



白皮书

2021年11月

中国重型货运卡车的拥有总成本对比分析：纯电动、燃料电池和柴油货运卡车

毛世越、Hussein Basma、Pierre-Louis Ragon、周圆融和、Felipe Rodríguez



www.theicct.org
communications@theicct.org
[twitter @theicct](https://twitter.com/theicct)

BEIJING | BERLIN | SAN FRANCISCO | SÃO PAULO | WASHINGTON

icct
国际清洁交通委员会

致谢

本文作者感谢所有内外审稿人提供的指导和建设性意见，特别感谢国际清洁交通委员会的何卉、Stephanie Searle、Eamonn Mulholland 和 崔洪阳，也感谢Gary Gardner为本文的校对及润色工作做出的贡献。本文也得到了多位外部专家的审阅及帮助，包括薛璐璐（世界资源研究所），贾莉洁（中汽数据），陈健华（中国能源基金会），以及秦兰芝（能源与交通创新中心）。他们的审阅并不意味着对本报告内容的任何背书，本文作者对本文内容负全部责任。

International Council on Clean Transportation
1500 K Street NW, Suite 650
Washington, DC 20005

communications@theicct.org | www.theicct.org | [@TheICCT](https://twitter.com/TheICCT)

© 2021 International Council on Clean Transportation

执行摘要

道路货运领域的减碳主要基于以下三个方面：零排放技术创新、配套基础设施建设以及通过强大的经济激励措施摆脱对柴油车的需求。本文通过研究零排放重型车(HD-NEV)的拥有总成本(TCO)将重点放在第三个方面。我们发现，与柴油货运卡车相比，在正确政策的指引下，零排放重型车可实现非常可观的拥有总成本效益。从政策层面确保零排放重型车的稳健供应对于实现这些经济效益而言是非常重要的。因此，我们建议即将修订的新能源汽车(NEV)销售目标将重型货车纳入监管范畴。

中国的新能源汽车销售目标是，到2025年将新能源汽车的销量份额提升至汽车总销量的20%左右。目前尚不清楚即将出台的政策针对哪些汽车类型。在中国，重型汽车(HDV)是一个重污染领域，其氮氧化物(NO_x)排放量占道路运输排放总量的74%以上，其颗粒物(PM)排放量占道路运输排放总量的52.4%。

在本研究中，我们对中国零排放货运卡车技术（纯电动货运卡车和燃料电池货运卡车）的拥有总成本进行了分析，具体分析对象包含三类重型汽车：半挂牵引车、自卸汽车和载货汽车。研究聚焦北京、上海和深圳三地，针对这三类重型汽车分析探究零排放货车与传统柴油车之间实现拥有总成本平价的时间点，从而为促进零排放重型车销量目标的制定提供分析基础。该分析基于全面的拥有总成本建模和能耗模拟。

我们通过分析发现，所有纯电动货运卡车均可在2025-2030年与柴油车实现拥有总成本平价。与柴油自卸汽车相比，纯电动自卸汽车最早到2025年可具备成本效益优势。纯电动半挂牵引车和载货汽车到2030年左右将实现与柴油车的拥有总成本平价。

燃料电池载货汽车和自卸汽车到2030年左右可实现与柴油车之间的拥有总成本平价。相对于纯电动货运卡车，此时间推迟是因为制造燃料电池堆需要更为平缓的技术迭代曲线和更高的能源成本。但是，柴油车与燃料电池货运卡车之间的拥有总成本差距会在2026-2030年间缩小。

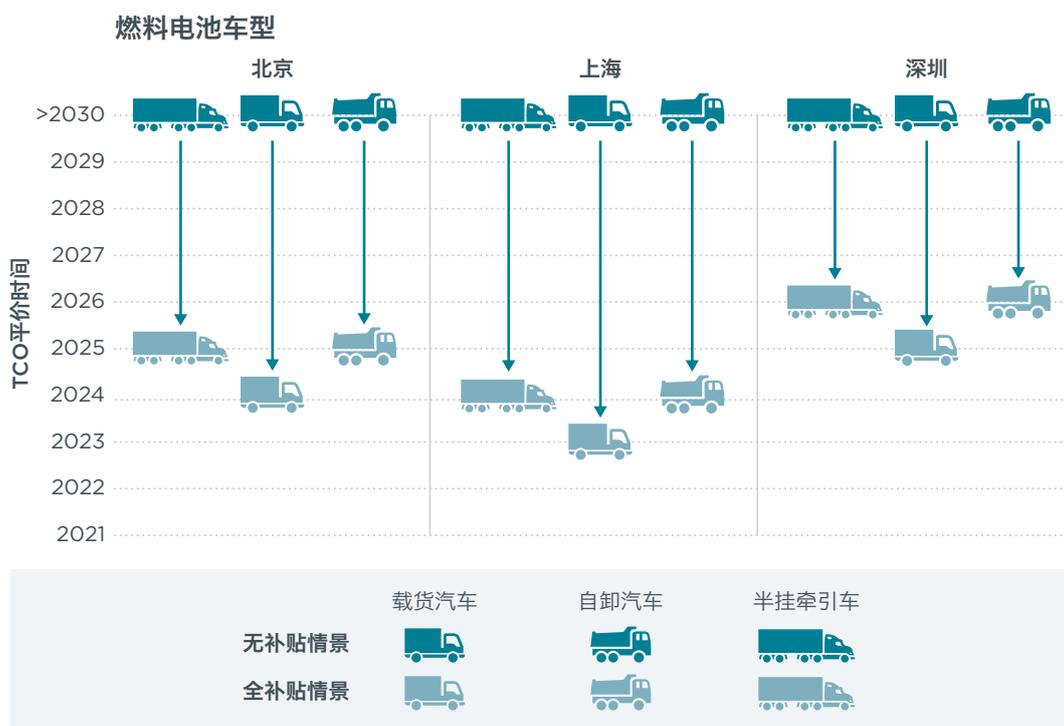
一些有针对性的政策措施可以将纯电动货运卡车和燃料电池货运卡车与柴油车实现拥有总成本平价的时间提前几年。如果在2021-2025年期间可以创造出大量的零排放重型车需求，则有可能更早实现拥有总成本平价。这反过来又会转化为市场动力，促进车辆生产企业增加可供选择的车型和产量供应。由于经验与效率之间的转化关系（学习曲线）和规模经济效应，随着产量增加，新能源汽车的生产制造成本将会有所下降。因此，利用需求端的政策推动来降低零排放重型车的拥有总成本最终可对供应端产生长期的积极影响，从而促进制定较为激进的零排放重型车销量目标。我们评估了以下需求端政策：

- » 减免零排放重型车的道路通行费；
- » 改革零排放重型车直接用电的基本电价；
- » 绿氢生产补贴；
- » 零排放重型车的购置补贴；
- » 引入针对化石燃料的碳税。

图ES 1和图ES 2汇总了本研究中分析的中国三个城市不同类型货运卡车的拥有总成本平价年份。深绿色卡车图标表示无政策干预场景，而浅绿色卡车图标则表示实施了上述一揽子政策干预措施的场景。如图ES 2所示，这些政策措施的实施产生了实质性的综合影响。在大多数情况下，当采用上述所有干预措施时，零排放重型车可在2021-2025年实现拥有总成本平价，其中纯电动货运卡车在2021年便可实现拥有总成本平价。



图ES 1. 实施与不实施政策激励的情况下纯电动货运卡车实现拥有总成本平价年份的汇总



图ES 2. 实施与不实施政策激励的情况下燃料电池货运卡车实现拥有总成本平价年份的汇总

根据我们的研究成果, 我们建议制定以下政策促进中国零排放重型车的推广:

针对零排放重型车提出较为激进的短期销量要求。货运卡车运营商只有在零排放重型车供应非常充沛的情况下才能获得经济收益。加州在设定销售目标方面提供了一个很好的实践范例, 加州要求到2025年重型载货汽车新车中零排放车辆的占比要达到11%, 到2030年要达到50%。对于半挂牵引车, 要求到2025年零排放车辆销量占比达到5%, 到2030年达到30%。中国要想实现2060年碳中和的宏伟愿景就需要中央政府制定至少与加州激进程度相仿的目标。

设定零排放车辆的长期销量目标, 为生产企业提供明确的发展蓝图, 促进其进行产品设计和投资。政府部门可以采用短期约束性销售要求和长期非约束性目标相结合的方式, 前者主要为了确保快速启动供应链需求; 后者则为投资的长期性提供了保障。二者的结合对于创建一个巨大而持久的市场是至关重要的, 规模经济将降低制造成本, 从而降低零排放重型车的拥有总成本。

2021-2025年期间为实现零排放重型车与柴油车之间的拥有总成本平价提供激励政策。充分的政策激励措施能够在未来五年内缩小重型柴油车与零排放重型车之间的拥有总成本差距。从财政角度来讲, 补贴是不可能长期持续存在的, 应当限定补贴的范围和周期, 以激励早期阶段的市场需求。在制定激励政策时应遵循污染者付费的原则, 所产生的收入可以为长期激励计划提供资金支持。

制定出台有针对性但技术中立的政策措施。激励政策应针对二氧化碳排放量最高的车型推广零排放车辆, 如半挂牵引车。但与此同时, 政策的出台也应致力于为纯电动货运卡车和燃料电池货运卡车创造一个公平的竞争环境, 从而确定出最具成本效益的技术路径并提供长期支持。我们的分析表明, 在不考虑激励政策的情况下, 纯电动货运卡车更具成本优势。

目录

执行摘要	i
简介及研究范围	1
中国重型货车市场概览	1
本研究的适用范围	2
政策背景	3
国内背景	3
国际背景	5
文献综述	6
中国零排放重型车的拥有总成本研究概述	6
研究方法与数据来源	8
车辆能耗模型	8
柴油货运卡车模型的验证	8
实际油耗建模	9
固定成本	15
运营成本	21
研究结果	28
重要发现	28
政策措施分析	31
敏感性分析	37
研究结论与政策建议	41
参考文献	44
附录A: 零排放货车零售价格验证	45

图目录

图ES 1.实施与不实施政策激励的情况下纯电动货运卡车实现拥有总成本平价年份的汇总	ii
图ES 2.实施与不实施政策激励的情况下燃料电池货运卡车实现拥有总成本平价年份的汇总	ii
图1. 2005-2019年中国商用车销量(OICA, 2020)	1
图2. 2011-2019年零排放重型车和燃料电池货运卡车销量(Monika, 2020)	2
图3. 自2009年以来针对零排放重型车实施的财政激励措施一览	3
图4.采用基准柴油货车模型获得的模拟油耗值。对于半挂牵引车和载货汽车,棕色和蓝色柱子表示第二阶段车辆	10
图5. 2020年(左图)和2030年(右图),在载质量保持不变的情况下,纯电动货车所需的电动续航里程对三类货运卡车所需电池容量的影响。虚线表示电池容量与续航里程成比例增长的情况。	13
图6. 2020年和2030年各类车型与技术路线组合的最终能耗值	15
图7.纯电动货车和燃料电池货车的成本(不包括动力装置)	17
图8.重型车电池组成本分析的三种场景	17
图9. 2020-2030年间纯电动、燃料电池和柴油技术的货车总成本估算值	18
图10. 各类车型的折旧曲线	19
图11.电池组和燃料电池组残值变化曲线	20
图12.根据存活率估算值调整三类货车的年行驶里程	22
图13. 2020年各地区各类货车的平均加权总电价(DT: 自卸汽车; ST: 载货汽车; TT: 半挂牵引车)	25
图14.纯电动和燃料电池货车相对于柴油车型的拥有总成本差距变化	29
图15. 各类货车车型和技术相对于柴油技术的拥有总成本细目(以北京为例)	31
图16. 当实施所有激励措施后,各类纯电动货车车型的拥有总成本平价年份及变动情况(数据标签表示与柴油货车的拥有总成本差距,负值表示电动车型更便宜)	36
图17.在实施所有激励措施的情况下,各类燃料电池货车车型的拥有总成本平价年份及变动情况(数据标签表示与柴油货车的拥有总成本差距,正值表示燃料电池车型更昂贵)	36
图18.年行驶里程和日续航里程的敏感性分析:以北京纯电动半挂牵引车为例	38
图19.年行驶里程和日续航里程的敏感性分析:以深圳纯电动自卸汽车为例	38
图20.年行驶里程和日续航里程的敏感性分析:以北京燃料电池半挂牵引车为例	39
图21.可再生能源电力和绿氢对拥有总成本的影响	40
图22. 2020车型年零排放货车价格验证	45

表目录

表1.中国零排放重型车激励措施及政策汇总.....	3
表2.中国零排放重型车的拥有总成本估算值.....	6
表3. 三类货运卡车（半挂牵引车、自卸汽车和载货汽车）的三款柴油车模型的主要技术参数.....	9
表4. 2030年柴油货车技术潜力（以及相对于2020年的改进）.....	11
表5.关于零排放货车的主要假设和技术参数，其中包括相对于基准柴油货车的重量调整.....	12
表6. 2030年零排放货车技术潜力（以及相对于2020年的改进）.....	14
表7.三类货车的2021年实际柴油车价格和2030年估算柴油卡车价格.....	15
表8. 电动传动系统零部件的直接制造成本.....	16
表9. “高技术复杂性水平”技术的间接成本乘数.....	16
表10.贷款购车信息假设.....	18
表11. 各类车型税费假设.....	20
表12. 相关研究贴现率假设.....	20
表13.中国重型车年行驶里程估算值文献汇总.....	20
表14.中国货车存活率文献综述.....	21
表15. 不同动力技术的货车维护成本假设.....	22
表16. 石油价格细目表(Hyqfocus.com, 2019).....	22
表17. 2020年分区域可再生能源电价.....	23
表18. 2020年北京、上海和深圳的商业用电价格.....	23
表19. 用于估算管理费用的输入项和假设值.....	23
表20. 2020年和2030年北京、上海和深圳三地加氢站数量及年氢气需求量的假设.....	25
表21. 2020年和2030年三个城市蓝氢加氢站的成本建模.....	26
表22. 2020年和2030年三个城市绿氢加氢站的成本建模.....	26
表23.三类货车的拥有总成本平价年份.....	29
表24. 在提供购置补贴情景下，三类货车车型的拥有总成本平价年份.....	30
表25:中国现行高速公路通行费用假设.....	31
表26:道路通行费减免情况下，三类货车车型的拥有总成本平价年份.....	31
表27:采取能源激励措施情况下，三类车型的拥有总成本平价年份.....	32
表28.在征收温室气体排放费用的情况下，三类车型的拥有总成本平价年份.....	32
表29:中国碳排放交易机制内的预期碳价（中国碳论坛，2019）.....	33
表30. 采用碳税政策后，三类货车车型的拥有总成本平价年份.....	33
表31.年行驶里程和日续航里程的敏感性分析假设.....	35
表32.用于验证零排放货车零售价的车型.....	43

简介及研究范围

中国重型货车市场概览

近年来,中国商用车市场一直在蓬勃发展,商用车总销量从2005年的180万辆增加到2019年的430万辆(OICA, 2020),如图1所示。在中国,重型汽车(HDV)是专为重型负荷和运输而设计制造且总车重(GVW)超过3.5吨的商用车辆。重型汽车通常包括以下几类,如载货汽车、自卸汽车、半挂牵引车以及客车或公共汽车。自2010年以来,中国的重型汽车市场已成为全球最大的重型汽车市场(Muncrief & Sharpe, 2015),每年生产超过100万辆汽车(J. Li, 2016)。然而,重型汽车也给中国带来严重的环境负担,亟待解决。就CO₂、NO_x、PM_{2.5}和其他污染物而言,重型汽车在污染物排放总量中占很大比例。在中国,虽然重型汽车仅占道路运输总销量和保有量的7.8%(新华社, 2018),但其NO_x排放量占道路运输排放总量的74%,其PM排放量占道路运输排放总量的52.4%(生态环境部, 2020)。此外,根据清华大学的一项研究,2015年重型汽车的温室气体排放量占中国总排放量的6.1%(Song et al., 2017)。

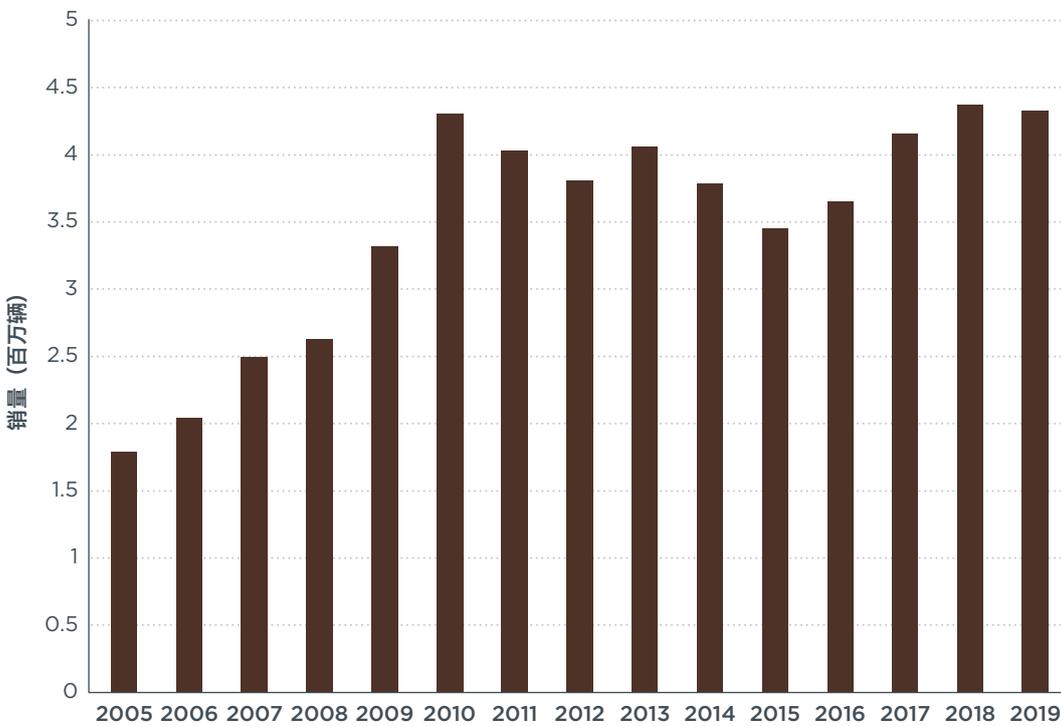


图1. 2005-2019年中国商用车销量(OICA, 2020)

中国正在推广包括货运卡车和客车在内的零排放商用车,以减少重型汽车的道路交通污染物排放。中国中央政府和地方政府通过推行补贴和激励政策措施,鼓励制造商和运营商积极采用零排放重型车技术(纯电动和燃料电池重型车)。近十年来,中国的零排放重型车市场呈指数级增长。零排放重型车(HD-NEV)的总销量曾于2016年达峰,其销量一度超过20万辆,此前零排放重型车的产能已连续多年增长。然而,由于早年相关补贴政策和监督的不规范,个别车企出现恶意骗取补贴的情况,在2016年有5家相关车企受到严厉处罚(人民网, 2016)。随后几年针对零排放重型车生产的补贴减少,对零排放重型车获得补贴的技术要求也更加严格。由于以上种种原因,零排放重型车在中国的销量大幅下降,如图2所示。

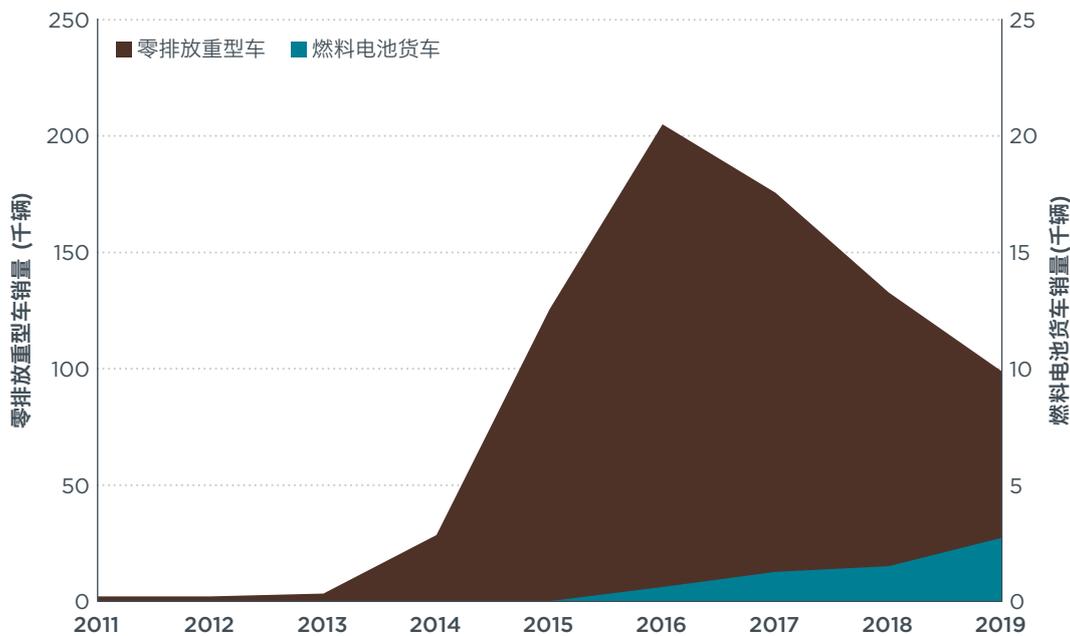


图2. 2011-2019年零排放重型车和燃料电池货运卡车销量(Monika, 2020)

本研究的适用范围

本研究评估了中国零排放重型车（即纯电动和燃料电池货运卡车）的拥有总成本情况，其中重点研究以下三类货运卡车：

1. 载货汽车
2. 自卸汽车
3. 半挂牵引车

之所以选择这三类车型是因为它们是目前中国市场上主流的商用车辆，其中自卸汽车和载货汽车大多用于建筑工地、矿山等短途运输，而半挂牵引车大多用于中长途运输。此外，评估半挂牵引车的减排潜力是至关重要的，因为在中国各类车型中，半挂牵引车的温室气体排放量最大(Delgado & Rodríguez, 2018)。

这三类新能源货车的经济性能将与其同款柴油车进行比较，以便从首位用户的视角（本研究假设为首次购车后5年内）确定各类货车的新能源车型何时可以实现成本平价。本研究聚焦的地区分别为北京、上海和深圳，以反应不同纬度和地理特征的车型总成本表现。

政策背景

国内背景

过去十年间,中国已成为全球最大的电动汽车市场,这得益于国家和各地方政府积极推行针对性政策,通过试点计划、激励措施、销售目标等具体举措来推动销售。中国的试点计划与中央补贴和激励政策相结合,将电动汽车市场成功推向了一个能够支持进一步可持续发展的成熟节点。2018年之后,中国开始从行业补贴转向实施激励措施与销售目标法规相结合的手段,以确保创新和投资的持续推进以及可供选择车型的持续增加。

新能源汽车(NEV)强制性政策要求增加电动汽车的产量和销量,这一直是电动车型推出和轻型汽车销量增加的最重要驱动因素。得益于过去几年的试点和补贴计划,目前电动重型车市场正在步入稳定增长阶段,中国也正在评估针对货运卡车和客车出台同等政策的可行性(Caixin, 2021)。中国汽车工程学会发布的《节能与新能源汽车技术路线图2.0》中提出,到2025年新能源(零排放)重型车的年销量占比达到12%,到2030年达到17%,到2035年达到20%(中国汽车工程学会, 2021)。此外,中国政府还通过出台购置激励政策加速向零排放重型车(纯电动和氢燃料电池汽车)过渡。为此,中央政府自2009年以来实施了一系列财政激励措施,如表1和图3所示。

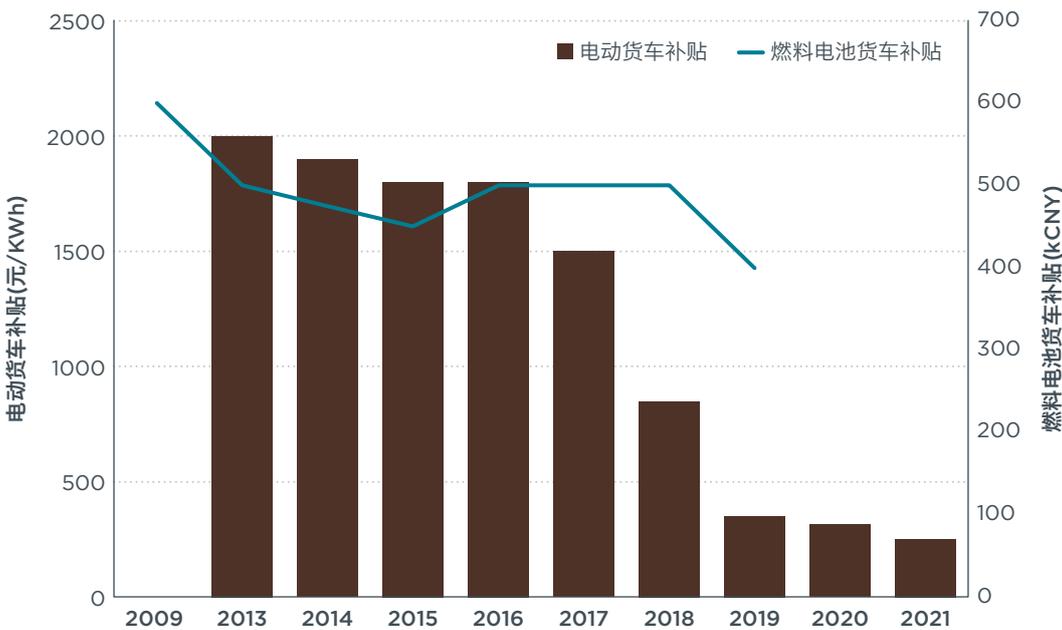


图3. 自2009年以来针对零排放重型车实施的财政补贴措施一览

表1.中国零排放重型车激励措施及政策汇总

年份	类型	能量要求	补贴方案	其他要求
2009	BET	无限制	—	—
	FCET	无限制	60万元	—
2013	BET	无限制	2000元/kWh	补贴上限为15万元
	FCET	无限制	50万元	—
2014	BET	无限制	1900元/kWh	补贴上限为14.25万元
	FCET	无限制	47.5万元	—
2015	BET	无限制	1800元/kWh	补贴上限为13.5万元
	FCET	无限制	45万元	—
2016	BET	无限制	1800元/kWh	续航里程 ≥ 80km
	FCET	无限制	50万元	续航里程 ≥ 200km, 补贴上限为13万元
2017	BET	≤ 30 kWh	1500元/kWh	1. 系统能量密度 ≥ 90 Wh/kg 2. $E_{kg} \leq 0.5 \text{ Wh/km} \cdot \text{kg}$ 3. 补贴上限为15万元
		30-50 kWh	1200元/kWh	
		> 50 kWh	1000元/kWh	
	FCET	无限制	50万元	续航里程 ≥ 300 km
2018	BET	≤ 30 kWh	850元/kWh	1. 系统能量密度 ≥ 115 Wh/kg 2. $E_{kg} \leq 0.4 \text{ Wh/km} \cdot \text{kg}$ 3. 补贴上限为10万元
		30-50 kWh	750元/kWh	
		> 50 kWh	650元/kWh	
	FCET	无限制	50万元	1. 额定功率 > 30 kw 2. 续航里程 ≥ 300 km
2019	BET	无限制	350元/kWh	1. 系统能量密度 ≥ 125 Wh/kg 2. 续航里程 ≥ 80 km 3. $E_{kg} \leq 0.35 \text{ Wh/km} \cdot \text{kg}$ 4. 补贴上限为5.5万元
	FCET	无限制	40万元	
2020	BET	无限制	315元/kWh	1. 系统能量密度 ≥ 125 Wh/kg 2. 续航里程 ≥ 80 km 3. $E_{kg} \leq 0.29 \text{ Wh/km} \cdot \text{kg}$ 4. 补贴上限为5万元
	FCET	直到燃料电池汽车试点城市计划更新后才公布		
2021	BET	无限制	252元/kWh	补贴上限为4万元 (私人领域)
			315元/kWh	补贴上限为4.95万元 (公共领域)
	FCET	直到燃料电池汽车试点城市计划更新后才公布		

a) E_{kg} 是单位载质量能量消耗量, $E_{kg} = E/M$, 其中E表示能量消耗率, 单位为Wh/km; M表示附加质量。如果载质量 ≤ 180kg, M=载质量; 如果载质量在180kg与360kg之间, M=180 kg; 如果载质量 ≥ 360kg, M=0.5×载质量。

总体而言, 燃料电池货运卡车(FCET)和纯电动货运卡车(BET)的财政补贴正在稳步下降; 燃料电池货车的财政补贴从2016年的50万元人民币降至2019年的40万元人民币, 纯电动货车的财政补贴从2016年的1800元/kWh降至2021年的252元/kWh (估算值)。需要特别指出的是, 中国在2020年暂停了对燃料电池货车的财政补贴, 但是正在制定一项全新的燃料电池货车激励措施, 预计将在2021年与中国燃料电池汽车示范城市群一起公布 (截止本报告付梓时, 北京市、上海市与广东省被确定为中国燃料电池汽车首批示范城市群(OFweek.com, 2021), 但相应补贴政策尚未公布)。中国不再直接向符合条件的制造商和用户提供财政补贴, 而是试图以更可持续的方式推广燃料电池货车, 其中包括对氢基础设施的直接和间接投资, 以及各地区不同行业 and 公司的协调参与。

国际背景

加州是唯一一个通过立法形式要求销售零排放重型车的地区。加州在2020年通过的《先进清洁卡车(ACT)法规》(加州空气资源委员会, 2020)是全球第一项要求制造商增加零排放货车销量占比的法规。该法规要求,从2024车型年(MY)开始,三类重型汽车须根据其权重占比满足规定的零排放货车销量要求。到2025年,重量超过6.3吨的载货汽车新车中零排放车辆的占比须达到11%,到2030年要达到50%,到2035年要达到75%。到2025年,半挂牵引车新车中零排放车辆的占比要达到7%,到2030年要达到30%,到2035年要达到40%。

一些地区也制定了非约束性目标,设定了长期愿景,以便制造商对政策与经济的发展方向有一个明确的预期。与加州ACT法规的约束性目标相比,非约束性目标在本质上是具有政治倾向性的,并且会影响法规的制定与实施。加州制定了一个非约束性目标,要求到2045年道路上行驶的所有重型车(包括销售的新车和全部存量车)均实现零排放(加利福尼亚州, 2020)。尽管现任美国政府尚未针对零排放重型车制定一个联邦目标,但到目前为止,已有15个州联合签署了一份谅解备忘录(MOU),他们计划到2030年将零排放重型车的普及率提高到30%,到2050年达到100%(NESCAUM, 2020)。在国际上,荷兰正带头签署一份全球谅解备忘录,以加速零排放重型车的市场推广;该备忘录设定的目标是,到2030年零排放车辆占比达到30%,到2040-2050年达到100%;同时鼓励各国积极推进这一目标。奥地利、加拿大、智利、德国、希腊、荷兰、挪威和瑞典已经签署了这份全球谅解备忘录(TDA, 2021)。

各个国家和地区出台的促进零排放重型车推广的财政与非财政政策的范围和结构各不相同。本文中未作详细说明;ICCT近期发布的另一份报告中概述了各个国家和地区采取的政策措施以及对中国的建议(Xie & Rodríguez, 2021)。

文献综述

拥有总成本（通常简称为TCO）是一项衡量产品生命周期内各个阶段累计成本的分析。众所周知(Qian, 2019; Yang et al., 2018), 零排放货车的拥有总成本应包括几个关键要素, 例如购置成本(C_p)、使用成本(C_u)、维护成本(C_m)和剩余价值(或残值) (C_s)。一些货运卡车研究也采用机会成本(C_o)和报废回收成本(C_r)等额外成本要素, 如表2所示。因此, 拥有总成本的计算公式一般可表示为:

$$C_{\text{总}} = C_p + C_u + C_m + C_o + C_r - C_s$$

中国零排放重型车的拥有总成本研究概述

一般来说, 由于中国市场上可供选择的零排放重型车车型不多, 因此关于热门货车车型的研究很少。需要引起注意的是, 由于不同研究的假设与案例研究之间存在很大差异, 现有的关于零排放重型车的研究可能无法直接进行横向对比。

Qian (2019)表示, 2019年零排放轻型物流车的拥有总成本为7.06万元人民币, 低于传统柴油车的拥有总成本(7.77万元人民币)。Zhang等人在2018年分析了几款燃料电池汽车(FCV), 他们发现燃料电池物流车的拥有总成本比同款柴油车便宜, 因为中国对物流行业的零排放转型给予了6000元/千瓦的高额补贴(Zhang & Peng, 2018)。

2020年进行的一项研究表明, 用于街道日常清扫和环卫项目的电动环卫车在经济性能方面优于同款燃油车。电动环卫车的售价比燃油车贵82万元人民币, 但在八年运营期内比传统燃油车节省了93万元人民币。因此, 即使逐步取消补贴, 电动环卫车仍比柴油车便宜6万元人民币(Wang et al., 2020)。

Yang等人还对采用电池换电技术的电动货车进行了分析, 并且对柴油货车、插电式电动货车和换电电动货车的总成本分别进行比较。通过比较发现, 相对于同尺寸的柴油货车, 轻型插电式电动货车极具竞争力, 但轻型换电电动货车并无竞争优势。根据这项研究(Yang et al., 2018), 中型货车也面临着类似的情况。

中国电动汽车百人会(EV100)是一家专门研究与分析新能源汽车政策的著名智库, 其估算了采用燃料电池技术的典型城市客车(10.5米)、物流车(9吨)和重型货车(42吨)的拥有总成本。他们通过模拟发现, 假设2020年的氢成本为60元/千克, 客车、物流车和重型货车的成本保守估计分别约为448.1万元、200万元和535万元。预计到2025年和2030年, 各车型的总成本将进一步下降(图1)。

中国汽车技术研究中心(CATARC)认为目前阶段燃料电池货车的拥有总成本仍将高于电动汽车。但据估计, 燃料电池技术的关键零部件价格将比电动车型零部件下降得更快。例如, 到2030年和2050年, 燃料电池堆的成本分别约为316元/kWh和148元/kWh, 比电池动力系统分别便宜50%和62%(中国汽车技术研究中心, 2021)。

表2.中国零排放重型车的拥有总成本估算值

车型	技术	年份	柴油车与零排放车型总拥有成本差值 (若有)	数据来源
轻型物流车	纯电动	2019	7100元	(Qian, 2019)
中型物流车	燃料电池	2020	—	(EV100, 2020)
重型物流车	燃料电池	2018	800元	(Zhang & Peng, 2018)
环卫车	纯电动	2020	60028元	(Wang et al., 2020)
轻型货运卡车	插电式	2018	149352元	(Yang et al., 2018)
轻型货运卡车	纯电动	2018	-79389元	
中型货运卡车	插电式	2018	37334元	
中型货运卡车	纯电动	2018	-106040元	
重型货运卡车	燃料电池	2020	—	(EV100, 2020)
客车	燃料电池	2020	—	
货运卡车	燃料电池	2021	—	(中国汽车技术研究中心, 2021)
货运卡车	纯电动	2021	—	
客车	燃料电池	2021	—	
客车	纯电动	2021	—	

研究方法数据来源

车辆能耗模型

由于能源成本在货运卡车的拥有总成本中所占的比例很大，因此准确地确定各种动力传动系统的能耗非常重要，无论是柴油货车的油耗、纯电动货车的电能消耗还是燃料电池货车的氢耗。为了公平地比较各类货运卡车（半挂牵引车、自卸汽车和载货汽车）的不同动力传动系统技术，并实现未来的技术潜力，我们采用车辆仿真软件为各种情况开发了模型。由此获得的九种车辆模型涵盖了各动力传动系统类型和各类货运卡车的完整组合。采用车辆模拟方式而非从市场获取的认证能耗值有两大好处。首先，目前市场上的几款零排放货车车型的技术参数与柴油车型存在很大不同，这意味着能耗差异可能由于车辆特性不同，可能无法充分体现各种技术的潜力。通过搭建一个与其认证油耗相匹配的且易于扩展的柴油货车模型，以保持主要车辆技术参数不变，该模型可以通过仅更改动力传动系统来适应其零排放同款车型。

采用基于模型模拟方式的第二个原因是，通过中国现行认证程序所获得的柴油货车认证能耗值与实际能耗值之间确实存在差距；有证据表明，零排放货车也可能会出现类似的问题。需要特别指出的是，在型式核准时针对各类货运卡车采用的中国-全球统一瞬态试验循环(C-WTVC)所确定的油耗值并不能准确体现实际运行油耗(Hanzhengnan et al., 2019)。在最大载质量条件下对货运卡车进行认证也导致了这一油耗差距(Mao et al., 2021)。相反，我们在更能代表其实际运行工况的条件下模拟车辆性能，可以提高能源成本估算的准确性。此外，通过模型模拟还可以估算各类车型和动力传动系统技术在一系列特性上的未来性能表现，其中包括降低道路载荷、提高内燃机效率、增加电池能量密度、提高燃料电池效率和功率密度。

柴油货运卡车模型的验证

为了验证模拟软件的有效性，我们首先根据各类货车畅销车型的车辆和发动机技术参数搭建了三款柴油货车的模型：一汽的6x2半挂牵引车¹，重汽的8x4自卸汽车²和江淮的4x2载货汽车³。这些货运卡车的技术参数如**表3**所示。除非另有说明，这些技术参数均从参考货车获得。

我们采用认证程序中使用的参数来模拟油耗量并将模拟结果与工信部在型式核准清单中公布的报告认证值进行比较，对柴油货车模型的有效性进行了验证。这里使用的是C-WTVC试验循环，因为中国各类货运卡车均采用此试验循环进行认证。CATARC近期开发了一系列全新的行驶试验循环，其中中国重型商用车试验循环(CHTC)更能代表各类货车的实际运行工况。我们在基于实际工况参数（稍后讨论）确定货运卡车的能耗时采用了CHTC试验循环。出于验证目的，在运行货车模型时采用了**表3**中规定的最大载质量。

关于道路载荷参数（空气阻力系数和滚动阻力系数），在货运卡车型式认证时制造商可自行选择进行测量或使用标准值，一般而言后者是一种性价比更高的选择。如之前的一项ICCT研究(Mao et al., 2021)中所述，车辆制造商为符合日益严格的

1 “解放牌 (FAW Jiefang) CA4250P66K24T1A1E5型平头柴油半挂牵引汽车，第274批”，Auto-Che，访问时间：2021年9月30日，详见：<http://auto-che.com/v/ca/ca4250p66k24t1a1e5-274-faw-jiefang.html>。

2 “豪瀚牌(Sinotruk Hohan) ZZ3315N3563E1型自卸卡车，第282批”，Auto-Che，访问时间：2021年9月30日，详见：<http://auto-che.com/v/zz/zz3315n3563e1-282-sinotruk-hohan.html>。

3 “江淮 骏铃V9L 170马力 6.8米栏板载货车(HFC1181P3K1A53S6V)”，访问时间：2021年9月30日，详见：https://product.360che.com/m202/50741_index.html。

国燃油效率标准会使用这些相对较高的默认值，因此后者通常是首选。在进行模型有效性验证时，我们假设各类货运卡车的认证油耗值都是使用默认参数获得的。我们对模型进行了校准，以确保模拟油耗值与认证值相匹配。这需要调整驾驶员的加速、刹车和换挡行为。如图4所示，所得到的模拟油耗值与认证值高度匹配，偏差值在±0.05%以内。

表3. 三类货运卡车（半挂牵引车、自卸汽车和载货汽车）的三款柴油车模型的主要技术参数

	半挂牵引车	自卸汽车	载货汽车
行驶循环			
原行驶工况	C-WTVC	C-WTVC	C-WTVC
新行驶工况	CHTC-TT	CHTC-D	CHTC-HT
车辆技术参数			
额定车辆总重量(kg)	49000	31000	18000
车轴配置	6x4	8x4	4x2
整车整备质量 (kg)	8805 (挂车: 7000 ^a)	15040	7850
最大载质量 (kg)	33195	15960	10150
载质量(kg) (最大占比%)	29731(75%)	11970 (75%)	7613 (75%)
阻力面积(C _d A) (m ²) ^a	6.0	6.0	6.0
轮胎滚动阻力系数 ^a	0.006	0.006	0.006
轮胎尺寸	12R22.5 (牵引车 x10) 12R22.5 (牵引车x12)	11R20 (x12)	11R22.5 (前轮x2) 10R20 (后轮x4)
柴油动力传动系统技术参数			
发动机额定功率(kW)	312	225	125
发动机排量(L)	11.05	6.87	3.92
气缸数	6 (直列式)	6 (直列式)	4 (直列式)
进气系统	单级固定截面涡轮增压器	机械增压器 (建模为涡轮增压器)	单级固定截面涡轮增压器
发动机峰值制动热效率 ^a	0.45	0.40	0.40
变速箱	12速手动变速箱	12速手动变速箱	12速手动变速箱

^a (Meszler et al., 2019)

实际油耗建模

为了获得更具代表性的油耗值，我们对模拟参数（包括道路载荷和载质量）进行了调整，以便更贴近货运卡车的实际性能。

鉴于其油耗认证值，参考半挂牵引车和载货汽车符合中国第二阶段燃油效率标准。从2015年开始实施的第二阶段标准规定半挂牵引车和载货汽车的燃料消耗量限值分别为47 L/100km和31 L/100km。不过第三阶段油耗标准已经实施，因此我们对相关车辆属性进行了调整以符合第三阶段标准，以确保我们用于计算燃料运营成本的油耗值具有代表性。根据之前的一项ICCT研究(Meszler et al., 2019)得出的结果，我们对道路载荷进行了相应的改进。

此外，我们也对载质量进行了调整，以便更贴近各类货运卡车的实际运行工况。由于缺乏中国的具体数据，我们假设各类货车的载质量代表值为最大载质量的75%，这与欧洲采用的数值相同。在中国，半挂牵引车主要用于散装材料的运输，并且经常会超载，有时甚至会超过额定车辆总重量(GCWR) (Delgado et al., 2016)。然而，考虑到空车行驶以及货车在达到其总重量限值之前达到其最大容积的情况，这

就抵消了超载的问题。载货汽车通常用于从中心仓库到各个门店的货物运输。货运卡车从满载开始,以空载结束,不过途中也可能会发生装卸货活动。自卸汽车同理,通常是要么空载要么满载。为更好地代表实际情况,我们评估了各类货车在特定CHTC循环下产生的油耗,如表3所示。

如图4所示,采用实际参数模拟符合第三阶段标准货车的性能得出的油耗结果低于三类货车之前的认证值。对于半挂牵引车和载货汽车,新引入的CHTC循环比认证采用的C-WTVC循环能耗更低;此外,采用更低且更具代表性的道路载荷参数值得出的结果也更低。对于自卸汽车,尽管采用改善的道路载荷性能和较低的载质量导致了模拟油耗的降低,CHTC-D循环下产生的油耗依然高于认证循环下产生的油耗。

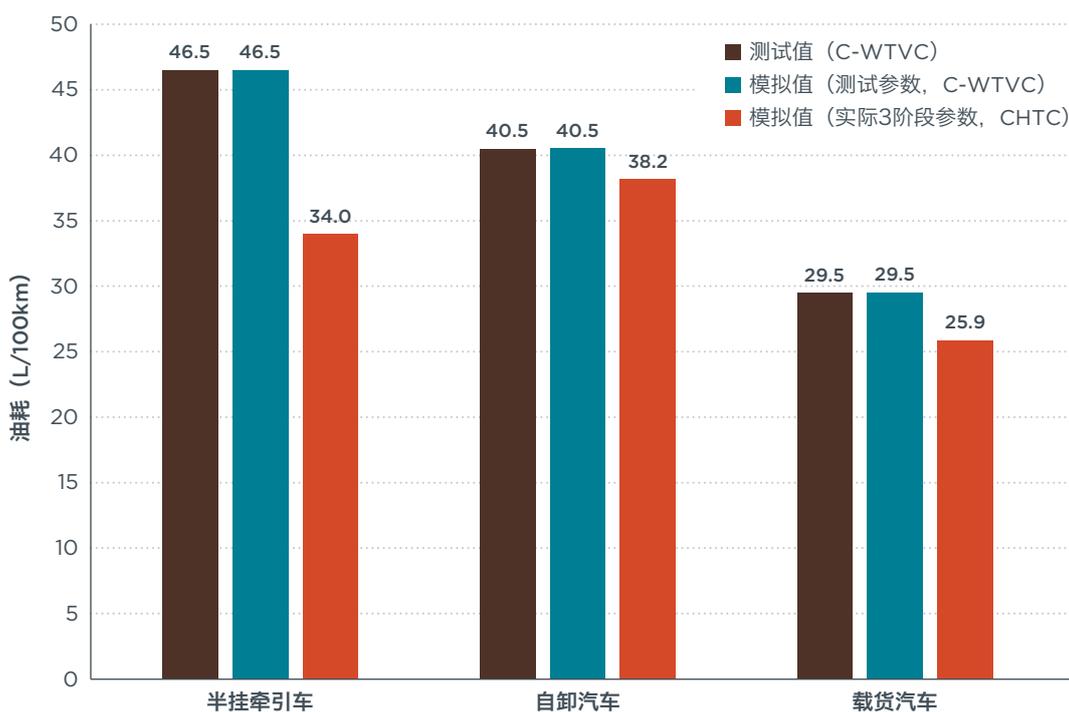


图4.采用基准柴油货车模型获得的模拟油耗值。对于半挂牵引车和载货汽车,棕色和蓝色柱子表示第二阶段车辆

未来柴油技术潜力

后一组结果用于评估这些货车的燃料运营成本以及下文中涉及的能源价格。我们将相应的模型作为零排放货车建模(如下节所述)以及实现未来技术潜力的基础。针对所有动力传动系统技术的改进包括了降低道路载荷和轻量化,这里我们假设挂车重量或半挂牵引车的空气动力特性没有明显改进。与此同时,我们也预计车辆的动力传动系统在未来会有些许改进。对于柴油货车而言,这主要涉及发动机制动效率。2030年柴油货车的假设值基于之前的一项ICCT研究(Meszler et al., 2019),如表4所示。需要特别指出的是,货车整备重量的降低将提高其载质量,这对运营商来说是有利的。但是,在对2030年的能耗值建模时,我们仍然使用与表3所示的初始值相同的载质量,以便了解改进的车辆技术所产生的影响。

表4. 2030年柴油货车技术潜力 (以及相对于2020年的改进)

	半挂牵引车	自卸汽车	载货汽车
车辆属性的改进			
阻力面积($C_d A$) (m ²)	3.5 (-42%)	4.4 (-27%)	4.4 (-27%)
牵引车整备质量	7397 (-16%)	12634 (-16%)	6594 (-16%)
针对动力传动系统的改进			
发动机峰值制动热效率	0.52 (+16%)	0.50 (+25%)	0.48 (+20%)

零排放货运卡车建模

在对柴油货车模型进行调整以适配同款零排放车型时, 我们保留了表3中的主要车辆技术参数, 其中包括车轴配置、底盘重量、车轮尺寸和挂车重量等。最重要的是, 道路载荷参数与典型载质量保持不变。此外, 表5汇总了针对零排放车辆动力传动系统的特定假设, 并在下文进行论述。零排放货车配备与柴油内燃机输出功率相同的电机以及与柴油车车轮扭矩相同的变速箱。对于这两种零排放技术, 我们假设电机输出3kW的平均功率并馈送到电气配件。

表5. 关于零排放货车的主要假设和技术参数, 其中包括相对于基准柴油货车的重量调整

动力参数	半挂牵引车	自卸汽车	载货汽车
电动续航里程 (km)	500	300	400
电机类型	内置式永磁同步电机		
电机额定功率 (kW)	312	225	125
重量调整			
柴油动力传动系统拆除后重量 (kg)	2154	1690	943
电池能量密度 (Wh/kg)	160	160	160
燃料电池功率密度 (W/kg)	280	280	280
储氢质量(kg/kgH ₂)	20	20	20
电机、逆变器和变速箱质量(kg)	628	628	628
其他参数— 纯电动货运卡车			
电池化学特性	磷酸铁锂电池 (无模组设计)		
电池容量(kWh)	845	365	375
纯电动货车整备质量(kg)	12561	16259	9879
纯电动货车载质量(kg) (相对于柴油货车的降低比例)	29439 (-11%)	14741 (-8%)	8121 (-20%)
其他参数— 燃料电池货运卡车			
储氢类型	700帕压缩氢		
储氢规模(kg)	42.5	18	18
燃料电池峰值功率(kW)	190	150	120
燃料电池平均效率	0.52	0.52	0.52
电池容量(kWh)	70	50	40
燃料电池货车整备质量(kg)	9288	15204	8592
燃料电池货车载质量(kg) (相对于柴油货车的降低比例)	32712 (-1%)	15796 (-1%)	9408 (-7%)

关于纯电动货运卡车的假设

对于纯电动货运卡车, 原始模型中的柴油动力传动系被替换为一个大型动力电池组、一个永磁电动机和一个逆变器。纯电动货车配备与柴油内燃机输出功率相同的电机以及与柴油车车轮扭矩相同的变速箱。这辆货车配备了磷酸铁锂(LFP)电池,

这是中国电动汽车市场上的主流电池类型。与欧洲和美国通常使用的镍钴类电池（镍钴铝和镍锰钴）相比，磷酸铁锂电池的单体能量密度已经接近其最大潜力，中国生产电池的单体能量密度在250-280 Wh/kg之间(InsideEVs, 2020b)。因此，该技术的剩余潜力主要在于通过无模组设计(CTP)和电池到底盘设计(CTC)等创新手段将电池集成到车辆动力传动系统中。CTP技术跳过了模块步骤，将电池直接集成到电池组中，从而使其体积能量密度提高了50%(InsideEVs, 2020a)。宁德时代和比亚迪等中国制造商已采用CTP技术，目前最先进的磷酸铁锂电池的能量密度约为160 Wh/kg。该值也用于当前的纯电动货车性能假设。此外，汽车电池制造商国轩高科宣称到2022年将生产能量密度为260 Wh/kg的电池，这相当于电池组的能量密度达到234 Wh/kg(InsideEVs, 2021)。虽然这一声明看起来相当雄心勃勃，但我们依然采用一个较为保守的数值。电池和电池仓热控制技术的使用可能会对纯电动货车续航里程产生相当大的影响。据之前的一项ICCT研究(Basma et al., 2021)估计，在-7°C（冬季）和35°C（夏季）温度范围内，电池和电池仓热管理系统使用热泵可导致半挂牵引车的续航里程减少5%至9%。

关于燃料电池货运卡车的假设

这辆燃料电池货运卡车配备了质子交换膜(PEM)燃料电池堆，表5中列出了各类货运卡车的额定功率。其配备一个压缩氢储存系统和一个小型缓冲蓄电池，以满足极端电力需求和实现制动能量回收，以及一个与纯电动货车类似的电动机。我们假设该车配备一个70兆帕的压缩氢储存系统，因为目前这被认为是长途货运最具前景的选择之一。对于储氢量，我们假设为20kg H₂/kg (FCHJU & Roland Berger, 2020)。对于燃料电池堆（包括电力电子器件和水管理系统），我们假设其功率密度为280 W/kg，这相当于目前最先进的行业技术水平(Ballard, 2020)。由于全球都在深入研究氢动力传动系统，因此我们假设燃料电池功率密度每年提高5%，到2030年该值达到460 W/kg。该值与中国汽车工程学会的《节能与新能源汽车路线图2.0》预测一致。作为参考，美国能源部的最终目标是650 W/kg(DOE, 2015)。根据目前最先进的性能水平(Ballard, 2020)，我们将燃料电池效率设定为52%；我们假设到2030年每年提高1.3%才能实现美国能源部60%的提升目标。最后，基于对现有模型和原型产品(Hyundai Hydrogen Mobility, 2020; Daimler AG, 2020)的研究，我们将半挂牵引车磷酸铁锂电池组的容量设定为70 kWh，并按比例缩小其他两类货车的能耗值，如表5所示。我们假设其与纯电动货车电池具有相同的能量密度值。为确保燃料电池货车产生最低能耗，该模型还配备一个能源管理系统，该系统根据等效因子计算燃料电池堆和电池组之间的最佳能量平衡。

关于重量与续航里程的假设

各类货车的整备质量随各种动力传动系统技术有所调整。第一步是扣除柴油动力传动系（包括发动机和变速箱）的重量，其中半挂牵引车的动力传动系重量约为2.2吨(Mareev et al., 2018)。考虑到其他两类货车的发动机较小，该重量按比例缩小。然后基于上述能量密度和功率密度假设值，加上了零排放货车的储能系统重量。最后，假设各类纯电动和燃料电池货运卡车的电动机、逆变器和变速箱的总重量为630千克(Sharpe, 2019)；替换更新后的整备质量如表5所示。

对于燃料电池货车，在设定电池与储氢容量时要确保零排放货车一次充电可满足其所需的续航里程，这是根据各类货车典型的日行驶里程确定的。对于运营商而言，在货站对电池进行过夜充电是最便宜的选择。我们对储能装置的容量和重量进行动态调整以获得所需的续航里程，所得到的最终能耗值如图6所示。纯电动货车的续航里程是根据固定循环距离内的模拟放电深度(DoD)确定的，据此推算出总可用荷电状态(SoC)为80%。为避免电池深度放电和电池过充加速电池老化，并为可能

影响货车续航里程的潜在电池容量下降提供缓冲, 我们认为电池荷电状态的运行窗口是15%-95%。

假设电池在运行5年后达到其使用寿命⁴。考虑为SoC提供的缓冲, 以及在其整个生命周期内不断下降的年行驶里程(VKT) (如下文中“年行驶里程”章节详述), 我们假设电池始终可以提供足够能量来满足货车的续航里程要求。此外, 随着电池在运行过程中容量下降, 其内阻增大, 电池的充放电效率降低, 但由于我们假设电池内阻随时间的变化是恒定的, 因此我们的模型未考虑这个问题。

我们通过敏感性分析评估所需的电池容量, 以获得在载质量保持不变情况下的不同电动续航里程。如图5所示, 所需的电池容量随货车所需的续航里程以准线性方式增加。然而, 对于高电动续航里程, 电池组的重量变得非常重要, 由于需要更多的能量来驱动储能装置, 因此所需的电池容量也相应增加得更快。这在目前电池能量密度相对较低的情况下尤为重要。考虑到电池能量密度有望到2030年实现突破, 预计届时所需的电池容量会随着续航里程的增加而减少, 同时也将缩小高电动续航里程下的准线性差距。

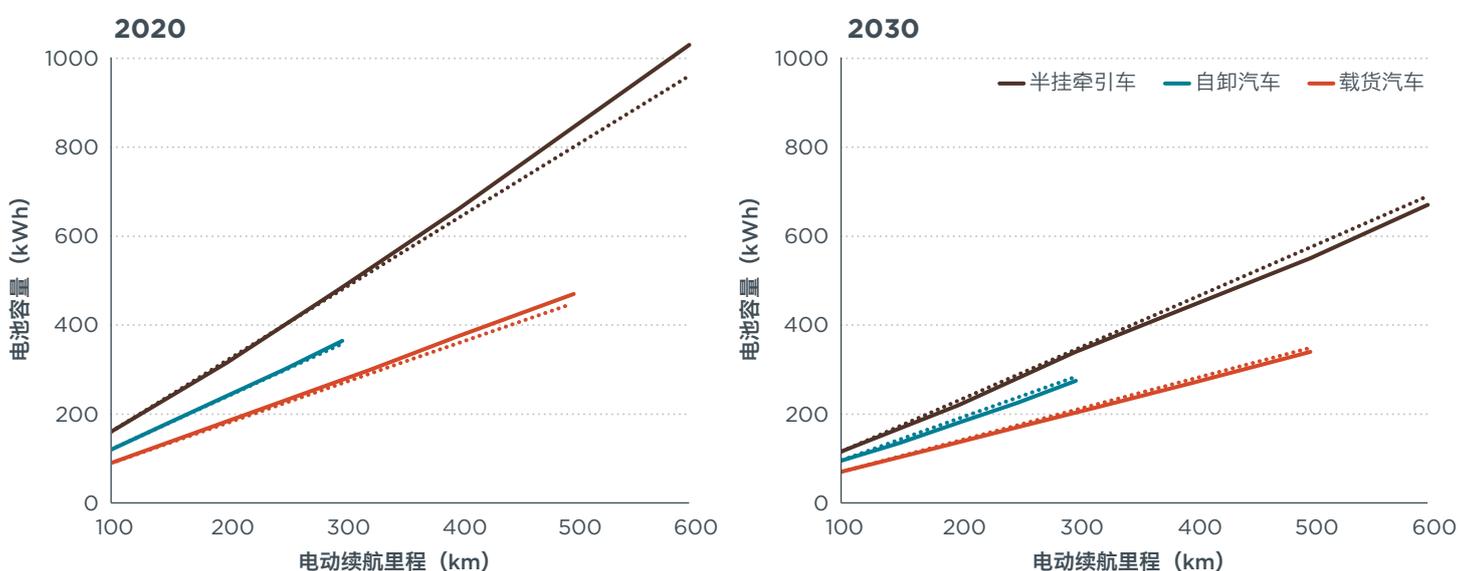


图5. 2020年(左图)和2030年(右图), 在载质量保持不变的情况下, 纯电动货车所需的电动续航里程对三类货运卡车所需电池容量的影响。虚线表示电池容量与续航里程成比例增长的情况。

各类货车的日行驶里程是根据我们对年行驶里程的估算(请参见“年行驶里程”章节)得出的, 前提是零排放货车主要依靠夜间货站充电。也就是说, 这些货车应能够在一次充电的情况下跑完大部分日行驶里程, 而无需在白天使用充电或加氢基础设施。尽管如此, 考虑到图5中确定的电池体积差距, 我们假设半挂牵引车和载货汽车可以在驾驶员休息时在路上通过快充(纯电动)和气瓶加氢(燃料电池)的方式增加相当于100公里的续航里程。

我们假设半挂牵引车、自卸汽车和载货汽车的每日平均行驶里程分别为600公里、300公里和400公里, 这足以涵盖绝大多数应用场景。考虑到充电因素, 我们将半挂牵引车和载货汽车的电动续航里程分别设定为500公里和400公里。通过降低续航里程, 我们可以缩小这两类货车的电池体积(纯电动)和储氢容量假设值(燃料电池), 因为这对能耗有相当大的影响。就自卸汽车而言, 由于其主要活动范围

⁴ 电池寿命终止主要是指原始电池充电容量损失 20%。

不在市区和公路干线上，所以假设其无法保证其使用快充设备。因此，其每日电动续航里程设定为300公里。最终得出表5中规定的电池容量。

未来零排放技术潜力

如上所述，动力传动系统的未来技术潜力主要取决于电池能量密度（纯电动）和燃料电池效率（燃料电池）。表6汇总了我们对于2030年技术潜力的假设。燃料电池货车使用的小型缓冲电池的容量与2020年保持相同。

表6. 2030年零排放货车技术潜力（以及相对于2020年的改进）

	半挂牵引车	自卸汽车	载货汽车
纯电动货运卡车技术潜力			
电池能量密度 (Wh/kg)	234 (+46%)	234 (+46%)	234 (+46%)
电池容量 (kWh)	550 (-35%)	275 (-25%)	270 (-28%)
纯电动货车整备质量(kg)	8,466 (-33%)	12,917 (-21%)	7,484 (-24%)
纯电动货车载质量 (kg)	33,534 (+14%)	18,083 (+23%)	10,516 (+29%)
燃料电池货运卡车技术潜力			
储氢规模(kg)	25 (-41%)	11.5 (-36%)	11.5 (-36%)
燃料电池功率密度 (W/kg)	460 (+63%)	460 (+63%)	460 (+63%)
燃料电池平均效率	0.60 (+14%)	0.60 (+14%)	0.60 (+14%)
燃料电池货车整备质量(kg)	7,269 (-22%)	12,457 (-18%)	6,950 (-19%)
燃料电池货车载质量 (kg)	34,731 (+6%)	18,543 (+17%)	11,050 (+17%)

总的来说，零排放货车比同款柴油车更重，这导致其负载能力大幅降低，2020年纯电动货车的负载能力降幅高达20%。这将对运营商造成重大损失：为确保相同的货运周转能力，要么需要更多数量的货车，要么保持数量不变但每辆车需要行驶更多里程。这两种情况都意味着车队成本的增加。随着上述车辆整备质量的下降，预计到2030年所有动力传动系统的载质量将会增加。届时，柴油车和零排放货车之间的载质量差距将缩小。在某些情况下，零排放货车甚至有望在2030年拥有比柴油车更高的载质量。尽管如此，由于我们要根据单辆车的性能表现来比较各动力传动系统的能耗，所以我们对所有动力传动系统均设置了相同的载重能力，并且在2030年之前保持不变。

最终能耗值

图6汇总了在使用实际运行参数的情况下2020年和2030年三类货车（半挂牵引车、自卸汽车和载货汽车）和三种动力技术路线（柴油车、纯电动货车和燃料电池货车）的各种组合的模拟能耗值。

有趣的是，虽然柴油动力传动系统的能耗最高，但是相对于配备零排放动力传动系统的其他两类货车而言，自卸汽车的能耗要低得多。这主要是由确定能耗值的工况循环不同而导致的。由于CHTC-D是一个瞬态试验循环，期间会多次发生加速和制动事件，而自卸汽车在制动事件期间会回收更多制动能，从而降低其能耗。

此外，相对于与其他两类货车，半挂牵引车在2030年的提升更为显著，尤其是纯电动车型。这是由两种现象共同导致的：首先，这些长途货车在空气动力特性方面的改进预计会更大。其次，由于其对续航里程要求更高，所以其配备的电池也将会更大。因此，随着到2030年电池能量密度的提高，这些货车将受益于更大幅度的减重，这也将显著降低能耗。

图6所示的结果用于评估运营各类货车的当前和未来能源成本，我们在此假设2020年和2030年之间能耗值呈年度线性降低。

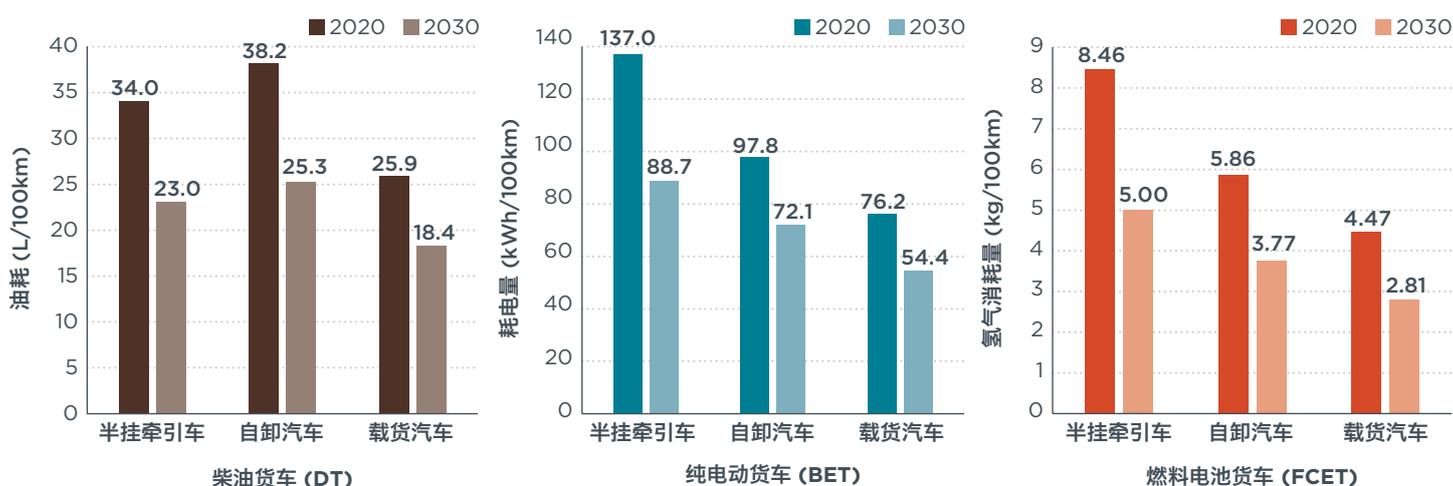


图6. 2020年和2030年各类车型与技术路线组合的最终能耗值

固定成本

车辆价格

根据公开的市场数据(Chinacar.com, 2021), 我们估算了各类货车的柴油新车(即2021年车型)的价格(见表7)。考虑到降低油耗所需的技术升级, 后续年份车型的价格将提高。这里假设未来的第四阶段油耗标准将于2025年引入, 并要求油耗比第三阶段(见上一章节)降低约30%。ICCT之前开发的成本曲线(Meszler et al., 2019)用于估算燃油效率技术提升导致的价格上涨。额外技术升级导致的价格上涨已经包括了研发、管理、营销与分销以及利润空间方面的支出。2030年货车车型的估算价格如表7所示。

表7. 三类货车的2021年实际柴油车价格和2030年估算柴油卡车价格

车辆类型	2021年价格	2030年价格
半挂牵引车	牵引车: 36万元人民币 挂车: 6万元人民币	牵引车: 502.73万元人民币 挂车: 8.3788万元人民币
自卸汽车	33万元人民币	44.6263万元人民币
载货汽车	13.9万元人民币	20.9298万元人民币

为了评估纯电动和燃料电池货车的价格, 从柴油货车的价格中减去柴油零部件的价格, 得出无动力车身(即无动力传动系统的车辆)的估算价格。据估算, 柴油动力传动系统(例如发动机、排气、油箱和变速箱)约占柴油货车总价格的51.7%⁵(Fries et al., 2017)。对于半挂牵引车, 柴油车与电动车之间的挂车单价在特定年份保持不变。

电动传动系统是纯电动货车零售价的主要组成部分。为了估算此成本, 我们使用了文献中的公开数据。现有成本数据通常基于对间接成本的不同假设, 例如研发、管理、营销与分销、保修支出和利润加成。考虑到这些差异, 首先调整成本数据以反映

5 对于半挂牵引车, 柴油动力传动系统组件的估算成本为牵引车成本(不包括挂车成本)的51.7%。

直接制造成本(DMC)⁶。然后,使用间接成本乘数(ICM)来估算所有间接成本。我们采用ICCT委托的咨询公司⁷研究得出的估算值来估算电动传动系统的直接制造成本,其中包括电动机、变速箱和逆变器、电力电子器件、车载充电机和电池热管理系统,如表8所示。储氢瓶的成本估算基于《节能与新能源汽车路线图2.0》(中国汽车工程学会,2021)。

表8. 电动传动系统零部件的直接制造成本⁸

	2020	2030
电力驱动装置 (元/kW)	553.5	121.5
电力电子器件 (元/kW)	182.25	182.25
车载充电机 (元/kW) ⁹	486	486
热管理系统 (元/kW)	60.75 (燃料电池) 141.75 (纯电动)	60.75 (燃料电池) 141.75 (纯电动)
储氢瓶 (元/kg)	5600	2000

间接成本因相关技术的复杂性而异,粗略估计在直接制造成本的15%至75%。直接成本加上间接成本就是与特定技术相关的预计零售价格(不含增值税)。本研究中使用的间接成本乘数(如表9所示)对应于美国环保局(EPA & NHTSA, 2016)定义的高技术复杂性水平,并且已经过严格的开发与审查流程。

表9. “高技术复杂性水平”技术的间接成本乘数

复杂性水平	间接成本乘数	2020 (短期)	2030 (长期)
高水平1	保修成本	0.073	0.037
	非保修成本	0.352	0.233
	合计	0.425	0.27
高水平2	保修成本	0.084	0.056
	非保修成本	0.486	0.312
	合计	0.570	0.368

图7给出了2020年和2030年不同纯电动货车和燃料电池货车的无动力车身和动力传动系统组件成本的估算值。储氢瓶成本的大幅降低是由于其单位质量成本的降低(如表8所示,5600-2000元/千克),以及由于燃料电池动力传动系统的能效提高导致气瓶容量的大幅降低(参见上一章节“最终能耗值”)。

6 直接制造成本(DMC)表示生产和组装技术组件所需的材料和劳动力成本;从本质上来讲,DMC表示车辆或发动机制造商的组件成本。

7 Ricardo战略咨询,“电动货运卡车虚拟拆解研究”,2021年。

8 此处采用的货币汇率为:1美元=6.75元人民币;1欧元=7.7625元人民币。

9 假设纯电动货车配备44 kW的车载充电机,燃料电池货车配备6.6 kW的车载充电机。

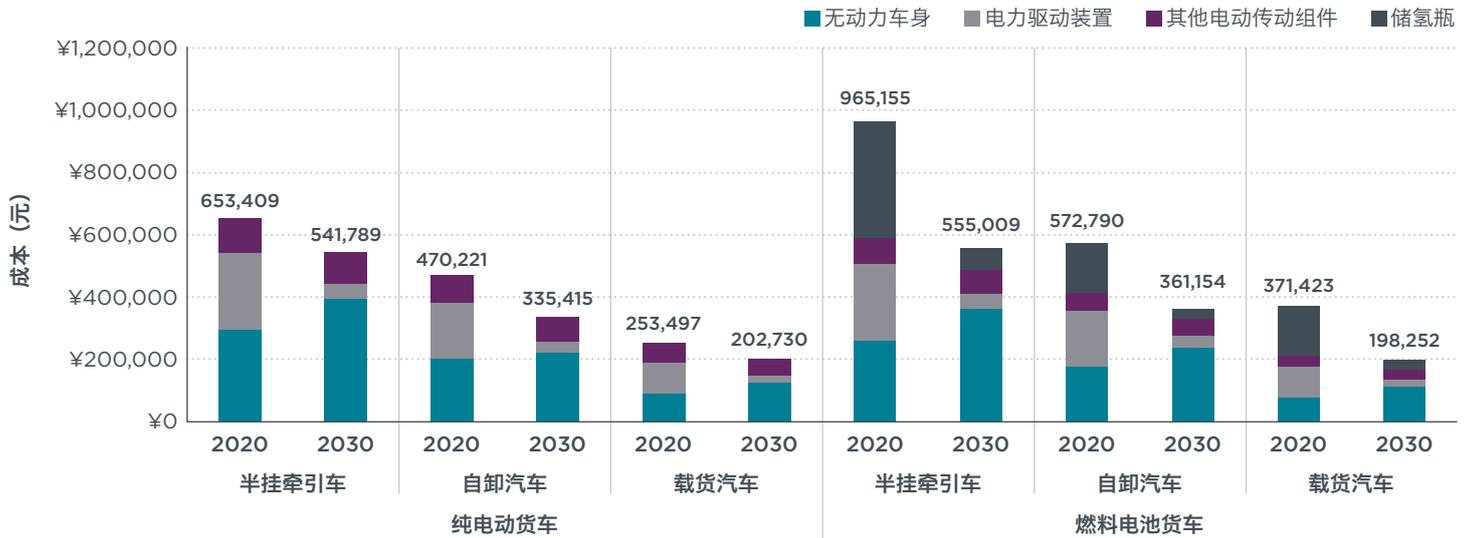


图7.纯电动货车和燃料电池货车的成本（不包括动力装置）

根据货车制造商公布的数据、提供商用车服务的网络平台以及文献中的其他研究对零排放货车的零售价进行验证。详细信息见附录A：零排放货车零售价格验证。

我们对电池价格（源自2019年公开数据）(Frith, 2020)进行了三种情景分析，并基于之前的一项ICCT分析(Lutsey & Nicholas, 2019)进行预测。虽然电池成本在过去几年大幅下降，但重型和轻型车辆在电池组层面存在很大差异，例如耐久性、电压等级、功率输出、热管理和模块化。因此，目前重型车辆的电池组-单体成本比高于2，而轻型车辆的电池组-单体成本比仅为1.3(Frith, 2020)。本研究中使用的电池组成本参考了《节能与新能源汽车路线图2.0》，如图8所示。燃料电池组成本也采用了《节能与新能源汽车路线图2.0》(中国汽车工程学会, 2021)中的数据，预计2020年燃料电池组成本约为5000元/kW。这一数字到2025年下降到2000元/kW，到2030年下降到600元/kW。

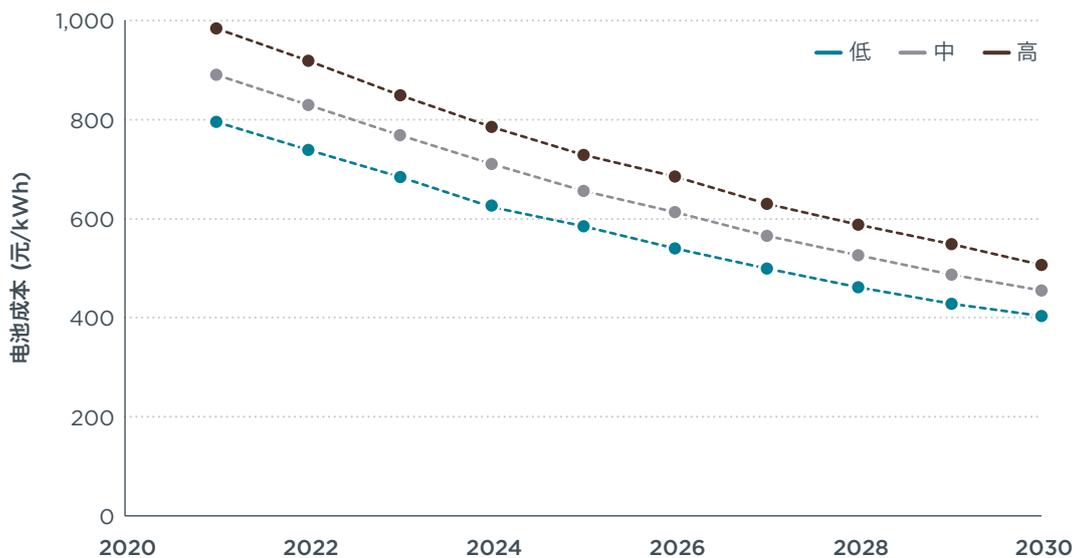


图8.重型车电池组成本分析的三种场景

柴油、纯电动和燃料电池货运卡车在2020-2030年间的总成本变化(包括动力装置)如图9所示。除非另有说明,下文均使用电池的中等价格场景。在2020-2030年间柴油货车成本增加,这主要是由于技术升级带来的额外成本上升。

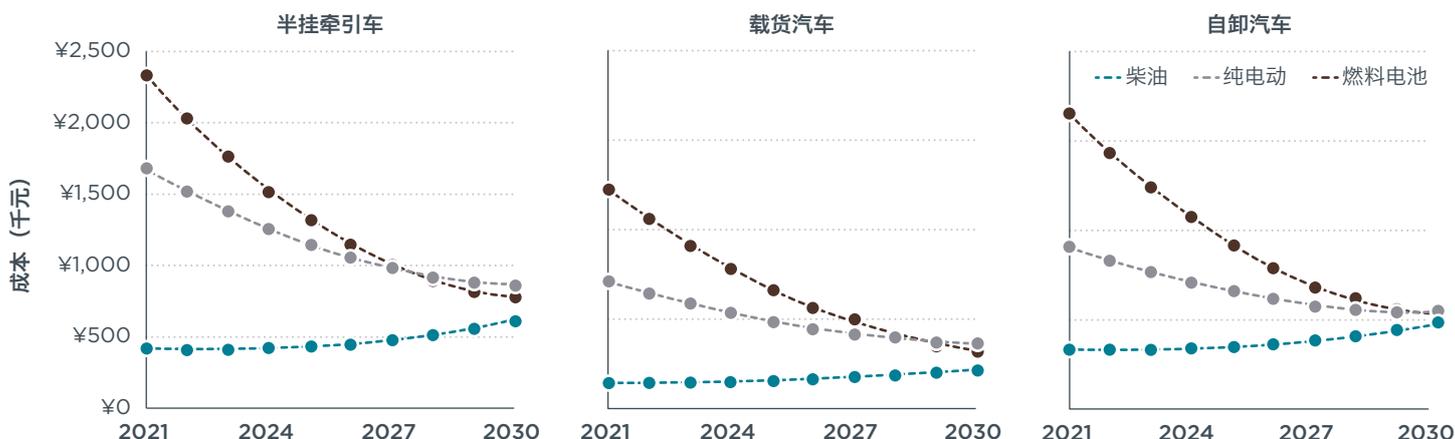


图9. 2020-2030年间纯电动、燃料电池和柴油技术的货车总成本估算值

贷款购车

自2018年以来,中国人民银行和中国银行保险监督管理委员会(CBIRC)规定,购车贷款金额不得超过柴油货车价格的70%,纯电动和燃料电池货车不得超过75%(PBC & CBIRC, 2017)。一般来说,贷款购车的贷款期限为3年,年利率为10%。表10给出了我们在本研究中分析的贷款购车方案。一些货车运营商可能会考虑为其车队提供租赁选择。虽然本文未作分析,但我们估计租赁的财务成本与贷款购车的财务成本差不多。

表10. 贷款购车信息假设

最大贷款比例			贷款期限	年利率
柴油货车	纯电动货车	燃料电池货车		
70%	75%	75%	3年	10%

剩余价值

货车折旧后的剩余价值取决于其动力传动技术和应用类型。在中国,货车的最长运营期限为15年(MOF et al., 2013),这意味着运营15年后其残值为零。然而,纯电动和燃料电池货车的贬值速度可能比通常预期的更快。据悉,大部分电动车型的二手交易残值均低于60%(中国经济日报, 2019)。对于本研究,由于老化和耐久性问题的,折旧还应考虑更换电池组和燃料电池组。在本研究中,我们同时考虑了货车折旧及其相应的动力装置折旧(电池和燃料电池)。

对于无动力装置的卡车折旧,我们采用了类似于Feng & Figliozzi (2012)的双重折旧模型:(1) 随着时间推移而产生的固定折旧率,一般在每年5%到10%之间(Machado et al., 2021);(2) 随着年行驶里程数变化的可变折旧率。因此,各类货车的折旧曲线不同,如图10所示。我们将固定折旧率设定为每年7.5%,这是典型的5%-10%范围内的平均值,而每公里可变折旧率的调整方式是使货车的残值在15年后归零。每条曲线的形状受年行驶里程的影响很大,不同类型的货车之间也有所不同,并且每年都会发生变化,下文中将对此进行解释(参见“年行驶里程”章节)。由于本研究仅涉及5年以上的一手货车,因此我们关注的是每辆货车运营5年后的残值,这在图中突出显示。

对于电池组和燃料电池组的折旧,我们假设这两类动力装置都不需要更换,因为电池组可以实现2000次以上的充放电循环(Wang et al., 2011),大致相当于五年的运营期;如Burke & Sinha (2020)报告中所述,燃料电池组的耐久性足以支撑五年的运营期。至于电池组的剩余价值,这将取决于其重新确定用途后的二次销售价格。据美国国家可再生能源实验室(NREL)预测,这些电池将比新电池的价格降低30%-70%(Neubauer et al., 2015),并且考虑到电池组的预计价格,电池组的剩余价值可能占其采购成本的15%左右。根据“电池2030+”倡议(Battery 2030+, 2020),电池循环寿命预计在未来几年也将增加,达到当前电池循环寿命的一到两倍。图11显示了低、中和高电池循环寿命增长的情况下电池组剩余价值的三种情景。请注意,其剩余价值对应于电池的直接制造成本且不包括间接成本乘数(ICM)。

对于燃料电池组,目前正在运营的几辆货车尚未达到使用寿命,二次寿命研究和应用的条件尚不成熟(Deloitte China & Ballard, 2020)。在本研究中,燃料电池组的残值数据源自《节能与新能源汽车路线图2.0》(中国汽车工程学会, 2021),如图11所示。该残值对应于燃料电池组,但不包括燃料电池单元中使用的原材料和贵金属,也不包括间接成本乘数。我们假设这些贵金属的回收残值可以达到100%。

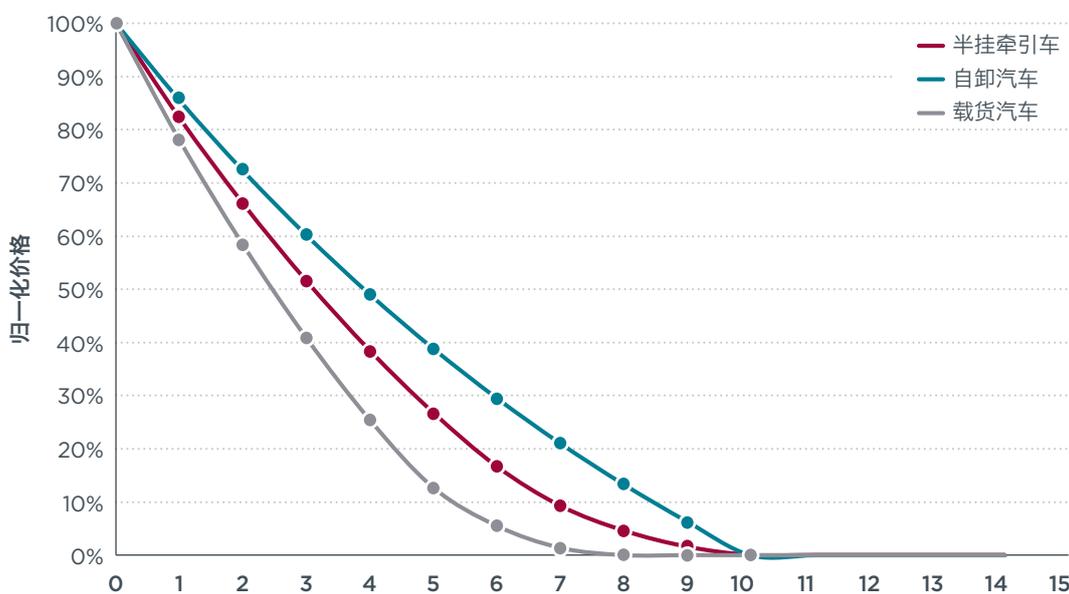


图10. 各类车型的折旧曲线

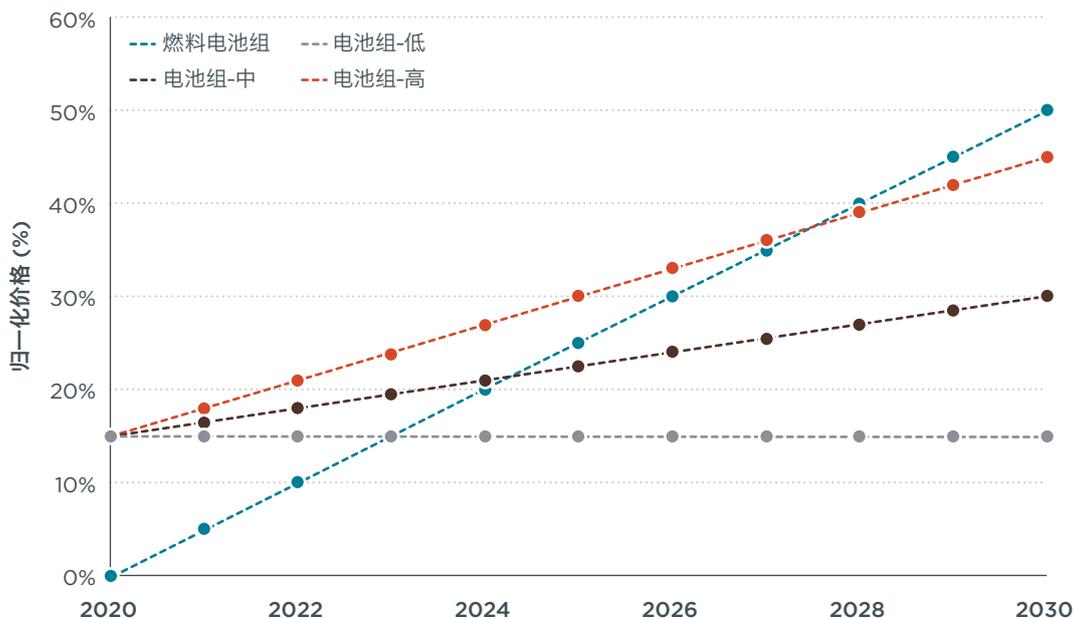


图11. 电池组和燃料电池组残值变化曲线

车辆购置税和使用税费

中国的货车税收制度包括了购置税和使用税费。目前传统柴油货车需要缴纳购置税和使用税费，而纯电动和燃料电池货车均暂时免除了相关费用(MOF et al., 2018)；不过，我们预计未来几年将国家将恢复对零排放货车征收相关税费，且税收力度与燃油车型相当。这里我们假设，在2026年之前替代燃料货车仍享受免税待遇(北京投资促进服务中心, 2018; 上海市人民政府, 2011; 深圳市人民政府, 2013)。

表11. 各类车型税费假设

城市	柴油货车		纯电动货车		燃料电池货车	
	购置税	使用税 (元/吨*年)	购置税	使用税 (元/吨*年)	购置税	使用税 (元/吨*年)
北京	10%	96	0%	0	0%	0
上海	10%	90	0%	0	0%	0
深圳	10%	96	0%	0	0%	0

贴现率

表12汇总了中国拥有总成本相关研究分析采用的贴现率。在本研究中，我们将统一采用10%的贴现率。

表12. 相关研究贴现率假设

其他研究中采用的贴现率假设值	数据来源
4%、7%、10%	(Meszler et al., 2019)
5%	(Hsieh & Green, 2020)
10%	(Agenbroad et al., 2016)
10%	(Zhu et al., 2016)

运营成本

年行驶里程

运营成本与该年份的行驶里程成正比。因此，年行驶里程的确定对拥有总成本的计算至关重要。然而，目前无法获得关于本研究涉及三类货车年行驶里程的官方统计数据。因此，我们查阅了大量文献资料，以估算中国各类货车的年行驶里程，如表13所述。

表13.中国重型车年行驶里程估算值文献汇总

年行驶里程范围	备注	数据来源
-106,500 km	第一次全国污染源普查	(China.org.cn, 2010)
-114,418 km	采访调查广东省698名货车（车重超过20吨的重型车）司机	(CAI-Asia Center & World Bank, 2010)
29,200-82,000 km	作者承认关于年行驶里程变化的信息很少	(Huo et al., 2012)
50,000-80,000 km	北京和天津地区，从2001年到2010年稳步提高	(Lang et al., 2012)
48,000-182,500 km	涵盖了所有道路货运车辆，包括载货汽车和短途/长途半挂牵引车	(中国物流与采购联合会, 2016)
150,000-200,000 km	长途半挂牵引车	(中国汽车技术研究中心, 2016, 如Xing et al., 2016所述)
> 200,000 km	重型物流车，高频率使用	
80,000-100,000 km	自卸汽车	(中国汽车技术研究中心, 2018)
100,000-150,000 km	长途货运卡车	
250,000-300,000 km	快递企业自有配送车辆	
-50,000 km	城市物流配送车	

通过文献回顾发现，行车里程的估算值各不相同，并且在很多情况下缺乏评估车辆类型、车辆具体应用（即使用案例）、评估年份和地点的详细信息。然而，中汽中心¹⁰近期发布的报告为本研究涉及的车辆类型和使用案例提供了可靠的估算值。尤其是，我们的估算值基于Xing et al. (2016)报告的较低行车里程范围。

由于在用货车的数量随着车龄的增长而减少，年平均行车里程也随之下降，因此有必要考虑货车的平均存活率。中国在用公路牵引车的车龄分布存在很大的不确定性。基于文献回顾，表14汇总了车龄对存活率或年行驶里程影响的详细信息。

表14.中国货车存活率文献综述

存活率信息	备注	数据来源
中重型货车运营13年后的存活率为50%	通过威布尔分布（Weibull distribution）建模得出的生存率分布	(Hao et al., 2011)
运营8年后年行驶里程的降幅达到50%-65%	基于宜昌和佛山两市的估计值。没有关于车辆类型或使用案例的具体信息	(Huo et al., 2012)
载货汽车运营10年后和半挂牵引车运营12年后的存活率约为60%	通过威布尔分布（Weibull distribution）建模得出的生存率分布	(W. Li et al., 2015)
半挂牵引车、重型物流车和自卸汽车的平均退役车龄分别为8年、10年和3年	数据来自中国四大货车制造商	(中国汽车技术研究中心, 2016, 如Xing et al., 2016所述)
存活率在运营5年后约为90%，在运营10年后约为50%，在运营15年后归零	根据现有文献和运营15年后强制报废规定	(Meszler et al., 2019)

10 中国汽车技术研究中心（CATARC）是一家为汽车行业和国家机关提供服务的中央国有技术机构，目前是中国主要的车辆检测机构。

与年行驶里程估算值一样，文献中提到的存活率估算值各不相同，其中主要涉及与50%存活率相关的车龄。然而，通过文献回顾发现，前五年的存活率基本差不多，只是存活率略有下降。在本研究中，我们根据ICCT(Meszler et al., 2019)之前研究得出的存活率曲线，并使用选定的曲线来调整年行驶里程。我们对各类货车的100%报废车龄（也就是存活率归零的年份）进行调整，使其总寿命约为100万公里。

图12显示了各类货车车型的年行驶里程随车龄的变化。我们认为这些年行驶里程曲线代表了本研究涉及三类货车车型的典型使用情况。尽管如此，考虑到年行驶里程在不同地区和应用场景中存在显著差异，我们对该输入变量进行了敏感性分析（参见“敏感性分析”章节）。

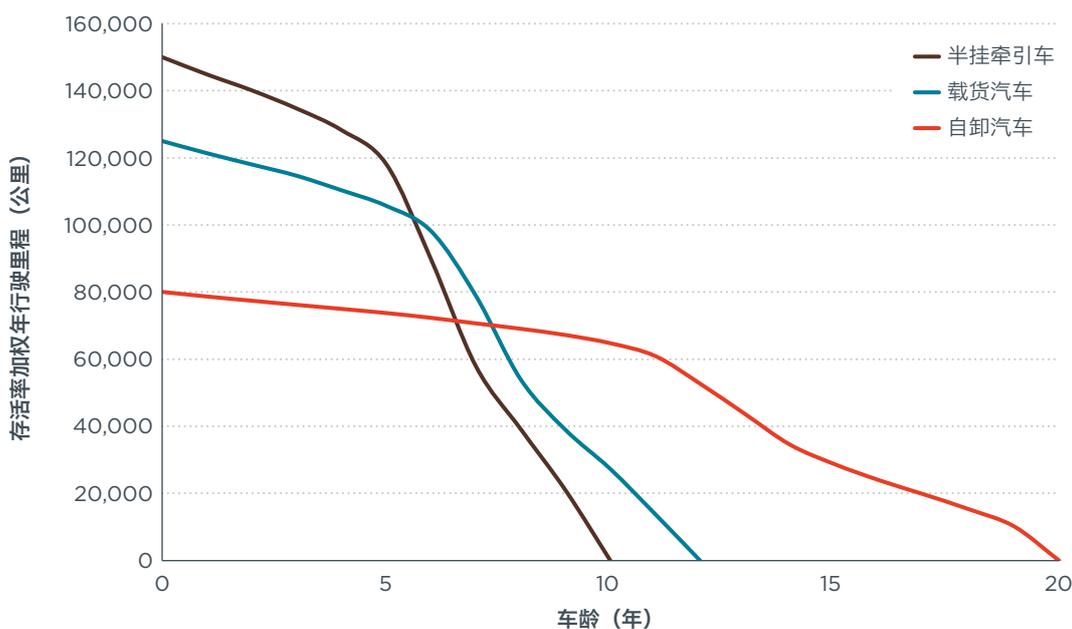


图12.根据存活率估算值调整三类货车的年行驶里程

维护成本

由于货车用途和动力技术不同，维护成本也存在很大差异。文献中有一些研究和报告着重介绍了柴油货车的维护成本，但基本未提及零排放重型车的维护成本。首先，据Yang et al. (2018)估计，中国柴油货车的维护成本约为0.325元/公里。关于纯电动和燃料电池货车的维护成本，据德国航空航天中心报告称，与柴油货车相比，纯电动货车的维护成本降低33%，燃料电池货车的维护成本降低30%(Kleiner & Friedrich, 2017)，据此得出纯电动和燃料电池货车的维护成本分别为0.218元/公里和0.228元/公里。不过需要注意的是，这些数值未考虑电池组和燃料电池组的更换成本。

另一个变量是轮胎的磨损和更换，这也会从某种程度上影响维护成本。电动货车从一开始加速时就会产生最大扭矩，使轮胎承受更大的扭矩和摩擦。因此，电动货车的轮胎在行驶过程中会承受更大的压力，进而影响轮胎的耐久性和价值(Manges, 2021)。然而，在本研究中，我们并没有专门分析电动货车与柴油货车之间轮胎耐用时间的差异，因为在这方面暂时没有可用的数据。

表15. 不同动力技术的货车维护成本假设

技术	维护成本 (元/公里)
柴油	0.325
纯电动	0.218
燃料电池	0.228

柴油价格

中国70%以上的石油依赖进口，所以国内柴油价格受原油价格和政治风险影响较大。为保持柴油价格稳定，国家发改委每十个工作日对柴油价格进行一次指导和调整。

受新冠肺炎疫情影响，2020年原油价格大幅波动。2020年国内平均柴油价格为6.5元/升，这将作为未来十年柴油货车总成本分析和柴油价格模拟的基点。

中国国内柴油价格由原油价格、消费税、增值税和其他杂费等多项成本组成。我们将根据未来十年的预测价格评估每项成本的未来变化。

表16. 石油价格细目表(Hyqfocus.com, 2019)

成本项	占比
原油价格	36.50%
消费税	20.97%
增值税	13.79%
加油站收入	13.24%
炼油厂收入	2.38%
运输和运营成本	6.90%
其他杂费	6.22%
合计	100%

电价

与柴油价格一样，中国的电价体系也是一个政府引导的市场。在本研究中，我们分析了北京、上海和深圳的电价，因为这三个城市中替代燃料货车的普及率较高。一般来说，不同城市、不同用途和不同地区的电价是不同的。尤其是北京地区，可能会根据最终用途（住宅、商业或工业）、地区（特定区域、市区或郊区）和每日时间段（尖峰时段、高峰时段、平峰时段和低谷时段）收取不同的电费。北京、上海和深圳也按不同电压容量对用电收取不同的固定费用，称为基本电价。此外还对实际使用中具有高电力需求的设施收取阶梯费用（表18）。

2020年，除正常电网供电外，中国还分区域对可再生能源电价进行了调控（表17）。在可再生能源电价分区中，北京属于二区，上海和深圳属于三区：2020年各区域电费分别为0.4元/kWh和0.49元/kWh。

表17. 2020年分区域可再生能源电价

区域划分	电价 (元/kWh)
一区 (其他区域)	0.35
二区 (包括北京)	0.4
三区 (包括上海和深圳)	0.49

表18. 2020年北京、上海和深圳的商业用电价格

城市	区域	场景	电价							
			用电价格 (元/千瓦时)					基本电价 (元/千瓦*月)		
			电压等级	尖峰	高峰	平峰	低谷	变压器容量	最大需量	
北京 (InsideEVs, 2020)	经济开发区	一般工商业	1-10 KV	0.7787	0.7030	0.4386	0.2085	32	48	
	郊区	一般工商业	1-10 KV	1.3551	1.2268	0.7081	0.2407	-	-	
深圳 (深圳发改委, 2019)	全部区域	商业	> 250kWh/月	10 KV	1.0049	-	0.6524	0.2084	22	54
上海 (上海发改委, 2020)	全部区域	商业	夏季	10 KV	0.9160	-	0.5670	0.2130	22.68	34.02
		其他	10 KV	0.8880	-	0.5380	0.2660	22.68	34.02	

除了标准调控电价外, 充电站运营商还将收取额外费用, 主要是指向消费者供应电能(kWh)的管理费用(OH), 以收回硬件的初始投资和充电站的安装成本; 此外还包括不同充电站的运营成本, 如各地区征收的需量电费。这些额外的管理费用由表示基础设施成本的资本支出项(CAPEX)和表示运营成本的运营支出项(OPEX)组成, 例如租金、保险、客户服务、维护以及充电站的需量电费成本。值得一提的是, 这些成本不包括接入高压电网的成本, 而这可能是充电基础设施总成本的主要组成部分。此外, 我们假设充电站位于已建成的商业建筑内, 由充电站运营商租用, 因此本分析不考虑建设成本, 只考虑租金成本。资本支出估算是基于对中国直流充电桩硬件与安装成本的当前和未来预测, 相关数据引用自Sandalow & Hove (2020), 其中2020年硬件成本估算为600元/kW, 相应的安装成本约为450元/kW。与全球平均水平 (尤其是美国) 相比, 中国的硬件成本非常低, 这主要是由于政府为部署新充电站提供了高额补贴(L. Zhang et al., 2018)。假设当前的补贴一直存在, 预计到2030年资本支出削减将超过35%。

运营支出主要由电费和充电站运营过程中产生的费用组成, 如审批许可、维护、客户服务等。在本研究中, 我们假设电费占快速充电站总运营支出的50%, 占夜间充电站总运营支出的75%(Levy et al., 2020)。表19汇总了用于估算管理费用所需的输入项和不同假设值。各类货车车型的充电功率是根据其白天和夜间的能源需求估算的 (参见“关于重量与续航里程的假设”章节, 并四舍五入到最接近的整数), 同时考虑可用的充电时间。

表19. 用于估算管理费用的输入项和假设值

货车车型	快速充电站			夜间充电站		
	自卸汽车	载货汽车	半挂牵引车	自卸汽车	载货汽车	半挂牵引车
充电桩数量	10			10		
充电桩功率	0	280 kW	360 kW	70 kW	70 kW	120 kW
硬件成本	650元/千瓦—2020年价格					
安装成本	450元/千瓦—2020年价格					
使用率	33%			33%		
充电时间	0.5小时			8小时		
能源占比	根据不同区域调整					
需量电费						
运营支出的电费占比	50%			75%		

然后, 在采用9.5%的内部收益率(IRR)的同时, 将在充电站使用寿命内(本研究认为是15年)发生的总支出(资本支出和运营支出)的净现值均摊到总能源消费量中来估算管理费用。**图13**显示了2020年不同地区各类货车的平均加权¹¹管理费用。

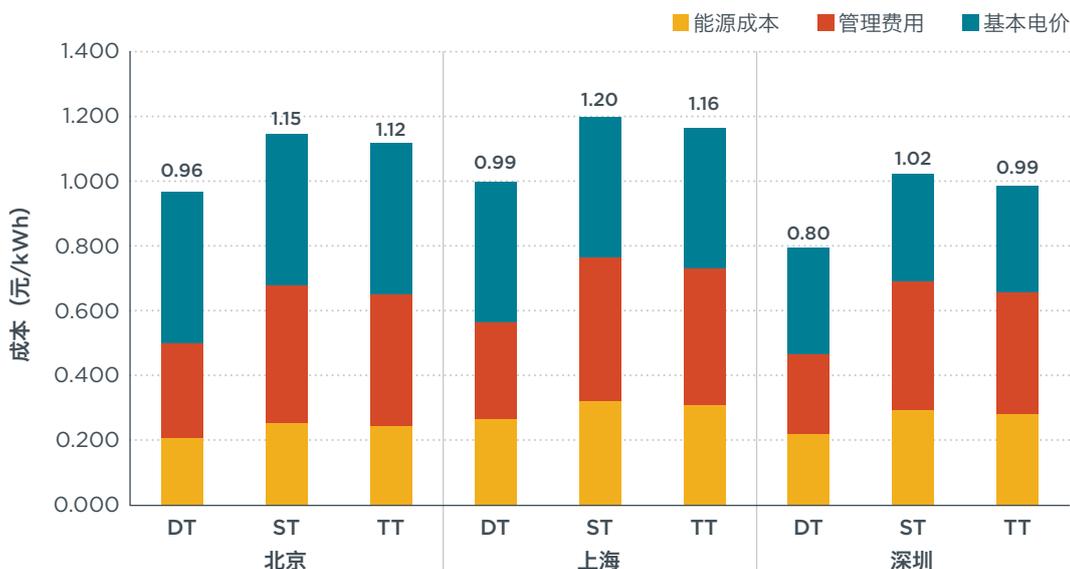


图13. 2020年各地区各类货车的平均加权总电价 (DT: 自卸汽车; ST: 载货汽车; TT: 半挂牵引车)

氢能价格

加氢站的氢气价格受多种因素和参数的影响, 主要影响因素包括生产成本、氢气从制氢厂到加氢站的输送成本以及加氢站的运营成本。本研究采用ICCT之前开发的两个模型(Baldino et al., 2020; Christensen, 2020)预估2020年和2030年三个城市(北京、上海和深圳)每千克氢气的价格。由于这两个模型是基于美国和欧盟开发的, 我们根据中国的具体情况对其进行了调整, 例如燃料价格数据。但是, 基于西方市场经验的一些基本假设(例如电解槽成本)并未改变。此外, 我们并未考虑氢供应链相关的潜在征税, 也没有考虑在各阶段可能转嫁给消费者并反映到加氢站燃料价格中的边际收益。换句话说, 本研究中的最终氢成本仅仅是生产、运输和燃料成本的总和。

绿氢生产: 绿氢是采用可再生能源电力通过电解水生产出来的。我们采用Christensen (2020)中所述的方法开发了两种现金流折现模型: 一种用于评估中国三个城市可再生能源电力的发电均化成本(LCOE), 另一种用于评估绿氢生产的发电均化成本。为了建立可再生能源电价模型, 我们收集了中国太阳能和风能发电厂的资本成本和运营成本数据(CPIA, 2020; IRENA, 2019; NEA, 2020)。我们还专门收集了北京、上海和深圳的太阳能和风能容量系数(Burandt et al., 2019; Liu et al., 2018)。对于未来的可再生能源电价预测, 我们采用了NREL (2020)中所述的成本降低率和技术改进率。我们假设绿氢生产直接连接到可再生能源发电机。这意味着建模的可再生能源LCOE直接用作氢成本模型的输入项, 而无需增加电网输送费用; 此外, 制氢的容量受可再生能源容量的限制。为了建立绿氢生产成本模型, 我们采用了与Christensen (2020)相同的电解槽资本成本和固定运营成本, 但是使用针对中国三个城市分别建模的可再生能源电价和水价更新了可变运营成本。我们还采用与(Christensen, 2020)相同的成本降低和效率改进假设值, 用于未来氢成本的预测。

¹¹ 平均加权管理费用由快速和夜间充电站的管理费用构成。

蓝氢生产: 蓝氢是采用碳捕获和储存(CCS)技术从天然气中生产出来的。蓝氢和灰氢生产成本的估算基于Baldino et al. (2020)开发的模型。该模型采用多项单独成本构成,其中包括非燃料氢生产、燃料(天然气)、碳捕获和储存(CCS)以及蓝氢相关的其他成本。我们收集了中国三个城市工业用户的天然气零售价格,并将其输入模型中。我们使用其他研究(China Hydrogen Alliance, 2019; Jiang et al., 2019; Liu et al., 2018; S. Zhang & Peng, 2018)得出的中国特征参数更新了Baldino et al. (2020)中的其他(非燃料)成本和CCS成本。对于蓝氢成本的预测,我们假设其他成本和CCS成本保持在当前水平,因为从天然气中制氢的甲烷重整(SMR)技术已经相对成熟,不太可能大幅降低成本。然而,对于CCS,其未来价格仍存在很大的不确定性。因此,本研究只考虑了蓝氢生产的燃料成本变化,并假设中国的天然气价格跟随全球市场的增长趋势(美国能源信息署, 2020)。

氢气输送—管道运输: 我们假设,中国之所以建设氢气输送管道网络,是因为与其他氢气输送方式相比,中国在大规模长距离运输方面具有经济优势(中国氢能联盟, 2019)。我们使用中国发布的信息(EV100, 2020)更新了Baldino et al. (2020)开发的模型中新建输送管道的每米成本。我们根据每个城市的规模和加氢站的数量估算了这三个城市的潜在管道距离,这些将在下一章节详细介绍。我们将计算出的管道总成本按20年的管道使用寿命均摊。然后,我们使用每年的氢气输送量来估算每千克氢气的输送成本。

加氢站: 表20给出了2020年和2030年三个城市加氢站数量以及年氢气需求量的假设。我们根据北京(北京市经济和信息化局, 2020)和上海(上海市经济和信息化委员会, 2020)等城市现有和规划的项目估算出加氢站的数量。我们假设2020年各加氢站的日加注能力为500千克,这是当前的典型情况(Si & Yu, 2019)。到2030年,我们假设大约三分之一加氢站的日加注能力与2020年相同,而其余加氢站的日加注能力达到1000千克,以满足更高的需求。基于这些假设,我们计算出年氢气需求量,如表20所示。对于2020年成本,我们从三项研究中得出中国加氢站(日加注能力约为500千克)的平均成本(中国氢能联盟, 2019; EV100, 2020, p. 100; Si & Yu, 2019)。对于未来的成本预测,根据之前的一项研究(加州空气资源委员会, 2019),我们假设2020-2030年间500千克加氢站的成本每年降低1%。在此基础上,我们按照设备容量和成本之间的指数关系(换算系数为0.7)来估算1000千克加氢站的成本。

表20. 2020年和2030年北京、上海和深圳三地加氢站数量及年氢气需求量的假设

年份	北京		上海		深圳	
	2020	2030	2020	2030	2020	2030
加氢站数量	25	150	10	150	5	50
年氢气需求量(吨)	4562.5	45625	1825	45625	912.5	15512.5

表21和表22给出了2020年和2030年中国三个城市蓝氢和绿氢加氢站的成本模型。我们还考虑了政策支持对氢成本的影响。中国一般通过两种方式对加氢站提供财政支持:(1)加氢站建设补助;(2)加氢补贴(上限为20元/千克)。目前,北京和深圳不提供任何形式的资金支持,而上海为每个加氢站提供200万元人民币的建设补助。现有政策中的财政支持情景因素对最终成本产生影响。我们还提供了一个假设情景,即在现有政策设计的基础上,对三个城市均提供20元/千克的加氢补贴。

表21. 2020年和2030年三个城市蓝氢加氢站的成本建模

蓝氢成本	北京		上海		深圳	
	2020	2030	2020	2030	2020	2030
无财政支持 (元/千克)	43.7	38.87	46.73	36.07	54.37	46.03
现有财政支持 (元/千克)	43.7	38.87	42.05	32.46	54.37	46.03
假设提供最强大的财政支持 (元/千克)	23.7	18.87	22.05	12.46	34.37	26.03

表22. 2020年和2030年三个城市绿氢加氢站的成本建模

绿氢成本	北京		上海		深圳	
	2020	2030	2020	2030	2020	2030
无财政支持 (元/千克)	94	66.2	76.8	49.6	113.5	75.7
现有财政支持 (元/千克)	94	66.2	69.2	44.7	113.5	75.7
假设提供最强大的财政支持 (元/千克)	74	46.2	49	24.7	93.5	55.7

研究结果

主要结论

图14显示了中国三个城市三类货车的纯电动和燃料电池车型相对于柴油车型产生的额外拥有总成本。纯电动车型相对于柴油车型的拥有总成本平价主要在未来十年内实现。纯电动半挂牵引车将在2029-2030年实现与同款柴油车的拥有总成本平价，而载货汽车将在2026-2027年实现成本平价，并且到2030年，相对于同款柴油车的成本优势将超过10万元人民币。纯电动自卸汽车最早将在2024-2025年比同款柴油车更具成本效益，这是目前最有希望实现电动化的货车车型。此外，到2030年左右其成本优势将达到约20万元人民币。

对于燃料电池货车，在2030年之前所有货车车型均无法实现成本平价，并且该技术的拥有总成本比柴油和纯电动车型高出许多倍。在没有政策干预的情况下，燃料电池载货汽车和自卸汽车可在2030年代初期实现拥有总成本平价，而半挂牵引车的拥有总成本平价将在2030年之后很长一段时期内才能实现。根据各城市的氢燃料预测价格，燃料电池半挂牵引车相对于同款柴油车的拥有总成本差距将大幅缩小，到2030年该差距将缩小到50万至70万元人民币，这远低于目前280万至320万元人民币的拥有总成本差距。表23汇总了三个城市各类货车的成本平价年份。

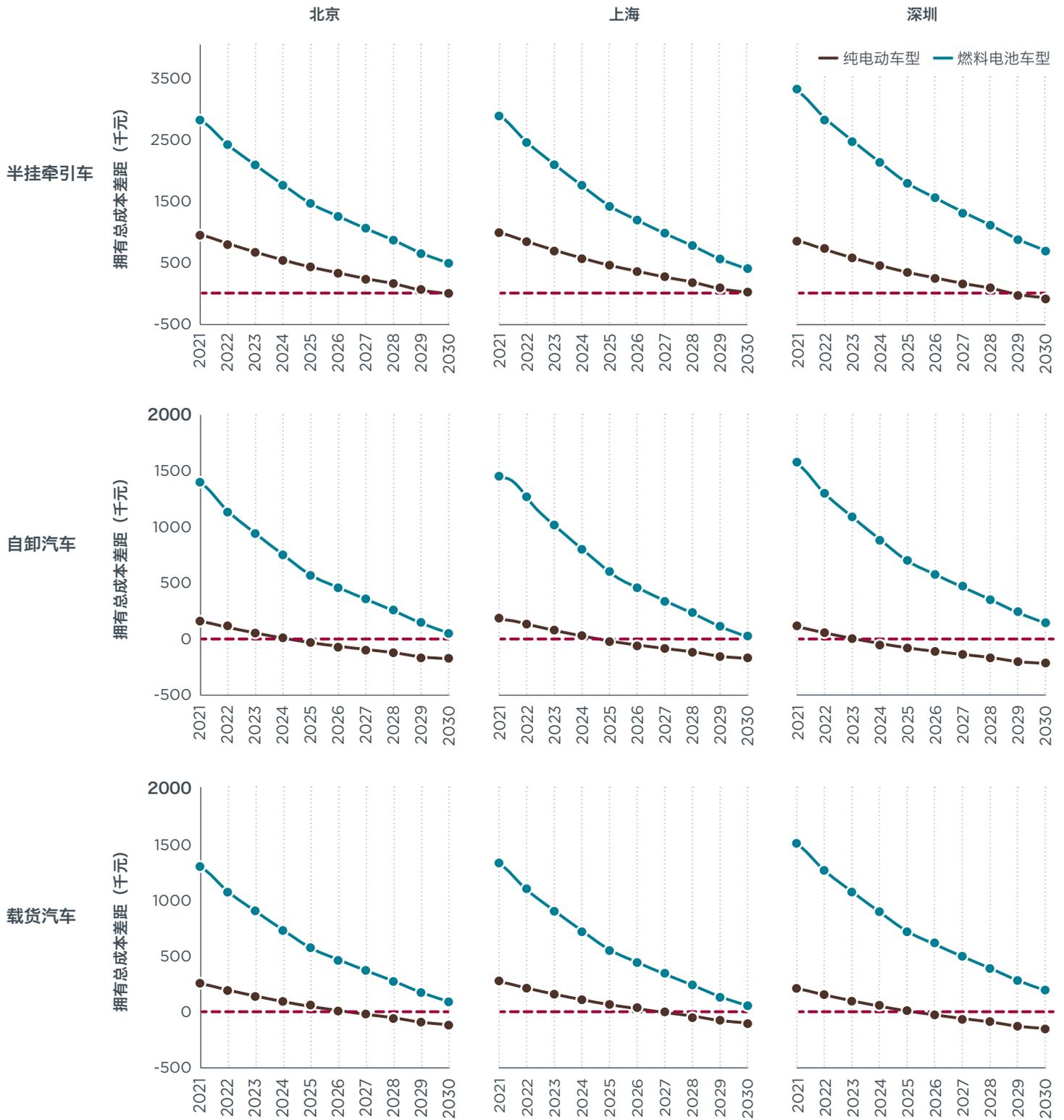


图14.纯电动和燃料电池货车相对于柴油车型的拥有总成本差距变化

表23.三类货车的拥有总成本平价年份

		北京	上海	深圳
自卸汽车	BET	2025	2025	2024
	FCET	2030之后	2030之后	2030之后
载货汽车	BET	2027	2027	2026
	FCET	2030之后	2030之后	2030之后
半挂牵引车	BET	2030	2030	2029
	FCET	2030之后	2030之后	2030之后

为了更好地了解不同货车车型和技术的拥有总成本平价情况，图15显示了2020年和2030年纯电动和燃料电池货车相对于柴油货车的拥有总成本细目。我们仅以北京为例，因为在其他城市运营的货车与其情况类似。

与柴油自卸汽车相比，得益于燃料成本的大幅降低，纯电动自卸汽车最早实现拥有总成本平价。此情况主要由以下两个因素共同作用：

1. 能耗差异。柴油自卸汽车的油耗在各类货车车型中最高，而纯电动自卸汽车得益于动能回收，其整体能耗降低（见图6）。
2. 电价差异。纯电动自卸汽车的总电费（包括能源成本、基本电价和管理费等）最低，因为它们在夜间使用单个充电站，从而降低了管理费和电费（见图13）。

由于能源效率的提升抵消了较高的购车成本以及货车、能源储存系统和动力装置的成本降低导致燃料成本降低，所以其他两类货车在2030年左右可以实现拥有总成本平价。

对于燃料电池技术，由于燃料电池货车和氢燃料的成本相对较高，未来十年内各类货车车型都无法实现与柴油技术的拥有总成本平价。然而到2030年，由于货车能源效率的提高和氢燃料成本的降低，两者拥有总成本差距将大幅缩小，此外这两个因素共同降低了燃料成本，并且货车成本也将继续下降。这一趋势很有积极意义，因为这表明，只要政策得当，燃料电池电动技术可以在未来十年内实现拥有总成本平价，我们将在下一章节对此进行分析。到2030年，半挂牵引车的拥有总成本差距是三种车型中最大，而这一成本差距主要是由于其较高的燃料成本。即使到2030年，货车油耗和氢能价格的大幅下降，燃料电池半挂牵引车的燃料成本仍然很高，这主要还是受到氢价居高不下的影响。这也反过来说明了补贴氢燃料价格的重要性。

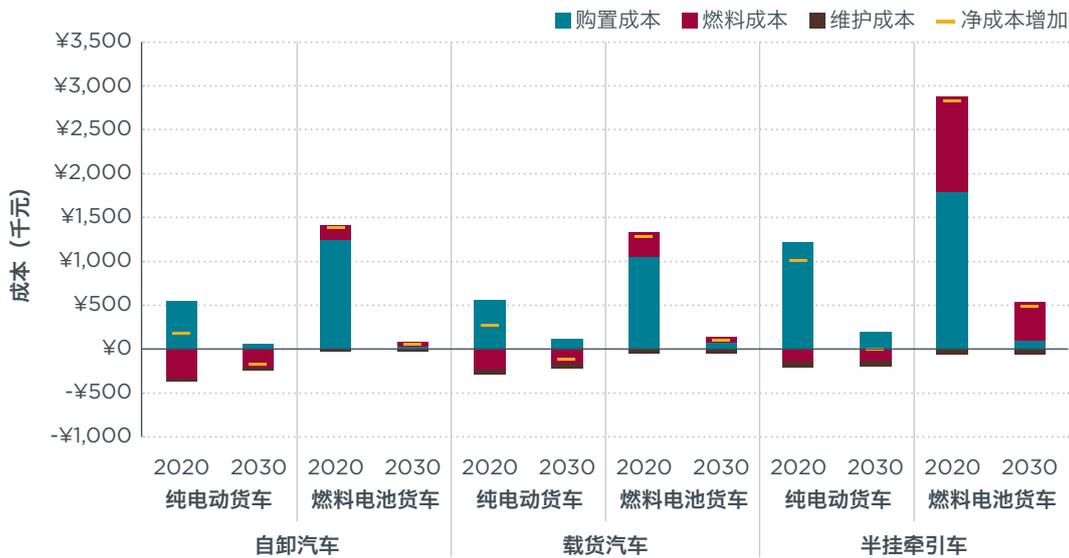


图15. 各类货车车型和技术相对于柴油技术的拥有总成本科目（以北京为例）

政策措施分析

本章节介绍了一系列可实施的政策措施，以便在北京、上海和深圳三地加快推广零排放重型车。可采用多种类型的政策干预措施，例如购车补贴和用车激励（针对货车运营成本的激励措施）。我们研究了六种政策措施对拥有总成本平价时间点的影响：

1. 购置补贴；
2. 减免部分零排放重型车的道路通行费；
3. 针对电力和氢燃料价格提供能源补贴；
4. 针对柴油货车征收道路温室气体排放费用；
5. 针对尾气排放征收碳税；
6. 上述政策的组合。

本分析范围仅限于评估上述政策对新能源汽车拥有总成本及其成本平价年份的影响。本分析并未量化政府的政策成本，因为这超出了本文的范围。此外，本文未涉及2020-2030年间的政策退出情景。

购置补贴

购置补贴主要由地方政府承担，旨在帮助货车运营商降低货车的购置成本，鼓励使用零排放重型车。在本研究中，我们认为燃料电池货车可获得40万元人民币(Xiao, 2019)的购置补贴，而纯电动货车的购置补贴为252元/kWh（基于电池容量），非公共用途货车的补贴上限为4万元(MOF et al., 2020)。根据“关于重量与续航里程的假设”章节中每辆货车所需的电池容量，所有纯电动货车均可获得最高4万元人民币的购置补贴。我们假设北京、上海和深圳三地均提供相同的购置补贴政策。

表24比较了有/无购置补贴情况下的拥有总成本平价年份。大体上，燃料电池货车从购置补贴政策中受益最大，因为每辆货车的补贴金额高达40万元人民币，这使自卸汽车和载货汽车实现拥有总成本平价的时间缩短了2-3年（2027-2028年）。即使有购置激励措施，半挂牵引车仍无法在2030年之前实现拥有总成本平价。另一

方面，纯电动货车从购置补贴政策中受益较小，因为每辆货车的补贴金额仅为4万元人民币，载货汽车和自卸汽车实现拥有总成本平价的时间仅缩短了1年。即使纯电动货车的购置激励足够高也无法继续提前拥有总成本的平价时间点。

表24. 在提供购置补贴情景下，三类货车车型的拥有总成本平价年份

		北京		上海		深圳	
		有	无	有	无	有	无
自卸汽车	BET	2024	2025	2024	2025	2023	2024
	FCET	2028	2030之后	2028	2030之后	2029	2030之后
载货汽车	BET	2026	2027	2026	2027	2025	2026
	FCET	2027	2030之后	2027	2030之后	2029	2030之后
半挂牵引车	BET	2030	2030	2030	2030	2029	2029
	FCET	2030之后	2030之后	2030之后	2030之后	2030之后	2030之后

粗体数字表示不同城市各类货车车型和技术的拥有总成本平价年份。

减免部分零排放重型车的道路通行费

中国实行基于里程的道路收费模式，货车车型不同，收费标准不同。自卸汽车和半挂牵引车的道路通行费为1.5元/公里，而载货汽车的道路通行费则高达2元/公里。此外，每辆货车的总道路通行费是由其在高速公路上的行车里程决定的。表25汇总了中国现行的高速公路通行费用。这项政策旨在为零排放重型车减免75%的道路通行费用。

表25: 中国现行高速公路通行费用假设¹²

	自卸汽车	载货汽车	半挂牵引车
道路通行费 (元/公里)	1.5	2	1.5
收费道路行车里程占比	10%	10%	50%

表26比较了有无道路通行费减免情况下零排放重型车的拥有总成本平价时间点。纯电动半挂牵引车从该政策干预中受益最大，因为其在三个城市的拥有总成本平价时间均缩短了3-4年，最晚在2026-2027年可以实现与同款柴油车的拥有总成本平价。同样，该政策有助于纯电动载货汽车在2024-2025年实现拥有总成本平价。半挂牵引车成本平价时间点的大幅提前主要是由于其约50%的里程是在高速公路上行驶的，这使其成为这项免税政策最大的受益车型。

得益于这项政策，燃料电池货车的拥有总成本确实出现了下降，其中半挂牵引车将降低约35万元人民币，载货汽车和自卸汽车降低约3万至9万元人民币；然而，此降低幅度不足以在2030年之前缩小与同款柴油车的成本差距，尤其是半挂牵引车（见图14）。尽管到2030年自卸汽车和载货汽车与同款柴油车的拥有总成本差距非常小，但是这两类车型从该项政策中的受益非常小，因为它们的总行驶里程中只有约10%是在高速公路上行驶的，这就解释了它们在2030年之前无法实现拥有总成本平价的原因（图14）。

12 在实际生活中，不同等级、不同区域的道路收费标准并不统一。为简化计算，此处假定不同道路为统一的收费标准

表26:道路通行费减免情况下,三类货车车型的拥有总成本平价年份

		北京		上海		深圳	
		有	无	有	无	有	无
自卸汽车	BET	2024	2025	2024	2025	2023	2024
	FCET	2030之后	2030之后	2030	2030之后	2030之后	2030之后
载货汽车	BET	2025	2027	2025	2027	2024	2026
	FCET	2030之后	2030之后	2030	2030之后	2030之后	2030之后
半挂牵引车	BET	2027	2030	2027	2030	2026	2029
	FCET	2030之后	2030之后	2030之后	2030之后	2030之后	2030之后

粗体数字表示不同城市各类货车车型和技术的拥有总成本平价年份。

电费和氢能补贴

货车燃料成本是其拥有总成本的主要组成部分,适当的燃料价格激励措施可大幅提前成本平价时间点。我们考虑针对电费和氢能价格采取以下能源激励措施:

- » 对北京、上海和深圳提供20元/千克的加氢补贴。
- » 减免基本电价,载货汽车和半挂牵引车总电价降低0.45元/kWh,自卸汽车总电价降低0.33元/kWh。

表27给出了采取上述能源激励措施情况下的拥有总成本平价年份。对于纯电动货车,在该政策情景下,自卸汽车到2022年便可实现成本平价。与未采取激励措施的情况相比,载货汽车在这三个城市提前3年实现成本平价(到2023-2024年)。半挂牵引车的成本平价时间点提前了2-3年,在2026-2030年实现拥有总成本平价。

另一方面,燃料电池货车也受益于这项氢燃料价格激励措施;然而,不同货车车型和不同城市的实施效果存在很大差异。在北京和上海,自卸汽车和载货汽车将在2027-2028年实现拥有总成本平价;而在深圳,在2029年之前无法实现成本平价。这是由于深圳的氢能价格一直居高不下(参见“氢能价格”章节),比北京和上海的氢价格高出近20%。由于半挂牵引车与同款柴油车的拥有总成本差距非常大(2030年为40万至70万元人民币),所以该项激励措施对其拥有总成本平价时间点的影响有限;由于上海氢价较低,上海地区半挂牵引车到2028年可实现成本平价。

表27:采取能源激励措施情况下,三类车型的拥有总成本平价年份

		北京		上海		深圳	
		有	无	有	无	有	无
自卸汽车	BET	2022	2025	2022	2025	2022	2024
	FCET	2028	2030之后	2027	2030之后	2029	2030之后
载货汽车	BET	2023	2027	2024	2027	2023	2026
	FCET	2028	2030之后	2027	2030之后	2029	2030之后
半挂牵引车	BET	2027	2030	2028	2030	2027	2029
	FCET	2030	2030之后	2028	2030之后	2030	2030之后

粗体数字表示不同城市各类货车车型和技术的拥有总成本平价年份。

向柴油货车征收道路温室气体排放费用

向柴油货车征收道路温室气体排放费用有助于地方政府解决与道路基础设施融资、交通拥堵和温室气体排放相关的问题。在本研究中, 我们建议对柴油货车征收0.5元/公里的温室气体道路排放费用。此方法类似于欧盟关于重型车的提案(欧盟理事会, 2020), 该提案要求征收0.08欧元/公里的温室气体排放费用。该费用将仅在收费道路(如高速公路)上对货车征收。结合前述假设, 载货汽车和自卸汽车的收费范围为总行驶里程的10%, 半挂牵引车的收费范围为总行驶里程的50%。

表28给出了征收道路温室气体排放费用情况下的拥有总成本平价时间点。与其他两类货车车型相比, 纯电动半挂牵引车从该干预政策中受益最大, 因为其在收费道路上的行车里程占比较高(占其总行车里程的50%)。纯电动半挂牵引车在2028-2029年可实现拥有总成本平价, 比无政策干预情景提前一年; 而在此政策干预下, 燃料电池货车的拥有总成本平价时间点未提前。虽然燃料电池半挂牵引车的成本因此得到了降低(约15万元人民币), 但其与同款柴油车之间的巨大拥有总成本差距导致其无法使平价时间点提前。由于载货汽车和自卸汽车在高速公路上的行驶里程占比较低(仅占总行车里程的10%), 在此政策下将产生约2万元人民币的成本优势。

与其他政策不同, 这一政策在财政上是长期可持续的, 因为其通过对柴油货车的温室气体排放征税来弥补因空气污染和气候影响而产生的社会外部性成本。然而, 如果该政策想要对零排放车型的推广产生实质性的影响, 则应征收更高的温室气体排放费用以促进运营商的快速转型。

表28.在征收温室气体排放费用的情况下, 三类车型的拥有总成本平价年份

		北京		上海		深圳	
		有	无	有	无	有	无
自卸汽车	BET	2024	2025	2025	2025	2023	2024
	FCET	2030之后	2030之后	2030之后	2030之后	2030之后	2030之后
载货汽车	BET	2026	2027	2027	2027	2025	2026
	FCET	2030之后	2030之后	2030之后	2030之后	2030之后	2030之后
半挂牵引车	BET	2029	2030	2029	2030	2028	2029
	FCET	2030之后	2030之后	2030之后	2030之后	2030之后	2030之后

粗体数字表示不同城市各类货车车型和技术的拥有总成本平价年份。

碳税

中国于2021年7月针对多个特定行业启动了碳排放交易机制, 也创造出了全球规模最大的碳交易市场(Zhou, 2021)。该碳排放交易机制在未来可能会包括对交通运输领域的尾气排放征收碳税, 这将增加柴油货车的拥有总成本。在本研究中, 我们假设每吨二氧化碳当量的碳税将按**表29**所示的税率征收。由于以下数字基于中国碳论坛2019年发布的调查报告, 所以是预期价格(中国碳论坛, 2019)。

表29:中国碳排放交易机制内的预期碳价(中国碳论坛, 2019)

年份	2020	2025	2030
税率(元/吨二氧化碳当量)	43	75	116

表30给出了针对尾气污染物征收温室气体排放税情况下的拥有总成本平价时间点。2020年, 中国征收的碳税为43元/吨二氧化碳当量, 而欧洲征收的碳税为26.87欧元/吨二氧化碳当量(按照1: 7.83的欧元对人民币汇率计算, 大约相当于210元人民币), 这比欧洲碳排放交易体系征收的碳税低很多倍。由于征收的碳税非常低, 所以对各类货车车型成本平价时间点的提前并不显著, 对纯电动和燃料电池电动技术的推动也不显著。我们假设车辆的使用阶段(从油箱到车轮, tank-to-wheel)的柴油碳强度为每升柴油2.627千克二氧化碳当量。

因此, 如果这项政策旨在推进纯电动货车的拥有总成本平价时间点, 载货汽车要想在未来2-3年内实现成本平价, 那么所征收的尾气温室气体排放税应提高3-5倍, 半挂牵引车要想在2025年左右实现成本平价, 那么温室气体排放税应提高10倍。对于燃料电池货车而言, 要想实现成本平价, 则需要征收更高的碳税, 这在当前政策下是不合理的。

表30. 采用碳税政策后, 三类货车车型的拥有总成本平价年份

		北京		上海		深圳	
		有	无	有	无	有	无
自卸汽车	BET	2024	2025	2024	2025	2023	2024
	FCET	2030之后	2030之后	2030	2030之后	2030	2030之后
载货汽车	BET	2026	2027	2027	2027	2025	2026
	FCET	2030之后	2030之后	2030之后	2030之后	2030之后	2030之后
半挂牵引车	BET	2030	2030	2030	2030	2029	2029
	FCET	2030之后	2030之后	2030之后	2030之后	2030之后	2030之后

粗体数字表示不同城市各类货车车型和技术的拥有总成本平价年份。

政策组合

在本节中, 我们将考虑包含上述五种政策措施的一揽子政策。**图16**给出了在实施所有政策激励措施的情况下各类纯电动货车车型的拥有总成本平价时间点, 其中数据标签中的数字表示它们相对于柴油货车的成本优势(负值表示新能源车型比柴油车型更便宜, 反之则更贵)。根据该假设情形, 在2021-2022年间, 各类纯电动货车车型都将实现与同款柴油车型的成本平价。

另一方面, 在无政策干预的情况下, 燃料电池货车在未来十年内无法与柴油货车实现拥有总成本平价, 如**图17**所示; 其中, 大多数燃料电池货车车型与柴油货车相比仍然存在相当大的成本差距, 如2030年的数据所示。在五项政策综合实施后, 燃料电池货车的优势愈加显著, 其在未来3-4年内可实现拥有总成本平价; 但由于深圳的氢燃料价格较高, 所以其成本平价时间点推迟了2年。



图16. 当实施所有激励措施后, 各类纯电动货车车型的拥有总成本平价年份及变动情况 (数据标签表示与柴油货车的拥有总成本差距, 负值表示电动车型更便宜)

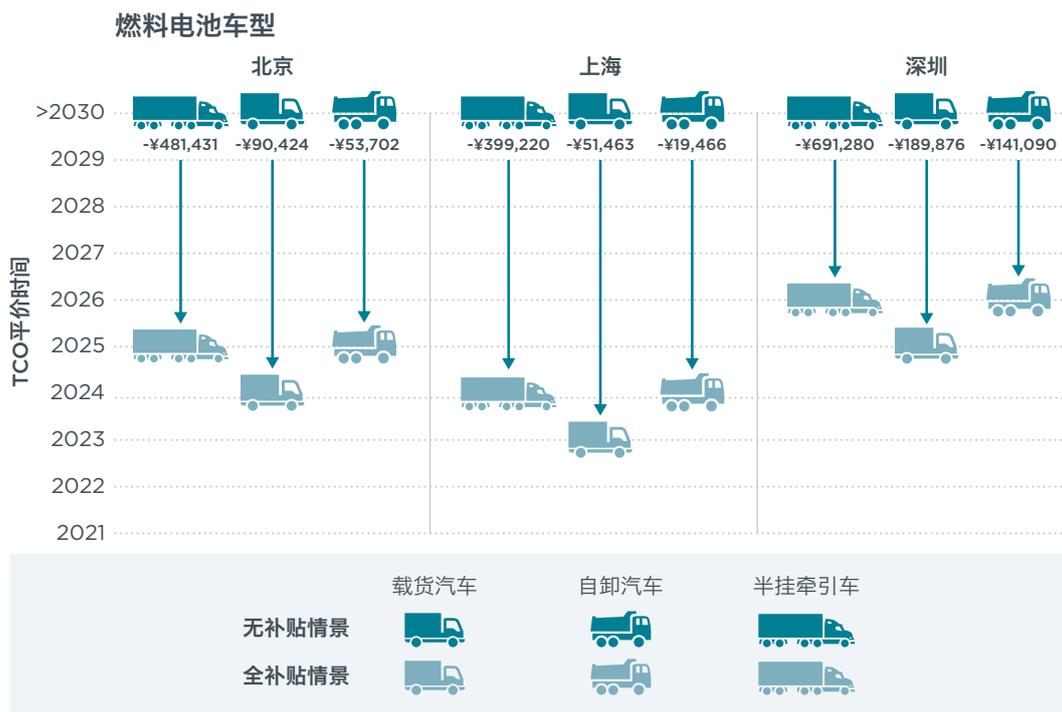


图17. 在实施所有激励措施的情况下, 各类燃料电池货车车型的拥有总成本平价年份及变动情况 (数据标签表示与柴油货车的拥有总成本差距, 正值表示燃料电池车型更昂贵)

未作分析的其他政策

在地方层面, 一些城市正在设立零排放区以规范车辆通行, 而只有符合零排放区规定环境性能标准的车辆才可自由出入。四川成都正在谋求全面实施零排放区, 以改善当地空气质量。成都只允许零排放物流车进入市区 (绕城高速以内地区), 在全天大部分时段禁止传统柴油货车通行 (EVHUI, 2019)。

鉴于此类通行限制的水平 and 进入零排放区的频率存在不确定性，我们在本研究中并未尝试量化其对拥有总成本的影响。

敏感性分析

年行驶里程和日续航里程

货车的年行驶里程(VKT)和日续航里程对其拥有总成本有重大影响，这两个因素可能会改变其实现成本平价的时间。本文研究的中国三个城市的地理位置不同，年行驶里程(AVKT)和日续航里程可能也不同。因此，本章节在进行敏感性分析时考虑了年行驶里程和日续航里程相关的几种场景。在本研究中，我们假定货车每天行驶特定的里程，并假设在其使用寿命内实现100万公里的行驶里程。本章节探讨了各类货车年行驶里程和日续航里程相关的几种场景（如表31所示）；其中参考场景被称为“高场景”，表示高水平的日常行驶。其他两种场景表示相对于高场景，日续航里程和年行驶里程分别减少20%（中场景）和40%（低场景）的情况。所需的电池容量是基于图5所示的续航里程敏感性分析估算的，而储氢瓶容量假设随着日续航里程的变化呈线性变化，因为储氢瓶重量对燃料电池货车能耗的影响可忽略不计。

表31.年行驶里程和日续航里程的敏感性分析假设

场景	自卸汽车				载货汽车				半挂牵引车			
	电池容量 (kWh)		储氢瓶容量 ¹³ (kg)		电池容量(kWh)		储氢瓶容量(kg)		电池容量(kWh)		储氢瓶容量(kg)	
	2020	2030	2020	2030	2020	2030	2020	2030	2020	2030	2020	2030
低 (-40%)	216	162	10.8	6.9	221	163	10.8	6.9	485	340	25.5	15
中 (-20%)	288	216	14.4	9.2	295	225	14.4	9.2	660	445	34	20
高 (参考)	365	275	18	11.5	375	270	18	11.5	845	550	42.5	25

为简单起见，我们在本节中仅展示了两类货车车型和两个城市的分析结果。图18展示了三种场景下北京纯电动半挂牵引车的案例。左图显示了纯电动货车相对于柴油货车的拥有总成本差距随车型年份的变化。一般来说，在低行驶里程场景下，拥有总成本差距会缩小，半挂牵引车可提前实现拥有总成本平价（低行驶里程场景为2029年，而高行驶里程场景为2030年）。这种情况是由两个对立因素导致的，我们可通过分析三种场景下的货车与燃料成本变化来说明，如右图所示。如前所述，行驶里程越低，所需的电池容量越小，货车成本就越低。另一方面，对于行驶里程较低的货车，其纯电动车型相对于柴油车型的燃料成本优势变得更小，这就增加了实现成本平价的时间。然而，在这种情况下，前者是主导因素，因为实现成本平价的总时间随着行驶里程的降低而减少。换句话说，行程较短且日续航里程较低的货车更容易实现成本平价，因为其电池容量较小。其他两类货车车型则不那么敏感，平价时间的变化可忽略不计，这主要是因为在本研究的五年分析期内其电池容量较小且累计行驶里程较低。

13 这是指储氢瓶内可用氢燃料的重量。储氢瓶重量按照20kg/kg H₂进行估计。

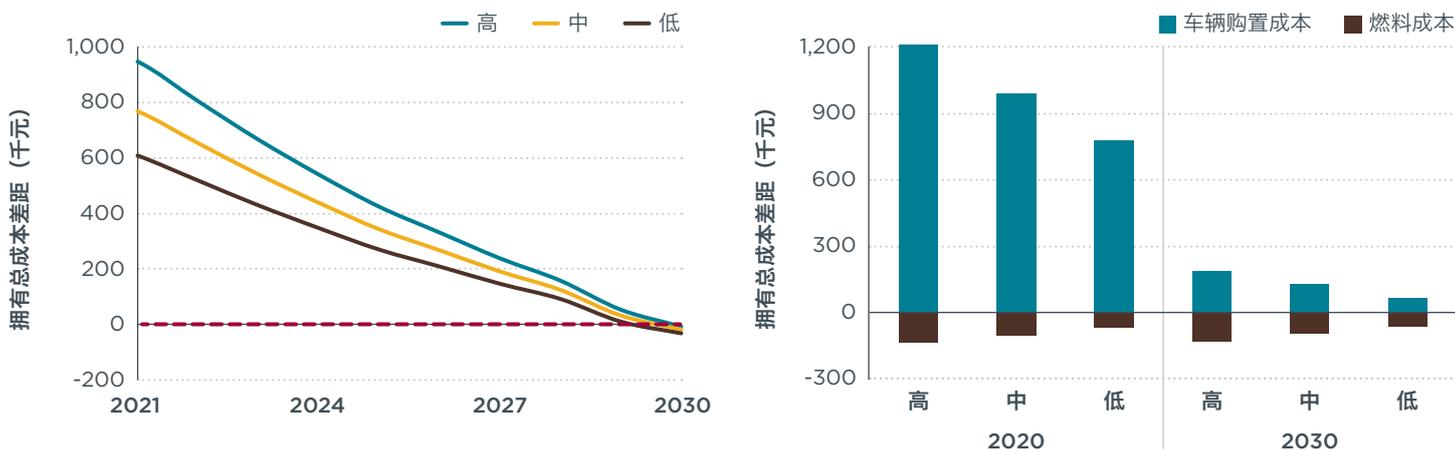


图18.年行驶里程和日续航里程的敏感性分析:以北京纯电动半挂牵引车为例

图19展示了三种场景下深圳纯电动自卸汽车的案例。尽管纯电动自卸汽车在2024年所有行驶里程场景下都实现了与柴油货车的成本平价,但分析其拥有总成本收益是很有意义的。在低行驶里程场景下,到2030年其相对于柴油货车的拥有总成本差距扩大(与柴油自卸汽车相比,拥有总成本收益更低),这与北京半挂牵引车案例中得出的结论相反。在较低行驶里程情况下,货车成本的降低被燃料成本收益的降低所抵消,如图19的右图所示。这主要是由于深圳的自卸汽车电费比其他两个城市低20%。

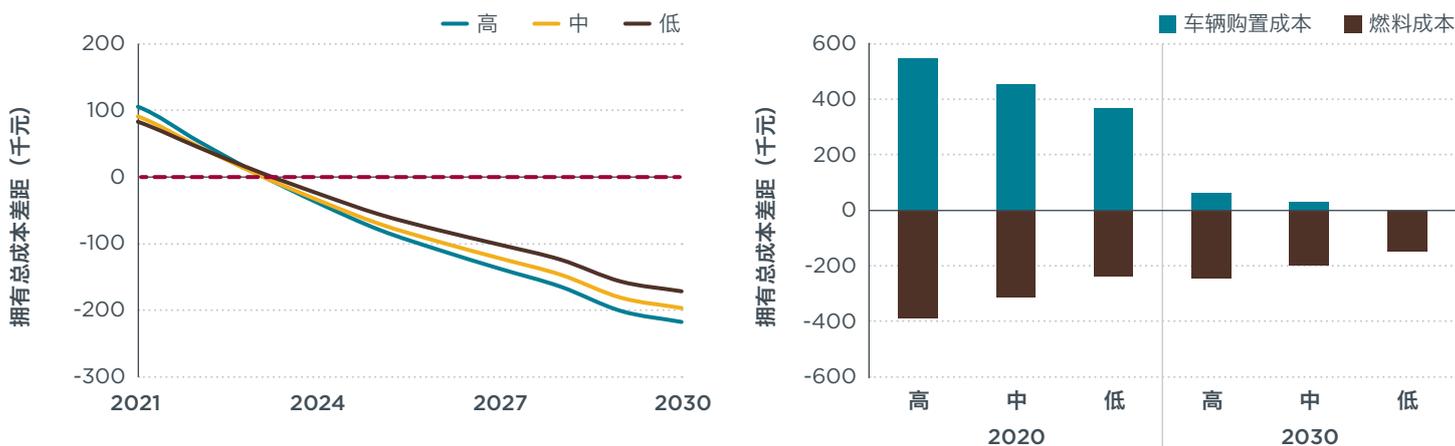


图19.年行驶里程和日续航里程的敏感性分析:以深圳纯电动自卸汽车为例

对于燃料电池货车,为简洁起见,这里仅介绍一个案例。图20展示了三种场景下北京燃料电池半挂牵引车的案例。由于货车与燃料成本的降低,较低行驶里程导致其相对于柴油货车的拥有总成本差距缩小。在较低行驶里程情况下,储氢瓶变得更轻,从而降低了货车的总成本。这种情况主要是由氢燃料成本的降低导致的。考虑到燃料价格和货车燃油经济性,2020年北京燃料电池半挂牵引车基于行驶里程的燃油成本为3.7元/公里,而2020年柴油货车的燃料成本(得益于成本降低)为1.76元/公里。这些数字将会在2030年分别下降到1.94元/公里(燃料电池货车)和1.2元/公里(柴油货车),这也就解释了在较低行驶里程情况下燃料电池货车和柴油货车之间燃料成本差距缩小的原因。其他两类货车车型的情况类似,但由于它们的累计行驶里程和氢燃料消耗量比半挂牵引车低,因此对行驶里程的变化不太敏感。

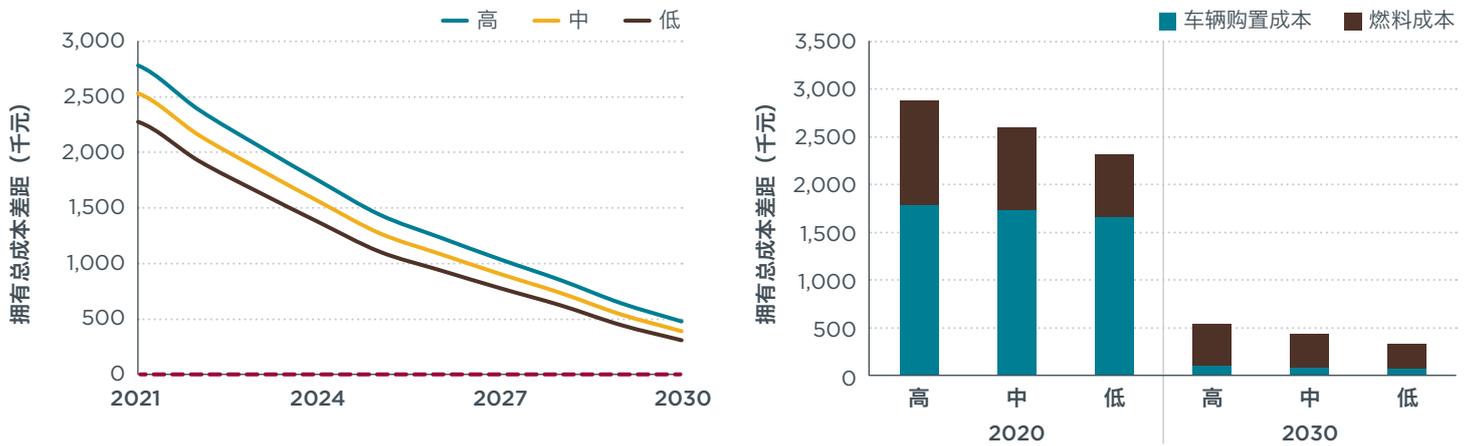


图20.年行驶里程和日续航里程的敏感性分析：以北京燃料电池半挂牵引车为例

可再生能源电力和绿氢

目前，中国的电网仍主要依靠火力发电。迄今为止，煤电占中国电网总容量的60%以上(Baležentis & Štreimikienė, 2019)。尽管国家电网公司承诺到2030年将非化石燃料在一次能源消费中的比例提高到25%(Zheng, 2021)，但煤电厂的供电仍将占总发电容量的近一半。为了充分发挥中国新能源汽车的环境效益并大幅减少重型货车油井到车轮(Well-to-wheel)的二氧化碳排放量，我们研究了使用100%可再生电力和绿氢燃料对拥有总成本平价的影响。为简洁起见，我们仅展示深圳和上海的半挂牵引车和自卸汽车场景，如图21所示。我们之所以选择这两个城市，是因为根据我们估算，上海的绿氢价格最低，而深圳的价格最高（参见前述“氢能价格”章节）。

对于纯电动半挂牵引车，由于可再生电力的价格较高，使用可再生电力将使其与柴油货车的成本平价时间点推迟到2030年之后。根据我们的推测，到2025年电动半挂车与柴油半挂车的拥有总成本差距将降至75万元以下；也就是说，只要采取适当的电价激励措施，即使使用可再生电力，纯电动半挂牵引车仍然可在2025年左右实现成本平价。按照中国目前的电力市场价格，到2025年自卸汽车已经实现相对于柴油货车的成本平价；如果使用可再生电力，其成本平价时间点将推迟到2028年。该时间推迟并不明显，因为2025年纯电动与柴油自卸汽车的拥有总成本差距仅为10万元人民币左右，完全可通过将当前的货车购置补贴（每辆纯电动货车约4万元）的金额翻倍来缩小这一差距。使用可再生电力对纯电动货车的成本平价时间点没有太大影响，而制定适当的政策干预措施将很容易缩小因使用昂贵的可再生电力而导致的拥有总成本差距。

燃料电池货车使用绿氢将进一步推迟其与柴油货车的成本平价时间。在绿氢燃料价格最低的上海，到2030年使用绿氢的燃料电池半挂牵引车与同款柴油车的拥有总成本差距约为100万元，这一数字明显高于使用蓝氢燃料的成本差距（2030年为40万元）。以深圳为例，该成本差距将更大，到2030年半挂牵引车的成本差距将达到200万元，因为据我们估算，三个城市中深圳的绿氢燃料价格最高。在其他两个城市中，自卸汽车的情况类似，但由于其较低的行驶里程和燃料消耗量，到2030年其拥有总成本差距低于半挂牵引车。到2030年，这一成本差距在上海约为25万元，在深圳约为65万元。除非采取重大政策干预措施，否则使用绿氢的燃料电池货车在未来十年内很难具备成本效益。

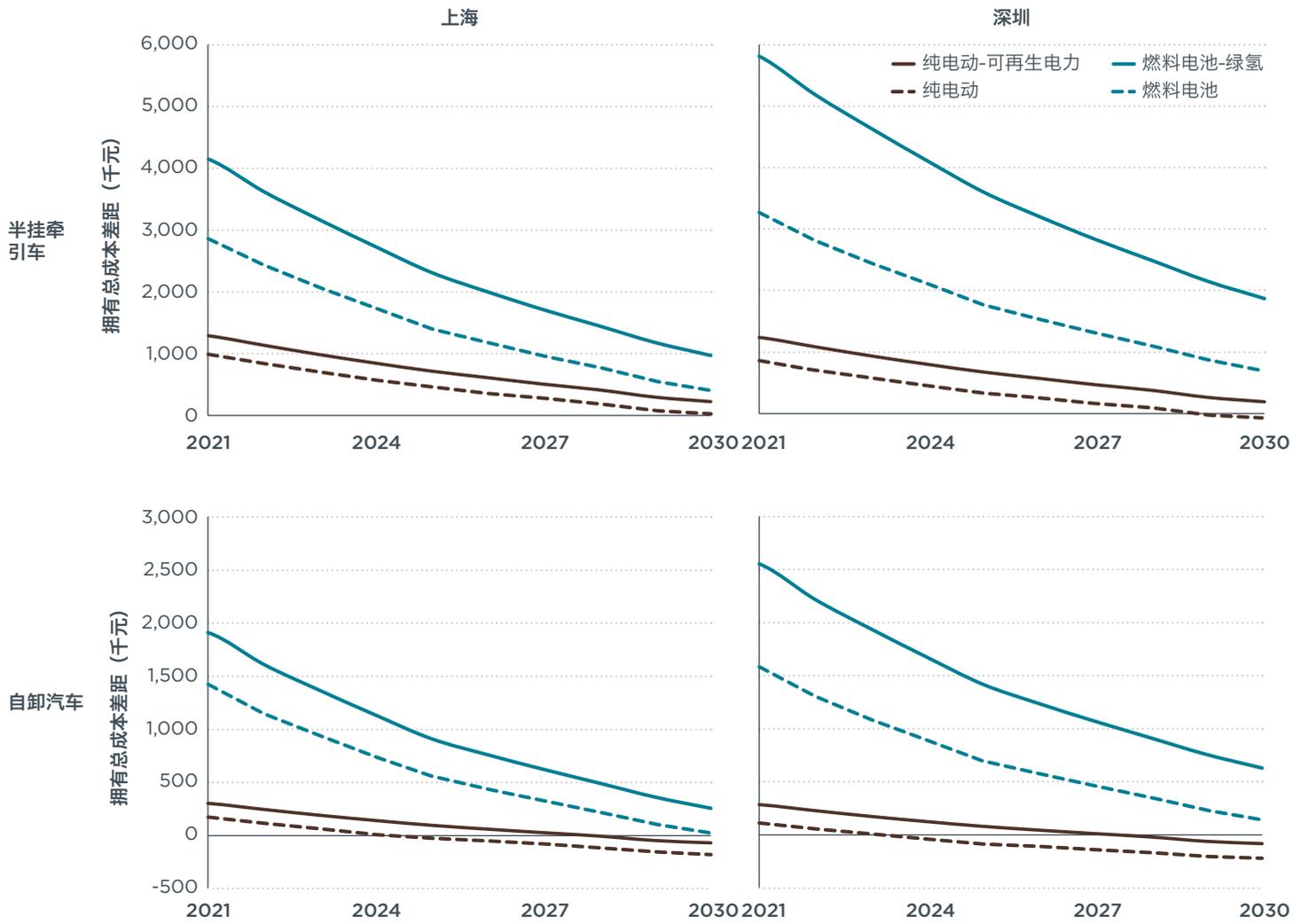


图21.可再生能源电力和绿氢对拥有总成本的影响

研究结论与政策建议

作为中国政府大力推广零排放重型车(HD-NEV)计划的一部分, 本文研究了中国零排放重型车的技术经济表现, 具体分析对象包含三类货运卡车: 自卸汽车、载货汽车和半挂牵引车。本研究聚焦北京、上海和深圳三大城市运营的纯电动货运卡车(BET)和燃料电池货运卡车(FCET), 并且针对2020-2030年间中国三大城市各类货车和技术的拥有总成本(TCO)进行了评估。我们得出以下主要结论:

- » **所有纯电动货运卡车在2021-2030年实现拥有总成本平价。**与柴油货运卡车相比, 纯电动货运卡车的能耗和单位能量所需的燃料成本均更低, 因此可以节省相当可观的燃料成本, 从而弥补较高的车辆购置成本。到2030年, 纯电动半挂牵引车预计要比同款柴油车型便宜5万元, 而纯电动载货汽车的成本则可比同款柴油车型低10-15万元。
- » **与同款柴油车相比, 纯电动自卸汽车最早在2024-2025年可具备成本优势。**由于电动传动系统可进行制动能量回收, 纯电动自卸汽车可以实现非常低的能耗; 由于经常处于瞬态行驶工况, 柴油自卸汽车的油耗是所有车型中最高的。这就使得纯电动自卸汽车有了非常实质性的燃料成本优势, 使其可以在2024-2025年左右就展现出较好的成本效益比。此外, 纯电动自卸汽车仅在夜间进行充电, 电费成本和间接费用就会相应减少。
- » **所有燃料电池货运卡车在2030年之后实现成本平价。**自卸汽车和载货汽车在2030年左右可实现成本平价, 这主要得益于规模经济效应和氢燃料成本下降, 燃料电池成本也会有所下降。半挂牵引车则还需比较长的时间才能实现成本平价, 但到2030年燃料电池半挂牵引车与同款柴油车之间的成本差距可缩小至50万元人民币以内, 所以采取适当的激励政策措施可到2030年实现其成本效益。
- » **使用可再生电力为纯电动货运卡车供电将实现拥有总成本平价的时间缩短三年。**尽管在中国目前的发电结构中可再生电力的成本更高, 但是对实现拥有总成本平价的影响非常有限, 这是因为可再生电力驱动的纯电动自卸汽车到2025年已经实现成本平价, 在2021年也仅贵17-20万元人民币。使用可再生电力的纯电动半挂牵引车仍可在2030年之后实现拥有总成本平价, 而到2025年其成本仍将高出近75万元人民币。如果采取适当的政策干预, 即使使用可再生电力, 纯电动货运卡车也将立马具有成本效益。
- » **使用绿氢的燃料电池货运卡车需要更广泛的政策支持才能具备比肩纯电动和柴油货运卡车的可能。**由于绿氢燃料的成本较高, 不同燃料电池货运卡车与其同款柴油车相比具有巨大的拥有总成本差距。燃料电池半挂牵引车与柴油车的拥有总成本差距最大, 在上海该差距达到100万元人民币, 在深圳达到200万元人民币。中国不同城市的氢价格存在差异, 这主要是由当地可再生电力的成本不同导致的。其他类型燃料电池货运卡车的拥有总成本差距会略小一些。要想让绿氢燃料电池货运卡车在成本竞争力方面抗衡纯电动和柴油货运卡车, 则需要更广泛的政策支持。

本研究还分析探究了几项有助于在未来几年实现拥有总成本平价的政策干预措施:

- » **减免零排放重型车的道路通行费有助于所有纯电动货运卡车在2024-2027年间实现拥有总成本平价。**道路通行费是货运卡车(尤其是半挂牵引车)拥有总成本的重要组成部分。如果免除部分(75%)道路通行费, 半挂牵引车将有望到2027年实现拥有总成本平价, 载货汽车将有望到2025年实现成本平价。燃料

电池货运卡车也将从中受益，但对其成本平价时间点的影响并不显著。

- » **免除基本电价有助于纯电动货运卡车提前三年（2022-2027年）实现拥有总成本平价。**基本电价是电费的重要组成部分，占总电力成本的33%-40%。如果免除这些电费，半挂牵引车将有望到2027年实现成本平价。此外，载货汽车到2023-2024年将具有成本效益，而自卸汽车最早可在2022年实现拥有总成本平价。
- » **20元/千克的绿氢激励措施有助于一些货运卡车在2026-2030年实现成本平价。**在该政策影响下，燃料电池载货汽车和自卸汽车可在2027年实现成本平价，尤其是在氢价格最低的上海地区。由于半挂牵引车与其柴油同款的拥有总成本差距非常大，到2030年此差距将超过75万元人民币，因此半挂牵引车受益于平价时间点的边际变化。
- » **碳定价（对柴油货运卡车征收道路排放费用）有助于纯电动货运卡车在未来3-4年内实现成本平价。**目前中国的碳排放交易机制可针对柴油货运卡车的二氧化碳尾气排放征收排放税。就目前的二氧化碳排放税而言，其对零排放重型车的影响微乎其微；但是，如果将此税率增加三到五倍的话，载货汽车将立马具备成本效益。同时，要想让纯电动半挂牵引车具备成本效益，那么需要对其柴油同款征收非常高的二氧化碳排放税，然而该政策很难在短时间内对实现所有燃料电池货运卡车的拥有总成本平价产生影响。
- » **购置激励措施可使拥有总成本平价提前1-3年，这相当于现行激励措施综合实施所能达到的效果。**虽然目前尚不清楚政府将出台的燃料电池货运卡车购置激励政策，如果基于2019年推行的40万元人民币的购置补贴，那么燃料电池货运卡车将在未来十年内实现拥有总成本平价。对于纯电动货运卡车而言，其购置补贴上限为4万元人民币，所以影响微乎其微。购置激励措施的效果类似于针对运营成本的其他措施。

基于以上研究成果，我们针对中国零排放重型车推广政策的制定提出以下政策建议：

- » **针对零排放重型车提出较为激进的短期销量要求。**在拥有总成本方面，到2025年零排放载货汽车和自卸汽车将低于柴油车，到2028年零排放半挂牵引车将低于柴油车。但是，货运卡车运营商只有在零排放重型车供应非常充沛的情况下才能获得经济收益。加州是目前唯一一个通过立法规定零排放重型汽车销量占比的地区，其在设定销售目标方面提供了一个很好的实践范例。加州要求到2025年重型载货汽车新车中零排放车辆的占比要达到11%，到2030年要达到50%。对于半挂牵引车，要求到2025年零排放车辆销量占比达到5%，2030年达到30%。中国要想实现2060年碳中和的宏伟愿景就需要中央政府制定至少与加州激进程度相仿的目标。
- » **设定零排放车辆的长期销量目标，为生产企业提供明确的发展蓝图，促进其进行产品设计和投资。**政府部门可以采用短期约束性销售要求和长期非约束性目标相结合的方式，前者主要为了确保快速启动供应链需求；后者则为投资的长期性提供了保障。二者的结合对于创建一个巨大而持久的市场是至关重要的，因为规模经济将降低制造成本，从而降低零排放重型车（尤其是半挂牵引车）的拥有总成本，这也是减碳最重要且最具挑战性的环节，所以将其与柴油车的拥有总成本平价时间点推迟至2030年左右。
- » **2021-2025年期间为实现零排放重型车与柴油车之间的拥有总成本平价提供激励政策。**充分的政策激励措施可缩小重型柴油车与零排放重型车之间的拥有总成本差距。政策激励措施包括购置补贴、能源成本改革或补贴，以及降低政

府规定的其他运营成本，例如道路通行费。从财政角度来讲，补贴是不可能长期持续存在的，应当限定补贴周期，以便在市场起步阶段创造充足的需求，然后在规模经济效应显现且制造成本降低时逐步退出。从长远来看，可以采用财政可持续的替代方案，例如遵循污染者付费原则。这包括对柴油车的购置和运营从重征税，增加柴油车的外部成本（例如空气污染和气候效应），并为激励零排放技术发展的计划提供资金支持。

- » **针对零排放重型车推广实施未纳入本研究范围的财政激励政策。**例如，赋予零排放重型车进入零/低排放区的特权，这可增加零排放重型车的市场需求。本研究并未量化这些激励政策措施对拥有总成本产生的影响。四川省会成都推行了这一政策，并取得了积极成果。在实施该政策两年后，成都于2021年3月成为全国零排放重型车销量领先城市。
- » **制定出台具备车型差异化但技术中立的政策措施。**考虑到不同类型和用途的车辆拥有不同的排放量，在制定激励政策时应针对污染物排放量最高的车型大力推行零排放车辆。例如，半挂牵引车是污染物排放量最高的车型，同时在2021-2025年期间实现与柴油车的成本平价也将面临更大的挑战。因此，针对此类车型制定政策措施将大幅减少二氧化碳排放量。鉴于不同零排放技术路径之间的拥有总成本存在明显差异，从长远来看，在制定政策时应避免偏袒纯电动或氢燃料电池货运卡车。在市场发展的早期阶段，可能需要对纯电动和燃料电池货运卡车采取差异化激励措施，以激励创新并降低这两种技术路径的制造成本。然而，随着市场发展和逐步取消激励措施，公平的竞争环境将有利于凸显某个特定领域最具成本效益的技术。我们的分析表明，在不考虑激励政策的情况下，纯电动货运卡车更具成本优势。

参考文献

- Agenbroad, J., Creyts, J., Mullaney, D., Song, J., & Wang, Z. (2016). *Improving efficiency in Chinese trucking and logistics*. RMI.
- China Automotive Technology and Research Center. (2016). *Annual Report on the Development of China's Automobile Industry*. http://www.caam.org.cn/chn/3/cate_23/con_5186256.html
- Clean Air Initiative for Asian Cities Center. (2010). *Guangzhou Green Trucks Pilot Project: Technology Pilot Report for the World Bank "Truck GHG Emission Reduction Pilot Project."* <http://documents1.worldbank.org/curated/en/285951468218406849/pdf/694430ESMOP1100aft0Final011June2010.pdf>
- Hao, H., Wang, H., Ouyang, M., & Cheng, F. (2011). Vehicle survival patterns in China. *Science China Technological Sciences*, 54(3), 625–629. <https://doi.org/10.1007/s11431-010-4256-1>
- Hsieh, I.-Y. L., & Green, W. H. (2020). Transition to Electric Vehicles in China: Implications for Total Cost of Ownership and Cost to Society. *SAE International Journal of Sustainable Transportation, Energy, Environment, & Policy*, 1(2), 13-01-02-0005. <https://doi.org/10.4271/13-01-02-0005>
- Huo, H., Zhang, Q., He, K., Yao, Z., & Wang, M. (2012). Vehicle-use intensity in China: Current status and future trend. *Energy Policy*, 43, 6–16. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.09.019>
- Hyqfocus.com. (2019). *One figure for oil price composition in China*. <https://www.hyqfocus.com/jsp/model.jsp?id=1561&modelType=2>
- InsideEVs. (2020). *Electricity prices for Beijing 2020*. <http://fgw.beijing.gov.cn/fgwzwwgk/zcgk/bwqtwj/202011/P020201130669129004290.pdf>
- Lang, J., Cheng, S., Wei, W., Zhou, Y., Wei, X., & Chen, D. (2012). A study on the trends of vehicular emissions in the Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) region, China. *Atmospheric Environment*, 62, 605–614. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.09.006>
- Li, W., Dai, Y., Ma, L., Hao, H., Lu, H., Albinson, R., & Li, Z. (2015). Oil-saving pathways until 2030 for road freight transportation in China based on a cost-optimization model. *Energy*, 86, 369–384. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.04.033>
- Meszler, D., Delgado, O., & Yang, L. (2019). *Heavy-duty vehicles in China: Cost-effectiveness of fuel-efficiency and CO2 reduction technologies for long-haul tractor-trailers in the 2025–2030 timeframe*. International Council on Clean Transportation. <https://theicct.org/publications/heavy-duty-vehicles-china-cost-effectiveness-fuel-efficiency-and-co2-reduction>
- Ministry of Environmental Protection, State Statistics Bureau, & Ministry of Agriculture. (2010). *First National Census on Pollution Sources*. http://www.china.org.cn/china/2010-02/09/content_19394384.htm
- OFweek.com. (2021). 五部委官宣启动京、沪、粤燃料电池汽车示范应用工作! <https://nev.ofweek.com/2021-09/ART-71011-8480-30522616.html>
- OICA. (2020). *China Commercial vehicle sales 2005–2019*. TheGlobalEconomy.Com. https://www.theglobaleconomy.com/China/commercial_vehicle_sales/
- Zhu, D., Patella, D., Steinmetz, R., & Peamsilpakulchorn, P. (2016). *The Bhutan Electric Vehicle Initiative*.

附录A: 零排放货车零售价格验证

根据货车制造商公布的数据、提供商用车服务的网络平台以及文献中的其他研究对零排放货车的零售价进行验证。由于现有数据不全面，我们通过比较无动力车身货车成本来验证三款货车（纯电动自卸汽车、纯电动半挂牵引车和燃料电池半挂牵引车）的零售价。由于这些组件的估算价格存在很大差异，因此该成本中不包括动力装置和/或能量储存系统。此外，这些组件的估算价格援引自《节能与新能源汽车路线图2.0》（中国汽车工程学会，2021），该报告中提供的中国成本估算数据极具可信度。**表32**汇总了用于验证零排放货车零售价的车型。

表32. 用于验证零排放货车零售价的车型

货车类别	车型	总成本 (元)	电池容量 (千瓦时)	燃料电池功率 (千瓦)	储氢瓶容量 (千克)	电动功率 (千瓦)
纯电动自卸汽车	陕汽重卡德龙 M300—8x4	85万	234	—	—	210
纯电动半挂牵引车	陕汽重卡德龙 M300—6x4	82.5万	234	—	—	210
燃料电池半挂牵引车	未指定	150万	100	80	40 ¹⁴	215

图22比较了零排放货车无动力车身和电驱动系统的参考和建模零售价。结果表明，建模价格与公开零售价格处于同一量级，记录的成本差异低于10%。由于汽车零售价主要由电池组和燃料电池组成成本构成，因此该成本差异无关紧要。

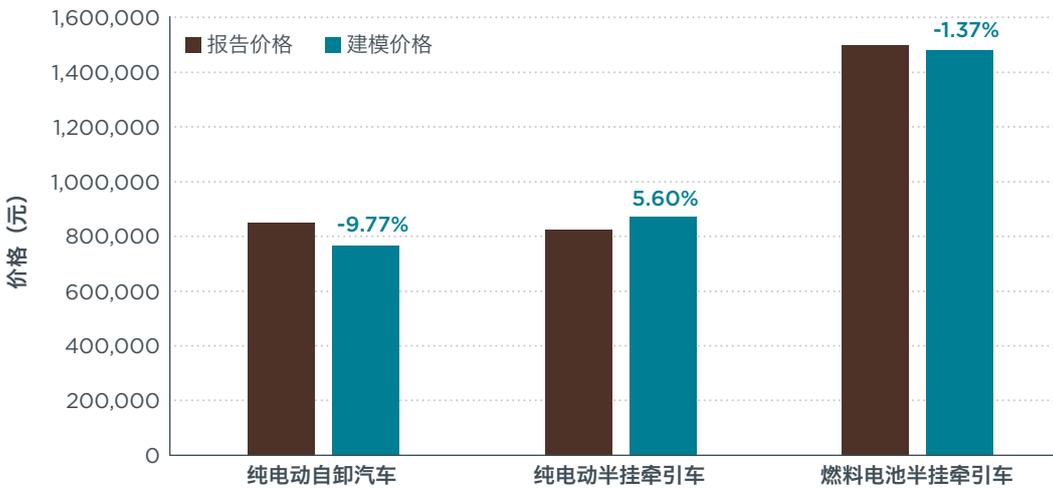


图22. 2020车型年零排放货车价格验证

¹⁴ 然而，储氢瓶容量并未以瓶内氢气的可用质量(kg)表示；根据储氢瓶的容积和压力等技术参数，储氢瓶容量粗略估计为 40 千克可用氢气。