



深圳市重型货车电动化推广应用实施 方案及综合效益评估

Implementation Plan and Comprehensive Benefit Evaluation of Electric Promotion and
Application of Heavy Truck Sector in Shenzhen City

深圳市协力新能源与智能网联汽车创新中心

Shenzhen Xieli Innovation Center of New Energy and Intelligent Connected Vehicle

2022年8月

目录

第一章 前言	1
1.1 研究背景	1
1.1.1 国家能源危机和环境问题亟需改善	1
1.1.2 国家层面的新能源汽车发展战略	3
1.1.3 新能源重型货车助力交通领域实现双碳目标	4
1.2 研究对象	5
1.3 主要研究内容	5
1.3.1 深圳市重型货车应用现状调研分析	5
1.3.2 深圳市重型货车技术经济与环境效益分析	5
1.3.3 深圳市纯电动重型货车商业化推广方案初步设计	5
1.3.4 深圳市重型货车电动化应用推广措施研究	5
1.4 研究意义	6
1.4.1 理论意义	6
1.4.2 实际应用价值	6
第二章 新能源汽车技术理论基础	8
2.1 研究对象的界定	8
2.1.1 新能源汽车	8
2.1.2 新能源重型货车	8
2.2 新能源重型货车及电池技术	9
2.2.1 氢燃料重型货车	9
2.2.2 纯电动重型货车	10
2.3 小结	13
第三章 新能源重型货车市场现状及发展趋势分析	14
3.1 国内外新能源重型货车推广现状	14
3.1.1 全球电动重型货车推广现状	14
3.1.2 中国新能源重型货车推广现状	16
3.2 深圳市新能源重型货车推广现状	19

3.2.1 深圳市推广新能源重型货车可行性分析	19
3.2.2 深圳市新能源重型货车市场规模	21
3.2.3 深圳市纯电动泥头车运营现状	22
3.2.4 深圳市纯电动泥头车推广难题	23
第四章 换电技术发展现状分析	26
4.1 国内外换电模式发展历程	26
4.1.1 国外换电模式发展历程	26
4.1.2 国内换电模式发展历程	26
4.2 换电重型货车技术方案分析	28
4.3 换电重型货车应用场景分析	29
4.3.1 封闭场景短倒运输	29
4.3.2 开发场景短倒运输	29
4.3.3 干线中长途运输场景	29
4.4 换电技术和模式相关政策分析	29
4.4.1 国家层面	29
4.4.2 地方层面	31
4.5 换电重型货车推广现状	32
第五章 深圳市重型货车电动化的环境效益评估	34
5.1 研究方法	34
5.1.1 分析指标	35
5.1.2 模型基本假设	35
5.1.3 数据来源	38
5.2 单车减排效益评估	39
5.2.1 泥头车生命周期评价结果	39
5.2.2 集疏港牵引车生命周期评价结果	43
5.2.3 港内（盐田港）重型牵引车生命周期评价结果	47
5.2.3 LNG 重型货车污染物减排效益分析	50
5.3 不同推广情景下总量减排效益评估	53
5.3.1 总量评估方法	53

5.3.2 情景设定	54
5.3.3 泥头车总量减排效益	55
5.3.4 集疏港牵引车总量减排效益预估	56
5.3.5 港内（盐田港）牵引车总量减排效益预估	58
5.4 重型货车电动化减排效益小结	60
第六章 深圳市重型货车的全生命周期成本分析	61
6.1 研究方法	61
6.2 泥头车 TCO 成本分析	61
6.2.1 不同类型泥头车 TCO 总体对比分析	61
6.2.2 充电泥头车与柴油泥头车的 TCO 成本平衡点分析	62
6.2.3 换电泥头车与柴油泥头车的 TCO 成本平衡点分析	63
6.3 集疏港牵引车 TCO 成本分析	65
6.3.1 不同类型集疏港牵引车 TCO 总体对比分析	65
6.3.2 集疏港充电牵引车与柴油牵引车的 TCO 成本平衡点分析	66
6.3.3 集疏港换电牵引车与柴油牵引车的 TCO 成本平衡点分析	67
6.4 港内（盐田港）牵引车 TCO 成本分析	69
6.4.1 不同类型港内牵引车 TCO 总体对比分析	69
6.4.2 港内充电牵引车与柴油牵引车的 TCO 成本平衡点分析	70
6.4.3 港内换电牵引车与柴油牵引车的 TCO 成本平衡点分析	70
6.5 小结	71
第七章 换电重型货车商业化推广方案设计	72
7.1 重型货车“车电分离”模式概述	72
7.1.1“车电分离，电池租赁”商业模式	72
7.1.2 换电车辆及电池标准	73
7.1.3 换电站技术选择	74
7.2 集疏港短途运输换电重型货车实施方案设计	75
7.2.1 场景分析	75
7.2.2 方案设计	76
7.2.3 合作模式	77

7.2.4 实施建议	78
7.3 港内（盐田港）换电重型货车解决方案设计	79
7.3.1 场景分析	79
7.3.2 方案设计	79
7.3.3 合作模式	81
7.4.2 实施建议	82
第八章 结论及建议	83
8.1 主要研究成果	83
8.1.1 深圳市新能源重型货车推广任重道远	83
8.1.2 深圳市重型货车综合效益评价结果	83
8.1.3“车电分离”模式可推动换电型重型货车市场化推广	84
8.2 措施及政策建议	85
参考文献	88

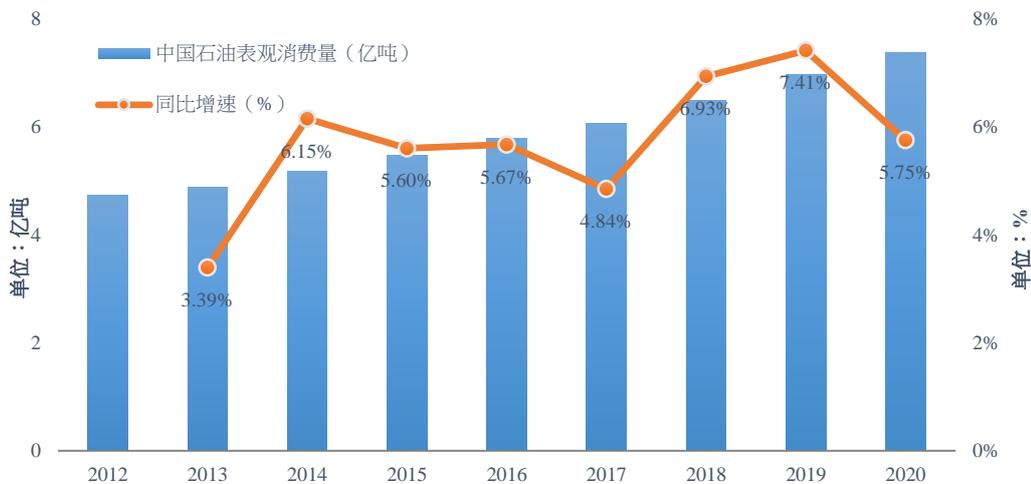
第一章 前言

1.1 研究背景

改革开放 40 年来，随着中国经济社会的快速发展和综合国力的显著增强，城乡居民生活水平显著提高，居民收入持续快速增长，消费质量明显改善。据公安部统计，截至 2022 年 6 月底，全国机动车保有量达 4.06 亿辆，其中汽车 3.10 亿辆，新能源汽车 1001 万辆。交通业持续稳定发展的同时也带来一系列的能源、环境（如碳排放）与健康等问题。2020 年 9 月 22 日，习近平主席在联合国大会上郑重宣布中国二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和。交通运输是国民经济中基础性、先导性、战略性产业和重要的服务性行业，是碳排放的重要领域之一，推动交通运输行业绿色低碳转型对于促进行业高质量发展、加快建设交通强国具有十分重要的意义。

1.1.1 国家能源危机和环境问题亟需改善

全球石油市场呈现石油需求与经济走势高度相关，交通用油主导需求增长。交通是最大的用油行业，且占比呈逐年上升的态势。交通部门的石油需求占比由 2000 年的 54% 上升至 2019 年的 59%。中国本身缺油，但却是石油消费大国，产量只占全球总产量的 4%，消费量却占全球总消费量的 15.3%¹。根据中国石油和化学工业联合会公布的最新数据显示，2020 年，国内原油表观消费量 7.36 亿吨，比上年增长 5.6%²（图 1-1），总体上，石油消费量逐年递增，增速波动变化大。



数据来源：中国石油和化工联合会

图 1-1 2012-2020 年中国原油产量及增速

交通部门以道路交通石油消费为主，占比达到 48%（图 1-2），随着汽车产业复工复产加快，未来五年中国还将新增机动车 1 亿辆以上，新增车用汽柴油消耗 1 亿至 1.5 亿吨（道路货运占比 45 %左右）。机动车是原油消费量快速增长的主要原因之一，而消费量的增速远高于其产生量，缺口只能依靠进口石油来填补，2020 年中国石油对外依存度 73.5%，远远高于国际石油依存度 50%的警戒线，中国的石油安全在一定程度面临挑战，影响中国的能源安全和可持续发展，因此要降低对石油的依赖，道路交通领域的绿色转型成为关键。

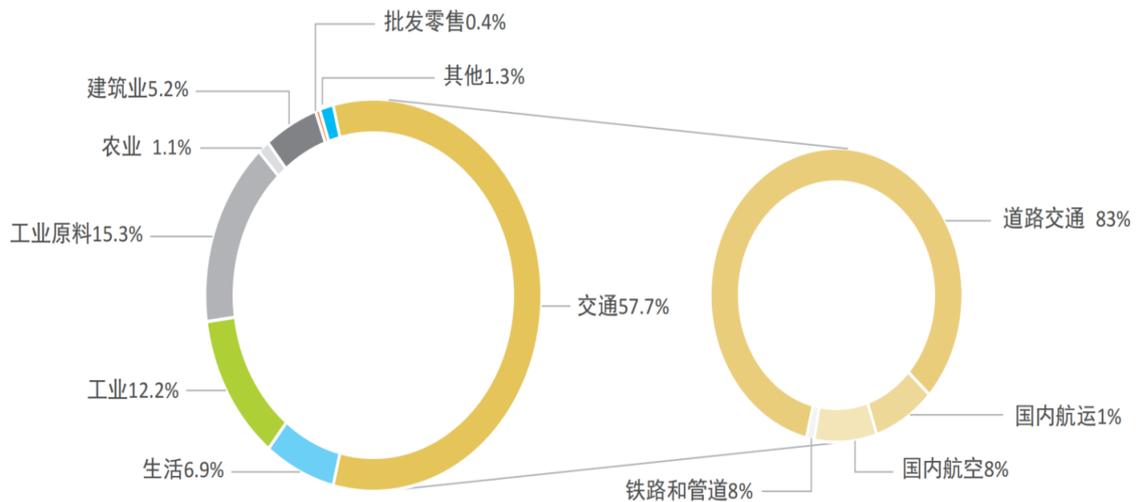


图 1-2 中国交通领域及各部门石油消费占比

此外，燃油机动车的行驶过程会向空气排放大量温室气体和其他大气污染物，已成为城市大气污染和雾霾天气的重要诱因，而其中道路货运行业是能源消耗和污染气体排放最大的行业之一。以中国为例，货车排放是仅次于乘用车的道路交通第二大排放源。据生态环境部《中国移动源环境管理年报（2021）》公布的数据显示，重型货车排放的一氧化碳（CO）、碳氢化合物（HC）、氮氧化物（NO_x）和颗粒物（PM）分别为 79.2 万吨、27.5 万吨、463.0 万吨和 3.3 万吨；重型货车在各类型汽车中 PM 排放分担率达到 52.1%；重型卡车在各类型汽车中 NO_x排放分担率达到 75.45%（图 1-3），是汽车排放 PM 和 NO_x污染物的首要贡献源。

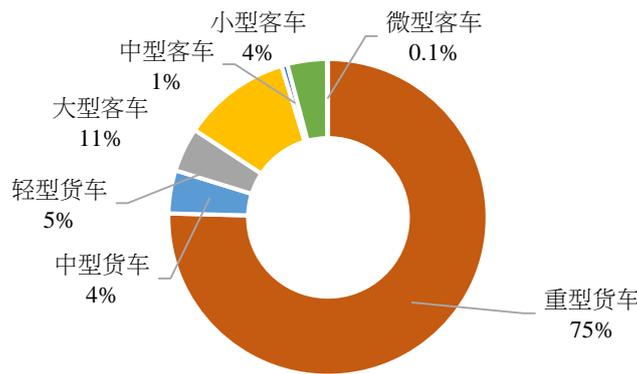


图 1-3 各类型汽车的氮氧化物 (NO_x)排放量比例

推动重型货车的绿色转型和碳减排对中国“双碳目标”的实现及交通行业的低碳发展具有重要意义。同时，随着中国在碳排放和大气环境污染方面的严格治理，燃油重型货车面临国标的升级、淘汰加速、路权限定等多方限制，其给了新能源汽车特别是重型货车的电动化发展提供了时机和空间。

1.1.2 国家层面的新能源汽车发展战略

缺油少气的能源结构问题、环境污染问题、“碳达峰和碳中和”等都极大地推动了中国对新能源汽车发展的注重程度。2020年11月，国务院颁布《新能源汽车产业发展规划（2021-2035年）》，为新能源汽车产业发展做出方向性指引，提出明确的目标和规划。近年来，国务院还陆续颁布若干有助于新能源汽车产业发展的政策，进一步推动中国新能源汽车持续健康发展。

新能源汽车发展初期，在国家战略驱动的导向下，国家及地方各级政府出台了一系列的支持政策，从各个方面都推动了新能源汽车的发展。随着新能源汽车产业发展成熟度不断提高，政策正在逐步退坡，市场化的程度越来越高。例如，2019年中国新能源汽车产销量受政策退坡影响第一次出现下降，但2020年中国新能源汽车销量又一次创下历史新高，在补贴退坡后，实现了市场驱动下的销量增长。

在较长的一段时间内，新能源汽车将依然保持强劲的增长态势。在国家大力倡导发展新能源汽车的进程中，由于鼓励政策、应用场景、使用环境等的不同，使得同为新能源汽车的乘用车与商用车、商用车中的客车与货车，以及轻型货车与重型货车之间的发展快慢不一，相对于其他汽车细分行业，新能源重型货车的发展起步晚、起点低，应用相对滞后。传统燃油重型货车作为公路运输的重要载体，对环境存在较大污染，而新能源重型货车在行驶过程中对环境几乎没有污染，更加符合国家的战略目标，

在政策和市场双重因素驱动下，新能源重型货车的发展已经迫在眉睫。

1.1.3 新能源重型货车助力交通领域实现双碳目标

深圳市十分注重交通领域的绿色低碳发展，新能源汽车也是深圳市战略性新兴产业之一。自 2009 年深圳市参与“十城千辆”新能源汽车示范推广试点工作以来，深圳市政府大力支持新能源汽车产业发展，通过机制保障、政策与资金扶持、鼓励模式创新等举措推广新能源机动车在交通领域的应用。经过十余年的发展，深圳市新能源汽车产业链条较为完善、成效显著，已成为全球新能源汽车累计推广应用数量最大的城市之一。截至 2021 年底，深圳市新能源汽车累计推广应用数量约为 54.4 万辆，在公共交通领域基本上已实现全面电动化。而在重型货车领域，新能源重型货车所受到的关注程度仍然不足，仍处于初步发展阶段，显然尚未实现大规模应用，提升新能源重型货车比例，降低传统重型货车的燃油消耗、污染物排放和碳排放，助力蓝天保卫战，对推动深圳市早日实现交通领域的双碳目标意义重大。

深圳市现有的公交车、小客车、物流车均以充电模式为主，而纯电动重型货车由于电池容量大，充电等待时间长等因素，全部采用充电模式并不能保证运营效率，这也成为限制其发展的问题和瓶颈，减弱了新能源重型货车对传统燃油重型货车的竞争优势。为解决这一突出难题，除了提高电池性能、降低整车电耗外，深圳市政府大力支持和推动充电基础设施建设，虽然逐步建设了一系列慢充充电桩、快充充电桩、充电站等充电基础设施，以期提高纯电动重型货车用户充电便利性，但这些举措尚未从根本上解决新能源重型货车充电时间长、充电难的问题，而换电重型货车可以解决充电重型货车运营效率低和一次性投入过高的痛点，使纯电动重型货车在某些应用场景下替代传统燃料重型货车成为可能。

根据国家发展改革委等三部门联合发布《推动重点消费品更新升级畅通资源循环利用实施方案（2019-2020 年）》：“借鉴公共服务领域换电模式和应用经验，鼓励企业研制充换电结合、电池配置灵活、续航里程长短兼顾的新能源汽车产品”。换电模式作为一种新能源汽车补电方式，通过更换电池，可以快速为新能源汽车补电，增加用户使用便利性及缓解用户里程忧虑。换电模式不仅成为国家政府主管部门鼓励发展的方向，而且还将是下一步重型货车电动化能源补给最有效的技术解决方案之一，深圳市重型货车的电动化也为推广应用换电模式提供了适宜的应用场景。

因此，面对新的发展机遇和市场形势，开展新能源重型货车换电模式的应用场景

及环境效益的系统研究，推动深圳市新能源重型货车换电模式应用，特别是支撑主管部门制定新能源重型货车换电的产业配套和扶持政策，对深圳市生态环境质量持续改善、交通可持续发展、能源资源安全和双碳目标的提早实现均具有重大战略意义。

1.2 研究对象

根据深圳市统计年鉴的数据显示，截至 2020 年底全市的重型货车存量数量约 10.5 万辆，其中集装箱牵引车数量为 4.7 万辆，泥头车 1.4 万辆³，即牵引车和泥头车合计占比约为 56%⁴，为了推动深圳市重型货车电动化发展，提升新能源重型货车比例，降低传统重型货车的燃油消耗、污染物排放和碳排放，经和相关主管部门和行业沟通，本项目选取在深圳市营运的泥头车、盐田港内倒短牵引车和盐田港外集疏港中短途运输牵引车为对象展开研究工作。

1.3 主要研究内容

1.3.1 深圳市重型货车应用现状调研分析

聚焦深圳市重型货车电动化的应用场景，本项目的所涵盖的重型货车主要指的是港口内集装箱拖车、港外集疏港短途运输集装箱拖车，以及用于城市渣土清运的泥头车。本项目将通过实地调研，进一步梳理掌握深圳市重型货车的投入运营情况，为后续环境影响量化综合评价、对比分析及提出换电方案提供基础数据支撑。

1.3.2 深圳市重型货车技术经济与环境效益分析

本项目采取生命周期环境影响评价(Life cycle assessment, LCA)和生命周期成本法(Total cost ownership, TCO)的理论与方法，基于调研数据定量核算纯电动重型货车替代传统燃油重型货车的减排效益；同时对比分析重型货车在传统燃油、充电及换电三种模式的全生命周期费用，为终端用户使用车辆产品和政府部门出台相关的政策制度提供依据。

1.3.3 深圳市纯电动重型货车商业化推广方案初步设计

结合深圳市重型货车实际运营情况，选取港口内封闭环境、港外集疏港短途运输这两类应用场景，完成港口内重型牵引车电动化及集疏港短途运输重型牵引车电动化的方案设计，通过市场化推广和商业模式创新推动重型货车电动化及换电设施的示范应用。

1.3.4 深圳市重型货车电动化应用推广措施研究

在国家大力推动发展新能源汽车的进程中，由于鼓励政策、应用场景、使用环境

等的不同，使得同为新能源汽车的乘用车与商用车、商用车中的客车与货车，以及轻型货车与重型货车之间的发展速度差异较大。相比较而言，纯电动重型货车的推广应用相对滞后，特别是充电重型货车存在充电时间长、初始购置成本高、运营效率低等突出问题，而换电重型货车基本可以解决充电重型货车运营效率低和一次性投入过高的难题，使纯电动重型货车在部分应用场景下替代传统燃料重型货车成为可能。

作为全国新能源汽车推广应用规模最大的城市，深圳市在积极响应国家统一规划和战略布局的基础上，根据自身经济发展和产业结构，出台了一系列地方性新能源汽车推广应用政策，特别是面向公共交通、出租车和私家车构建了全方位政策引导体系，为深圳在各个领域推广应用新能源汽车提供了可靠保障。但在推广应用充电或换电重型货车过程中，仍面临一些应用问题，如换电设施缺乏用电和用地政策保障、设施管理标准缺失等。因此，仍需深入了解深圳市重型货车电动化及换电技术过程中可能存在的突出问题。本项目通过实地调研了解实际推广的难点，以期为相关管理部门提供可靠的建议。

1.4 研究意义

目前国内关于新能源汽车应用方面的案例研究更多的集中于乘用车方面，关注的内容比较宽泛，视角主要是面向整车或零部件企业内部的主要价值链，提出相关的发展战略或措施建议。在新能源重型货车领域的研究比较少，因此本项目的研究具有如下的理论意义和实践价值。

1.4.1 理论意义

一方面，本研究旨在建立重型货车综合效益评价体系，为评价新能源重型货车的综合效益提供了方法模型，运用生命周期评价法(Life cycle assessment, LCA)和生命周期成本法(Total cost ownership, TCO)，通过定量的方式对传统燃油重型货车、充电式重型货车和换电式重型货车，为行业评价新能源重型货车综合效益提供了新方法和新思路。另一方面，旨在构建了基于市场化推广的原则下不同应用场景选择不同技术路线新能源重型货车的选择方法，对换电模式作为一种新能源汽车的补能方式的实践经验进行总结并提出解决方案和措施。

1.4.2 实际应用价值

本项目的研究从实际应用层面出发，特别是在当前国内新能源重型货车发展的起步阶段，具有一定的实际应用价值。

其一，开展新能源重型货车换电模式的经济、环境效益的系统研究，为行业推动深圳市新能源重型货车电动化的模式选择及主管部门制定新能源汽车的产业配套管理、扶持政策提供案例参考。

其二，能够推动深圳市新能源重型货车的推广应用，并根据指定场景车辆的实地应用情况作针对性的进行改进和完善，从而不断完善车辆品质和商业模式。换电模式将是下一步重型货车电动化能源补给最有效的技术解决方案之一，深圳市重型货车的电动化也为推广应用换电模式提供了适宜的应用场景并形成可复制的推广模式，为后续其他城市新能源车推广工作提供借鉴。本项目提出的深圳市新能源重型货车推广建议和商业模式创新对新能源产业发展提供了具体的实践参考，项目的核心研究成果也对合理制定深圳市重型货车电动化发展政策和管理策略具有现实指导意义。

其三，为国内新能源重型货车行业发展提供一定参考。面对新的发展机遇和市场形势，开展新能源重型货车换电模式的应用场景及环境效益的系统研究，为行业推动深圳市新能源重型货车电动化的模式选择及主管部门制定新能源重型货车换电的产业配套管理、扶持政策提供参考，对支撑深圳市生态环境升级、可持续发展和能源资源安全具有重大意义。

第二章 新能源汽车技术理论基础

2.1 研究对象的界定

2.1.1 新能源汽车

新能源汽车是指采用新型非常规的车用燃料或动力装置作为动力来源的汽车。主要分类包括纯电动、混合动力及燃料电池等，纯电动汽车与传统燃油汽车相比，更加节能环保，动力系统相对于传统汽车结构又很简单，而且在使用过程中的舒适性及操控性均优于传统汽车。另外，纯电动汽车的燃料经济性、车辆保养的经济性均优于传统能源汽车。但是纯电动汽车仍存在短板，一是充电后续航里程短，存在里程焦虑。二是车辆购买成本高，尤其是电池成本，几乎占到了车辆整个价格的近 1/2。另外，纯电动汽车还存在燃料加注（充电）时间长，动力电池使用寿命短的问题。目前虽然动力电池技术一直在突飞猛进的发展，但动力电池的使用缺点仍未完全改善。

混合动力汽车指的是由两个或多个驱动系统共同驱动车辆行驶的新能源车辆，一般是油电混动汽车，它采用传统的内燃发动机和电动机作为动力，车用燃料包括燃油和电。混合动力的技术呈现多样性，包括强混、轻混、弱混；动力布置形式包括串联式、并联式和混合式。主要特点是经济节能、使用便利。

燃料电池汽车一般也是采用电动机作为驱动装置，但相对于纯电动汽车，它采用燃料电池为电动机供电。燃料电池汽车使用燃料电池电堆为驱动系统提供电能，不需要充电。从本质上来看，燃料电池汽车仍属于电动汽车，只是使用少量动力电池作为储能装置。燃料电池汽车节能环保、相对于传统燃油汽车能量转化效率高，但燃料电池目前的产品生产成本低，后期使用成本也比较昂贵。

2.1.2 新能源重型货车

一般来说，汽车分为乘用车和商用车两大类，其中商用车是指超过 9 座的载人汽车和载货汽车。载货汽车主要用于货物运输，属于商用车概念范畴，包括常规货车、半挂牵引车和货车非完整车辆，可按照总质量、用途和燃料类型来细分。

重型货车一般指的是总质量大于 14 吨的载货汽车，产品主要包括牵引、载货、工程车等，其中牵引车和载货车属于公路用车，工程车可分为自卸车和水泥搅拌车等。传统燃油重型货车一般指使用柴油或清洁燃料（天然气、甲醇）作为动力燃料，以内燃机作为动力装置的重型货车；新能源重型货车是指采用新型非常规的车用燃料或动力装置作为动力来源的重型货车⁵。

2.2 新能源重型货车及电池技术

近年来，随着技术不断成熟以及“双碳”目标的提出，一系列的产业政策出台加快推动了新能源汽车全产业链进一步发展，新能源重型货车也面临重要发展机遇。目前新能源重型货车技术主要有纯电动（含换电）和氢燃料两种，两者主要动力均由电池供给，纯电动重型货车主要使用的是磷酸铁锂电池，燃料电池重型货车使用的是以氢气为燃料的电池。2016-2020 年全国纯电动、插电混动、氢燃料重型货车的市场销量占比分别为 99.63%，0.18%，0.19%。显然混合动力和燃料电池合计占比不足 1%，现阶段纯电动重型货车在新能源重型货车领域仍具有主导地位。

2.2.1 氢燃料重型货车

①优势分析

以氢气为燃料，较磷酸铁锂电池更为环保。氢燃料电池货车与纯电动货车虽然在行驶过程中都能做到零排放，但氢燃料电池的主要成分是氢，在使用寿命结束后，并不会对环境造成污染，而磷酸铁锂电池内部含有大量重金属，需要科学规范的回收处理，否则会对环境产生污染，所以在使用链上氢燃料电池货车会更环保。

续航里程长，加氢时间短。氢燃料电池的能量密度高，远远高于锂电池，且氢燃料电池的能量转化效率高，所以车辆续航里程更长，另外，加氢跟加油/气方式类似，一般加注时间在 10 分钟以内，虽然略长于燃油车型的加油时间，但远远低于纯电动货车的充电时间，车辆补能效率更高。

抗低温性能优异，电池不衰减。纯电动重型货车在使用过程中难以避免电池衰减问题，而且在低温环境下电池衰减更厉害，这也是纯电动重型货车一到冬天续航里程减少的原因，而氢燃料电池则没有这个问题，极大提高了低温环境作业效率。

车辆自重更轻，能耗更低。氢燃料电池能量密度高，车辆自重更轻，例如 100kWh 电量的锂电池重量在 800kg 左右，而同电量的氢燃料电池重量只有 1/4 左右，能够帮助提升车辆续航里程。

②劣势分析

加氢站基础设施少，补能便利性差。中国加氢站的数量较少，统计数据表明，截至 2022 年 4 月，中国累计建成加氢站 250 座⁶，而全国充电基础设施累计数量为 332.4 万台⁷，加氢站的数量远低于充电站，主要原因在于加氢站的建设成本过高，这在一定程度上会影响氢燃料重型货车的推广。

购车成本和氢气价格高，经济性较差。目前，由于全球氢能产业规模较小，固定成本比较高，无法利用规模化来进行降本，导致氢能重型货车的购置成本远高于纯电动重型货车和柴油重型货车。以大运此前交付运营的氢能重型货车来看，60 辆车的价格为 9576 万元，相当于每辆氢能重型货车的价格为 159.6 万元。对比普通的燃油重型货车来说，单辆氢能重型货车的购置成本要高上 3-4 倍⁸。从运营成本看，目前，由于制、储、加氢的相关环节的技术成熟度不高，导致氢气价格较高，氢燃料电池重型货车使用成本是燃油货车的 2 倍以上，使用成本较高⁹。

应用难题尚未突破，存在推广瓶颈。现阶段氢燃料电池在商用车尤其是在重型货车上的应用，仍有一些难题待突破。由于产业链上游包括氢气制取、储运以及加氢站等环节成本高昂，燃料电池系统成本以及车载储氢成本严重限制氢燃料产业的发展；其次是技术问题，氢燃料产业链自主化程度和技术水平与燃料电池的实际需求还有差距，比如电池的耐久性、功能密度等；另外，电解绿氢技术、氢储运技术、氢安全技术还需要改进提升。

2.2.2 纯电动重型货车

2.2.2.1 充电式重型货车

① 优势分析

驾驶体验好，技术成熟。电动重型货车依托电力驱动可实现零排放，且具有电机驱动带来的噪音降低、换挡便利、振动减小等特点，极大改善了司机的驾乘环境，同时车辆技术成熟，具备推广基础。

充电桩基础设施完善，车辆补能方便。由于充电桩体积小，安装、建设比较灵活，中国电动汽车充电基础设施促进联盟发布的 2022 年 4 月份充电设施建设数据显示，中国公共充电桩的保有量为 133.2 万台，形成全球最大规模的充电设施网络，作为新能源汽车的动力保障，充电基础设施的快速发展支撑了中国电动重型货车普及应用。

利用峰谷差价充电，降低使用成本。随着油价不断上涨，电动重型货车的使用优势更为明显，一方面，电价比较稳定，另一方面电价本身也比油价便宜，同时如果用户能运用波谷差价如在夜间休息的时候进行补能，其优势更为明显。

② 劣势分析

续航里程短，应用场景受限。对于充电重型货车来说，应用场景主要有专线运输（固定货物运输专线，如煤炭洗煤厂至铁路、港口运输等；单程距离 50km 以内）；支

线短倒（集中站至周边城市的支线短倒，如铁路港集装箱运输等；单程距离 150km 以内）；港口内倒（封闭场景内重复短倒运输如港口内货物运输、集装箱运输等；适合 24h 不停作业）以及干线运输（跨城市的公路干线运输，如汽配、百货、零担货物等；单程距离 800km 以上）。物流公司的运输业务主要以长途公路运输为主，一般纯电动重型货车的续航里程不能满足其运输需求。

充电慢，运营低效。重型货车作为物流行业中最重要生产工具，用户对其运行效率异常的敏感，一般的纯电动重型货车采用慢充的话需要 24 个小时以上，快充需要 3-4 小时，纯电动重型货车载货重，电耗相对较高，一天充多次电，大大降低货车的运营效率，且货车的活动半径只能以充电站为活动半径，基础设施不完善导致电动货车只能在特定的区域使用。

购置补贴退坡，整车购买成本高。纯充电重型货车整车购置成本为柴油重型货车的 2 倍，如若用户采购纯电动重型货车，在补贴退坡的大背景下，用车企业很难去考虑购置纯电动重型货车。

电池性能忧虑，安全性有待提高。纯电动汽车的电池安全性也有待提升。商用车使用强度大、周期长，长距离驾驶导致电池负荷增大，易导致电池过热引发安全事故。

2.2.2.2 换电型重型货车

① 优势分析

补能时间短，提高运营效率。相比于传统的充电模式，尽管公共充电桩大多已采用快充模式，但半小时以上的充电时间也会造成用户排队充电现象，实际充电时长或将更长，针对营运车及商用车等用于盈利的车型劣势较大，换电模式可 3~5 分钟更换电池，在长途运输中途设置合适的换电站，可有效解决充电慢问题，可提高纯电动货车的运营效率，更适合于中长途或高效率的应用场景。

衍生车电分离模式，降低用户购车门槛。换电产业下衍生出的“车电分离”模式能有效降低用户初次购车门槛。车电分离即在换电基础上，客户购买整车后，由电池管理公司回购电池产权，客户以租赁方式获得电池使用权，实现车电价值分离，是为客户降低初始购车成本的一种方式。

对电池统一管理，提高电池使用寿命。换电模式下电池由运营商进行统一管理、在适合的温度下以稳定的电流统一充电，可以有效提高电池安全系数。此外，换电站

拥有多种监测系统，包括视觉、烟感、温感以及 BMS（电池管理系统）机制，可以对所有站内电池进行安全监测，第一时间排除有安全隐患的电池，且电池 5 年后可以回收梯次利用到风电、太阳能发电等领域的储能上，提高了电池的综合使用效率，降低了电池的整体使用成本。

② 劣势分析

电池缺乏行业统一标准，电池在技术层面无法兼容。中国的电池标准化进程滞后现象较为突出，特别是在换电车辆的电池标准化问题上。当下，不同厂家生产的电动重型货车规格、品牌甚至材料等都略有差异。这主要是因为电动重型货车本身就有牵引车、自卸车、搅拌车、环卫车等各种车号不统一的问题。另外，因为各电池厂商研发方向和进度各不相同，电池企业生产的电池型号也千差万别。比如，目前换电重型货车搭载较多的电池品牌有宁德时代、亿纬锂能等，这些品牌的动力电池在能量密度、电池结构、尺寸规格等方面都还没有做到统一，使得电池在技术层面无法实现流通兼容。

换电站基础设施管理水平不足，顶层设计亟需落地支撑。首先是目前中国换电站的数量仍然较少，不能满足车辆的运营需求，第二是换电站建设方面还缺乏相关的标准规范，且各地对于换电站的建设要求和补贴并不统一，这导致换电站具有很强的区域性。第三是换电站的网点布局面临选址困难的问题，换电站的选址与日后运营中的盈利能力有高度的关联，目前深圳市土地资源稀缺，土地使用成本较高。公用换电站的建设主要是为了盈利，选址建设涉及土地资源、环境污染、电力扩容等诸多现实问题，这需要政府主管部门审批、环保部门认同、国家电网许可。这些因素都会给换电站的选址和建设带来较大的难度。第三是换电站的盈利模式仍旧不清晰，换电模式仍处于初级的探索阶段，所以各个换电站收取的服务费还没有统一的标准。

恶劣工况条件下存在换电安全隐患，换电风险不容忽视。换电过程电池包的高压线束的插接器件要频繁插拔，对插接器件的质量和可靠性要求非常高，一旦漏电就会产生严重的危害，特别是对于工况条件较恶劣的工程类作业车辆，包括渣土车、水泥搅拌车等。在工地施工作业过程中，水雾、粉尘的吸附会造成电池箱接口、线束连接部等局部湿度增加，在车辆刹车、震动和碰撞过程中，可能会更容易出现漏电等安全问题。

2.3 小结

氢燃料重型货车由于受成本和技术的限制，现阶段大规模的推广应用较为困难，纯电动重型货车是目前应用最广泛的新能源重型货车类型，重型货车车型能耗大，导致电动重型货车续航里程不足，补能频次较高。在城市建材运输、矿物运输、港口物流运输等场景下，重型货车车辆需长时间连续作业，补能速度对工作效率有较大影响，“安全性、充电难、充电慢、里程焦虑”等问题成为影响城市推广应用的主要障碍。换电重型货车提供了一种新型补能形式，有望可解决电动重型货车补能痛点。因此本项目选取充电重型货车和换电重型货车与传统燃油重型车对比进行综合效益分析。

第三章 新能源重型货车市场现状及发展趋势分析

3.1 国内外新能源重型货车推广现状

面对双碳目标下的新的发展机遇和市场形势，新能源汽车行业发布了一系列的利好政策，为中国新能源汽车研发和应用提供了较好的政策保障。但受限于技术发展原因，传统能耗和排放较高的货运车辆，尤其是重型货车的电动化进展较慢，本章主要是借鉴国内外新能源重型货车电动化的推广现状及趋势，以期对深圳市重型货车电动化发展提供案例支撑。

近年来，随着中国对环保问题逐渐重视，能源行业发展与生态环境的平衡点成为社会关注的焦点问题。新能源汽车产业是战略性新兴产业，随着技术的不断提升，电池成本不断降低，商业模式不断创新，再加上国家加快推进新能源重型货车的研发和推广，纯电动重型货车的市场规模也在不断扩大。

3.1.1 全球电动重型货车推广现状

重型货车凭借运距长、运量大、运输效率高的优势，是公路货运的核心运载工具，常用于物流运输、工程建设及专用车领域，是国家经济生活中的重要生产资料，以中国为例，公路运输目前仍占据着中国货物运输行业的主导地位，近5年来，公路每年营业性货运量的增幅有高有低，但其在全国占比始终高达70%以上，2021年全国公路货运量391亿吨，占全社会总货运量的75%¹⁰。重型货车作为物流运输的主力生产工具，虽然其保有量低，但其单车运营里程长、运营次数多、柴油消耗总量高的特点使其成为氮氧化物、一氧化碳和颗粒物等污染物的主要排放来源，造成严重的环境污染，新能源重型货车未来的发展趋势。

根据国际能源署（International Energy Agency, IEA）发布的《Global EV Outlook 2022》，截至2021年底全球电动重型货车的保有量为6.6万辆¹¹，占全球重型货车的0.1%，说明新能源重型货车市场有巨大的发展空间，中国是最大的市场，2021年的市场份额接近90%，可以预见的是，伴随技术路线与基础设施的持续完善，电动重型货车的使用场景将大幅拓宽，行业将迎来重要发展风口，后期市场竞争也将更为激烈。

重型货车目前主要依靠柴油驱动，其对空气污染物和温室气体排放的贡献巨大，挪威、英国全球很多国家已经进一步加严了针对重型车辆污染物和温室气体排放的管控力度，因此新能源重型车辆也势必会成为未来的发展趋势。例如2020年美国15个州和哥伦比亚特区宣布了一项联合谅解备忘录（Memorandum of Understanding, MOU）

活动，它的目的在中重型车辆（大型皮货车、货车、送货货车、厢式货车、学校和公交车巴士以及长途运输货车）领域中推广零排放汽车（Zero Emission Vehicles, ZEV），目标是到 2030 年实现 ZEV 销售量（包含插电式混合动力车辆、先进技术零排放车辆、氢燃料车辆和纯电动车辆）达到 30%，2040 年之前实现 ZEV 的销量达到 100%，以促进 2050 年实现“零碳排放”。

①欧盟：2019 年欧盟发布《欧洲绿色协议》，该文件是指导欧洲全社会绿色发展的战略纲领，在交通领域方面提出 2025 年中重型货车的二氧化碳排放量比 2019 年减少 15% 和 2030 年比 2019 年减少 30% 的发展目标，成员国相继发布相关的推广政策：荷兰发布了 Zero Emissions Trucks Purchase Grant (AanZET) 补贴计划，从 2022 年 5 月起为相关的企业提供财政补贴；芬兰从 2022 年向购买零排放重型货车用户提供购买补贴；奥地利的“2021 Mobility Master Plan”指出到 2035 年停止销售 18 吨以上的燃油中重型货车的目标，2021 年向购买零排放车辆的用户提供了 4600 万欧元（5400 万美元）的财政补贴；西班牙将用 4 亿欧元（4.73 亿美元）助力公路运输行业脱碳目标的实现。

②挪威：设定了到 2030 年零排放重型货车的销售量占总销售量的 50% 的目标，该目标首先在 2017 年《2018-2029 年国家交通计划（National Transport Plan 2018–2029）》被提出，并在 2021 年发布的最新版本中得到确认。

③英国：英国政府就交通脱碳计划相关提案进行几次公开咨询，该计划中的一项提案是，从 2040 年起英国出售的所有新重型货车均都为零排放车辆，同时从 2035 年起禁止销售重量在 26 吨或以下的化石燃料动力货车。此外英国政府出资超过 2 亿英镑（2.43 亿美元）的资金，用于比较确定氢燃料电池或电动重型货车哪种零排放技术更适合英国的重型公路货运车辆，帮助英国货运部门减少对化石燃料的依赖。

④加拿大：2022 年加拿大政府发布《2030 年减排方案（2030 Emission Reduction Plan）》，该方案指出在 2030 年之前将全国的温室气体排放总量较 2005 年水平降低 40-45%，为了促进新能源中重型货车的推广应用，政府还将提供 4.2 亿美元的购买补贴，同时拨款 2600 万美元用于氢货车示范项目的运营。

上述国家或地区虽设定了新能源重型货车的发展目标，但并没有颁布有法律约束力的政策。

⑤加州是美国汽车低碳和电动化政策的引领者，很多行动都超前于联邦政府，商用车是道路交通领域主要的温室气体排放源和汽车尾气污染物排放源，加剧温室效应

的同时，也对车队聚集区的居民健康造成很大影响。为缓解这一问题，美国加州经过近四年的调查和研究后于 2020 年 6 月发布了《先进清洁货车法规》，这是全球首个针对燃油货车的强制性法规，要求从 2024 年到 2035 年，零排放货车占新车销售量比例将不断增加，至 2045 年所有在加州销售的货车新车将全部转型为零排放汽车，据测算在这一法规的影响下，到 2030 年加州零排放货车数量将达到 10 万辆，到 2035 年这一数字将上升至 30 万辆。这一法规的出台将显著加速全球货车市场向电动化、零排放方向转型，对其他国家和地区的商用车电动化发展具有很好的借鉴意义。

3.1.2 中国新能源重型货车推广现状

中国的重型货车主要应用在物流运输与工程建设等领域.依据市场需求，还可以把重型货车分为不同的种类，主要包括牵引车、载货车、工程车等，其中牵引车和载货车属于公路运输车辆，工程车可分为自卸车 and 水泥搅拌车等。根据对中国货车的消费市场结构的分析可以看出，目前重型货车数量约占货车总量的 32.82%，其中牵引车为 17.13%、工程车为 8.83%、载货车为 6.68%¹²（图 3-1）。

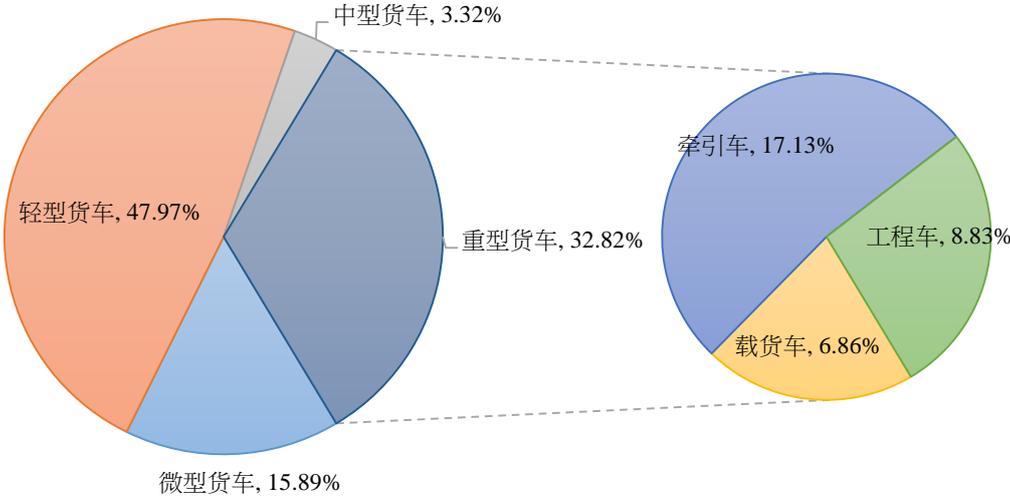


图 3-1 中国货车市场结构

根据国家统计局的相关数据，中国的重型货车保有量保持稳步增长态势，2002 年重型货车保有量为 148 万辆，2021 年重型货车的保有量为 850 万辆（图 3-2），2002 年至 2021 年重型货车的保有量翻了 5 倍，目前国内重型货车保有量达到 850 万辆左右，但是其中国三标准下的重型货车保有量占比约为 35%-40%¹³。

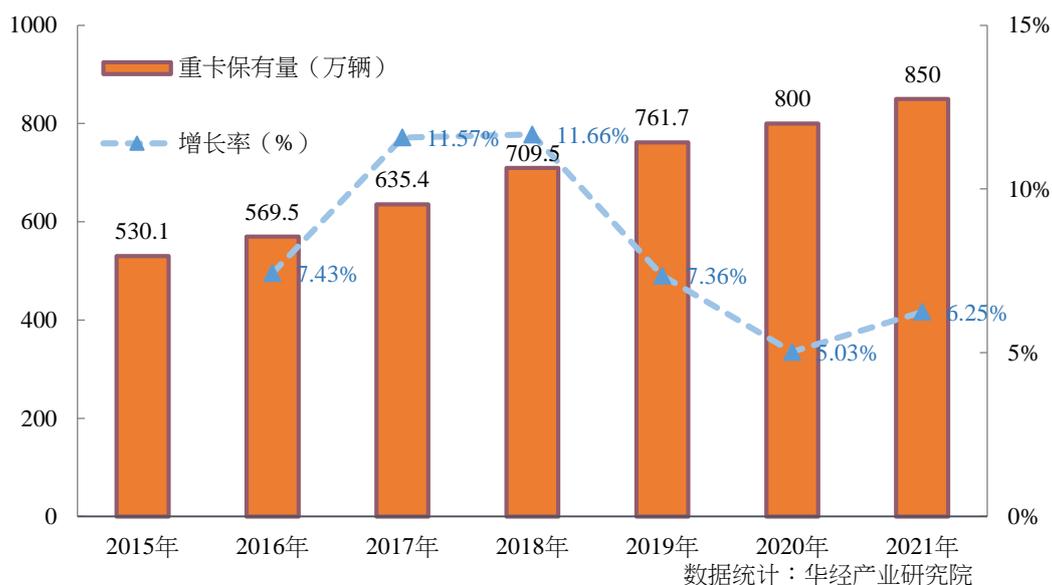


图 3-2 2015-2021 年中国重型货车保有量变动情况

中国重型货车销量波动比较明显，受到宏观经济与政策导向影响比较大（图 3-3），在 2020 年，在国三淘汰和国四限行等政策推动下，国内重型货车销量从 2019 年的约 119 万辆增长到了约 161.9 万辆。在未来的几年内国三、国四标准下的重型货车如果完全退出市场，将会带来巨大的市场空间。

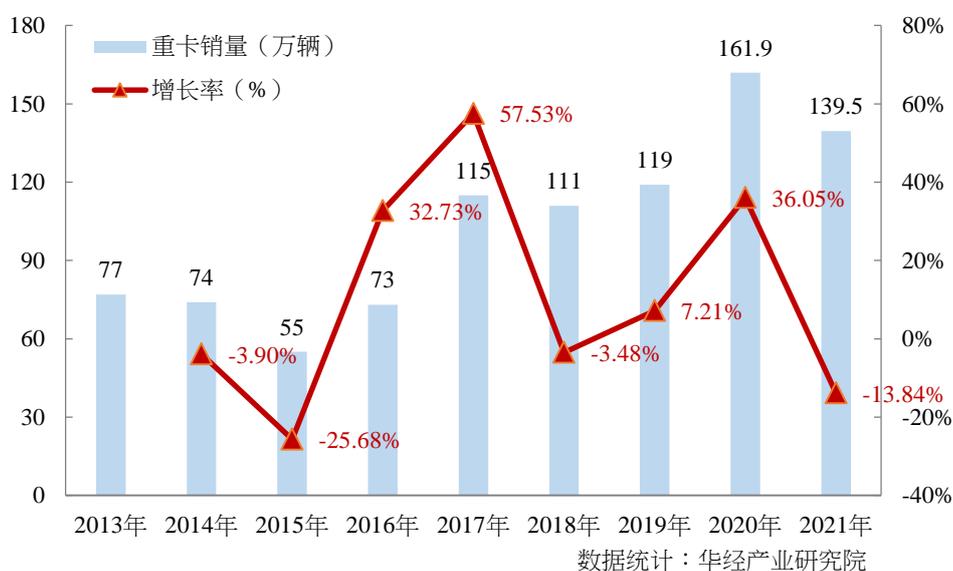


图 3-3 2013-2021 年中国重型货车销量及增长率

根据交强险数据统计，中国新能源重型货车 2018 年销量 658 辆，受双碳目标的驱动，近年来新能源重型货车销售量逐步增长，但 2019 年新能源重型货车销量出现激增，主要是因为深圳纯电动泥头车集中上牌所产生的效果。2021 年中国新能源重型货车进一步激增，累计销量突破万辆，达 10448 辆（图 3-4）。未来，随着双碳政策进一步驱动，以及技术和商业模式的发展，国内新能源重型货车将步入快车道，销量还将长

期保持持续增长趋势。



图 3-4 新能源重型货车销售量及渗透率

从各类新能源重型货车销量来看，2021 年中国纯电动重型货车销量 9650 辆，占比 92.4%，燃料电池重型货车销量 779 辆，占比 7.5%，混合动力重型货车销量 19 辆，占比 0.2%。销量主要分布在河北、河南、广东等环境治理要求较高的省份。

2021 年中国新能源牵引车和泥头车的销量占新能源货车销量的 72%¹⁴（图 3-5），港口、城建工地、厂区是目前新能源重型货车的主要应用场景，其中纯电动重型货车受法规限定及续航能力等因素影响，主要适用于矿山、港口、厂区、城建工地等环境的短倒运输场景。在各类新能源重型货车中，牵引车在港口、钢厂、等短途运输中应用范围最广，需求最大，占比约 53.2%。未来随着市场发展、基础设施完善及产品技术迭代完善，新能源重型货车的应用场景将逐步拓展，市场需求规模将呈现快速增长。

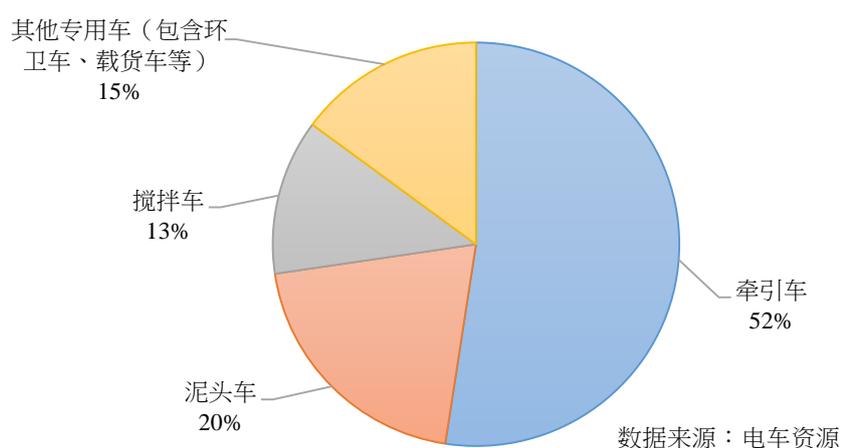


图 3-5 2021 年新能源重型货车销量细分市场占比

3.2 深圳市新能源重型货车推广现状

3.2.1 深圳市推广新能源重型货车可行性分析

3.2.1.1 推广基础良好

深圳市作为国家首批低碳试点城市、碳排放权交易试点城市、可持续发展议程创新示范区，是中国最早推广新能源汽车的城市之一，经过十余年的努力，深圳市新能源汽车示范推广有序推进，配套设施日趋完善，商业模式不断创新，产业培育取得突破，已连续六年成为全球新能源汽车注册登记数量最多的城市。面向碳中和、碳达峰的国家战略背景之下，国家正在大力推广新能源重型货车在中短途运输场景的应用，深圳市作为起步较早并领跑全国的地区也应积极推广新能源重型货车的应用，形成可复制的推广模式，为后续其他城市新能源车推广工作提供借鉴。

在新能源汽车推广应用上，深圳市一直走在全国前列。深圳是国内第一个实现公交车和出租车全面电动化的城市，截至 2021 年底，深圳市新能源汽车累计推广应用数量约为 54.4 万辆。此外充电基础设施是新能源汽车的生命线，对新能源汽车行业发展起到重要推动或制约作用，深圳市的充电设施网络基本完善，数据显示截至 2021 年底，全市累计建成各类公共充电桩 9.7 万个，其中快速充电桩约 3.7 万个，慢速充电桩约 6 万个，建成换电站 32 座。因此在良好的新能源重型货车推广经验和充电基础设施保障的基础下，深圳市可将泥头车、牵引车这类保有量较大的重型货车作为突破口，推动深圳市重型货车电动化的进程。

3.2.1.2 技术标准日趋完善

深圳市自新能源汽车推广发展之初就十分重视核心关键技术、产业化关键技术以及标准规范等技术创新，一方面加大资金的投入支持研发，另一方面通过产业调控政策支持企业的自主创新，例如《深圳市节能与新能源汽车示范推广实施方案（2009-2012）》提出对示范运行车辆测试工作给予科研经费补贴。《深圳新能源产业振兴发展规划（2009-2015 年）》提出在新能源汽车方面，开展动力系统、辅助零部件、电动加速器、汽车智能化等领域技术创新，推进整车及动力电池、电机、电控等关键部件技术研发与应用。《深圳市新能源汽车发展工作方案》提出在新能源汽车重点发展领域，新建或提升 5 家以上市级重点实验室、工程实验室、工程（技术）研究中心、企业技术中心，从而推进创新载体建设。

为了更好的指引、规范新能源汽车产业的发展，发布《电动汽车充电系统技术规

范》、《电动汽车维护和保养技术规范》、《电动汽车维修站通用技术要求》、《全密闭式智能重型自卸车技术规范》、《道路侧电动汽车充电设施建设规范》等一系列技术规范不断完善新能源汽车产业的标准体系建设。

3.2.1.3 扶持政策持续推进

随着“双碳”目标的确立，国家将制定更加严格和科学的环境保护措施。传统燃油重型货车作为公路运输的重要载体，对环境存在较大污染，而新能源重型货车对环境几乎没有污染，更加符合国家的战略目标。深圳市进一步出台了补贴政策，推动港口内燃油拖车更新置换为新能源车。《深圳市交通运输专项资金绿色交通建设领域港航部分资助资金实施细则》(深交规〔2021〕8号)提出，使用电动拖车按照租赁费用的50%予以资助，普通电动拖车每辆车每月最高资助额度不超过0.5万元。2022年5月份印发的《深圳市关于促进消费持续恢复的若干措施》规定，对港口内燃油拖车置换为符合条件新能源车(含清洁燃料车)的，给予最高不超过5万元/台补贴，体现出深圳市积极引导、支持新能源重型货车在工程领域、物流领域和港口内的应用(表3-1)。

表 3-1 深圳市关于新能源重型货车的相关政策文件

时间	政策文件	主要内容
2019	《深圳市推进新能源工程车产业发展行动计划(2019-2021年)》	1) 深圳市将着力夯实新能源汽车产业基础，持续扩大新能源汽车整车产业规模，促进工程车辆电动化升级转型，提升新能源工程车核心技术水平、核心产品竞争力。 2) 到2021年深圳市工程车领域新增车辆纯电动化工作率先完成。通过示范引领，将新能源泥头车的应用示范经验进行推广和复制，并逐步延伸至大型吊车、挖掘机、推土车等其他类型的新能源工程车。
2020	《“深圳蓝”可持续行动计划》	1) 柴油车(机)污染攻坚工程。实施重型柴油车国六排放标准项目严格实施重型柴油车燃料消耗量限值标准，不满足标准限值要求的新车型禁止进入道路运输市场，在全市主要进深道路、货运通道、物流园区等柴油车密集区域安装尾气遥感检测设备和排放黑烟或其它明显可见污染物的机动车监控设备。
2021	《深圳市新能源汽车推广应用工作方案(2021-2025)》	1) 持续提升公共领域新能源汽车比重。至2025年，新能源网约车达到5.5万辆，新能源物流车达到11.3万辆，新能源环卫、泥头车达到0.8万辆，新能源公务(含警车)、国企用车达到0.5万辆。 2) 大力建设新型新能源汽车充电基础设施。加快完善公交、物流、环卫、泥头车辆运营、停放、充电一体化保障体系，构建车辆可持续运行模式。
2021	《深圳市交通运输专项资金绿色交通建设领域港航部分资助资金实施细则》	使用电动拖车按照租赁费用的50%予以资助，普通电动拖车每辆车每月最高资助额度不超过0.5万元，无人驾驶的电动拖车每辆车每月最高资助额度不超过1万元，使用LNG拖车每辆车每月资助0.1万元。

时间	政策文件	主要内容
2022	《深圳市综合交通“十四五”规划》	加大新能源车辆推广和普及力度。推进存量和增量载运工具清洁化替代，重点提升货车新能源比例，加快推进市内短距离物流车、港口码头园区牵引车等车辆电动化。开展道路使用管理政策技术储备研究。建立以交通减碳为切入点的道路使用调节机制，研究在交通拥堵严重、环境保护要求高的重点片区设置机动车低排放区，提高准入车辆的排放标准。
2022	《深圳市关于促进消费持续恢复的若干措施》	推动港口内燃油拖车更新置换。对港口内燃油拖车置换为符合条件新能源车（含清洁燃料车）的，给予最高不超过5万元/台补贴。

3.2.1.4 运输需求攀升

根据深圳市生态环境局近年来公布的《深圳市固体废物污染环境防治信息公告》，近6年深圳市建筑废弃物总产生量达到4亿m³，未来随着开发建设工程体量不断增加，每年仍将产生1亿m³的建筑废弃物（主要为工程弃土），泥头车的保有量在未来仍有上涨空间。

此外，港口是水陆运输的起点和终点，是对外贸易进出口货物的集散中心以及国际物流供应链的重要节点和物流通道的枢纽，深圳作为国家物流枢纽布局承载城市，港口货运是深圳的支柱产业之一，2021年，深圳港全年累计完成集装箱吞吐量2877万标箱，同比增长8.4%，超额完成年度目标，集装箱吞吐量位居全球第四¹⁵，随着国民经济的持续健康发展以及货运量也将持续增长，为半挂牵引车市场提供了良好的需求平台。

在一些非道路特定场景，例如港口车、工程车或是泥头车，有固定的行车路线和特定需要，电动重型货车具有推广优势，因此在存量柴油重型货车面临置换更新的前提下和重型货车运输业务需求上涨的情况下，深圳市可以港口物流和渣土物流为突破口，逐步推广新能源重型货车在货运领域的应用。

3.2.2 深圳市新能源重型货车市场规模

截至2021年底，深圳市新能源汽车累计推广应用数量约为54.4万辆，在公共交通领域，包括公交车、巡游出租车，基本上已经实现全面电动化；在重型货车领域，深圳市营运状态的重型自卸货车的企业数共369家，营运的新型泥头车共有15365辆，其中传统燃料类泥头车11165辆（占比73%），纯电动泥头车4200辆（占比27%）。其中柴油类约占全市渣土车总运力的70%，而纯电动类约占总运力30%，已经初步实现了新能源重型货车的规模化应用。深圳市当前各类重型柴油货车保有量约10.5万辆，包括仅在港口内运营的集装箱牵引车超过1200辆。

此外，根据《深圳市建筑废弃物管理办法》运输管理中规定了深圳市建筑废弃物运输车辆及企业的相关要求。为规避泥头车乱倾乱倒、超载超速等违法乱象行为，规范泥头车行业秩序，深圳于 2018 年颁布了《全封闭式智能重型自卸车技术规范》（深市监标 201766 号），对全市泥头车的规格型号进行统一，在全国范围内首次提出大力推进泥头车电动化。2019 年开始深圳市政府着力推进重型货车电动化，同年 10 月深圳市交通运输局发布《深圳市纯电动泥头车推广使用实施方案》，明确了纯电动泥头车保有量目标，并在路权等配套政策和充电桩等配套设施方面予以支持和保障，同时提出在 2 年内形成完善、便捷的纯电动泥头车充电网络，为了推动淘汰传统泥头车推广纯电动泥头车，深圳还出台了相应的补贴政策，对符合奖励条件的纯电动泥头车，深圳市将给予最高 80 万元/车的超额减排奖励，在前期的推广基础下，深圳市目前已推广纯电动泥头车 4200 辆，并且已经运行接近 4 年时间，在此期间积累了大量的运营经验。而深圳也将以纯电动泥头车为突破口，持续发展新能源重型车整车产业规模。通过示范引领，将新能源泥头车的示范经验，逐步在港口运输、搅拌车等种类重型货车上予以推广。基于此，本项目以泥头车为代表，分析深圳市新能源重型货车的推广现状。

3.2.3 深圳市纯电动泥头车运营现状

根据深圳市新泥头车规定《全封闭式智能重型自卸车技术规范》，新型泥头车实际装载容积不超过 10.6 立方米，且所有泥头车需满足国五加 DPF 排放。深圳市积极推行泥头车电动化，加强渣土运输环境保护。以比亚迪 T10ZT 电动智能泥头车为例（图 3-6），该电动泥头车货箱容量不超过 10.6m³，有效载重约 15.5 吨，整车电量达 435kwh，通过监控平台实测数据，车辆满电可以行使约 250km，可以满足大部分泥头车的日均营运需求。



比亚迪T10ZT纯电动智能泥头车			
车身尺寸 (mm)	9610*2550*3110	驱动形式	8*4
整备质量 (kg)	15495	电机最大功率 (kw)	180*2
满载质量 (kg)	31000	变速箱	4档AMT
轴距 (mm)	1850+3200+1350	最高车速 (km/h)	≥85
续航里程 (km)	>280	最大爬坡度	≥50%
货箱容量 (立方)	10.6	电池形式	磷酸铁锂电池
悬架	前钢板弹簧/后平衡悬架	整车电量 (kwh)	435
制动	前后气压式鼓式制动	充电功率 (kw)	直流120*2
转向	EHPS	充电时间 (h)	直流2

图 3-6 比亚迪 T10ZT 电动泥头车外观与型号信息

深圳市纯电动泥头车平均运营情况如下，数据由实地调研、大数据平台、深圳市交通运输局公布的泥头车运输行业经营月报（图 3-7）及纯电动泥头车运营里程监测数据表整理得出。



注：图片来源 2020 年 12 月深圳市泥头车运输行业公报。

图 3-7 深圳市泥头车运行情况

- 单车日均行驶距离：110-210 公里
- 车辆日均行驶时段：集中在 5-12 时
- 车辆日均行驶时间：7-8 小时
- 运力水平：对比 2019 年，2020 年深圳市建筑废弃物运输车辆新增 925 台，取消“两牌两证”后放宽了对外地车辆的限制，近年来进入深圳市建筑废弃物运输行业的企业和车辆呈逐年上涨态势，加大了环境压力和交管部门的监管压力。调研显示车辆的日均出勤率为 50%~70%不等，车辆的闲置率较高；深圳市新型泥头车市场空间在 8224-13863 辆，运力供需平衡最佳理论值为 10421 辆。目前行业运力已超出合理运力上限。

3.2.4 深圳市纯电动泥头车推广难题

深圳市于 2019 年发布了纯电动泥头车的推广方案，在财政补贴下深圳的纯电动泥头车保有量居全国首位，然而在取消财政补贴后其市场明显走弱，项目组在深圳市交通运输局的支持下对运输企业进行走访调研（问卷统计结果详见图 3-8），纯电动泥头车的推广痛点主要有以下几个方面：

第一，是车辆的购置成本过高，由于纯电动重型卡正处于研发使用的初始阶段，市场没有形成规模，成本目前仍然很高。例如，比亚迪纯电动自卸车补贴前价格为 100 万元左右，比同类柴油车型（40 万左右）价格明显高出许多。

第二，是充电时长降低了营运效率，作为营运性车辆，车辆的充电时间较长，而

深圳市对泥头车的营运时间是有区间限制的，车辆充电时长使得车辆的有效运营时间减少，损失的时间成本较高，降低企业的营运收入。

第三，是车辆的维修服务保障问题，根据调研电动泥头车的维修等待时间过长，例如有企业表示关键部件的维修需要等到总部寄来之后才能进行维修，车辆的售后服务不够完善。车辆自身的安全性能、售后维修服务能力、电池寿命是制约其推广的重要因素；换电模式有机会成为解决当前充电式重型货车在使用过程中充电难和电池维保问题的最佳解决方案。

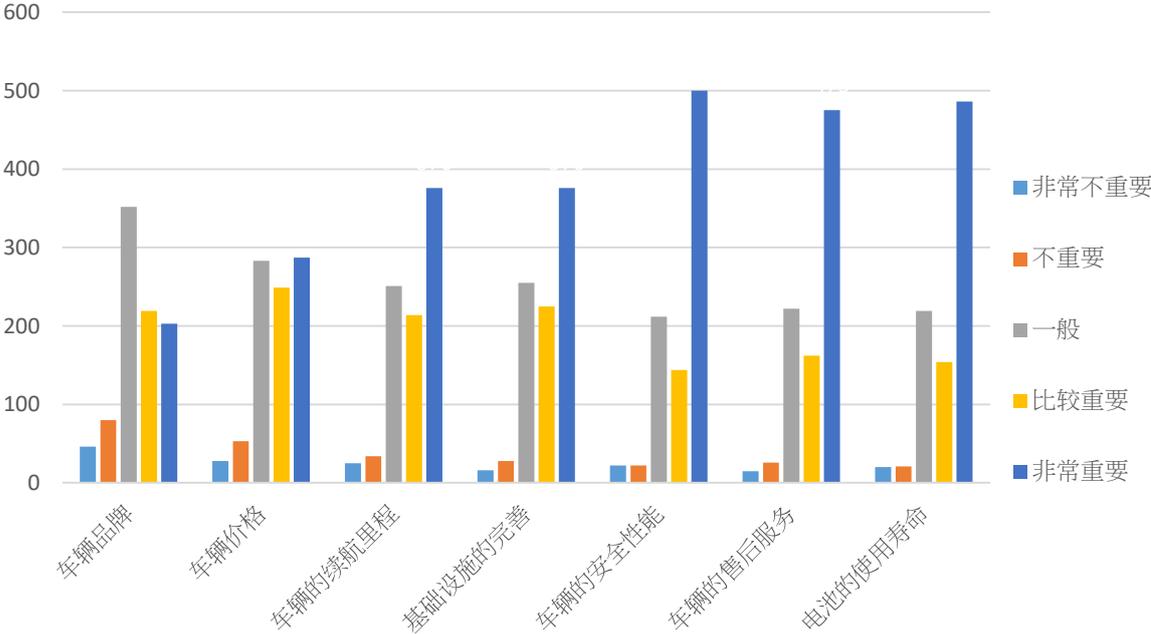


图 3-8 深圳市泥头车电动化影响因素

调研结果表明，泥头车运输企业受市场竞争运费单价压低，泥尾处置问题又提高了运输企业的经营成本，本土运输企业的利润降低，大多处于亏损状态。相比传统充电模式，换电模式可以减少充电等待时间和初始购置成本，运输企业更愿意使用换电版的泥头车。

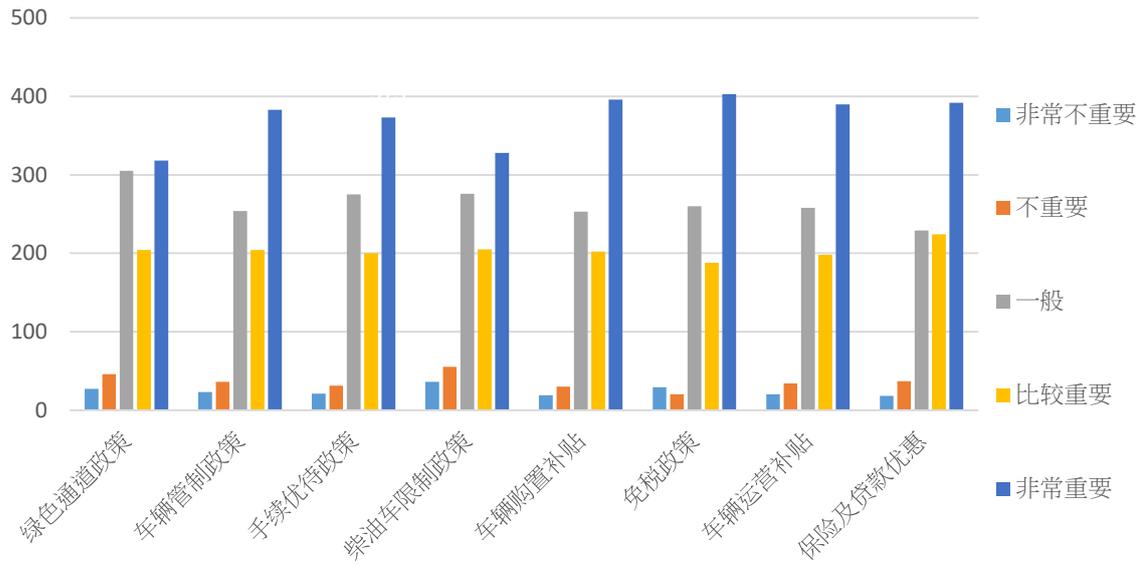


图 3-9 深圳市泥头车电动化推广政策需求

此外，相比于路权、手续优待等政策，企业更关注的是免税、补贴等经济激励政策（图 3-9）；深圳市目前对泥头车运营的时间段及运营路线有相应限制，若相应放宽对电动泥头车的车辆管制政策，可以促进其推广。

第四章 换电技术发展现状分析

4.1 国内外换电模式发展历程

4.1.1 国外换电模式发展历程

早在 2007 年，以色列 Better Place 公司成为世界上第一家从事新能源汽车换电模式运营公司。该公司开发了一套完整的纯电动汽车底盘换电技术，并进行了商业化推广，为客户提供纯电动汽车换电服务。由于硬件成本和电池维护成本投资较大，且受制于当时汽车生产企业对发展新能源汽车还存在较大顾虑，新能源汽车数量极少，同时换电模式在用户端的便性、使用成本和传统燃油车相比没有大的优势，因此最终并没有实现商业化推广。

2013 年，美国电动汽车制造商特斯拉展示了其开发的快速换电技术，换电时间缩短到 90 秒。从技术上看，特斯拉的快速换电技术仍是基于 Better Place 的底盘换电技术路线，但进一步提高了换电速度。由于特斯拉意识到底盘换电的异形电池无法跨车系车型共享、换电站兼容性低、运营效率低，以及难以整合车企资源形成通用标准的致命缺陷，很快将发展重点转向了其超级充电桩技术 Supercharger 3，战略性地放弃了换电路线和模式¹⁶。

4.1.2 国内换电模式发展历程

中国早期主要是在北京奥运会、上海世博会和广州亚运会期间，开展了新能源公交车换电模式示范运行项目，开发和验证了新能源公交车换电技术。国家电网公司首先在新能源乘用车领域进行换电技术研究，提出了“换电为主、插充为辅、集中充电、统一配送”的商业运营模式，完成相关技术储备和出租车换电试点，首次提出并验证了“车电分离，里程计费”的商业模式。

表 4-1 中国换电模式发展历程

时间	发展特点	产业特征
2009-2012 年	国网牵头，示范基地为主，发展换电模式	换电为主，充电为辅
2012-2018 年	充电模式成为发展主流，换电模式发展缓慢	充电为主，换电为辅
2019 年-至今	支持政策出台，市场再次关注换电模式	充换电并行发展

通过中国换电模式发展历程（表 4-1）可以看出，在新能源汽车推广的不同时期境遇截然不同。初期选择换电的原因在于效率高，能够提高消费者对新能源汽车的接受度，特别是在“十城千辆节能与新能源汽车示范推广应用工程”阶段，行业内更关注补电效率，在乘用车和公交车换电等领域都做过尝试，形成了一套完整的换电技术体系，

也进行了市场验证。中期则由于换电投入成本太高、换电车辆少、兼容车型少等缺点，加上标准不完善、企业积极性低等因素，使得市场转而选择并大力发展充电模式，并实现充电桩建设和运营规模化发展。但企业端并没有停止发展换电模式，一直在探索中进步。而现阶段，在新能源汽车补贴逐步退坡的“后补贴时代”，市场又亟需降低整车成本、增加对传统燃油车的竞争优势、减轻消费者的购买压力，于是换电模式所支持的裸车售卖、电池租赁等商业模式被视为新能源汽车行业发展的重要路径之一，重新成为市场关注热点。

2021年10月，工业和信息化部办公厅印发《关于启动新能源汽车换电模式应用试点工作的通知》，决定启动新能源汽车换电模式应用试点工作，其中宜宾、唐山、包头3城市纳入重型货车特色类试点。以下对三个城市（表4-2）进行发展基础以及未来发展计划的分析和研究，为深圳市发展换电重型货车规模化市场应用提供经验借鉴。

表 4-2 新能源重型货车换电模式应用试点城市

城市	发展基础	未来规划
包头	包头市拥有全国唯一军工背景的重型货车生产企业——北奔重汽集团。北奔重汽集团拥有国家级企业技术中心和特种汽车院士工作站，与宁德时代、特百佳动力、玖行能源等行业龙头形成了紧密的合作关系，成功研制了国内第一批换电重型货车。应用场景上，包头及周边地区能源丰富，不乏矿山、厂区等适合纯电动重型货车运营的场景，可以满足运营所需。	2020年12月，包头市启动新能源汽车换电网生态一体化项目建设。2020年12月长安新能源包头智慧换电站投入运营。2020年包头市新能源汽车换电网相关产业投资合作，计划将在3年内在全包头市推广约4万辆新能源汽车，在包头市标准分箱换电模式新能源汽车保有量达1万辆以上时，建成一座以包头为基地、覆盖内蒙古全省的动力电池租赁、存储、转运、梯次利用、循环利用与服务新型动力电池循环产业园。
唐山	唐山的钢铁产量一直位于全国首位，工业产值占唐山经济发展的半壁江山，同时也带来了突出的能耗和环境问题，随着大宗物料以及港口货物运输需求增长，唐山重型货车保有量已超过10.2万辆。在绿色低碳发展目标下，唐山市大宗运输、港口接驳等物流企业也纷纷对新能源运输车辆表现出巨大热情和积极的接纳态度，以助力城市大气污染治理，为换电重型货车的推广提供了丰富的应用场景。	唐山市计划在试点期内落地运营换电重型货车2600台，建成投运换电站不少于60座，成立电池资产管理公司2家，换电运营示范企业5家，届时可节约柴油消耗18亿升，减排二氧化碳473万吨。重点从设计“三纵一横”干线换电网络布局、与国家电投合作建立换电重型货车数据监控管理平台、建立全市纯电动重型货车换电联盟、对新能源重型货车城区不限行等方面落实试点方案。
宜宾	四川宜宾已具备新能源汽车换电模式应用的多个优势。产业集群方面具备完整新能源重型货车换电产业链，宁德时代200GWh生产基地四川时代落地宜宾，3月被认证为全球首家电池零碳工厂，宜宾金茂科易、宜宾科易换电是国内领先的重型货车换电设备提供商，产业基础完备。此外宜宾还拥有行业领先的技术研发团队，丰富的水电等清洁能源，中国电动重型货车换电产业促进联盟等	宜宾市计划在2年内建成换电站20座以上，推广车辆1000辆以上，到2025年建成60座换电站，推广车辆3000辆，并将试点成果推向全国其他20个以上城市，累计建成换电站1000座以上，推广换电重型货车50000辆以上，形成产值300亿以上。从围绕宜宾港、宁德时代园区等典型场景开展共享式重型货车换电示范运营、加快建设换电基础设施网

城市	发展基础	未来规划
	行业组织、独特的“成渝双城经济圈”区位优势等，这些都为其发展换电重型货车提供了基础。	络、构建严格的安全监管平台、推动标准体系建设等方面推动试点方案实施。

4.2 换电重型货车技术方案分析

当前市场电动重型货车的电池安装方式多种多样，主流的换电技术路线包括顶吊式换电方案、整体单侧换电方案、整体双侧换电方案3种（表4-3）。

其中，较早投入进行试点示范的是顶吊式换电方案，由于该种换电方式采用钢索吊装电池包，在电池包接近落座时，钢索具有一定的柔性，比较容易实现误差的兼容，所以顶吊式换电属于技术简单、成本比较低、可行性比较好的换电方案，也是最早商用化的换电方案。因为顶吊式换电的定位方式比较简单，对司机的驾驶技能要求较高，对于港口、矿山等司机经过强化培训的封闭场景，能够发挥司机管理优势，使控制系统简化降低成本。该技术的代表企业为上海玖行

整体单侧换电的电池抓取机构是刚性的，机器人在抓取电池之间没有柔性环节，如果车辆电池与既定位置对位偏差，换电机器人产生校正位置的力则会很大，对导向机构会产生很大的损伤。所以整体单侧换电对智能化技术的挑战更大，对控制精度的要求更高，需装备激光雷达及视觉传感器，导致其成本也相对比较高。由于整体单侧换电智能化程度比较高，其对司机的专业性要求较弱，可适应城市中的渣土车、牵引车、水泥搅拌车等多类车型，且对司机换电停车的要求相对较低，其智能化装备也发挥了较大价值。此外，侧换式换电的优势是换电站的主体装备高度与车高相当，在城市建设时比较容易被定性为装备，可以免去临时建筑审批流程。

整体双侧换电最大的优势是电池不占货箱空间，适用于电池存储位置有限的矿货车型。整体双侧换电对部分必须双侧布置电池的场景及车型具有无可替代的优势。但由于整体双侧换电需要装备两套机器人及两套电池存储充电仓，其成本也相对较高。

表 4-3 三种换电模式对比分析

分类	整体单侧换电	顶吊换电	整体双侧换电
主体高度	主体与车辆等高(<4.5米)	主体位于车辆上方(>6米)	主体与车辆等高
换电时间	3-5分钟	3-5分钟	<5分钟
占地面积	200 m ²	200 m ²	>300 m ²
定位方式	激光雷达+视觉	减速带机械定位	——
车型适应性	自动校准	司机控制停车位置	——
成本	控制系统成本高	控制系统成本低	双机器人成本高

4.3 换电重型货车应用场景分析

4.3.1 封闭场景短倒运输

封闭场景主要包括港口、钢厂、煤矿等，具有作业区域固定，定点、高频、运输效率要求高，日均运距为 80-150 公里，24 小时不间断作业等特征，车辆常处于怠速或低速状态，发动机热效率低、燃油经济性差、污染水平高，使用换电重型货车既能实现能源的快速补给，降低车辆造成的大气污染，且建设一座换电站即可覆盖整个封闭区域的服务需求。且高频短倒用换电，满足快速补能需求，可以提高效率；低频短倒用充电，不需要快速补能，可以降低成本。

4.3.2 开发场景短倒运输

短倒运输场景主要包括城市渣土运输、公铁接驳运输、煤矿到电厂短途运输等，具有路线固定、单程距离短的特征。该场景下，根据运输距离不同，重型货车每天能够往返运输 4-6 次，单程里程 100-200 公里左右，使用换电重型货车可每单程或往返更换 1 块电池，几乎不影响运输效率，可实现对柴油重型货车的替代。同样，高频短倒用换电，满足快速补能需求，可以提高效率；低频短倒用充电，不需要快速补能，可以降低成本。

4.3.3 干线中长途运输场景

重型货车是高速公路运输的主力，因此高速公路等干线中长途运输是换电重型货车的主要应用场景之一。该场景下，重型货车单程运距为 350 公里左右，日均行驶里程可达 800 公里以上，对运输效率要求较高，使用换电重型货车能够满足对运输效率的要求，且换电站可以与加油站同样布局于高速公路服务区内，几乎无需新增土地规划，容易实现推广应用。干线中长途运输用氢燃料电动货车，对车辆有长续航和快速补能的需求。

4.4 换电技术和模式相关政策分析

4.4.1 国家层面

2020 年来多份政府文件提出大力发展换电模式（表 4-4），在 2020 年 5 月国务院发布的《政府工作报告》中，关于新基建的内容由“建设充电桩”扩展为“增加充电桩、换电站等设施”，这是换电站第一次被写入政府工作报告，亦是换电站首次被纳入新型基础设施行列，换电站成为中国新基建的七大重要领域之一，自 2021 年 5 月起重庆、海南、辽宁省大连市相继颁布换电站补贴标准，参考乘用车换电站单站投入 500 万元，

最高可获得 150 万元的一次性建设补贴，以加快换电站建设速度。随着换电站未来迎来快速增长，各省市或将陆续出台补贴标准。同年 11 月《新能源汽车产业发展规划（2021-2035 年）的通知》明确鼓励开展换电模式应用。

换电技术标准走向统一，2021 年《电动汽车换电安全要求》换电领域首个基础通用国家标准的发布，于 1 月起开始实施，文件中对换电汽车设计、换电接口连接、电池包功能及相关监测要求做出了明确规定，从机械强度、电气安全以及环境适应性三个角度保障了换电汽车的使用安全，为换电模式的发展提供了标准支撑，引导了行业合理规范的发展。

此外，2021 年工信部发布的《关于启动新能源汽车换电模式应用试点工作的通知》，将唐山、包头、宜宾等列为重型货车特色类城市。这些城市积极响应，制定了明确的推广目标，出台多项支持换电重型货车推广应用的配套政策，在政策引导的推进下，新能源重型货车的发展已由单纯补贴推动逐步向商业化转变，市场已到了新的转折点。作为特定场景下解决运输需求的载体，换电重型货车或将迎来一波快速增长，2022 年《汽车标准化工作要点》中提出加快构建完善电动汽车充换电标准体系，开展电动汽车大功率充电技术升级方案研究和验证，加快推进电动汽车传导充电连接装置等系列标准修订发布。

表 4-4 2020 年以来换电行业相关政策梳理

时间	名称	主要内容
2020.05	政府工作报告	加强新型基础设施建设，增加充电桩、换电站等设施。
2020.11	新能源汽车产业发展规划(2021—2035)	加快充换电基础设施建设，提升充电基础设施服务水平，鼓励商业模式创新。
2021.02	商务领域促进汽车消费工作指引部分地方经验做法的通知	完善新能源汽车使用环境，便利新能源汽车充(换)电，鼓励有条件的地方出台充(换)电基础设施建设运营补贴政策。
2021.03	2021 年工业和信息化标准化工作要点	推进新技术新产业新基建标准制定，大力开展电动汽车和充换电系统等融合创新标准制定。
2021.03	政府工作报告	增加停车场、充电桩、换电站等设施，加快建设动力电池回收利用体系。
2021.10	关于启动新能源汽车换电模式应用试点工作的通知	将 11 个城市纳入换电试点范围。试点内容包括加强技术研发、开展示范应用、完善基础设施、加强监测管理、健全标准体系、优化产业生态、强化政策支持。
2021.11	电动汽车换电安全要求	发布中国汽车行业换电领域的首个基础通用国家标准，规定了换电式汽车的安全标准，未对换电车型整体设计、电池包、电池接口、换电技术做统一标准划定。
2022.03	2022 年汽车标准化工作要点	提出加快构建完善电动汽车充换电标准体系,推进纯电动汽车车载换电系统、换电通用平台、换电电池包等标准制定。

4.4.2 地方层面

多省市地方政府已经或正在出台一些鼓励乃至专项政策尝试换电模式运营，加码新能源汽车换电模式建设。虽然目前换电模式仍处于推广前期，但政策向充换电模式倾斜，有利于充换电良性商业模式的形成和发展，加强充换电基础设施建设，进一步打开换电新能源汽车产业的发展空间，部分省市也相继发布鼓励换电运营的相关政策（表 4-5）。

表 4-5 部分地方政府鼓励换电运营的专项政策

地方	时间	文件名称	主要内容
上海	2021.02	上海市加快新能源汽车产业发展实施计划（2021-2025）	将完善换电设施报建管理制度，对符合条件的换电运营给予补贴，完善经营性换电网络布局，滚动编制换电设施建设专项规划。
浙江	2021.05	浙江省数字基础设施发展“十四五”规划	鼓励专业运营商加大充换电基础设施建设投资力度，鼓励整车企业与电池企业、充换电基础设施生产运营企业合作，重点加大换电站等设施建设。
贵州	2021.07	关于印发贵州省电动汽车充电基础设施三年行动方案（2021-2023）	加快推动重型货车、渣土车、搅拌车等电动化的工作，因地制宜的建设充换电站，到 2023 年全省累计建成 15 座换电站。
北京	2021.08	关于印发北京市电动汽车社会充换电设施运营补助暂行办法的通知	以充换电设施的充电量为基准，结合对充换电站运营的考核评价等级，给予充换电设施投资建设企业一定的财政资金补助，评选充换电服务示范站，并加大补助支持。
重庆	2021.10	重庆市新能源汽车换电站建设补贴	对换电站采用先建后补的方式，对符合申报条件的、市内已竣工验收并投入使用的公共领域换电站给予补贴，其中建换电站给予 400 元/千瓦的一次性建设补贴
大连	2021.10	大连市新能源汽车充电基础设施建设奖补资金管理办法	对于符合条件的新能源汽车换电站一次性给予不超过换电设施投资的 30% 的补贴资金，最高补贴额度不超过 200 万。
海南	2021.11	海南省新能源汽车换电模式应用试点实施方案	到 2022 年底全省建成换电站 30 座以上，对投放换电车辆不低于 50 辆并实际以换电模式运营的中重型货车项目，一次性给予 400 万的奖励。
宜宾	2022.03	全面推进“电动宜宾”工程实施方案(2022—2025 年)	到 2025 年，核心示范区重型货车换电站达到 37 座、加快发展区重型货车换电站达到 23 座，基本形成全市换电标准统一，车、电池、换电站兼容共享的重型货车换电体系。
重庆	2022.04	关于重庆市 2022 年度新能源汽车与充换电基础设施财政补贴政策的通知	中重型货车换电站按照换电设备充电模块额定充电功率，给予 400 元/千瓦的一次性建设补贴，单站补贴最高不超过 80 万元，单个企业补贴不超过 500 万元。
苏州	2022.06	苏州市“十四五”电动汽车公共充换电设施规划	公交场站、环卫部门、港口码头、物流园区、产业园区等短途、高频、重载场景，布局专用换电站，探索车电分离模式，促进重型货车领域的电动化转型。

4.5 换电重型货车推广现状

由于较大的燃油消耗量和碳排放量，燃油重型货车是电动化的重点对象。2021 年新能源重型货车年销量冲破万辆大关，大大超过市场预期，自 2020 年开始，换电模式在政策的支持下，快速发展。换电重型货车虽然起步较晚，但是发展快速，在两年多时间内，市占比几乎是从零开始，在 2021 年占比达到了 30.70%，基于换电模式可有效解决营运车、商用车等细分赛道对补能效率的需求，换电重型货车正在凭借时效性和经济性加速商用车领域的电动化进程。

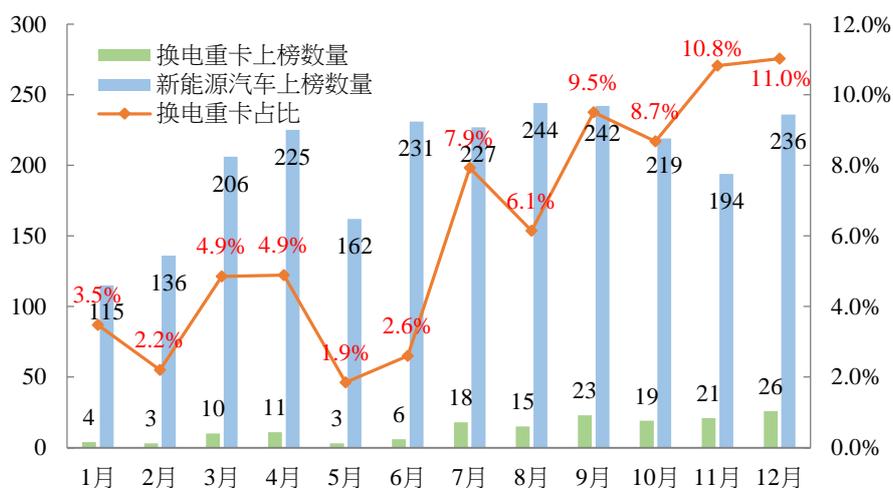


图 4-1 2021 年第 1-12 批换电重型货车车型数量及占比情况

根据工信部 2021 年全年的《新能源汽车推广应用推荐车型目录》数据（图 4-1），换电重型货车推荐车型款数呈现出整体大幅上升趋势，下半年总推荐车型 122 款，远高于上半年的 37 款，预示着换电模式可能会成为未来纯电动重型货车克服续航里程和充电时间等短板的主要路径之一。

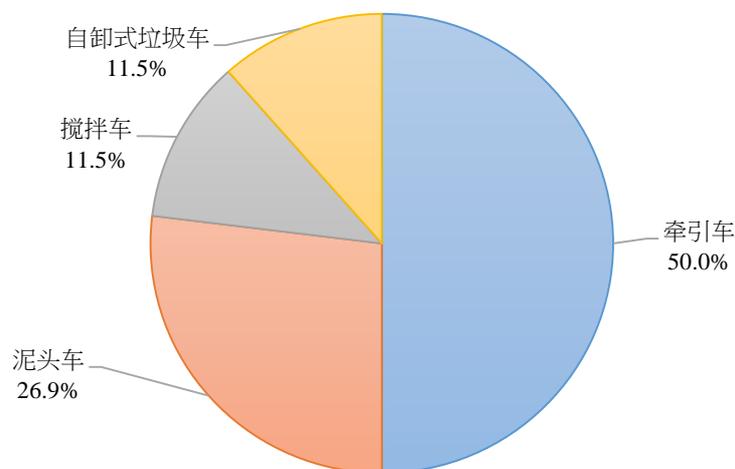


图 4-2 2021 年第 12 批换电重型货车各类车型数据

按车型来分，在第 12 批次的数据显示，上榜的换电牵引车 13 款，占比半壁江山，

居第一；换电泥头车上榜 7 款，占比 26.9%；搅拌车和自卸式垃圾车均上榜 3 款，占比均为 11.5%（图 4-2）。

目前，重型货车换电站主要集中布局在北京、广东、浙江、江苏、福建、山东、上海等经济发达的城市及环境治理要求较高的重工业城市。2020 年 7 月首批北汽新能源换电重型货车车辆交付仪式在京举行，中国首个换电重型货车商业化应用场景正式落地。2020 年 10 月，国内首套电动重型货车智能换电系统在内蒙古煤电露天矿通过 100 天高强度试运行，开启了中国大型工程车辆的电气化进程，2020 年 12 月，国家电网江苏电力公司和徐工集团强强联合，共同推进国内首个城市新能源泥头车换电示范运营项目落地。同月，国家电投山西铝业正式投运充换电站，包含“电动重型货车+充换电站”、智慧物流、光伏发电等 3 个子项目。

到 2020 年底，国家电投已落地换电重型货车、工程机械累计突破 5000 台，充换电设施分布在北京、上海、江苏等 14 个省市，换电站布局落地签约 66 座，其中换电站建成交付 11 座。2021 年 2 月，河南省首个纯电动重型货车充换电站在郑州高新区启用，每天最多可充电 100 辆，实现 24 小时无人值班不间断运营¹⁷。2021 年 12 月，中国重汽 30 辆电动重型货车交付日照港，为山东打造“零碳港口”作出了重要贡献。换电重型货车在钢铁行业、港口运输、市政工程建设领域表现出了强大的运输能力，赢得了市场的认可。2022 年 2 月全国首条电动重型货车干线——福宁干线正式投入运营，标志着换电重型货车走出了只适应支线短倒、短途运输的运输场景，拓展了新的应用场景。随着国家政策不断地扶持和鼓励，换电模式运营商在成本方面有了一定的缓解，加上技术方面的规范和用车方面的安全性，换电重型货车市场或将迎来新的风口。

第五章 深圳市重型货车电动化的环境效益评估

5.1 研究方法

生命周期分析(Life Cycle Analysis, LCA)是针对产品或服务系统从“摇篮到坟墓”全过程的资源消耗和环境影响评价的方法，也是机动车生命周期环境影响量化评价主要方法之一，可用于研判其低碳绿色发展水平。在车辆生命周期环境影响评价研究领域，近年来众多国内外学者采用 LCA 方法对传统汽车与新能源汽车(私家车和公交车)例如纯电动汽车、燃料电池汽车和混合动力汽车等开展对比研究，本研究同样采用生命周期评价方法开展单车减排效益评估，研究系统边界见图 5-1。

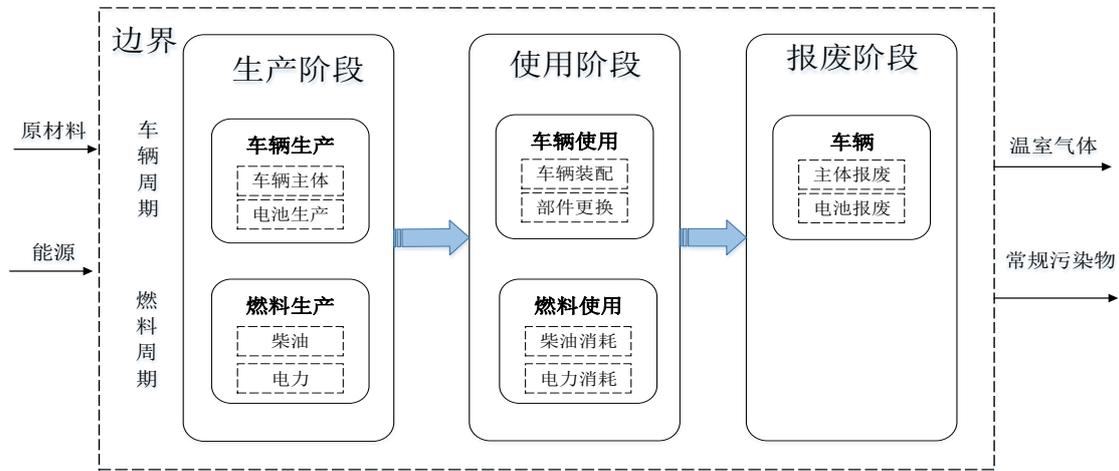


图 5-1 车辆生命周期系统边界

美国阿贡实验室（Argonne national laboratory, ANL）开发研究的 GREET 模型被广泛应用车辆的生命周期评价领域，该模型以燃料为研究对象，划分油井到油泵（well-to-pump, WTP）也称为燃料上游周期和油泵到车轮（pump-to-wheel, PTW）称为燃料下游周期，为了衔接 GREET 模型的结果，本研究将系统边界分为燃料周期和车辆周期，涉及的燃料为传统重型货车使用的柴油和新能源重型货车使用的电力，柴油的上游阶段包括原油开采及运输、炼油和柴油输送到柴油补充站，电力上游阶段包括原煤的开采与生产、电煤运输及其他原料开采与运输，燃料的下游周期为车辆的行驶阶段；车辆周期主要包括生产阶段、使用阶段、维修以及车辆报废处理阶段，本研究的系统边界只考虑与车辆和燃料系统直接相关的范围，不考虑诸如厂房建设和设备制造等间接影响（图 5-1），功能单位考虑为车辆行驶 1km 里程。

5.1.1 分析指标

根据《机动车强制报废标准规定》规定重型载货汽车行驶 70 万 km 需引导报废，并结合行业现状，本研究设定泥头车、集疏港牵引车的生命周期行驶里程为 70 万 km，港内倒短牵引车的生命周期行驶里程为 40 万 km，所分析的直接环境影响主要包括温室气体如 CO₂、CH₄、N₂O 和常规空气污染物 SO_x、NO_x、CO、VOC 和颗粒物等 8 种，其中颗粒物包括了 PM_{2.5} 和 PM₁₀（表 5-1）。

表 5-1 环境影响指标

种类	名称	主要影响
能源消耗	一次能源消耗 (MJ)	主要是包括一次能源、化石能源消耗
温室气体排放	二氧化碳(CO ₂)	是导致全球变暖的主要贡献气体
	甲烷 (CH ₄)	
	一氧化二氮 (N ₂ O)	
常规污染物	挥发性有机物 (VOC)	VOC 是指在常温常压下，从液体或固体中自发发出的化学物质气体排放物，对人类健康和环境具有危害。
	一氧化碳 (CO)	是碳基燃料不完全燃烧的产物，对人类健康造成影响。
	氮氧化物 (NO _x)	会增加水体中的氮负荷，扰乱生态系统的化学与营养平衡。
	二氧化硫 (SO ₂)	是一种对呼吸道有刺激性作用和酸沉降前体物质。
	颗粒物 (PM)	是小颗粒和液滴的复杂混合物，加重呼吸系统疾病。

5.1.2 模型基本假设

5.1.2.1 燃料周期基础参数

本研究涉及的燃料为柴油和电力，传统重型货车使用的是 0 号柴油。柴油的开采等数据主要参考《车辆燃料生命周期能耗和排放分析方法》的结论¹⁸，而电力则考虑深圳市的实际消费电力构成。根据《广东电力市场 2020 年年度报告》内容，广东省域电网核电的装机容量占比 11.5%，气电占比 19%，煤电占比 46.8%，风电、光电等新能源装机占比 22.7%；而深圳电网核电的装机容量占比 44.3%，气电占比 38.6%，煤电占比 13.5%，风电、光电等新能源装机占比 22.7%¹⁹。深圳属于典型受端电网，外来电量即购省网电量的比例大约为 70%，本地调管的电源电量占 30%，根据上述资料可以得到深圳市消费电力构成为核电占比 21.3%，气电占比 24.9%，煤电占比 36.8%和新能源占比 16.97%（图 5-2）。

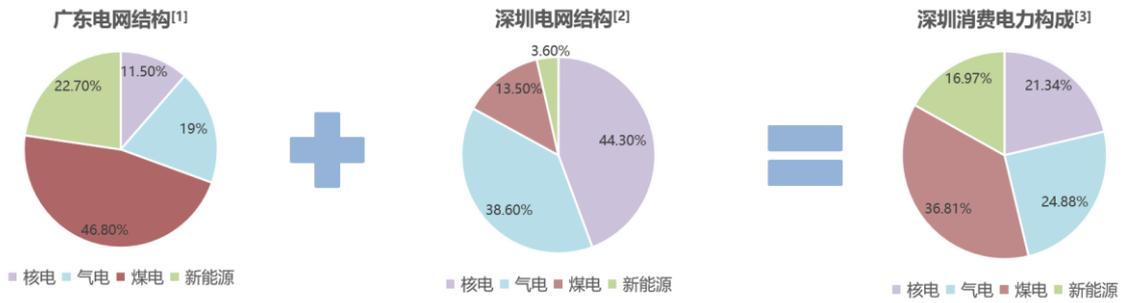


图 5-2 深圳市消费电力结构

美国阿贡国家实验室(ANL)的交通研究中心从 20 世纪 80 年代就开始研究交通燃料和车辆技术的燃料周期问题，通过计算机模拟工具评估在不同交通技术条件下的全生命周期的能源消耗和排放量，本研究采取 ANL 开发的 GREET 软件进行燃料周期的分析。

5.1.2.2 车辆周期基础参数

车辆装配需要多种零部件，而每种零部件的生产工艺不同，根据生产工艺将其划分为车辆主体、电池和流体三部分。电池包括启动和动力电池两种类型，其中启动电池为车辆启动提供电力，而动力电池为车辆行驶提供动力。传统柴油重型货车只有启动电池，而新能源重型货车有启动和动力电池。流体是指车辆中的机油、冷却液、制动液等。车辆除了流体和电池两部分外，其余部件归入车辆主体部分。车身主体原材料构成参考软件内置设置比例（表 5-2），目前纯电动重型货车配备的电池主要为磷酸锂动力电池，其原材料构成占比为：铅：69%，硫酸：7.96%，聚丙烯：6.1%，玻璃纤维：2.1%。

表 5-2 车身主体材料占比

原材料	传统燃油重型货车	纯电动重型货车
钢	61.70%	66.40%
铸铁	11.10%	2.00%
锻铝	4.10%	1.00%
铸铝	2.80%	5.50%
铜	1.90%	4.70%
玻璃	2.90%	3.50%
塑料	11.20%	12.10%
橡胶	2.40%	1.80%
其它	1.90%	3.00%

本研究假设柴油重型货车车辆主体占比 95%²⁰，而纯电动重型货车的电池重量由调研得到，电池重量以 10kg/kwh 计算，车辆装配主要能源消耗发生在车间压缩、焊接、涂装等工艺中，车辆配送阶段的环境影响与运输装置和距离相关，本研究假设采用重

型货车和铁路运输，平均运距为 1600km；车辆的报废包括车辆主体和电池的报废处理，除了加热工序使用煤，其余各个阶段均采用电能（表 5-3）。

表 5-3 车辆装配、配送和报废的能耗强度

环节	涂装	照明	供暖	压缩	焊接	运输	主体报废	电池报废
能耗 MJ/kg	2.72	2.18	2.03	0.90	0.61	1.0MJ/t•km	0.37	31

车辆寿命期间需要对其进行日常维护保养，以保证车辆性能，维修阶段的环境影响主要是由于更换零部件导致的，由于缺乏更换过程的有效数据及这部分影响非常小可以忽略不计，因此本研究不考虑更换过程的环境影响，只考虑更换零部件的生产带来的环境影响，其主要更换的零部件是轮胎和流体，根据文献资料，车辆行驶 80000km 需要更换一次轮胎，重型货车生命周期内加注机油 44 次，雨刷液行驶 12500km 更换一次，制动液和冷却液行驶 62500km 更换一次。

5.1.2.3 车辆行驶阶段参数及道路排放因子

车辆行驶过程的百公里能耗是影响车辆运营过程能耗与环境污染排放的关键因子，本研究传统燃油车的能耗通过调研运输企业获取，纯电动重型货车的能耗通过调研车企及车辆实际运营能耗获取，调研结果表明传统柴油泥头车的百公里油耗为 50L/100km，港内运营的牵引车百公里油耗 65L/100km，中短途运输的牵引车百公里油耗为 30L/100km；纯电动泥头车的百公里电耗为 155~165kWh/100km，本研究选取 160kWh/100km；而港内运营的牵引车百公里电耗的实测数据为 140~150kWh/100km，本研究选取 145 kWh/100km，港外运营的牵引车百公里电耗的实测数据为 130~135kWh/100km，本研究选取 132 kWh/100km。

表 5-4 车辆运行阶段温室气体与大气污染物排放因子

污染物	排放因子 (g/km)	
	燃油重型货车	纯电动重型货车
VOC	0.2285	0
CO	0.2700	0
NOX	8.1091	0
PM10	0.0130	0
PM2.5	0.1122	0
SOX	0.0040	0
CH4	0.0762	0
N20	0.0100	0
CO2	583.5000	0
VOC (蒸发)	0.002	0.013
PM2.5 (轮胎摩擦)	0.022	0.007
PM10 (轮胎摩擦)	0.055	0.026

车辆行驶过程的尾气排放分为标准污染物、温室气体和非尾气排放物，标准污染

物 SOX、NOX、CO、VOC 和颗粒物，温室气体包括了 CO₂、CH₄ 和 N₂O（表 5-4）；非尾气排放物包括燃油蒸发产生的有机化合物 VOC-Evap，轮胎和刹车磨损产生的固体颗粒排放物，数据主要来源于 GaBi 数据库、道路实测数据及相关参考文献。

5.1.3 数据来源

本研究涉及的数据包括燃料周期的燃料上游、下游车辆运行能耗，车辆周期包括车辆原材料的生产与加工、车辆装配与运输、车辆维护和报废阶段，各阶段的能耗与相关物质的污染物排放系数等基础数据来源主要有文献、国家统计局、中国能源统计年鉴和 ANL 开发的 GREET 软件等（表 5-5）。

表 5-5 数据分类及来源

生命周期阶段	数据类别	数据来源
燃料生产	一次能源如煤、石油、天然气生命周期评价数据	能源统计年鉴 2020、文献（高有山）
	深圳市电力构成及生命周期评价数据	广东电力市场年报 2020、文献（周长宝）
车辆原材料生产	钢铁、铜、铝等车辆主体原材料生命周期评价数据	GREET 内置数据、文献（丁宁 ²¹ 、杨建新 ²² ）、GaBi 数据库
	镁、塑料、石墨二极管等电池系统生命周期评价数据	GREET 内置数据、文献（沈万霞 ²³ 、李书华 ²⁴ ）、GaBi 数据库
	机油、传动液等流体系统生命周期评价数据	文献（李书华）
车辆生产、维保和报废	车辆主体、电池系统和流体系统构成比例	GREET 内置数据
	车辆喷涂、焊接和组装等装配阶段的能耗	GREET 数据、文献（李书华）
	车辆配送距离及其能耗	文献（WEISS ²⁵ ； LI ²⁶ ）
	维修阶段部件(如轮胎、机油等)的更换次数及能耗	文献 ²⁷ （余大立、李书华）
	车辆报废回收能耗	文献（AGUIRRE ²⁸ ， LI）
车辆运行	车辆的百公里油耗/电耗	调研
	车辆运营阶段的排放因子	GaBi 数据库、实测数据、文献（余大立、李楠楠 ²⁹ 、郭园园 ³⁰ ）

车辆全生命周期研究过程中收集的数据较为复杂，其中车辆生产制造过程、使用阶段能耗是本研究的重要环节。因此生产过程中所需要的原材料相关数据来自中国本土化的生命周期评价数据(CLCA)；本研究基于能源基金会的项目支持，调研深圳市内相关的家泥头车、港内外运输企业，上汽红岩、重汽等车企收集车辆使用阶段的能耗数据；而车辆维保及拆解阶段的相关数据对结果的影响较小，本研究采用国内外已有文献数据和相关的商业数据库 GaBi 作为参考。

5.2 单车减排效益评估

5.2.1 泥头车生命周期评价结果

5.2.1.1 燃料周期

柴油的 WTP 结果采用已有研究数据，电力 WTP 结果基于深圳市消费电力结构，在 GREET 软件模拟得到;根据调研，即纯电动泥头车的能耗为 1.60kWh/km，柴油泥头车的能耗为0.5L/km;柴油热值为42652kj/kg，密度为0.84~0.85kg/L，本研究取0.85kg/L，电力热值为3600kj/kWh，根据 GREET 模型可得出车辆燃料周期内的能耗与排放结果（表 5-6）。

表 5-6 燃料周期评价结果

燃料	能耗(万 MJ)		燃料周期空气污染物排放(kg)							
	WTW	VOC	CO	NOX	PM10	PM2.5	SO2	CH4	N2O	CO2
柴油	1,269	201	276	6,127	76	199	2,222	521	11	535,383
电力	391	66	213	416	93	42	456	1,065	12	215,187

从能源消耗的角度分析，由于纯电动泥头车的行驶能耗低于柴油泥头车，因此在燃料周期内纯电动泥头车的总能耗降低了 69.2%，在深圳等清洁能源发电占比较高的区域，纯电动重型货车相对传统燃油重型货车有很好的节能效果；在燃料周期下游阶段，纯电动泥头车在行驶过程中尾气零排放，在燃料周期内的气体排放主要来源于燃料周期上游的开采、运输等阶段，使得纯电动泥头车在 WTW 阶段的整体排放优于传统柴油泥头车，从常规气体排放分析，柴油重型货车的排放物主要是因为燃烧不完全而导致的燃烧废物，中国五之前柴油车排放限值较低，且重型货车在道路上处于低速、中速状态下行驶时间最长，而低速行驶是造成单位距离高油耗和排放的主要原因，可以看出 NO_x 的排放显著降低，推广新能源货车可以有效缓解柴油货车 NO_x 控制水平欠佳的问题；从温室气体排放的角度分析，总的排放水平在一定程度上也降低，N₂O 排放对 WTW 周期内的温室效应的贡献不足 1%，其影响相对较小。

5.2.1.2 车辆周期

本研究通过实地调研深圳市泥头车运输企业选取代表车型：其纯电动泥头车主要以本地品牌比亚迪车型为主，柴油泥头车主要以华菱为主（表 5-7）。

表 5-7 泥头车主要技术参数

动力	整备质量	能耗	发动机	电动机	电池类型	动力电池质量	电池容量	启动电池
柴油	15.5 吨	0.5L/km	247kW	-	-	-	-	24V 铅酸
电力	16.5 吨	1.60kWh/km	-	360kW	磷酸铁锂	4.35 吨	435.2kW·h	24V 铅酸

注：车型参数来源货车之家(www.360che.com.cn);能耗信息来源于实地调研，动力电池重量以 10kg/kWh 计算。

从车辆周期各阶段的能源消耗与气体排放可以看出（表 5-8），纯电动泥头车生产阶段的能耗高于柴油泥头车，在目前的技术水平下，大多新能源的重型货车均高于柴油重型货车，加上配备的电池，生产阶段比柴油重型货车需要用到更多的原材料，因而会导致在车辆周期的排放量更高；从整个车辆周期的评价结果来看，新能源汽车车辆链组成阶段的能源需求情况与该组成部分的质量比重有关，车辆生产（车辆主体、流体、电池生产和整车装配）占车辆周期能源消耗的主要部分，气体排放情况与能源消耗的情况一致，由于纯电动泥头车的自重较大，整体排放水平高于柴油泥头车，因此降低车辆周期能耗与排放的重点在于降低新能源重型货车自身在生产阶段的能耗与排放。

表 5-8 车辆周期评价结果

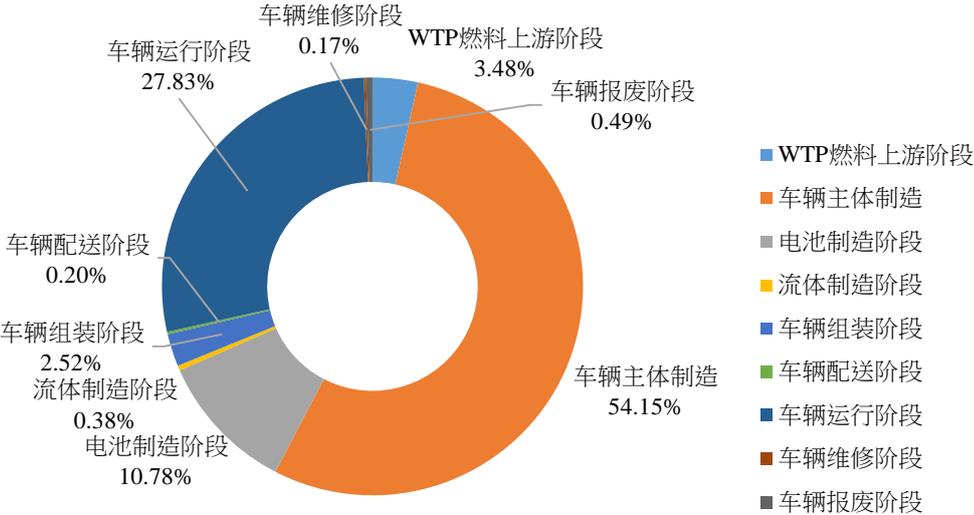
万 MJ/kg	总能耗	VOC	CO	NO _x	PM ₁₀	PM _{2.5}	SO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂
I. 车辆生产阶段的能耗及空气污染物排放										
柴油	664.31	211.55	495.49	874.83	746.20	341.75	2663.78	2059.70	8.97	261,151
电动	816.18	235.49	512.76	905.66	776.31	355.98	3511.18	2155.76	9.36	337,108
II. 车辆装配阶段的能耗及空气污染物排放										
柴油	29.54	4.32	16.09	31.45	5.69	2.83	34.50	80.54	0.94	42,044
电动	31.45	4.60	17.13	33.47	6.06	3.01	36.73	85.73	1.00	44,754
III. 车辆维修阶段的能耗及空气污染物排放										
柴油	2.44	2.98	5.27	3.83	2.78	1.32	9.77	6.68	0.02	2041.12
电动	2.12	2.92	5.18	3.33	2.62	1.22	9.33	6.22	0.02	2049.92
IV. 车辆报废阶段的能耗及空气污染物排放										
柴油	1.03	0.15	0.56	1.09	0.20	0.10	1.20	2.80	0.03	1459.24
电动	6.15	0.90	3.35	6.54	1.18	0.59	7.18	16.75	0.20	8746.13

5.2.1.3 全生命周期能耗

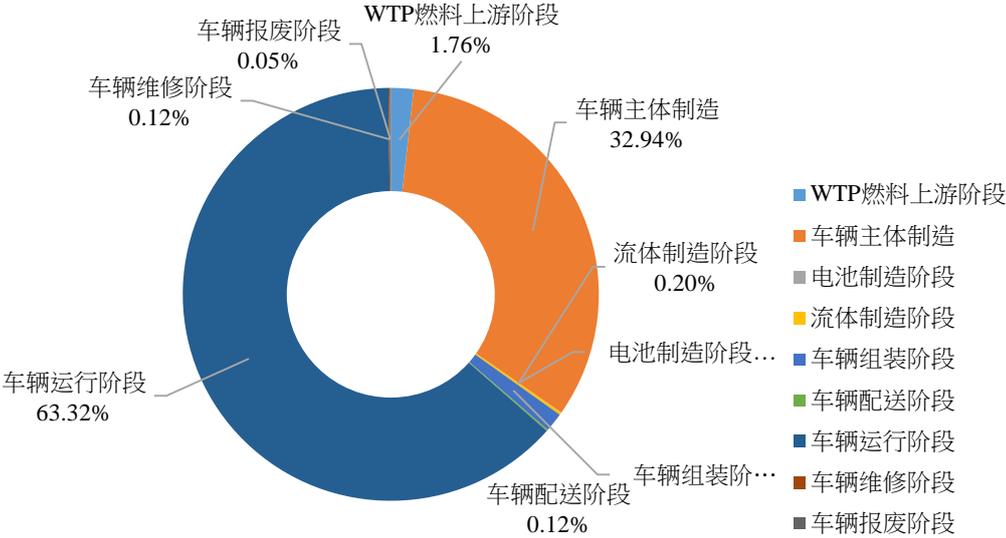
从全生命周期能耗的角度出发，根据上文构建的车辆生命周期系统模型，柴油泥头车和纯电动泥头车的能耗分别为 28.1MJ/km、17.9MJ/km，公交车的整备质量与泥头车相差不大，与黎土煜的研究做对比，传统柴油公交车和纯电动公交车的结果分别为 21.2MJ/km、15.0 MJ/km，结果产生差异的原因主要是由于泥头车的运行过程消耗的燃料水平和系统边界不同引起，本研究的系统边界包含了车辆的维修的阶段和报废阶段，此外由于行驶速度和行驶工况的不同，泥头车的百公里电耗和油耗水平均高于公交车，导致能耗高于公交车。

纯电动泥头车全生命周期能耗较传统柴油泥头车减少 36.2%，从各个阶段的能耗占

比可以看出（图 5-3），柴油泥头车的运行能耗占其总能耗的 63.3%，而纯电动的泥头车能耗仅占总能耗的 27.8%，主要原因是柴油泥头车在运行作业的过程中频繁启动，怠速和刹车等操作使得油耗水平很高，而纯电动泥头车处于经济运行状态，运行效率高于传统泥头车；纯电动泥头车的制造能耗占比 54.1%，是全生命周期内能耗最高的阶段，主要原因是由于纯电动泥头车的自重比柴油泥头车大，所需原材料更多，若能进一步将纯电动泥头车轻量化其节能效果更加显著。



(a) 纯电动泥头车全生命周期能耗占比



(b) 柴油泥头车全生命周期能耗占比

图 5-3 泥头车全生命周期能耗

分析可知，车辆行驶阶段的能耗是柴油泥头车全生命周期能耗占比最大的部分，

降低其运行能耗的关键在于合理规划泥头车运行线路和运行时间；而纯电动泥头车能耗最大的阶段是车辆主体制造阶段，与传统柴油泥头车相比，纯电动泥头车配备的磷酸铁锂动力电池制造能耗远超过普通车载电池制造能耗，约为传统柴油泥头车车载铅酸蓄电池的400倍，因此降低纯电动泥头车的能耗关键在于在动力电池，应采用先进技术、研发先进材料、合理利用和回收能源，以此降低动力电池的制造能耗。

5.2.1.4 全生命周期大气污染物和温室气体减排效益

基于上文分析，结合相应的泥头车实际运行数据，综合得出两类泥头车全生命周期行驶单位公里大气污染物和温室气体的排放量（图5-4、5-5），根据中国移动源环境管理年报的公开数据，十三五期间NO_x的减排比例仅2%，其中重型柴油货车NO_x的排放量分担率达到了75%，就泥头车而言，纯电动泥头车相较于传统柴油泥头车在全生命周期内NO_x的减排效益最为显著，降低了80.6%；VOC和PM_{2.5}的减排效果次之，分别为26.5%和26.2%，柴油泥头车的VOC主要是由于柴油不完全燃烧尾气排放和蒸发造成；对于SO₂，纯电动泥头车的排放来源于电力生产过程，由于深圳处于珠三角区域，清洁能源发电比例较高，全生命周期的减排效益为18.5%；从固体颗粒物的减排效果看，PM₁₀的排放增加5.9%，PM_{2.5}的排放降低了26.2%，重型柴油货车的废气会加重颗粒物的浓度进而危害人体健康，总体而言纯电动泥头车也能降低颗粒物的排放。

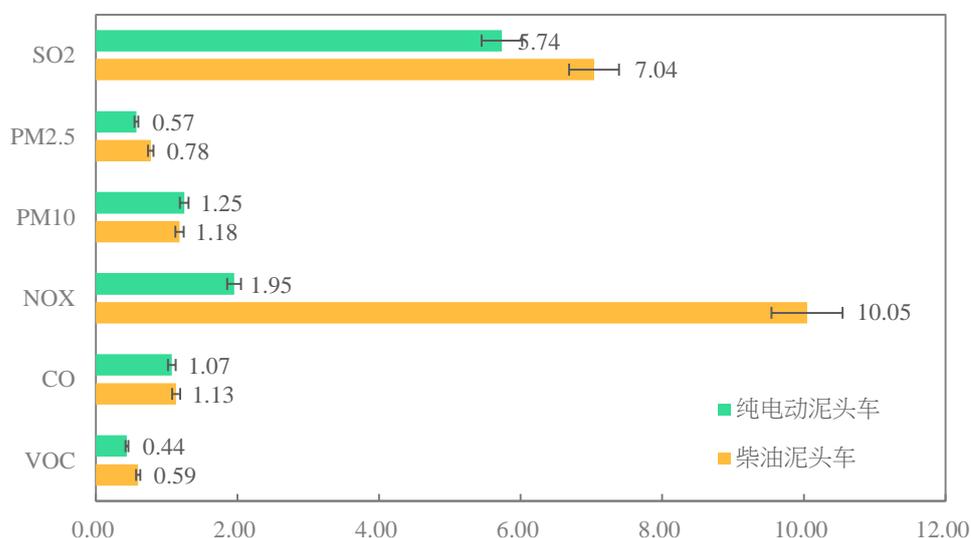


图 5-4 泥头车全生命周期大气污染物排放 (g/km)

纯电动泥头车和柴油泥头车的温室气体(greenhouse gases, GHGs)排放强度分别为1307.3g/km、996.9 g/km，降低了23.7%，Song对比不同吨位传统柴油和LNG泥头车的GHGs排放结果为1200~1500g/km和1100~1400g/km，减少约8.3%，这一结果表明纯

电动泥头车减排效果比 LNG 更加显著，主要原因是在清洁能源发电比例较高的珠三角地区推广纯电动泥头车的碳减排效果更加显著。对于传统柴油泥头车，温室气体排放的主要阶段来源于车辆运行阶段尾气的排放，而纯电动泥头车可以实现车辆行驶过程中的温室气体零排放。

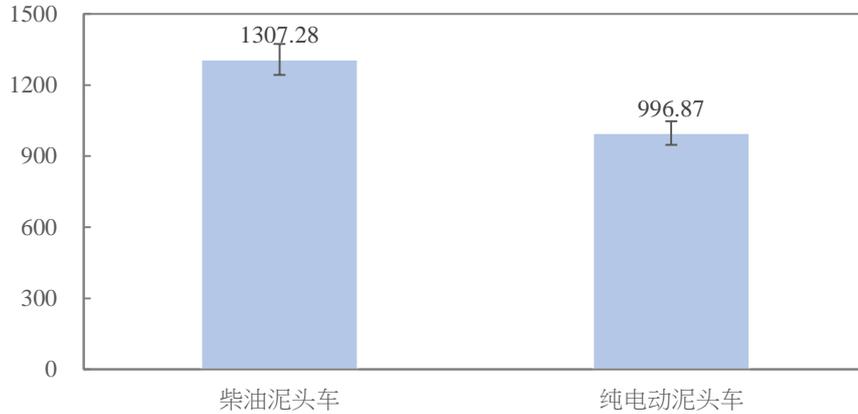


图 5-5 泥头车全生命周期温室气体 (Greenhouse gases, GHGs) 排放 (g/km)

5.2.2 集疏港牵引车生命周期评价结果

5.2.2.1 燃料周期

与泥头车的评价结果相似，根据调研，集疏港纯电动牵引车的能耗为 1.32kWh/km，柴油牵引车的能耗为 0.3L/km，根据 GREET 模型可得出泥头车燃料周期内的能耗与排放结果（图 5-9）。

表 5-9 燃料周期评价结果

燃料	能耗(万 MJ)		燃料周期空气污染物排放(kg)							
	WTW	VOC	CO	NOX	PM10	PM2.5	SO2	CH4	N2O	CO2
柴油	1,015	193	259	6,037	70	178	1,778	427	11	504,936
电力	333	58	181	394	82	37	418	907	11	215,011

从能源消耗的角度分析，由于纯电动牵引车的行驶能耗较低，因此在燃料周期的总能耗降低了 67.2%，节能效果显著。

5.2.2.2 车辆周期

本研究通过实地调研选取代表车型：纯电动牵引车主要以重汽豪沃换电牵引车为主，柴油牵引车主要以斯太尔为主（图 5-10）。

表 5-10 重型牵引车主要技术参数

动力	整备质量	能耗	发动机	电动机	电池类型	动力电池质量	电池容量	启动电池
柴油	6.8 吨	0.65L/km (港外) 0.3L/km (港内)	247kW	-	-	-	-	24V 铅酸
电力	8.8 吨	1.32kWh/km (港外) 1.45kWh/km (港内)	-	250kW	磷酸铁 锂	2.8 吨	282kWh /141kWh	24V 铅酸

注：车型参数来源货车之家(www.360che.com.cn);能耗信息来源于实地调研，动力电池重量以 10kg/kwh 计算。

从车辆周期各阶段的能源消耗与气体排放可以看出（表 5-11），相较于泥头车，牵引车的自重较低，在生产阶段所需要的原材料也较少，因此其在车辆周期的能耗低于泥头车，总体而言，目前新能源重型货车自身的整备质量都高于传统的柴油重型货车，车辆周期内能耗及常规污染物的排放都不具有节能减排优势，削减新能源重型货车在全生命周期内的减排效益，在未来技术水平不断提高的基础下，新能源重型货车可以通过多种途径降低自身生产阶段的环境影响，其在全生命周期内的减排效益将更加显著。

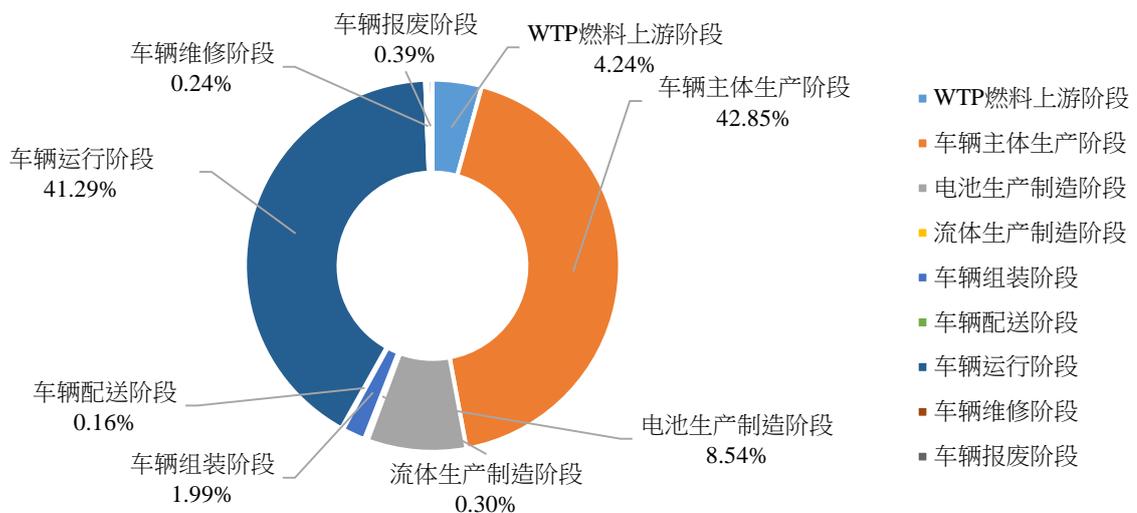
表 5-11 车辆周期评价结果

万 MJ/kg	总能耗	VOC	CO	NO _x	PM ₁₀	PM _{2.5}	SO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂
I. 车辆生产阶段的能耗及空气污染物排放										
柴油	326.81	94.17	226.88	394.51	332.18	152.13	1509.34	916.60	3.99	286,547
电动	453.30	125.59	295.37	493.55	414.03	123.35	1884.06	1149.74	4.99	345,905
II. 车辆装配阶段的能耗及空气污染物排放										
柴油	14.20	2.42	7.68	27.36	2.67	1.56	18.79	36.40	0.44	19,736
电动	16.79	2.45	9.14	17.87	3.23	1.61	19.60	45.76	0.54	23,889
III. 车辆维修阶段的能耗及空气污染物排放										
柴油	2.31	2.86	5.19	3.67	2.44	1.16	7.52	5.99	0.02	1963.03
电动	2.00	2.82	5.11	3.18	2.32	1.08	7.31	5.61	0.02	1980.80
IV. 车辆报废阶段的能耗及空气污染物排放										
柴油	0.46	0.07	0.25	0.49	0.09	0.04	0.53	1.24	0.01	649.60
电动	3.28	0.48	1.79	3.49	0.63	0.31	3.83	8.94	0.10	4664.60

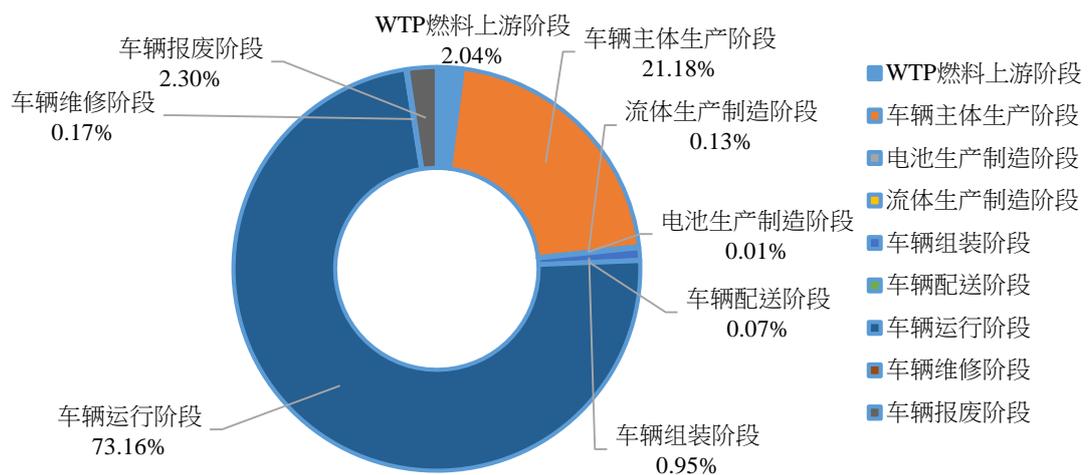
5.2.2.3 全生命周期能耗

根据上文构建的车辆生命周期系统模型，集疏港中短途运输纯电动牵引车和柴油牵引车港内倒短牵引车和港外短途运输牵引车的能耗分别为 11.5MJ/km、19.4MJ/km，与纯电动泥头车相比，4×2 的纯电动牵引车整备质量较轻，其车辆周期的总能耗较低，因而其单公里能耗低于纯电动泥头车；车辆主体生产和车辆运行是全生命周期能耗占比最高的阶段，超过 80%，电池制造阶段的能耗比例为 8.5%（图 5-7），其能耗也不容

忽视，降低纯电动牵引车的能耗关键在于提高动力电池和车辆主体的制造水平，追求新能源重型货车的轻量化，轻量化作为支撑汽车产业变革的一项共性关键基础技术，是国内外汽车厂商应对能源环境挑战的共同选择，也是汽车产业可持续发展的必经之路。在《中国制造 2025》中关于汽车发展的整体规划中更是重点提及，强调“轻量化仍然是重中之重”，将“轻量化”发展作为国家做大做强汽车制造业的重要战略方向之一，在当前商用车治超法规日益严苛和环保政策逐渐趋紧的双重压力下，推进商用车轻量化技术发展更是意义重大。



(a) 集疏港纯电动牵引车全生命周期能耗占比



(b) 集疏港柴油牵引车全生命周期能耗占比

图 5-7 牵引车全生命周期能耗

5.2.2.4 全生命周期大气污染物和温室气体减排效益

基于实际运行数据，综合得出集疏港牵引车全生命周期行驶单位公里大气污染物和温室气体的排放量（图 5-8、5-9），柴油重型货车是造成机动车 NO_x 排放水平高居不下的原因之一，从研究结果可以看出，纯电动牵引车可以显著降低 NO_x 排放量，同时新能源重型货车在运行期间可以实现无噪音和零尾气排放，在国家可持续发展的背景下和双碳政策的驱动下，推广新能源重型货车可以助力道路货运行业完成绿色升级转型。

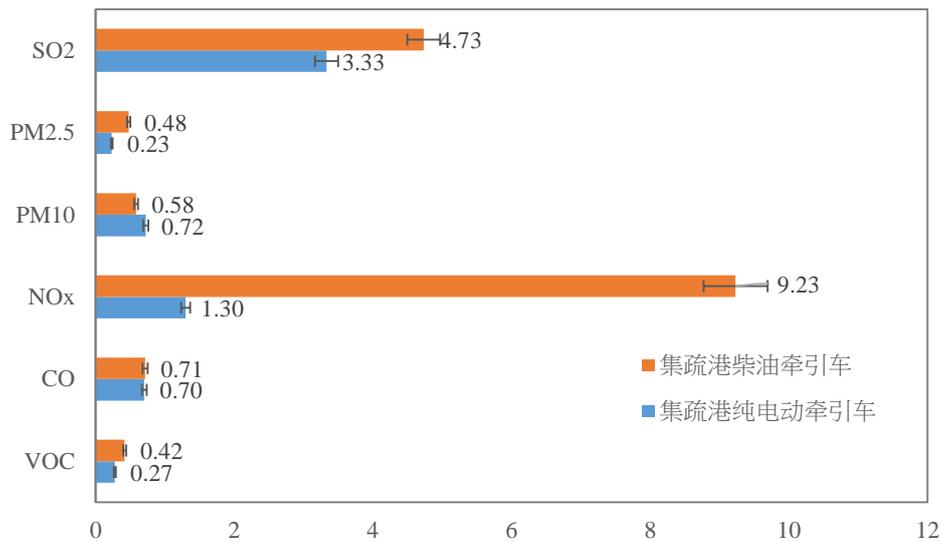


图 5-8 集疏港牵引车全生命周期大气污染物排放 (g/km)

纯电动牵引车和柴油牵引车 GHGs 排放强度分别为 927.6g/km、1218.7g/km，Song 对比不同吨位传统柴油和 LNG 牵引车的 GHGs 排放结果为 1400~1800g/km 和 1300~1600g/km，结果相差不大，可以看出，纯电动牵引车在节能减排效果上更优于 LNG 牵引车。

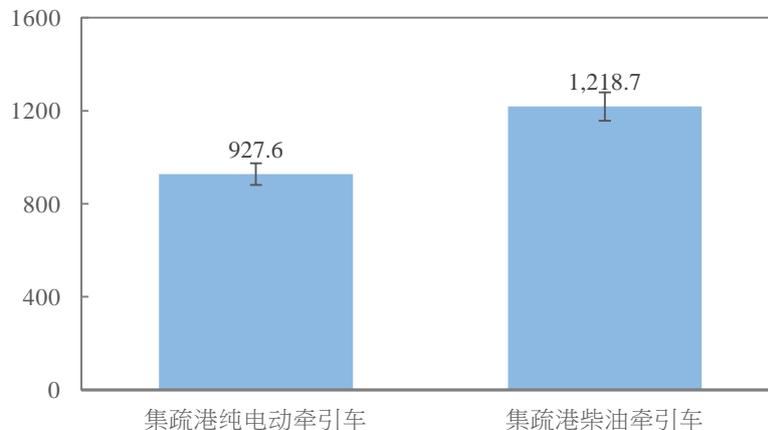


图 5-9 集疏港牵引车全生命周期温室气体 (Greenhouse gases, GHGs) 排放 (g/km)

5.2.3 港内（盐田港）重型牵引车生命周期评价结果

5.2.3.1 燃料周期

根据调研，港内纯电动牵引车的能耗为 1.45kWh/km，柴油牵引车的能耗为 0.65L/km，根据 GREET 模型可得出泥头车燃料周期内的能耗与排放结果（表 5-12）。

表 5-12 燃料周期评价结果

燃料	能耗(万 MJ)		燃料周期空气污染物排放(kg)							
	WTW	VOC	CO	NOX	PM10	PM2.5	SO2	CH4	N2O	CO2
柴油	914	121	173	3,578	48	132	1,650	378	7	338,305
电力	194	36	102	205	51	23	250	569	7	184,853

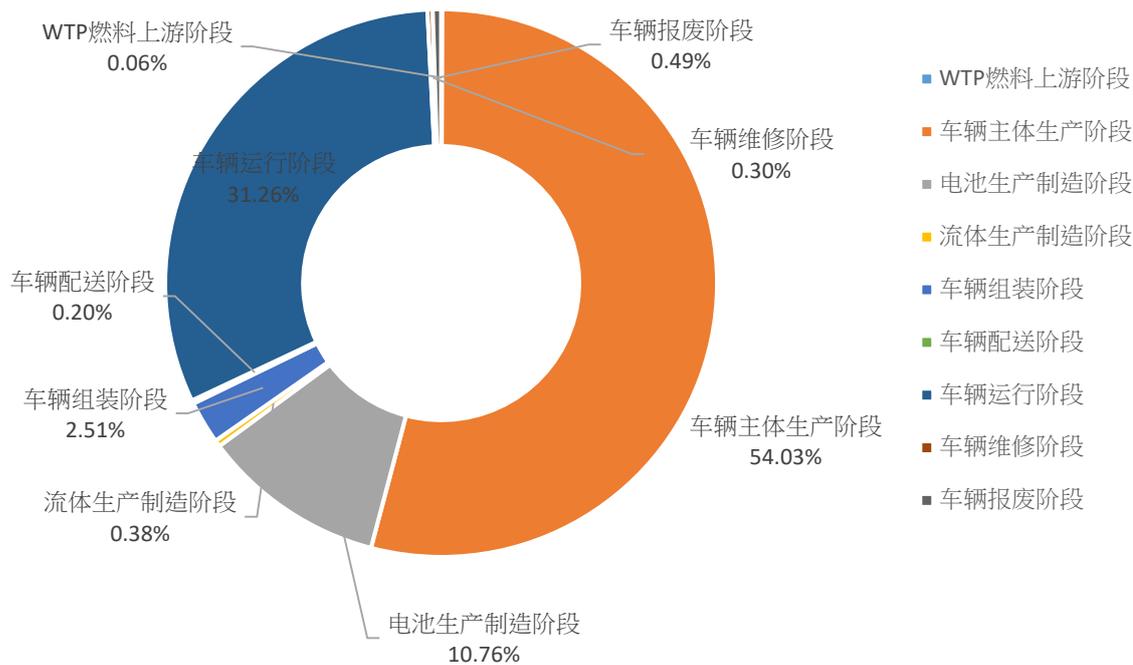
从能源消耗的角度看，燃料周期的总能耗降低了 78.7%，港口内主要为重载短倒运输，同时车辆行驶中处于低速、频繁停启的状态，在港口内推广纯电动重型货车可以显著减少能耗。

5.2.3.2 车辆周期

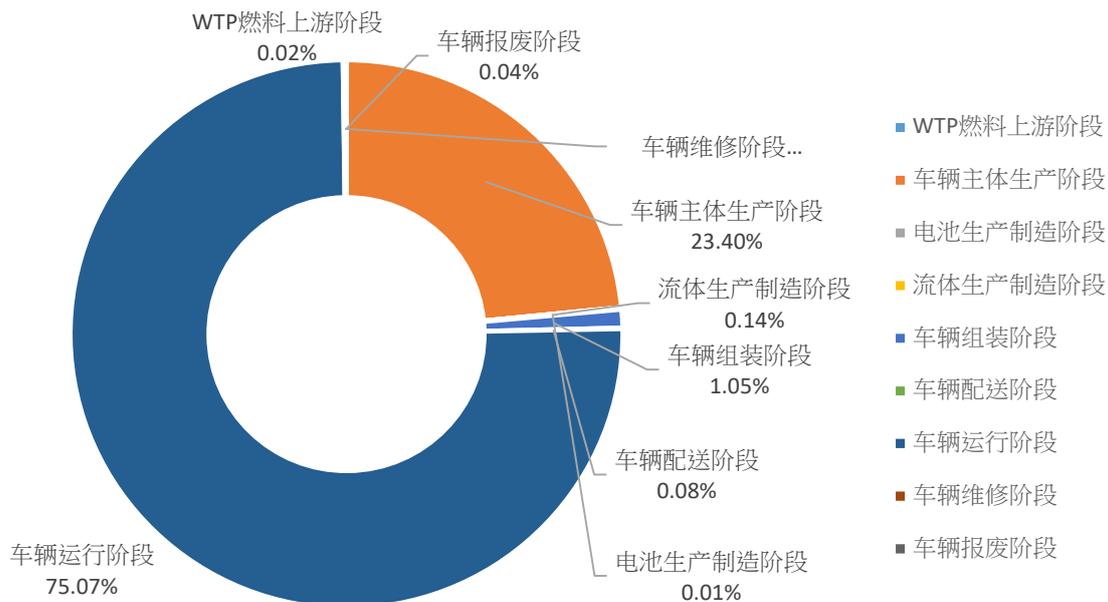
港内车辆和集疏港车辆一致，因此车辆周期评价结果一致，本部分内容在 5.2.2 中已有描述，本节不再赘述。

5.2.3.3 全生命周期能耗

根据上文构建的车辆生命周期系统模型，港内倒短纯电动牵引车和柴油牵引车的能耗分别为 16.7MJ/km、31.4MJ/km，对于港内倒短柴油牵引车而言，推广纯电动牵引车的能耗单公里能耗可以降低 46.8%，车辆行驶阶段的能耗是其全生命周期能耗占比最大的部分，占比 75%（图 5-10），主要原因在于车辆运行是处于低速、大负荷的状态，相应地也会造成油耗水平较高，因此对于柴油牵引车而言，降低其能耗的关键在于降低其油耗水平。



(a) 港内纯电动牵引车全生命周期能耗占比



(b) 港内柴油牵引车全生命周期能耗占比

图 5-10 港内牵引车全生命周期能耗

5.2.3.4 全生命周期大气污染物和温室气体减排效益

基于实际运行数据，综合得出港内牵引车全生命周期行驶单位公里大气污染物和温室气体的排放量（表 5-13、图 5-11、5-12），可以看出 NO_x 的减排效果最为显著，高达 81.1%，而港内牵引车结果比集疏港牵引车稍高的原因在于系统生命周期里程的设

定，港内牵引车主要为倒短运输，每天运营里程较少，因此生命周期总里程数少于集疏港牵引车。

表 5-13 重型货车全生命周期环境效益评汇总表
(a)泥头车全生命周期环境效益评价

万MJ/kg	总能耗	VOC	CO	NO _x	PM ₁₀	PM _{2.5}	SO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂
I. 燃料周期能耗及空气污染物排放										
柴油	1269	201	276.00	6127.00	76	199	2222.00	521	11	535,383
电动	391	66	213.00	416.00	93	42	456.00	1065	12	215,187
II. 车辆周期的能耗及空气污染物排放										
柴油	697.32	219.00	517.42	911.20	754.87	346.00	2709.25	2149.72	9.96	306,696
电动	855.90	243.91	538.43	949.00	786.17	360.80	3564.41	2264.46	10.58	392,658
III. 全生命周期的能耗及空气污染物排放										
柴油	1966.32	420.00	793.42	7038.20	830.87	545.00	4931.25	2670.72	20.96	842,079
电动	1249.02	312.03	753.55	1367.12	881.29	404.92	4022.53	3331.58	24.70	607,847

(b) 集疏港牵引车全生命周期环境效益评价

万MJ/kg	总能耗	VOC	CO	NO _x	PM ₁₀	PM _{2.5}	SO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂
I. 燃料周期能耗及空气污染物排放										
柴油	1015	193	259.00	6037.00	70	178	1778.00	427	11	504,936
电动	333	58	181.00	394.25	82	37	417.76	907	11	215,011
II. 车辆周期的能耗及空气污染物排放										
柴油	343.78	99.42	240.00	426.03	337.38	154.89	1536.18	960.23	4.46	308,896
电动	475.37	131.34	311.41	518.09	420.21	126.34	1914.80	1210.05	5.65	376,439
III. 全生命周期的能耗及空气污染物排放										
柴油	1358.78	292.42	499.00	6463.03	407.38	332.89	3314.18	1387.23	15.46	813,832
电动	808.37	189.34	492.41	912.34	502.21	163.34	2332.56	2117.05	16.65	591,450

(c) 港内牵引车全生命周期环境效益评价

万MJ/kg	总能耗	VOC	CO	NO _x	PM ₁₀	PM _{2.5}	SO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂
I. 燃料周期能耗及空气污染物排放										
柴油	913.51	121.00	173.00	3578.00	48.00	132.00	1650.00	378.00	7.00	338,305
电动	193.52	36.00	101.88	205.20	51.00	23.00	250.13	569.00	7.00	184,853
II. 车辆周期的能耗及空气污染物排放										
柴油	343.78	99.42	240.00	426.03	337.38	154.89	1536.18	960.23	4.46	308,896
电动	475.37	131.34	311.41	518.09	420.21	126.34	1914.80	1210.05	5.65	376,439
III. 全生命周期的能耗及空气污染物排放										
柴油	1257.30	220.42	413.00	4004.03	385.38	286.89	3186.18	1338.23	11.46	647,201
电动	668.89	167.34	413.29	723.29	471.21	149.34	2164.94	1779.05	12.65	561,292

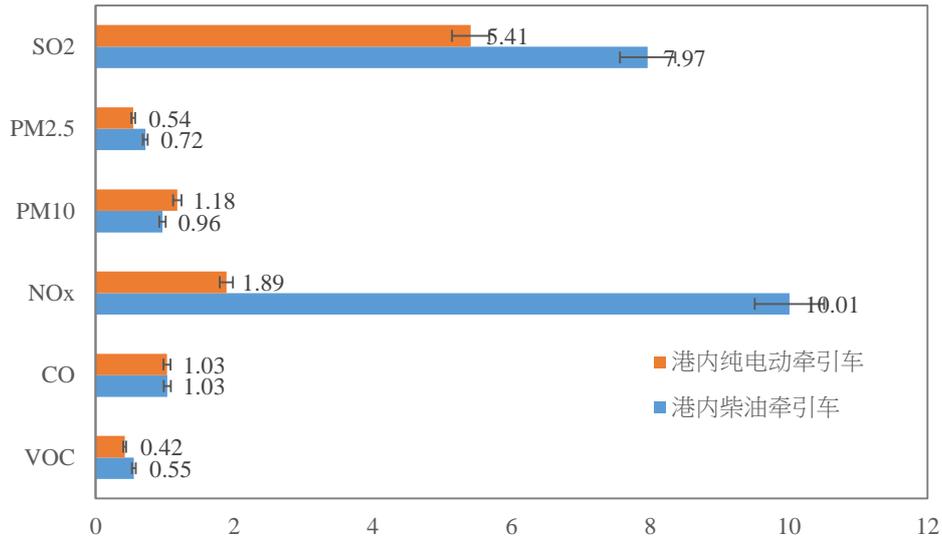


图 5-11 港内牵引车泥头车全生命周期大气污染物排放 (g/km)

纯电动牵引车和柴油牵引车 GHGs 排放强度分别为 1472.9g/km、1644.9g/km，相较于 NO_x 的削减幅度，GHGs 的减排效果较小，减排比例为 10.4%。

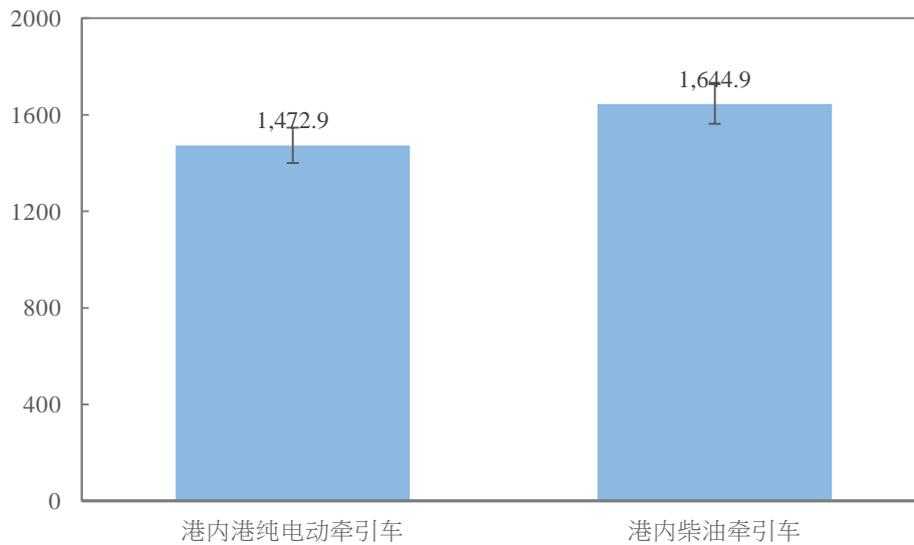


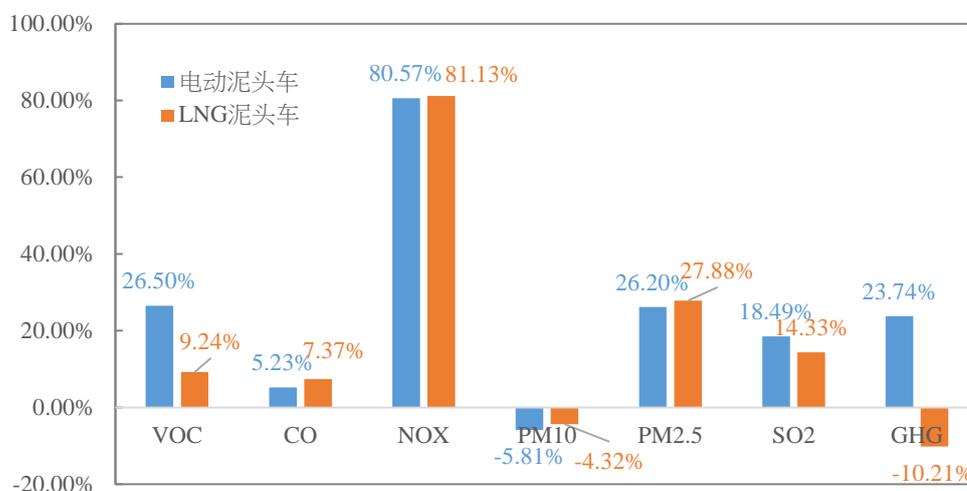
图 5-12 港内牵引车全生命周期温室气体 (Greenhouse gases, GHGs) 排放 (g/km)

5.2.3 LNG 重型货车污染物减排效益分析

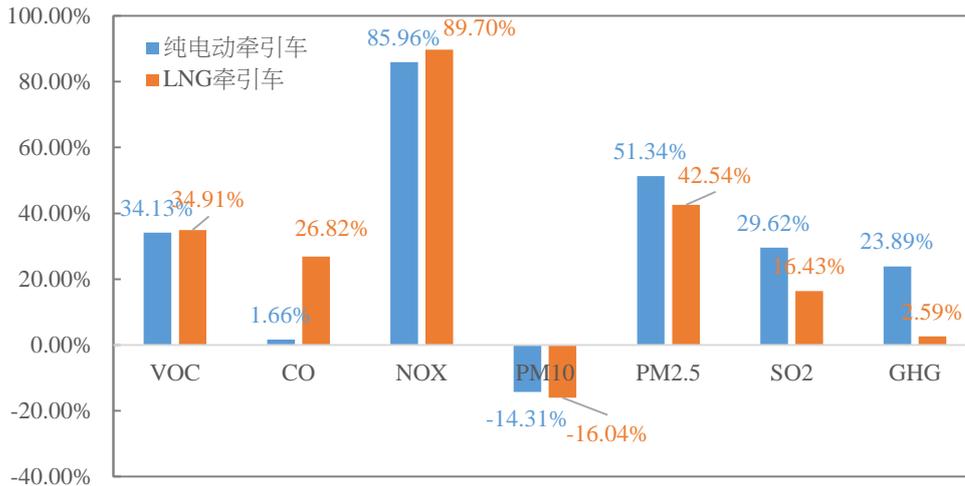
中国 LNG 重型货车的排量生产始于 2008 年，2019 年年产量于超过 10 万辆，2020 年，重型货车年产量达到历史新高的 14.2 万辆，保有量达到 58 万辆。中国 LNG 重型货车的年车辆和保有量多年来一直是全球第一，保有量占全球 LNG 重型货车的 98%。新能源重型货车是未来的发展趋势，但是 LNG 重型货车在深圳市特定场景也有少量应用，包括 8*4 泥头车和 4*2 牵引车。为了客观地评估纯电动重型货车的综合效益，本节将基于文献数据，对比分析 LNG、纯电动重型货车较传统燃油重型货车的污染物减排

比例。

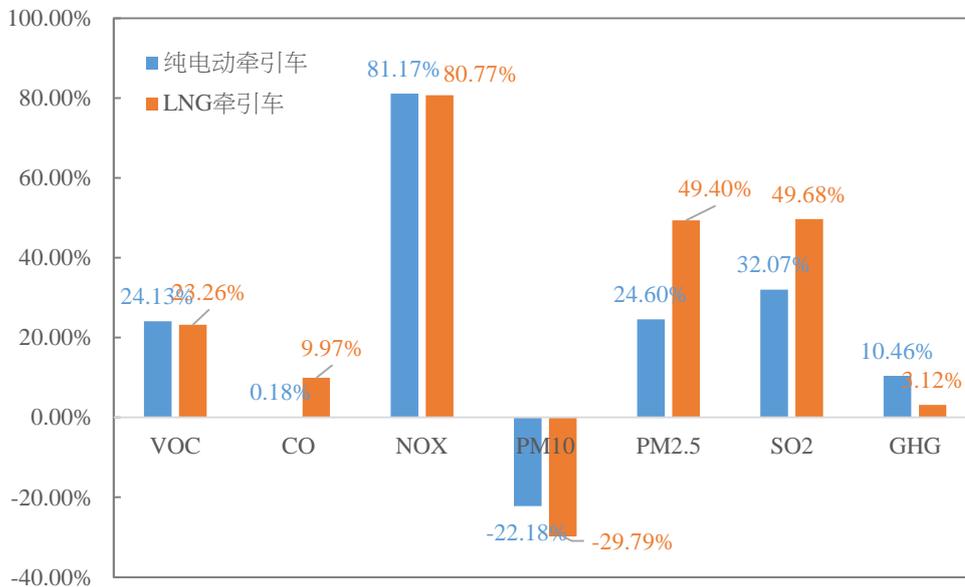
LNG 重型货车车型选择 8*4 泥头车和 4×2 牵引车，燃料周期中，天然气生产、运输等阶段的数据来源于 GaBi 软件，车辆运行阶段的数据基于调研及文献补充，LNG 泥头车的能耗为 0.5kg/km，港内运行 LNG 牵引车的能耗为 0.44kg/km，集疏港 LNG 牵引车的能耗为 0.26kg/km，车辆周期中，LNG 车型整备质量稍重于柴油重型货车，因此假设车辆的整备质量比柴油重型货车高 10%，而诸如车辆装配等阶段数据与柴油重型货车一致，车辆行驶 70 万 km 报废，对比分析得出 LNG、纯电动重型货车较传统燃油重型货车的污染物减排比例（图 5-13），从减排效果看，纯电动重型货车在常规污染物和温室气体排放方面均具有稳定的削减效益，NO_x 的减排效果最为显著，本研究表明纯电动重型货车 NO_x 的削减比例为 80%~90%，因此推广纯电动重型货车对降低城市中心区氮氧化物浓度水平具有重要意义。而 LNG 重型货车在常规污染物排放方面也具有一定的减排效益，总体而言削减幅度低于纯电动重型货车，但在温室气体方面，LNG 化石燃料消耗较高，虽然 CO₂ 排放方面有 5%~10% 的微小减排效果，但是同时车辆会有大量的 CH₄ 排放，因此整体而言在 GHG 排放方面并没有优势。



(a) 纯电动、LNG 泥头每公里污染物减排比例



(b) 集疏港纯电动、LNG 牵引车每公里污染物减排比例



(c) 港内纯电动、LNG 牵引车每公里污染物减排比例
图 5-13 电动与 LNG 重型货车污染物减排对比分析

目前各省市打赢蓝天保卫战三年行动计划方案陆续出台与实施，同时各地国三标准货车的淘汰更新政策正在加速实施，同时叠加国六 a 阶段排放标准的实施，可以看出在交通运输领域尤其是重型货车上大力推广清洁能源，降低石油消耗，减少排放污染，将是未来发展的趋势，纯电动重型货车、LNG 重型货车的推广均能改善城市空气质量。但是从目前的研究分析来看，电动重型货车的减排效益更为明显。虽然 LNG 重型货车作为柴油重型货车的替代燃料车，可以有效地削减石油消耗和 NO_x 排放，但是其带来的天然气消耗量以及排放的温室气体方面并不占优势，因此在深圳地区并不适宜推广应用 LNG 重型货车。

5.3 不同推广情景下总量减排效益评估

柴油车虽然保有量不高，80%机动车排放的氮氧化物和90%以上的机动车颗粒物排放都来源于传统柴油重型货车，中国重型柴油货车的一氧化碳、碳氢化合物、颗粒物减排工作现有一定成效，但氮氧化物排放量仍有所增加。虽然尾气排放标准持续提升，但重型柴油货车保有量及货运量的增长，几乎抵消了交通部门控制的氮氧化物减排效果，因此推广新能源重型货车是有效降低传统柴油重型货车的尾气污染物排放的有效途径，重型货车的主要排放污染物为NO_x和PM两类，同时在双碳政策背景下，机动车的碳减排也是一个重点关注的话题，因此本节主要探讨推广在不同情境下推广新能源重型货车的NO_x、PM和CO₂三类污染物的减排效益。

5.3.1 总量评估方法

本研究基于前文单车减排效益，对深圳市未来2021-2035年推广新能源重型货车（以泥头车和牵引车为例）的减排效益进行分析，计算公式如（5-1）

$$E_a = P_i \cdot D_i \cdot E_{i(a)} \quad (5-1)$$

其中， E_a 为第a种污染物（NO_x、PM和CO₂）的减排总量； P_i 为当年第i种电动重型货车（泥头车、牵引车）的保有量，单位为辆， D_i 为第i种车型的年均行驶里程，单位为km，根据调研，泥头车的日均行驶里程为150~230km，本研究假设日均行驶里程为200km，考虑天气、运输业务等因素，全年实际出勤天数假设为260天，因此泥头车的年均运营里程假设为5.2万km；港内牵引车的日均行驶里程为180km，考虑天气、运输业务等因素，全年实际出勤天数假设为260天，则港内牵引车的年均运营里程为4.68万公里；集疏港牵引车的月均行驶里程为6,000km，其年均运营里程假设为7.2万公里。 $E_{i(a)}$ 为电动重型货车i相较于传统燃油重型货车的污染物减排量，单位为g/km，本研究纯电动泥头车、牵引车单位公里的减排量基于5.2节的研究数据。

根据历年深圳市统计年鉴的数据，截至2020年底，深圳市的重型货车数量为105,696辆，深圳市集装箱牵引车数量为47,270辆，泥头车车辆为14,061辆，即牵引车和泥头车的占比分别为44.7%、11.3%。本研究基于深圳市2015-2020年重型货车的保有量数据，通过回归方程预测未来15年深圳市重型货车的保有量（图5-14）， R^2 衡量的是回归方程整体的拟合度，是表达因变量与所有自变量之间的总体关系， R^2 的值越接近1，说明回归直线对观测值的拟合程度越好，本研究 R^2 的值为0.9681，拟合精度较高。

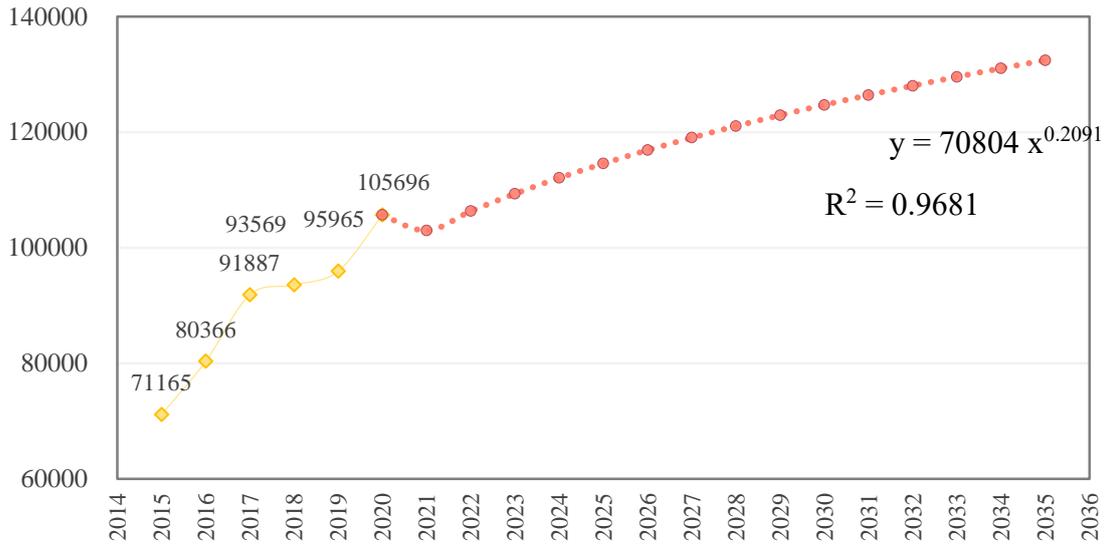


图 5-14 深圳市 2015-2035 重型货车保有量

基于预测的数据，并假设未来 15 年牵引车和泥头车的占比和 2020 年保持一致，可以得到泥头车和牵引车 2022-2035 年的保有量（表 5-14）。

表 5-14 深圳市 2022-2035 泥头车、牵引车保有量

年份	牵引车（辆）	泥头车（辆）
2022	47,566	14,149
2023	48,913	14,550
2024	50,132	14,912
2025	51,249	15,245
2026	52,281	15,551
2027	53,240	15,837
2028	54,139	16,104
2029	54,984	16,356
2030	55,783	16,593
2031	56,541	16,819
2032	57,263	17,033
2033	57,951	17,238
2034	58,610	17,434
2035	59,242	17,622

5.3.2 情景设定

本研究以 2021 年为基准年，结合历史发展趋势预测出 2022-2035 年泥头车、牵引车的保有量，假设随着时间的推移，新能源重型货车的成本逐年降低，推广率在 2022-2025 年为新增注册车辆的 20%，2026-2030 年为新增注册车辆的 30%，2031-2035 年达到 50%；同时在碳达峰碳中和蓝天保卫战等政策驱动下，设定积极推广新能源重型货车的情景，即在基准推广情景的基础上，将原有的柴油重型货车更新替代为新能源重型货车，假定 2022-2025 的替代率为 2%，2026-2030 的替代率为 3%，2031-2035 的替代

率为 5%（表 5-15），通过两类不同推广情景分析深圳市未来推广新能源牵引车和泥头车的减排效益。

表 5-15 推广情景设定

年份	基准推广情景	积极推广情景
2022-2025	新能源重型货车占新增注册车辆的 20%	基准情景基础上，原有柴油重型货车更新替代为新能源重型货车，替代率为 2%
2026-2030	新能源重型货车占新增注册车辆的 30%	基准情景基础上，原有柴油重型货车更新替代为新能源重型货车，替代率为 3%
2031-2035	新能源重型货车占新增注册车辆的 50%	基准情景基础上，原有柴油重型货车更新替代为新能源重型货车，替代率为 5%

5.3.3 泥头车总量减排效益

截至 2022 年 1 月 31 日，我市营运状态的重型自卸货车的企业数共 369 家，营运的新型泥头车共有 15365 辆，其中传统燃料类泥头车 11165 辆（占比 73%），纯电动泥头车 4200 辆（占比 27%）。情景分析结果如下：

从 NO_x 的减排效果来看（图 5-15），在基础情景下，2035 年纯电动泥头车的普及率为 31.8%（此时推广数量约为 5600 辆），2021-2035 年累计减排量达到 4,572 吨，年均减排量为 305 吨；在积极推广情景下，2035 年纯电动泥头车的普及率为 76.9%（此时推广数量为 13553 辆），2035 年单年的减排量为 3,936 吨，2021-2035 年累计减排量达到 2.5 万吨。



图 5-15 纯电动泥头车 2021-2035 年 NO_x 减排量

从固体颗粒物的减排效果来看（图 5-16），在基础情景下，2021-2035 年累计减排量达到 76 吨，年均减排量为 5 吨；在积极推广情景下，2035 年单年的减排量为 65.4 吨，2021-2035 年累计减排量达到 415.6 吨，年均减排量为 27.7 吨。



图 5-16 纯电动泥头车 2021-2035 年 PM 减排量

从温室气体的减排效果来看（图 5-17），根据国家林业局相关研究数据表明，植一棵树每年固碳 4 至 18 千克，在 20 年（计入期）里可吸收固定二氧化碳 80 至 360 千克。在基础情景下，2021-2035 年累计减排量达到 17.5 万吨，年均减排量为 1.1 万吨，若按照一棵树一年可以吸收二氧化碳 18 千克，则每年的减排量相当于每年植树 64 万棵，在积极推广情景下，2035 年单年的减排量为 29 万吨，2021-2035 年累计减排量达到 95.8 万吨，年均减排量为 6.3 万吨，相当于每年植树 355 万棵，碳减排潜力可观。



图 5-17 纯电动泥头车 2021-2035 年 GHGs 减排量

5.3.4 集疏港牵引车总量减排效益预估

深圳市集装箱牵引车保有量 47,270 辆，主要是柴油牵引车，还有少量的 LNG 牵引车，在基础情景下，2035 年纯电动牵引车的普及率为 7.9%（此时推广数量约为 5,600

辆），在积极推广情景下，2035年纯电动牵引车的普及率为53.5%（此时推广数量约为31,724辆），情景分析结果如下：

从NO_x减排效果看（图5-18），在基础情景下，2021-2035年累计减排量达到2.08万吨，年均减排量约为1,391吨；在积极推广情景下，2035年单年的减排量为1.8万吨，2021-2035年累计减排量达到11.6万吨，年均减排量约为7,769吨。



图 5-18 集疏港电动牵引车 2021-2035 年 NO_x 减排量

从固体颗粒物的减排效果来看（图5-19），在基础情景下，2021-2035年累计减排量达到269.7吨，年均减排量约为17.9吨；在积极推广情景下，2035年单年的减排量为234.3吨，2021-2035年累计减排量达到1,506吨，年均减排量约为100.4吨。



图 5-19 集疏港电动牵引车 2021-2035 年 PM 减排量

从温室气体的减排效果来看（图5-20），在基础情景下，2021-2035年累计减排量达到76.5万吨，年均减排量约为5.1万吨；在积极推广情景下，2035年单年的减排量为1.8万吨，2021-2035年累计减排量达到1,506万吨，年均减排量约为100.4万吨。

为 66.5 万吨，2021-2035 年累计减排量达到 427.4 万吨，年均减排量约为 28.5 万吨。

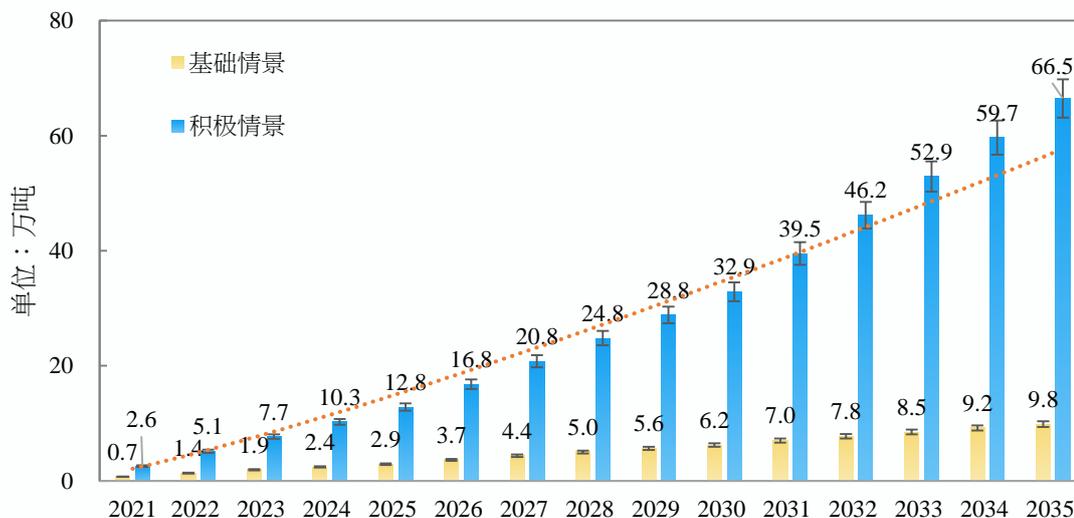


图 5-20 集疏港电动牵引车 2021-2035 年 GHGs 减排量

5.3.5 港内（盐田港）牵引车总量减排效益预估

目前盐田港内牵引车为 4×2 结构的重型牵引车，总计约 600 辆，其中 LNG 车约 340 辆，柴油货车约 260 辆（表 5-16）。车辆每天工作时长平均达到了 17 小时以上，港口每年更新车辆数在 50-100 辆，并且要求车辆使用达到 10 年就要强制更换。

表 5-16 盐田港重型牵引车车辆信息

车辆类型	车辆结构	车辆数	燃料消耗	盐田港补贴燃料量	日均行驶里程
LNG 牵引车	4×2	340 辆	5.8m ³ /h	4.8m ³ /h	110km
柴油牵引车	4×2	260 辆	4.5L/h	4L/h	110km

目前港内拥有的 600 辆牵引车足以满足日常营运需求，因此本研究假设未来 15 年内盐田港牵引车总数保持不变，只对港口内的车辆进行更新替换，基础情景假设每年推广 20 辆纯电动牵引车，2035 年纯电动牵引车的普及率为 50%（推广数量 300 辆），积极情景假设每年推广 40 辆纯电动牵引车，到 2035 年港内牵引车实现 100% 电动化，即总共有 600 辆纯电动牵引车。按照实际运营情况设定每年车辆运营里程约为 4.68 万公里，情景分析结果如下：

从 NO_x 减排效果看（图 5-21），在基础情景下，2021-2035 年累计减排量达到 927.5 吨，年均减排量约为 61.8 吨；在积极推广情景下，2035 年单年的减排量为 222.8 吨，2021-2035 年累计减排量达到 1,782.7 吨，年均减排量约为 253.9 吨。

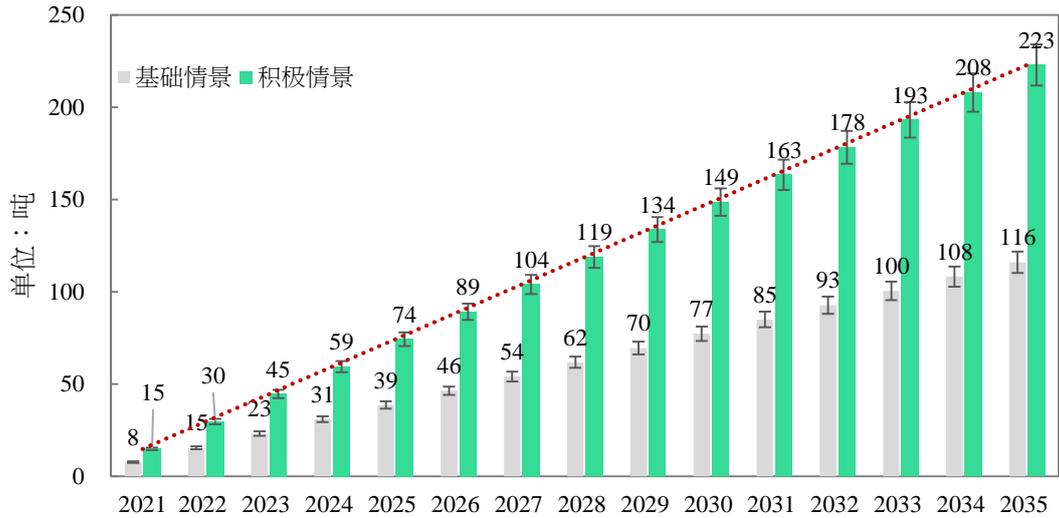


图 5-21 盐田港电动牵引车 2021-2035 年 NO_x 减排量

从固体颗粒物的减排效果来看（图 5-22），在基础情景下，2021-2035 年累计减排量达到 11.5 吨，年均减排量约为 0.76 吨；在积极推广情景下，2035 年单年的减排量为 2.9 吨，2021-2035 年累计减排量达到 23 吨，年均减排量约为 1.5 吨。

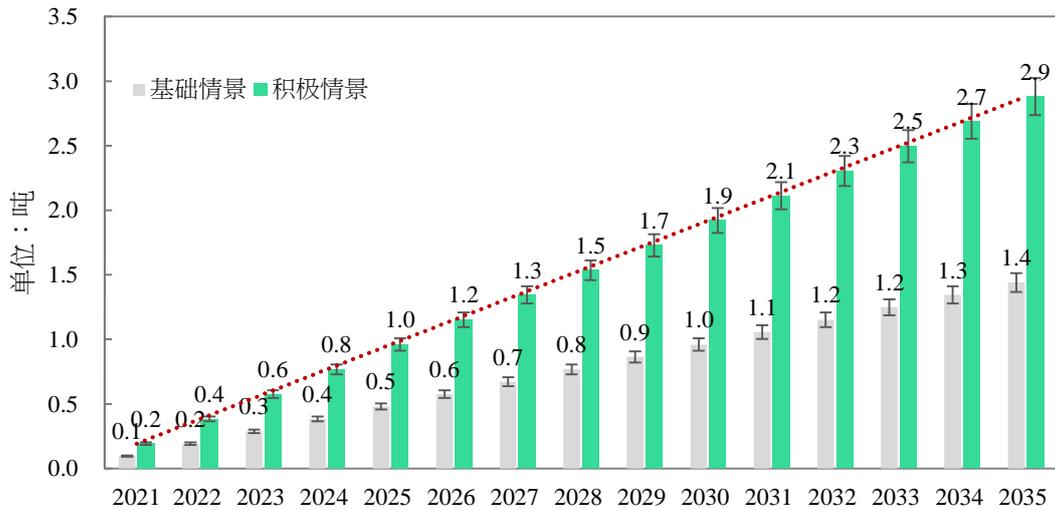


图 5-22 盐田港电动牵引车 2021-2035 年 PM 减排量

从温室气体的减排效果来看（图 5-23），在基础情景下，2021-2035 年累计减排量达到 5.4 万吨，年均减排量约为 3,602 吨；在积极推广情景下，2035 年单年的减排量为 1.3 万吨，2021-2035 年累计减排量达到 10.8 万吨，年均减排量约为 7,204 吨。

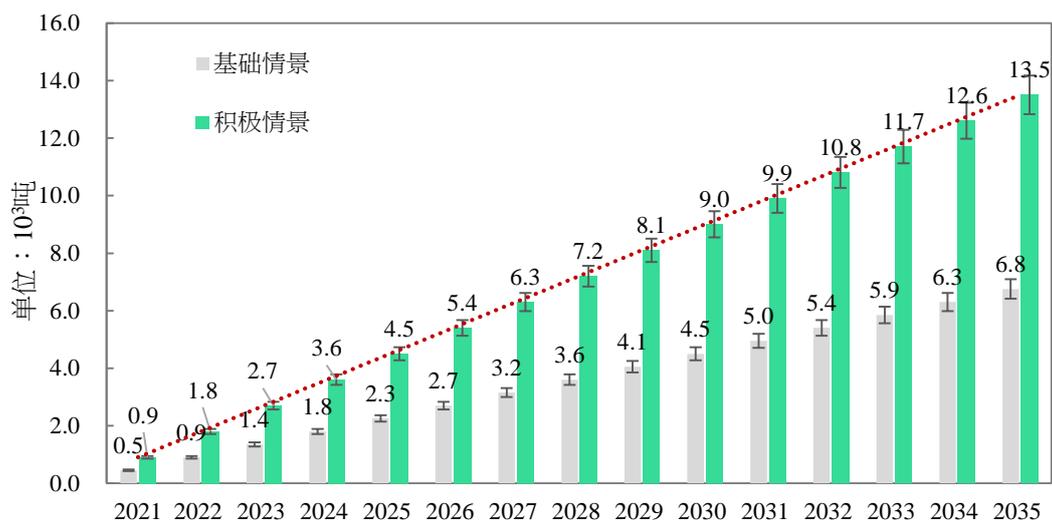


图 5-23 盐田港电动牵引车 2021-2035 年 GHGs 减排量

5.4 重型货车电动化减排效益小结

本章对单车的减排效益以及不同电动化情景下新能源重型货车的减排效益进行分析，纯电动重型货车相比柴油重型货车在全生命周期的污染物排放方面有明显优势，动力电池生产技术和重型货车车身进一步轻量化也将是提升未来纯电动重型货车减排效益的关键因素之一。换电重型货车的推广应用有助于中国大气污染防治和“碳达峰、碳中和”目标实现。

第六章 深圳市重型货车的全生命周期成本分析

6.1 研究方法

车辆的 TCO 成本可全面评价电动重型货车和普通燃油重型货车生命周期内的经济性，它是指在对象的寿命周期内为其论证、研制、生产、运行、维护、保障、退役后处理所支付的所有费用之和。它将对象的全系统、过程中涉及的各种技术、物资、人力及组织管理措施统统量化为费用指标，运用系统工程的观点为各种管理决策的科学化提供可靠的依据。重型货车的 TCO 成本（式 6-1）包括购置环节(C_b)、使用环节(C_u)、维护环节(C_m)、报废更新环节(C_s)四个方面。

$$C_t = C_b + C_u + C_m - C_s \quad (6-1)$$

本项目将通过全生命周期成本费用理论（(Total Cost of Ownership, TCO) 来计算深圳市重型货车在传统燃油、充电模式、换电模式三种使用场景下的价格定位，并分别计算出充电重型货车、换电重型货车与柴油重型货车的 TCO 成本平衡点，建立深圳市重型货车技术经济效益评价体系并进行应用研究。

6.2 泥头车 TCO 成本分析

6.2.1 不同类型泥头车 TCO 总体对比分析

根据泥头车生产企业提供的销售价格数据，一辆柴油泥头车、282kWh 充电泥头车、282kWh 换电泥头车无电池车身目前销售价分别约为 41 万元、90 万元、50 万元。根据企业提供的数据显示，柴油泥头车的综合油耗约为 50L/100km，纯电动泥头车综合电耗约为 160kWh/100km。本研究以普通泥头车运输企业的运营状况为参考，按照单车年行驶 5.2 万公里为基准，5 年更换淘汰计算，综合车辆购置、使用、维护、报废等环节的成本数据，形成不同类型泥头车全生命周期成本如下表所示（表 6-1）。

表 6-1 不同类型泥头车 TCO 组成情况

成本 (万元)	成本 类型	柴油泥头 车	充电泥头车	换电泥头车	备注
购置环 节 C_b	购置成本	41.00	90.00	50.00	车辆购置价格/1.17*0.1 贷款七成，3 年等额本息，年利 率 6.5%。 车辆年运营里程 5.2 万公里，生 命周期 5 年。
	购置税	3.50	0.00	0.00	
	利息	5.60	12.29	6.83	
	合计	50.10	102.29	56.83	
使用环 节 C_u	燃料成本	20.28	12.48	12.48	柴油价格 7.8/L，电力价格为 1.5 元/度（包含服务费）；
	电池租金	-	-	10.20	
	尿素成本	1.00	-	-	
	车辆保险	2.00	3.00	3.00	

成本 (万元)	成本 类型	柴油泥头 车	充电泥头车	换电泥头车	备注
	一年成本	23.28	15.48	25.68	换电版牵引车配备电池为282kWh，平均每月租金约为8500元； 保险费用为调研得到，纯电动车辆的保险费用比柴油车高1万元。
	5年成本	116.40	77.40	128.40	
维护环 节 Cm	保养成本	0.9	0.45	0.45	保养成本中，电车费用0.45万元/年，油车需要加注机油，总的保养费用为0.9万元/年； 维修成本中，车辆两年更换三次轮胎，年均更轮胎成本2.52万元/年； 油车的组件较多，其他部件维修成本平均0.5万元/年
	轮胎更换	2.52	2.52	2.52	
	其他部件 维修	0.5	-	-	
	一年成本	3.42	2.97	2.97	
	5年成本	19.60	14.85	14.85	
报废环 节 Cs	车辆残值	4.10	17.46	5.00	车辆残值按购置价格10%计算； 电池回收残值：每度电300元回收利用。
全生命周期成本 Ct		182.00	177.08	195.08	-
与柴油重型货车 TCO 的比值		-	97.30%	107.19%	

可以看出，以目前柴油价格和充电电价水平，282kWh 电池容量的充电泥头车 TCO 比传统柴油泥头车降低了约 2.7%。说明在该运营情景下，即使没有补贴，充电泥头车也有 TCO 的优势。但是充电的时间会占用车辆的实际运营时间，特别是在业务繁忙期间，充电会减少企业的营运利润，调研显示大部分运输企业对充电泥头车仍然存在使用方面的顾虑。

而换电泥头车其 TCO 成本比传统柴油泥头车高出约 7.19%，在当前的运营情景下，换电泥头车会直接降低企业的运营利润。一方面是由于换电泥头车无电池车身价格偏高，在购置环节虽然减省了购置税，但是购置成本比柴油泥头车依然高了近 5 万元；另外一方面换电泥头车的月租金较高，运营环境成本没有优势。根据企业提供的收费标准，一块 282kWh 的电池每年的租赁费约 10 万元。以当前深圳市泥头车的总体运营水平，每年 10 万的租赁费用很难通过油电差价弥补回来。因此，现阶段深圳市的纯电动泥头车的推广，在没有补贴政策推动情况下，充电技术路线更容易受市场认可。

6.2.2 充电泥头车与柴油泥头车的 TCO 成本平衡点分析

从充电泥头车与柴油泥头车 TCO 成本平衡点可以看出（图 6-1），按目前深圳市柴油的大客户集采价格 7.8 元/L 的水平，充电泥头车的 TCO 平衡点充电电价（包含服务费）约为 1.64 元/kWh。目前深圳市充电电价白天普遍在 1.5 元/kWh 左右，此时实际

充电电价低于平衡点，司机使用纯电动泥头车全生命周期成本会低于柴油泥头车。当柴油价格下降为 2020 年的约 6 元/L 的时候，TCO 平衡点的充电电价（包含服务费）约为 1.1 元/kWh，则现有的 1.5 元/kWh 充电电价让纯电动泥头车 TCO 会高于柴油泥头车，用户需避开充电高峰，选择在夜间电价谷期充电。因此，纯电动泥头车的 TCO 受柴油价格水平影响较明显。柴油价格越高，则纯电动泥头车的经济优势越明显。

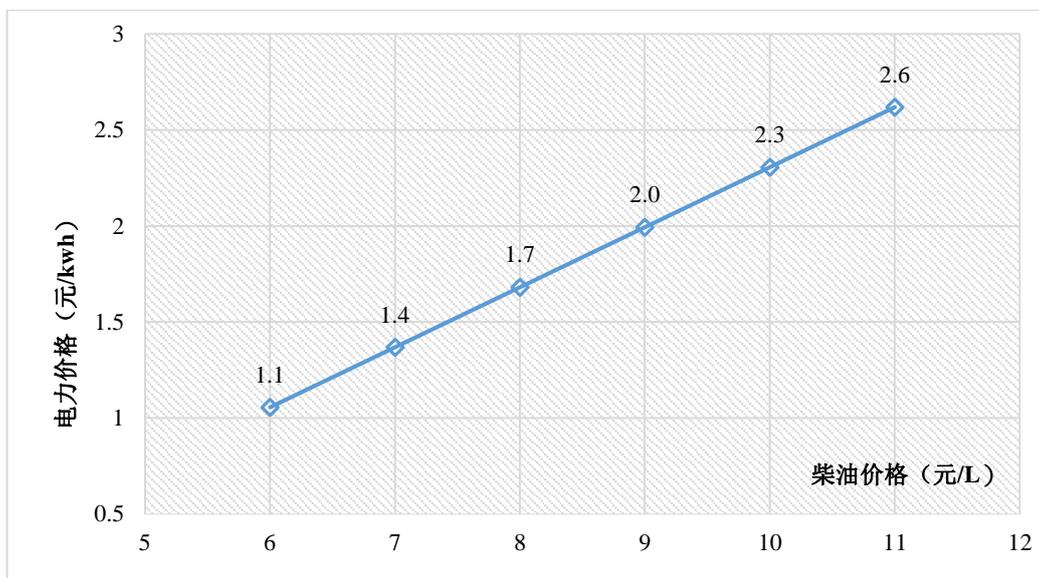


图 6-1 充电模式下基于油电成本的泥头车 TCO 成本平衡曲线

6.2.3 换电泥头车与柴油泥头车的 TCO 成本平衡点分析

对运输企业而言，使用换电泥头车可以解决司机充电难、时间长等痛点问题，同时换电泥头车采用“车电分离”金融模式，司机不再购买动力电池，采用租赁模式降低了换电泥头车的前期购车成本。后期则主要通过运营过程中使用燃料（或电力）的油电差价来平衡成本的增加量，最终实现 TCO 平衡。

以电力价格和柴油价格为变量，在其他环节成本条件不变的情况下，分析换电泥头车与柴油泥头车的 TCO 成本的平衡点曲线（图 6-2）。可以看出，假设柴油价格在 6 元/L，则换电电价只要小于 0.6 元/kWh，换电泥头车就会有 TCO 的优势；当柴油价格上涨到 11 元/L，则换电电价只要小于 2.2 元/kWh，换电泥头车都会有 TCO 的优势。而目前深圳市泥头车的柴油价格约 7.8 元/L，而换电服务费为 1.5 元/kWh，则换电重型货车并不具有经济优势。

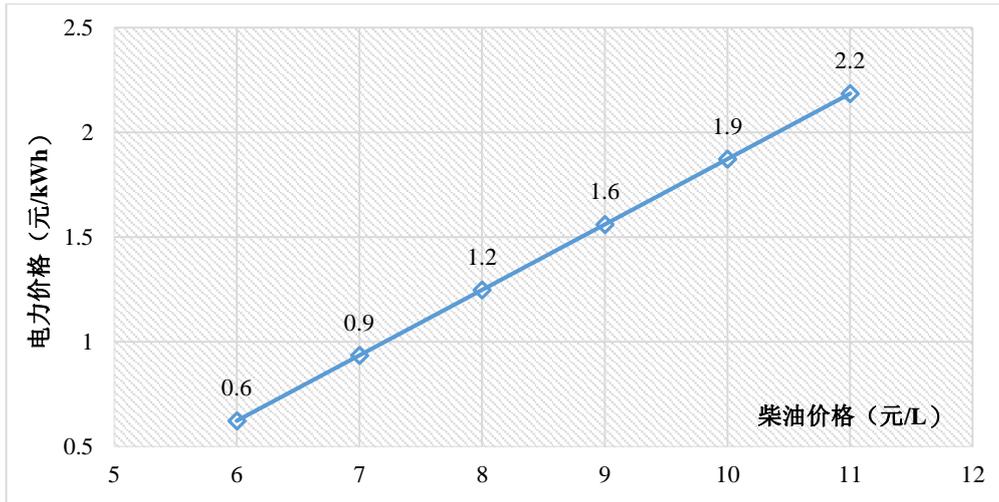


图 6-2 换电模式下基于油电成本的泥头车 TCO 成本平衡曲线

在电价和油价保持固定的情况下，让换电泥头车比柴油泥头车有 TCO 优势的两个关键因素分别是电动泥头车的无电池车身价格、车辆的实际运营里程数量，并且这两个因素在实际表现中还有较大的提升空间。目前电动泥头车的无电池车身价格比同车型柴油泥头车贵了约 5 万元，从生产制造的物料成本来分析，无电池车身价格至少还有 5 万元的降价空间。而深圳市的泥头车运营里程，多数车辆每天不到 150km，里程偏低造成油电燃料成本不明显，因此可以通过政府部门出台更加积极的政策，提高车辆的运营水平。

以电动泥头车的无电池车身价格、车辆的实际运营里程数量为变量，在其他环节成本条件不变的情况下，分析换电泥头车与柴油泥头车的 TCO 成本的平衡点曲线。可以看出，假设按现有车辆每年运营里程 5.2 万公里计算，则无电池车身的价格应该下调至 40 万元以内，才能实现换电泥头车和柴油泥头车的 TCO 平衡；假设按现有无电池车身价格 50 万元计算，则车辆每年运营里程要达到 7 万公里以上，才能实现换电泥头车和柴油泥头车的 TCO 平衡（图 6-3）。

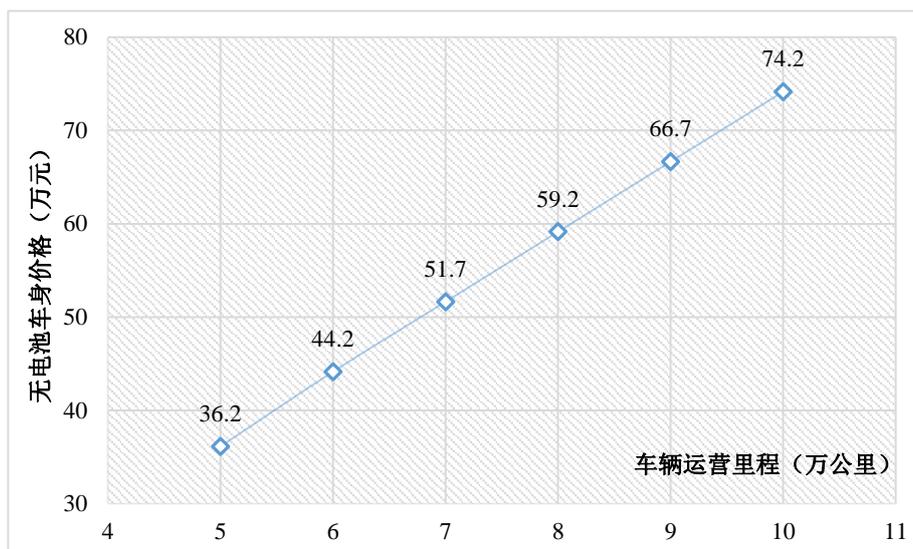


图 6-3 换电模式下基于购置成本和运营里程的泥头车 TCO 成本平衡曲线

6.3 集疏港牵引车 TCO 成本分析

6.3.1 不同类型集疏港牵引车 TCO 总体对比分析

根据运输企业提供的车辆销售价格数据，集疏港 4×2 牵引车柴油版、282kWh 充电版、无电池车身销售价格分别约为 23 万元、72 万元、35 万元。目前在深圳运营的集疏港短途运输车主要以城市道路路况为主，车辆平均车速约 40km/h，综合油耗约 30L/100km。同车型的纯电动牵引车同工况条件下电耗约为 132kWh/100km。本研究以单车年行驶里程 7.2 万公里为基准，从深圳出发运营辐射范围可以覆盖东莞、惠州等绝大多数地区，并按 5 年更换淘汰计算。综合车辆购置、使用、维护、报废等环节的成本数据，形成不同类型集疏港 4×2 牵引车全生命周期成本如下表所示。

表 6-3 不同类型 集疏港牵引车 TCO 组成情况

成本(万元)	成本类型	柴油牵引车	充电牵引车	换电牵引车	备注
购置环节 C _b	购置成本	23.00	72.00	35.00	车辆购置价格/1.17*0.1 贷款七成，3年等额本息，年利率6.5%。 车辆年运营里程7.2万公里，生命周期5年。
	购置税	1.97	0.00	0.00	
	利息	3.14	9.83	4.78	
	合计	28.11	81.83	39.78	
使用环节 C _u	燃料成本	16.85	14.26	14.26	柴油价格7.8/L，电力价格为1.5元/度（包含服务费）； 换电版牵引车配备电池为282kWh，平均每月租金约为7500元； 保险费用为调研得到，纯电动车辆的保险费用比柴油车高1万元。
	电池租金	-	-	9.00	
	尿素成本	1.00	-	-	
	车辆保险	2.00	3.00	3.00	
	一年成本	19.85	17.26	26.26	
	5年成本	99.24	86.28	131.28	
维护环节 C _m	保养成本	0.75	0.45	0.45	保养成本中，电车费用0.45万元/年，油车需要加注机油，总的保养费用为0.75万元/年； 维修成本中，车辆一年更换一次轮胎，年均更轮胎成本0.72万元/年； 油车的组件较多，其他部件维修成本平均0.5万元/年
	轮胎更换	0.72	0.72	0.72	
	其他部件维修	0.5	-	-	
	一年成本	1.97	1.17	1.17	
	5年成本	9.85	5.85	5.85	
报废环节 C _s	车辆残值	2.30	15.66	3.50	车辆残值按购置价格10%计算； 电池回收残值：每度电300元回收利用。
全生命周期成本 C _t		134.90	158.30	173.41	-
与柴油重型货车 TCO 的比值		-	117.35%	128.55%	

可以看出，无论是充电牵引车的整车销售价格，还是换电牵引车的无电池车身价格，均比同车型柴油车售价要高出很多。虽然后期使用过程中纯电动车的电力燃料成本和维护成本比油车要低，但是总差额无法弥补购置成本的增加。而换电牵引车虽然通过车电分离的模式降低了前期购置成本，但是每年需要支付电池租赁费约9万元，相比较充电牵引车大幅增加了使用环节的成本。

6.3.2 集疏港充电牵引车与柴油牵引车的 TCO 成本平衡点分析

以电力价格和柴油价格为变量，在其他环节成本条件不变的情况下，分析集疏港充电牵引车与柴油牵引车的 TCO 成本的平衡点曲线（图 6-4）。可以看出，假设柴油价格在 6 元/L，则充电电价只要小于 0.6 元/kWh，充电牵引车就会有 TCO 的优势；当柴油价格上涨到 11 元/L，则充电电价只要小于 1.7 元/kWh，充电牵引车都会有 TCO 的优势。目前柴油价格约 7.8 元/L，而充电服务费约为 1.5 元/kWh，司机要想降低充电牵

引车的 TCO，可以选择充电电价在 1 元/kWh 以内的时间段或场站充电。

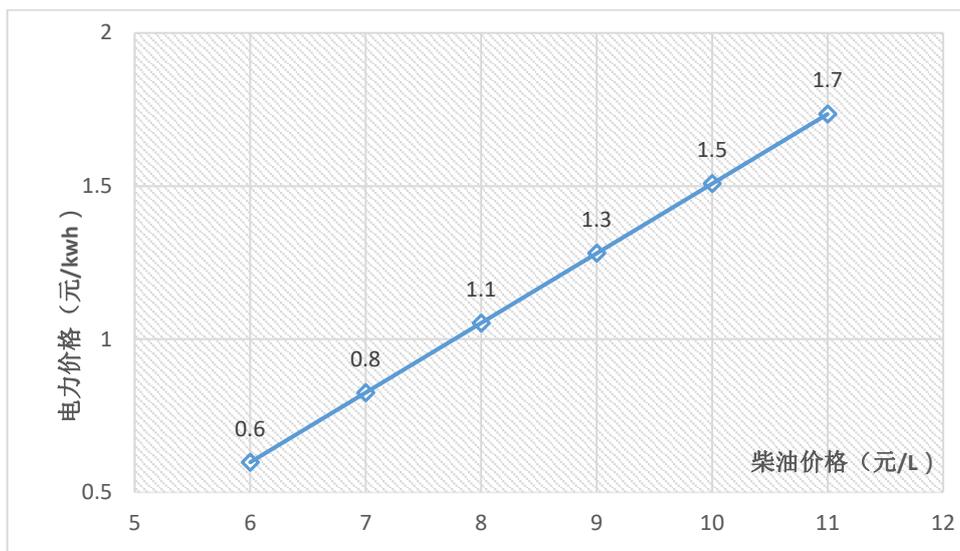


图 6-4 充电模式下基于油电成本的集疏港牵引车 TCO 成本平衡曲线

6.3.3 集疏港换电牵引车与柴油牵引车的 TCO 成本平衡点分析

集疏港换电牵引车采用“车电分离”的金融模式，用户不需要持有动力电池，而只需要向第三方企业租赁电池的使用权，若租金为 0.75 万元/月，则用户在 5 年生命周期内需要支付的租金约为 45 万元，租赁费用比持有电池成本高了约 25%。因此，需要在运营环节有更大的油电使用差额来平衡成本的增加。

以电力价格和柴油价格为变量，在其他环节成本条件不变的情况下，分析集疏港充电牵引车与柴油牵引车的 TCO 成本的平衡点曲线（图 6-5）。可以看出，假设柴油价格在 6 元/L，则换电电价要小于 0.3 元/kWh，换电牵引车才会有 TCO 的优势；当柴油价格上涨到 11 元/L，则换电电价只要小于 1.4 元/kWh，换电牵引车才会有 TCO 的优势。目前在柴油价格 7.8 元/L 和换电电价 1.5 元/kWh 条件下，集疏港运输场景采用换电牵引车将大幅增加企业的成本，换电牵引车不具备市场化推广条件。

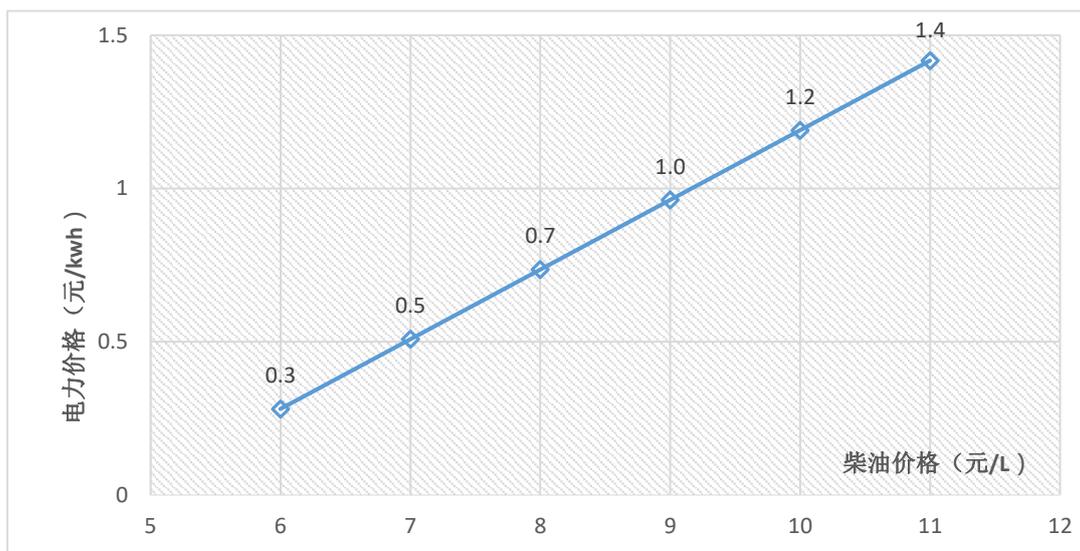


图 6-5 换电模式下基于油电成本的集疏港牵引车 TCO 成本平衡曲线

通过下调无电池车身价格或提高车辆的实际运营里程数量，进一步分析换电集疏港牵引车 TCO 成本平衡点（图 6-6）。可以看出，以无电池车身价格、车辆的实际运营里程数量为变量，在其他环节成本条件不变的情况下，当无电池车身价格 35 万元时，运营里程要超过 27 万公里/年，才能比柴油牵引车有 TCO 的优势；而当现有运营里程 7.2 万公里/年不变的情况下，无电池车身价格平衡值为负值，车辆难以实现 TCO 平衡。

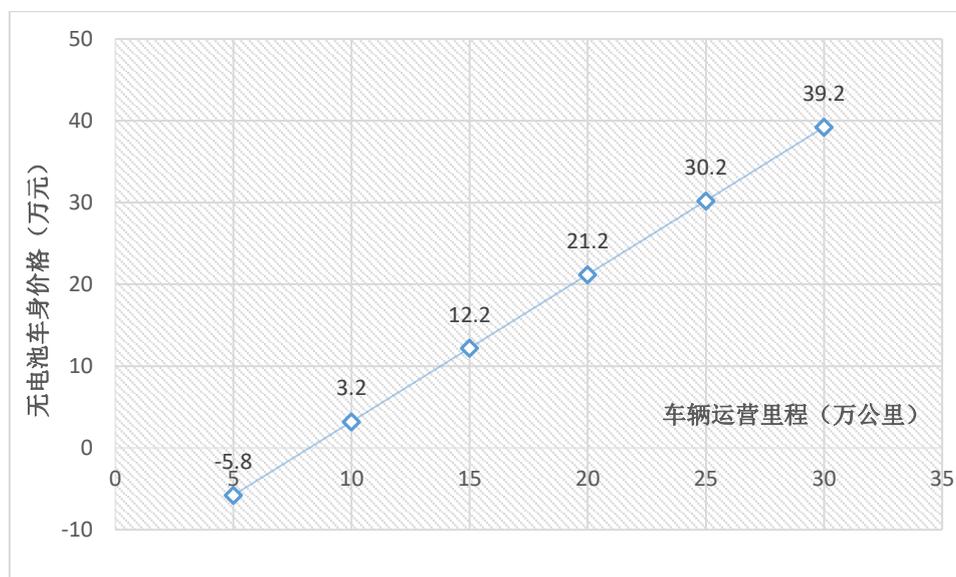


图 6-6 换电模式下基于购置成本和运营里程的集疏港牵引车 TCO 成本平衡曲线

因此，在集疏港应用场景中，虽然应用换电重型货车可以在全生命周期尺度污染物减排方面有明显优势，但对运输企业来说，会造成其 TCO 成本大幅度上涨，因此在没有补贴及没有相关政策优待的情况下，集疏港应用场景并没有推广优势。

6.4 港内（盐田港）牵引车 TCO 成本分析

6.4.1 不同类型港内牵引车 TCO 总体对比分析

根据运输企业提供的车辆销售价格数据，港内 4×2 牵引车和集疏港 4×2 牵引车价格相同，柴油版、282kWh 充电版、无电池车身销售价格分别约为 23 万元、72 万元、35 万元。在港口封闭场景内，车辆限速为 30km/h。根据运输企业提供的数据，盐田港的柴油牵引车的油耗约为 65L/100km，而纯电动牵引车的电耗约为 145kWh/100km。本研究以单车实际年行驶里程 4.68 万公里为基准，8 年更换淘汰计算，综合车辆购置、使用、维护、报废等环节的成本数据，形成不同类型集疏港 4×2 牵引车全生命周期成本如下表所示。

表 6-5 不同类型港内牵引车 TCO 组成情况

成本(万元)	成本类型	柴油牵引车	充电牵引车	换电牵引车	备注
购置环节 C _b	购置成本	23.00	72.00	35.00	车辆购置价格/1.17*0.1 贷款七成，3 年等额本息，年利率 6.5%。 车辆年运营里程 4.68 万公里，生命周期 8 年。
	利息	3.14	9.83	4.78	
	合计	26.14	81.83	39.78	
使用环节 C _u	燃料成本	23.73	10.18	10.18	柴油价格 7.8/L，电力价格为 1.5 元/度（包含服务费）； 换电版牵引车配备电池为 282kWh，假设平均每月租金为 6300 元； 保险费用为调研得到，纯电动车辆的保险费用比柴油车高 1 万元。
	电池租金	-	-	7.56	
	尿素成本	1.00	-	-	
	车辆保险	2.00	3.00	3.00	
	一年成本	26.73	13.18	20.74	
8 年成本	213.82	105.43	165.92		
维护环节 C _m	保养成本	0.90	0.45	0.45	保养成本中，电车费用 0.45 万元/年，油车需要加注机油，总的保养费用为 0.90 万元/年； 维修成本中，车辆一年更换一次轮胎，年均更轮胎成本 1.44 万元/年； 油车的组件较多，其他部件维修成本平均 0.5 万元/年
	轮胎更换	1.44	1.44	1.44	
	其他部件维修	0.5	-	-	
	一年成本	2.84	1.89	1.89	
	8 年成本	22.72	15.12	15.12	
报废环节 C _s	车辆残值	2.30	15.66	3.50	车辆残值按购置价格 10% 计算； 电池回收残值按每度电 300 元回收利用。
全生命周期成本 C _t		260.38	186.72	217.32	-
与柴油重型货车 TCO 的比值		-	71.71%	83.46%	-

由于港口内作业车辆大部分时间处于怠速状态，港内车辆的油耗远远高于港外公路运输的车辆油耗。从全生命周期成本分析看，无论是采用充电技术还是换电技术的

纯电动牵引车，其 TCO 总成本均小于柴油牵引车。但是考虑到盐田港港内车辆作业繁忙，平均每天需要工作 17 小时以上，且港口内场地面积受限，所以需要较长时间停车充电的充电型牵引车并不适用。而采用换电型牵引车，不仅可以实现 6 分钟内换电，而且未来还可以进一步降低动力电池的配置容量，从 282kWh 下调到 141kWh，从而进一步降低 TCO 成本。

6.4.2 港内充电牵引车与柴油牵引车的 TCO 成本平衡点分析

以电力价格和柴油价格为变量，在其他环节成本条件不变的情况下，分析港内充电牵引车与柴油牵引车的 TCO 成本的平衡点曲线（图 6-6）。可以看出，假设柴油价格在 6 元/L，则充电电价只要小于 2 元/kWh，充电牵引车就会有 TCO 的优势；当柴油价格上涨到 11 元/L，则充电电价只要小于 4.3 元/kWh，充电牵引车就会有 TCO 的优势。目前柴油价格为 7.8 元/L，如果港内充电服务费如果定价为 1.5 元/kWh，相当于是为运输企业节省了约 1.3 元/kWh，一年比柴油车节省了约 8.8 万元燃料成本。

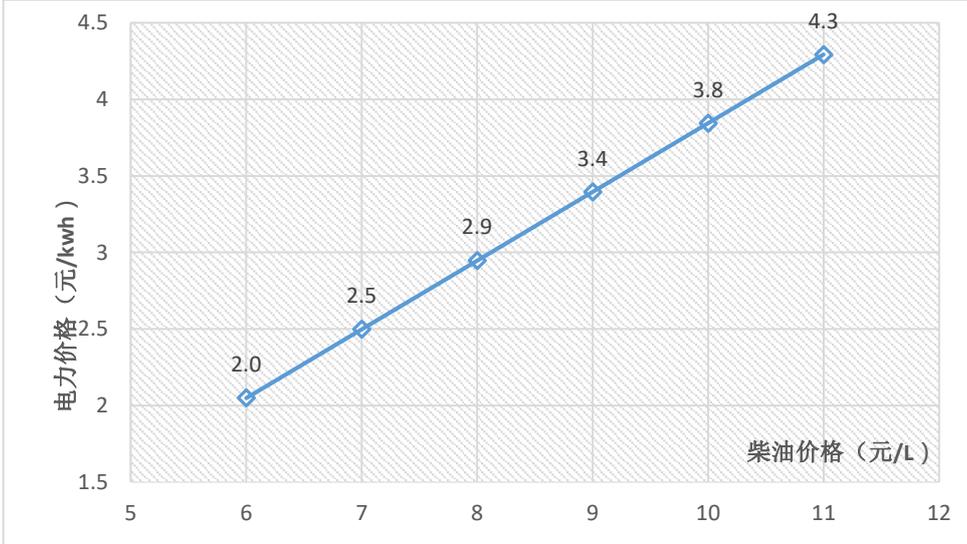


图 6-6 充电模式下基于油电成本的港内牵引车 TCO 成本平衡曲线

6.4.3 港内换电牵引车与柴油牵引车的 TCO 成本平衡点分析

以电力价格和柴油价格为变量，在其他环节成本条件不变的情况下，分析港内换电牵引车与柴油牵引车的 TCO 成本的平衡点曲线（图 6-7）。可以看出，假设柴油价格在 6 元/L，则换电电价要小于 1.3 元/kWh，换电牵引车就会有 TCO 的优势；当柴油价格上涨到 11 元/L，则换电电价只要小于 3.5 元/kWh，换电牵引车就会有 TCO 的优势。目前柴油价格为 7.8 元/L，如果港内充电服务费如果定价为 1.5 元/kWh，相当于是为运输企业节省了约 0.6 元/kWh，一年比柴油车节省了约 4.1 万元燃料成本。

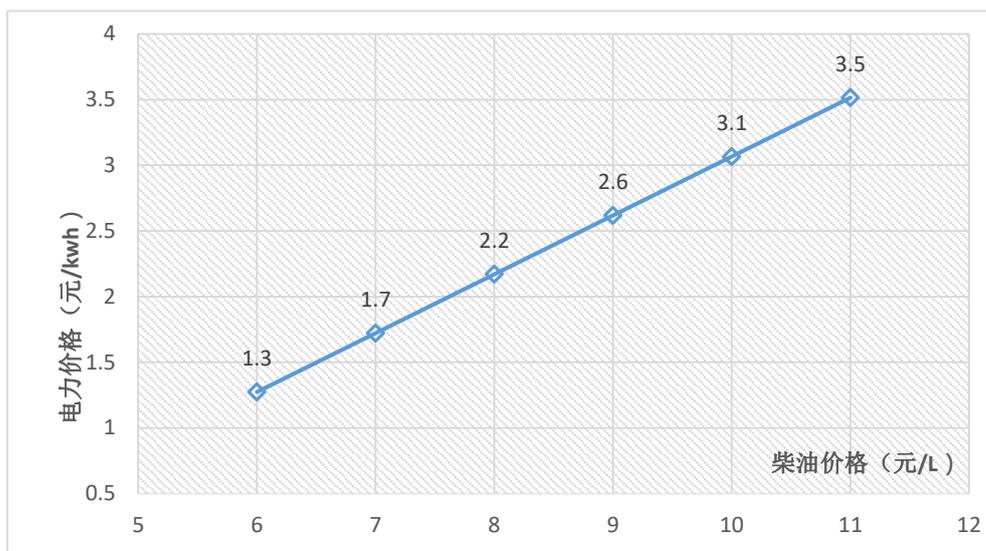


图 6-7 换电模式下基于油电成本的港内牵引车 TCO 成本平衡曲线

6.5 小结

对深圳市三个典型应用场景的应用分析可以看出，在港口内高频短倒运营场景推广换电重型货车的潜力最大，换电牵引车的 TCO 比柴油车减少 17%以上；城市渣土运输的泥头车运营场景次之，在目前的运营水平和油价水平下，其 TCO 成本比传统柴油泥头车稍高 7%，需要政府通过适当的政策手段降低车辆的购置成本和提高车辆的年运营里程，这样换电泥头车才能具有 TCO 成本优势；而在集疏港应用场景下，车辆的 TCO 水平比传统柴油车高出 20%~30%，如果没有补贴政策的强力支持，其市场化推广难度非常大。

换电重型货车在全生命周期内具有污染物减排优势，但是经济分析结果表明其应用场景较为局限，比较适合在厂区、港口等高频短倒和油（气）电成本差价较大的场景进行市场化推广应用，而在其他场景下仍然需要通过补贴、路权优先等方式来弥补 TCO 劣势。

第七章 换电重型货车商业化推广方案设计

深圳现运营的新能源公交车、小客车、物流车以充电模式为主，纯电动重型货车由于电池容量大，充电等待时间长等特点，并不适合全部采用充电模式。换电重型货车模式在一定程度上能够解决早期电动化重型货车购置成本高、充电时间长等问题，目前深圳市的重型货车存量数量约 10.5 万辆，其中以集装箱牵引车数量最多，总共约 4.7 万辆，主要从事集疏港和港内短倒的运输业务。本项目拟通过商业模式的创新设计以期推动重型货车尤其是集疏港和港内短倒车辆的电动化发展，并形成可以复制的模式便于推广应用。

7.1 重型货车“车电分离”模式概述

7.1.1 “车电分离，电池租赁”商业模式

换电重型货车的商业化推广衍生出了车电分离金融模式（图 7-1），在该模式下，用户向整车制造商购买纯电动重型货车，电池资产公司再将电池回购，用户通过支付一定的租赁费用向电池资产公司租赁电池的使用权。换电运营商投资建设运营换电站，换电站需向电池资产公司租赁一定数量的电池以供用户更换，换电站的主要收入是向用户收取换电服务费，电池资产公司的主要收入来源是收取电池的租赁费用。

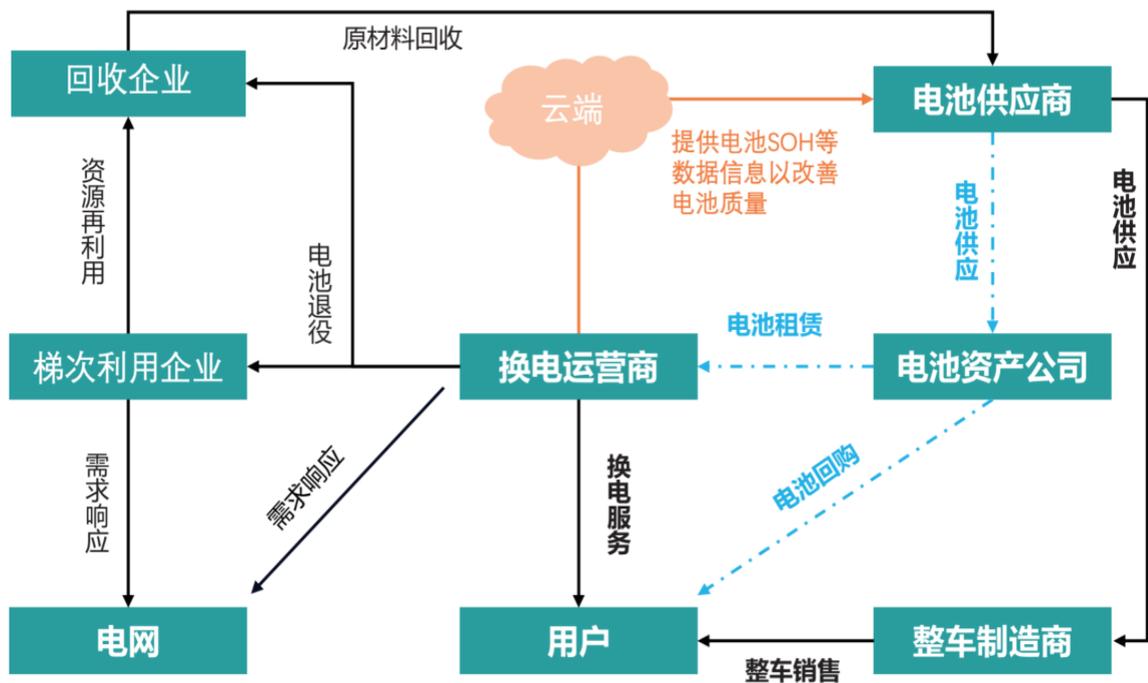


图 7-1 车电分离模式

“车电分离”既是物理上汽车整车和电池箱的分离，也是资产上整车资产和电池

资产的分离。通过换电站和电池租赁等创新的商业模式，借助第三方对电池资产的专业化运营，实现整车资产和电池资产的分离，通过向终端使用方租赁电池和收取换电服务费用收回电池的购置成本，实现对电池资产的统一的专业化的管理与维护，使电池得到生命周期内更高效地利用。

换电重型货车是“车电分离”模式的主要应用场景之一。随着各种场景下的不断试点和推广，目前已经在国内部分矿山、港口、厂区、城建工地等环境等到了试点应用。

7.1.2 换电车辆及电池标准

港外集疏港短途运输场景选择每天行驶里程在 200km 范围内，从深圳各主要港口到深圳市内、东莞、惠州等地的仓储中心、生产基地的运输场景。港内短倒运输场景是从岸桥到堆场到运输，车辆平均每天运输距离不超过 150km，车型结构主要为运载轻货类的 4×2 型牵引车。根据运营场景到不同，选择不同配置到车辆（如表 7-1）。

表 7-1 各类重型货车选型技术标准

货车类型	日均续航要求 (km)	车型结构	电池电量(kWh)	耗电量(kWh/km)
港外短途集装箱拖车	200	4×2	282	1.3
港内集装箱拖车	150	4×2	141、282	1.3

车辆选择市场认可度较高的品牌，包括比亚迪、开沃汽车、中国重汽、上汽红岩、徐工；动力电池选择磷酸铁锂电池，寿命可达8年以上；电池包采用标准化设计，按照 141kWh、282kWh 两种容量配置，并采用统一换电技术。车辆同时具备快充和换电两种技术。在大功率快充模式下，60 分钟即可充满电；在换电站换电，则 6 分钟内可换完电池。



图 7-2 投入路测的 4×2 型牵引车

7.1.3 换电站技术选择

7.1.3.1 固定式换电站技术

采用上海玖行能源科技有限公司（以下简称玖行）顶吊式换电站技术，并采用全自动无人值守技术，实现自动化换电作业，换电站示意图详见图 7-3。换电时间在 3-5 分钟，换电服务效率接近传统车加油效率，保证电动重型货车的运营效率。针对封闭场景的场内车辆，可结合车辆运行线路特点，将换电站建设在场内车道上，车辆顺路通过时换电（非换电车辆不能经过换电站通行），无需绕路至加油站，节约换电时间；针对开放道路运行的车辆，可在集散点周边或车辆运行线路枢纽位置布局换电站，实现车辆运行线路两端换电，以减少占地面积。



图 7-3 玖行固定式换电站

表 7-2 固定式换电站性能指标

性能指标	参数
换电时间	3 min—5min
自动换电成功率	>99.9%
充电功率	2400kW-3000kW
备用电池数量	7个 - 9个
设计换电次数	168 -216 次/天
换电模式	顶部吊装卸电
适配车型	各种重型货车车型
监控系统	云平台智能监控运管系统
占地面积	120 m ² -140 m ²

7.1.3.2 移动式换电站技术

换电站功能和集装箱挂车合并，灵活解决换电站建设难的问题。电池可以异地充电，整体运输，以适应不同场地条件。建站速度最快，移动换电站具有小时级建站特性。占地面积最小，单通道换电站占地不到 100 平米，双通道不到 200 平米。与固定式

换电站需要较大占地面积相比较，移动式换电站更适合城市建站场景。对于集疏港运输场景，由于深圳市用地条件限制，可采用移动式换电站以及港湾式平面布置，在车辆途经道路附近选择合适场地建设换电站，以解决换电需求。

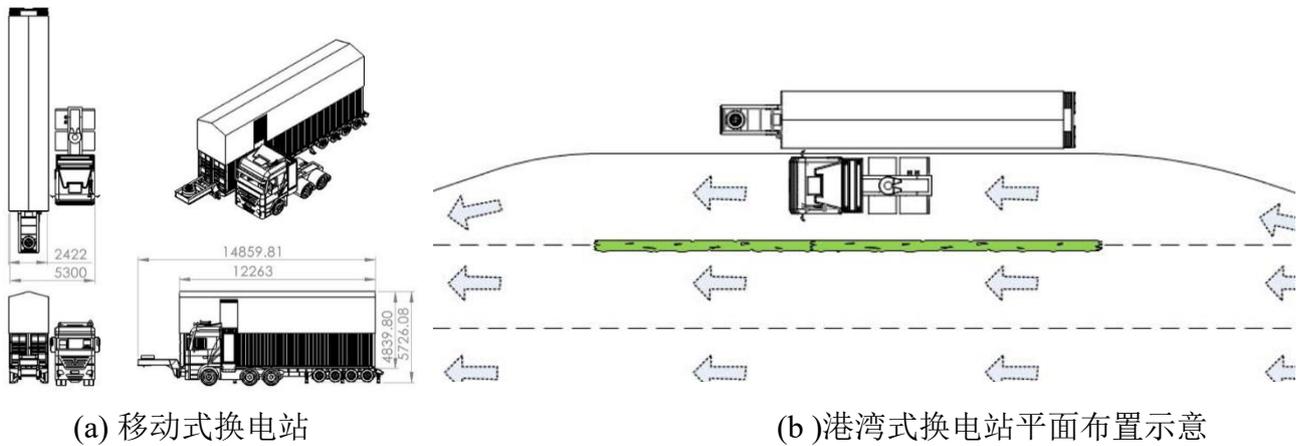


图 7-3 移动式换电站

7.2 集疏港短途运输换电重型货车实施方案设计

7.2.1 场景分析

盐田港集疏港业务范围延伸至东莞、惠州、江门、韶关、河源、长沙、津市、赣州等周边省市，其中深圳、东莞、惠州三市都地处珠江口的东岸，《深圳、东莞、惠州规划一体化合作协议》提出 2030 年深莞惠经济圈港口外贸集装箱服务周边地区比例达到 50%的发展目标，因此本项目选择东莞和惠州作为中短集疏港物流运输应用场景，设计换电重型货车的实施方案，具有很好的代表性。



图 7-4 短途运输换电重型货车应用场景

本方案选择两条运输路线（图 7-4），路线一为深圳盐田港至东莞，途径龙岗大道、

凤深大道和莞樟路，总路线约 85km，路线二为深圳盐田港至惠州，途径龙岗大道、凤深大道和龙桥大道，总路线约 90km。目前盐田港采取预约机制，遵守“无预约，不进港”制度，因此车辆的运输次数最多为一天1个来回。根据调研发现，为了节省高速费用，司机通常选择省道国道等不收费的路线，牵引车的在港外行驶时速一般为 50km/h 以内。

7.2.2 方案设计

车辆选择 4×2 型总质量 35T 纯电动牵引车，电池容量为 282kWh，车辆具备快充和换电两种技术。根据上文的 TCO 分析可知，目前柴油价格约 7.8 元/L，而充电服务费约为 1.5 元/kWh，司机要想降低充电牵引车的 TCO，只能选择充电电价在 1 元/kWh 以内的时间段充电，即选择夜间谷期电价充电。后期车辆数形成规模，同时车价和换电电价降低，并且有配套政策支持情况下，可以选择换电模式。

根据车辆的续航能力及作业规律，初期选择在盐田港附近公共充电桩（图 7-5），以及东莞、惠州厂区、仓库附近通过自建专用快充桩或公共充电桩充电。换电站选择建在线路中点共线段，从而降低基础设施的建设成本。换电站的建设可以根据用地条件，选择固定式换电站或者港湾式移动换电站。首尾充电和中间换电的整体充换电保障方案（图 7-6），能覆盖东莞-惠州-深圳三地的合围区域，具有较强的适配性。



图 7-5 盐田港港外具备货车充电条件的站点位置图



图 7-6 充换电保障方案

7.2.3 合作模式

7.2.3.1 整车经营性租赁模式

由经营性租赁公司购买 4×2 纯电动牵引车，并将电池出售给电池银行（即电池资产公司），每月向电池银行支付电池租赁费用。经营性租赁公司再将整车租赁给运输企业，运输企业每月支付整车租赁费。如果需要换电服务，则由电池银行投资或参股换电站，运输企业去换电站换电，并支付换电服务费（图 7-7）。

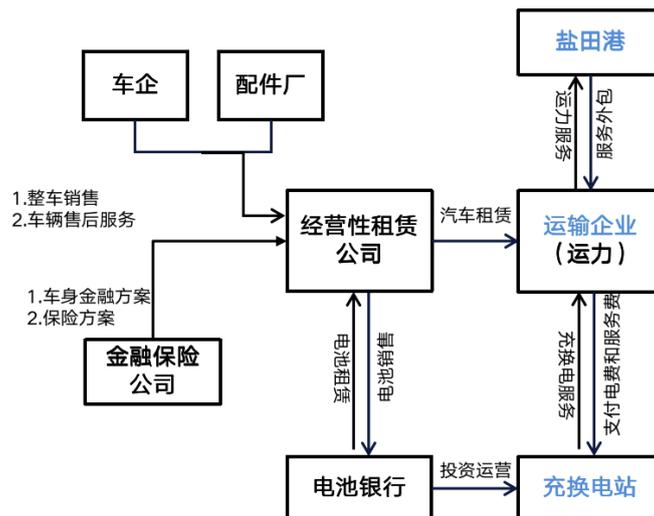


图 7-7 经营性租赁模式框架图

这种方式对运输企业较为有利，但是经营性租赁公司将会承担很大的风险。如果运输企业业务无法得到保障，将影响汽车租赁费的支付，进而影响经营性租赁公司向

电池银行支付电池租赁费，最终可能破坏了整个租赁业务的生态。同时，由于运输企业没有承担车辆购置的责任，在用车过程中对车辆的爱护程度、违章的自我管控力度会下降，最终也会将管理成本和运营风险转嫁给经营性租赁公司身上，造成经营性租赁模式无法维系下去。

7.2.3.2 车电分离模式

运输企业从车企购买 4×2 纯电动牵引车，电池银行再将电池回购，运输企业通过支付租赁费用向电池资产公司租赁电池的使用权。电池银行投资或参股换电站，运输企业去换电站换电，并支付换电服务费。

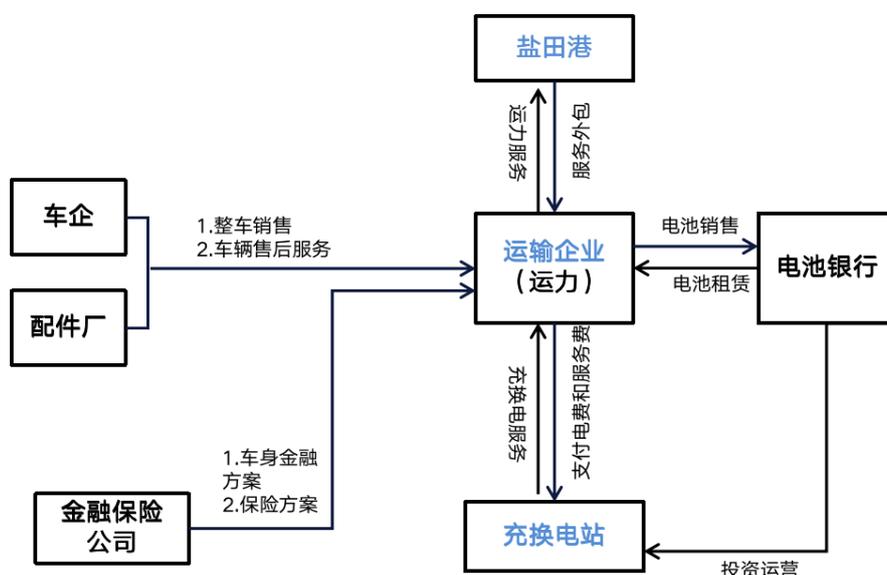


图 7-8 车电分离模式框架图

7.2.4 实施建议

每天行驶里程在 200km 范围内的短途集疏港运输换电重型货车的 TCO 成本优势不明显，在项目初期建议以充电方式解决补能问题，并且尽量选择在夜间低谷电价充电，以减少充电成本。其次，车辆可以直接选择充电型牵引车，相比较同配置换电型牵引车，采购成本还可以下降约 5 万元。后期如果同一运输线路运营车辆数如果超过 50 辆，则可以考虑建设换电站，提供换电服务。换电车辆数越多，换电成本将越低。

具体实施计划建议分三个阶段：

①重点突破阶段（2022 年-2023 年）。推动交通主管部门出台新能源重型货车路权优先整车、运营补贴政策。同时组织物流运输企业推进短途集疏港运输重型货车电动化试点项目，以充电模式和经营性租赁模式严重作为试点目标。年度推广应用数量建议不少于 50 辆。

②试点应用阶段（2023年-2024年）：阶段性总结试点工作经验，找出试点工作难点，加速推进试点项目建设，进一步形成规模，探索车电分离，充换电结合模式试点应用。年度推广应用数量建议不少于200辆。

③全面推广阶段（2025年）：总结试点工作经验，向全行业推广短途集疏港运输电动化模式。同时推进单程200km以上的重型货车电动化运营场景采用换电模式的试点应用。年度推广应用数量建议不少于500辆。

7.3 港内（盐田港）换电重型货车解决方案设计

7.3.1 场景分析

目前盐田港内牵引车为4×2结构的重型牵引车，总计约600辆(表7-3)，其中LNG车约340辆，柴油货车约260辆。车辆每天工作时长平均达到了17小时以上，港口每年更新车辆数在50-100辆，并且要求车辆使用达到10年就要强制更换。目前盐田港内绝大多数运营的牵引车使用年限超过了8年，面临更新淘汰的需要。

表 7-3 盐田港重型牵引车车辆信息

车辆类型	车辆结构	车辆数	燃料消耗	盐田港补贴燃料量	日均行驶里程
LNG牵引车	4×2	340辆	5.8m ³ /h	4.8m ³ /h	110km
柴油牵引车	4×2	260辆	4.5L/h	4L/h	110km

盐田港通过服务外包形式将港内集装箱运输交给9家运输服务商，其中8家为民营企业，1家为国有企业。车辆由运输服务商自行采购，港口方负责给予燃料补贴。

根据管理要求，港口内牵引车最高时速不得超过30km/h，并且在装卸集装箱过程中，低速和怠速时间较长，因此车辆使用一段时间后，容易出现发动机老化、积炭等现象。特别是车辆使用超过5年后，普遍会出现油（气）耗增加、噪音大、污染物排放大、维护成本高等问题。另外，为了保证操作安全，车辆使用过程中必须打开车窗，能听到操作声音，所以车辆空调的保温效果很差，进一步增加了燃料消耗量。

7.3.2 方案设计

7.3.2.1 车辆选型方案

采用目前技术比较成熟的4×2纯电动牵引车方案。根据港口方的建议，初期在整体运行效率还未优化提升前，先采用配置282kWh电池的车身，以满足港口作业旺季车辆24小时运转的需求。经测试，容量282kWh的动力电池，可满足满电状态下约200km的续航要求。后期实施过程中，将根据实际作业情况，增加141kWh容量的车辆，以进一步降低车辆前期购置成本。

所有电池全部采用磷酸铁锂电池，保证使用寿命达 8 年以上。



图 7-9 4×2 纯电动重型货车方案

采用的 4×2 换电牵引车车型基本参详见下表 7-4。

表 7-4 4×2 换电牵引车车型基本参数

关键项	参数
前桥	斯太尔 6.5t 前桥
板簧片数	前 2 片/后 3+1 片
车架材质	P610
车架厚度	8mm
车架断面高度	标载 280mm
整备质量 (kg)	9500
轴距 (mm)	4400
长×宽×高 (mm)	6910×2550×3785
换电时间	3~5min
空调	自动
轮胎规格	12R22.5, 条型花纹
前/后回转半 (mm)	2020/1840
变速箱类型	4 档 AMT
驱动桥	H6A 桥, 5.286
电池电量	282kwh/141kWh
额定/峰值功率 (kw)	250/360
额定/峰值转速 (rpm)	0-3500rpm
额定/峰值扭矩 (Nm)	≥1600Nm/2500Nm
港内实测电耗 (≤30km/h)	<140kwh/100km
实测续航里程 (282kWh)	>200km
实测续航里程 (141kWh)	>100km
充电时间 (5%-90%)	≤60min
最高车速	85km/h
整车耐久寿命 (万公里)	80
鞍座和底板	#50 为标配
最大爬坡度 (%)	>20

车辆同时具备快充和换电两种技术。在大功率快充模式下，60 分钟即可充满电；在换电站换电，则 5 分钟内可换完电池。

7.3.2.2 充换电方案

港内车辆采用换电为主的补能方式，换电站初步选址靠近车辆集中停放的停车场，如图中 A、B 点位置。同时，每处换电站配套建设 1 套直流快速充电桩，充电桩功率为 240kW，采用一体式双枪充电设计，输出电压范围：200V-750V，单枪最高可分配功率 120kW，主要用于临时应急充电需求。

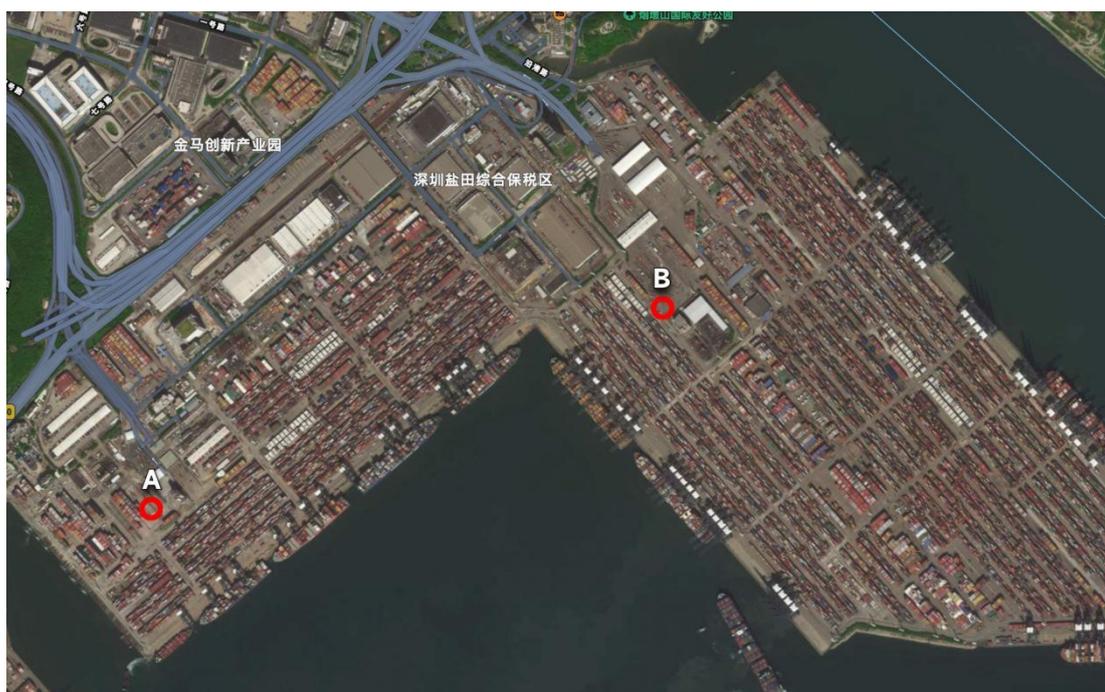


图 7-10 换电站初步选址位置（图中 A、B 点位置）

7.3.3 合作模式

由盐田港公司、某重资产持有企业和港内运输企业，采取“车电分离、电池租赁”的模式开展合作。具体分工如下：

盐田港公司负责协调港口管理部门，制定相关政策要求港内达到使用年限的柴油牵引车、LNG 牵引车全部更换为纯电动车。同时协助充电桩、换电站的规划和建设。

无动力车身（不带电池）由港内运输企业购买，电池银行提供无动力车身的金融分期方案；动力电池由电池银行全资采购，并以租赁方式提供给港内运输企业，解决重型货车电动化更新因整车采购价过高的问题和电池运营管理、电池安全管理、维保维修、残值管理的问题。电池银行同时负责换电站的施工建设、项目产品的采购和销售、车辆和电池的的日常维修检测、换电站的日常管理运营、电池未来的回收利用等。

港内运输企业购买无电池车身并承接港口内的运输业务，每个月向电池银行支付电池租赁费用，并向充换电站支付充电服务费。

7.4.2 实施建议

港口内属于封闭应用场景，由于吞吐量巨大，车辆运营具有显著的高频短倒特征。根据 TCO 分析可以看出，盐田港港内运输车辆无论是充电还是换电，其 TCO 均比柴油货车有显著的优势，但是考虑到旺季 24 小时作业的需求，用换电牵引车更符合实际需要。目前港内车辆使用年限大部分已经超过 8 年，在 TCO 具有明显优势的前提下，可以加快老旧柴油牵引车更换速度，所有达到更换条件的车辆全部更换为换电纯电动牵引车。同时，港口方适时将燃料补贴从原来的“油（气）补”更改为“电补”，以比原来更少的补贴进一步降低运输企业的运营成本，加快更换速度。

港内换电站按照 50 辆车一个换电车道进行建设，采用单站双通道可以进一步提高换电效率，降低建设规模。

具体实施计划建议分三个阶段：

①重点突破阶段（2022 年-2023 年）。重点组织推进试点项目，积极协调解决项目实施过程中的各种困难和实际问题，确保项目顺利实施。年度推广应用数量建议不少于 200 辆。

②试点应用阶段（2023 年-2024 年）。阶段性总结试点工作经验，找出试点工作难点，加速推进试点项目建设。年度推广应用数量建议不少于 400 辆。

③全面推广阶段（2025 年）。总结试点工作经验，向全行业推广。

第八章 结论及建议

交通运输行业是能耗和排放的重点行业之一。面临中国 2030 年碳排放达到峰值，2060 年实现碳中和的目标，交通运输行业面临较大的节能降碳压力。发展新能源汽车则成为了公路领域节能降碳的重要措施。一直以来，公路货运车辆的油耗和尾气排放均居高位，尤其是重型柴油货车，更在其中占据重要比例。换电模式不仅成为国家政府主管部门鼓励发展的方向，而且还将是下一步重型货车电动化能源补给最有效的技术解决方案之一，重型货车的电动化也为推广应用换电模式提供了适宜的应用场景。因此，面对新的发展机遇和市场形势，本项目开展深圳市新能源重型货车换电模式的应用场景及环境效益的系统研究，结果表明换电重型货车有够有效降低城市的空气污染程度，但其推广也存在一定的问题，因此应积极出台相应的政策助力换电重型货车在货运领域的应用。

8.1 主要研究成果

8.1.1 深圳市新能源重型货车推广任重道远

深圳市新能源汽车累计推广应用数量约为 54.4 万辆（截至 2021 年底），在公共交通领域基本上已实现全面电动化。深圳市新能源重型货车仍处于初步发展阶段，虽然在高额的超额减排奖励政策支持下，深圳市在 2018 年注册登记了 4200 辆纯电动泥头车，成为国内新能源重型货车推广应用最大的城市，但该项目补贴政策的导向性非常明显，与市场化推广的目标相差较远。随着国家补贴政策的退坡，大额补贴政策将逐渐退出，单方面依靠补贴政策来推广应用纯电动货车的模式不可复制，也不可取，行业更需要基于市场化的推广辅以政策的引导这种模式来实现大规模的推广应用。

8.1.2 深圳市重型货车综合效益评价结果

本项目立足深圳市重型货车电动化的推广实践，建立了一套科学可行的重型货车综合效益评估体系，重点针对泥头车、集疏港牵引车和港内牵引车三类应用场景进行分析：

从环境效益角度来看，纯电动重型货车相比柴油重型货车在全生命周期的污染物排放方面有明显优势，换电重型货车的推广应用有助于中国大气污染防治和“碳达峰、碳中和”目标早日实现。

从经济效益角度来看，在港口内高频短倒的应用场景下推广换电重型货车的潜力最大；泥头车次之，而在集疏港短途运输应用场景下市场化推广具有较大难度。

①根据对现有存量泥头车运营情况的调研和分析表明，在现有的车辆销售价格和油费、电费条件下，充电型纯电动泥头车会有 TCO 成本优势，282kWh 电池容量的充电泥头车 TCO 比传统柴油泥头车降低了约 2.7%，如果采用夜间谷期电价充电，则优势会更明显。换电型泥头车虽然解决的车辆前期购置成本高和充电等待时间长的问题，但是 282kWh 电池容量的充电泥头车 TCO 比传统柴油泥头车提高了约 7.2%，并不具备 TCO 成本优势。目前要想实现纯电动泥头车的规模化应用，就需要出台引导政策，从三方面入手解决问题：一是提高运距，运距越大，油电消耗成本差越明显，纯电动泥头车的 TCO 优势越明显；二是提高运费，单位运费越高，车辆的运输收益越高，企业能越快实现盈亏平衡；三是降低车辆采购成本，无电池车身的采购成本需要降低至 40 万以内，也能实现 TCO 的降低。

②对集疏港牵引车的 TCO 分析表明，短途集疏港运输运营环境下，配置 282kWh 电量的充电型和换电型纯电动牵引车的 TCO 比柴油牵引车分别增加了 17.4%和 28.6%，不具备成本优势。充电型牵引车目前要想和柴油牵引车 TCO 平衡，可以选择充电电价在 1 元/kWh 以内的时间段或场站充电。而换电型牵引车只能通过政府补贴，或者车企降低车辆销售价格来降低整体 TCO 成本。

③对港口内牵引车的 TCO 分析表明，港口内高频短倒运营环境下，纯电动牵引车比柴油牵引车的燃料成本有大幅的下降，每公里的燃料成本下降了约 57.1%。而充电型和换电型牵引车的 TCO 比柴油牵引车分别下降了约 28.3%和 16.5%，成本优势非常明显。考虑到深圳港口用地紧张，不具备车辆大面积长时间停放充电的条件，且作业旺季需要车辆 24 小时连续运行，因此，充电型纯电动牵引车并不适用于港口内的运营环境，而换电型纯电动牵引车更符合使用要求。

总体来看，换电重型货车在全生命周期内具有污染物减排优势，但是经济分析结果表明其应用场景较为局限，比较适合在电厂、港口等高频倒短，油（气）成本差价较大的场景进行市场化推广应用，而在其他场景下仍然需要通过补贴、路权优先等方式来弥补 TCO 劣势。

8.1.3 “车电分离”模式可推动换电型重型货车市场化推广

根据本项目研究分析可以发现，纯电动重型货车受续航能力限制、充换电设施不足、成本过高等问题影响，现阶段并不适合所有的运输环境。而在没有补贴政策的情况下，纯电动重型货车尤其是换电型重型货车的市场化推广仅适用于高频短倒、油电

燃料成本差额较大的场景，比如港口内短倒、厂（港）-短倒、工地或矿区短倒，而且需要根据场景的特征进行车辆的定制化配置，以降低购置成本。

在纯电动重型货车推广过程中，创新商业模式的应用变的尤为重要。现阶段，随着上游原材料的大幅上涨，以及补贴的取消，生产制造成本转移到运营端的压力越来越大。一辆纯电动重型货车目前的销售价格是传统油车的2倍以上，车企或经销商如果只是通过直接销售车辆来获利，将得不到运营企业的认可。本项目的商业合作模式是站在运营端的角度进行设计，通过一家资产持有公司整合车辆集采、充换电场站、金融和保险、后市场运维等服务资源，在车辆购置环节通过“车电分离”的方式降低运营端前期购置成本，再通过收取电池租金、充换电服务费、维修保养费，以及未来动力电池回收和梯次利用的综合收益来实现获利。这样即达到了让运营企业在车辆购置环节大幅降低车辆采购成本并实现全生命周期 TCO 的平衡，又让资产持有公司实现持续获利，大大降低了纯电动重型货车市场化推广的难道。

8.2 措施及政策建议

①制定纯电动重型货车补贴政策，加快重型货车电动化进度

从本项目研究结果可以看出，目前重型货车的购置成本依然高居不下，即使采用车电分离的金融方案，无电池车身购置环节综合成本比同类型柴油车要高出约 10 万元。建议政府部门制定运营补贴或者置换补贴，给予 4×2 和 6×4 纯电动牵引车、8×4 纯电动泥头车 10 万元补贴，以加快重型货车电动化进度。

②出台差异化路权政策，以路权优势弥补重型货车成本劣势

对于泥头车，限制柴油泥头车在福田、罗湖、南山等地区的通行权，增加纯电动泥头车可通行路段数量，未来可柴油泥头车的限行范围扩大到其他区域。对于牵引车，调整现有对货车实行限制通行的交通管制措施，对于需要在港口、仓库、工厂之间进行短倒运输的纯电动牵引车，允许开放部分通行时段和路段并给予通行权。通过给予纯电动牵引车更多路权优势，引导更多企业使用纯电动车。

③纯电动重型货车承运优先，提高车辆使用频次和运距

建议对政府投资的基础设施建设项目提出要求，在项目招投标阶段即要求承担余泥渣土运输的车辆必须是纯电动泥头车，同时加强施工工地及周边道路的监管，严格限制外地牌照超载车辆进工地施工作业。对于入港承运的牵引车，建议港口方在进港预约系统内给予纯电动牵引车优先入港权，减少排队等待时间。

④提高港口的绿色化标准，要求旧车全部更换为纯电动

目前深圳各大港口拥有内拖牵引车数量超过 1200 辆。从能源消耗量来看，1 辆港内 4*2 牵引车百公里的柴油消耗量约和 3 辆长途运输公路重型货车或 7 辆城市物流配送轻卡的消耗量相当，因此，虽然港口内拖牵引车数量较少，但是其碳排放和污染物的排放数量却非常惊人。根据本项目的研究可以看出，港口内纯电动牵引车比柴油车有非常明显的 TCO 成本优势，并且采用换电模式可以充分保障运营效率，因此，建议政府部门对港口方提出车辆电动化的政策要求，所有运营时间超过 5 年的车辆应全部更换为纯电动。

⑤油（气）补贴改为电补，让充电服务具有价格优势

以盐田港为例，目前港口方给予承运商有免费加油（气）的额度，其中柴油每小时免费额度为 4.5 升，LNG 每小时免费额度为 3.8 公斤，超出部分按市场价结算。相当于港口方变相的在给承运商油（气）补贴。本项目 TCO 分析中并未考虑补贴因素，所以用纯电动牵引车运营的充换电服务费要比加油（气）便宜。建议在港口牵引车电动化过程中，港口方将原来的油（气）补贴改为等额电补，在同等条件下让充电服务具有价格优势。

⑥建立用地用电保障机制，为换电站建设创造条件

建议将新能源汽车换电站建设及用电纳入城市空间发展规划与国家电力供应保障体系中。根据新能源汽车市场发展预期及充换电需求预测，为高需求规划区放宽换电站用地准入门槛。简化换电站建设用地、用电审批手续，为符合要求的企业提供政策保障。同时，对服务于重型货车并建成通过验收的换电站给予建设补贴和运营补贴，加快换电站建设速度。

⑦建立区域联动机制，扩大新能源重型货车应用范围

深圳市集疏港车辆有超过 70%是在珠三角地区运行，而深圳、东莞、惠州三地间的产业分布、物流运输业务紧密相连。建议联合惠州、东莞等地政府部门、行业组织、运输企业，就跨区域纯电动重型货车的运营，以及换电站规划建设形成联动合作机制，保障深圳辐射到东莞、惠州等地的纯电动重型货车区域一体化运营的充换电需求。

⑧建立健全标准体系，实现换电模式的互联互通

组织整车、动力电池、电力公司、运营企业与行业机构研究制定换电电池包、车辆接口、换电设备、换电站建设、换电站运维管理等标准，解决不同品牌换电车辆电

池包的问题，促进换电站运营服务的互联互通，提升换电站运维管理安全水平和经济效益，并在此基础上逐步完善换电设备、换电站建设、换电运营管理相关的系列标准和规范，为换电运营服务的健康发展提供完整的标准体系。

参考文献

- 1 前瞻产业研究院. 2021 年中国石油行业市场现状及发展前景分析[EB/OL]. 2021[20220802]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1711780574899359325&wfr=spider&for=pc>.
- 2 《中国石油消费总量达峰与控制方案研究》[R]. 中国:自然资源保护协会 (NRDC), 2021.
- 3 深圳市道路货物运输运价指数分析及预判报告 2020 年 1 月[R]. 中国深圳:深圳市公路货运与物流行业协会, 2020.
- 4 深圳市泥头车运输行业运营月报[R]. 中国深圳:深圳市交通运输局, 2020.
- 5 邓晓楠. A 公司新能源重卡产品竞争力提升策略研究[D]. 长安大学, 2021.
- 6 雪球. 我国加氢站世界第一! [EB/OL]. 2022[20220802]. <https://xueqiu.com/9331049986/222198553>.
- 7 中国电动汽车充电基础设施促进联盟. 2022 年 4 月全国充电设施保有量 332.4 万台 [R]. 中国北京:, 2022.
- 8 运联研究院 石美燕. 氢能重卡能否取代燃油重卡? [R]. 中国:运联研究院, 2021.
- 9 全国能源信息平台. 氢燃料电池卡车与纯电动卡车对比, 谁才能代表新能源卡车的未来? [EB/OL]. 2022[20220802]. <https://www.yoojia.com/article/9257631693774961076.html>.
- 10 2021 年交通运输行业发展统计公报[R]. 中国:交通运输部, 2022.
- 11 《Global EV Outlook 2022》[R]. 国际能源署, 2022.
- 12 华经情报网. 2020 年我国货运重型卡车行业市场前景与发展格局分析[EB/OL]. 2021[[]]. <https://xueqiu.com/1973934190/170985172>.
- 13 华经情报网. 2021 年中国重卡市场现状分析, 市场遇冷, 新能源重卡销量大幅度上升[EB/OL]. 2022[2022]. <https://www.huaon.com/channel/trend/782001.html>.
- 14 电车资源. 2021 年万辆新能源重卡卖到哪里去了? [EB/OL]. 2022[2022]. <http://www.cvworld.cn/news/xinnengyuan/xinnengyuanzka/220127/197807.html>.
- 15 读创. 2021 年深圳海空“双港”货运吞吐量双双攀上历史新高[EB/OL]. 2022.2<https://baijiahao.baidu.com/s?id=1720990894772657327&wfr=spider&for=pc>.
- 16 卜德明,王娜.新机遇下我国新能源汽车换电模式发展前景分析[J].汽车实用技术,2021,46(06):11-14.
- 17 龙志刚. 关于换电重卡的相关研究 (上): 概述与发展现状[EB/OL]. 2022[[]]. https://www.sohu.com/a/547063227_120109837.
- 18 高有山. 2013. 车辆燃料生命周期能耗和排放分析方法[M]. 北京: 冶金工业出版社. 192
- 19 周长宝. 2020. 不确定条件下深惠莞区域能源电力系统规划研究[D]. 华北电力大学(北京). 70
- 20 李艳丽, 吕锦旭, 李晓越. 2021. 碳中和背景下低碳运输工具比选研究[J]. 交通节能与环保, 17(04): 1-8
- 21 丁宁, 高峰, 王志宏, 等. 2012. 原铝与再生铝生产的能耗和温室气体排放对比[J]. 中国有色金属学报, 22(10): 2908-2915

- 22 丁宁, 杨建新. 2015. 中国化石能源生命周期清单分析[J].中国环境科学, 35(05): 1592-1600
- 23 沈万霞.2011. 镁合金材料的全生命周期评价[D].北京工业大学
- 24 李书华. 2014.电动汽车全生命周期分析及环境效益评价[D]. 吉林大学
- 25 Weiss M A, Heywood J B, Drake E M, et al.2000. ON THE ROAD IN 2020: A LIFE-CYCLE ANALYSIS OF NEW AUTOMOBILE TECHNOLOGIES
[EB/OL].<https://www.acemap.info/paper/157621091>
- 26 Li S,Li N,Li J, et al. 2012. Vehicle Cycle Energy and Carbon Dioxide Analysis of Passenger Car in China[J]. Aasri Procedia, 2(Complete): 25-30
- 27 余大立, 张洪申. 2019. 纯电动与柴油货车全生命周期能耗及排放分析[J]。环境科学学报, 39(06): 2043-20524
- 28 Aguirre K, Eisenhardt L, Norring A, et al. 2012。 Lifecycle Analysis Comparison of a Battery Electric Vehicle and a Conventional Gasoline Vehicle[EB/OL].<https://www.semanticscholar.org/paper/Lifecycle-Analysis-Comparison-of-a-Battery-Electric-Aguirre-Eisenhardt/2913dc7927c411ba6a922f426a67f01108699fd3?p2df>
- 29 李楠楠. 插电式混合动力轿车燃料周期能源消耗与气体排放研究[D]. 吉林大学, 2014
- 30 郭园园.MOVES-深圳模型的构建及其模拟机动车排放因子的应用[D].哈尔滨工业大学, 2014