白皮书

零排放卡车在美国和欧洲的实际表现及其对中国的影响

作者：邱茵
宋舒涵
Ross McLane
CALSTART

2022年4月

报告声明

本报告由能源基金会（美国）北京办事处（Energy Foundation China）、气候工作基金会（ClimateWorks Foundation）以及威廉和弗洛拉·休利特基金会（the William and Flora Hewlett Foundation）资助。作者要感谢FIER Automotive的工作人员，包括Rob Kroon，感谢他们对这项工作的贡献。作者还要感谢CALSTART的主要工作人员对该报告提出的关键性审核和补充意见，他们包括Cristiano Facanha博士、Owen MacDonnell、Baha Al-Alawi、Kevin Leong、Chase LeCroy和John Zhang。本报告基于截至2022年2月收集的信息。本报告的任何错误都归于作者自身。

CALSTART保留所有权利。未经CALSTART事先书面许可，不得以任何形式或以电子拷贝、复印或录音等其他方式复制或传送本报告的任何部分。请求获得许可或进一步信息，联系方式如下：

邮寄地址： CALSTART, 48 S. Chester Ave, Pasadena, CA 91106
电子邮箱： Publications@CALSTART.org.

全球商用车辆 Drive to Zero

www.globaldrivetozero.org
@TeamDriveToZero

CALSTART

www.calstart.org
@calstart

© Copyright 2022 CALSTART

目录

报告声明 ii
缩略语 v
图目录 vi
表目录 vii
执行摘要 viii

1. 介绍 1

2. 车辆分类 3

3. 美国和欧洲零排放卡车市场背景 7
3.1. 美国零排放卡车市场背景 7
3.2. 欧洲零排放卡车市场背景 9

4. 欧美技术和经济可行性分析 12
4.1. 数据来源 13
4.2. 技术能力 14
4.2.1. 标称续航里程（Nominal Ranges） 15
4.2.2. 电池容量 16
4.2.3. 载重能力 17
4.2.4. 行驶周期（Duty Cycle） 18
4.2.5. 真实环境下的能源效率 21
4.3. 经济可行性 24
4.3.1. 制造商建议零售价格（MSRP） 25
4.3.2. 燃料成本 26
4.3.3. 维护成本 28
4.3.4. 政策和激励措施 28
4.3.5. 拥有总成本（TCO）结果 29

目录

5. 对中国的建议 33
5.1. 宣布保持中国领导地位的强有力目标 33
5.2. 实施强有力的法规，提供市场确定性 36
5.3. 延长有针对性且有时限性的激励措施 38
5.4. 继续投资于电池电动技术 39
5.5. 优先考虑零排放尾气排放技术 40
5.6. 利用零排放客车投资加速零排放卡车商业化 41
6. 未来研究展望 43

参考文献 44
附录一： TCO成本和结果 47

缩略语

BET	纯电动货运卡车
CARB	加州空气资源委员会
Cargo Van	厢式货车（3级）
FCET	燃料电池货运卡车
GVWR	车辆总重量等级
HD卡车	重型卡车（7/8级）
HVIP	混合动力及零排放卡车和客车代金券激励计划
ICCT	国际清洁交通委员会
ICE vehicles	内燃机车辆
LHDV	轻型重型车辆（2b级）
MHD ZEV	中型和重型零排放汽车
MHD ZET	中型和重型零排放卡车
MD step van	中型步入式厢式货车（3-6级）
MD truck	中型卡车（3-6级）
MOU	谅解备忘录
MSRP	制造商建议零售价
OEM	原始设备制造商
TCO	拥有总成本
US	美国
Yard tractor	场内/码头牵引车
ZET	零排放卡车
ZETI	Zero-Emission Truck Inventory

图目录

图1. 在一切照旧情景下全球卡车存量、能源消耗和尾气排放预测（来源：ICCT）

图2. 基于技术和应用的卡车车辆分类

图3. 面向中国市场的MHDVs分类

图4. 按美国各州划分的零排放卡车采用情况（2011-2021年）

图5. 近年来美国零排放卡车采用变化

图6. 按国家划分的欧洲零排放卡车销售额（2017-2020年）

图7. 物流公司DB Shenker使用的扶桑eCanter卡车，瑞士的现代XCIENT重型卡车，以及奥斯陆的沃尔沃FE重型卡车（从左到右）

图8. 零排放卡车在欧洲领先国家的销售额（按重量等级和品牌分类）

图9. 美国能源部数据收集项目的MHDEV采用地图

图10. 美国和加拿大，欧洲以及中国按车辆类别划分的续航里程（2019-2022年）

图 11. 美国和加拿大，欧洲以及中国按车辆类别划分的卡车电池容量（2019-2022）

图12. 美国卡车载重能力估算（2019-2022）

图13. 美国能源部数据库中的中重型纯电动货运卡车的能效

图14. 美国多地区场内牵引车能源效率与环境温度的季节性特征

图15. 美国多地区场内牵引车能源效率与环境温度的散点图

图16. TCO分析中纯电动货运卡车和柴油基准卡车的当前MSRP和未来MSRP预测

图17. TCO分析中纯电动货运卡车和基准卡车的当前和未来燃料成本预测（美元/英里）

图18. 拥有总成本（TCO）分析中纯电动货运卡车和基准卡车的当前维护成本（美元/英里）

图19. 支持性政策可使得拥有总成本（TCO）平价年份提前

图20. 纯电动货运卡车和柴油卡车实现TCO平价的最早年份

图21. 全球轿车、轻型商用车（Vans）、客车和卡车的市场份额（资料来源： IEA Global EV Outlook 2021)

图22. 全球轻型车和中重型车的目标（来源：CALSTART)

图23. 2020年已作出零排放汽车承诺的汽车制造商所占的区域市场份额

图24. 加州汽车目标和法规时间线（1963-2020）资料来源：CALSTART

图25. 中国的零排放卡车和零排放客车补贴和销售情况（资料来源：）

图26. The Beachhead Strategy

表目录

表1. 中美相对应的重量等级比较

表2. 零排放卡车实测数据源汇总表

表3. 美国能源部数据库中重型纯电动货运卡车的行驶周期

表4. Run-on-Less Electric项目中重型纯电动货运卡车的行驶周期

表5. 每个数据来源所使用的区域和分析参数情况

表6. 纯电动货运卡车和柴油卡车实现TCO平价的汇总结果

表7. 按类别和燃料类型划分的加州HVIP资金金额

执行摘要

中重型（MHD）卡车所排放的温室气体（GHGs）和氮氧化物（NOx）、颗粒物（PM）等空气污染物与其市场存量不成比例，这主要是由于中重型卡车行驶里程更长、配备柴油发动机、重量更大、行驶周期（duty cycles）更频繁且燃油效率普遍更低。与传统燃油中重型卡车相比，零排放替代方案可以通过消除尾气排放的方式大幅减少全生命周期温室气体排放，从而缓解以上问题。

在全球范围内，零排放卡车（ZETs）的采用情况不尽相同。这在很大程度上取决于国家和州政府的政策。在美国和欧洲，以中型卡车为主的零排放卡车的产量不断攀升，也有越来越多的车队加入购买零排放卡车的行列。自2010年以来，美国已经配置了1200多辆零排放卡车，美国零排放卡车制造商（OEMs）拥有超过14万辆零排放卡车的非约束性订单，将在未来10年内陆续交付。此外，大多数的美国汽车制造商都承诺实现电动化，如果进行加总，零排放卡车将在2035年达到约占中重型卡车年销量的35%。此外，自2017年以来，欧洲已经配置了2300多辆零排放卡车。欧洲汽车制造商协会（European Automobile Manufacturers Association）估计，到2025年，欧洲将配有4万辆中重型零排放卡车，且这一数值将在2030年达到27万（ACEA，2021）。

美国和欧洲这些趋势的背后是国家和州政府强有力的目标、激励和监管措施的共同作用。美国加利福尼亚州（以下简称“加州”）就是这些驱动因素的例证：加州出台的某项行政命令以到2045年实现100%的零排放中型和重型车辆（ZE MHDV）销售为目标；另一项代金券激励计划（HVIP）迄今已为零排放卡车和零排放客车提供了超过4亿美元的资金；此外，加州一项监管规定要求制造商逐年增加零排放卡车的销售比例，并在2035年达到45-75%的占比。

虽然美国和欧洲在零排放卡车领域的增长率很高，但中国目前仍以全国23.2万辆中重型零排放卡车的配额处于世界领先地位。尽管如此，中国目前设定的目标与其能力并不匹配。中国汽车工程学会（China-SAE）近期提出了关于总重超过3.5吨的新能源卡车（NETs)[1] 的销售目标：到2025年占比达12%，2030年占比达17%，2035年占比达20%（China SAE，2021）。相比之下，由15个国家和地区联盟签署的一份全球谅解备忘录（Global MOU）[2]，设定了到2040年实现100%零排放卡车和客车销售的目标，以及到2030年实现占比达30%的中期目标。本报告旨在鼓励中国决策者将中国的能力与其目标相统一，并致力于更积极的零排放卡车目标。为了支持这一目标，我们对零排放卡车的技术和经济可行性进行了调研。

技术可行性

全世界在决策方面的犹豫不决，很大程度上是因为对零排放卡车替代传统燃油卡车的技术能力缺乏信心，然而，两者间的技术能力差异正在日益缩小。在本报告中，我们评估了几种不同来源的技术数据，不仅是制造商引用的数据，还包括在不同气候、地形、行驶速度、拥堵情况和停车频率的组合测试下获取的真实性能数据。尽管上述每个因素的影响尚未得到很好的归因，但由此得出的性能表现可以从多个方面描述零排放中型和重型车辆的技术能力现状。

1 新能源汽车在中国被定义为部分或完全由电力驱动，如纯电动汽车（BEVs）、插电式混合动力汽车（PHEVs）和氢燃料电车汽车（FCEVs）。

2 奥地利、加拿大、智利、丹麦、芬兰、卢森堡、荷兰、新西兰、挪威、苏格兰、瑞士、土耳其、英国、乌拉圭和威尔士

制造商目前的标称续航里程和电池容量足以满足城市使用需求，并迅速接近内燃机（ICE）车辆的续航里程。根据中国车型的已有数据做参照，美国和欧洲现有的零排放卡车车型在中型卡车和厢式货车上可实现相似的标称续航里程，且在重型卡车上提供更优的标称续航里程。更大容量的电池可以延长电池续航里程，但如果车辆总重量等级（GVWR）保持不变，大尺寸电池可能会增加汽车整备重量（curb weight）并限制载重能力。纯电动卡车的载重能力（payload capacities）目前已可与内燃机同类车相媲美。尽管纯电动货运卡车（BETs）在上述技术能力上表现相对较好，但我们应该意识到，由于当前供应链的复杂动态，一些已经官宣的高端车型不一定很快就能投产。

在执行常规行驶周期（duty cycles）时，纯电动的场内牵引车（yard tractor）、中型卡车、中型步入式厢式货车（step van）和厢式货车（cargo van）的性能与传统燃油卡车相当。在重型卡车类别测试的纯电动车型可以在通常只需要一个班次、每天行驶不超过200英里（322公里）的区域性行驶周期内很好地执行工作，但是如果存在路线多变不可预测、路程或等待时间过长、或者驾驶员无法每天返回基地充电的情况时，由纯电动车型执行工作会略有挑战性。•

电动汽车公认的优势是其更好的能源效率，约是柴油卡车效率的2-4倍。美国纯电动的场内牵引车和重型箱式卡车的中位能效分别为2.62 千瓦时/英里（14.5英里每加仑当量，以下简称“ MPGe”）和2.17 千瓦时/英里（17.6 MPGe），然而在大多数情况下，其实际能效表现往往低于标称能效，但仍然是柴油同类车的大约2倍（6.5-8 英里每加仑，以下简称“ MPG”）。重型日间驾驶牵引车（day cab tractors）和中型步入式厢式货车表现相对较好，中位能效分别为1.95 千瓦时/英里（19.5 MPGe）和1.12 千瓦时/英里（34 MPGe），相当于柴油卡车能效的3至4倍（6.5 MPG和9 MPG）。此外，以场内牵引车为例，研究发现较低的能源效率与较低的环境温度有关。与美国西海岸相比，东北部和中西部地区受温度的影响更为明显，这可能是因为这两个地区的季节间变化更大且冬季温度更低。

经济可行性

对纯电动货运卡车（BETs）的经济可行性评估基于对拥有总成本（TCO）的文献综述。考虑到假设和方法论的差异，该部分对多个成本因素进行了跨文献分析。纯电动卡车的制造商建议零售价（MSRP）目前比柴油卡车更贵，但随着电池技术的成熟和产量的增加，成本差异预计会随着时间的推移而减少。在当前和未来的情景中，纯电动货运卡车通常比柴油卡车的燃料成本更低，而燃料效率是影响纯电动货运卡车燃料成本的决定性因素。尽管不同文献中的成本估算存在差异，由于纯电动货运卡车不需要更换机油和后处理系统维护，纯电动货运卡车的维护成本预计低于柴油机。综上所述，若在有支持性政策的情况下，纯电动货运卡车目前即可实现拥有总成本（TCO）平价。而到2030年，即使没有经济激励，分析预计纯电动货运卡车依然能够实现经济可行。

政策建议

中国在零排放汽车（ZEV）采用、生产、电池制造以及激励措施方面领先世界。尽管处于这样的领导地位，但中国的零排放卡车（ZET）市场并没有取得像其零排放轻型乘用车和客车市场那样的成功。许多与中重型卡车电动化相关的技术和经济因素导致零排放卡车的采用较慢，而中国独特的卡车市场特点使得这些挑战格外突出。中国超过70%的重型卡车司机是独立的车主经营者，较低的工资水平使得他们无法承受中重型零排放卡车的前期成本。中重型零排放卡车几乎是柴油卡车成本的两倍，而这些独立卡车车主与大型物流企业相比融资选择有限。

然而，这些障碍是可以克服的。一项涵盖强有力的全国零排放卡车目标、法规和激励措施的综合计划可以系统地指导制造商和省级政府采取行动，加速零排放卡车商业化，提高零排放卡车的财务可行性，直到实现与传统卡车的总成本平价。以下是我们为中国提出的一系列政策建议：

- **制定保持中国领导地位的强有力目标**

目标可以指导雄心勃勃的法规的制定，并向地方政府、中重型卡车制造商和车队发出明确的市场信号。如果中国有意保持其在零排放运输方面的领先地位，关键的第一步是制定至少与其他国家和美国各州类似的强有力零排放卡车目标。

- **实施强有力的法规，提供市场确定性**

监管法规可以为市场参与者提供长期的确定性，并鼓励投资。为了巩固向零排放卡车的转型，中国应该通过监管政策支持任何雄心勃勃的零排放卡车目标，这些政策包括制造商的销售或库存配额，也可以是对车队的车辆部署要求等。

- **延长有针对性且有时限性的激励措施**

为了维持和加速零排放卡车的采用，政府应延长并增加对零排放卡车的购置激励，以填补零排放卡车和传统柴油卡车之间的拥有总成本（TCO）差距，同时政府还应设计额外的针对零排放卡车的运营期激励措施。重新引入的激励措施应该既有针对性，又有时间限制。制定一套全面协调的法规和激励措施将为投资提供市场确定性，并明确激励措施退坡时间表。

- **继续投资于电池电动技术**

所有纯电动货运卡车类别预计将在2025-2035年实现在无激励措施的情况下的拥有总成本（TCO）平价。考虑应对气候变化的紧迫性以及中国在电池制造方面的投资能力，在转向更昂贵、技术尚不成熟的燃料电池技术之前，一个严谨的零排放卡车路线图将最大限度地推动电池电动技术在每个卡车类别的应用。在投资纯电动货运卡车的同时，继续投资于燃料电池货运卡车的开发和早期采用，将使中国以最快、最具成本效益的方式向零排放卡车转型。

- **优先考虑零排放尾气排放技术**

在制定未来中重型卡车领域的目标、法规或激励措施时，中国都应该优先考虑“零排放（zero-emission）”尾气技术，而不是“趋近零排放（near-zero）”或“低排放”技术。这些其他技术仍然会产生有害污染物，并且减少的温室气体（GHGs）排放不足以满足国际气候目标所需的深度脱碳战略（ICCT，2021c）。此外，由于许多中重型卡车部门可以实现电动化，真正可持续的生物燃料和昂贵的电燃料可预留给海运和航空等更难减排的行业。在这些行业，电池技术还不能满足电池重量、能量和功率的要求。

- **利用零排放客车投资加速零排放卡车商业化**

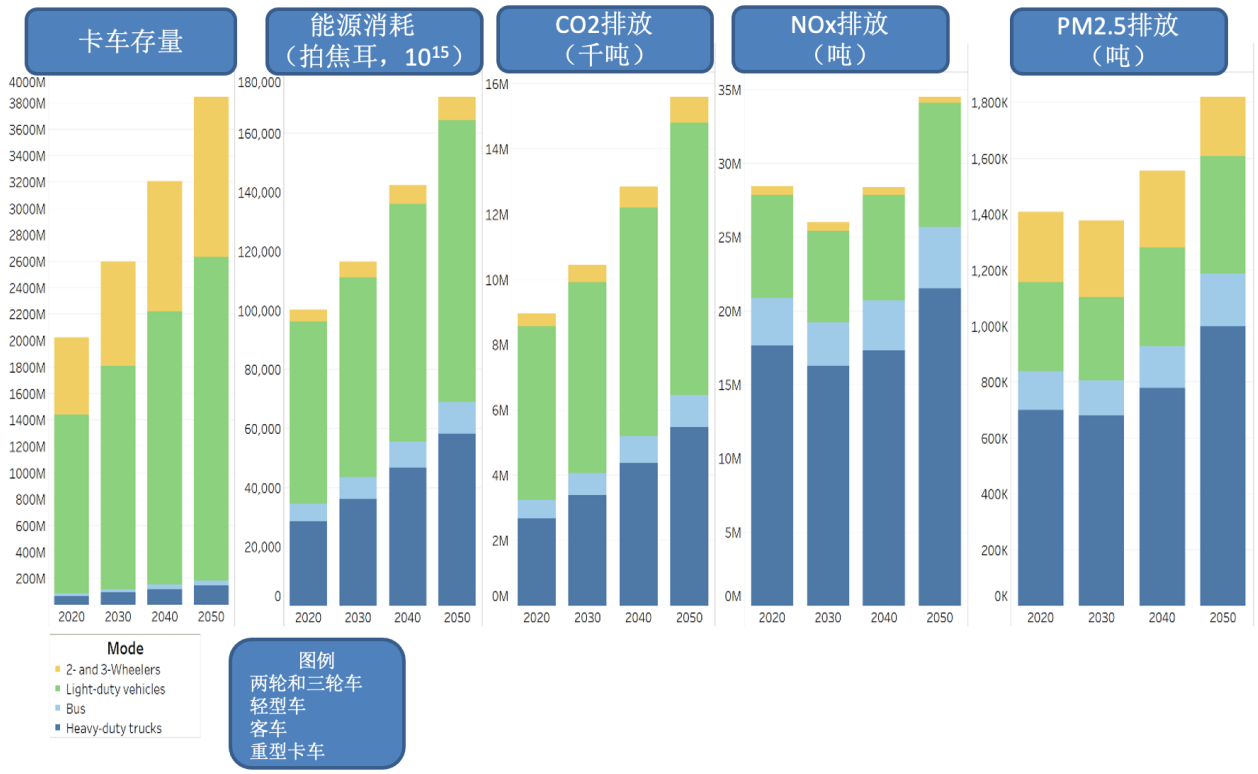
中国是全球客车领域电动化的领导者，中国占全球零排放客车的比例超过98%（IEA，2021）。正如国际公认的“Beachhead Model”所概述的，零排放客车是一种“率先成功的”零排放技术（或称为“Beachhead”），继而加速更难电动化的车辆类别的发展。中国有能力且有责任利用好制造和推广零排放客车的经验，加速零排放卡车（ZETs）的商业化。中国已有几家中重型汽车制造商开始利用“Beachhead Model”的策略。通过有针对性的政策，类似的投资可以扩展到重型卡车领域。

1

介绍

中重型（MHD）卡车所排放的温室气体和空气污染物与其市场存量不成比例（图1）。2020年，重型卡车占全球车辆存量的比例略高于3%，但其污染物排放量却分别占二氧化碳排放量的30%，氮氧化物（NOx）的62%，以及道路车辆PM2.5排放的约50% （ICCT, 2019a; ICCT, 2019b）。在一切照旧的情景下，到2050年，中重型（MHD）卡车的二氧化碳排放量预计将增加一倍以上，而氮氧化物和PM2.5排放量预计将分别增长超过20%和40%，这很大程度上是由国内和国际货运需求显著增长推动的 （ITF, 2019）。使该问题更加严峻的事实是，低收入社区由于所在位置往往更临近高速公路且更加依赖公共交通，会受到温室气体和空气污染物排放的影响更大。

图 1：在一切照旧情景下全球卡车存量、能源消耗和尾气排放预测（来源：ICCT）



在中国，车辆总重在4.5吨以上的中重型卡车占道路车辆总量的4%，但却占温室气体排放总量的40%，氮氧化物（NO_x）排放量的84%，以及所有来自道路车辆颗粒物（PM）污染的90% （ICCT, 2021d; Xue, 2021）。

零排放卡车（ZETs）的使用可以通过消除尾气污染物以及大幅减少全生命周期温室气体排放的方式来缓解上述不成比例的污染物排放，即使零排放卡车是在相对重煤的电网情况下进行充电。2021年国际清洁交通委员会（ICCT）的一项研究发现，2021年至2035年期间，中国纯电动轻型乘用车的全生命周期排放量将比汽油和生物燃料混合动力轻型乘用车的排放量低约40% （ICCT, 2021a）。针对零排放中重型卡车的类似研究也很可能得出相似结论，即它们相较于柴油车也有类似的温室气体减排效果。

目前，中国处于零排放市场领先地位，2021年售出超过23.2万辆超3.5吨的零排放卡车（EV Volumes, 2021）。此外，中国还以全球41%和98%的份额在零排放乘用车和客车市场处于领先地位。尽管中国占据主导地位，但中国设定的目标低估了自身的能力。尽管针对零排放卡车和客车有大力度的财政补贴，但截至2021年，中国尚没有宣布国家层面的零排放卡车或客车的目标或法规 （IEA, 2021c）。相比之下，在荷兰和CALSTART领导下的15个国家和地区联盟签署了全球谅解备忘录（Global MOU）[3]，设定了到2040年实现100%零排放卡车和客车销售的目标，以及到2030年实现零排放卡车和客车销售占比达30%的中期目标。同样，占美国中重型卡车市场总量34%的18个州（包含华盛顿特区）[4]签署了一份谅解备忘录，承诺到2050年实现零排放卡车和客车销售占比达到100%。这些州有一部分通过了法规，要求从2024年开始，逐步提高零排放中重型卡车和客车销售的份额，最终到2035年达到40-75%的水平。

本报告旨在鼓励和告知中国决策者关于零排放卡车技术能力和经济可行性的情况，以加速其商业化。通过介绍美国和欧洲零排放卡车市场背景并分析零排放卡车运营车辆数据，本报告旨在更全面地介绍零排放卡车在全球其他领先先进汽车市场的采用情况和政策。本报告分为三个大部分：一是美国和欧洲的市场背景，二是美国和欧洲的汽车数据分析，三是对中国的政策建议。第一部分介绍了在美国和欧洲的零排放卡车市场概况，并提供了这些市场的各自独特的发展背景。第二部分对最新、最先进的零排放卡车试点项目的运营数据进行了深入分析。最后一部分基于市场背景和数据分析，就加快部署零排放卡车的政策与途径，为中国提供了进一步指引。

3 奥地利、加拿大、智利、丹麦、芬兰、卢森堡、荷兰、新西兰、挪威、苏格兰、瑞士、土耳其、英国、乌拉圭和威尔士。

4 加利福尼亚州、科罗拉多州、康涅狄格州、夏威夷州、缅因州、马里兰州、马萨诸塞州、内华达州、新泽西州、纽约州、北卡罗来纳州、俄勒冈州、宾夕法尼亚州、罗德岛州、佛蒙特州、弗吉尼亚州、华盛顿州和华盛顿特区。

2

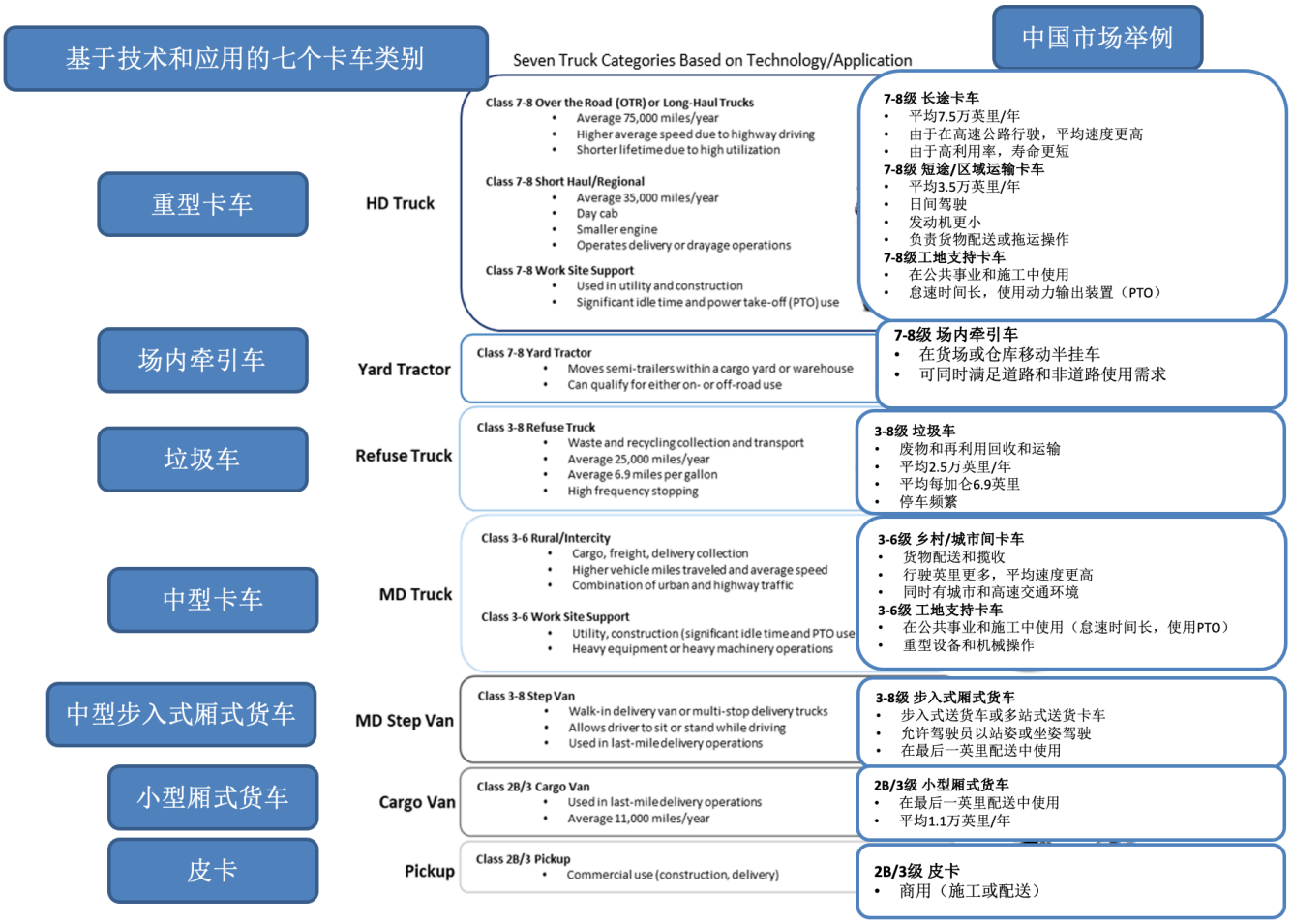
车辆分类

车辆分类对于了解不同车辆类别的现状以及全球市场的技术成熟度非常重要。虽然有很多方法可以按不同的具体程度对车辆进行分类，但本报告在提及美国和欧洲MHDVs时，大多使用的是基于车型的八个类别划分，这是全球MHDV市场惯用的分类方式：重型卡车（美国7/8级）、中型卡车（美国4-6级），中型步入式厢式货车（medium-duty step vans，美国3-6级）、公交客车（美国3-8级）、场内牵引车（美国7/8级）、小型厢式货车（美国2b/3级）、皮卡（美国2b/3级）和垃圾车（美国3-8级）。这些类别所代表的车辆类型可以跨越一系列重量等级和职业用途。由于本报告聚焦在卡车领域，我们移除了公交客车的类别，保留了其余七个卡车类别及其在中国市场上的职业用途和示例（图2）。这种分类方法基于更新后的加州混合动力和高效先进卡车研究中心（CalHEAT)[5]方法以及CALSTART的Beachhead Theory of Change。[6]

5 CalHEAT是2010年由加州能源委员会设立的，并由CALSTART运营的一个项目，目的是研究、规划并支持卡车技术的商业化和演示，将帮助加州实现至2050年的环境政策。https://calstart.org/wp-content/uploads/2018/10/CalHEAT-Roadmap.pdf

6 https://globaldrivetozero.org/public/The_Beachhead_Model.pdf

图 2 基于技术和应用的卡车车辆分类



下面的表1可以从重量等级的角度帮助读者理解美国和中国市场之间的相似性和差异。

表 1： 中美相对应的重量等级比较

<table>
<tr><th></th><th colspan="3">美国</th><th colspan="2">中国</th></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td>卡车</td><td>牵引车</td></tr>
<tr><td></td><td>重量（磅）</td><td>级别</td><td>重量（吨-公斤）</td><td>重量（吨-公斤）</td><td>重量（吨-公斤）</td></tr>
<tr><td>较轻的重型车
LHDV</td><td>8,501 - 10,000</td><td>2b</td><td>3.86 - 4.54</td><td>3.5 - 4.5</td><td rowspan="6">3.5 - 18</td></tr>
<tr><td rowspan="4">中等重型车
MHDV</td><td>10,001 - 14,000</td><td>3</td><td>4.54 - 6.35</td><td>4.5 - 5.5</td></tr>
<tr><td>14,001 - 16,000</td><td>4</td><td>6.35 - 7.26</td><td>5.5 - 7</td></tr>
<tr><td>16,001 - 19,500</td><td>5</td><td>7.26 - 8.85</td><td>7 - 8.5</td></tr>
<tr><td>19,501 - 26,000</td><td>6</td><td>8.85 - 11.79</td><td>8.5 - 10.5</td></tr>
<tr><td rowspan="6">较重的重型车
HHDV</td><td>26,001 - 33,000</td><td>7</td><td>11.79 - 14.97</td><td>10.5 - 12.5</td></tr>
<tr><td rowspan="3">33,001 - 60,000</td><td rowspan="3">8a</td><td rowspan="3">14.97 - 27.22</td><td>12.5 - 16</td></tr>
<tr><td>16 - 20</td><td rowspan="2">18 - 27</td></tr>
<tr><td>20 - 25</td></tr>
<tr><td rowspan="5">60001及以上</td><td rowspan="5">8b</td><td rowspan="5">> 27.7</td><td>25 - 31</td><td>27 - 35</td></tr>
<tr><td rowspan="4">> 31</td><td>35 - 40</td></tr>
<tr><td>40 - 43</td></tr>
<tr><td>43 - 46</td></tr>
<tr><td>46 - 49</td></tr>
<tr><td colspan="5">> 49</td></tr>
</table>

由于大多数国家的车辆数据仅按品牌提供而不是按车型提供，因此我们可基于上述七个卡车类别进行更全面的同类别跨区域分析。作为参考，如图3所示，本系列报告的另一分析报告《中国零排放中型和重型车的技术及商业化路径》结合了中国市场的车辆分类情况，帮助读者加深对特定车型的职业用途的了解。虽然主要是命名问题，自卸车(dump trucks)和多用途卡车(utility trucks)是在中国市场重要的细分类别，但在美国却不那么突出。在美国，这些车辆被归为跨越多个用途的不同类别。下面的图3展示了根据中国市场现状对卡车类别进行的归纳总结，并附有八个细分类别各自对应的指示性车型及其属性。

图 3 ：面向中国市场的MHDVs分类



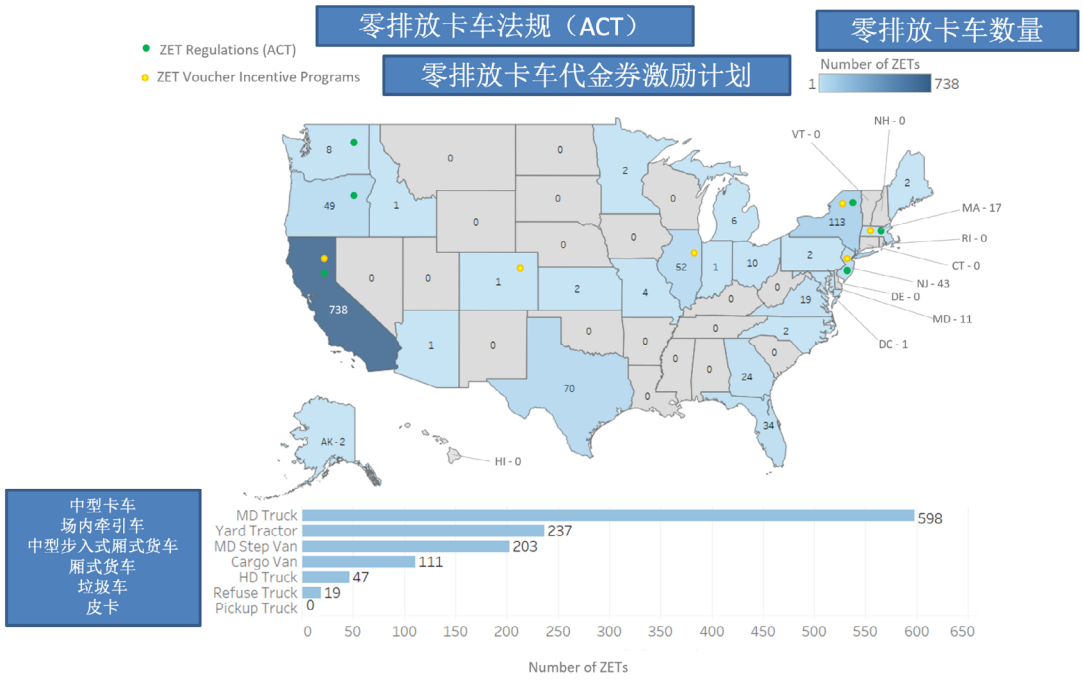
3

美国和欧洲零排放卡车市场背景

3.1. 美国零排放卡车市场背景

截至2021年，美国已经配置了1215辆零排放卡车，其中大部分是纯电动（99.5%），且大部分在加州（60.7%）（CALSTART, 2022）。图4展示了这些零排放卡车在美国的位置以及车辆类别细分。

图 4：按美国各州划分的零排放卡车采用情况（2011-2021年）

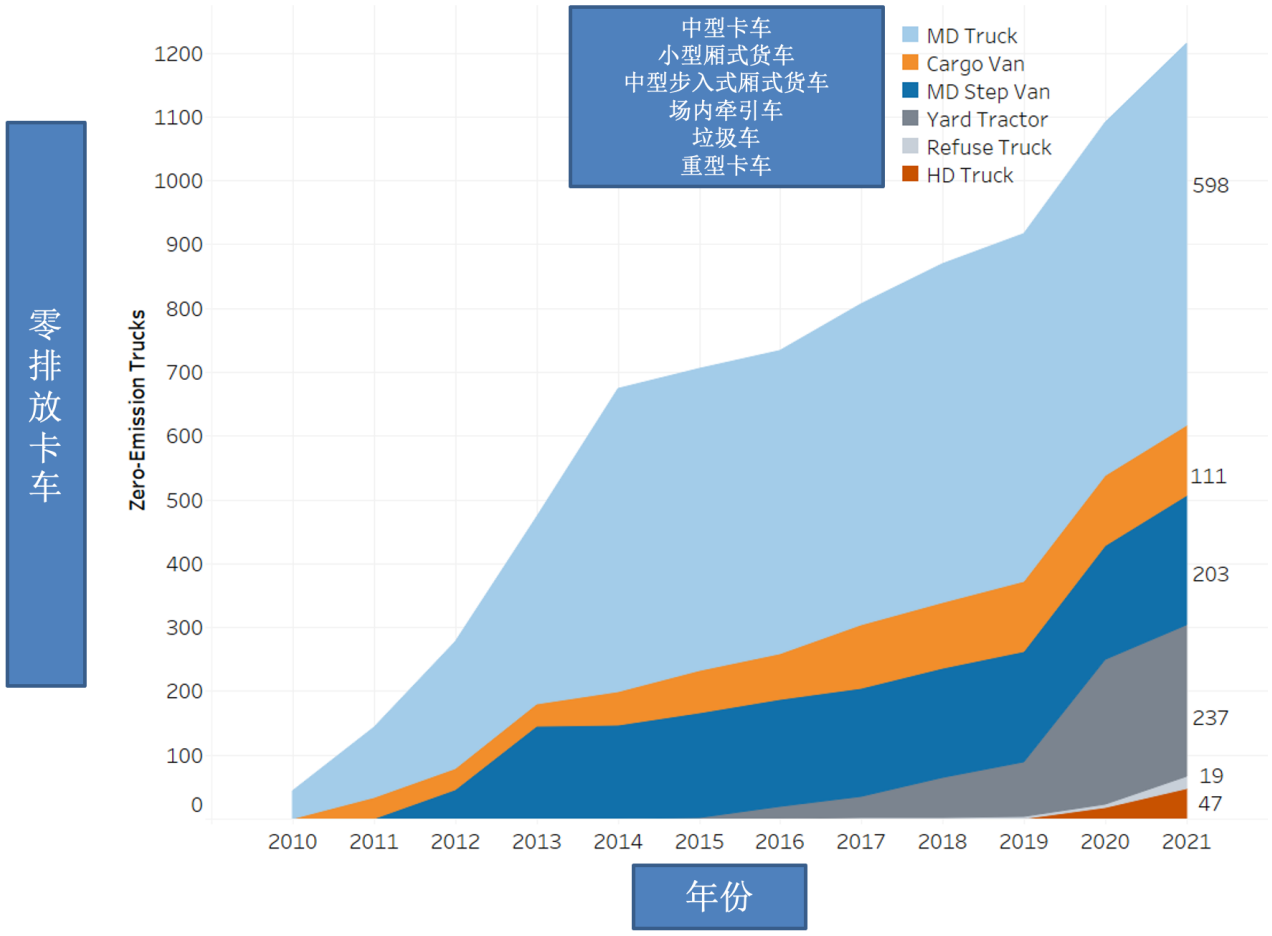


由于美国所有零排放卡车类别尚未与柴油卡车达到拥有总成本（TCO）平价，零排放卡车的采用集中在可以提供显著货币性激励政策、能够显著降低前期购置价格的州。加利福尼亚州、伊利诺伊州、纽约州、新泽西州和马萨诸塞州都有大力度的零排放卡车代金券激励计划，因此也有最大量的零排放卡车在这些州投入使用。加州推行了混合动力及零

排放卡车和客车代金券激励计划 （HVIP）和清洁非道路设备（CORE）代金券计划，在2021年共资助8.73亿美元，约等同于2013-2020年用于重型道路和非道路车辆激励计划的8.81亿美元（CARB，2021c；CARB，2020a）。在所有的激励计划中，加州HVIP计划帮助了全国最多的车辆投入使用，占加州零排放卡车的61%和全美零排放卡车的37%。

迄今为止，零排放卡车在美国的采用很大程度上符合由CALSTART和CARB创立的Beachhead Theory of Change（又简称Beachhead Strategy）理论，它预测了零排放技术将如何在中重型车辆的各个类别中普及（CALSTART，2020）。根据清洁运输行业广泛认可的Beachhead Strategy，更适合零排放车辆应用场景和行驶周期需求的车型会率先进行转型，并通过技术转移影响应用场景较难电动化的车辆类型，促进其随后得到发展。在图5中可以看到Beachhead Strategy正在逐步实现：在2010年至2015年期间，非常适合电动传动系统和电池技术的车辆类型，如中型卡车、小型厢式货车、中型步入式厢式货车等率先实现了电动化，并带动了从2019年开始的重型卡车和垃圾车（refuse trucks）等更难电动化车辆类型的发展。

图 5：近年来美国零排放卡车采用变化



随着越来越多的州采取监管和激励计划，预计零排放卡车的分布将在美国各地实现平衡，并实现数量的大幅上升。短期来看，HVIP预计将在未来18个月内为1200个零排放卡车订单提供优惠，这将会使美国零排放卡车使用数量增加一

倍。。[7]目前合计超过14万辆零排放卡车的非约束性订单，预计将在未来1-10年内交付，实际时间取决于制造商的产能和订单规模。此外，如果所有签署了多州谅解备忘录的州都达到了他们的目标，在2024年至2035年期间将有大约75.6万辆零排放卡车投入使用（约占美国注册的在用MHD卡车总数的3%）。大多数服务美国市场的主要制造商（OEMs）都承诺生产零排放汽车，如果它们所有的承诺都最终达成，到2035年，年卡车销量的35%将为零排放卡车。

美国的零排放卡车市场主要由完全依赖静态导电电缆充电的纯电动货运卡车（BETs）构成。截至2022年，尚没有制造商推出有换电（battery swapping）、无线充电或受电弓充电（pantograph charging）能力的纯电动货运卡车车型。2018年，西门子与一家加州当地空气质量机构试点了三个电动和混合电动重型卡车，这些卡车改装有主动受电弓充电功能，可在加州配备架空悬链电缆的一英里的道路上充电。然而自此之后，美国再没有其他用于商用目的的“电动高速公路（eHighways）”试点或开发。

美国大多数充电解决方案围绕着基地充电（能够在1到10小时内完成纯电动货运卡车充电）和/或途中大功率“兆瓦”充电，该技术目前仍在开发中。2022年，加州能源委员会在加州启动了一个项目，旨在试点两个第一批“兆瓦”拖车（drayage trucks）充电站，并为加州高速充电走廊奠定基础。戴姆勒卡车北美公司（Daimler Truck North America）、NextEra Energy Resources和贝莱德可再生能源公司（BlackRock Renewable Power）宣布了一项谅解备忘录，目的是成立合资公司并投资6.5亿美元用于建设美国中重型纯电动和氢燃料电池汽车的高性能充电网络（Daimler Truck, 2022）。

在美国，一些私人组织测试了换电模式在轻型车辆领域的应用，然而，尚未有该技术在零排放卡车领域应用的试点或演示。换电模式的好处包括更快的充电时间（refueling times）、降低车队的电池使用成本（进而降低前期零排放卡车价格）、以及为电网提供储能服务的可能性。换电模式的缺点包括换电站需要复杂的机器人系统以及复杂的物流来匹配电池供应和需求，由换电站承担昂贵的电池成本，以及美国汽车制造商（OEMs）之间在生产标准化的换电系统时需要进行的前所未有的协调工作。随着纯电动货运卡车电池技术不断革新、大功率充电站更加普及，换电需求不太可能成为美国主导的充电策略。

使得换电模式在美国发展受限的技术和经济条件不一定适用于中国。在中国，大多数主要的电动卡车制造商已经官宣了换电模式零排放卡车车型（Liu & Danilovic,2021）。更低的劳动力成本，显著的电子制造能力，以及制造商之间的更好协调可能意味着换电模式将在中国重型卡车零排放中扮演更重要的角色。

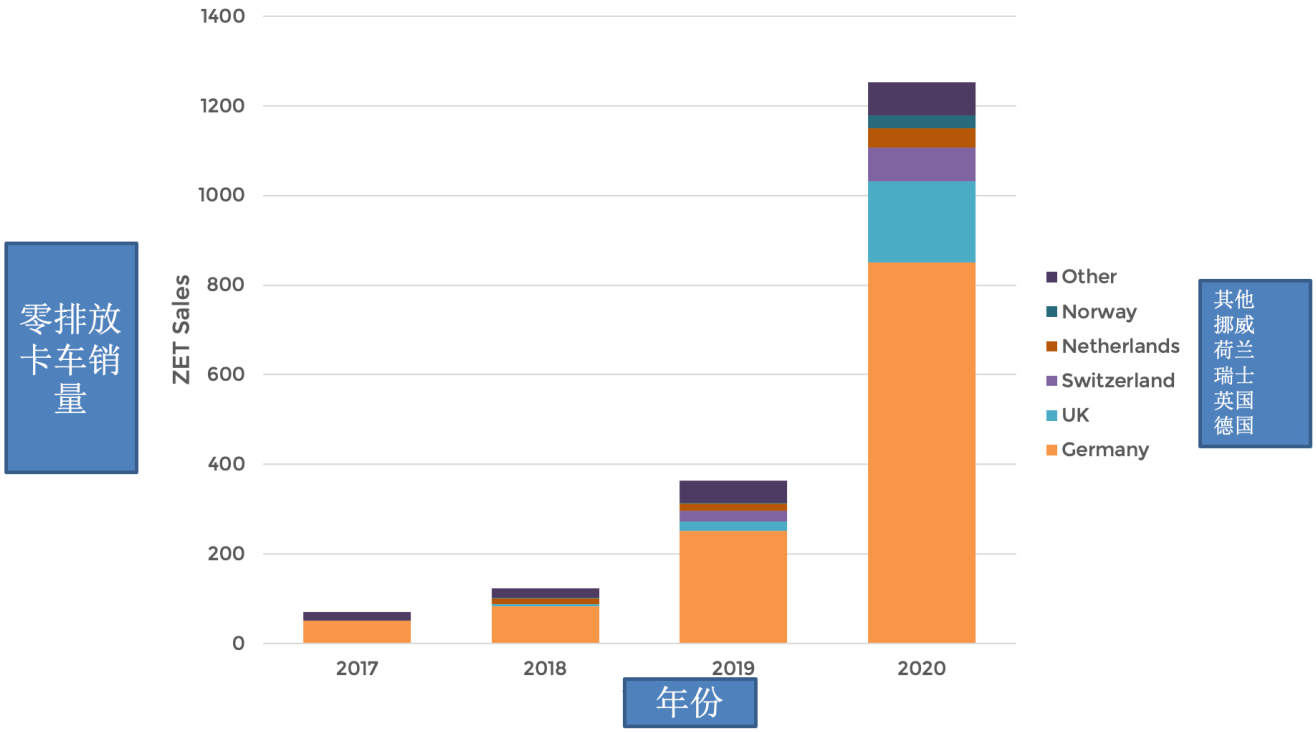
3.2. 欧洲零排放卡车市场背景

自2017年以来，整个欧洲地区[8]已采用了超过2,300个中重型零排放卡车。在零排放卡车采用方面，领先的国家包括德国（56%）、英国（9%）、瑞士（7%）、荷兰（4%）和挪威（3%），如图6所示。

7 订单不具约束力，买方或制造商可取消订单。

8 包括欧盟、欧洲自由贸易协会（European Free Trade Association）和英国

图 6：按国家划分的欧洲零排放卡车销售额（2017-2020年）



在欧洲的零排放卡车中，56%是中型卡车（美国Class 2b-6），44%是重型卡车（美国Class 7-8）。德国、英国和荷兰在城市物流应用的大多是中型扶桑（Fuso）eCanter卡车（图7）。瑞士在区域分销中配置了很大比例的现代（Hyundai）XCIENT燃料电池货运卡车（FCETs），而挪威在物流和施工中使用了很高比例的沃尔沃FE&FL电动重型卡车（美国7级）。

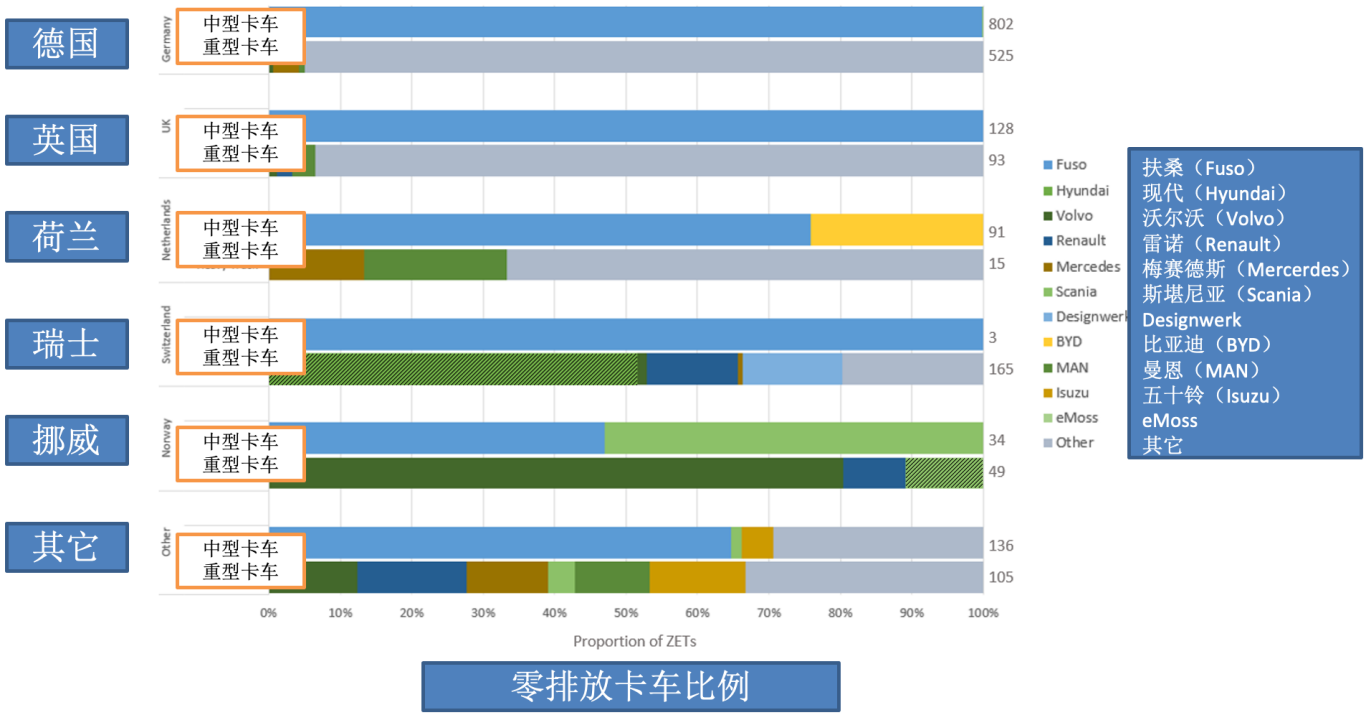
图 7：物流公司DB Shenker使用的扶桑eCanter卡车，瑞士的现代XCIENT重型卡车，以及奥斯陆的沃尔沃FE重型卡车（从左到右）



这些国家的零排放卡车配置是由大型物流公司的采购推动的，并得到了零排放卡车激励措施和创新融资模式的支持。例如，德国物流公司DB Shenker，采购了36辆电动扶桑eCanter卡车，已在11个欧洲城市使用，该公司还计划从瑞典制造商Volta Trucks处订购近1500辆零排放卡车。而挪威食品批发商ASKO采用了16辆斯堪尼亚（Scania）P系列

重型卡车并计划继续接收59辆该车型。这些采购部分得到了英国、德国和荷兰提供的零排放卡车经济激励措施的支持（OZEV，2021；FMDT，2021；City of Amsterdam, 2021）。另一方面，瑞士通过现代和瑞士H2 Energy公司的合资公司，向超过25家从事物流、分销和超市配送业务的瑞士企业部署了81辆重型燃料电池货运卡车（FCETs），该合资公司将车辆以按次付费的模式租赁给运营方，并提供氢气供应。

图8：零排放卡车在欧洲领先国家的销售量（按重量等级和品牌分类）



欧洲已有9个国家和地区签署了全球谅解备忘录，承诺到2040年，零排放卡车的销量将达到100%。如果所有这些承诺都得以实现，基于2021年卡车销量和货运需求增长预测，这将意味着到2050年，这些国家每年将销售6.5万至19.5万辆零排放卡车。欧洲汽车制造商协会估计，到2025年，欧洲将有4万辆中重型纯电动货运卡车投入运行，到2030年将增长至27万辆（ACEA，2021）。

由于欧洲各个国家政策和战略的多样性，零排放卡车充电技术在欧洲的同质性低于美国。目前考虑的充电策略主要围绕静态导电电缆，此外也包括一些道路和头顶导电和感应充电公路。沃尔沃（Volvo）、戴姆勒和Traton计划到2022年为欧洲纯电动货运卡车安装1700个大功率充电站，耗资约为5亿欧元。与此同时，德国已经在法兰克福附近的一个架空悬链线试验项目中试点了7辆配备受电弓的斯堪尼亚重型零排放卡车。同样，瑞典已经试点了两个基于嵌入路面的导电轨道的电力公路项目，其中一个采用导电架空悬链线，另一个则采用嵌入在路面下的感应充电技术。由于与美国类似的原因，换电模式在欧洲并没有引起太多关注。

4

欧美技术和经济可行性分析

与传统燃油卡车相比，零排放卡车的经济可行性以及其完成相同运输任务的技术能力，是衡量零排放卡车在美国和欧洲走向全面采用进程的两项最重要的指标。

纯电动货运卡车（美国和欧洲采用的绝大多数零排放卡车类型）在当前条件下只有通过财政激励才能实现经济可行，但预计在2025-2035年的时间区间内能够实现所有卡车类别无财政激励下的拥有总成本（TCO）平价。虽然零排放卡车在运营和维护成本方面相较于柴油车有显著成本优势，但是高昂的初始投资仍阻碍纯电动货运卡车的大规模扩张。这就证明了监管在提供市场明确性方面的作用，以及鼓励尽早引入监管方面的作用。在强有力的监管和有针对性的激励措施作用下，前期高昂的资本投入形成的壁垒将会随着技术不断成熟和电池成本不断下降而逐渐降低。卡车的能源效率、行驶周期（duty cycles）和充电管理，也会通过影响运营成本进而对纯电动货运卡车的拥有总成本产生显著影响。考虑上述所有方面，在2030年之前，纯电动货运卡车预计将在所有卡车类别上与传统燃油卡车具有相同竞争力。

纯电动货运卡车在技术能力方面总体表现良好。我们评估了几种不同来源的技术数据，包括制造商引用的数据，还有在不同气候、地形、行驶速度、拥堵情况和停车频率的组合下获取的实测性能数据。制造商目前的标称续航里程和电池容量足以满足城市使用，并迅速接近传统燃油车的续航里程。与目前获得的中国车型数据相比，欧美现有的零排放卡车车型在中型卡车和厢式货车上提供相似的而在重型卡车上提供更高的标称续航里程。纯电动货运卡车的电池容量增大能有效提高行驶里程，但同时也会增加自重和限制货运的有效载荷能力。纯电动车型标识的有效载荷能力在各车辆类别上与内燃机同类车相媲美。尽管在以上技术评测中表现良好，我们应该意识到，由于当前供应链的复杂动态，一些已经官宣的高端车型不一定很快就能投产。

在执行常规行驶周期时，纯电动的场内牵引车、中型卡车、中型步入式厢式货车和厢式货车与传统燃油车相比性能相似。纯电动的重型卡车类别的测试车型可以很好地完成通常只需要一个班次、每天行驶不超过200英里（322公里）的局域性的行驶周期任务，但如果存在动态和不可预测的路线、更长的路线、更长的等待时间，或者驾驶员没有每天返回基地充电时，纯电动重型卡车目前仍存在挑战。

电动汽车公认的优势是其更好的能源效率，约是柴油卡车效率的2至4倍。美国纯电动的场内牵引车和重型箱式卡车的中位能效分别为2.62 千瓦时/英里（14.5 MPGe）和2.17 千瓦时/英里（17.6 MPGe），然而在大多数情况下，其实际能效表现往往低于标称能效，但仍然是柴油同类车的大约2倍（6.5-8 MPG）。重型日间驾驶牵引车（day cab tractors）和中型步入式厢式货车表现相对较好，中位能效分别为1.95 千瓦时/英里（19.5 MPGe）和1.12 千瓦时/英里（34 MPGe），相当于柴油卡车能效的3至4倍（6.5 MPG和9 MPG）。此外，以场内牵引车为例，研究发现较低的能源效率与较低的环境温度有关。与美国西海岸相比，东北部和中西部地区受温度的影响更为明显，这可能是因为这两个地区的季节间变化更大且冬季温度更低。

4.1. 数据来源

技术和经济可行性分析的数据主要来自美国和欧洲的真实零排放卡车演示和试点。虽然目前数据有限，但实测数据比铭牌或制造商引用的数据仍具有优势，因为它更贴近中重型零排放卡车在实际运营的技术和经济方面的真实表现。

美国市场的数据来自CALSTART执行的数据收集以及示范项目，例如由美国能源部（DOE）资助的车辆性能实测数据收集，由加州空气资源委员会（CARB）资助的沃尔沃Low Impact Green Heavy Transport Solutions（LIGHTS）项目的零排放卡车性能数据。美国、欧洲和中国的车辆技术配置数据由CALSTART开发的Zero-Emission Technology Inventory（ZETI）收集。尽管ZETI在全球范围内的车型覆盖率非常高，我们还是需要指出，验证和更新其除北美以外的车型的难度会相对更大。因此，一些观测结果可能无法全面准确地反映零排放卡车在中国或欧洲市场的情况。

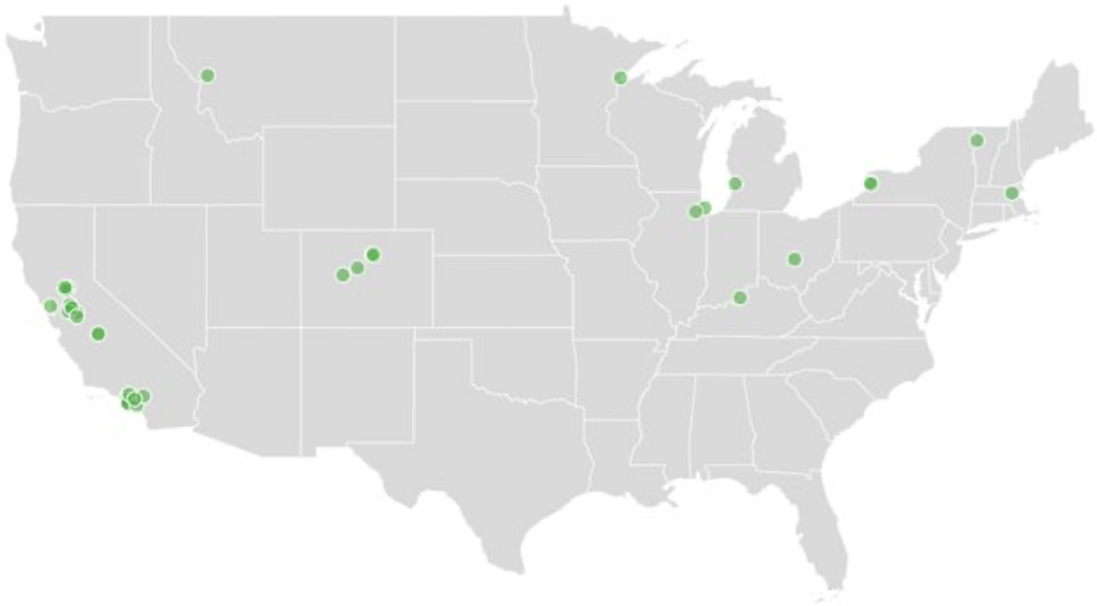
表2汇总了本报告的主要数据来源。其他过往项目或研究的数据来源如未在下面列出，将在报告相对应位置分别引用。

表 2： 零排放卡车实测数据源汇总表

车辆类别	重量等级	车辆数量	项目	时间	市场
重型场内牵引车	美国7/8级	7	ZETI	2019 - 2024	全球
重型卡车	美国8级	73	ZETI	2019 - 2024	全球
中型卡车	美国3-6级	112	ZETI	2019 - 2024	全球
中型厢式货车	美国2b-6级	42	ZETI	2019 - 2024	全球
中型步入式厢式货车	美国2b-6级	27	ZETI	2019 - 2024	全球
重型场内牵引车	美国7/8级	25	美国能源部中重型电动汽车数据收集	2020 - 2021	美国
重型卡车	美国8级	19	美国能源部中重型电动汽车数据收集	2018, 2019, 2021	美国
中型步入式厢式货车	美国2b-6级	5	美国能源部中重型电动汽车数据收集	2019	美国

纯电动和燃料电池都是满足零排放卡车不同使用场景的重要技术。然而，由于目前燃料电池电动车的在用运营和数据收集都较匮乏，本研究将重点放在纯电动货运卡车类别。一项由美国能源部资助的且正在进行中的数据收集项目，将建立起美国首个且迄今最大的有关零排放卡车及其设施的实测性能、充电和维护的数据库，来自美国全国324辆中重型电动车辆已确认参与数据分享（图9）。尽管新冠疫情对车辆运营和数据收集工作带来一些挑战，但随着运营恢复和数据增加，我们预计将大幅扩展我们的数据库以覆盖更多车辆类别，并通过分析更好地了解它们在各种情况下的真实性能。

图 9：美国能源部数据收集项目的MHDEV采用地图



4.2. 技术能力

市面上中重型零排放卡车是否有能力完成现有的行驶周期是车队决定是否从内燃机（ICE）卡车转换到零排放卡车的一个关键的考虑因素。至关重要的是，技术能力的检验不仅依赖于制造商所提供的车辆规格信息，还依赖于在不同气候、地形、驾驶速度、拥堵和停车频率等情景下收集的真实性能数据。

技术能力分析包括五个维度：标称续航里程（nominal range）、电池容量、载重能力（payload capacity）、行驶周期和能源效率。以下分析以纯电动货运卡车（BET）车型为分析对象。在所分析的车辆类型中，纯电动货运卡车的总体技术能力非常有前景：

- 标称续航里程：目前美国和欧洲的大多数重型电动卡车的标称续航里程在200公里至500公里之间，而特斯拉（Tesla）宣称其续航里程可达800公里。作为参考，大多数柴油8级半挂车（semi-trucks）的续航里程在1600至3200公里之间。然而货运卡车运行的受限因素往往不是行驶里程，而是驾驶时长。该限制要求司机在连续驾驶9至11小时后必须停车休息，那么按平均行驶速度测算，续航里程为950公里至1100公里即可满足运行需求（FMCSA, 2015; EU, 2006）。在有数据的情况下，与中国的车型相比，美国和欧洲现有的零排放卡车车型可以在中型卡车和厢式货车方面实现相近的标称续航里程，而在重型卡车方面可提供更高的标称续航里程。
- 电池容量：美国和欧洲中型纯电动货运卡车（BETs）的电池容量相近，平均约150至200千瓦时，反映了它们的续航里程要求较低且主要在城市应用。美国和欧洲重型卡车的电池容量大多在300至400千瓦时之间，但在已官宣的车型中，有的电池容量高达1000千瓦时。美国和欧洲的纯电动货运卡车车型的电池容量选择比中国的多，且一些汽车制造商提供了比中国市场现有车型更为先进的配置。
- 载重能力：经过真实环境下的行驶周期和驾驶条件试点，证明美国纯电动货运卡车在研究涉及的四种车辆类别（重型卡车、中型卡车、中型步入式厢式货车和中型厢式货车）中具有与同类型内燃机卡车相似的估计载重能

力，可以满足运营要求。

- 行驶周期：在执行常规行驶周期时，纯电动的场内牵引车、中型卡车、中型步入式厢式货车和小型厢式货车的性能与同类型内燃机车辆相当。测试的纯电动重型卡车车型可以在通常只需要一个班次、每天行驶不超过200英里（322公里）的局域性行驶周期内很好地执行工作。然而，如果行驶路线难以固定或有经常性的变动，路程或等待时间过长、或者驾驶员无法每天返回基地为卡车充电，纯电动车型执行工作就会存在挑战。
- 真实能源效率：美国纯电动的场内牵引车和重型箱式卡车的中位能效分别为2.62 千瓦时/英里和2.17 千瓦时/英里，而其实际能效表现往往低于标称能效。重型日间驾驶牵引车和中型步入式厢式货车表现相对较好，平均能效分别为1.95 千瓦时/英里和1.12 千瓦时/英里。此外，根据初步的回归分析，场内牵引车较低的能源效率与较低的环境温度有关。与美国西海岸相比，东北部和中西部地区受温度的影响更为明显，这可能是因为这两个地区的季节间变化更大且冬季温度更低。

持续进行的真实环境数据收集将进一步加强对纯电动货运卡车车型产品的技术能力的理解。

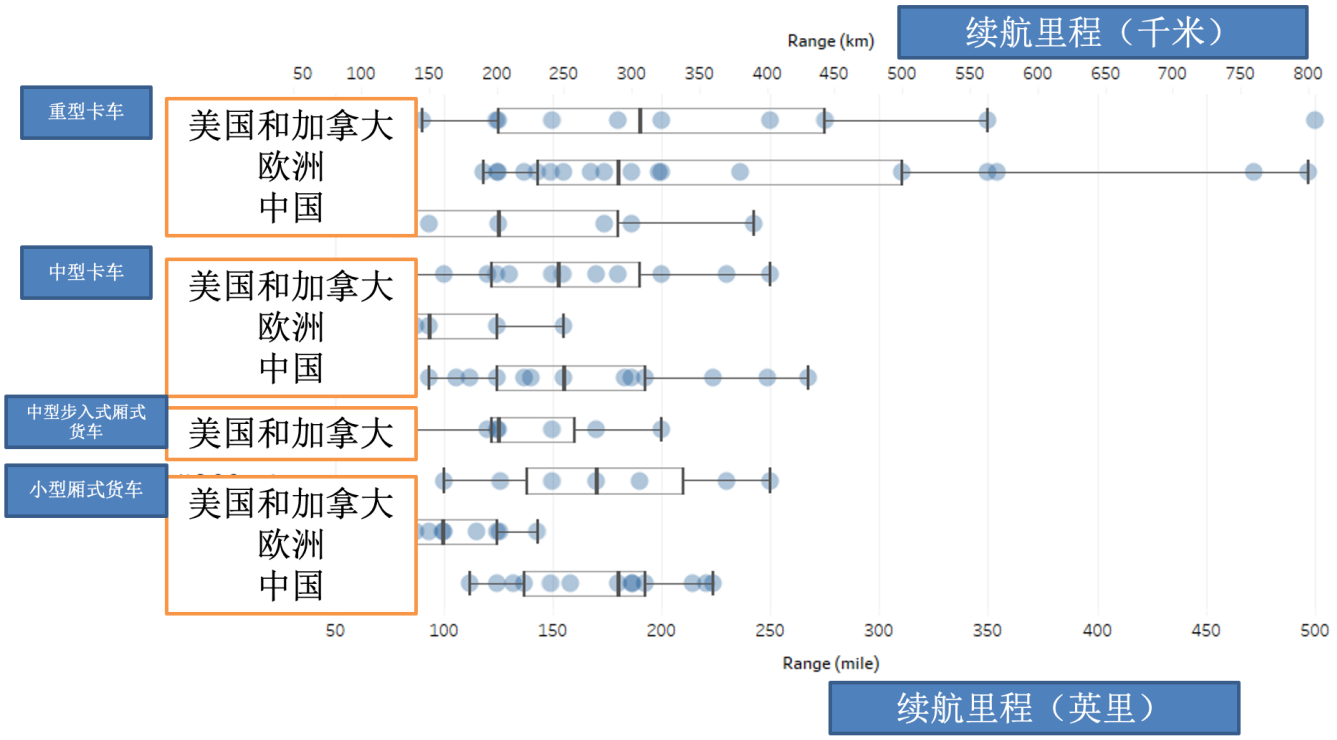
4.2.1. 标称续航里程（NOMINAL RANGES）

本节中分析的标称续航里程是指从制造商和其他可靠来源处收集的车型的电池续航里程配置。CALSTART会定期添加并审查ZETI数据库的纯电动货运卡车车型的信息，该数据库目前已涵盖到2024年推出的车型。下方图10显示了截至2022年，美国、欧洲和中国的按车辆类型划分的卡车标称续航里程。它可用于检验这些车型在中国纯电动货运卡车市场的技术竞争力。虽然美国、欧洲和中国的中型卡车续航里程基本相似，但美国和欧洲重型卡车的平均续航里程均优于中国。

美国重型卡车在电池续航里程方面差异较大，包括能够一次充电行驶275英里（443公里）的沃尔沃车型，行驶350英里（563公里）的Nikola车型，和行驶500英里（805公里）的特斯拉车型。除了在美国市场已有的车型，电动卡车品牌Futuricum预计将在2022年在欧洲推出续航里程高达472英里（760公里）的车型。然而，在中型卡车和厢式货车领域，中国的标称续航里程与美国车型相似或略好，而且中美车型似乎都优于欧洲的车型。

总之，我们可以有把握地得出结论，美国和欧洲的中型纯电动货运卡车的标称续航里程可以达到与中国现有车型相近的标称续航里程，而美国和欧洲的重型纯电动货运卡车在续航里程超过310英里（500公里）的车型上有更多的选择。当这些更高续航里程的车型进入市场时，车队可以更有信心地在短途和长途行驶周期中以纯电动车型取代内燃机卡车。

图 10：美国和加拿大，欧洲以及中国按车辆类别划分的续航里程（2019-2022年）



关于如何阅读箱线图的说明：箱线图中的垂直线，从左到右，分别代表卡车续航里程的最小值、25%分位值、中位值、75%分位值和最大值。每个卡车车型在图表中显示为一个蓝点，其中点的不透明度表示多个车型在一定续航里程水平上的重叠。使用1.5*四分位数（IQR）方法，超过最大或最小标线的点被识别为异常值。

4.2.2. 电池容量

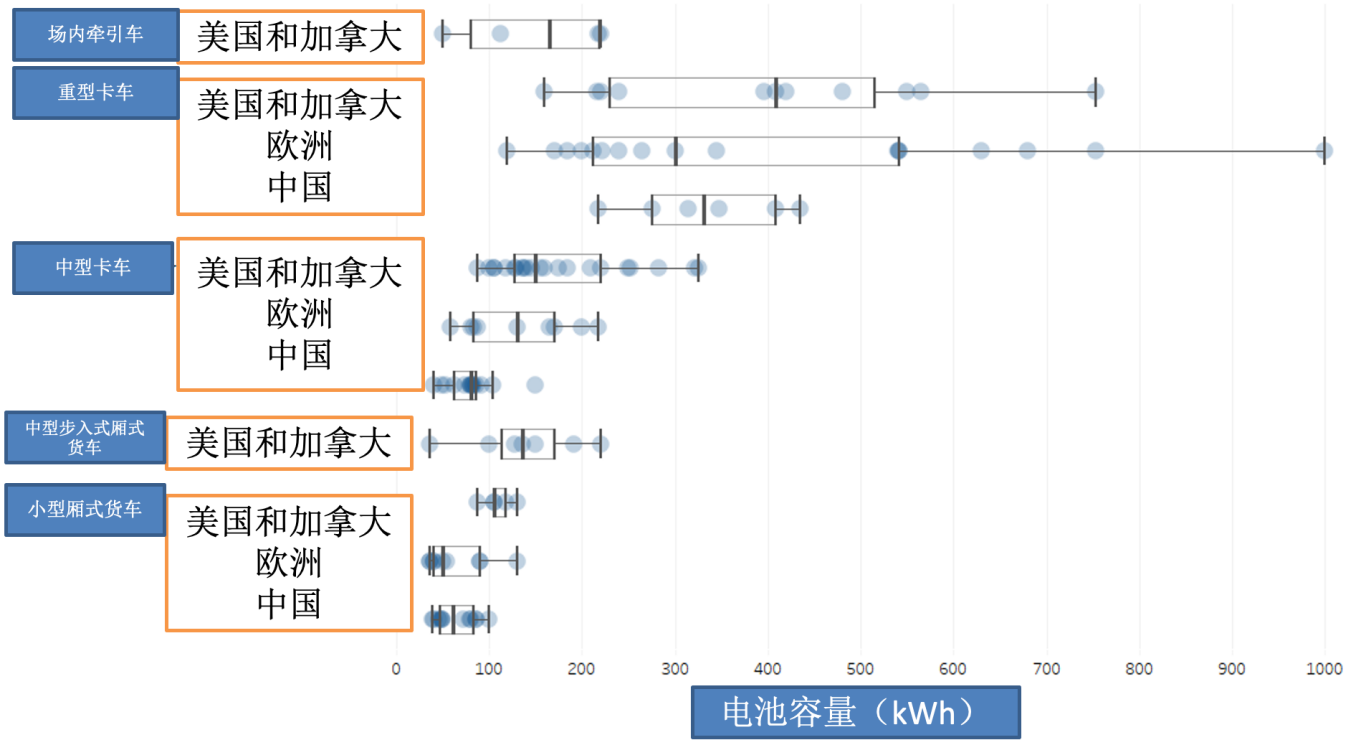
当评估技术能力时，以千瓦时衡量的电池容量是反应纯电动货运卡车能量存储的一个关键指标。电池组中存储的能量直接影响卡车行驶里程，特别是当长途运行充电机会很少时，其对行驶里程的影响更大。更大尺寸的电池可以延长电池续航里程，但如果车辆总重量等级（GVWR）保持不变，大尺寸电池可能会增加汽车整备重量（curb weight）并限制载重能力。这就需要改进电池技术，以逐渐增加能量密度来降低其对载量的影响。

在图11中，我们比较了整个美国、欧洲和中国的纯电动货运卡车电池容量。对于场内牵引车，现有型号的电池容量续航里程比其他车辆类型低，在50到220千瓦时之间，但由于这些非道路牵引车在场地内部或相邻场地之间运行，它们可以很容易地在换班期间找到充电机会。对于重型卡车，与有数据的中国车型相比，美国和欧洲车型的电池容量分布区间更广。汽车制造商已经宣布在美国和欧洲推出了一系列高容量电池，包括特斯拉（1000千瓦时），Nikola（753千瓦时）和Futuricum（680千瓦时）。在中型卡车领域，美国和欧洲都提供了更多的规格选择和整体更高的电池容量。作为该领域的佼佼者，Freightliner、International、Peterbilt和Kenworth的电池规格分部在282千瓦时到325千瓦时之间。对于厢式货车，美国现有的电池容量一般高于中国的电池容量，而后者的两个车型集群的电池容量分别分布

在约45千瓦时和80千瓦时的区域。欧洲也有车型配置有45千瓦时的电池容量，但也有更高可达130千瓦时的配置。

总之，基于当前ZETI的数据，同车辆类型的跨地区比较表明美国和欧洲的车型有更多种类的电池容量，而且一些欧美汽车制造商在重型卡车和中型卡车类别提供最先进的配置，这在中国目前是没有的。

图 11 美国和加拿大，欧洲以及中国按车辆类别划分的卡车电池容量（2019-2022）



关于如何阅读箱线图的说明：箱线图中的垂直线，从左到右，分别代表电池容量的最小值、25%四分位值、中位值、75%四分位值和最大值。每个卡车车型在图表中显示为一个蓝点，其中点的不透明度表示多个车型在一定电池容量水平下的重叠。使用1.5*四分位数（IQR）方法，超过最大或最小标线的点被识别为异常值。

4.2.3. 载重能力

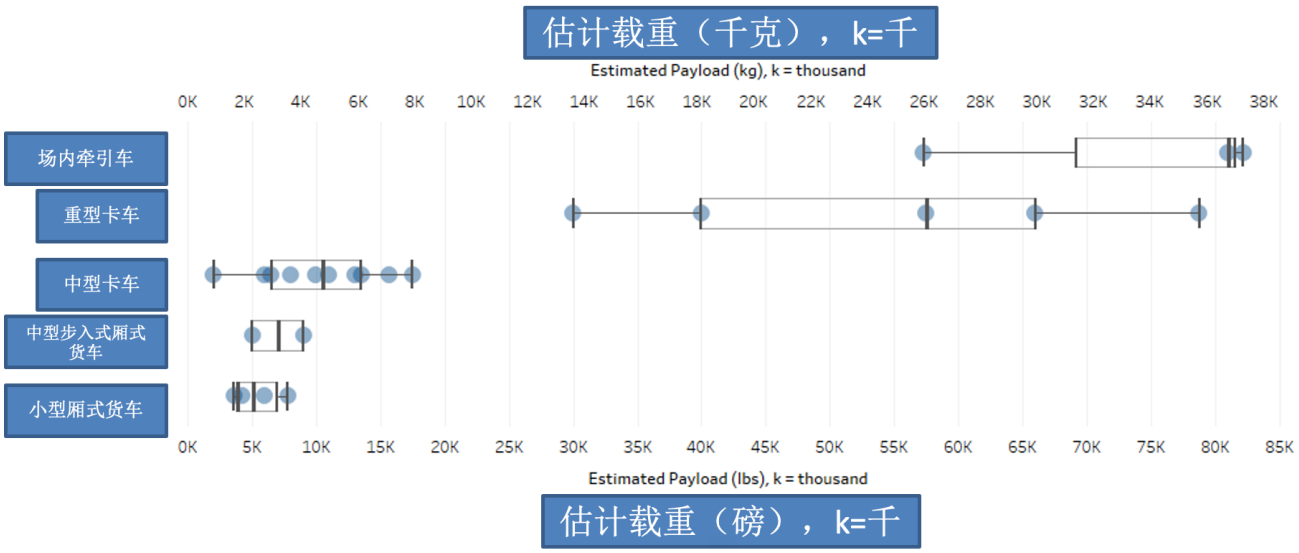
载重能力参数的重要性在于它直接影响拥有总成本（TCO）。在图12中，我们展示了美国纯电动货运卡车的载重能力。[9] 由于中重型电动车还属于新兴市场、技术发展迅速，我们声明基于ZETI数据库进行的载重能力估算不一定是最新或最全面的。然而，箱线图可以提供美国纯电动货运卡车市场现有的载重能力估算的大致情况。

根据美国基准内燃机卡车的运营要求，重型卡车的估计载重能力约需达到4万磅（18144公斤），中型卡车为最高1.5

9 大多数国家采用公制（例如公斤、米、公里），而美国采用英制（例如磅、英尺、英寸）。我们使用1公斤=2.2046磅进行转换，使公制系统中的载重能力可与美国市场上报告的载重能力相比较。

万磅（6804公斤），中型步入式厢式货车为1.008万磅（4572公斤），中型货车为4200磅（1905公斤）(NACFE, 2022a)。ZETI数据库中的大多数纯电动货运卡车车型有足够的载重能力，可以满足这四个类别对应的内燃机车型的运营要求。换言之，从载重能力的角度来评估，重型卡车、中型卡车、中型步入式厢式货车和小型厢式货车是可以电动化的。但我们应注意，由于当前供应链的复杂动态，一些汽车制造商已经官宣的高端车型不一定在未来一两年内就能投产。

图 12：美国卡车载重能力估算（2019-2022）



关于如何阅读箱线图的说明：箱线图中的垂直线，从左到右，代表了卡车估计载重能力（单位：磅）的最小值、25%四分位值、中位值、75%四分位值和最大值。每个卡车车型在图表中显示为一个蓝点，其中点的不透明度表示多个车型在一定载重能力水平下的重叠。使用1.5*四分位数（IQR）方法，超过最最大或最小标线的点被识别为异常值。

4.2.4. 行驶周期（DUTY CYCLE）

行驶周期分析主要基于美国能源部（DOE）的中重型电动车数据库，在全美范围内收集真实环境下纯电动货运卡车的性能数据。我们还总结了多个项目的主要发现，具体包括沃尔沃LIGHTS项目（2022），NACFE的Run-on-Less Electric项目（2022b），美国邮政的零排放配送卡车试点项目（2020）以及NREL的中型插电式电动配送卡车项目（2014，2016）。在执行常规行驶周期时，纯电动货运卡车（BETs）在场内牵引车、中型卡车、中型步入式厢式货车和中型厢式货车类别与燃油车性能相当。而测试的重型卡车纯电动车型可以在通常只需要一个班次、每天行驶不超过200英里（322公里）的局域性行驶周期内很好地执行工作，但是，如果存在动态和不可预测的路线、更长的路线、更长的等待时间，或者驾驶员没有每天返回基地充电时，该类别的纯电动车型执行工作会存在挑战。

美国能源部中重型电动车数据库包含来自南加州10多个车队的19辆重型卡车（其中包括14辆8级牵引车和5辆7级厢式卡车）、5辆中型步入式厢式货车的真实环境车辆性能数据。此外还包括在加利福尼亚州、伊利诺斯州、俄亥俄州和纽约州运营的25辆场内牵引车数据，可为非道路重型纯电动货运卡车提供借鉴。表3显示了美国能源部数据库中重型纯电动货运卡车的行驶周期。由于数据中有一些极高的值可能会使我们的分析产生偏差，所以我们使用中位数而不

是平均数来代表分布的集中趋势。每日运行时间是指保持汽车自钥匙插入开始的运行时间，其中包括怠速时间（idle time）。平均行驶速度的计算是用每日行驶距离除以每个车辆日（vehicle-day）的行驶时间（不包括怠速时间），也在表中用中位数表示。数据库中的重型日间驾驶牵引车（HD day cab tractors）和重型厢式卡车适用于区域性或短途拖车的行驶周期，这意味着这些卡车每天行驶最多150-200英里，然后每天返回基地。

表 3 美国能源部数据库中重型纯电动货运卡车的行驶周期

车辆类别	车辆类型	每日行驶距离中位数（MI）	每日运行时间KEY-ON TIME中位数（小时）	每日平均行驶速度中位数（每小时英里数）	行驶周期和用例
场内牵引车	场内牵引车	32	10	3	单班到多班，固定路线
重型卡车	重型日间驾驶牵引车	58	4	20	返回基地、港口拖运或区域行驶周期，固定路线
	重型箱式卡车	48	4	16	返回基地，区域行驶周期，固定路线
中型步入式厢式货车	中型步入式厢式货车	44	14	23	返回基地，在城市投递邮件或包裹，可变路线

场内牵引车：数据显示纯电动场内牵引车每天一般运行6-13个小时，最多可运行21个小时。由于场内牵引车是在场地内或临近场地之间移动货物的非道路重型车辆，它们的行驶距离和速度相对较低。每天的驾驶距离约为19-48英里，每天的平均速度约为2-7英里/小时。对于一个电动场内牵引车，它每天花在引擎空转和驾驶上的时间大致相同（各约4小时），并在换班时充电约2.5小时。[10] 车队经理对正在测试的纯电动场内牵引车的反馈比较积极。尽管最初担心车辆所需的充电频次，车队通过采用保持车辆在工作间隙插入电源充电的新做法，确保了日常运营未受充电需求影响而中断。相比柴油牵引车，纯电动场内牵引车更安静、更清洁。[11]

重型日间驾驶牵引车：该类型的纯电动车辆每天一般行驶35-91英里，持续行驶2-6小时；有记录的最远距离为每天200英里，最长运行时间接近14小时。平均速度是14-25英里/小时，在某些天可以达到60-70英里/小时。沃尔沃LIGHTS项目中的电动牵引车车型的电池续航里程为120英里，它们在不超过150英里的区域性路线上表现良好，这属于车队运行的短程路线。然而，在下一代续航里程超过300英里的纯电动货运卡车投入使用之前，现有的重型日间驾驶牵引车还无法在150-250英里的短途行驶周期下运行。这些电动牵引车必须夜间在基地充电，这使得它们每天只能执行一个班次，而内燃机牵引车则可以执行两个班次。参考图10，在重型卡车类别的所有可用或即将可用的型号中，正在测试的牵引车车型的电池续航里程较小，并且我们注意到，在最短路线上运行时它们不一定会耗尽整个续航里程，因此日运行时间和距离似乎较低。为了将电动牵引车应用于短途和长途行驶周期，可能的解决方案包括使用更快的充电设备、配备具有更高能量密度的电池，以及在有机会的时候及时充电（下称"机会充电"）。[12]

重型厢式卡车：纯电动重型厢式卡车每天一般行驶35至80英里，行驶3-7小时；最远行驶距离约为133英里，最长运行时间接近11小时。平均速度约为11-25英里/小时，最高达到60-70英里/小时。电动厢式卡车可以采用机会充电和夜间

10 数据来自沃尔沃LIGHTS数据收集项目

11 反馈来自沃尔沃LIGHTS数据收集项目

12 CALSTART, 2022. 沃尔沃LIGHTS数据收集项目

在基地充电的模式，来帮助扩大它们的日常续航里程。根据沃尔沃LIGHTS项目报告，只有一辆厢式卡车在第一周的使用中耗尽电力，影响了正常运行。在沃尔沃将可用电池容量从全部电池容量的70%提高到80%后，车队建立起了运行电动卡车的信心。[13]

中型步入式厢式货车：纯电动的中型步入式厢式货车每天一般行驶22-48英里，行驶13-15小时；有记录的最远距离为88英里，而最长运行时间超过22小时。平均速度约为20-25英里/小时，最高可达到55英里/小时。根据美国邮政的零排放配送卡车试点项目的数据（ CALSTART, 2020），这5辆步入式厢式货车由84.8千瓦时的电池供电，并且可以用2级电动车充电器充电。中型步入式厢式货车的续航里程可达75英里，大约需要10.5个小时才能完全充电。该项目的主要借鉴意义，一是大规模部署中型卡车充电基础设施可能是具有挑战性和昂贵的，需要大量的前期规划，二是在满足所需的行驶周期方面，电动包裹配送卡车可以成功地取代内燃机车。

2022年1月，Run-on-Less Electric（RoL-E）项目也公布了在美国八个州真实环境下的13辆商用纯电动货运卡车的演示结果（表4）。项目将这13辆纯电动货运卡车车型与同类别基准柴油车进行比较，以分析纯电动车能否满足常规真实环境行驶周期的要求。该项目包含的车辆类别与美国能源部数据库基本一致，包括8级场内牵引车、8级区域运输牵引车、6级中型箱式卡车、3-5级中型厢式货车以及3-5级中型步入式厢式货车。报告的结论是这些经测试的电动卡车技术已足够成熟，可以执行所有车辆类别的柴油车所对应的行驶周期和任务要求。但是当重型卡车需要完成长途或特定区域运输行驶周期时，如果有不可预测的动态路线、更长的路线、更多的等待时间且司机无法每日返回基地的情况，纯电动卡车接替燃油卡车仍具挑战（NACFE， 2022a）。长途货运卡车能否实现电动化，至少要取决于区域充电基础设施的完备性。此外，目前的估算表明重型 纯电动货运卡车的整备重量要比内燃机牵引车重3000-5000磅（1361-2268公斤），这意味着，纯电动货运卡车因为电池增加了额外的重量，除非政府能够放宽纯电动货运卡车的车辆总重量等级（GVWR）的限制，否则运输大量货物的车队就需要减轻货物的载重以确保不超出GVWR的限制。

表 4： Run-on-Less Electric项目中重型纯电动货运卡车的行驶周期

车辆类别	车辆类型	每日距离或运行时间	行驶速度	行驶周期和用例
场内牵引车	场内牵引车	每天10-22个小时	大部分低于每小时20英里	单班到多班，固定路线
重型卡车	重型区域牵引车	每天少于300英里	大部分低于每小时40英里	单班，返回基地，区域运输，固定路线
中型卡车	中型箱式卡车	每天少于120英里	大部分低于每小时40英里	返回基地，本地接货和配送，可变路线
中型步入式厢式货车	中型步入式厢式货车	每天少于50英里	大部分低于每小时40英里	返回基地，城市送货或最后一英里配送，固定路线
中型厢式货车	厢式货车	每天少于100英里	大部分低于每小时40英里	返回基地，城市送货或最后一英里配送，固定路线

在2016年的一项试点研究中，对6级中型纯电动配送卡车的实地评估发现，10辆配备90千瓦时电池的电动卡车可以在美国华盛顿州大塔科马地区满足与9辆基准柴油配送卡车相同的运营需求（NREL， 2016）。该研究共记录了17天的

13 CALSTART, 2022. 沃尔沃LIGHTS数据收集项目

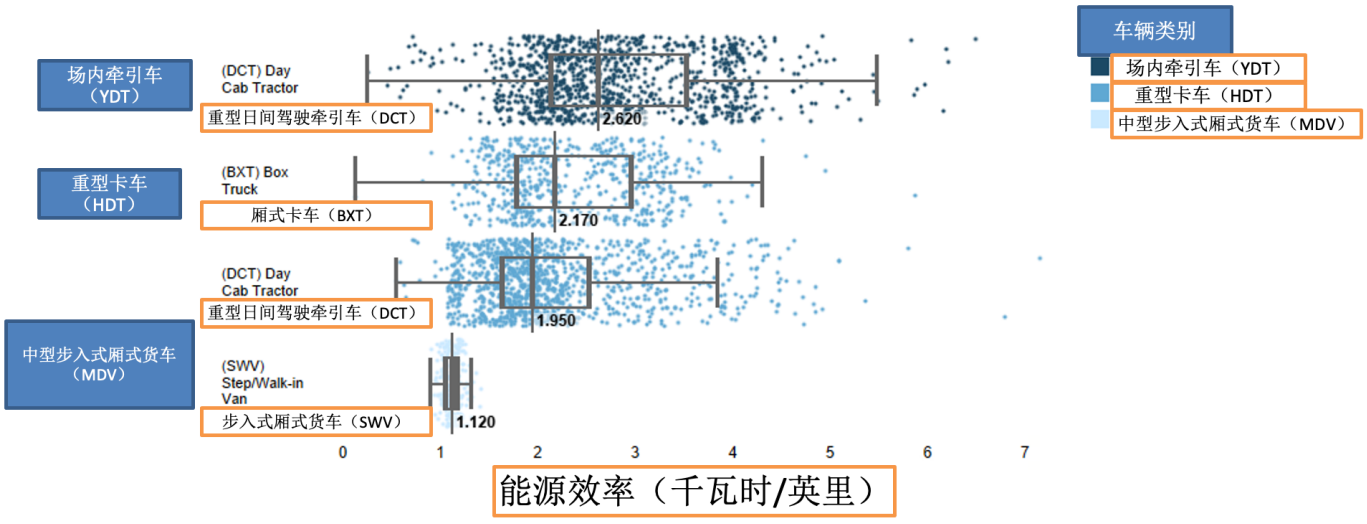
卡车性能数据，相当于123个车辆日（vehicle-days）。卡车平均每天行驶1.5小时，每天行驶不到40英里（每年行驶8488英里）。它们的平均运行速度为每小时22英里，相当于每小时35公里。它们大约在凌晨2点到4点离开基地，在上午10点到下午1点之间返回，每天大约途径44个站点。车队评估显示，先进车辆技术能否成功在很大程度上依赖于驾驶周期的特性和车辆的常规运行情况，如对高峰需求充电、充电基础设施需求以及在不同班次之间充电所需的时间的考虑。

4.2.5. 真实环境下的能源效率

能源效率分析也是基于美国能源部（DOE）数据库中的中重型电动车数据。 它们的行驶周期已在前一节中进行描述并在表3中进行总结。在本节中，我们按照车辆类别将真实环境下的能效与制造商提供的名义能效进行了比较，观察了能效的季节性特征，最后进行了初步回归分析，以了解三个地区的能效与环境温度之间的相关性。我们观察到，场内牵引车和重型箱式卡车的中位能效分别为2.62 千瓦时/英里（14.5 MPGe）和2.17 千瓦时/英里（17.6 MPGe），然而在大多数情况下，其实际能效表现往往低于标称能效，但仍然是柴油同类车的大约2倍（6.5-8 MPG）。重型日间驾驶牵引车（day cab tractors）和中型步入式厢式货车表现相对较好，中位能效分别为1.95 千瓦时/英里（19.5 MPGe）和1.12 千瓦时/英里（34 MPGe），是柴油卡车能效的3倍以上（6.5 MPG和9 MPG）。此外，根据初步的回归分析，场内牵引车较低的能源效率与较低的环境温度有关。与美国西海岸相比，东北部和中西部地区受温度的影响更为明显，这可能是因为这两个地区的季节间变化更大且冬季温度更低。

在评估中重型电动汽车的真实能源效率时，多种因素会影响性能，包括运输货物的重量、驾驶速度、怠速时间、气候、地形、拥堵情况和停车次数等。图13显示了各车辆类别的纯电动货运卡车的能源效率分布，并根据车身形态进行进一步细分（如重型卡车项下又细分了箱式卡车和日间驾驶牵引车）。图中的每个数据点代表一个车辆日的能效表现，并对每个箱线图的中位值进行标记，以表示特定车辆类别的能源效率中心点。在下面的段落中，我们将制造商提供的车型名义能效与DOE数据库中捕获的能效数据进行比较。在不同的运营条件组合下，真实环境的能效通常与名义能效不同。

图 13：美国能源部数据库中的中重型纯电动货运卡车的能效



关于如何阅读有散点的箱线图的说明：箱线图中的垂直线，从左到右，代表了卡车能效（千瓦时/英里）的最小值、25%分位值、中位值、75%分位值和最大值。每个车辆日数据在图表中以一个蓝点表示，当多个数据点具有相同的能源效率值时，这些点在垂直方

向上随机排列。其中点的不透明度表示多个车型在一定载重能力水平下的重叠。使用1.5*四分位数（IQR）方法，超过最大或最小标线的点被识别为异常值。

对于重型场内牵引车，厂商提供的名义效率约为2.3-2.5千瓦时/英里，位于真实效率表现分布的25%分值为至中位值之间。基于在美国四个州运营超过一年半的25辆重型场内牵引车样本，分析结果显示超过半数样本的真实运营效率低于名义效率。其中位能效为2.62 千瓦时/英里（14.5 MPGe），仍然大幅高于化石燃料汽车，是柴油同类车效率（6.5 MPG）的两倍多。

对于重型日间驾驶牵引车，标称效率约为2.0-2.2千瓦时/英里，位于真实样本分布的中位值和75%分位值之间。其中位能效为1.95 千瓦时/英里（19.5 MPGe），是柴油同类车能效的3倍（6.5 MPG）。基于14辆重型日间驾驶牵引车约8个月的运营数据，**超过半数样本的真实运营效率高于名义效率。**一种可能的解释是，目前的数据覆盖范围并不是均匀地覆盖全年，而主要是在更加温暖的季节（4月至12月之间）。**根据我们的数据观测，更温暖月份的车辆效率要高于更寒冷的季节。**另一个需要考虑的因素是地理位置。数据库中所有的重型日间驾驶牵引车都在加州运行，那里的平均环境温度比大多数其他州都要高。**由于影响效率的外部因素众多，这些结果并不适用于所有的中重型电动车类型。** 如前所述，其他行驶周期因素和驾驶条件也会影响效率性能，当更多数据可用时值得进一步研究。

对于重型厢式卡车，标称效率为1.76千瓦时/英里，略低于25%分位值水平。基于5辆重型厢式卡车的操作记录，**超过75%的真实运营效率低于名义效率。**其中位能效为2.17千瓦时/英里（17.6 MPGe），是柴油同类车能效的2倍以上（8 MPG）。

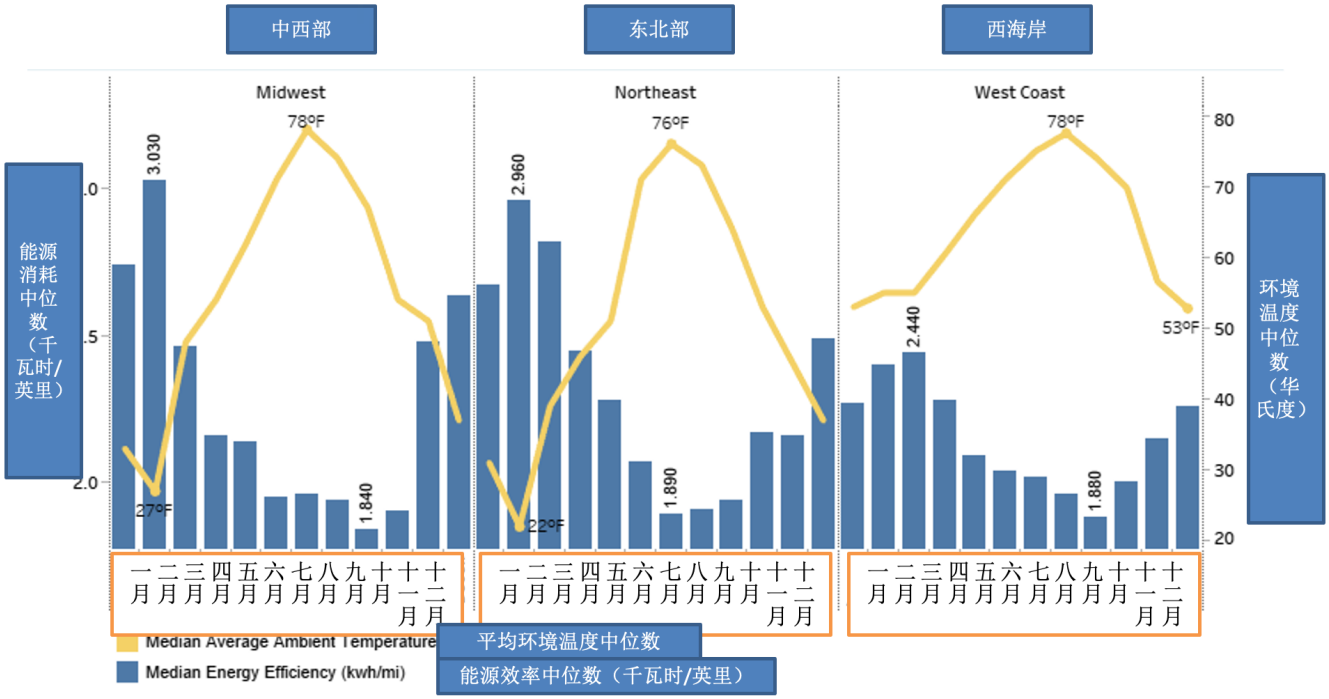
对于中型步入式厢式货车，我们测试了5辆电池容量为85千瓦时的车辆，测试时间从2019年5月到2020年1月，大约9个月。真实环境下的能源效率中位数约为1.12千瓦时/英里。这些车辆没有提供名义效率，所以我们不能像其他类别一样进行比较分析。补充之前研究中的更多能效数据，NREL的中型插电式电动配送卡车项目（NREL，2016）显示，6级电动配送卡车的燃料经济性平均为24.09 英里每加仑柴油当量[14] （**约1.58千瓦时/英里**[15]）。较同类柴油车7.63英里每加仑（约5千瓦时/英里）的燃油经济性，纯电动配送卡车的效率提升了3.15倍。 2014年进行的另一项NREL实地研究（NREL， 2014）也发现了类似的结果，该项研究跟踪了259辆型号相同、电池容量都为80千瓦时的6级配送卡车的运行情况。这项研究持续了大约三年，覆盖了81个运营城市，总行驶距离达到440万公里。研究发现，这些步入式厢式货车的燃料效率为24.9英里每加仑柴油当量（**约1.53千瓦时/英里**），比2016年实地研究中的柴油同类车的效率高出3.26倍。

除了按车辆类别得出的结果外，我们还对能源效率和环境温度进行了描述性分析，以观察DOE数据库中的重型场内牵引车数据的季节性特征。例如，过去两年（2020年1月至2021年9月），庭院拖拉机目前在全美范围内拥有更全面的数据覆盖。图14描述了场内牵引车能效的季节性特征，在较寒冷的月份每英里消耗的能量更多，在较温暖的月份消耗的能量更少。较寒冷的月份是指冬季和早春环境温度较低的月份，具体取决于具体位置，通常在11月至3月之间。这可能是由于加热系统为保持车辆在较低温度下运行而消耗的额外能量所造成的。

14 每加仑当量英里数（Miles per gallon equivalent）假设充电器效率为90%。

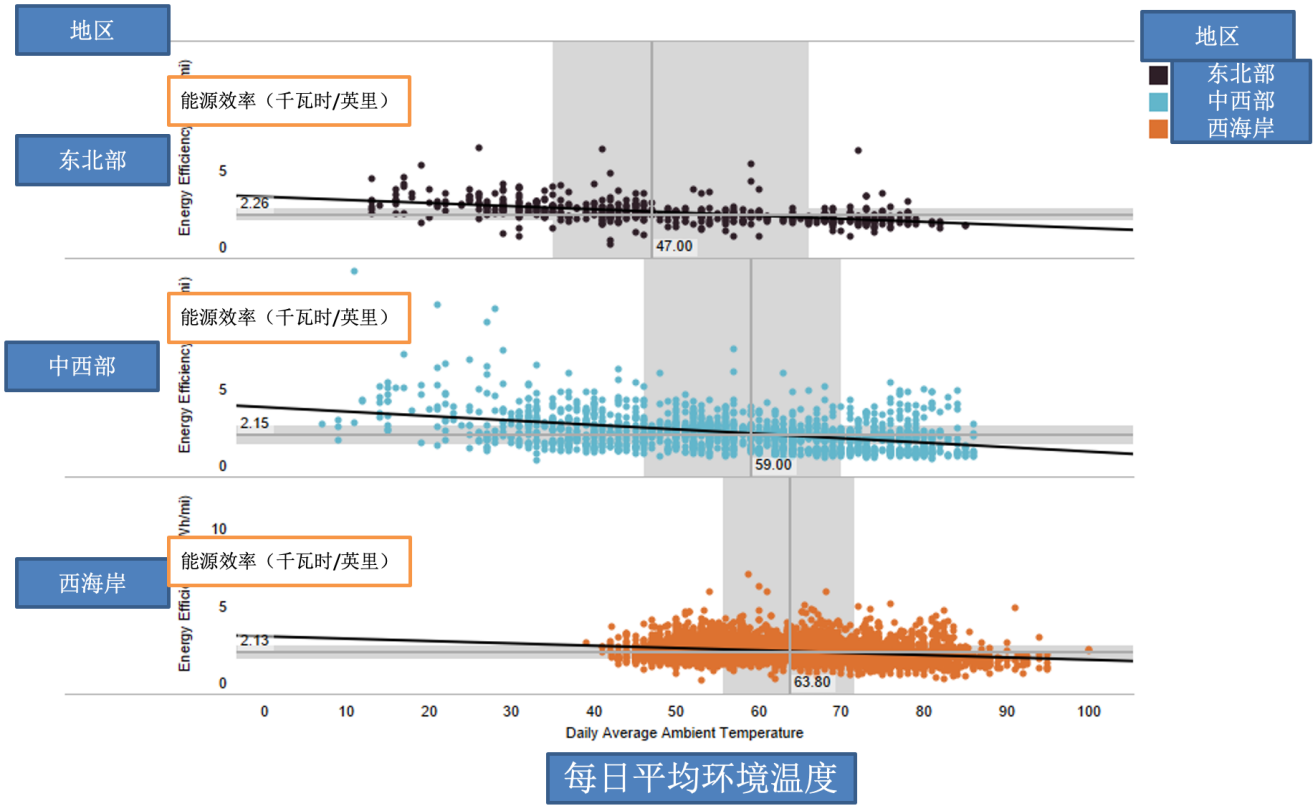
15 38.1千瓦时的电力相当于1加仑柴油的能量。

图 14：美国多地区场内牵引车能源效率与环境温度的季节性特征



我们还进行了初步回归分析，以分析场内牵引车能效与环境温度之间的相关性。研究发现，在95%的统计显著性下，该相关性系数为负值，说明在较冷的气候条件下，电动汽车的能效更低，而且在季节间变化较大的地理区域，这种相关性更为显著。在美国东北部和中西部，环境温度一般在10到85华氏度之间变化，而在美国西海岸，温度主要在40到95华氏度之间变化。在图15中，25%到75%分位对应的温度和能源效率用灰色阴影表示，而温度和能源效率的中位数用标签标记。根据普通最小二乘法（OLS）回归分析，**由于环境温度相关性系数为负值，纯电动卡车在较寒冷的气候条件下的能效性能低于较温暖的气候条件下的能效性能。此外，东北部和中西部的环境温度相关性系数分别比西海岸的大30%和87%。**除此之外，我们可以通过添加控制变量（如行驶速度、怠速时间和其他已知影响能效的变量）对目前的OLS回归分析进行改进，从而更加准确地测算温度的影响。我们还可以通过改变模型的函数形式来改进目前的初步OLS回归分析，以拟合能效与环境温度之间的非线性相关性。随着可用数据增多，我们可以进一步分析这种季节性表现在其他车辆类别是否也普遍存在、以何种程度存在，以及影响能效背后的潜在因素是什么。

图 15：美国多地区场内牵引车能源效率与环境温度的散点图



4.3. 经济可行性

经济可行性分析是基于对拥有总成本（TCO）的文献综述。其中固定成本包括制造商建议零售价格（MSRP）和首个用户生命周期后的残值，这些固定成本根据折现率折现为当前情景。可变成本包括燃料/能源成本、维护成本和充电站基础设施成本。其他成本包括载重能力损失的成本、司机工资和福利、保险、许可证、道路使用费和通行费、登记和所有权税以及在工作期间卡车没有进行实际工作而是进行充电/补充燃料或装卸设备的停留时间成本。我们依据所有文献中的相关数据，研究分析了各车辆类别和燃料类别卡车的三大主要成本因素，即MSRP，燃料成本，和维护成本。我们还简要讨论了政策和奖励措施对纯电动货运卡车采用的影响（表5）。附录一包括文献中TCO的成本和结果。图I-1列出了每种来源中使用的所有成本的详细信息。图I-2列出了TCO分析的结果，包括每英里的成本，预计达到成本平价的年份，或柴油和电力之间的盈亏平衡价格。研究发现，激励措施在短期内很重要，但到2030年激励措施将不再是纯电动货运卡车实现与柴油车相同经济性竞争力的必要条件。

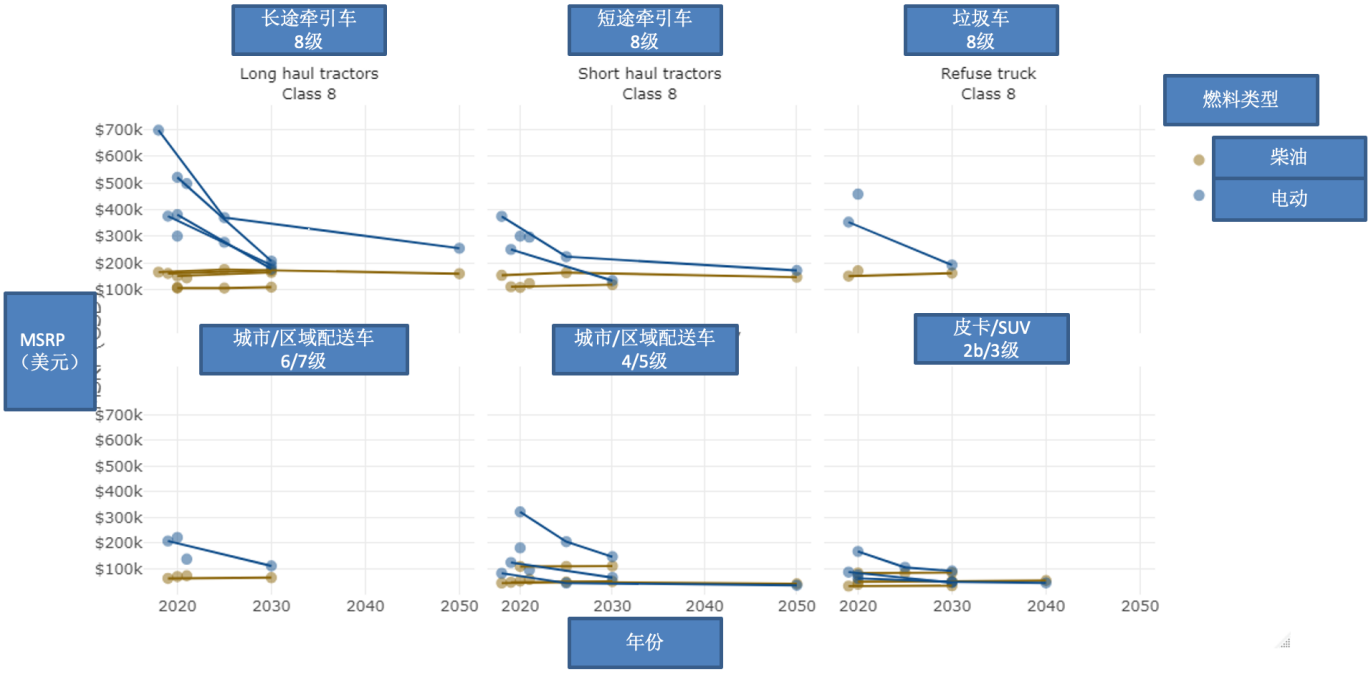
表 5：每个数据来源所使用的区域和分析参数情况

参考资料	地区	在下面的分析中使用的成本参数
Basma, Saboori, & Rodríguez 2021	欧洲	MSRP，燃料成本，维护成本，激励措施
ICF, 2019	美国加利福尼亚州	MSRP，燃料成本，维护成本，激励措施
Hunter, et al., 2021	美国	MSRP，燃料成本，维护成本
HVIP TCO Calculator, 2021	美国加利福尼亚州	MSRP，燃料成本，维护成本
Mulholland, 2022	美国	MSRP，燃料成本，维护成本
Vijayagopal & Rousseau, 2021	美国	MSRP，燃料成本
Welch, et al., 2020	全球	MSRP，激励措施
Prohaska, et al., 2016	美国华盛顿州	燃料成本

4.3.1. 制造商建议零售价格（MSRP）

制造商建议零售价格（MSRP）即车辆的原始购买价格。尽管纯电动货运卡车，特别是重型卡车的MSRP比柴油同类卡车更昂贵，但随着电池技术成熟、产量增加，成本差异将随着时间推移而减少。（Welch, et al., 2020）。在图16中，我们将同一文献在不同时间节点所估计的MSRP连接成一条线（详见图I-1）。在当前情景下，所有类别的纯电动货运卡车的MSRP均高于柴油或汽油卡车。重型卡车，如长途或短途牵引车和垃圾车，比用于城市和区域配送的中型卡车和轻型重型车辆（LHDV）具有更大的MSRP差异。展望未来，随着时间的推移，电车技术和市场将逐渐成熟，纯电动货运卡车的MSRP将伴随电池成本的下降而显著降低（图16）。大多数文献认为，由于更严格的法规和更高的税费，未来柴油卡车的MSRP将会增加，而另一些研究则认为未来基准燃油卡车的MSRP会更低（Hunter, et al., 2021）。尽管变化的方向有不同，但未来柴油卡车的MSRP相较目前价格不会有明显变化（图16）。纯电动货运卡车的MSRP的显著降低和柴油/汽油卡车相对恒定的MSRP将导致两者MSRP差异的显著减少。然而，所有车辆类型的卡车都实现MSRP平价可能较难（Vijayagopal & Rousseau, 2021），特别是对于4/5级以上类别的卡车而言更是如此。在此情况下，纯电动货运卡车和柴油/汽油基准卡车之间的TCO平价将在很大程度上取决于燃料和维护成本的差异。

图 16：TCO分析中纯电动货运卡车和柴油基准卡车的当前MSRP和未来MSRP预测



4.3.2. 燃料成本

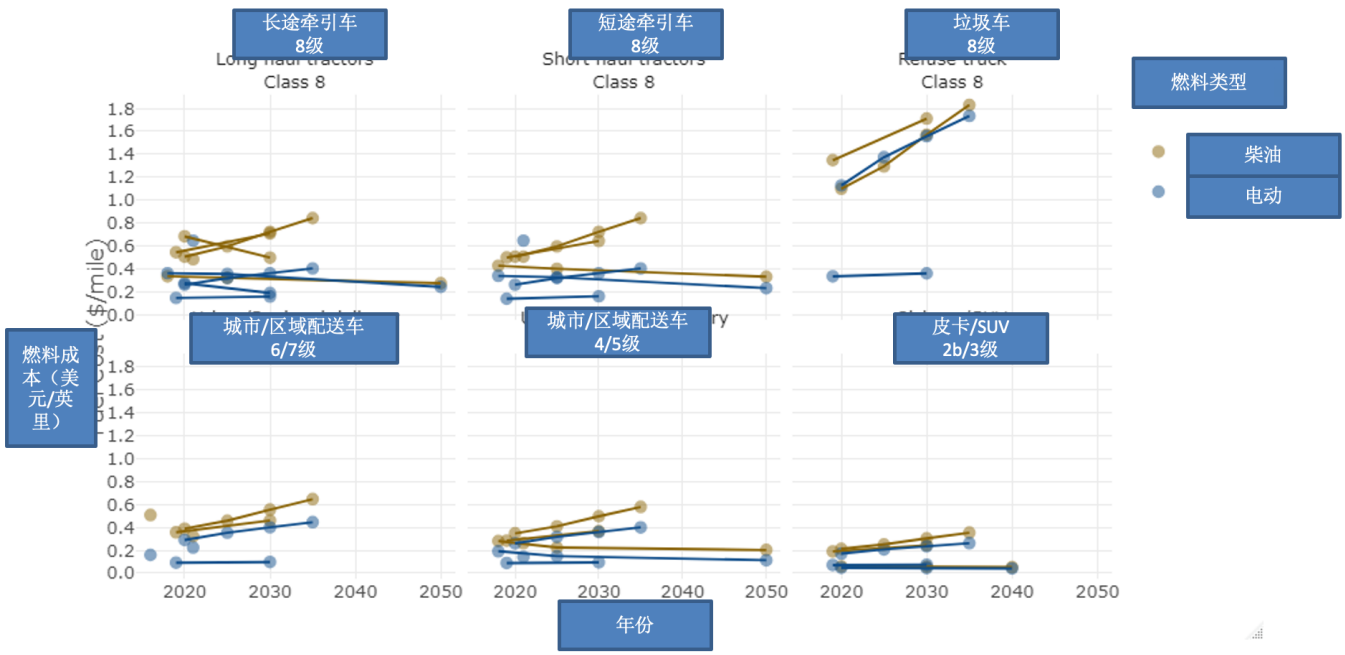
燃料成本的定义是卡车每英里的燃料消耗成本，这取决于未来的燃料价格和燃料效率。在目前和未来的情景下，纯电动货运卡车的燃料成本一般都比柴油卡车更便宜。由此，燃料效率是影响纯电动货运卡车燃料成本的决定因素。

主要文献均预期燃料效率将随着时间的推移而提高（Basma, Saboori, & Rodríguez 2021, Hunter et al. 2021, Mulholland 2022），尽管另有三个文献没有对燃料效率将如何变化给出明确的假设（HVIP TCO Calculator 2021, ICF 2019, Vijayagopal & Rousseau 2021）。文献中对燃料效率的预估，一般通过对特定情景下的行驶周期和车辆规格参数进行建模而得到（Hunter et al. 2021, ICF 2019, Vijayagopal & Rousseau 2021）。

对未来燃料价格的预测是具有挑战性的。聚焦分析美国州内纯电动卡车的文献，尤其是分析加州卡车TCO的ICF（2019年）和HVIP TCO Calculator（2021），其预计柴油和电力价格在未来都会上涨。而针对美国全国或欧洲的分析，未来燃料价格的变化方向和幅度皆很难预测。因由原油价格变化驱动，柴油价格具有高度不确定性（Basma, Saboori, & Rodríguez 2021）。而由于电价结构的复杂性（Bloch-Rubin, Gallo, & Tomić, 2014）以及同一国家各地区之间的差异（Hunter, et al., 2021），未来电价走势也是难以预测的。因此，很多文献使用了敏感性分析或情景模型得到一个燃料价格区间，以涵盖上述报告中的不确定性。

在目前和未来预测中，纯电动货运卡车的燃料成本将普遍低于柴油卡车。在美国华盛顿州费德威市（Federal Way）进行的真实现场评估得出，6类柴油运货卡车的燃料成本为0.507美元/英里，而同类型电动卡车的燃料成本为0.159美元/英里（Prohaska, et al., 2016）。图17绘制了各文献估计的燃料成本并把来自同一文献的不同时间节点的数据点连接成一条线（更多细节见图I-2）。若文献在单一时间节点使用不同情景预测燃料成本的可能范围，我们根据研究结果计算平均值绘于图中，以给出总体趋势。

图 17：TCO分析中纯电动货运卡车和基准卡车的当前和未来燃料成本预测（美元/英里）



在目前情景下，除了Vijayagopal和Rousseau（2021）文献中测算的8级牵引车和HVIP TCO Calculator测算的8级垃圾车以外，纯电动货运卡车的燃料成本总体低于柴油车。由于这两个文献测算的车辆类别的燃料效率要低于其他文献来源，因此它们测算得出纯电动货运卡车的燃料成本相对更高，这说明燃料效率将对燃料成本产生重大影响。例如，Vijayagopal 和 Rousseau（2021）对8级电动长途牵引车使用11.5英里每加仑柴油当量（英里/dge）的燃料效率假设，而其他报告使用的燃料效率假设在14.9到29.5英里/dge之间，这意味着后者的电动牵引车的燃料效率假设要好于Vijayagopal 和 Rousseau的测算。对于8级电动长途牵引车，ICF（2019）假设它们的能源消耗效率比柴油牵引车高四倍，而Vijayagopal 和 Rousseau（2021）假设电动牵引车的燃料效率不到柴油牵引车的两倍。此外，Hunter等人估计柴油长途牵引车的燃料效率上限为12.9英里/dge，高于Vijayagopal 和 Rousseau（2021年）对电动牵引车的估计。

此外，对于燃油经济性较低的卡车来说，燃油价格的变化将更严重地影响其燃油成本。以垃圾车为例，HVIP TCO Calculator（2021）的数据估计，电动垃圾车的燃料成本与燃料效率仅为8.81千瓦时/英里的柴油车大致相同。假设燃料效率不随时间的推移而变化，尽管预测的燃料价格只是在未来小幅增长，柴油垃圾卡车的燃料成本也会随之急剧增加（ICF 2019，HVIP TCO Calculator 2021）。综上所述，纯电动货运卡车的燃料效率将显著影响其经济可行性。

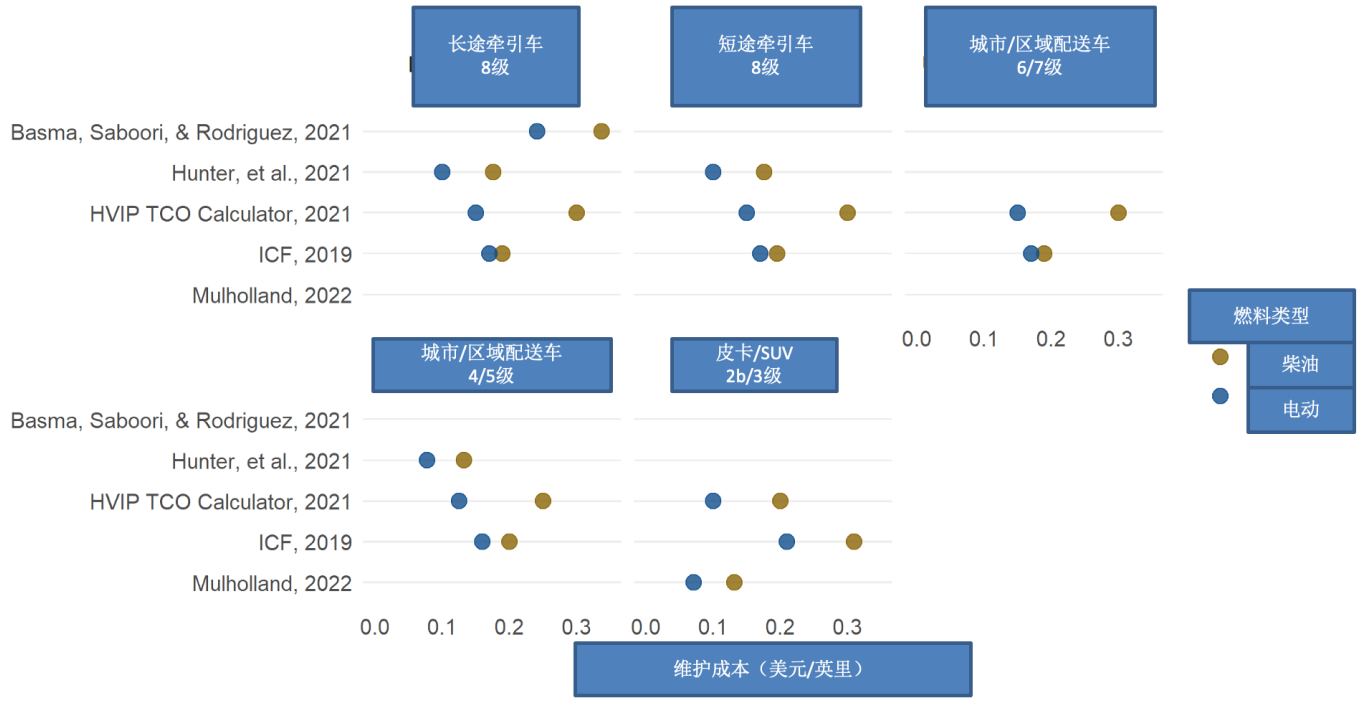
4.3.3. 维护成本

在本报告中，维护费用包括一般性维护和维修成本。一般性维护可分为定期维护和非定期维护，判断依据该服务是定期的预防性更换还是根据检查测试情况进行的维护（Burnham, et al., 2021）。一般性维护的例子包括机油更换、液体更换、排气后处理系统维护和发动机维护。由于纯电动货运卡车不需要更换机油和排气后处理系统维护，因此纯电动货运卡车的运维成本估计比柴油车低30%到50%（Basma, Saboori, & Rodríguez 2021, HVIP TCO Calculator 2021,

Mulholland 2022）。展望未来，ICF（2019）认为在2030年纯电动货运卡车单位行驶里程的维护成本将减少一半，而其他文献均预计该值不会随着时间推移而下降。

虽然所有文献都认为纯电动货运卡车的维护成本低于柴油卡车，但在具体的成本估计之间存在差异（图18）。欧洲对长途电动8级牵引机的维护成本估算高于美国（Basma, Saboori, & Rodríguez, 2021）。而在美国的估算中，基于加州的维护成本估算高于其他使用全国平均值的估算（Hunter et al., 2021, Mulholland 2022）。除图中显示的数据外，由于缺乏数据、不确定性高，我们并未展示8级垃圾车的数据。ICF（2019年）估计垃圾车的维护成本远高于其他车辆类别（柴油2.89美元/英里，电动2.83美元/英里），而HVIP TCO Calculator假设垃圾车的维护成本与其他8级卡车相同（柴油0.3美元/英里，电动0.15美元/英里）。

图 18：拥有总成本（TCO）分析中纯电动货运卡车和基准卡车的当前维护成本（美元/英里）



4.3.4. 政策和激励措施

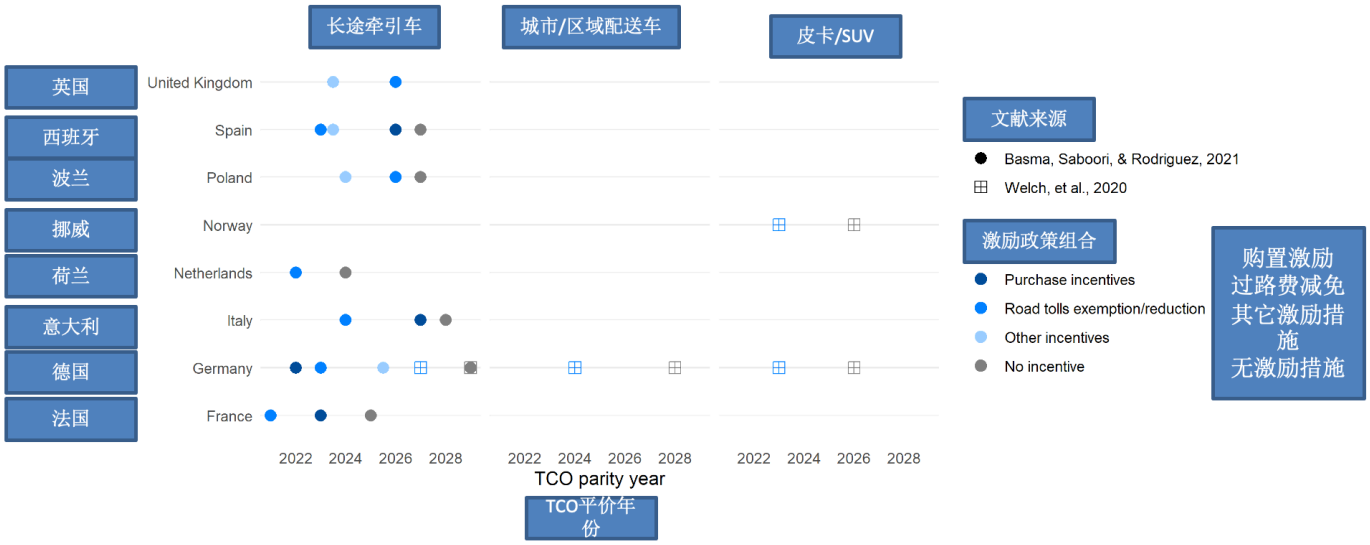
根据对加州和欧洲的分析（Basma, Saboori, & Rodríguez 2021, ICF 2019），目前纯电动货运卡车可以通过激励措施和信贷计划等支持性措施实现TCO平价（见8.1.3），并在2030年实现无激励措施情况下的经济可行。由于增量成本是实现纯电动货运卡车广泛采用的主要障碍，降低前期成本和提高纯电动货运卡车残值的政策会十分有效（Welch, et al., 2020）。相反，发电和输电的税费和附加费会增加电力成本并降低电动卡车燃料成本优势，为纯电动货运卡车的广泛采用制造障碍（Basma, Saboori, & Rodríguez, 2021）。

ICF（2019年）TCO分析中包含的现有全生命周期激励区间如下：8级牵引车和垃圾卡车在22.2万至25.05万美元区间；4-7级城市/区域配送卡车在11.2万至13.14万美元区间；2b/3级皮卡和SUV在4.48万美元至6.88万美元区间。到2030年，当所有纯电动货运卡车都能够在没有激励的情况下实现TCO平价时，其所需的激励政策将减少70-80%（ICF

2019）。此外，关于欧洲过路费豁免的案例研究发现，不同国家、不同车辆类别的纯电动货运卡车每年可享受的豁免在8200至6万美元区间（Welch, et al., 2020）

支持政策有可能将纯电动货运卡车和柴油卡车实现TCO平价的时间最多提前8年（图19）。在欧洲的案例研究表明，豁免纯电动货运卡车过路费和道路使用税有可能将TCO平价的时间提前，从2b/3级小型厢式货车到8级长途牵引车，TCO平价提前的时间在2到4年不等（Welch, et al., 2020）。此外，在Basma、Saboori和 Rodríguez（2021）建立的所有七个国家模型中，8级电动长途牵引车可以在2030年前实现没有任何激励政策的TCO平价，而最早是在2024年便实现TCO平价。如果假设在2021年就实施了二氧化碳用户收费，那么这七个国家都可以在2023年或之前达到TCO平价。车辆购置激励措施将会使德国的TCO平价时间从2029年大幅提前至2022年。假设同时有购置激励措施、运输排放交易系统、在过路费中增加二氧化碳外部成本，以及减少或免除零排放卡车过路费等一系列支持政策，欧洲这七个国家都可在2021年实现TCO平价。

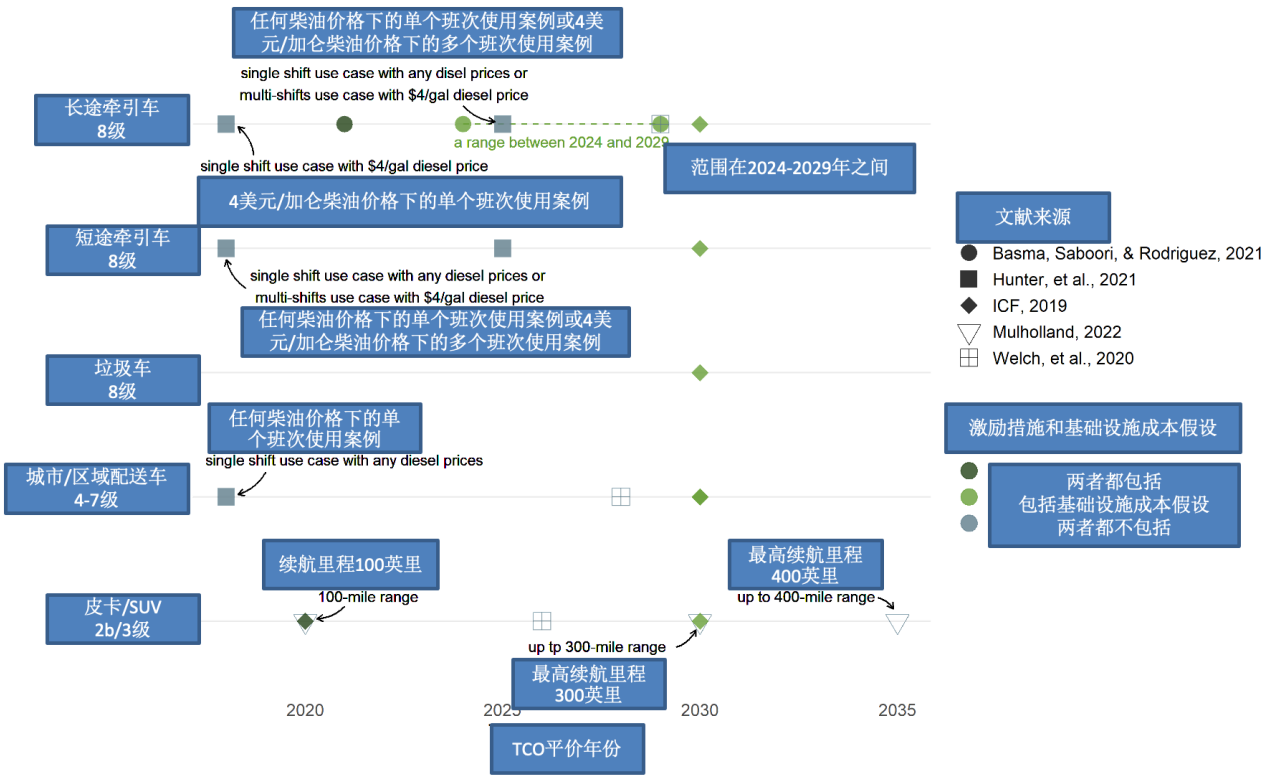
图 19：支持性政策可使得拥有总成本（TCO）平价年份提前



4.3.5. 拥有总成本（TCO）结果

大部分文献认可在2020-2030年期间，纯电动货运卡车可以实现与柴油车的TCO平价（图20，表6）。纯电动货运卡车的运营和维护成本均优于柴油卡车，但增量成本是大规模使用纯电动卡车的一个重大障碍。此外，具有高燃料效率的纯电动货运卡车需要更便宜更小尺寸的电池和更低的燃料成本，从而更容易实现与柴油卡车相同的TCO水平。如果卡车在工作时间因为充电或装卸设备而无法行驶将导致停留时间成本，此类使用情况也会增加纯电动货运卡车的操作成本（Hunter, et al., 2021）。当纯电动货运卡车需要多班次轮流驾驶，且充电不能完全在班次间隙内完成时，停留时间成本将使纯电动货运卡车的应用更具挑战性。激励措施对纯电动货运卡车在未来短期内的竞争力至关重要。到2030年，当零售价格随着电池成本降低和燃料效率提高而下降时，即使没有激励措施，纯电动货运卡车也可以凭借其低运维成本与柴油车竞争。附录中的表I-2列出了文献中各车辆类别的TCO、达到TCO平价的年份和与柴油车的盈亏平衡价格。

图 20：纯电动货运卡车和柴油卡车实现TCO平价的最早年份



除了上面讨论的固定成本和运营成本外，我们虽然没有对基础设施成本进行充分讨论，但该成本也是一个重要的成本因素。它可以分解为充电设备采购成本、安装成本和年度维护成本。这将增加纯电动货运卡车的TCO，尤其是在车队需要在基地安装夜间充电站的初始阶段。然而，关于基础设施成本的数据是有限的，并且大多数文献并没有囊括其相关分析。一项华盛顿州的实际现场研究发现，安装一个额定输出功率为3.8-19.2千瓦的充电站的平均成本约为2.2万美元，其中主要是挖沟、导管安装和混凝土浇筑的施工费用（Prohaska, et al., 2016）。据估计，随着市场的成熟、资本成本和维护成本降低，未来基础设施成本将逐步降低（Basma, Saboori, & Rodríguez 2021, ICF 2019）。

表 6：纯电动货运卡车和柴油卡车实现TCO平价的汇总结果

车辆分类	纯电动货运卡车在寿命期内可以达到与柴油卡车TCO平价的最早购买年份	地区	参考文献
长途牵引车			
8级	2024-2029年，燃料成本固定和无激励情景下；2021年，若所有激励措施相结合	欧洲	Basma, Saboori, & Rodríguez, 2021
	单班使用：2018年，柴油价格为4美元/加仑的情景下；2025年，任何柴油价格的情景下。 多班使用：2025年，柴油价格为4美元/加仑的情景下（没有考虑基础设施成本或激励措施）。	美国	Hunter, et al., 2021
	2030年，没有激励措施	美国加州	ICF, 2019
	w当电池成本低于100美元/千瓦时，且柴油高于3美元/加仑；或电池成本低于200美元/千瓦时，且柴油高于4美元/加仑（没有考虑基础设施成本或激励措施）	美国	Vijayagopal & Rousseau, 2021
	2029年，没有激励措施（没有考虑基础设施成本）	全球	Welch, et al., 2020
短途牵引车和拖车			
8级	单班使用：2018年，任何柴油价格的情景下。 多班使用：2018年，柴油价格为4美元/加仑的情景下，2025年，任何柴油价格的情景下（没有考虑基础设施成本或激励措施）。	美国	Hunter, et al., 2021
	2030年，没有激励措施	美国加州	ICF, 2019
	当电池成本低于100美元/千瓦时，且柴油高于3美元/加仑；或电池成本低于150美元/千瓦时，且柴油高于4美元/加仑（没有考虑基础设施成本或激励措施）	美国	Vijayagopal & Rousseau, 2021
垃圾车			
8级	2030年，没有激励措施	美国加州	ICF, 2019
城市/区域运货			
8级	当电池成本低于100美元/千瓦时，且柴油高于2.5美元/加仑；或电池成本低于180美元/千瓦时，且柴油高于4美元/加仑（没有考虑基础设施成本或激励措施）	美国	Vijayagopal & Rousseau, 2021
6/7级	2030年，没有激励措施	美国加州	ICF, 2019

车辆分类	纯电动货运卡车在寿命期内可以达到与柴油卡车TCO平价的最早购买年份	地区	参考文献
4/5级	单班使用：2018年，任何柴油价格。 多班使用：由于停留时间成本高，无法实现TCO平价（没有考虑基础设施成本或同等激励）	美国	Hunter, et al., 2021
	当电池成本低于150美元/千瓦时，且柴油高于3美元/加仑（没有考虑基础设施成本或激励措施）	美国	Vijayagopal & Rousseau, 2021
	2028年，没有激励措施（没有考虑基础设施成本）	全球	Welch, et al., 2020
	2030年，没有激励措施	美国加州	ICF, 2019
皮卡/SUV			
2b/3级	2020年，100英里续航里程的纯电动货运卡车；2035，续航里程达400英里的纯电动货运卡车（没有考虑基础设施成本或激励）	美国	Mulholland, 2022
	2026年,没有激励措施（没有考虑基础设施成本）	全球	Welch, et al., 2020
	2020年,有激励措施；2030年,没有激励措施	美国州	ICF, 2019

2b/3级电动皮卡和SUV最有希望实现TCO平价，成为首个向纯电动货运卡车（BETs）过渡的车辆类别。在激励措施的支持下，2020年该类别纯电动货运卡车的TCO就已经低于柴油同类车（ICF 2019）。除此之外，由于电池容量不同，不同续航里程的纯电动货运卡车将在不同年份达到TCO平价。在目前的情况下，那些拥有100英里续航里程的车辆已经可以比柴油皮卡和面包车更有竞争力（Mulholland, 2022）。到2030年，200英里和300英里续航里程的纯电动货运卡车将具有竞争力，而那些400英里续航里程的纯电动货运卡车需要到2040年才能将超越基准柴油卡车（Mulholland, 2022; ICF, 2019）。此外，到2030年的购买年度，这一车辆类别的纯电动货运卡车相较于柴油车的投资回收期将短于3年（Mulholland, 2022）。

截至2018年，4级纯电动货运卡车的TCO高于柴油卡车，但将从2025年开始具有竞争力（Hunter, et al., 2021, Vijayagopal & Rousseau, 2021）。敏感性分析发现，单个班次的4级包裹配送卡车预计有较大希望达到TCO平价，而用于多个班次的包裹配送卡车无论柴油价格和电价如何，都不能实现TCO平价（Hunter, et al., 2021）。这是因为用于多个班次的卡车更难以管理停留时间成本，从而导致更高的运营成本。5-6级和重型城市/区域配送卡车因需要更大的电池组而面临更大的挑战（Vijayagopal & Rousseau, 2021）。更大的电池组会更昂贵，导致纯电动货运卡车采用的增量成本增加。一项实地研究显示，纽约州的电动汽车代金券奖励计划提供了6万美元的代金券，但80千瓦时的“史密斯牛顿（Smith Newton）”电动车的增量成本比传统汽车的成本要高出86,791美元（Prohaska, et al., 2016）。

8级垃圾车、短途和长途牵引车也可能在2030年左右达到TCO平价。它们的经济可行性对电池成本、柴油成本和激励措施都很敏感。8级垃圾卡车的数据和研究有限。由于燃料效率低，它们的燃料成本可能不比柴油卡车低，进而削弱了这类纯电动货运卡车在运营成本方面的优势。存在像荷兰和法国这样的国家，无论电力和柴油价格如何变化，纯电动货运卡车都可以实现TCO平价（(Basma, Saboori, & Rodríguez, 2021）。然而，对大多数国家来说，低柴油价格和不可返还的电力税费和附加费将推迟纯电动货运卡车与柴油车实现TCO平价的时间。因此，征收高额柴油价格税费并颁布财政措施激励可再生能源电力的使用，会促进纯电动货运卡车实现TCO平价。

5

对中国的建议

中国在零排放汽车（ZEV）采用、零排放汽车和电池制造能力以及零排放汽车激励措施方面领先世界。尽管处于这样的领导地位，但中国的零排放卡车（ZET）市场并没有取得像其零排放轻型乘用车和客车市场那样的成功。

许多与中重型卡车电动化相关的技术和经济挑战因素导致零排放卡车采用的较慢。相较其他车辆类型，中重型卡车行驶距离相对较长、需要的电力更多，因此需要大电池容量来完成日常路线。卡车电池组成本在300美元-1000美元/千瓦时之间，纯电动货运卡车电池容量在200-500千瓦时之间，这些电池是零排放卡车最大的成本构成，导致比传统燃油车更高的增量资本成本（CALSTART， 2021）。在目前的电池能量密度下，这些大的电池容量也增加了电池重量，使卡车的装载能力减少10-20%（Liu & Danilovic，2021）。此外，零排放卡车还需要一个充足的高功率卡车充电网络提供支持，这在中国或其他任何国家都还没有出现。

除了零排放卡车面临的技术和经济挑战外，中国独特的卡车市场条件使得零排放卡车的采用格外具有挑战性。中国超过71%的重型卡车司机是独立的车主经营者，工资水平较低（约10万元），而重型柴油卡车的成本通常在40万至50万元之间，重型零排放卡车的成本在80万至100万元之间（Khanna, 2021; Liu & Danilovic, 2021）。这种较低的利润成本比例意味着许多卡车司机必须依赖低首付或零首付的银行贷款，与大型的卡车物流组织相比，他们的融资选择要差得多。

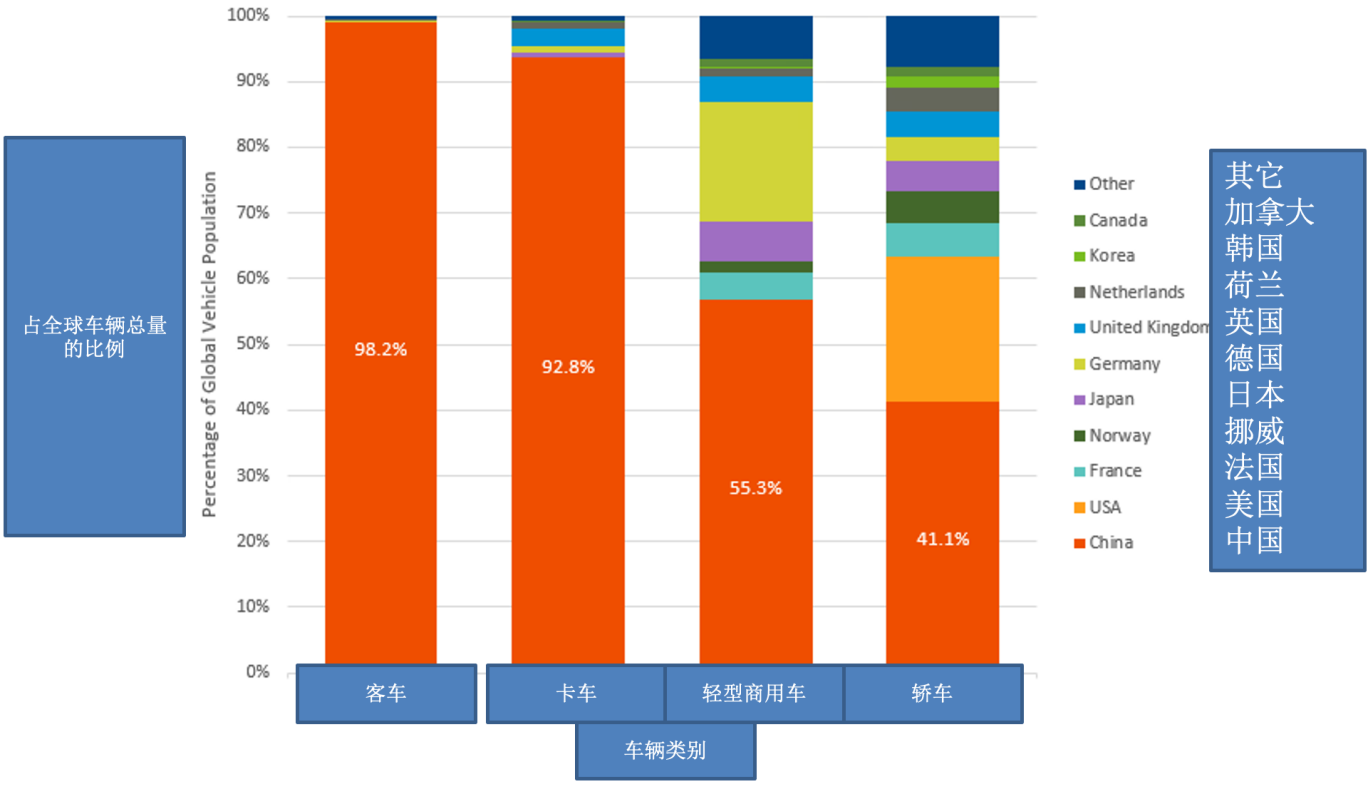
然而，这些障碍是可以克服的。一项涵盖强有力的全国零排放卡车销售/库存目标、法规、有针对性且有时限的零排放卡车激励措施的综合计划可以系统地指导制造商和省级政府采取行动，加速零排放卡车商业化，提高零排放卡车的财务可行性，直到实现与传统卡车的总成本平价。美国加州是该策略的一个成功案例，加州将目标、法规和激励措施相结合，刺激了零排放卡车部门的快速增长，鼓励了制造商作出承诺，并影响了美国其他人口众多的州制定类似的目标和法规。

本节根据本报告的市场研究和技术和经济数据分析结果，向中国提供了加快零排放卡车商业化的非详尽建议清单。

5.1. 宣布保持中国领导地位的强有力目标

中国目前的零排放卡车市场份额与其未来的目标之间存在着巨大差距。中国占全球零排放客车市场份额的98.2%，全球零排放卡车市场份额的92.8%，全球零排放轻型商用车市场份额的55.3%，以及全球零排放轻型轿车市场份额的41.1%（图21）。尽管中国在零排放汽车领域占据主导地位，但中国目前还没有制定零排放卡车的国家目标（IEA, 2021c） 。在美国和欧洲，地方政府制定的独立政策比国家政策更积极严格，而与美欧不同，中国许多省级决策在很大程度上受到国家政策和决策的影响，因此拥有零排放卡车国家目标对中国尤其重要。

图 21：全球轿车、轻型商用车（Vans）、客车和卡车的市场份额（资料来源： IEA Global EV Outlook 2021）[16]



中国汽车工程学会（China-SAE）近期提出了关于总重超过3.5吨的新能源卡车（NETs）[17] 的销售目标：到2025年占比达12%，2030年占比达17%，2035年占比达20%（China SAE，2021）。相比之下，尽管世界上其他国家和州目前的零排放卡车市场份额低于中国，但它们正致力于更积极的目标。由荷兰和CALSTART牵头的国家和地区政府联盟[18]制定了一个目标，即到2030年实现30%的中重型汽车（MHDV）的销量为零排放汽车，到2040年达到100%（图22）。同样，累计约占美国中重型卡车销量34%的18个州（包含华盛顿特区）[19] 设定了相同的2030年目标，并到2050年实现中重型汽车销量100%为零排放汽车。

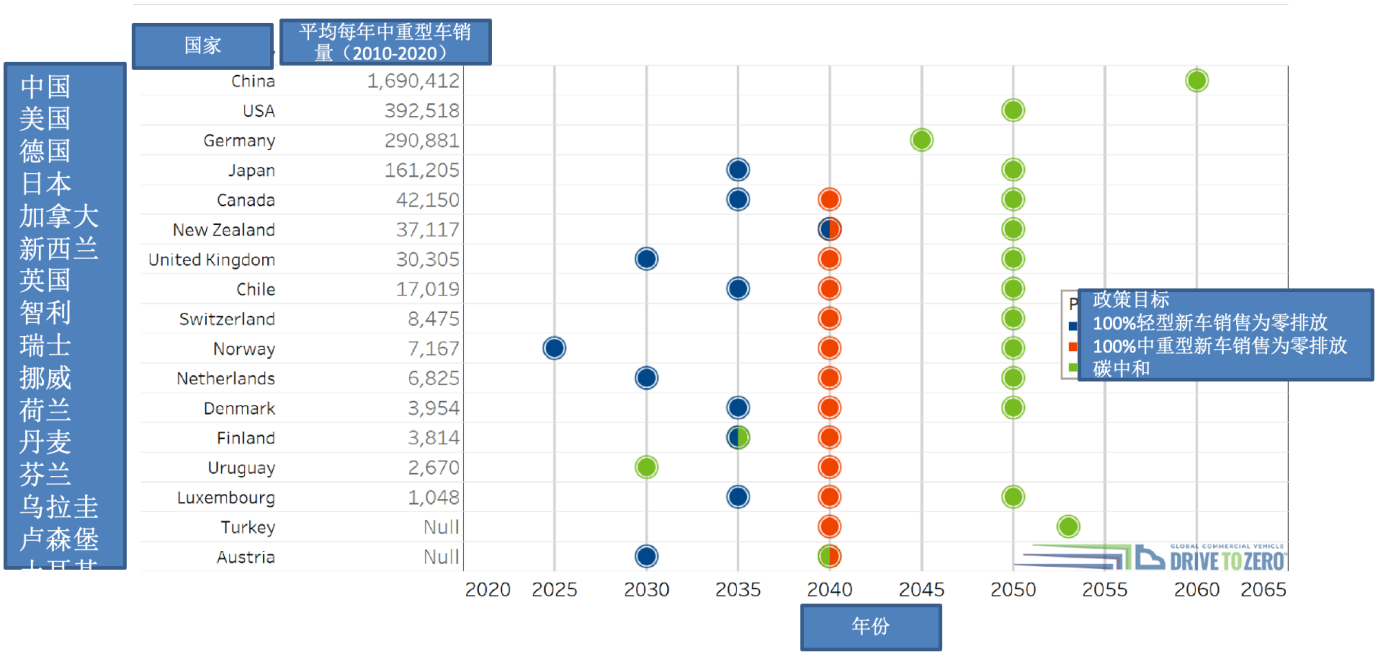
16 轻型商用车是指车辆总重量等级（GVWR）小于3.5吨的车辆，而卡车是指GVWR大于3.5吨的车辆

17 新能源汽车在中国是指部分或完全由电力驱动，如纯电动汽车（BEVs）、插电式混合动力汽车（PHEVs）和氢燃料电车汽车（FCEVs）。

18 奥地利、加拿大、智利、丹麦、芬兰、卢森堡、荷兰、新西兰、挪威、苏格兰、瑞士、土耳其、联合王国、乌拉圭和威尔士。

19 加利福尼亚州、科罗拉多州、康涅狄格州、夏威夷州、缅因州、马里兰州、马萨诸塞州、内华达州、新泽西州、纽约州、北卡罗来纳州、俄勒冈州、宾夕法尼亚州、罗德岛州、佛蒙特州、弗吉尼亚州、华盛顿州和华盛顿特区。

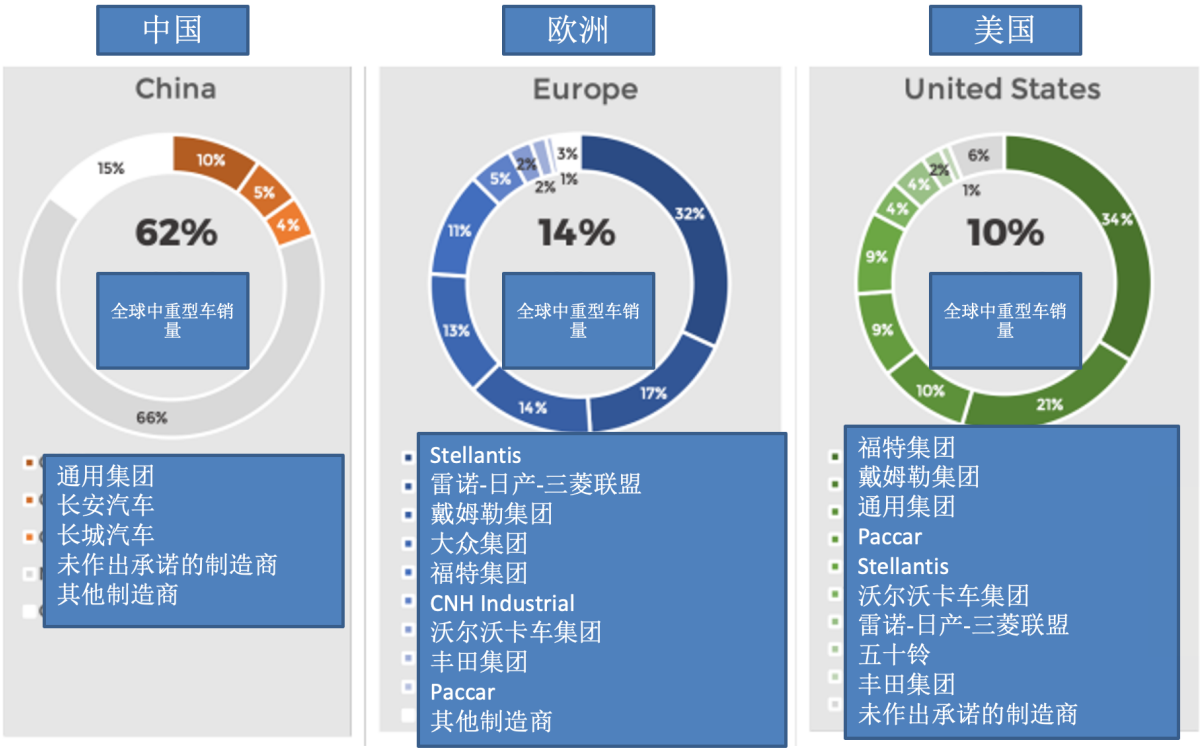
图 22：全球轻型车和中重型车的目标（来源：CALSTART）[20]



目标制定是全面实施清洁交通政策的一个重要组成部分，因为其指导着雄心勃勃的法规的制定，并向地方政府、中重型卡车制造商和车队发出明确的市场信号。如果没有明确的目标，国内制造商就不太可能为自己设定雄心勃勃的目标，或对零排放技术进行早期投资。在美国和欧洲，积极的零排放卡车目标正在整个国家和地方层面的参与者中传播，占中重型市场94%和97%的汽车制造商已分别承诺完全过渡到零排放运输。而在中国，由于目标尚未制定，仅有占中重型市场33%的汽车制造商进行了相关承诺（图23）。 如果中国有意保持其在零排放运输方面的领先地位，关键的第一步是宣布至少与其他国家和美国各州类似的强有力零排放卡车目标。

20 https://globaldrivetozero.org/publication/country-policy-targets-briefing

图 23：2020年已作出零排放汽车承诺的汽车制造商所占的区域市场份额

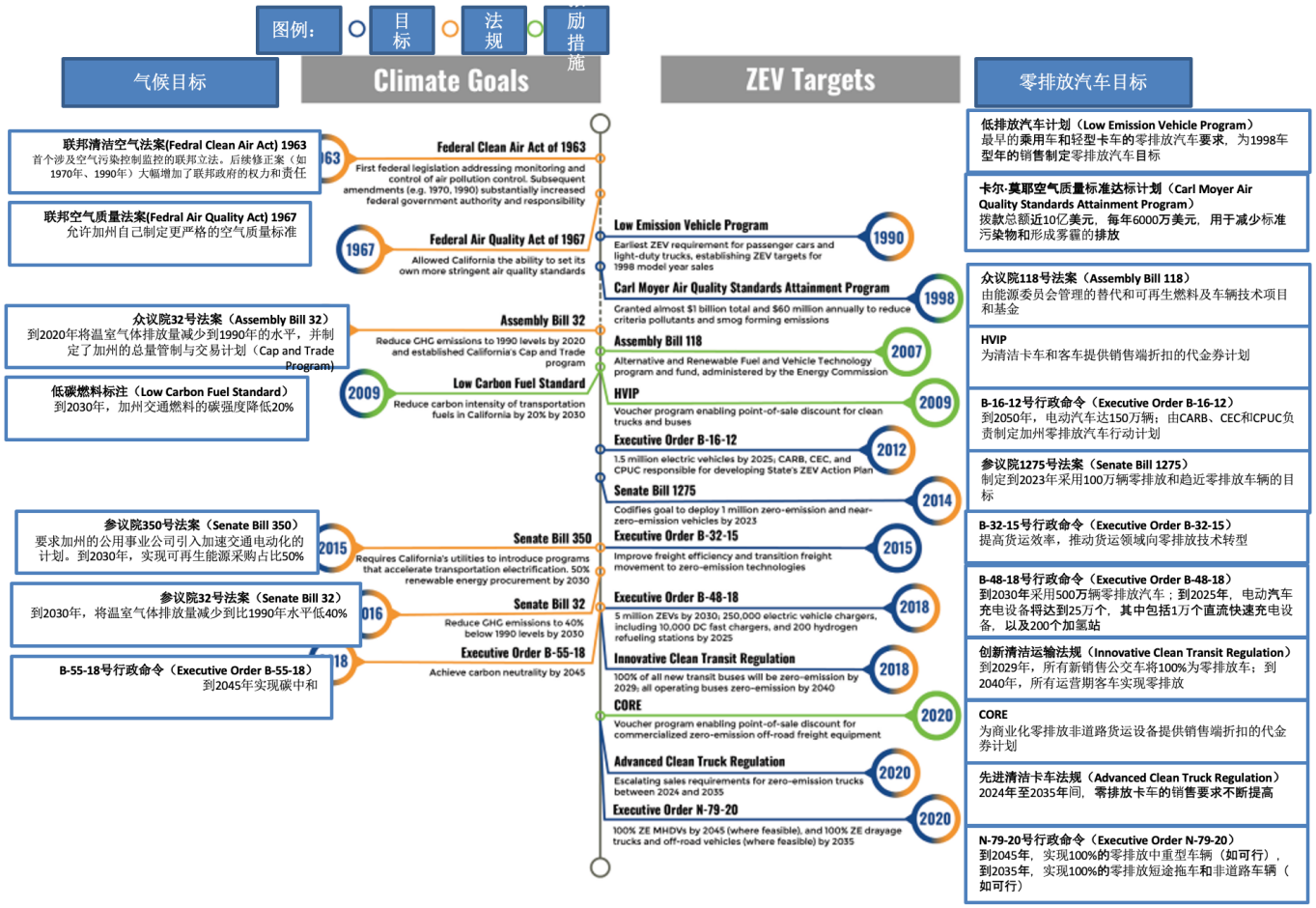


5.2. 实施强有力的法规，提供市场确定性

监管法规是协调清洁交通政策的一个必要方面，因为其为市场参与者提供了长期的确定性，并鼓励投资。为了巩固向零排放卡车的过渡，中国应该通过监管政策支持任何雄心勃勃的零排放卡车目标，这些政策包括管理制造商的销售或库存配额和/或对车队部署车辆的要求。

加州采取的即为这种方法，加州空气资源委员会（CARB）作为加州负责控制空气污染和气候变化的主要监管机构，若支持由立法机构或州长行政命令通过的目标，就会批准将目标纳入法规。图24显示了从1963年到2020年，有关加州卡车和客车目标和法规的进展。

图 24：加州汽车目标和法规时间线（1963-2020）资料来源：CALSTART



2020年，美国加州州长加文·纽森（Gavin Newsom）签署了一项行政命令，目标是到2035年实现乘用车、轻型卡车、短途拖车和非道路车辆销量的100%为零排放车，并且到2045年实现中重型车销量的100%为零排放车（如适用）。同年，CARB最终制定了一项名为“先进清洁卡车规则（Advanced Clean Truck Rule）”的法规，要求从2024年起增加零排放卡车占汽车制造商销售的百分比，最终到2035年达到所有中重型卡车销量的40-75%。该法规的结构是一套积分（credit）和赤字（即负积分，deficit）会计系统，制造商每年在销售道路重型卡车时会产生赤字，但可以通过销售零排放或接近零排放的汽车获得积分来抵消这些赤字。尽管目前还没有生效，但该规定已经在鼓励对零排放卡车的投资，因为2021年至2023年产生的积分可以累积，并在2024年法规正式生效时用于满足相关要求。

CARB目前正在制定一项与《先进清洁卡车（ACT）法规》对应的《先进清洁车队（ACF）法规》，该规则将要求加州车队购买零排放卡车，从而为汽车制造商提供需求的确定性。该法规预计将于2022年最终制定，并将于2023年生效。

如果中国也出台类似的供应侧和需求侧的法规组合，一方面将提升零排放卡车的制造能力，另一方面将增强制造商的信心，使他们相信所生产的零排放卡车将有车队需求。

5.3. 延长有针对性且有时限性的激励措施

截至2021年，中国还没有任何零排放卡车类别实现了与柴油车的拥有总成本（TCO）平价（ICCT，2021c）。在没有额外的激励措施的条件下，所有纯电动卡车类别都将在2030年前实现与柴油车的TCO平价，而燃料电池汽车预计要到2030年后才会实现TCO平价。

这种持续的TCO差距的影响是，零排放卡车的销售仍然与购置的激励措施的可得性挂钩。我们在中国市场上可以看到，随着补贴逐步退坡，零排放卡车的销量已经大幅下降。2017年至2020年，纯电动卡车的补贴下降了83%，同期，其销量下降了92%（图25）。

图 25：中国的零排放卡车和零排放客车补贴和销售情况（资料来源：ICCT, 2021c; ICCT, 2021b）



为了维持和加速零排放卡车的采用，政府可延长并增加对零排放卡车的购置激励，以填补零排放卡车和传统柴油卡车之间的TCO差距，同时设计额外的针对零排放卡车的运营期激励措施。重新引入的激励措施应该既有针对性，又有时间限制。

- 有针对性：激励措施应根据需要将资金用于不同的车辆类别。TCO与柴油车差距较大的重型车辆应按比例给予更多的激励资金，以加快其电动化的时间线。表7显示了加州的HVIP计划如何针对不同的重量等级和燃料类型，向TCO与柴油车差距更大的车辆类别投入更多的资金。此外，政府应参考Beachhead Model of Change中的不

同车辆用途，推出有针对性的激励措施。随着市场进步并实现自我可持续发展，像客车这样的车辆可能需要的激励资金会逐步减少，而卡车可能会需要更高比例的激励资金，因为卡车在商业化的道路上没还未取得类似客车的发展。在加州，加州空气资源委员会决定如何将资金分配到不同的车辆类别，并在年度报告《三年重型投资战略（The Three-Year Heavy-Duty Investment Strategy）》中披露（CARB，2021）。

- 有时间限制：激励措施应该在市场开始自我可持续发展后逐步退坡。这将使市场参与者摆脱对公共资金的依赖，在没有激励的情况下发展出一种经济上可行的商业模式。

表 7：按类别和燃料类型划分的加州HVIP资金金额

重量等级	非弱势群体			弱势群体		
	纯电动	燃料电池	插电混合动力	纯电动	燃料电池	插电混合动力
2b级（85,001-10,000磅）	待定	待定	待定	待定	待定	待定
3级（10001-14000磅）	$45,000	$90,000	$22,500	$49,500	$99,000	$24,750
4-5级（14001-19500磅）	$60,000	$120,000	$30,000	$66,000	$132,000	$33,000
6-7级（19501-33000磅）	$85,000	$170,000	$42,500	$93,500	$187,000	$46,750
8级（33000+磅）	$120,000	$240,000	$60,000	$132,000	$264,000	$66,000
8级拖车（33,000+磅）	$150,000	$300,000	$75,000	$165,000	$330,000	$82,500[21]

过去，中国的零排放卡车激励措施也有针对性和时限，但缺乏通过补充法规来提供市场确定性，促使制造商投资并增加产能。今后，一套全面协调的法规和激励措施将为投资提供市场确定性，并明确激励措施退坡时间表。

5.4. 继续投资于电池电动技术

由于电池电动技术更难以满足长途和重型车辆的需求，燃料电池货运卡车（FCETs）是该车辆类别的一个有前景的长期选项。然而，燃料电池货运卡车的拥有总成本仍比柴油车要高，且预计要到2030年后才能达到总成本平价。而另一方面，所有纯电动货运卡车类别预计将在2025-2035年实现无激励措施的TCO平价。考虑应对气候变化的紧迫性以及中国在电池制造方面的投资能力，在转向更昂贵、技术更不成熟的燃料电池技术之前，一个严谨的零排放卡车路线图将最大限度地在每个卡车类别采用电池电动技术。在投资纯电动货运卡车的同时，继续投资于燃料电池货运卡车的开

21 这些激励金额代表了提供给“完全”零排放卡车制造商的金额，即包括动力传动系统和底盘在内的零排放。对于使用传统底盘和零排放传动系统的“改良”制造商，激励金额会减少50%。

发和早期采用，将使中国实现最快、最具成本效益的向零排放卡车转型。

由于技术不够成熟、氢加气站缺乏以及整个价值链中清洁氢解决方案的高昂成本，在2030年之前，美国、欧洲和中国的燃料电池货运卡车的拥有总成本（TCO）将继续高于柴油同类车（ICF，2019；ICCT，2021c）。2020年一项在美国进行的研究发现，到2030年，加州的8级燃料电池牵引车的TCO仍将比柴油车高23%，而纯电动牵引车的TCO将比柴油车低48%。一项针对中国零排放卡车的类似研究发现，到2030年，燃料电池牵引车的TCO仍将比柴油牵引车贵50万人民币（以2022美元计算，为7.86万美元），而所有纯电动货运卡车类别的TCO将与柴油车持平（ICCT，2021c）。

此外，美国试点和示范项目正在证明纯电动货运卡车能够在重型卡车应用场景中执行任务。在试点和示范项目中，2b-8级纯电动货运卡车已经成功执行了城市、短途和区域运输等应用场景任务，未来的试点将增加重型纯电动货运卡车测试的规模。

随着电池和充电技术不断改进，纯电动货运卡车的续航里程将继续增加，使它们能够以更少的充电需求满足更长的行驶周期。Drive to Zero的Zero-Emission Technology Inventory（ZETI）数据库显示，到2023年，美国和欧洲将有56款纯电动重型卡车型号可用，其中25%的续航里程将超过250英里（400公里）。其中许多重型卡车型号可以在1到3个小时内充满电池容量的80%，这样它们就可以很容易地在基地中完成充电。随着美国各地兆瓦充电系统（MCS）的开发、标准化和投入使用（美国能源部预计需要到2025年），纯电动货运卡车将越来越有能力执行现在为柴油卡车保留的长途卡车任务。作为MCS的替代方案，受电弓充电正在欧洲试点，西门子和斯堪尼亚（Scania）已经在德国道路上合作部署了15个配备受电弓的重型纯电动货运卡车。

纯电动货运卡车的早期成功出现在美国和欧洲，目前采用的零排放卡车中分别有99.5%和99.4%是纯电动货运卡车，涵盖从中型厢式货车到重型8级卡车的所有卡车类别（IEA, 2021b）。其余的零排放卡车为由现代、斯堪尼亚和Paccar制造的重型（7-8级）燃料电池货运卡车，并在示范拖运或区域物流和分销业务中采用。[22]

5.5. 优先考虑零排放尾气排放技术

在未来中重型卡车领域的目标、法规或激励措施中，中国都应该优先考虑“零排放（zero-emission）”尾气技术，而不是“趋近零排放（near-zero）”或“低排放”技术。天然气、混合动力柴油、生物燃料和电燃料发动机等“趋近零排放”或“低排放”技术仍然依赖燃烧作为能源，因此仍然会产生有害污染物，如氮氧化物（NO_x）、硫氧化物（SO_x）、挥发性有机化合物（VOCs）和颗粒物（PM）等，这些污染物对当地的空气质量有不利影响。此外，这些技术并不足以减少温室气体（GHGs）排放，无法满足国际气候目标所需的深度脱碳战略（ICCT，2021c）。

虽然天然气和混合动力技术在短期内可以带来适度的环境收益，但从长期来看，它们无法让交通运输业实现巴黎气候目标。同样，一些生物燃料（指那些由废物资源生成，不会造成由土地用途变化导致的间性接污染排放、不会对土地和粮食生产形成竞争或使用大量淡水资源的生物燃料）充其量可以适度减少温室气体。在最坏的情况下，许多生物燃料在其生命周期中排放的温室气体比传统运输燃料还要多。真正可持续的生物燃料供应有限，不太可能满足大量的运输能源需求。

电燃料（eletro-fuels）是可直接用于现有内燃机的滴入液体或气体燃料，由电解产生的氢气和二氧化碳混合而成。电

22 斯堪尼亚为专注于电池电力技术，选择暂时关闭其燃料电池卡车业务，因为电池技术的市场条件日益成熟且目前氢燃料电池技术经济性不佳。更多信息参见：https://www.scania.com/group/en/home/newsroom/news/2021/Scanias-commitment-to-battery-electric-vehicles.html

燃料可以是一种低碳解决方案，但供应也非常有限，且相较于柴油有很高的价格溢价。到2030年，欧洲的电燃料预计不会低于每升3-4欧元，这比2010-2018年欧盟的平均柴油价格高出130-208%，只有在最佳情况下，预计到2050年才能与化石燃料成本持平（ICCT，2021b）。

因为电池电动和燃料电池技术可以满足许多中重型卡车部门的需求，真正可持续的生物燃料和昂贵的电燃料可能会预留给海运和航空等更难减排的行业，在这些行业，电池技术还不能满足电池重量、能量和功率的要求。

5.6. 利用零排放客车投资加速零排放卡车商业化

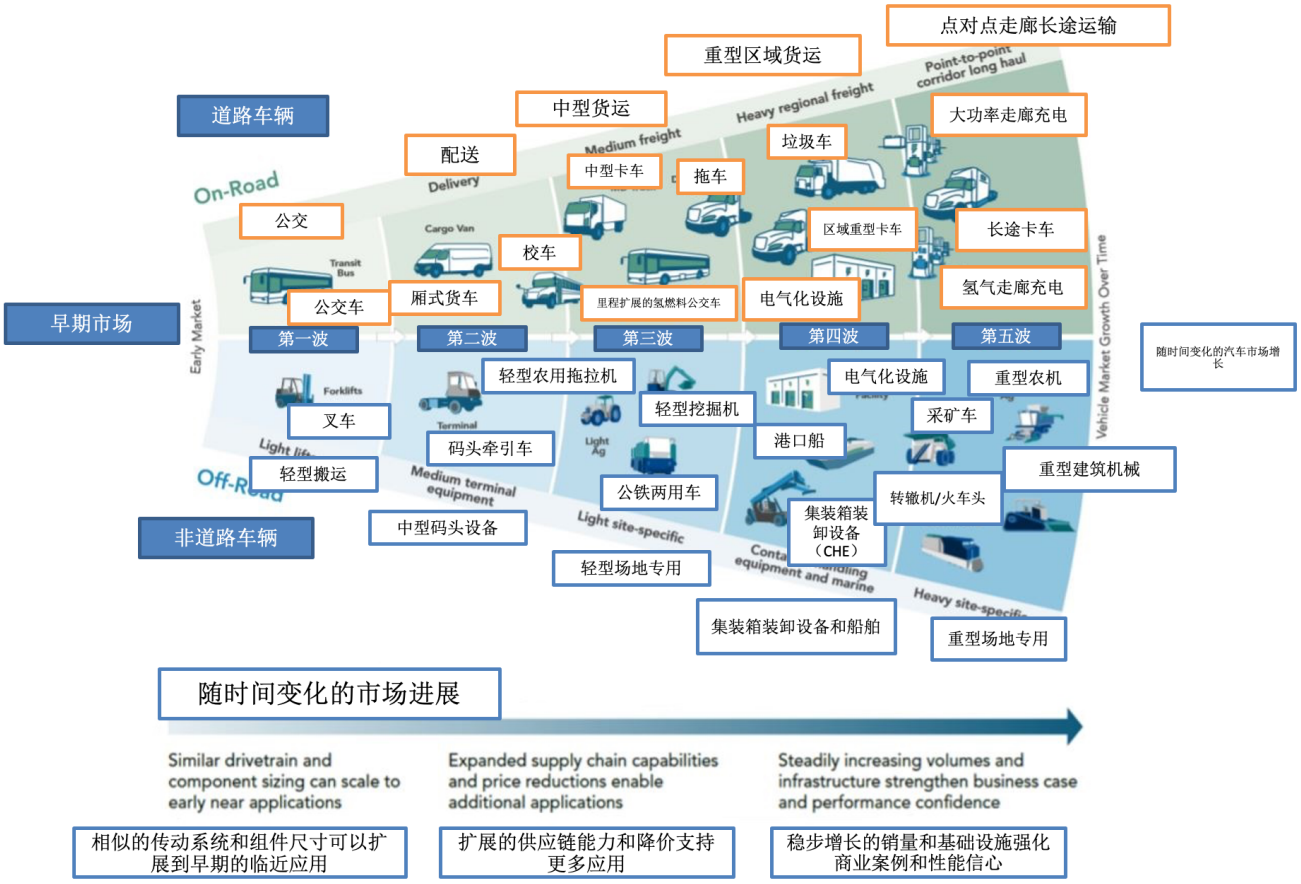
中国是全球零排放客车（ZEBs）的领导者，截至2020年，中国有558,336辆公交车上路，占全球零排放客车的比例超过98%（IEA, 2021b）。2021年，有超过30家不同的客车制造商生产超过150种公交和摆渡车车型。中国能够而且应该利用这种制造和推广零排放客车的经验，加速零排放卡车（ZETs）的商业化。

正如国际公认的“Beachhead Model”所概述的，零排放客车是一种“率先成功的”零排放技术（或称为“Beachhead”），它可以加速更难电动化的车辆类别的发展。电力驱动技术对典型公交运营的适用性促使零排放客车在早期就取得成功。市政公交往往沿着相对较短的既定路线运行，车辆返回基地，可以在夜间充电。这使得零排放客车可以使用更小的电池尺寸，并使用相对便宜的电力充电，这两个因素都会降低零排放客车相对于柴油车的拥有总成本。

从技术角度看[23]，客车与包括卡车在内的其他中重型车辆类别有共同的部件（电池、电动机、电力电子控制装置等），因此零排放客车的开发和商业化有助于为中重型卡车的开发和商业化铺平道路。图26显示了Beachhead Model建立的零排放运输技术的发展路径。每一波连续的浪潮代表一个中重型车辆类别，行驶路线越往后越长且越难以预测，使得后者更难实现电动化。第一批电动化的是“第一波（Wave 1）”车辆类型，其路线可预测且较短，随后通过技术和知识转移影响其他类别商用车的发展，最终实现长途卡车等“第五波（Wave 5）”车辆类型的电动化。

23 我们理解，中国客车电气化的商业模式、政府补贴和利益相关者相互作用与卡车电动化大不相同，但从技术角度吸取的经验仍然具有借鉴性。

图 26： The Beachhead Strategy



中国的公交已经率先在零排放市场获得成功，因此Beachhead Model尤其适用于中国。2019年，中国零排放客车占所有客车的55%以上，而同年，零排放卡车仅占中国卡车总量的0.15%（GIZ, 2020; National Bureau of Statistics of China, 2020）。通过将监管和财政政策的重点转移到零排放卡车，中国可以利用其在客车上的投资，在零排放卡车市场创造类似的增长。这与加州采取的方法相同，加州的商用车监管始于创新清洁交通（ICT）法规，该法规要求到2029年，加州交通运输局的客车采购量的100%应为零排放车。但该法规已转向以零排放卡车为重点的监管，随着2020年《先进清洁卡车（ACT）法规》的通过，ACT法规要求到2035年，该州45%至75%的卡车销量为零排放卡车。

比亚迪、福田和东风汽车是少数几家已经准备好迎接这一战略并乘势而上的中国中重型汽车制造商。这些公司在客车市场上积累了经验和巨大的市场份额，并且最近开始销售采用可换电技术的轻型和中型零排放卡车和重型卡车。通过有针对性的政策，类似的投资可以扩展到重型卡车领域。

6

未来研究展望

本报告尽管对零排放卡车市场、技术和经济可行性以及推荐策略进行了充分讨论，但随着技术和市场的成熟，仍有一些研究和分析的不足可以在未来的研究中弥补。在政策和市场偏好的推动下，预计将有越来越多的零排放卡车项目得到落实，并生成越来越多的真实运营和经济数据，以便我们更好地了解如何实现“净零排放（net-zero）”的未来。尤其重要的是，当技术和数据可用时，扩大数据收集范围、覆盖更多的车辆类别，如垃圾车、长途卡车和拖车等，尤为重要。这些数据将继续帮助我们了解处于Beachhead Strategy后期的纯电动货运卡车的运营表现，并为在中国的应用提供有价值的见解。此外，未来的研究应该分析基础设施成本对TCO的影响，包括与安装、运行和维护相关的成本。在适用的情况下，太阳能和储能系统也可能有助于零排放卡车在中国的经济可行性，这需要在有相关数据时更密切的关注。最后，零排放卡车在美国和欧洲具有本报告中未提及却意义重大的环境和社会经济效益。未来的研究可以探讨零排放卡车如何通过减排、推动行业转型、创造新增就业机会和增强可持续性来造福中国的公共健康和社会韧性 。

参考文献

ACEA. (2021). Truck charging points needed in Europe by 2025 and 2030, per country. Retrieved from https://www.acea.auto/figure/interactive-map-truck-charging-points-needed-in-europe-by-2025-and-2030-per-country

Basma, H., Saboori, A., & Rodríguez, F. (2021). Total Cost of Ownership for Tractor-Trailers in Europe: Battery Electric Versus Diesel. Europe: ICCT.

Bloch-Rubin, T., Gallo, J.-B., & Tomić, J. (2014). Peak Demand Charges and Electric Transit Buses. U.S. Department of Transportation Federal Transportation Agency.

Burnham, A., Gohlke, D., Rush, L., Stephens, T., Zhou, Y., Delucchi, M. A., . . . Boloor, M. (2021). Comprehensive Total Cost of Ownership Quantification for Vehicles with Different Size Classes and Powertrains. Chicago: Argonne National Laboratory. Retrieved from https://publications.anl.gov/anlpubs/2021/05/167399.pdf

CALSTART. (2021). Commercial Vehicle Battery Cost Assessment. Retrieved from https://calstart.org/wp-content/uploads/2021/12/Commercial-Vehicle-Battery-Costs-Industry-Report-Final_12.22.21.pdf

CALSTART. (2021). How Zero-Emission Heavy-Duty Trucks Can Be Part of The Climate Solution. Retrieved from https://globaldrivetozero.org/site/wp-content/uploads/2021/05/How-Zero-Emission-Heavy-Duty-Trucks-Can-Be-Part-of-the-Climate-Solution.pdf

CALSTART. (2022). Zeroing in on ZETs.

CARB. (2021). Retrieved from https://calstartcompany.sharepoint.com/sites/D2ZChina-eTruckpilotsandTCO/Shared%20Documents/General/Task%202/3YP

City of Amsterdam. (2021). Retrieved from https://www.amsterdam.nl/en

Daimler Truck. (2022). Retrieved from https://media.daimlertruck.com/marsMediaSite/en/instance/ko/Daimler-Truck-North-America-NextEra-Energy-Resources-and-BlackRock-Renewable-Power-Announce-Plans-To-Accelerate-Public-Charging-Infrastructure-For-Commercial-Vehicles-Across-The-US.xhtml?oid=5187

FMDT. (2021). The future of mobility is electric. Retrieved from https://www.bmvi.de/SharedDocs/EN/Dossier/Electric-Mobility-Sector/electric-mobility-sector.html

GIZ. (2020). New Energy Buses in China. Retrieved from https://www.changing-transport.org/wp-content/uploads/2020_GIZ_New-Energy-Buses-in-China.pdf

Green Car Congress. (2021). Retrieved from https://www.greencarcongress.com/2022/01/20220120-rhetta.html

Hunter, C., Penev, M., Reznicek, E., Lustbader, J., Birky, A., & Zhang, C. (2021). Spatial and Temporal Analysis of the Total Cost of Ownership for Class 8 Tractors and Class 4 Parcel Delivery Trucks. NREL.

HVIP. (2021). Total Cost of Ownership Estimator. Retrieved from California HVIP: https://californiahvip.org/tco

ICCT. (2019a). Retrieved from https://www.globalfueleconomy.org/media/708302/gfei-working-paper-20.pdf

ICCT. (2019b). Retrieved from https://theicct.org/publication/global-progress-toward-soot-free-diesel-vehicles-in-2019

ICCT. (2021a). A Global Comparison of the Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Combustion Engine and Electric Passenger Cars. Retrieved from https://theicct.org/publication/a-global-comparison-of-the-life-cycle-greenhouse-gas-emissions-of-combustion-engine-and-electric-passenger-cars

ICCT. (2021b). Race to Zero: How Manufacturers are positioned for zero-emission commercial turcks and buses in China. Retrieved from https://theicct.org/sites/default/files/publications/china-race-to-zero-aug2021.pdf

ICCT. (2021c). Total Cost of Ownership for Heavy Trucks in China: Battery-Electric, Fuel Cell Electric, and Diesel Trucks. Retrieved from https://theicct.org/publication/total-cost-of-ownership-for-heavy-trucks-in-china-battery-electric-fuel-cell-and-diesel-trucks

ICCT. (2021d). Zero-emission integration in heavy-duty vehicle regulations: A global review and lesson for China. Retrieved from https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/12/china-hdv-reg-zev-review-sep21.pdf

ICF. (2019). Comparison of Medium and Heavy Duty Technologies in California. Retrieved from https://caletc.aodesignsolutions.com/assets/files/Summary-for-Policymakers_FINAL.pdf

IEA. (2021a). EV Outlook 2021. Retrieved from https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021

IEA. (2021b). Global EV Outlook 2020. Retrieved from https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020

IEA. (2021c). IEA EV Policy Explorer. Retrieved from https://www.iea.org/articles/global-ev-policy-explorer

ITF. (2019). Retrieved from https://www.oecd-ilibrary.org/transport/itf-transport-outlook-2019_transp_outlook-en-2019-en

Khanna, N. L. (2021). Near and long-term perspectives on strategies to decarbonize China's heavy-duty trucks through 2050.

Liu, J. L., & Danilovic, M. (2021). EXPLORING BATTERY SWAPPING FOR HEAVY TRUCKS IN CHINA 1.0. Retrieved from https://hh.se/download/18.7b11fe917c2ac07303bf9d3/1632994342544/Sweden-China%20Bridge%20-%20Exploring%20Battery%20Swapping%20for%20Heavy%20Trucks%20in%20China%201.0%5B68%5D.pdf

Mulholland, E. (2022). Cost of Electric Commercial Vans and Pickup Trucks in the United States through 2040. ICCT.

National Bureau of Statistics of China. (2020). China Statistical Yearbook 2020. Retrieved from https://www.statista.com/statistics/278424/amount-of-trucks-in-china

OZEV. (2021). Plug-In Vehicle Grant. Retrieved from https://www.gov.uk/plug-in-car-van-grants

Prohaska, R., Simpson, M., Ragatz, A., Kelly, K., Smith, K., & Walkowicz, K. (2016). Field Evaluation of Medium-Duty Plug-in Electric Delivery Trucks. NREL.

Traton. (2021). The TRATON GROUP, Daimler Truck, and Volvo Group sign joint venture agreement for European high-performance charging network. Retrieved from https://traton.com/en/newsroom/press_releases/press-release-16122021.html

Vijayagopal, R., & Rousseau, A. (2021). Electric Truck Economic Feasibility Analysis. World Electric Vehicle Journal.

Welch, D., Façanha, C., Kroon, R., Bruil, D., Jousma, F., & Weken, H. (2020). Moving Zero-Emission Freight toward Commercialization.

Xue, L. (2021). Technology Pathways to Decarbonize China's Heavy-Duty Trucks. Retrieved from https://thecityfix.com/blog/technology-pathways-to-decarbonize-chinas-heavy-duty-trucks

附录一

TCO成本和结果

表 I-1: 不同文献的TCO分析所使用的相关成本汇总

车辆分类	燃料类型	MSRP	燃料成本	成本	折现率	其他成本	地区	文献来源
长途牵引车								
8级	柴油	$150,440 (2020) $164,000 (2030)	$3.23-$4.83/加仑	$0.337/英里	9.5%	残值、充电基础设施成本、注册税和所有权税，固定的年度道路使用费，基于距离的过路费	欧洲	Basma, Saboori, & Rodríguez, 2021
	电动	$520,300 (2020) $186,630-$226,220 (2030)	$0.11-$0.16/千瓦时	$0.241/英里				
	柴油	$165,000 (2018) $175,000 (2025) $159,000 (2050)	$1.5-$4/加仑 (2018) $1.6-$4.5/加仑(2025) $1.8-$4.6/加仑(2050)	$0.075-$0.301/英里	3% 和7%	残值、有效载重损失成本、税收、驾驶员工资和福利、保险、许可证、通行费、停留时间（卡车在工作期间但不在运输货物的时间，即加油/充电时间、装卸设备时间）	美国	Hunter, et al., 2021
	电动	$579,000-$816,000 (2018) $316,000-$423,000 (2025) $228,000-$281,000 (2050	$0.07-$0.4/千瓦时 (2018) $0.07-$0.5/千瓦时 (2025) $0.07-$0.45/千瓦时(2050)	$0.06-$0.143/英里				

车辆分类	燃料类型	MSRP	燃料成本	成本	折现率	其他成本	地区	文献来源
8级	柴油	$160,000 (2019) $171,000 (2030)	$232,180 (2019) $301,800 (2030)	$69,920	5%	残值、加油/充电基础设施成本、纯电动货运卡车激励措施	美国加州	ICF, 2019
	电动	$375,000 (2019) $191,153 (2030)	$63,226 (2019) $68,475 (2030)	$63,665 (2019) $31,830 (2030)				
	柴油	$143,500	$2.5-$4/加仑	-	7%	-	美国	Vijayagopal & Rousseau, 2021
	电动	$496,800	$0.1-$0.3/千瓦时	-				
短途牵引车								
8级	柴油	$153,000 (2018) $163,000 (2025) $146,000 (2050)	$1.5-$4/加仑(2018) $1.6-$4.5/加仑(2025) $1.8-$4.6/加仑(2050)	$0.075-$0.301/英里	3% 和7%	残值、有效载重损失成本、税收、驾驶员工资和福利、保险、许可证、通行费、停留时间（卡车在工作期间但不在运输货物的时间，即加油/充电时间、装卸设备时间）	美国	Hunter, et al., 2021
	电动	$374,000 (2018) $223,000 (2025) $171,000 (2050)	$0.07-$0.4/千瓦时 (2018) $0.07-$0.5/千瓦时 (2025) $0.07-$0.45/千瓦时 (2050)	$0.06-$0.143/英里				
	柴油	$110,000 (2019) $118,000 (2030)	$165,600-$166,500 (2019) $213,350-$214,500 (2030)	$51,817-$54,971 (2018) $49,473-$54,971 (2030)	5%	残值、加油/充电基础设施成本、纯电动货运卡车激励措施	美国加州	ICF, 2019
	电动	$250,000 (2019) $133,100 (2030)	$43,300-$50,800 (2019) $46,970-$62,100 (2030)	$45,047-$50,052 (2019) $22,523-$25,026 (2030)				
8级	柴油	$122,300	$2.5-$4/加仑	-	7%	-	美国	Vijayagopal & Rousseau, 2021
	电动	$296,200	$0.1-$0.3/千瓦时	-				

车辆分类	燃料类型	MSRP	燃料成本	成本	折现率	其他成本	地区	文献来源
垃圾车								
8级	柴油	$150,000 (2019) $160,970 (2030)	$210,370 (2019) $267,000 (2030)	$332,990	5%	残值、加油/充电基础设施成本、纯电动货运卡车激励措施	美国加州	ICF, 2019
	电动	$352,500 (2019) $191,520 (2030)	$52,550 (2019) $56,560 (2030)	$326,080 (2019) $163,040 (2030)				
城市/区域配送								
8级	柴油	$96,800	$2.5-$4/加仑	-	7%	-	美国	Vijayagopal & Rousseau, 2021
	电动	$221,800	$0.1-$0.3/千瓦时	-				
6/7级	柴油	$63,000 (2019) $66,000 (2030)	$75,280-$86,840 (2019) $96,977-$111,869 (2030)	$32,982-$38,479 (2019) $32,982-$38,479 (2030)	5%	残值、加油/充电基础设施成本、纯电动货运卡车激励措施	美国加州	ICF, 2019
	电动	$167,000-$250,000 (2019) $89,920 - $133,100 (2030)	$19,868-$21,918 (2019) $21,225-$23,202 (2030)	目前: $30,031 - $35,036 2030: $15,016 - $17,518				
	柴油	$2.5-$4/加仑	$2.5-$4/加仑	-	7%	-	美国	Vijayagopal & Rousseau, 2021
	电动	$138,000	$0.1-$0.3/千瓦时	-				
	柴油	-	$0.507/英里	-	-	-	美国华盛顿州	Prohaska, et al., 2016
	电动	-	$0.159/英里	-	-	-	美国华盛顿州	Prohaska, et al., 2016

车辆分类	燃料类型	MSRP	燃料成本	成本	折现率	其他成本	地区	文献来源
4/5级	柴油	$48,000 (2019) $51,000 (2030)	$69,630 (2019) $89,700 (2030)	$41,315	5%	Residual value, fueling/ charging infrastructure cost, incentives of BETs	California, US	ICF, 2019
	电动	$100,000-$150,000 (2019) $53,000-$79,920 (2030)	$21,830 (2019) $23,310 (2030)	$ 32,810 (2019) $16,400 (2030)				
	柴油	$45,000 (2018) $49,000 (2025) $42,000 (2050)	$1.5-$4/加仑(2018) $1.6-$4.5/加仑(2025) $1.8-$4.6/加仑(2050)	$0.057-$0.233/英里	3% 和 7%	残值、有效载重损失成本、税收、驾驶员工资和福利、保险、许可证、通行费、停留时间（卡车在工作期间但不在运输货物的时间，即加油/充电时间、装卸设备时间）	美国	Hunter, et al., 2021
	电动	$83,000 (2018) $45,000 (2025) $36,000 (2050)	$0.07-$0.4/千瓦时 (2018) $0.07-$0.5/千瓦时 (2025) $0.07-$0.45/千瓦时 (2050)	$0.046-$0.111/英里				
	柴油	$59,100	$2.5-$4/加仑	-	7%	-	美国	Vijayagopal & Rousseau, 2021
	电动	$95,900	$0.1-$0.3/千瓦时	-				

车辆分类	燃料类型	MSRP	燃料成本	成本	折现率	其他成本	地区	文献来源
皮卡/SUV								
Class 2b/3	柴油	$48,600-$51,300 (2020) $50,000-$53,000 (2030) $53,000-$56,000 (2040)	$12,800-$15,900	$11,700-$12,300	5%	残值、加油/充电基础设施成本、保险、其他间接车辆成本	美国	Mulholland, 2022
	电动	$47,000-$80,000 (2020) $39,000-$60,000 (2030) $38,000-$53,000 (2040)	$3,500-$5,200	$6,100-$6,900	5%			
	柴油	$27,500-$39,000 (2019) $28,700-$40,700 (2030)	$36,800-$42,300 (2019) $47,400-$54,000 (2030)	$52,500	5%	残值、加油/充电基础设施成本、纯电动货运卡车激励措施	美国加州	ICF, 2019
	电动	$75,000-$100,000 (2019) $40,000-$53,160 (2030)	$13,880-$15,890 (2019) $14,200-$16,850 (2030)	$36,000 (2019) $18,000 (2030)	5%			

表 I-2: 文献综述中按车辆类别和美国分类的TCO结果

车辆分类	TCO结果	地区	参考文献
长途牵引车			
8级	纯电动货运卡车TCO: $600,000-$850,000 (2020); $350,000-$500,000 (2030) 柴油车 TCO: $400,000-$600,000 (2020); $400,000-$550,000 (2030) 在燃料成本固定和无激励的情况下，纯电动货运卡车在2024-2029年间达到TCO平价。	欧洲	Basma, Saboori, & Rodríguez, 2021
	纯电动货运卡车TCO: $1.55-$2.8/英里 (2018); $1.25-$2.1/英里 (2025); $1.15-$1.7/英里 (2050) 柴油车TCO: $1.18-$1.38/英里 (2018); $1.17-$1.4/英里 (2025); $1.14-$1.39/英里 (2050) 单班盈亏平衡价格：当柴油价格为4美元/加仑时为$0.6/gge (2018); $1.4-$4.9/gge (2025); $3-$6.7/gge (2050) 多班盈亏平衡价格: 2018年无法实现盈亏平衡; 当柴油价格为4美元/加仑时为$0.2/gge (2025); 当柴油价格大于等于3美元/加仑$0.7-$2.6/gge (2050)	美国	Hunter, et al., 2021
	纯电动货运卡车 TCO: $195,200 (2019); $174,500 (2030) 柴油车TCO: $414,600 (2019); $491,800 (2030)	美国加州	ICF, 2019
	只有当柴油价格为3美元/加仑、电池组成本降至100美元/千瓦时，或者柴油价格升至4美元/加仑以上、电池成本低于200美元/千瓦时，8级卡车才具有成本效益。	美国	Vijayagopal & Rousseau, 2021
短途牵引车和拖车			
8级	纯电动货运卡车TCO: $1.16-$1.7/英里 (2018); $1-$1.47/英里 (2025); $0.91-$1.33/英里 (2050) 柴油车TCO: $1.03-$1.27/英里 (2018); $1.02-$1.29/英里 (2025); $0.98-$1.25/英里 (2050) 单班盈亏平衡价格：$0.6-$5.1/gge (2018); $3.8-$8.4/gge (2025); $5.1-$9.8/gge (2050). 多班盈亏平衡价格: 当柴油价格为4美元/加仑时为$2.2/gge (2018); $0.2-$4.8/gge (2025); $0.5-$5.3/gge (2050)	美国	Hunter, et al., 2021
	纯电动货运卡车TCO: $122,700-$115,500 (2019); $141,800-$159,100 (2030) 柴油车TCO: $298,700 - $302,800 (2019); $349,800 - $356,500 (2030)	美国加州	ICF, 2019
	只有当柴油价格为3美元/加仑、电池组成本降至100美元/千瓦时，或者柴油价格升至4美元/加仑以上、电池成本低于150美元/千瓦时，8级卡车才具有成本效益。	美国	Vijayagopal & Rousseau, 2021
垃圾车			
8级	纯电动货运卡车 TCO: $528,600 (2019); $373,800 (2030) 柴油车 TCO: $696,900 (2019); $764,500 (2030)	美国加州	ICF, 2019

车辆分类	TCO结果	地区	参考文献
城市/区域配送			
8级	只有当柴油价格为2.5美元/加仑、电池组成本降至100美元/千瓦时，或者柴油价格升至4美元/加仑以上、电池成本低于180美元/千瓦时，8级卡车才具有成本效益。	美国	Vijayagopal & Rousseau, 2021
6/7级	纯电动货运卡车 TCO: $78,200-$170,000 (2019); $77,000-$137,100 (2030) 柴油车TCO: $155,300-$172,400 (2019); $179,100-$199,600 (2030)	美国加州	ICF, 2019
4/5级	纯电动货运卡车 TCO: $1.1-$1.8/英里 (2018); $0.95-$1.6/英里 (2025); $0.9-$1.55/英里 (2050) 柴油车TCO: $1.05-$1.25/英里 (2018); $1.03-$1.26/英里 (2025); $1-$1.23/英里 (2050) 单班盈亏平衡价格：$2.4-$7.9/gge (2018); $7.9-$13.6/gge (2025); $9.3-$15.3/gge (2050). 多班盈亏平衡价格: 无法实现盈亏平衡	美国	Hunter, et al., 2021
	在柴油成本为3美元/加仑的情况下，如果电池组成本低于125美元/千瓦时、年里程为4800英里时，或在年里程为9000英里时的成本低于150美元/千瓦时，则可以实现4级配送卡车的TCO平价。在770瓦时/英里的情况下，4级配送卡车每英里可节省0.16美元。以每年1.8万英里计算，运营商每年可节省2900美元。	美国	Vijayagopal & Rousseau, 2021
	纯电动货运卡车 TCO: $71,600 (2019); $87,000 (2030) 柴油 TCO: $147,200 (2019); $169,400 (2030)	美国加州	ICF, 2019
皮卡/SUV			
2b/3级	纯电动货运卡车TCO: $69,000-$107,000 柴油车 TCO: $82,000-$88,000 到2035年，续航里程为100-400英里的纯电动货运卡车可以实现TCO平价。到2030年，纯电动货运卡车投资回收期将少于3年	美国	Mulholland, 2022
	纯电动货运卡车s have cheaper TCO in 2020 with incentives. In 2030, without large incentives, 纯电动货运卡车s will have TCO of $64,000 while that for 柴油 counterparts will be $130,000. 在有激励措施的情况下，2020年纯电动货运卡车的TCO更低。到2030年，没有大规模的激励措施的情况下，纯电动货运卡车的TCO将为6.4万美元，而柴油对应的TCO将为13万美元。	美国加州	ICF, 2019

图 I-1: 纯电动货运卡车与基准卡车当前和未来的MSRP预测（美元）（含数据来源）



图 I-2: 纯电动货运卡车与基准卡车当前和未来燃料价格预测（美元/英里）（含数据来源）

