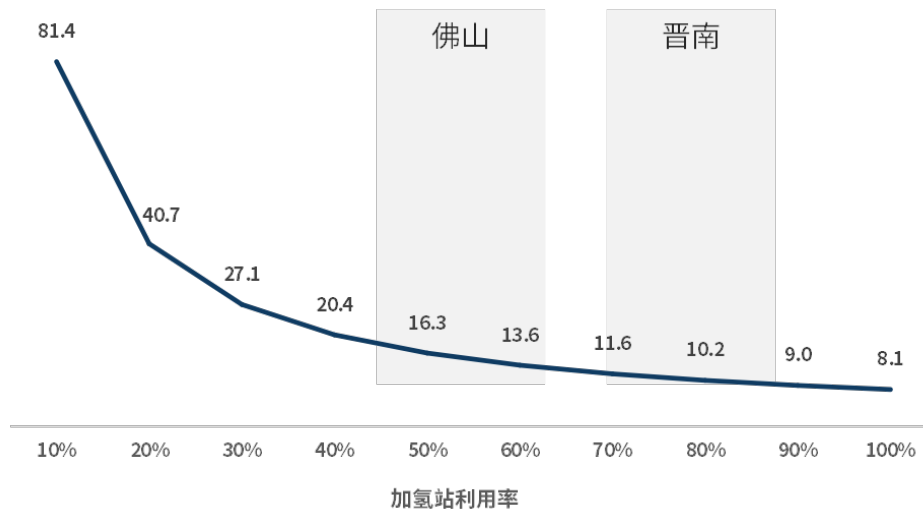
晋南钢铁厂区内运行的加氢站目前为全国规模最大的加氢站，规划单日总加氢能力达到了9吨，实际加氢能力已达到6吨，共配备8个加氢枪口，能够充分满足晋南钢铁400辆氢燃料电池重卡每日加氢需求。(图表9) 该加氢站总投资额约为5000万元人民币，设计使用寿命为10年，折合每千克氢气承担的固定成本约为3.4元/kg。而加氢站的日常运维、耗电、人工等环节的成本，折合在氢气上约为5元/kg。加氢站最终氢气泵端价格约25元/kg，刨除氢气进价15元/kg后，10元为加氢站营收。除固定成本和运营成本外，剩余的约1.6元为加氢站利润，与加氢站的共同投资方杭氧股份共享。

图表9 晋南钢铁厂氢燃料电池重卡车队运行范围和加氢站位置



而佛山市氢燃料电池车辆较多,且场景多样,为此全市已经构建了较为完整的加氢网,包括34座加氢站,全市理论每日最大加注能力达18吨。佛山单站投资成本相对较小,但折算到单位公斤氢气的加氢站投资成本与晋南钢铁基本相同。但是受制于供氢能力、氢气价格、车辆使用需求等因素,目前全市每天实际加氢总量为7吨左右,导致加氢站利用率较低,迫使加氢站提高氢气售价来保证收益。(图表10)研究团队对佛山市利益相关方调研的数据反馈显示,佛山市氢气加注成本中加氢站的部分约为12-14元/kg。最终佛山市的泵端加氢价从50元/kg到75元/kg之间不等。

图表10 加氢站利用率对加注成本的影响(元/kg H₂)^{vii}



3.3 氢燃料电池重卡碳排放水平

除了经济性之外,碳减排效果也是企业考虑使用氢燃料电池重卡的重要原因。由于氢燃料电池工作时不产生任何碳排放,因此氢燃料电池重卡的碳排放水平主要取决于氢气生产过程中产生的上游碳排放。在晋南钢铁和佛山两个案例中,氢燃料电池重卡所使用的氢气主要为副产氢和部分直接生产的灰氢,本研究针对案例中不同种类的氢源,使用不同核算方法进行了计算,以比较不同氢源的减排效果。

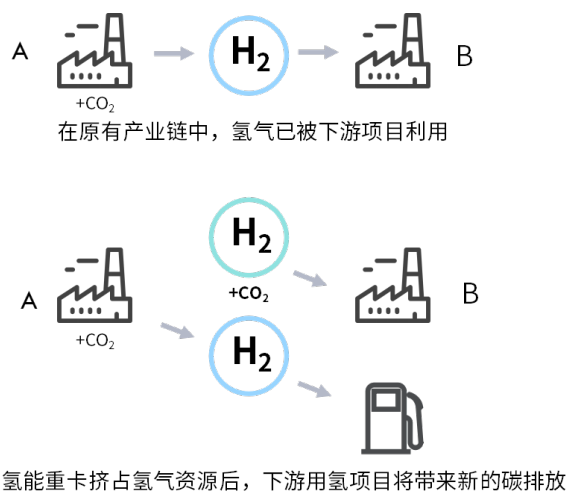
副产氢

由于副产氢是工业生产的副产物,其在总排放中所承担的比例并没有统一的核算标准。不仅如此,当副产氢供不应求时,新增氢燃料电池重卡的用氢需求会与传统工业产生竞争,有可能迫使产业增加制氢规模,带来额外的碳排放。因此,在计算氢燃料电池重卡碳排放时,必须站在整体系统的边界上来研究重卡用氢的实际碳排放,综合考虑用氢需求和上游供给方式来确定其排放水平。

分配法和系统扩展法是最常用于计算副产氢碳排放的方法。⁴⁰ 分配法以产品与副产品的物理参数为权重,将工业生产过程的总碳排放两者之间进行分配,例如热值分配法会按照产品与副产品的热值大小来分配碳排放。而系统扩展法则会拓展产品的核算边界,将产品的外部性重新纳入到系统边界之内予以计算。例如,生产焦炭时副产的氢气,能够帮助企业减少传统制氢流程中天然气的消耗。如果此时将氢气挪作他用,原本的用氢应用就需要重新使用天然气,站在整条产业链的角度来看,此时可以将新产生的天然气碳排放等量算作挪用这部分副产氢产生的碳排放。(图表11)

^{vii} 加氢站利用率指实际加氢量占加氢站最大加氢能力的比重。

图表11 从系统的边界上看, 氢燃料电池汽车应用可能带来额外碳排放



因此，氢燃料电池重卡的应用是否能起到减碳的效果，主要取决于当地副产氢的利用情况：若副产氢未能得到完全有效的利用，氢燃料电池重卡只使用盈余的副产氢，则应使用热值分配法进行计算；而如果副产氢已经在原系统中得到了充分的利用，新增氢燃料电池重卡应用将对场景中其他氢能应用产生影响，那么此时应使用系统边界扩展法进行计算。

在晋南钢铁的案例中，副产氢主要用于乙二醇生产和氢燃料电池重卡应用，由于乙二醇生产装置近期减产，副产氢使用量下降，增加氢燃料电池重卡的应用不会导致副产氢资源的挤占，因此研究团队选择热值分配法进行该部分副产氢碳排放的计算，得到车辆所使用的副产氢每公斤碳排放约为3kg，⁴¹车辆百公里碳排放约为30kg，低于柴油重卡110kg的百公里碳排放水平，能够实现有效减排。

而在佛山的案例中，氢气是重要的石油化工生产原料，因此副产氢的供给和需求处于平衡的状态，多余的副产氢资源十分有限。这种情况下，如果挪用一部分工业副产氢用于氢燃料电池重卡，原本的化工生产需要由新的氢源（现状条件下大多数为灰氢）进行补充，最终系统内灰氢碳排放将会增加。（图表12）具体来讲，额外增加的碳排放取决于不同替代氢源的排放水平，例如天然气制氢的碳排放水平约为每公斤氢气13.2kg，车辆百公里碳排放约为132kg，高于柴油重卡110kg的百公里碳排放水平，无法实现减排。

图表12 佛山市氢气主要来源及碳排放

氢源	制氢方式	成本 (元/kg H ₂)	碳排放 (kg CO ₂ /kg H ₂)
广州石化	丙烷脱氢副产	33	13.2 (天然气替代)
巨正源	丙烷脱氢副产	28	
华特气体	甲醇裂解	未知	21.6 ⁴²
广钢气体	甲醇裂解	35	
佛燃能源	天然气重整	未知	13.2

灰氢

相比于副产氢,灰氢的碳排放计算更为简单。目前主流的灰氢生产工艺包括煤气化制氢、天然气重整、甲醇裂解等等,许多专业机构已经对不同制氢手段的碳排放做过核算。在考虑原料全生命周期碳排放的情况下,大致碳排放如下表(图表13)所示:

图表13 不同制氢手段对应的碳排放⁴³

制氢手段	碳排放 (kg CO ₂ /kg H ₂)
煤气化	25
甲醇裂解	22
天然气重整	15

晋南钢铁的案例中暂时不存在使用灰氢作为氢燃料电池重卡能源的场景。而在佛山的案例中,为了弥补副产氢的不足,氢燃料电池重卡会使用一部分灰氢作为氢源(甲醇裂解法和天然气重整法)。计算显示,使用灰氢情况下氢燃料电池重卡的百公里排放约为150-220kg(取决于灰氢的生产路径),高于柴油重卡的百公里排放,并不能实现减排效果。

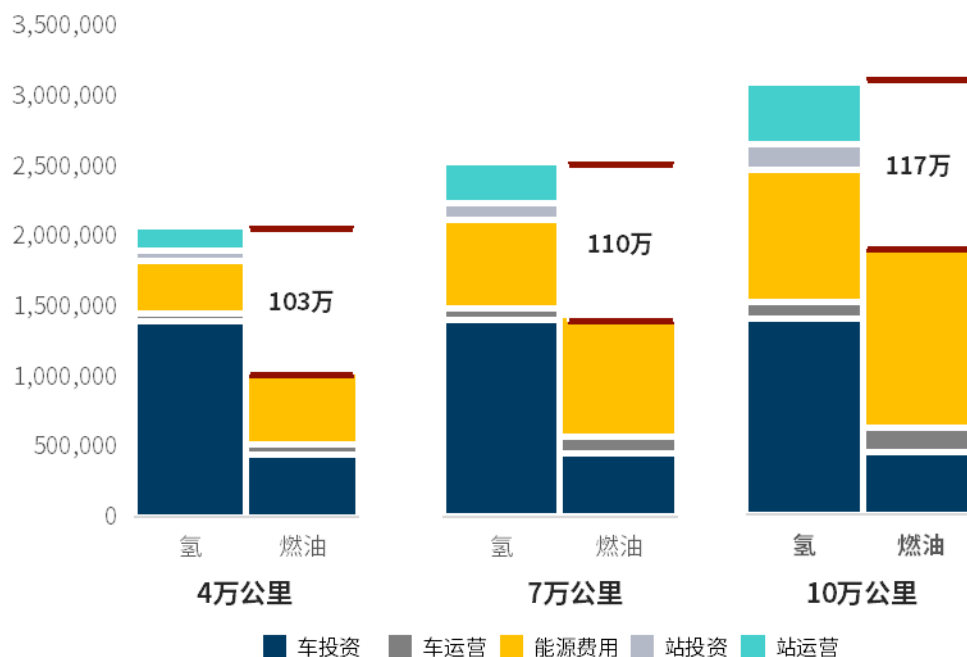
(四) 主要结论

4.1 当前氢燃料电池重卡在技术和性能上具备完成工业场景中短途运输的能力, 但成本经济性和碳减排能力仍存在较大提升空间

从晋南钢铁和佛山的案例分析中可以看出, 目前氢燃料电池重卡具备单次加氢行驶200-400公里的能力, 能够满足工业厂区内短倒运输和原材料、产品从工厂到集散地中短途运输的需求。但由于车辆购置成本仍然较高, 氢能供给的各环节综合成本难以快速降低, 且当前车辆使用的氢能多为副产氢和灰氢混用, 碳排放水平相比柴油优势并不明显, 氢燃料电池重卡距离大规模市场化推广应用还存在一定的差距。

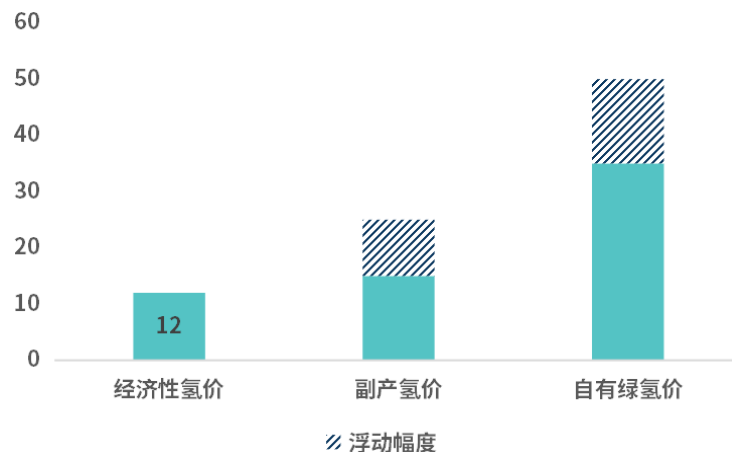
具体来看, 在无购置补贴和奖励的情况下, 当前氢燃料电池重卡的价格远高于柴油重卡, 在年行驶里程低于7万公里的情况下 (相当于日均里程200-300公里, 与当前氢燃料电池重卡日常使用场景类似), 氢燃料电池重卡仅购置成本一项就已经超过了柴油重卡的总拥有成本。(图表14)。

图表14 不同年行驶里程下的车辆TCO(元)



不仅如此, 在氢气价格仍然处于高位的情况下, 氢燃料电池重卡在运营成本方面同样不具备优势, 导致行驶里程越长, 成本的劣势越大。根据本研究计算, 只有当氢气泵端价格低于22元/kg时 (即到站价格低于12元/kg), 氢燃料电池重卡才能在运营成本上优于柴油重卡, 从而通过运营成本的优势弥补购置价格的劣势。然而目前无论是绿氢, 还是副产氢, 距离这一成本目标都仍有较大差距。(图表15)

图表15 氢气价格与运营环节平价氢价的差距(元/kg)^{viii}



最后,目前应用在氢燃料电池重卡中的氢气主要为副产氢,虽然在副产氢资源有所剩余的情况下使用氢燃料电池重卡能够起到一定的碳减排效果,但随着用氢场景的不断扩大,副产氢资源的供给将呈现日益紧缺的状况,届时使用副产氢产生的碳排放将高于柴油重卡。因此,氢燃料电池重卡要实现碳减排,需要持续加大力度完善绿氢产业的布局。

4.2 工业场景是当前实现氢燃料电池重卡推广应用最适宜的场景,也是向全运输场景扩展和规模化的重要基础

考虑到重型卡车主要作为生产资料被企业用于创造利润,在进行重卡车辆类型选择时企业通常会对车辆使用的成本经济性、稳定性及其他综合收益和成本等方面进行综合评估。随着我国碳排放管理体系的不断完善,工业企业及其上下游的排放约束日趋严格,使用氢燃料电池重卡等清洁能源重卡能够帮助企业实现减排目标。同时工业企业本身具备一定的副产氢资源,便于氢燃料电池重卡应用,且场内原材料和产品的运输距离通常较短,能够满足氢燃料电池重卡的技术特性。因此综合来看,工业场景是当前阶段氢燃料电池重卡推广应用最适宜的场景,也为未来大规模推广应用奠定了基础。

首先,从政策管理的角度,工业行业污染物和碳排放的标准正在逐步严格化,碳市场等相关机制也正在逐步向工业行业延伸。例如,2023年10月,生态环境部发布了《关于做好2023-2025年部分重点行业企业温室气体排放报告与核查工作的通知》⁴⁴将石化、钢铁等重点行业和企业纳入温室气体排放报告与核查工作范围。同年12月国务院发布的《关于全面推进美丽中国建设的意见》提出对钢铁等重点行业进行超低排放改造。⁴⁵在当前管理规定的要求下,企业大多需要满足一定的节能降碳要求以完成企业评级,从而确保自身的产能不受到过多限制。考虑到氢能本身具备潜在的零排放属性,氢燃料电池重卡是一种直接、有效地降低运输过程中空气污染物和二氧化碳排放的方式,因此对于工业企业来说,使用氢燃料电池重卡有助于企业合规,相应推广应用的意愿也更强。

其次,工业场景的氢源的成本和碳排放水平都相对更低。氢气是重要的工业原料、还原剂和燃料,在化工、钢铁等多个工业门类内有着广泛的应用。氢燃料电池重卡可以依托于原有的工业氢源获得稳定且较低成本的氢气供应。此外,氢气还是石油化工、煤化工、钢铁炼焦等工业中常见的副产品,与使用化石燃料生产的灰氢相比,副产氢的碳排放相对更低,能够帮助氢燃料电池重卡进一步降低碳排放。

^{viii} 计算假设厂内运输、仅使用一座加氢站的情况下。

最后,工业企业的运输场景运距短且固定,对氢燃料电池重卡应用较为友好。工业园区内部不同装置之间、不同工厂之间通常需要重卡进行物料运输,此类场景下重卡的活动范围有限、运输线路固定、距离较短,同时系统规范性强、可控性高。这使得工业场景对重卡续航能力的要求很低,规避了当前氢能重卡续航不足的缺点,同时集中化的管理也提高了加氢站等基础设施的利用率,降低了相关成本和氢燃料电池重卡的应用难度。

在具备更适合推广应用基础的情况下,氢燃料电池重卡在工业场景下应用的规模更容易进行扩大,且以副产氢为基础,结合工业场景自身的脱碳需求,更容易建立以副产氢和绿氢为基础的氢能产业链和基础设施体系,能够促进氢燃料电池重卡在购置和使用段持续降低成本和技术升级,为不断拓展续航能力,最终满足长距离干线运输条件奠定基础。

4.3 车价、氢价、氢气供给能力是决定氢燃料电池重卡未来推广进程的三大关键要素

从晋南钢铁和佛山的案例中可以看出,目前氢燃料电池车辆的价格、氢气的价格和氢气稳定供给的能力是确保氢燃料电池重卡相比柴油重卡具备足够竞争力的重要影响因素。

车辆价格

首先,车辆价格直接影响着市场接受度和购买意愿。在晋南钢铁的案例中,氢燃料电池重卡的购置成本占总拥有成本的67%,由于重型卡车本身属于重资产投资,车辆价格对于购车决策有着非常重要的影响。未来随着氢燃料电池系统技术不断创新和迭代,氢燃料电池重卡的价格也将稳步降低。车辆价格及与柴油重卡的价格对比将成为其销量增加速度的关键影响因素。

氢气价格

其次,氢气价格的高低与氢气供给的稳定性将直接影响到总拥有成本。在晋南钢铁案例中,得益于本厂自产副产氢的价格优势和供应稳定,燃料成本仅占车辆总拥有成本的18%左右。而对比之下,佛山受制于本地供需关系紧张的氢气市场,燃料成本占总拥有成本的34%。

在未来,随着氢能产业的发展,氢源将得到极大丰富,氢气供应也将趋于爆发性增长。预计随着供应量的增加,氢气价格有望进一步下降,为氢燃料电池重型卡车的商业化应用提供更为有利的条件。

氢气供给

氢气供给能力主要包括产量和运输便利性这两个部分。一方面,氢气产量的多少将直接影响其价格水平。目前氢燃料电池重卡的氢气来源主要以副产氢为主,随着钢铁和化工附加产品等行业用氢需求的不断增加,能够用于氢燃料电池重卡的副产氢总量会被不断压缩,导致氢气的成本增加、碳排放水平提高。未来在绿氢完成对化石能源制氢逐步替代的过程中,绿氢的产量同样会成为影响氢燃料电池重卡用氢成本的重要因素。

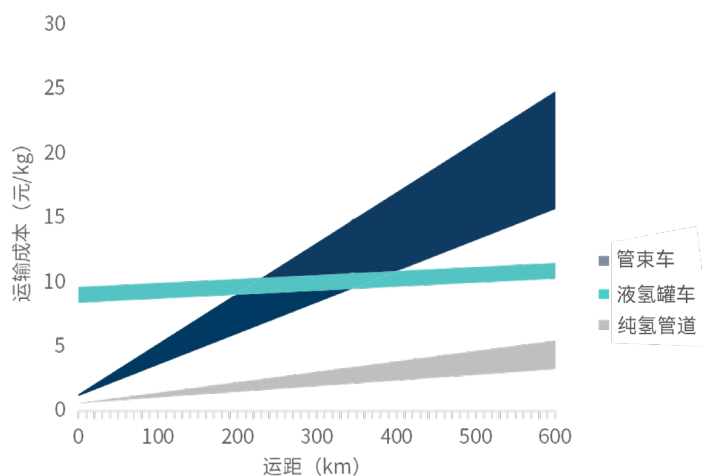
另一方面,运输的便利性也将影响加氢的成本和可获得性。在现有的条件下,氢燃料电池重卡应用必须紧邻制氢设施,距离一旦超过100公里,氢气的运输成本就将受到严重的影响。在佛山案例中,平均运距在100公里以内,氢

气的储运成本就已接近总燃料成本的18%。而且,随着氢燃料电池重卡进一步推广至干线运输等多样化交通场景中,因交通用能零散度本身较高,加氢站必然随之规模化铺设,运氢半径势必扩大。因此未来氢燃料电池车辆的推广需要建立完备的氢气供给和加注网络。

相比于目前的常压管束车,未来输氢技术有三个主要发展方向:高压管束车、管道和液罐车。高压管束车是最触手可及的技术路线。目前,我国常见的氢气管束车压力范围为15-35MPa,最常见的20MPa管束车的有效运氢空间仅有200多公斤,运输能力有限。而30-50MPa的车辆将能承受更高压力,运氢能力也更强,将对降低储运成本、稳定氢气供应起到重要作用。⁴⁶

除了管束车,液氢罐车和纯氢管道也将有助于实现氢气的长距离运输,适用于远离氢源的区域。然而,这两种技术的前期投资相对较高,更适用于大规模的氢气应用项目。液氢罐车的单次运载能力约为3-4吨氢气,而纯氢管道的单日输氢能力至少在10吨以上。⁴⁷这些技术的不断发展将有助于支持氢燃料电池重卡实现跨区域高效的氢气供应。(图表16)

图表16 2030年不同运氢方式成本预测

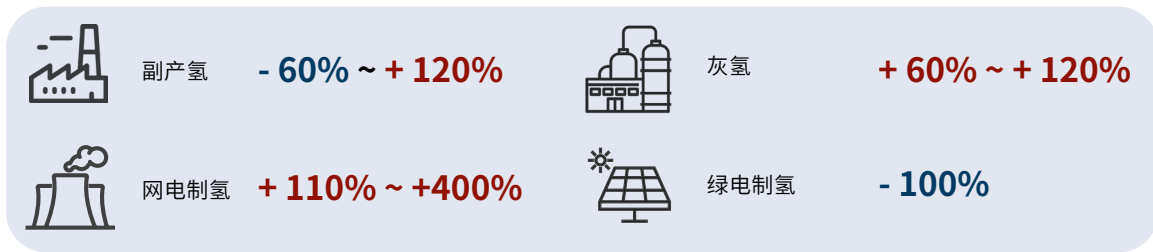


4.4 绿氢是氢燃料电池重卡具备零碳属性的必要条件

根据对不同能源种类碳排放强度的测算,柴油的全流程碳排放(Well to Wheel)大约为3.797kg CO₂/kg 柴油。考虑到柴油与氢气热值上的差异,氢气的碳排放必须低于约9kg CO₂/kg 氢气才有可能实现减排。⁴⁸

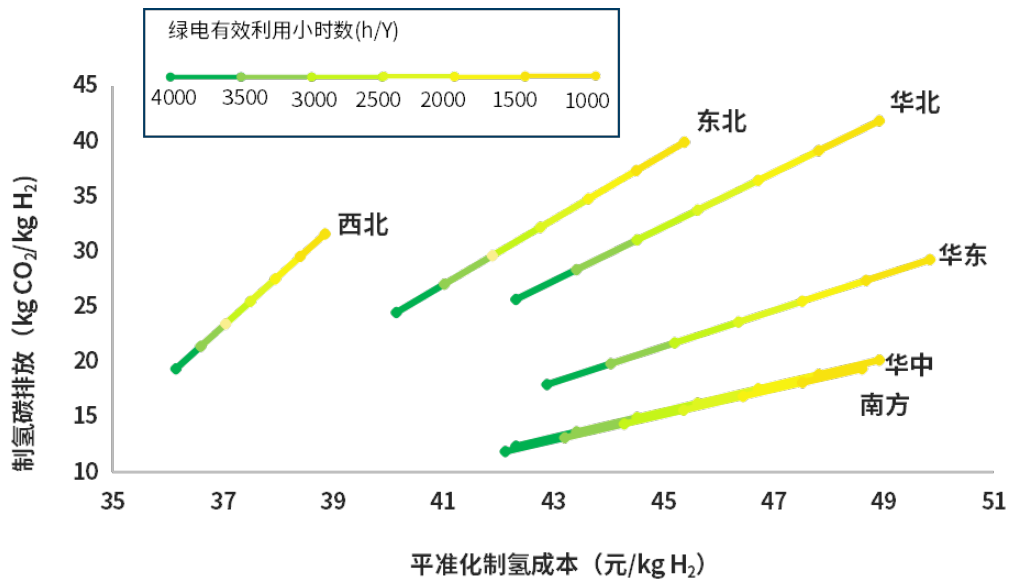
据此计算,相较于燃油重卡的排放,如果氢燃料电池重卡所使用的氢气是来源于煤炭或天然气的灰氢,将增加60%-120%的碳排放;如果重卡项目使用的是企业多余的副产氢,那么氢燃料电池重卡确实可以实现最多60%的碳减排。但如果氢燃料电池重卡应用挤占了其他用氢项目的资源、迫使企业增加了额外的氢气生产,那么使用副产氢的氢燃料电池重卡的实际碳排放水平反而会比使用柴油更高(图表17)。因此,灰氢和副产氢都不是降低重卡碳排放最稳妥的解决方案,使用可再生电力电解水生产的绿氢才是实现重卡零排放转型的最有效方式。

图表17 不同制氢方式的减排潜力



由于我国当前电力系统中化石能源发电比例仍然相对较高,使用网电电解水生产的氢气所产生的实际碳排放可能会高于灰氢。而在目前条件下,使用离网风光资源生产绿氢的成本较高。下图(图表18)展示了根据我国各地不同的电网排放因子与网电电力价格计算得出的“网电+绿电打捆制氢”模式的制氢成本与碳排放。可以看出,在绿电资源条件最好的西北地区,绿氢的生产成本仍然高于每公斤35元,而即便在排放因子较低、电力价格也较低的南方电网和西北电网,结合网电和可再生能源进行制氢的模式所得到的氢气的排放都远远高于同等行驶里程下柴油的碳排放。因此,使用绿氢替代柴油是实现氢燃料电池重卡完全零碳转型的最主要选择。

图表18 不同地区电网条件对制氢项目的成本与碳排放影响



(五) 未来氢燃料电池重卡发展路径及行动建议

综合上述分析,可以看出我国氢燃料电池重卡的推广应用仍然处在起步阶段,在车辆综合成本经济性、氢能的来源、运输、加氢方式以及所使用的氢能种类和减排潜力等方面仍然具备较大的优化空间。为了进一步提升氢燃料电池重卡的综合竞争力,并以工业场景为基础,逐步完成对不同物流运输场景柴油重卡的替代,本研究以晋南钢铁和佛山的案例分析报告为基础,以解决核心痛点为方向,提出如下5个方向的行动建议。

5.1 研究制定以工业场景为基础,逐步向中长途货运场景拓展的氢燃料电池重卡推广应用路线图

对于处在行业发展初期的技术和解决方案来说,清晰明确的目标和发展路线既是为行业指明方向的基础,也是提升企业加速发展信心的重要推动力。基于对氢燃料电池重卡技术特性、成本经济性和发展阶段的综合研判,研究团队建议国家和地方政策制定部门及行业协会协同研究并制定以工业场景为基础,规模化应用和成本降低为导向,全面覆盖以干线运输为主的中长途货运场景的氢燃料电池重卡推广应用路线图。其中,具体发展路线可以包含近期、中期、远期等3个主要阶段:

- **近期:以工业场景为主,扎实推进以副产氢为基础的中短距离运输模式。**依托工业行业碳减排相关政策目标和企业行动,在副产氢资源和其他条件相对较好的地区率先推进氢燃料电池重卡的应用,由工业园区和企业牵头,政府提供一定程度与减排效果挂钩的财税和基础设施支持,增加工业场景下中短距离氢燃料电池重卡购买和使用的比例。
- **中期:扩大氢燃料电池重卡的应用规模,促进成本的快速降低和续航能力的快速提升。**基于工业场景下氢燃料电池重卡应用的效果,针对核心痛点加大研发和政策、市场行动力度,在拓展续航能力的同时加速车辆购置成本和氢气生产、运输、加注成本的降低,在2030年之前实现部分场景下氢燃料电池重卡与柴油重卡成本经济性基本持平。
- **远期:全面推进氢燃料电池重卡在长距离干线运输场景中的应用,同时匹配绿氢供给和加氢站的基础设施。**在车辆储氢和续航能力不断提升的情况下,借助高速费减免和加氢优惠等政策,推动氢燃料电池重卡在长距离干线运输场景中的大规模推广应用,同时完善绿氢制、储、运、用综合体系的建立,在核心物流场站和高速公路重点点位配置加氢基础设施,在2050年左右实现氢燃料电池重卡和纯电动重卡齐头并进,共同完成重卡零碳转型的目标。

5.2 持续跟进相关配套激励机制,增强氢燃料电池重卡的综合竞争力

过去几年,燃料电池汽车城市群政策已经有效提升了部分地区氢燃料电池汽车的销量和保有量。由于氢燃料电池重卡仍存在成本经济性的劣势,在未来一段时间内持续提供车辆购置成本、使用成本和基础设施等方面的支持将有助于进一步加速其推广应用。

考虑到核心技术的规模化和国产化是影响我国氢燃料电池车产业链发展速度和质量的关键,而目前膜电极、燃料

电池系统和储氢瓶等氢燃料电池车辆技术仍有待突破，下一阶段的支持政策应当将侧重点放在关键技术的研发和突破上，以技术成熟度和效率水平为目标，设置不同程度的资金奖励机制。同时适当维持并扩大燃料电池汽车示范城市群覆盖的技术和产业领域，在为车辆提供购置奖励的基础上逐步调整为对车辆运营、加氢等方面的激励，并辅以路权、停车和高速通行费减免等方面的支持。

5.3 强化工业行业综合减排目标，提升企业用车动力

在晋南钢铁的案例中，企业以工业行业节能降碳和企业评级相关政策规定为基础，设立钢铁企业上下游“链主”制度，通过将碳减排激励与企业产能相关联，并同步带动上下游其他企业在不同环节协同参与减排行动，起到了促进运输环节减排，特别是使用氢燃料电池重卡替代柴油重卡的效果。氢燃料电池重卡不但可以直接帮助企业减少范围三的排放，而且氢燃料电池重卡的用氢需求可以辅助企业搭建用氢基础，促进企业在其范围一的生产环节中用氢减排。

由于工业企业具备良好的产氢和用氢基础，是氢燃料电池重卡在短期内推广应用的重要起点，在后续推进氢燃料电池重卡加速应用的过程中，可以考虑逐步完善钢铁和化工等工业行业碳减排相关目标和企业碳排放核算标准体系，并纳入碳市场，将运输环节的碳减排合理纳入企业碳排放考核体系，同时积极推进工业企业链主减排制度，以链主企业行动带动产业链各环节氢燃料电池重卡的应用。

5.4 稳步推进绿氢产业发展，逐步降低绿氢成本并提升供给水平

如前文所述，以可再生电力为来源的绿氢是氢燃料电池重卡助力重卡运输实现零排放转型的最终解决方案。氢气作为氢燃料电池重卡的能量来源，既是影响其运营成本高低的最主要因素，又是决定其减排效果的核心和关键。由于我国氢能产业目前仍然处在规模化发展的初级阶段，在推进技术研发和降低车辆成本的同时，充分布局氢能产业，加速绿氢成本的降低和供给能力的提升，是氢燃料电池重卡推广应用的有力支撑。

在国家 and 地方已经开始将氢能及相关产业的发展规划纳入各类政策规划，并着手提供不同程度政策激励的情况下，继续以国家和地方绿氢相关政策目标为基础，完善各类氢能碳排放核算标准体系的建立，并在有条件的地方建立绿氢标准和认证机制，同时配套绿氢补贴和税收减免等机制，加速氢能在钢铁和化工领域的试点示范项目推进工作，并强化氢能储运技术的发展，综合提升绿氢的成本经济性。

5.5 完善氢能“储-运-加”体系建设，依据车辆需求提前规划布局加氢基础设施

由于货物运输需求相对分散，且物流场站和加氢站所在地通常土地空间较为有限，在加氢站附近匹配稳定且相对便宜的制氢资源可能性相对较低，这意味着氢气的储运是满足氢燃料电池重卡氢能加注的必要条件。考虑到目前氢气的储运技术还不是非常成熟，运输方式基本以短距离长管拖车为主，综合优化氢气储运和加注体系的技术升级和系统布局是解决这一问题的有效策略。

因此，下一阶段行业企业和政策制定者应当首先明确未来氢能储运体系的格局和发展路径，并定位服务氢燃料电池汽车这类分布式加氢资源所需要的储运技术路线和规模，从国家和省级层面扩大氢气储运技术的研发力度和布局规模，同时以不同时间尺度下氢燃料电池重卡推广应用的规模、加氢需求点位、附近氢气的来源等信息为基础，确定加氢站建设的位置和体量，对土地和氢气运输和储存设施等进行提前规划。

参考文献

- 1 现代物流报,“重卡的绿色之路有多远”,2024
- 2 公安部,“全国机动车保有量达4.35亿辆”,2024
- 3 韩志玉,“预测能源转型下的中国汽车碳排放趋势”,2022
- 4 Mission Possible Partnership,“Making zero-emissions trucking possible - An industry-backed, 1.5°C-aligned transition strategy”,2022
- 5 波士顿咨询,“中国公路货运市场发展趋势”,2021
- 6 中国汽车工程学会等,“汽车产业绿色低碳发展路线图1.0”,2023
- 7 中国重汽,“产品综述-研究与发展”,2024
- 8 香橙会,“中国燃料电池汽车产业全景图”,2024
- 9 财政部,工信部等,“关于开展燃料电池汽车示范应用的通知”,2020
- 10 国家发改委,“氢能产业发展中长期规划(2021-2035年)”,2022
- 11 财政部、工信部等,“燃料电池汽车示范城市群申报指南”,2020
- 12 财政部、工信部等,“燃料电池汽车城市群示范目标和积分评价体系”,2020
- 13 央视新闻,“我国燃料电池汽车产业进入提速关键期”,2023
- 14 第一商用车网,“燃料电池重卡2023销量增长475”,2024
- 15 根据中汽协公开数据整理
- 16 中国汽车技术研究中心有限公司,“五大燃料电池汽车示范城市群发展成果一览”,2023
- 17 王建建、张奇等,“2023年氢燃料电池专用车发展现状与形势分析”,专用汽车,2023
- 18 北京晚报,“京津冀城市群这项示范,获中央财政3.5亿元奖励”,2024
- 19 新京报,“两会声音:建议将山西纳入燃料电池汽车示范应用城市群”,2024

- 20 中国日报, “川渝全国政协委员联名提案: 呼吁支持将成渝氢走廊区域纳入国家燃料电池汽车示范城市群”, 2024
- 21 中国汽车技术研究中心有限公司, “五大燃料电池汽车示范城市群发展成果一览”, 2023
- 22 王明华、王雯等, “中国氢燃料电池重型卡车的总拥有成本分析”, 汽车安全与节能学报, 2023
- 23 中氢互联, “2023上半年: 超9亿元氢车招标大单都花落谁家”, 2023
- 24 中国证券报, “天然气重卡市场持续爆发”, 2024
- 25 上海捷氢科技股份有限公司, “首次公开发行股票并在科创板上市申请文件的审核问询函的回复”, 2023
- 26 王建建、张奇等, “2023年氢燃料电池专用车发展现状与形势分析”, 专用汽车, 2023
- 27 香橙会, “燃料电池汽车产业化拐点已来”, 2024
- 28 刘畅、林汉辰等, “中国氢燃料电池汽车市场发展现状及展望”, 南方能源建设, 2024
- 29 山西晋南钢铁集团, “充分发挥氢能产业链‘链主’作用, 助力临汾创建‘绿色运输试点城市’”, 2023
- 30 山西晋南钢铁集团, “加快能源转型, 助力绿色运输”, 2023
- 31 广东省发改委, “广东省加快氢燃料电池汽车产业发展实施方案”, 2020
- 32 广东省发改委, “广东省加快建设燃料电池汽车示范城市群行动计划(2022-2025年)”, 2022
- 33 广东省住建厅等, “广东省燃料电池汽车加氢站建设管理暂行办法”, 2023
- 34 南海区政府, “佛山市南海区推进氢能产业发展三年行动计划(2022—2025年)”, 2022
- 35 佛山市政府, “佛山市能源发展‘十四五’规划”, 2022
- 36 第一商用车网, “燃料电池重卡2022年销量大涨215%! 宇通/飞驰争冠”, 2023
- 37 珠江时报, “含新量含智量跃升, 产业发展活力十足”, 2022
- 38 南方日报, “亿吨大港支撑佛山制造走向世界”, 2024
- 39 李敬法等, “氢能储运关键技术研究进展及发展趋势探讨”, 油气储运, 2023
- 40 Reinout Heijungs et al., “System Expansion and Substitution in LCA: A Lost Opportunity of ISO 14044 Amendment”, 2021
- 41 计算基于林婷等, 中国氢燃料电池车燃料生命周期的化石能源消耗和CO₂排放, 环境科学, 2018
- 42 ICCT, 从燃料氢全生命周期温室气体排放视角看中国燃料电池汽车示范城市群建设, 2022

- 43 计算基于林婷等, 中国氢燃料电池车燃料生命周期的化石能源消耗和CO₂排放, 环境科学, 2018
- 44 生态环境部, “关于做好2023-2025年部分重点行业企业温室气体排放报告与核查工作的通知”, 2023
- 45 国务院, “关于全面推进美丽中国建设的意见”, 2023
- 46 李敬法等, “氢能储运关键技术研究进展及发展趋势探讨”, 油气储运, 2023
- 47 李敬法等, “氢能储运关键技术研究进展及发展趋势探讨”, 油气储运, 2023
- 48 中国城市温室气体工作组, “中国产品全生命周期温室气体排放系数库”, 2024

李婷, 刘琦宇等, 以工业场景为基础的氢燃料电池重卡可行性及实践案例, 2024

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

©2024年10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。