

刘 玮,万燕鸣,陈思源,等.基于场景模拟的公路货运新能源车成本效益分析研究 [J]. 中国环境科学, 2023,43(10):5624-5632.

Liu W, Wan Y M, Chen S Y, et al. Study on the cost-benefit analysis of new energy vehicles for road freight transportation based on scenario simulation [J]. China Environmental Science, 2023,43(10):5624-5632.

基于场景模拟的公路货运新能源车成本效益分析研究

刘 玮^{1,2},万燕鸣²,陈思源^{3*},刘 畅²,刘 琦²,张 岩²,王 歌³ (1.国华能源投资有限公司,北京 100007; 2.北京国氢中联氢能科技研究院有限公司,北京 100007; 3.华北电力大学经济与管理学院,北京 102206)

摘要:为实现双碳目标,公路货运部门需要通过发展电动汽车和氢能汽车替代燃油汽车进行减排.因此,本文构建了考虑场景异质性的货运车辆生命周期净收益分析模型,对比了 25t 牵引车和 18t 栏式货车两类车队中油、电、氢三种车型在不同线路场景下的生命周期成本和收入.结果表明,氢能汽车更适用于高单价、寒冷气候的长途重型货运场景,而电动货运车型则更适用于低单价、短途、轻载、温暖气候场景,至 2030 年氢能汽车可在 25t 重型货运场景优于电动汽车,可作为氢能汽车的重点布局方向.中短期内,氢价补贴、碳税等政策无法实现货运部门新能源汽车对燃油汽车的自发替代,还需要额外政策支持.

关键词: 公路货运; 电动汽车; 氢能汽车; 全生命周期; 场景模拟

中图分类号: X24 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2023)10-5624-09

Study on the cost-benefit analysis of new energy vehicles for road freight transportation based on scenario simulation. LIU Wei^{1,2}, WAN Yan-ming², CHEN Si-yuan^{3*}, LIU Chang², LIU Qi², ZHANG Yan², WANG Ge³ (1.Guohua Energy Investment Co. Ltd., Beijing 100007, China; 2.Beijing Guohydro Zhonglian Hydrogen Energy Technology Research Institute Co. Ltd., Beijing 100007, China; 3.Economic and Management School, North China Electric Power University, Beijing 102206, China). *China Environmental Science*, 2023,43(10): 5624~5632

Abstract: To achieve the carbon peaking and carbon neutrality goals, China's road freight sector needs to reduce emissions by developing electric and hydrogen vehicles to replace traditional fuel vehicles. In this paper, a life-cycle benefit analysis model of freight vehicles considering scenario heterogeneity was constructed to compare the life-cycle costs and revenues of oil, electric and hydrogen vehicles under different route scenarios, taking 25t tractors and 18t railcars as examples. The results showed that hydrogen vehicles were more suitable for long-distance heavy freight scenarios with high shipping prices and cold climates, while electric freight models were more suitable for low shipping prices, short-distance, light-load, and warm climate scenarios. Moreover, hydrogen vehicles can outperform electric vehicles in 25-ton heavy freight scenarios by 2030, which can be the key layout direction for hydrogen vehicles. In the short and medium term, policies such as hydrogen price subsidies and carbon taxes cannot achieve spontaneous substitution of new energy vehicles for fuel vehicles in the freight sector, and additional policy support will be needed.

Key words: road freight; electric vehicles; hydrogen vehicles; life cycle assessment; scenario simulation

加快推进低碳交通运输体系建设、推广新能源车,是交通运输以及全国各部门实现双碳目标的重要抓手^[1].根据世界资源研究所的测算结果,依赖于上游电力和制氢部门的减排规划,新能源汽车推广措施可为中国交通部门带来 60%的额外减排^[2].近年来,中国的乘用车领域电动化发展迅速,而商用车特别是长途、重载货运领域,新能源车替代进展缓慢.中国重型货车保有量约占汽车保有量的 6.6%,但其碳排放量占到 50%以上,氮氧化物和颗粒物的排放量分别占到 75%和 50%以上^[3].目前,货运车辆低碳化主要有两条技术路线,分别是氢燃料电池汽车(以下简称氢能汽车)和动力电池汽车(以下简称电动汽

车),但两条技术路线均由于成本、效率等原因缺乏市场竞争力,应用场景尚不明确,其发展主要依赖于国家补贴政策的推动,目前仍处于在重点城市开展试点应用阶段^[4].此外,新能源汽车的发展也受到资源环境的约束^[5],其效益受具体场景影响存在不确定性,应当提前做好路径规划,避免无序发展.

国内外已有研究多基于总拥有成本(total cost of ownership,TCO)模型对油、电、氢三类车型进行

收稿日期: 2023-03-01

基金项目: 中国氢能联盟 2022 政研项目(CHA2022RP004);国家自然科学基金资助项目(72104021,72204085)

* 责任作者,副教授, chensiyuan@ncepu.edu.cn

对比分析. IEA 开发了针对不同国家、不同充电成本的 TCO 分析模型, 可用于电动汽车、混动汽车与燃油车的经济性分析^[6]. He 等^[7]使用 TCO 模型对乘用车的氢、油、电三种车型进行了经济性分析. Ally 等^[8]对比了柴油、天然气、混动和氢能巴士的生命周期经济性, 发现混动和氢能车型的经济性无法与柴油车型竞争. Jones 等^[9]对多种城市物流车型的 TCO 进行了分析, 并对能源价格等关键参数进行了敏感性分析, 得出了使氢能汽车具有成本优势的参数取值范围. Li 等^[10]则应用 TCO 模型检验了中国发展绿氢驱动氢能汽车的可行性. Rout 等^[11]在考虑多种技术制氢成本异质性的基础上, 对比了小客车、公交车、货车、叉车等种类的油、电、氢竞争情况, 并发现到 2050 年, 大部分种类的氢能汽车总拥有成本将低于燃油车, 而电动汽车的总成本始终低于同种类氢能汽车.

然而已有研究存在一个显著不足之处: 由于货运卡车为商用车型, 其购置决策往往以收益最大化而非成本最小化为目标, 电动汽车具有购置成本低、补能成本低的优势, 这些优势均可以体现在 TCO 模型中, 但也存在着电池质量大、补能时间长、寒冷环境续航损失严重等劣势, 这些劣势会影响运输时效、单车载货量, 导致生命周期货运收入下降, 却无法体现在 TCO 模型中, 从而会使其经济性评价结果产生偏差. 此外, 公路货运可分为多种场景, 如重载或轻载、长途或短途^[12]、高寒地区或温暖地区^[13]等, 不同的场景会对车型需求以及车辆的能耗等产生影

响, 均会影响车辆的经济性. 而已有关于货运车辆适用性的研究中, 大多未能考虑这些因素^[14].

本文首先构建考虑场景异质性的货运车辆生命周期净收益分析模型, 以更贴近货运车辆的多维使用效益以及真实购置决策过程. 考虑到中国货运行业中牵引车占比高达 71.3%, 仓栅式、厢式货车、自卸式、栏板式和特殊结构车辆合计占比 26.1%, 其他类型货车占比仅 2.6%^[15]. 因此, 本文选取 25t 牵引车和 18t 栏式货车两类车队作为代表, 对油、电、氢三种车型在不同线路场景下的生命周期净收益进行模拟, 得出电动汽车和氢能汽车各自的适用场景. 进一步通过对关键参数进行敏感性分析挖掘货运部门新能源车替代机制, 以期决策部门指定新能源车发展政策提供科学支持.

1 货运车辆生命周期净收益分析模型

1.1 模型分析框架

构建了如图 1 所示的货运车辆生命周期净收益分析模型, 模型考虑了购置、使用、至报废全生命周期内的货运车辆的成本和收益. 其中, 成本包括购置成本、补能成本、司机成本、过路费、维修保险以及回收残值等. 收入则假设为在每日 10h、每年 80% 日期工作的运行强度下所有的运费收入^[16], 该时间不考虑装卸时间和等货时间, 但包括补能时间. 为反应新能源汽车的特性, 该模型考虑了电池、储氢罐质量对载货能力的影响, 以及气温等外部环境对单位能耗的影响.

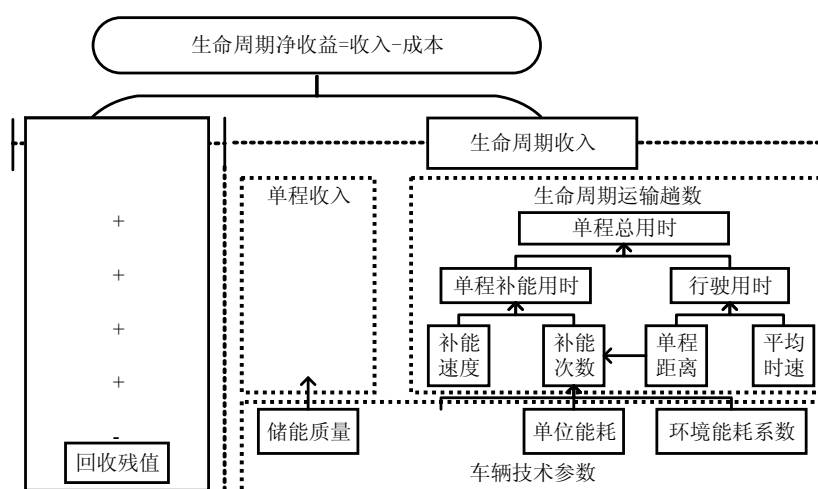


图 1 货运车辆生命周期净收益分析模型框架

Fig.1 Life-cycle benefit analysis modeling framework for freight vehicles

1.2 货运车辆生命周期收入核算

车辆生命周期收入 LCR 的计算如式(1)所示,其中,SR 为单程货运收入,YT 为年均运输趟数, i 为折现因子,设为 6%,LIFE 为车辆寿命.

$$LCR = \sum_{t=1}^{LIFE} SR \cdot YT \cdot (1+i)^{-(t-1)} \tag{1}$$

单程货运收入 SR 由货运线路的单价 p ,车辆负载 W ,和单程距离 SL 决定,如式(2)所示.车辆负载 W 则由车身质量 VW、电池和储氢罐质量 BW 以及法律规定最大载重 MAXW 共同决定,如式(3)所示.

$$SR = p \cdot W \cdot SL \tag{2}$$

$$W = MAXW - VM - BW \tag{3}$$

年均运输趟数 YT 则由年工作时间 YWT 和单程耗时 ST 决定,如式(4)所示.而其中 ST 又由单程行驶时间和单程补能时间构成,单程行驶时间等于单程距离除以平均行驶速度 v ,而单程补能时间等于单程补能次数 SN 乘以单次补能时间 ct ,如式(5)所示.

$$YT = YWT / ST \tag{4}$$

$$ST = SL / v + SN \cdot ct \tag{5}$$

单次补能次数由单程距离、能耗 EI、油箱/电

池/储氢罐容量 BC 决定,如式(6)所示,其中 e 为环境影响系数,用于刻画寒冷天气对能耗的影响.

$$SN = SL / v + SN \cdot ct \tag{6}$$

1.3 货运车辆生命周期成本核算

货运车辆的生命周期成本 LCC 由购置成本 FC、补能成本 EC、司机工资 DS、过路费 TOLL、维修保险 OMC 以及回收残值 RV 六项构成,如式(7)所示.其中,购置成本为一次性支出,补能成本由行驶里程、能耗和补能价格 cf 决定,司机工资和维修保险为每年固定支出,而过路费由里程和单位里程过路费 tf 决定.年补能成本和年过路费的计算方式如式(8)-(9)所示.

$$LCC = FC + \sum_{t=1}^{LIFE} (EC + DS + TOLL + \tag{7}$$

$$OMC) \cdot (1+i)^{-(t-1)} - RV \cdot (1+i)^{-LIFE}$$

$$EC = YT \cdot SL \cdot EI \cdot e \cdot cf \tag{8}$$

$$TOLL = YT \cdot SL \cdot tf \tag{9}$$

1.4 车型和场景参数

本文共考虑 2 类货运车型,分别是 25t 牵引车和 18t 栏式货车.其 2020 年的成本和技术参数表 1 所示.其中车身残值为车身成本 5%,动力电池回收残值为 7.3 万/t^[17].

表 1 基准年车型技术经济参数

Table 1 Technical and economic parameters for different vehicles

车型		购置成本(万元)	油箱/电池/氢罐容量	车身自重(t)	额定总重(t)	百 km 能耗	单次补能时间(min)	残值(万元)
25t 车型	燃油汽车	39.71	500L	19	49	35L	5	2
	电动汽车	81.53	380kW·h			180kW·h	90	19
	氢能汽车	131.48	40kg			11kg	12	7
18t 车型	燃油汽车	20.72	300L	6	17	21L	3	1
	电动汽车	46.46	220kW·h			75kW·h	52	11
	氢能汽车	81.88	40kg			5.5kg	12	3

表 2 场景参数敏感性分析取值范围

Table 2 Value range of key parameters in sensitive analysis

项目	单程距离*	每年寒冷 时间**	单位货运 价格*	终端氢 价***
取值范围	200~3000km	0~5 个月	0.1~0.9 元 /(t·km)	40~50 元/kg

注:*线路单位距离和单位货运价格根据实际线路数据确定,详见表 3;**每年寒冷时间指中国各省平均气温低于10度以下的月份数量,数据来源:https://zh.weatherspark.com/;***终端氢价由与中国氢能联盟合作的市场调研获得.

本文基于单程距离、每年寒冷时间、单位货运价格、终端氢价等因素构建分析场景,一方面对多个因素对耦合作用进行敏感性分析,如表 2 所示;另一方面,收集了 17 条路线的运费数据,进行实际场景分析,如表 3 所示.

除上述参数外,本研究使用的默认终端氢价为 50 元/kg,为 2020 年全国终端氢价平均水平,充电价格为 0.9 元/(kW·h),柴油价格为 8.15 元/L,这些成本价格均由市场调研获取.

表 3 实际货运线路距离和运费

Table 3 Actual freight route distance and freight costs

路线	距离(km)	25t 车型单位运价*18t 车型单位运价*	
		[元/(t·km)]	[元/(t·km)]
广州-乌鲁木齐	4164.71	0.20	0.30
上海-乌鲁木齐	3315.49	0.27	0.40
银川-乌鲁木齐	2122.56	0.09	0.14
广州-北京	2121.74	0.31	0.47
上海-西安	1363.98	0.36	0.54
上海-北京	1206.87	0.25	0.38
上海-郑州	949.09	0.29	0.43
哈尔滨-大连	945.50	0.13	0.19
上海-武汉	794.00	0.44	0.66
哈尔滨-沈阳	591.85	0.16	0.23
沈阳-长春	319.27	0.31	0.47
石家庄-北京	292.23	0.40	0.60
哈尔滨-长春	271.35	0.34	0.51
哈尔滨-吉林	264.16	0.53	0.79
宁波-杭州	149.00	0.46	0.70
北京-天津	138.30	0.47	0.70
广州-深圳	138.03	0.54	0.80

注:*单位货运价格由整车重货价格除以距离和载货量获得,不考虑超载等情况.数据来源:中国公路物流运价指数网,<http://index.0256.cn/pricex.htm>.

2 分析结果

2.1 不同货运场景下新能源车适用性对比

如图 2 所示,随着货运单价的提升以及单程距离的提升,25t 氢能汽车的生命周期净收益将超过电动汽车.此外,随着路线寒冷月份的增加以及终端氢价的下降,氢能汽车的经济性将进一步提升.因此,氢能汽车更适用于高价、寒冷气候的长途重型货运场景,而电动汽车则适用于短途、低价场景.其原因在于氢能汽车的补能时间、受寒冷天气导致的续航衰减、驱动系统质量方面均相较于电动汽车有较大优势,因此,货运单价较高时,氢能汽车可以获得更多的收益.

对于 18t 车型的模拟结果如图 3 所示,随着货运单价的提升、单程距离的提升、路线寒冷月份的增加以及终端氢价的下降,18t 氢能货车与电动货车的生命周期净收益差距不断缩小,但仍存在差距.与 25t 车型相比,18t 车型电动车优势明显.即对于轻载场景,电动汽车是成本更低的减排方案.

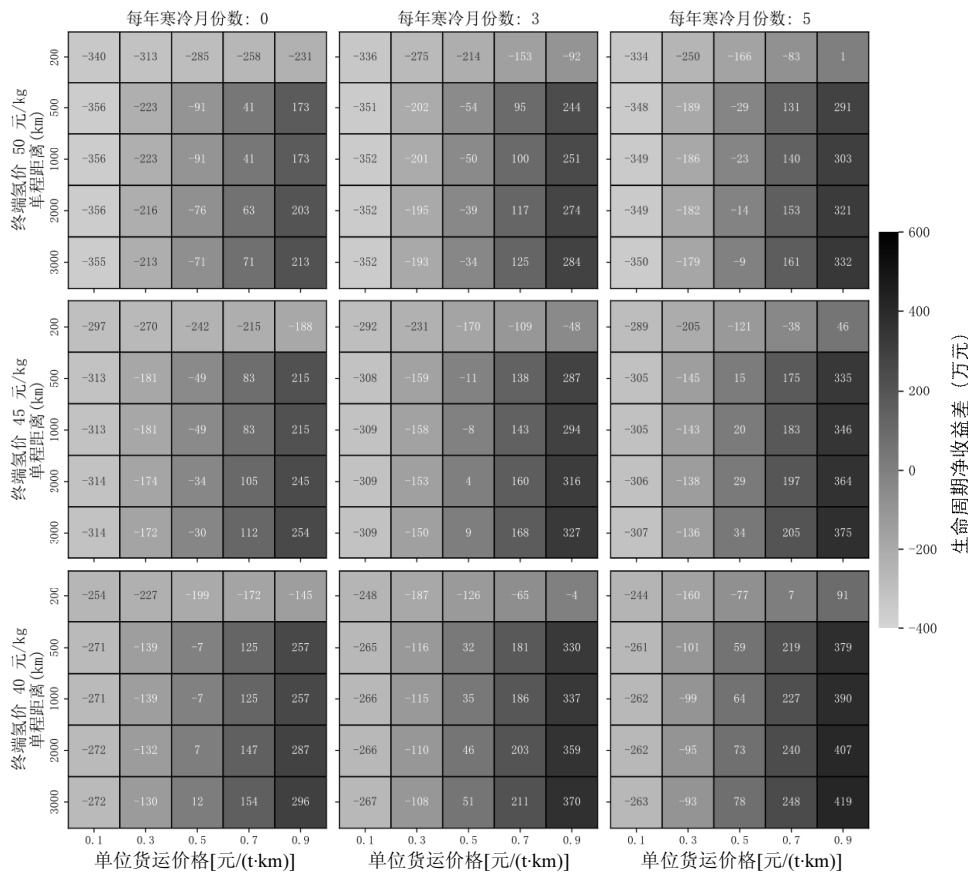


图 2 25t 车型在不同氢价、运价、单程里程下,氢能汽车与电动汽车的生命周期收益差(差值为正意味着氢能汽车优于电动汽车)
Fig.2 Life-cycle benefit difference between 25-ton hydrogen and electric vehicles at different hydrogen prices, shipping prices, and one-way mileage (A positive difference means that hydrogen vehicles are better than electric vehicles)

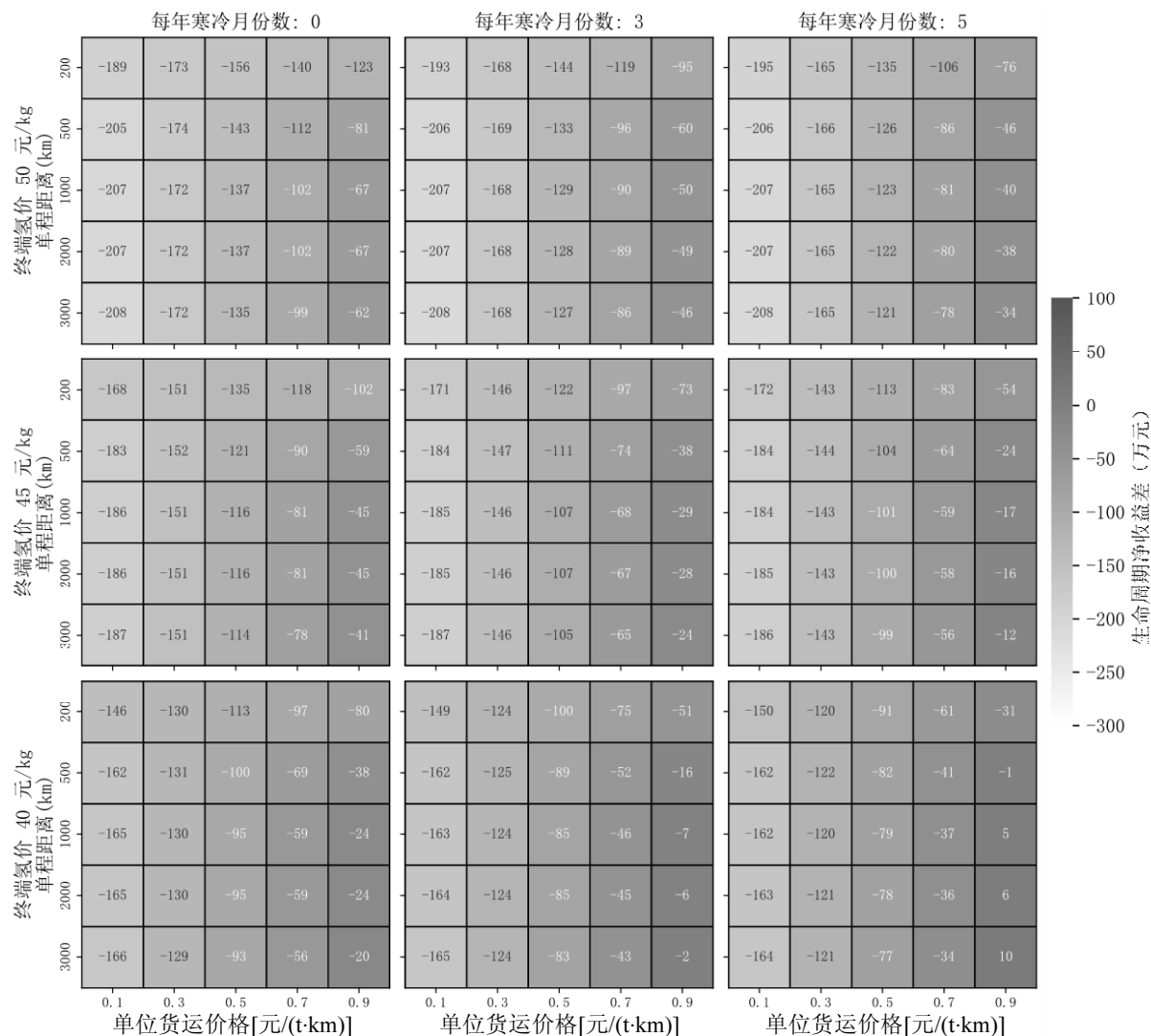


图3 18t车型在不同氢价、运价、单程里程下,氢能汽车与电动汽车的生命周期收益差(差值为正意味着氢能汽车优于电动汽车)

Fig.3 Life cycle benefit difference between 18-ton hydrogen vehicles and electric vehicle at different hydrogen prices, shipping prices, and one-way mileage (A positive difference means that hydrogen vehicles are better than electric vehicles)

2.2 不同车型的货运场景适用性

针对所收集的 17 条实际货运线路,本文应用所构建模型计算了其生命周期货运收入和成本结构,如图 4 和图 5 所示。其中,图 4(a)和图 5(a)分别展示了 25t 和 18t 货运车辆的收入和成本,图 4(b)和图 5(b)则分别统计了 25t 和 18t 货运车辆 17 条线路中车辆各类成本占比。

结果表明,目前氢能汽车已能在部分线路实现盈利,但其净收益远低于电动车型。在绝大部分线路上,电动车型的净收益仍劣于燃油车型,而对于商业化的货运企业,意味着没有动力主动选择氢能车型。特别的,25t 车型在银川-乌鲁木齐和哈尔滨-大连等线路上,以及 18t 车型在广州-乌鲁木齐、银川-乌鲁

木齐和哈尔滨-大连等线路上,电动汽车优于燃油汽车。这些线路的共同特征是货运价格极低,25t 车型单价低于 0.2 元/(t·km),18t 车型单价低于 0.4 元/(t·km),处于亏损状态。

此外,对于 25t 氢能车型,平均补能成本占比约为 50%,而 25t 电动汽车的补能成本仅为 30%;对于 18t 氢能车型,补能成本也是所有成本中占比最高的。因此,对于氢燃料电池车,终端氢价是最关键的影响因素。特别的,无论是 25t 车型还是 18t 车型,电动车型的过路费占比都是所有成本中最高的;燃油车型的过路费占比在 20%~40%,与其补能成本接近。因此,对新能源货车实施优惠的过路费政策更容易在实践中执行。

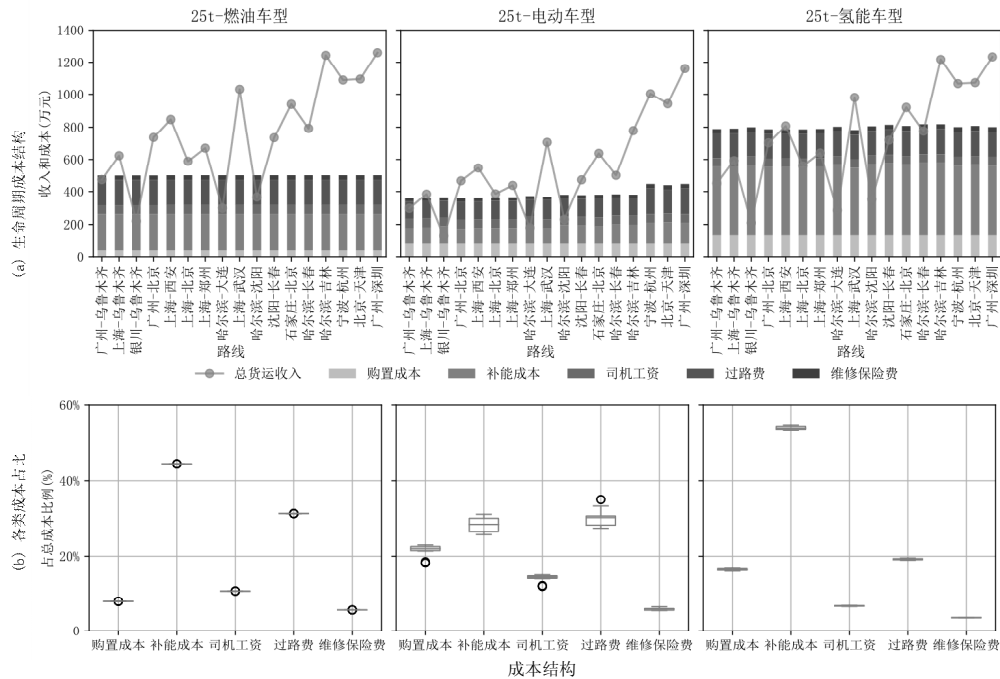


图4 油、电、氢三类 25t 货车在不同货运路线下的生命周期成本结构

Fig.4 Life cycle cost structure of 25-ton oil, electric and hydrogen trucks under different freight routes

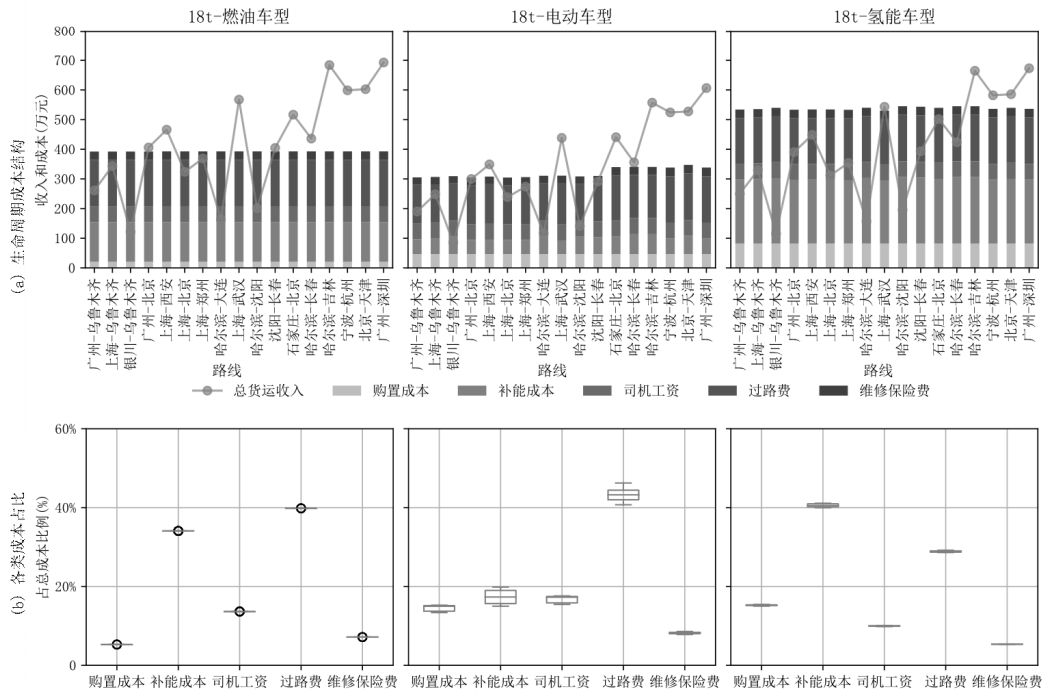


图5 油、电、氢三类 18t 货车在不同货运路线下的生命周期成本结构

Fig.5 Life cycle cost structure of 18-ton oil, electric and hydrogen trucks under different freight routes

2.3 不同车型的适用性趋势

根据 2.2 节分析结果,氢能车型生命周期成本中补能成本占比最多,因此,推进终端加氢价格的下降是促进氢能车型实现市场自发采纳的关键途径,当前中国的氢能发展激励政策中也包含对于氢价的

补贴。为明确终端氢价的下降目标和合理的补贴力度,本文分别测算了氢能车型可以实现与电动汽车和燃油汽车市场竞争时的终端氢价阈值,并对比了当前(2020 年)技术成本参数和 2030 年预期技术成本参数下的差异,结果如图 6 所示。

然气制氢驱动氢能车也均无法实现货运减排.当使用电解水制氢时,仅当电力碳强度降至 0.181kg/(kW·h)和 0.215kg/(kW·h)时,也就是用氢碳强度下降至 8.145kgCO₂/kgH₂ 和 9.675kgCO₂/kgH₂ 时,才能使 25t 氢能车型和 18t 氢能车型具有减排效益.因此,发展可再生能源电力,并加大蓝氢、绿氢的供应规模,是实现货运部门碳减排的重要前提.

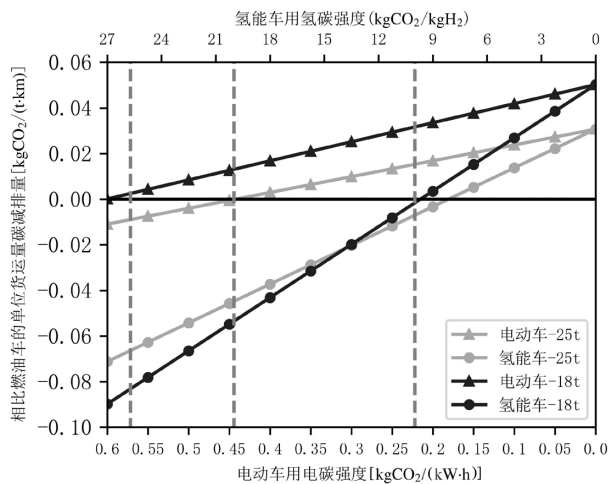


图 7 不同燃料碳强度下新能源车型的减排能力
Fig.7 Emission reduction capacity of new energy vehicles under different fuel carbon intensity
下横轴为电力碳强度,上横轴为对应的电解水制氢的氢碳强度

在使用 100%绿电和绿氢的前提下,当前若要通过碳税政策使得电动汽车和氢能汽车与燃油汽车的生命周期净收益相当,17 条实际线路所需碳税阈值范围如表 5 所示,其中电动车型在部分线路中的碳税阈值为负,意味着无需执行碳税政策,即可实现电动车型对于燃油车型的自发替代.相较于当前全国电力部门碳市场不足 60 元/t 的价格,甚至欧盟碳市场 2022 年平均 80 欧元/t 的碳价,这些碳税阈值过高,因此,碳价类政策仅能在货运部门的新能源车替代中起到辅助作用.

表 5 17 条实际线路中,电、氢车型和燃油车型实现自发替代的碳税阈值范围和均值(元/t)
Table 5 Range and mean of carbon tax thresholds for electric, hydrogen and fuel vehicles to achieve spontaneous substitution in 17 actual lines(Yuan/t)

车型	25t-阈值范围	25t-阈值均值	18t-阈值范围	18t-阈值均值
电动汽车	-573~4257	1268	-985~1536	276
氢能汽车	3907~4259	4022	3176~3545	3296

4 结论

4.1 研究方法:构建了考虑应用场景异质性的货运车辆生命周期净收益分析模型,全面考虑了补能时间、电池质量、寒冷环境等因素对新能源货运车辆运行的影响,克服了传统总拥有成本模型未考虑车辆生命周期总收入,不符合商用车购置决策过程的弊端.

4.2 政策建议:氢能汽车更适用于高单价、寒冷气候的长途重型货运场景,补能成本占比较高;电动汽车则更适用于低单价、短途、轻载、温暖气候场景,过路费则占比较高.补贴终端氢价和新能源货运车辆过路费是提升货运部门新能源车经济性的有效措施;随着成本下降,至 2030 年氢能车可在 25t 重型货运场景优于电动汽车,可作为氢能汽车的重点布局方向;燃油汽车的成本优势明显,单纯依靠氢价补贴或碳税等政策无法实现货运部门新能源汽车对燃油汽车的自发替代,仍需要车辆购置补贴政策或燃油车禁售、禁行等强制性政策的支持.

4.3 研究局限:鉴于当前我国氢燃料电池车发展还处于初期阶段,相关数据的透明度不够高,导致本文存在以下局限性:(1)未考虑充电桩、加氢站等补能基础设施的建设成本;(2)未考虑换电等补能方式;(3)未考虑成本的地区异质性,也没有考虑不同路况导致的能耗变化.为此,本研究下一步将基于以上不足进一步完善.

参考文献:

[1] 贾璐宇,王 克.碳中和背景下中国交通部门低碳发展转型路径 [J]. 中国环境科学, 2023,43(6):3231-3243.
Jia L., Wang K. Low-carbon transition pathways for China's transportation sector under the background of carbon neutrality [J]. China Environmental Science, 2023,43(6):3231-3243.

[2] 薛露露,刘岱宗.迈向碳中和目标:中国道路交通领域中长期减排战略 [R]. 世界资源研究所, 2022.
Xue L., Liu D. Decarbonizing China's road transport sector: strategies toward carbon neutrality [R]. Word Resource institute, 2022.

[3] 张明琦,郑泽东,李永东.公路货运能耗及低碳化发展路径研究 [J]. 机车电传动, 2022,(3):10-16.
Zhang M., Zheng Z., Li Y. Research on road freight energy consumption and low-carbon development path [J]. Electric Drive for Locomotives, 2022,(3):10-16.

[4] 交通运输部.绿色交通“十四五”发展规划 [R]. 2021.
Ministry of transport of the people's republic of China. The 14th Five-Year Plan of green transportation [R]. 2021.

- [5] 彭天铎,袁志逸,袁杰辉,等.中国车用能源需求和关键材料资源可获得性分析 [J]. 中国工程科学, 2018,20(1):127-132.
Peng T, Yuan Z, Yuan J, et al. Analysis on vehicle energy demand and key mineral resource availability for vehicle production in China [J]. Strategic Study of Chinese Academy of Engineering, 2018,20(1):127-132.
- [6] IEA. Electric vehicles: Total cost of ownership tool – Data tools [EB/OL]. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/electric-vehicles-total-cost-of-ownership-tool>.
- [7] He X, Wang F, Wallington T J, et al. Well-to-wheels emissions, costs, and feedstock potentials for light-duty hydrogen fuel cell vehicles in China in 2017 and 2030 [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021,137:110477.
- [8] Ally J, Pryor T. Life cycle costing of diesel, natural gas, hybrid and hydrogen fuel cell bus systems: An Australian case study [J]. Energy Policy, 2016,94:285-294.
- [9] Jones J, Genovese A, Tob-Ogu A. Hydrogen vehicles in urban logistics: A total cost of ownership analysis and some policy implications [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 119:109595.
- [10] Li Y, Taghizadeh-Hesary F. The economic feasibility of green hydrogen and fuel cell electric vehicles for road transport in China [J]. Energy Policy, 2022,160:112703.
- [11] Rout C, Li H, Dupont V, et al. A comparative total cost of ownership analysis of heavy duty on-road and off-road vehicles powered by hydrogen, electricity, and diesel [J]. Heliyon, 2022,8(12).
- [12] Yan J, Wang G, Chen S, et al. Harnessing freight platforms to promote the penetration of long-haul heavy-duty hydrogen fuel-cell trucks [J]. Energy, 2022,254:124225.
- [13] Jaguemont J, Boulon L, Dubé Y. A comprehensive review of lithium-ion batteries used in hybrid and electric vehicles at cold temperatures [J]. Applied Energy, 2016,164:99-114.
- [14] Yan J, Zhao J. Willingness to pay for heavy-duty hydrogen fuel cell trucks and factors affecting the purchase choices in China [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022,47(58):24619-24634.
- [15] 许刚,陈庆麟,葛磊,等.中国公路货运市场发展趋势 [R]. 波士顿咨询公司, 2021.
Xu G, Chen Q, Ge L, et al. Development trends of Chinas road freight [R]. Boston Consulting Group, 2021.
- [16] 2022 年货车司机从业状况调查报告 [R]. 中国物流与采购联合会, 2023.
2022 Survey report on the employment status of truck drivers [R]. China Federation of Logistics& Purchasing, 2023.
- [17] 电池回收系列专题(二):电池回收成本和盈利拆分模型 [R]. 信达证券股份有限公司, 2022.
Battery Recycling Series Topic (2): Battery Recycling Cost and Profit Split Model [R]. Cinda Securities Co., Ltd., 2022.
- [18] 晏嘉泽.基于平台经济的货运行业新能源车推广机制研究 [D]. 北京:华北电力大学, 2023.
Yan J. Research on the substitution mechanism of new energy vehicles in freight industry based on platform economy [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2023.
- [19] 王彦哲,欧训民,周胜.基于学习曲线的中国未来制氢成本趋势研究 [J]. 气候变化研究进展, 2022,18(3):283-293.
Wang Y, Ou X, Zhou S. Future cost trend of hydrogen production in China based on learning curve [J]. Climate Change Research, 2022,18(3):283-293.

作者简介: 刘 玮(1977-),男,湖北武汉人,高级工程师,博士,研究方向为新能源、氢能与燃料电池.发表论文 30 余篇.10000032@ceic.com.