

快递行业电动化 转型与运输效率 优化的减排潜力

DRIVING EMISSIONS
REDUCTIONS IN
EXPRESS DELIVERY
INDUSTRY: POTENTIAL
OF ELECTRIFICATION
AND TRANSPORT
OPTIMIZATION



研究团队

同济大学：袁泉、俞诚成、林佳毅、覃正桃、闫丛笑、马旭
绿色和平：朱伟望、李嘉铖、夏怡雯

编辑与校对

王乐 闫咏涵

鸣谢

感谢以下专家对报告内容的支持（按姓氏首字母排序）：

巢 渊 上海市减污降碳管理运行技术中心
高欣甜 清华大学
沈 寅 上海市减污降碳管理运行技术中心
王雯雯 能源与交通创新中心
李星宇、刘爽、马倩儒、王昕楠、吴浩、袁瑛、赵雨晨 绿色和平

著作权及免责声明

本报告为绿色和平于环保公益工作中形成的资料。阅读本研究报告即表示您已阅读、理解并接受下列著作权和免责声明条款的约束。请认真阅读。

1. 本报告由绿色和平和同济大学基于在上海取得的临时活动备案共同发布，除标明引用的内容外，本报告内所有内容（包括文字、数据、图表）的著作权归绿色和平和同济大学所有。
2. 本报告仅作环保公益和信息分享目的使用，不作为公众及任何第三方的投资或决策的参考，绿色和平、同济大学亦不承担因此而引发的相关责任。
3. 本报告为绿色和平和同济大学于2024年4月至2025年1月期间内整理研究产出的成果。绿色和平、同济大学不对报告中所含涉信息的及时性、准确性和完整性作担保。
4. 本报告中所提及相关企业案例仅为论证本报告之观点，不涉及对于企业品牌、商品及服务背书或推销的目的。

发布时间：2025年4月



目录

执行摘要	1
主要研究发现	2
总结与建议	4
第一章 研究背景	5
第二章 方法论	7
2.1 三级快递网络运输模型	8
2.2 PEMS实测数据采集与分析及MOVES模型本地化修正 ..	9
2.3 电动化减碳效益评估	10
2.4 共享集散中心 (UFCC) 网络优化模型	10
2.5 综合减排矩阵与未来情景预测评估	11
第三章 运输环节排放特征与因素分析	12
3.1 基于PEMS实测数据的MOVES模型本地化校正	13
3.2 基础场景碳排放计算结果与特征分析	15
3.3 基于控制变量法的影响因素分析	16
第四章 不同场景下的减排方案分析	19
4.1 共享集散中心网络优化方案评估	20
4.2 综合矩阵优化场景评估	22
4.3 结合政策的未来综合矩阵场景评估	23
第五章 总结与建议	25
5.1 研究发现	26
5.2 建议	26
附录	28
参考文献	42

执行摘要



快递行业低碳转型，运输环节减排是关键

中国快递行业在飞速发展的同时，也面临日益严峻的环境压力，尤其是碳排放问题。绿色和平此前研究显示，2017年至2022年，快递行业总碳排放从1837万吨激增至5565万吨，增长超过200%。2022年，运输环节的碳排放占比超过60%，跨省干支线运输尤为突出。在干线运输中，公路运输排放量最高，达1874万吨。因此，推动快递行业低碳转型，必须聚焦运输环节的减排潜力。

本研究旨在探索快递行业运输环节的减碳路径。为此，研究首先基于真实的快递运输模式，构建了三级物流网络模型。其次，采用PEMS (Portable Emissions Measurement System, 便携式排放测量系统) 排放因子实测评估不同的运输车辆类型的排放特性，并对MOVES (Motor Vehicle Emission Simulator, 机动车排放模拟模型) 进行本地化校正，以适应中国物流运输的实际工况和车辆特性，提高模型测度的准确性，帮助准确量化各类运输活动的碳排放特征。在设定基础场景后，分析运输环节的排放特征和影响因素，定位出两种潜在的减碳路径——改变

能源类型和优化中转效率。并基于两种减碳路径，研究构建出对应两种方案的综合矩阵场景，最终，量化分析出不同组合方案下的减排潜力，为快递行业开展运输环节的低碳转型提供科学依据与实践建议。

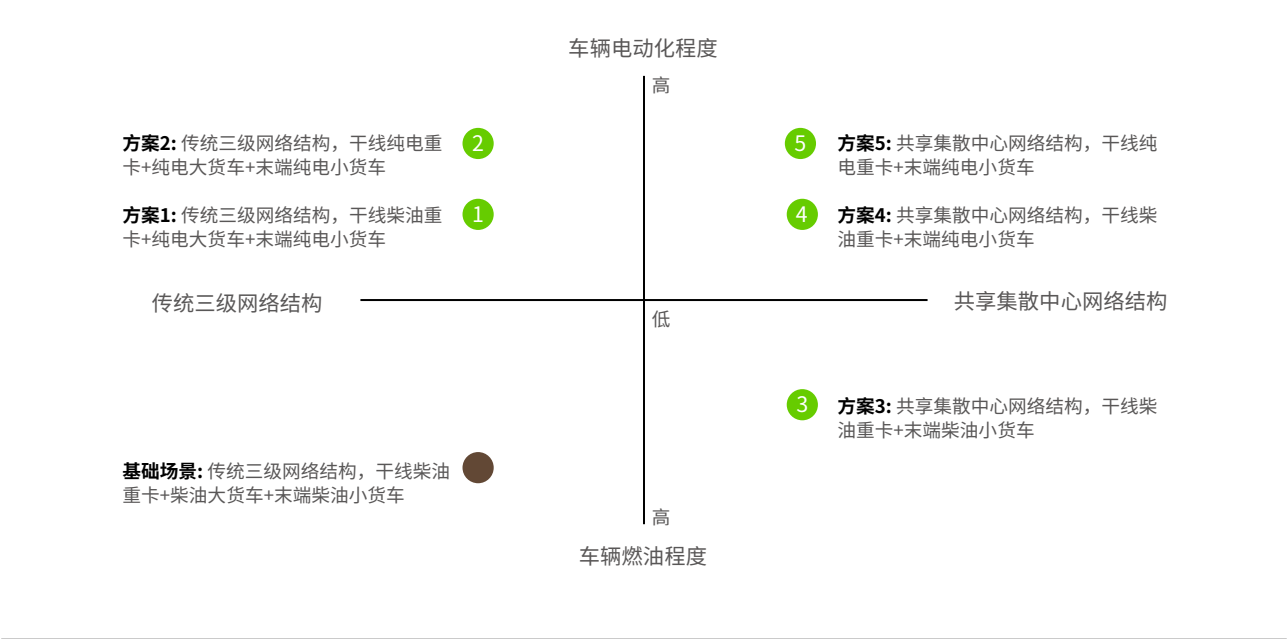
主要研究发现

两种潜在减碳路径：能源类型转型与优化运输中转效率

本研究对MOVES (机动车排放模拟模型) 进行了本地化校正，该模型能有效提高排放测算精度。研究通过校正后的模型建立影响因子库，并发现车辆类型、排放标准、能源类型三个因子是主要的排放影响因素。随后，研究在采用校正后的模型计算得到的基础场景上，进一步使用控制变量法，发现增强运输集约化程度及改变能源类型对运输车辆碳排放呈显著影响。

根据结果及相关文献研究，研究提出两种可能的快递行业运输环节减碳路径，一是通过优化运输中转效率，减少中转环节，替代传统的三级物流网络；二是通过能源结构转型，采用电动货车等新能源车辆，从根本上推动快递行业的绿色发展。

快递运输环节减碳方案矩阵情景设计 | 执行摘要图 1



1. 所有减碳路径组合矩阵情景中，采用电动化转型能实现最大的减排效益

基于两种潜在的减碳路径，研究对相应的两个解决方案进行了场景和参数设置。在能源结构转型方案中，在运输过程的不同阶段进行车辆能源类型的替代，逐步用电动大、小货车及重卡替代传统燃油货车；在优化运输中转效率路径中，研究提出共享集散中心（Urban Freight Consolidation Center, UFCC）网络优化的方案，并进一步将UFCC网络优化方案与能源转型方案进行组合并设计强度变化，得到减碳矩阵情景，以及结合现行政策设计得到2030年未来矩阵场景。

通过与基础场景对比发现，在仅替换能源类型的情景中，全程采用纯电车可以减少41.78%的碳排放，是本次研究中最具减排效益的方案（即方案2）。其次为设置UFCC并采用“干线柴油重卡+末端纯电小货车”的模式（即方案4），该方案减少了30.38%排放；再次为设置UFCC，并采用“干线纯电重卡+末端纯电小货车”模式（即方案5），减排30.35%。

在2030年场景中，相较于未来基础场景，保持三级运输网络结构不变并全程采用新能源车（电车）的方案仍为最具减排效益的方案，该方案可减少55.26%

的排放；其次为设置UFCC，并采用“干线纯电重卡+末端纯电小货车”模式，减排45.26%；再次为不采用UFCC，且除干线以外的运输采用电动车替换，该方案可减少32.81%的排放。综合来看，全程纯电替代方案是最直接有效的减碳策略，同时，在新能源技术尚未普及的过渡期，可以继续通过提升运输集散效率来实现减碳目标。

2. 以UFCC网络优化方案为代表的优化运输中转效率的路径能够减少中转环节及运输距离，具有一定的减碳潜力

在优化运输中转效率的减碳路径中，本研究创新地提出了共享集散中心（Urban Freight Consolidation Center, UFCC）网络优化的方案。研究结果表明，该方案较基础场景而言，能减少14.95%的碳排放，具有一定的减排效果。共享集散中心作为一个高度优化的共享整合物流枢纽，通过优化周转效率和集散效率来提高快递运输系统的整体性能，通过机器学习算法匹配目标最优的车辆配置和调度安排，能够减少运输频次和等待时间，从而减少能源浪费。



总结与建议

1. 加快推进车队能源转型，实现新能源技术在货运领域的广泛应用

车队能源转型是货运行业实现深度减排的核心途径。建议企业尽快启动能源转型计划，优先采用电能或氢能等新能源驱动的车辆逐步替代传统燃油车辆，降低碳排放强度。企业应全面评估现有车队的技术改造可行性，制定分阶段替换计划，并通过与新能源供应商和充电设施运营商的合作，加速配套基础设施建设，确保新能源车辆的高效运营和推广。

2. 探索货运中转优化方案，推动资源高效整合与运输网络优化

面对新能源车辆技术尚存的瓶颈（如续航能力不足、补能方案不完善），企业应呼吁行业内的统筹、协调与协作，共同推动物流资源的优化配置。例如通过建设区域性货运枢纽，整合各企业的货物，进行更集约的分拣处理，提高车辆的装载率和运输效率。这种优化方案能够减少车辆空载率和重复运输带来的能源浪费，实现减排效益。此外，政府和行业协会的支持与参与，能推动这些枢纽的建设，适宜的政策激励和资源调度将促进行业内各企业的广泛合作，以实现更加

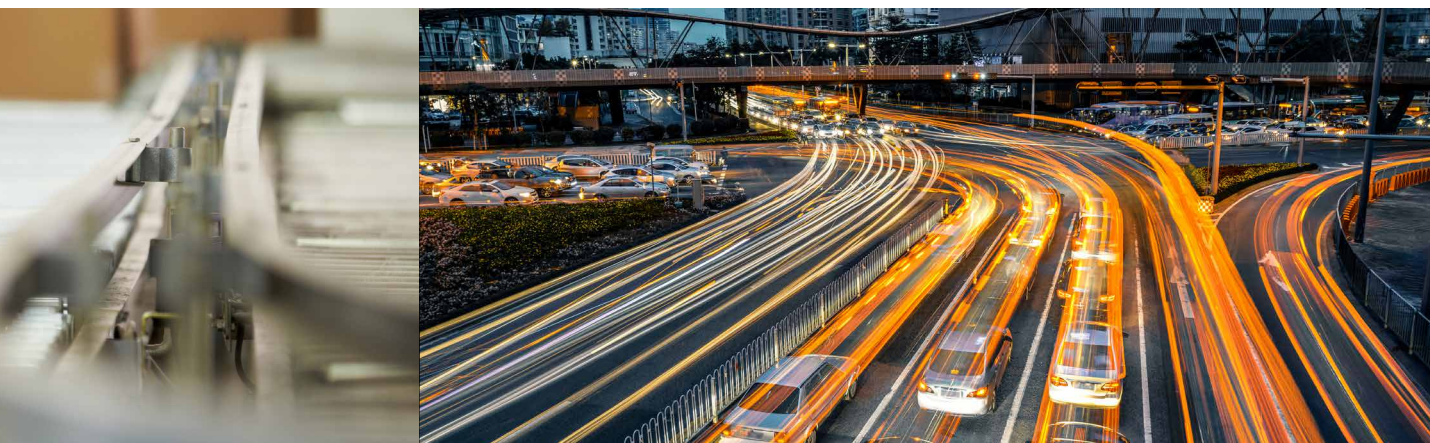
合理的区域枢纽布局和资源利用，进一步提升整体行业的减碳效果。

3. 借助物联网和大数据技术提升运输效率，推动绿色管理与智能物流运营

企业应充分利用物联网（IoT）技术和大数据分析平台，实时采集和监控运输过程中的车辆状态、路况信息和交通状况，动态调整优化配送路径，减少运输中的能源浪费和碳排放。例如，通过避开高峰拥堵区域、根据车辆类型调整能源使用策略等方式，实现精准化绿色管理。长期积累和分析物流数据也可为企业制定智能物流管理策略提供支撑，逐步形成绿色、高效、可持续的物流运营模式。

4. 全面推动本地货运排放数据库建设，支持科学政策制定与行业精准减排

建议货运行业与学术机构密切合作，共同构建覆盖全面且科学的本地货运排放数据库。数据库应涵盖不同车型、道路条件、货物种类、运输距离、季节性和区域性差异等多维度数据，以真实反映中国货运活动的复杂性和多样性。系统性数据库不仅有助于精确量化运输环节的碳排放特征，还可为政府部门制定科学的减碳减排政策提供可靠依据，为推动货运行业的绿色低碳转型和实现国家“双碳”目标奠定坚实基础。



第一章

研究背景



快递行业是支持中国近10亿的网络购物用户日常消费的重要基础设施^[1]。旺盛的互联网消费活动给行业带来了持续的发展，2023年中国快递行业业务量连续十年位居世界第一^[2]；2024年，中国快递业务继续稳步增长，业务量突破1000亿件的时间较2023年提前了71天^[3]。同年，中国快递业务量达到1745亿件，同比增长21%，快递业务收入1.4万亿元，同比增长13%^[4]。

近年来，快递行业持续增长而衍生的环境问题引起了广泛讨论，其中与快递包装相关的废弃物治理问题在政策和企业治理层面获得了极高的关注。包装问题之外，快递行业在碳排放上的问题与减排潜力逐步获得关注。

目前，快递行业的发展与快递业务产生的排放并未脱钩，根据绿色和平2023年发布的《中国快递行业的碳排放研究发现摘要》，从2017到2022年，中国快递行业的碳排放总量显著增长，且增速迅猛^[5]。从总量上看，中国快递行业在2017年的二氧化碳排放当量为1837万吨，到2022年，这一数字激增到5565万吨，五年间增长超过200%。这些碳排放主要来自包装、仓储和运输三个环节，其中运输环节是快递行业碳排放的主要来源，其排放占总碳排放的60%以上。

在运输环节中，几乎全部的碳排放来自于异城（跨省市）快递场景下的干-支线运输，其中公路和航空运输的减排是快递行业减排的重中之重。2022年，在快递行业的干线运输中，公路运输的碳排放当量最高，达1874万吨；紧随其后的是航空运输的碳排放当量，达1376万吨，这两者在干线运输中碳排放当量的占比分别为56.9%和41.8%。

快递是链接生产和消费的重要环节，低碳的快递业务对于赋能上游和下游的绿色转型和协同减碳具有重要意义。对于上游生产端，绿色快递有助于赋能其生产端企业范围3的直接减排；对于下游消费端，快递的绿色化是推动绿色消费发展不可或缺的环节。因此，快递行业应该更积极地加入实现双碳目标的队伍，系统、科学地研究和落实减排举措。



第二章

方法论



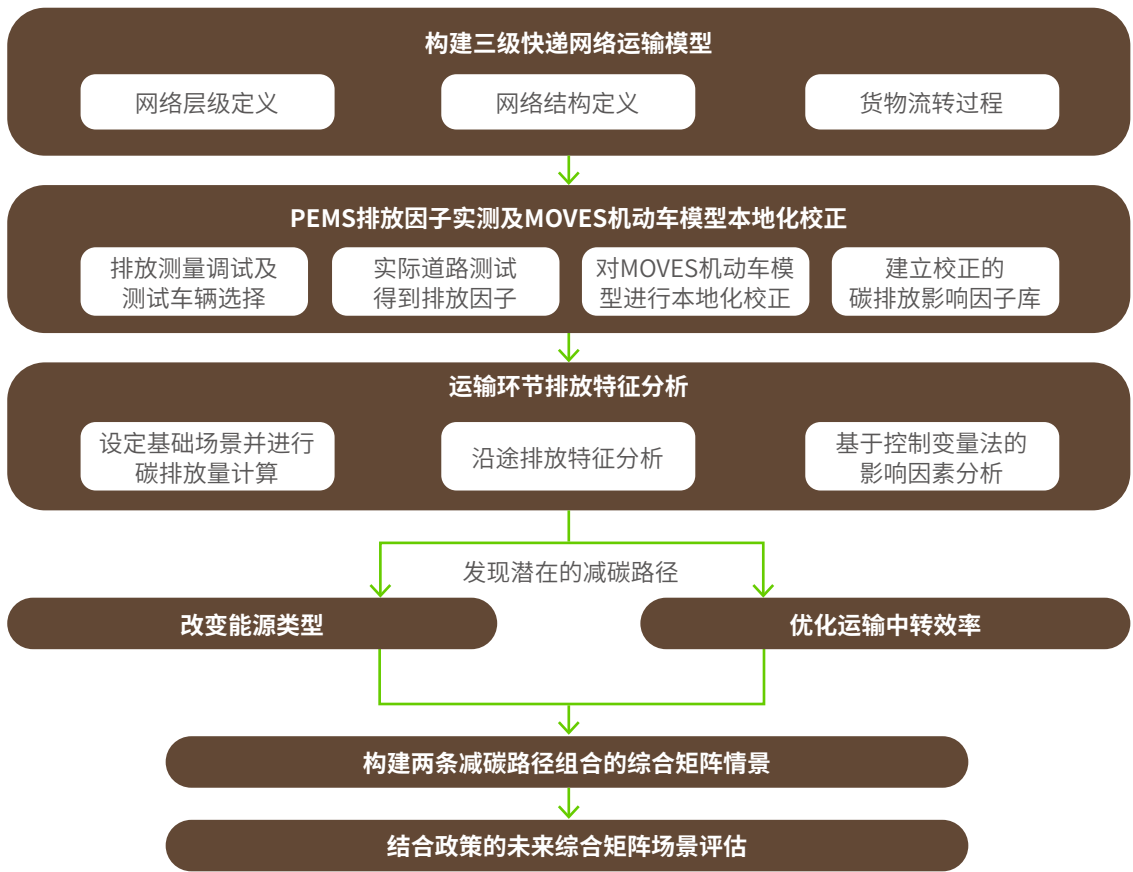
为深入探索快递行业运输环节的减碳路径，本研究围绕快递运输环节的碳排放特征，建立了多层次、系统化的研究框架。首先，研究根据真实快递运输模式构建了三级物流网络模型；其次，采用PEMS因子实测方法评估不同运输车型的排放特性，对MOVES机动车模型进行本地化校正¹；在设定基础情景后，对运输环节的排放特征和影响因素进行分析；最终，研究构建出基于车型优化减碳效益模型和共享集散中心优化模型的综合矩阵情景，探索快递运输阶段的减排潜力，为快递行业低碳发展提供理论支撑和方法指导。本报告的研究方法框架见图1。

2.1 三级快递网络运输模型

研究通过构建三级快递网络运输模型，总结出物流节点间的动态联系和运输路径，以追踪和分析快递运输全过程^[5]。

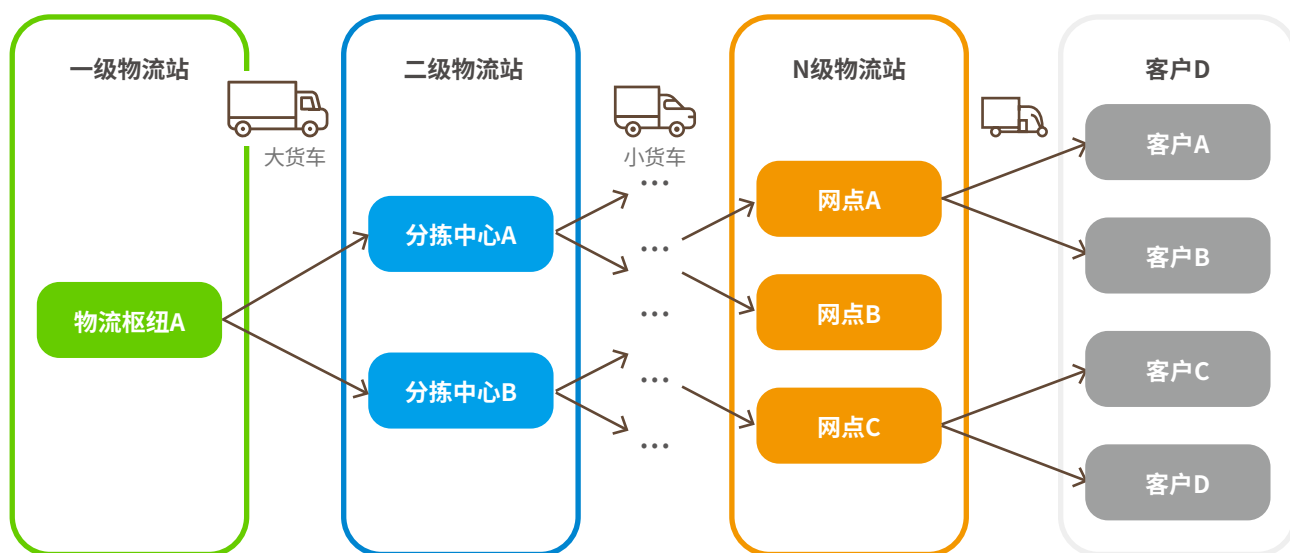
三级快递网络一般包括商品的加工工厂、配送节点、商品需求地及各节点之间的运输通道。该模型假设大型物流节点主要分布在临近具有重要交通枢纽和便利基础设施的物流园区周边。根据快递运输流量的分布情况和运输方向，在人口密集区域或靠近城市商业中心的位置建立中小型物流节点（二

研究框架 | 图 1



¹ 注：详细的PEMS实测及MOVES机动车模型本地化校正的方法与结果见附录2。

快递运输网络的三级配送网络概念模型 | 图2



级、N级物流站）。在三级物流网络模型下，货物在大型物流节点经处理后运输至中小型物流节点，最终送达客户。

因此，该模型涉及一级物流站、二级物流站和N级物流站等主要物流节点（见图2）。首先，货物在出发地的一级物流站集中装箱后，使用重型卡车运输到目的地的一级物流站；随后，货物通过物流枢纽进行分拣和初步处理，使用大货车运输到二级物流站；接着，分拣中心进一步处理货物，用小货车将货物送至N级物流站的各个网点；最终，由末端配送送达客户。

2.2 PEMS实测数据采集与分析及MOVES模型本地化修正

研究使用便携式排放测量系统（PEMS），基于中国上海及周边的运输场景，按照GB 17691-2018《重型柴油车污染物排放限值及测量方法（中国第

六阶段）》的规定，获取货运卡车在不同道路类型（城市道路、郊区道路、高速公路）和运行工况下的碳排放实测数据。实测数据涵盖运行速度、载重、燃油消耗量等关键变量²。

研究根据实测数据对MOVES模型进行本地化修正。MOVES模型是国际广泛使用的车辆排放评估工具，但其原始数据基于美国场景，不完全适用于中国。因此，研究对MOVES模型进行了两轮本地化修正：

第一轮校正：筛选与中国实际情况相关的影响因子（如车型、道路类型、工况），构建初步的本地化排放因子库。

第二轮校正：基于PEMS实测数据，运用回归分析建立校正公式：

$$E_{ij} = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n$$

² 注：具体实测数据收集方法和实验设计见附录1.2。

其中, E_{ij} 表示车型*i*在道路类型*j*上的排放因子, $X_1, X_2, \dots, X_n$ 表示速度、载重、工况等变量。修正后的因子库显著提升了模型预测的精度³。

本研究第三章中的运输环节排放特征与因素分析, 以及第四章中不同减排方案的碳排放量测算均基于此修正后的排放因子库。

2.3 电动化减碳效益评估

由于MOVES模型主要关注传统燃油机动车的排放情况, 而能源转型在道路减排的长期路线上是必不可少的一步。联合国气候变化框架公约指出, 电动汽车广泛应用将有效降低温室气体排放, 特别是在电网逐步转向可再生能源的背景下, 电动货车的减碳潜力将进一步提升^[6]。因此, 本研究选取货车电动化作为能源转型的代表方案, 通过分析主流电动货车

的能耗数据并结合国家电网排放因子, 评估其在减少二氧化碳排放方面的效益。电动货车的碳排放计算公式如下:

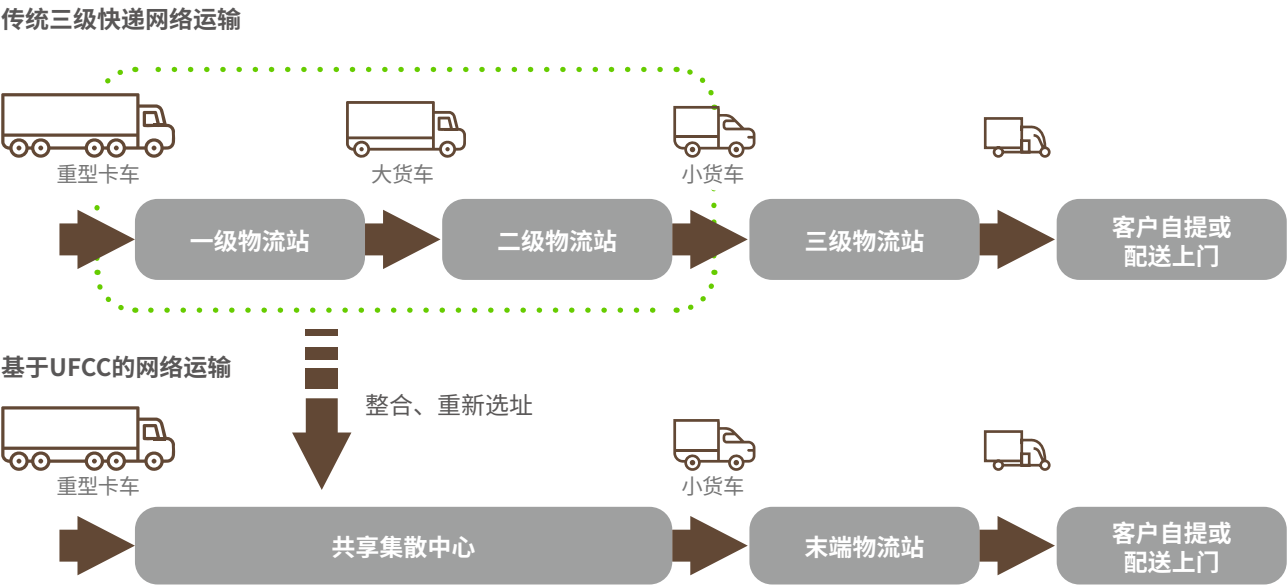
$$C_{EV} = EC \times EF \times D$$

其中, C_{EV} 是电动货车的碳排放总量, EC 是单位公里的电能消耗量, EF 是国家公布的电网碳排放因子, D 是运输距离。

2.4 共享集散中心 (UFCC) 网络优化模型

本研究创新性地提出共享集散中心 (Urban Freight Consolidation Center, UFCC) 网络优化方案, 以替代传统三级物流网络中的一级和二级枢纽, 通过UFCC直接链接干线运输和末端配送, 通过优化运输路径和车队调度安排等资源配置, 评估可能提升的物流效率和减碳潜力⁴。

传统三级物流网络配送模式与UFCC配送模式对比图 | 图 3



³ 注: 具体排放因子本地化修正模型方法见附录1.2。

⁴ 注: 详细的方法论见附录1.4。

首先，研究提出了带有时间窗口的多批次多行程车辆路径问题（Multi-Trip Vehicle Routing Problem with Time Windows, MB-MTVRPTW），扩展了传统的车辆路径问题（Vehicle Routing Problem with Time Windows, VRPTW）。该模型模拟了货物从主要枢纽到共享集散中心（UFCC），再由UFCC分配至客户的全流程。为确保模型的简洁性和可操作性，研究作出的模型假设和求解步骤如下：

（1）模型假设及符号声明⁵：a. 货物信息已知（每批次货物的到达时间、总货量明确）；b. 枢纽容量限制（货物批次量均小于枢纽最大容量，避免拥堵和延误）；c. 单批次独立服务（同一批次的货物仅由一辆车完成配送）；d. 车辆多样性（考虑不同载重量类型和能源类型的货车）；e. 预定路径和时间窗口（所有运输路径及时间安排都事先确定）。

（2）目标函数设计：设定两个目标函数，一是最小化碳排放，即通过优化运输路径减少车辆总行驶距离，从而减少能源消耗和碳排放；二是最大化物流集散效率，通过缩短货物在UFCC的积压时间和车辆行程间的间隔时间，提高货物转运效率。

（3）设定约束条件：a. 客户全覆盖（所有客户需求必须被满足，确保服务完整性）；b. 车辆匹配与限制（每辆车的服务总需求量不超过其载重能力，同一批次仅由一个行程完成配送）；c. 时间与路径约束（车辆需在约定的时间窗口内完成配送，并确保路径合理性和流通性）；d. 变量定义（车辆、行程、路径、时间的变量需符合逻辑范围，如0-1变量用于表示是否被选中或执行）。

（4）帕累托优化分析：使用启发式或元启发式算法生成一组初始可行解，并计算每个解的碳排放

量和物流集散效率，记录对应目标函数值；然后根据帕累托最优解的定义，筛选出所有不可支配的解，并将其绘制为帕累托前沿图，发现两目标函数间的权衡关系。

（5）车辆配置优化：根据目标函数权衡关系和实际需求，设计匹配重型卡车与中小型货车的最佳组合，构建仿真场景，评估不同车辆在物流链条中的减排效果。

2.5 综合减排矩阵与未来情景预测评估

研究采用多目标优化模型和矩阵情景分析的方法。首先，对UFCC网络优化方案进行模型求解，确定车辆配置及调度计划；然后，结合UFCC网络优化和车辆能源类型优化两种解决方案，构建一个带有强度序列的综合减排矩阵。最终，通过设置多种组合场景，对传统三级物流网络与UFCC优化网络在不同能源类型下的减排潜力进行量化分析。场景设计包括多种车辆配置方案，如在UFCC结构下的柴油重卡+柴油小货车、传统三级网络运输结构下的纯电动重卡+纯电动大小货车等。通过对比基础场景与优化场景的碳排放，量化并分析各方案的减排效果。

同时，为进一步探讨政策驱动下的未来减排潜力，本研究引入政策与技术发展趋势，结合相关政策文件与技术预测报告的参数设定，设置了包括轻重型商用车油耗、电动车能耗及电网排放因子变化等参数，揭示多种优化路径在2030年的未来政策和技术条件下的适用性与减排潜力。

⁵ 注：详细的模型假设和符号见附录1.4的附录表3。

第三章

运输环节 排放特征 与因素分析



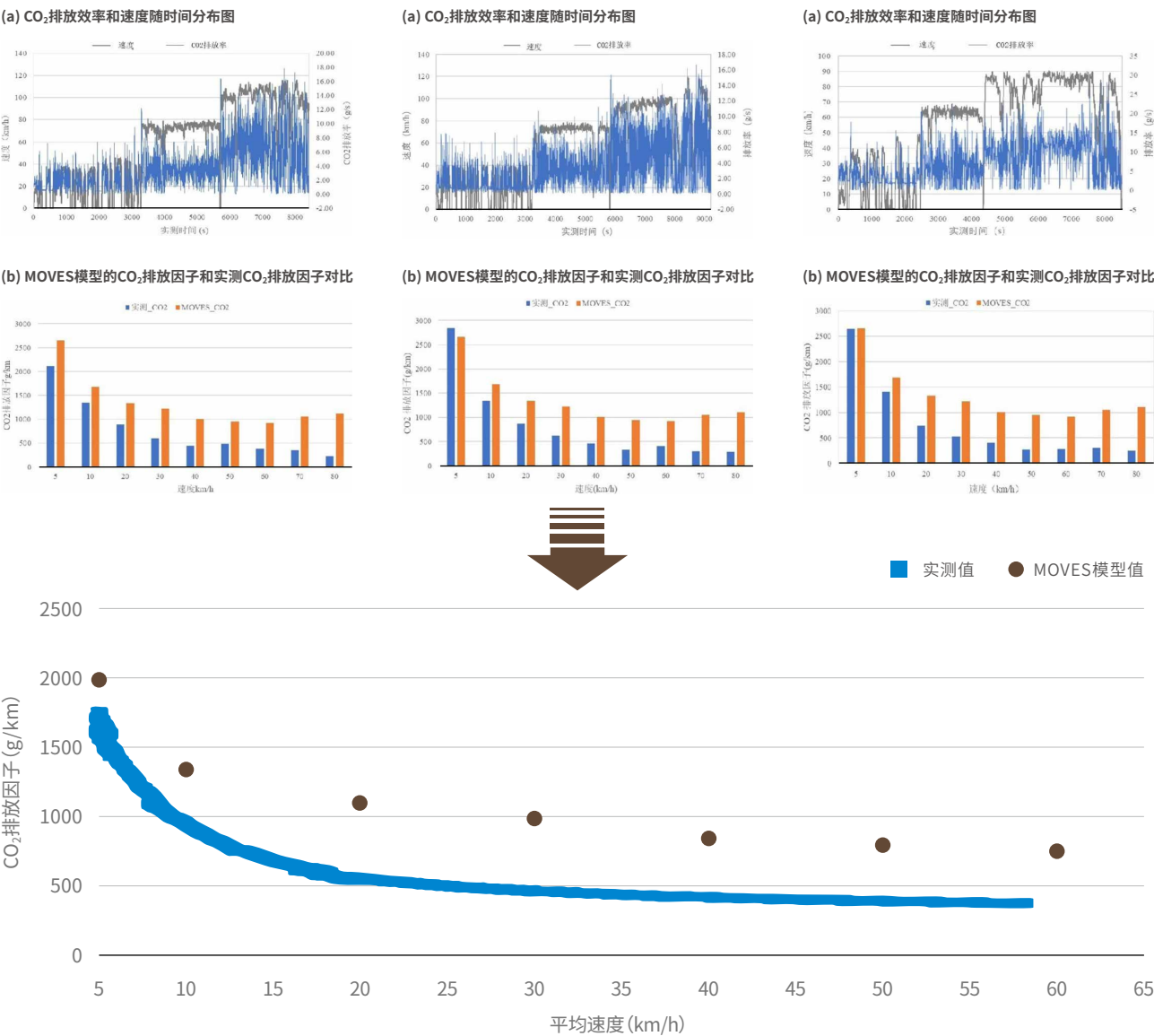
3.1 基于PEMS实测数据的MOVES模型本地化校正

3.1.1 实测结果与第一轮本地化校正

鉴于美国与中国上海地区在道路类型、地理特征及排放标准等方面存在差异，需对美国MOVES模型进行校正。根据上海的实际情况，修改模型中预设

的影响碳排放的关键因子，对MOVES模型进行第一轮本地化，得到初步排放因子模型计算结果。研究将MOVES模型值与样本车辆实测结果进行对比，发现仍然存在较大差异，特别是在中高速路段（如图4）。这可能是由于车辆行驶至高速时，车辆运行状态趋于平稳，发动机预热更为充足，导致排放更低。而MOVES模型中未能充分反映这一情况。

三辆货车实测结果与MOVES模型值对比 | 图 4



3.1.2 第二轮本地化校正

考虑MOVES模型未纳入动态驾驶工况、复杂道路条件等难以量化的因子，导致结果与实测数据存在偏差，需基于实测数据建立排放因子修正模型与修正系数表。本研究结合实际运输环节中影响车辆燃油消耗的因素与国家第六阶段机动车污染物排放标准^[7-10]，设定了车辆碳排放影响因子（见表1）。

a. 模型建立：将实测排放结果作为因变量，MOVES模型输出结果作为自变量，并引入车辆类型、道路类型及平均车速等影响因子，运用统计方法

与机器学习算法，建立排放修正模型，表征实测与模型结果之间的关系。

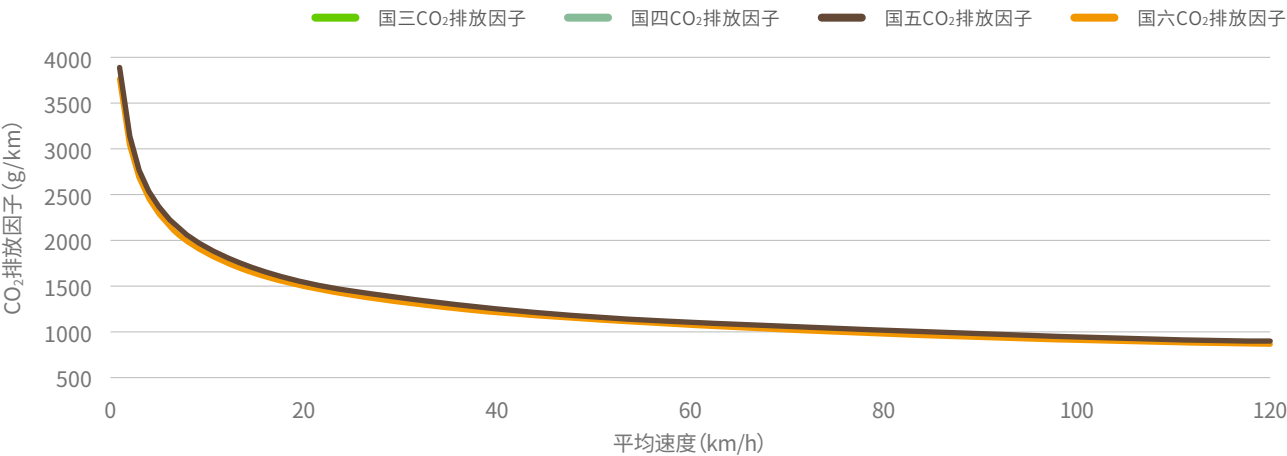
b. 修正系数矩阵：通过改变MOVES模型的输入变量，计算修正系数矩阵，并将MOVES模型输出结果与修正系数相乘，得到更精确的排放因子（见图5）。

上述研究成果中的本地化后的MOVES模型将用于后续碳排放测算工作，以提高测算的精准度。同时，在第二轮本地化过程中发现的对车辆碳排放具有重要影响的关键因子，将在后续研究中展开进一步的分析和探讨。

碳排放影响因子库 | 表 1

影响因子名称	名称解释	影响因子取值
车型	货车型号，影响货车的载重量和污染物排放量	重型卡车、大货车、小货车
排放标准	国家规定的机动车污染物排放标准	国三、国四、国五、国六
道路类型	货车行驶的道路类型	城市道路、高速公路
载重	给定载重量的情况下，货车的载重情况	半载、满载
车速	货车的行驶速度，取货车行驶一公里的平均速度	5至80km/h
燃油类型	货车所使用的燃油类型	柴油、汽油

根据MOVES模型与映射关系计算得到的不同国标下重型卡车CO₂排放因子曲线⁶ | 图 5



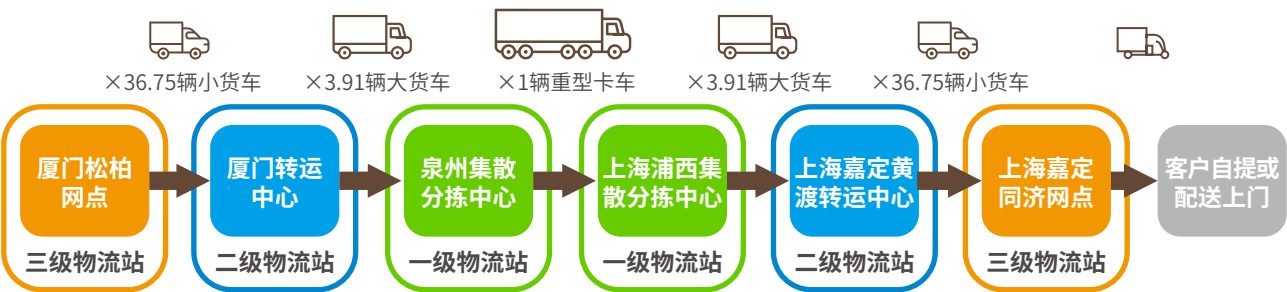
⁶ 注：国三、国四、国五三个排放标准下的CO₂排放因子差异太小，在图象上呈现重合。

3.2 基础场景碳排放计算结果与特征分析

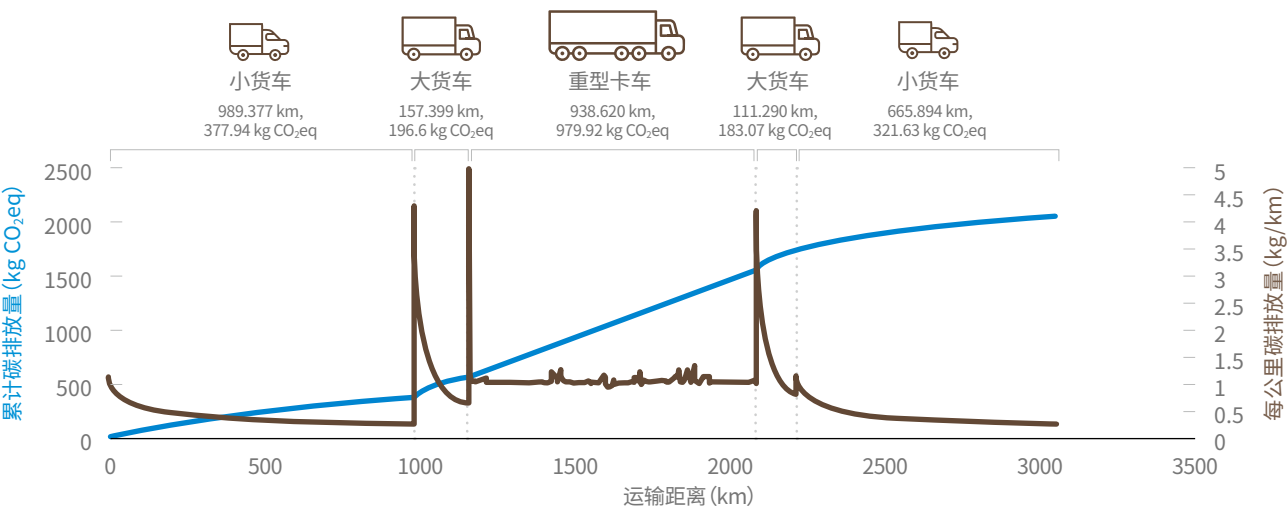
基于本地化校正后的MOVES模型，研究设定了一批总质量为39.7吨的快递货物从厦门市送至上海市的基础场景，以进行运输环节排放特征的分析（见图6）。假定发货与收货地两端分别有1个一级物流枢纽、10个二级物流站点和40个三级物流站点，并依据三级物流网络模型的运输结构设定每阶段的运输车辆类型，即一级物流枢纽之间采用载重能力在10吨以上的重型卡

车（基础场景采用的参数统一设定载重量为39.7吨），二级与一级之间采用载重能力在1.5吨至10吨之间的大货车（设定为10.15吨），三级与二级之间采用载重能力为1.5吨以下的小货车（设定为1.08吨），并统一使用国四排放标准。每类车型的油耗参数及排放因子均采用本地化校正后的MOVES机动车模型参数进行计算。同时，考虑零担运输的情况，研究设定包括虚拟货车平均化配送⁷、折算系数⁸及虚拟走行距离⁹等虚拟条件。

设定的基础场景运输过程及车辆配置 | 图 6



基础场景下的沿途排放特征变化¹⁰ | 图 7



⁷ 注：虚拟小货车和大货车分别配送同一批货物，并且每次配送的货物量相等。每辆虚拟货车仅负责配送该批货物。
⁸ 注：虚拟货车需要多次配送同一个配送点的货物。因此，引入折算系数帮助计算，折算系数等于三级配送点或二级物流枢纽的货物需求量与对应货车车型运货量的比值，反映了实际情况中该配送点对不同类型货车的需求量；详细计算方法见附录1.3。
⁹ 注：虚拟走行距离等于配送路径长度与折算系数的乘积。
¹⁰ 图注：由于车辆的负载特性与燃油效率的变化，其平均每公里碳排放量在阶段转换时可能出现剧增。

结合图7和计算结果（表2），研究发现，不同级别物流站之间的碳排放特征呈现出明显的差异。

(1) 一级物流枢纽与一级物流枢纽之间

在一级物流枢纽间由1辆重型卡车进行运输，累计行驶距离为938.62公里，产生碳排放量为979.92 kg CO₂eq。其主要行驶的路段为高速公路，整体行驶速度高且稳定，平均每公里的碳排放量波动较小。然而，由于长距离运输和较大的载重需求，该阶段的总碳排放量显著高于其他运输阶段。

(2) 二级物流站与一级物流站之间

该阶段由3.91辆大货车进行运输，累计行驶距离为268.689公里，产生碳排放量为379.67kg CO₂eq。其主要行驶的路段为国道、省道等普通公路或园区道路等，运输中常面临拥堵路段的低速行驶和频繁加速刹车等非平稳工况，导致发动机燃油效率降低。然而，由于该阶段的运输里程较短，沿途总碳排放量相对较低。随着行驶里程的增长，大货车的速度逐步提升，平均每公里的碳排放量逐渐下降，呈现更平稳的排放曲线特征。

(3) 三级物流站与二级物流站之间

该阶段由36.75辆小货车进行运输，累计行驶

距离为1649.271公里，产生碳排放量为699.57 kg CO₂eq。其主要行驶的路段为城市道路，由于三级物流站与二级物流站之间需要大量小货车进行多次运输，该阶段在整个配送网络中承担了57.82%的运输距离，导致沿途总碳排放量较高。

3.3 基于控制变量法的影响因素分析

结合第二轮MOVES模型本地化校正的影响因子库和相关文献发现，车辆类型、排放标准、能源类型三个因子是主要的排放影响因素。因此，研究基于控制变量法，对比改变这三个单一变量前后，分析基础场景沿途运输的碳排放变化情况后发现：

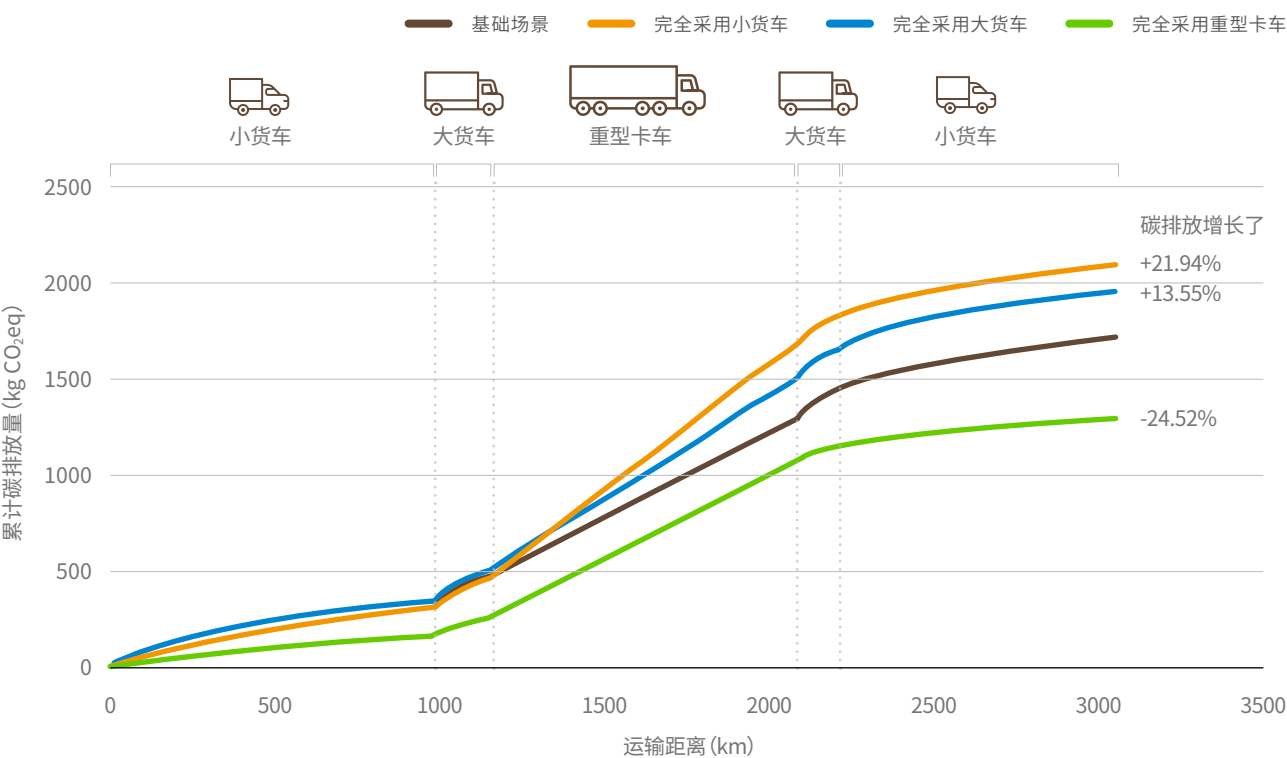
(1) 增强运输集约化程度对排放影响显著

研究通过控制车辆类型的单一变量后发现，全程采用大货车或小货车时，由于单车载重量的减少，需要更多车辆和更高的运输频次才能实现运输任务，导致碳排放量均显著高于基础场景（见图8）。而全部采用重型卡车时，由于其更高的载重量及稳定高速的运输速度，累计碳排放量最低。因此，本研究认为，构建更高效集约的物流运输网络，减少中间环节，提高干线运输重型卡车的行驶距离比例，以充分发挥重型卡车的规模化运输优势，这是运输环节减碳的一条潜在路径。

基础场景碳排放不同配送车辆类型的计算结果 | 表 2

运输阶段	始发物流站	终点物流站	配送车辆类型	距离(km)	平均每公里排放量 (kg CO ₂ eq/km)	沿途碳排放量 (kg CO ₂ eq)
第一段	三级物流站	二级物流站	小货车	989.377	0.382	377.94
第二段	二级物流站	一级物流站	大货车	157.399	1.249	196.6
第三段	一级物流站	一级物流站	重型卡车	938.620	1.044	979.92
第四段	一级物流站	二级物流站	大货车	111.290	1.645	183.07
第五段	二级物流站	三级物流站	小货车	665.894	0.483	321.63

改变车辆类型变量下的沿途排放量变化 | 图 8

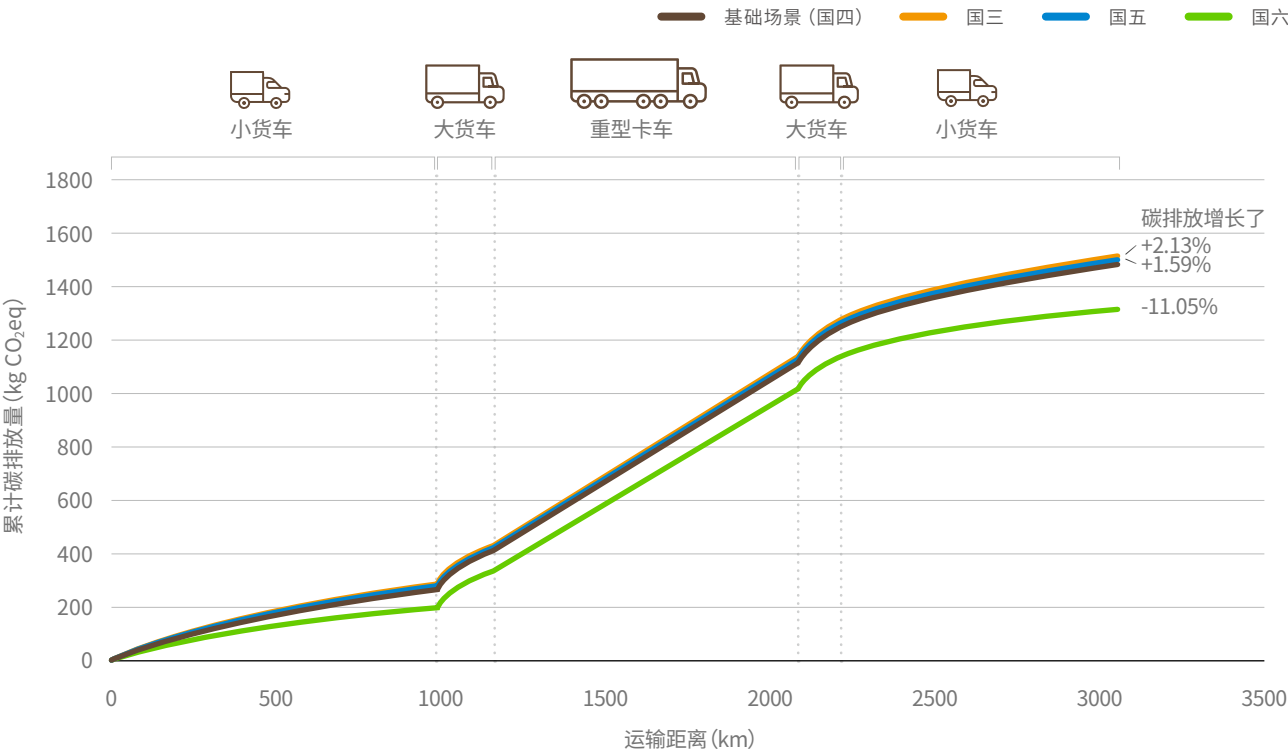


(2) 排放标准对碳排放影响有限，电动化能源转型对排放影响显著

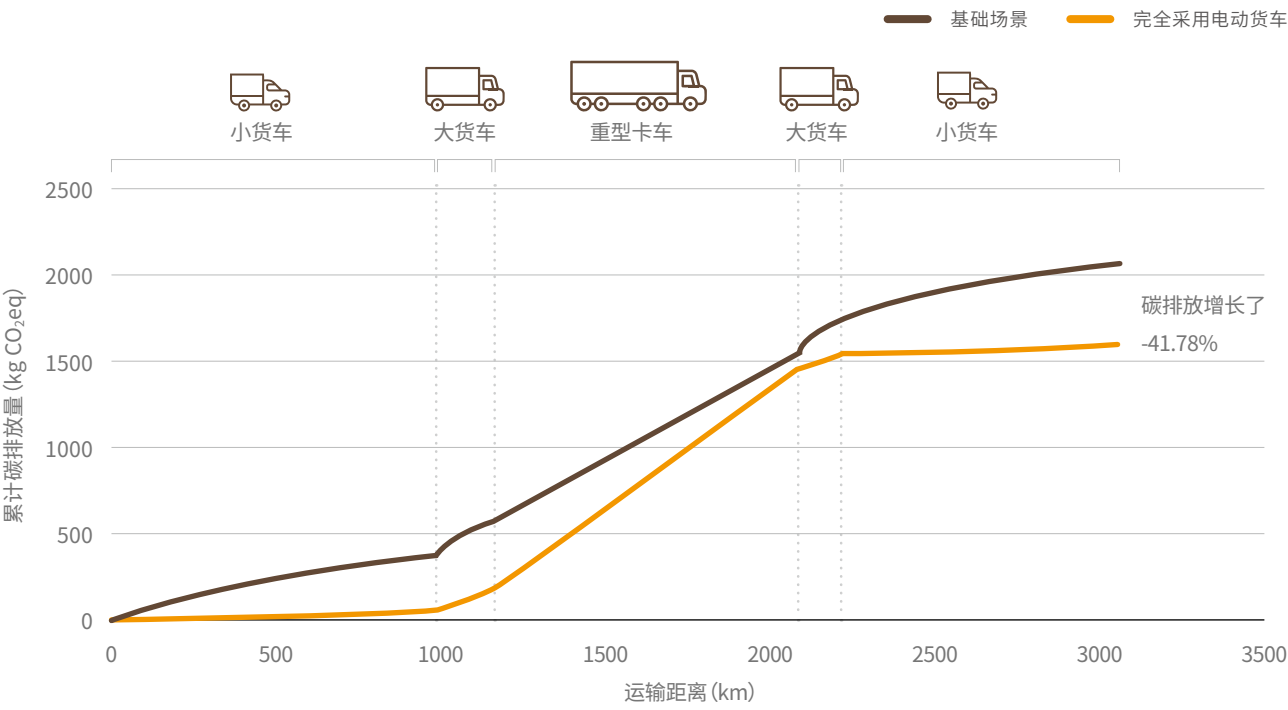
研究发现，不同排放标准对碳排放的总体影响并不显著，单纯依靠提升排放标准（如从国三到国六）无法在物流运输中实现大幅度的碳减排（见图9）。相比之下，能源类型变化对碳排放的影响表现非常显著，在采用全程电能驱动的基础场景下，碳排放量相较于基础场景（国四标准）减少了41.78%，尤其是在大货车和小货车运输的环节，碳排放量呈现较大下降趋势（见图10）。

基于控制变量法的影响因素分析和MOVES本地化校正发现的影响因子库，研究总结出两种可能的减碳路径，一是优化运输中转效率，减少中转环节，替代传统的三级物流网络；二是转变能源结构，采用电动货车等新能源车辆，从根本上推动快递行业的绿色发展。

改变排放标准变量下的沿途排放量变化 | 图 9



改变能源类型变量下的沿途排放量变化 | 图 10



第四章

不同场景下的 减排方案分析



改变能源类型及优化运输中转效率可以显著减少运输环节碳排放。基于第三章提出的两种潜在减碳路径，本章设计了两种解决方案的场景设置与参数：在能源结构转型方案中，在运输过程的不同阶段进行车辆能源类型的替代，逐步用电动大、小货车及重卡替代传统燃油货车¹¹；在优化运输中转效率方案中，研究创新性地提出了共享集散中心（UFCC）网络优化的方法。同时，研究进一步设计了UFCC网络优化方案与能源转型方案组合与强度变化的减碳矩阵情景（见图11），通过与基础场景的对比，评估每种方案的减排潜力。

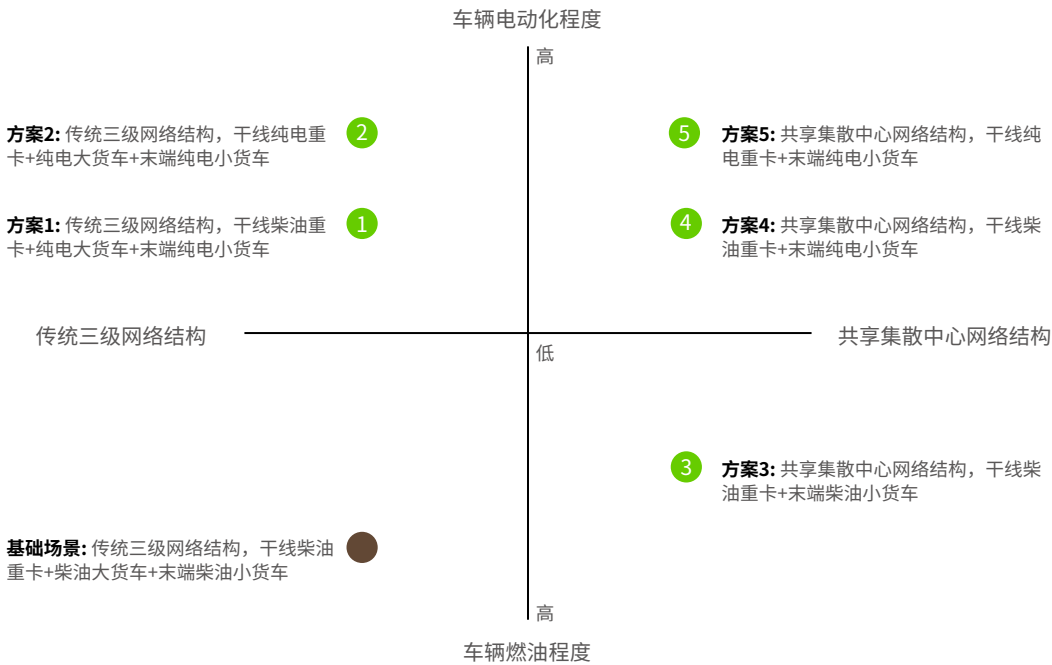
UFCC作为一个高度优化的共享整合物流枢纽，通过优化中转效率和集散效率提高快递运输系统的整体性能，实现货物快速、高效装配，减少了集散

时间；在理想情况下，UFCC还能精准匹配车辆，减少运输频次，在最大程度上减少等待时间和能源浪费。由于UFCC方案直接改变了配送车辆的行驶路径、车型选择以及运输时效等特征，涉及多目标优化问题，需要通过模型求解以确定最佳的车队配置和运输路径。因此，研究首先针对UFCC方案（在不改变车辆能源类型的前提下）进行帕累托求解，获取其基础方案的车队配置和路径安排，并据此计算UFCC基础方案下的碳排放量，为后续减排方案的评估与对比提供参考基准。

4.1 共享集散中心网络优化方案评估

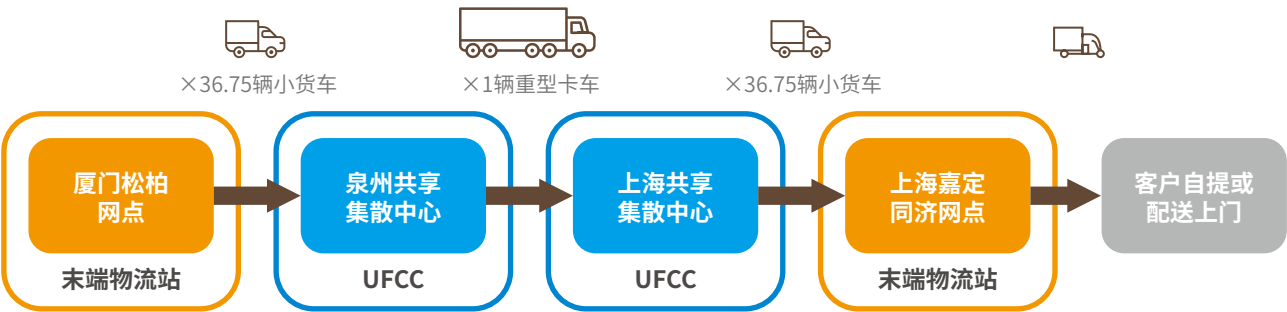
在该方案下，货物以批次的形式，通过干线运输持续向UFCC发货，UFCC根据干线运输的实际到达情况

快递运输环节减碳方案矩阵情景设计 | 图 11



¹¹ 注：为简化模型计算，本研究中电动替代方案不考虑充电时效影响，假定采用换电的补能方式。

基于UFCC的网络优化方案场景设置和车辆配置 | 图 12



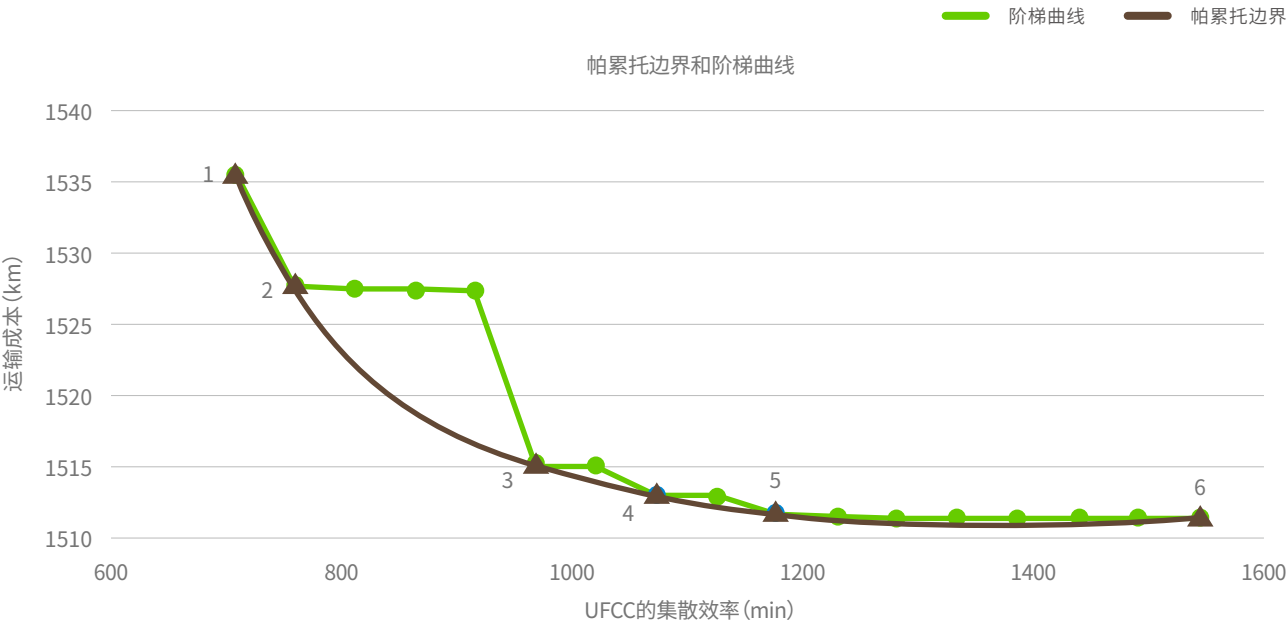
和三级物流站点的订单需求, 进行实时车货匹配, 假设UFCC内集散消耗时间与集散成本成正比 (见图12)。

由于模型目标设置中的最低碳排放量与行驶距离呈正比, 因此, 在目标函数中将其转换为UFCC集散时间成本与行驶距离成本。求解的帕累托前沿, 其中纵坐标为行驶累计距离, 单位是千米, 横坐标为

UFCC枢纽集散时间消耗, 单位为分钟 (见图13)。最终, 优化方案求解得到5个帕累托非支配解, 每个节点对应的方案制定不同的车辆路径、车辆调度计划。

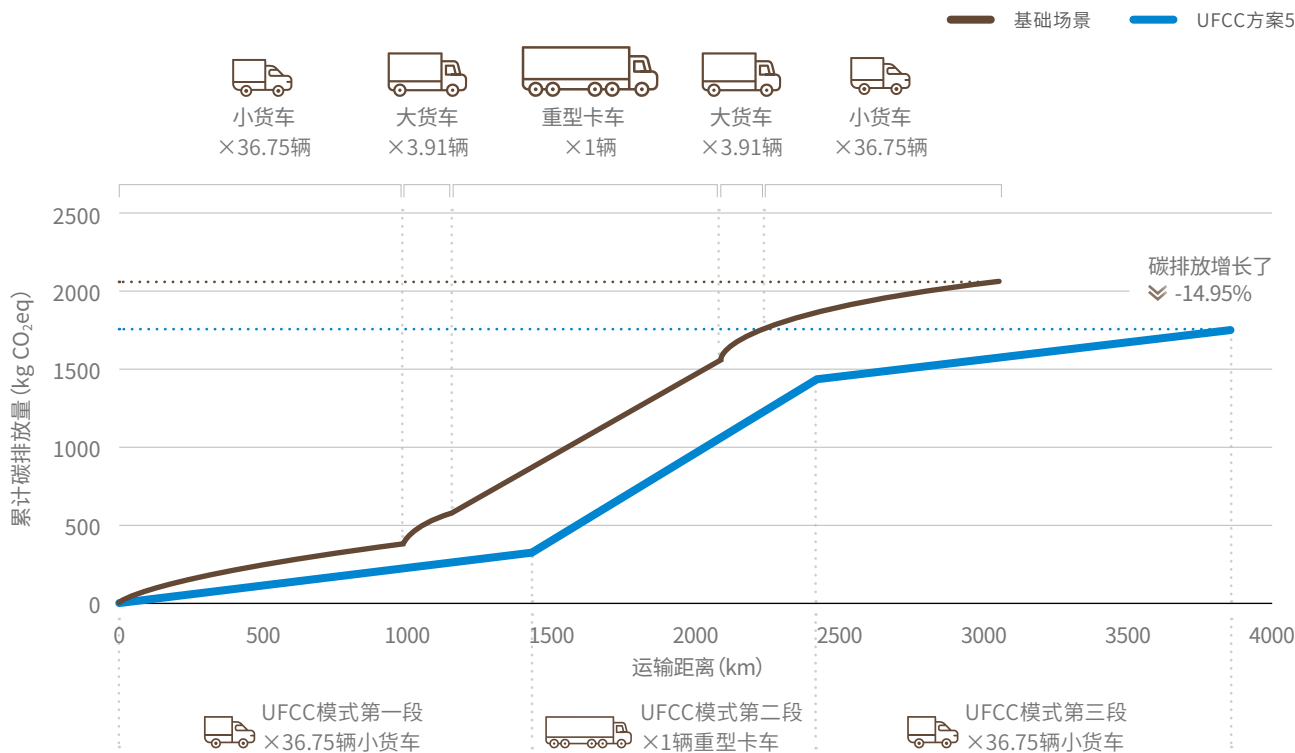
研究选择减碳量最大的第5号节点为最终解, 根据解的结果配置车队方案及调度计划, 进行排放计算。结果表明, UFCC方案较基础场景而言, 减少

UFCC方案的帕累托前沿结果¹² | 图 13



¹² 图注: 图中标记为棕色三角形的节点表示UFCC枢纽集散时间消耗和路径消耗均表现较好的节点, 其中5号节点和6号节点对应的路径结果相同, 由于6号节点为初始解, 为保持求解的完整程度也将其考虑其中。

基础场景与UFCC方案的沿途碳排量对比 | 图 14



了14.95%的碳排放（见图14）。这表明通过减少中转环节以及采用动态车货匹配机制可以提升运输效率，减少空驶率和冗余配送，实现一定的减排效果。

4.2 综合矩阵优化场景评估

4.1完成了UFCC方案的多目标求解，并选择其中最减碳节点得到车辆配置及调度计划。本节采取不同程度的能源转型，搭配采用UFCC方案替代传统物流网络的方法，得到不同强度的减碳矩阵，并讨论每种方案相较于基础场景的减碳效果。

研究结果显示（见表3），在仅替换能源类型的情景中，减碳程度随电动化比例的提升而提升。保持目前的物流网络不变，方案2采用全程新能源替代的方案，具有最高的减排效益，这也是本次研究中最具减排效益的方案，相比基础场景减少了41.78%的碳排放。

放。方案1采用纯电大货车和小货车，减排比例也达到22.72%，说明运输车辆电动化具有显著的减排潜力。

通过建立UFCC来优化运输效率的方案（方案3、4、5），其减排幅度因车辆能源结构的差异而出现明显分化。其中，方案3采用仅建立UFCC的方案，减排比例最小，为14.95%，说明在依赖燃油车辆的情况下，提升效率中转具有一定的减碳效益，但是难以大幅降低碳排放。相比之下，方案4在末端环节采用纯电小货车进行协同配置，减排比例能提升至30.38%。

然而，方案5在干线运输阶段也使用纯电重卡，减排比例下降到30.35%。这表明，虽然用UFCC替代已有的一级二级物流枢纽和节点时，UFCC能够提升物流效率，但由于该方案使用重卡进行运输的距离拉长，目前电网碳排放因子较高，以及电动重卡能效水平尚不理想等原因，在与全程纯电方案结合时，其

减碳方案的减碳效果 | 表 3

减排方案	方案明细	碳排量 (kg)	减碳百分比
基础场景	无UFCC, 干线柴油重卡+柴油大货车+末端柴油小货车	2060.261	0
方案1	无UFCC, 干线柴油重卡+纯电大货车+末端纯电小货车 ¹³	1592.206	22.72%
方案2	无UFCC, 干线纯电重卡+纯电大货车+末端纯电小货车	1199.466	41.78%
方案3	有UFCC, 干线柴油重卡+末端柴油小货车	1752.237	14.95%
方案4	有UFCC, 干线柴油重卡+末端纯电小货车	1434.379	30.38%
方案5	有UFCC, 干线纯电重卡+末端纯电小货车	1434.999	30.35%

实际减排效果受到了一定限制，减弱了全程纯电重卡和小货车的减排优势。

4.3 结合政策的未来综合矩阵场景评估

交通运输部门的能源结构转型是大势所趋。2024年12月23日，中共中央办公厅、国务院发布了《关于加快建设统一开放的交通运输市场的意见》，明确提出要大力推动中、重型卡车的新能源化，鼓励新能源车辆在物流运输领域的广泛应用。在这一类政策推动下，预计传统燃油货车的市场份额将逐步缩减，公路货运将迎来全面的新能源转型。

与此同时，新能源市场和技术的飞速发展也为转型提供了强有力的支撑。根据中国汽车流通协会、高工产研锂电研究所发布的数据显示，2024年前11个月，国内新能源重卡销量为6.68万辆。相比去年同期，销量增长了139%，预计2024年中国新能源重卡渗透率突破8%^[11]。电能作为替代能源的代表，已成为推动物流行业低碳化的重要方向。电动轻卡和重卡的技术成熟度、经济性及配套充电网络的日益完善，为其在城市配送和干线运输中的广泛

应用奠定了基础。

因此，以下将以电能为例，深入分析到2030年时，绿电比例提高的情景下，电动化转型在物流运输中的潜力及对碳排放的减排效应。

4.3.1 未来能耗及排放因子参数设置

为进一步分析未来条件下的碳排放场景，结合现行政策和前文提到的场景设置，对未来的碳排放情况进行预测，并对比各方案的减排效果。研究设置了一系列结合政策的未来能耗及排放因子参数变化，如下：

(1) 燃油货车油耗下降

根据即将于2026年发布的《轻型商用车辆燃料消耗量限值》与现行标准的对比，预计到2030年，轻型商用车辆的燃油消耗量将下降约30%^[12]；

同样，对比2022年发布的《重型商用车辆燃料消耗量限值》（征求意见稿）与现行标准，预计到2030年，重型商用车辆的燃油消耗量将下降约10%^[13]；

¹³ 注：在电动化替代方案中，设定纯电重卡载重量为38.37吨，数量为0.96辆；纯电大货车为9.55吨，数量为4.16辆；纯电小货车为1吨，数量为39.7辆。

(2) 电动货车能耗下降

根据《中国零排放货运年度进展报告2023》预测，至2030年，电动货车的能耗将降低10%^[14]；

(3) 电网碳排放因子下降

参考《中国区域电网二氧化碳排放因子研究（2023）报告》，预计到2030年全国电力平均二氧化碳排放因子将下降35%^[15]。

4.3.2 未来综合矩阵场景对比分析

结合以上参数设置，对未来基础场景与前文提出的各矩阵方案在2030年条件下的碳排放进行评估计算和对比分析。基于未来条件下的碳排放预测，不同运输方案在减排效果上表现出显著差异。

研究结果显示（见表4），在三级运输网络结构不变的情况下，方案二全程采用纯电替代，展现出最大的减排潜力，沿途碳排放减少701.688kg，减排比例达到55.26%，在所有方案中减碳效果最优，这表明以电能为代表的新能源技术在运输环境的应用

对物流碳排放的控制具有显著效果；方案一仅在较难进行新能源替代的干线运输环节保持柴油重卡，而其余路线全部用纯电大货车及小货车，也能减碳32.81%，在所有方案中减排比例排名第三，这也展现新能源替代在减排上的潜力。

方案五引入UFCC及采用全程纯电车型的组合，减碳比例达45.26%，减排比例排名第二。在引入UFCC的3个方案中，共享集散中心网络优化与纯电车型的协同减排显示出一定的减排潜力。但方案五的减碳表现次于基于传统网络结构的电动化转型的方案二。

综合来看，在本研究中，全程纯电替代方案是最直接有效的减碳策略，在当前新能源技术存在瓶颈的情景下，以UFCC为代表的提升运输集散效率的方案，具有一定的减碳潜力，通过优化运输中转和集散环节，可以有效提升物流效率，减少不必要的空驶和重复运输，但其减碳效果取决于具体场景设计和应用。因此，未来的减排工作应推动新能源技术的应用转型，同时，在技术尚未普及的过渡期，可通过提升运输集散效率来实现减碳目标。

2030年基础场景与综合矩阵方案对比 | 表 4

减排方案	方案明细	碳排放量 (KG)	减碳百分比
基础场景	2030年基础场景	1568.423	0
方案一	无UFCC, 干线柴油重卡+纯电大货车+末端纯电小货车	1053.757	32.81%
方案二	无UFCC, 干线纯电重卡+纯电大货车+末端纯电小货车	701.688	55.26%
方案三	有UFCC, 干线柴油重卡+末端柴油小货车	1312.809	16.30%
方案四	有UFCC, 干线柴油重卡+末端纯电小货车	1169.485	25.44%
方案五	有UFCC, 干线纯电重卡+末端纯电小货车	858.620	45.26%

第五章

总结建议



5.1 研究发现

1. 在本研究中，基于MOVES模型本地化校正的影响因子库和相关文献发现，车辆类型、能源类型、排放标准是影响排放的主要因素。其中，相较于基础场景：

- 不同的排放标准对碳排放的总体影响并不显著；
- 全程采用重型卡车对于减少运输环节碳排放影响显著，由于重型卡车具有更高的载重量，并且在主要行驶高速公路的路况下，具有稳定高速的运输速度；
- 能源类型对碳排放的影响表现非常显著，在采用全程电能驱动的场景下，碳排放量相较于基础场景减少了41.78%。

2. 优化运输中转效率具备一定的减碳潜力。建立共享集散中心（UFCC）是优化运输中转效率的一种方法，该方法通过提前确定车辆配置和调度计划，实现货物的快速装配，优化中转效率和集散效率，并且通过优化传统的三级运输网络结构，减少运输的中转环节，从而减少总运输距离。因此，UFCC具有减少能源消耗和碳排放的潜力。

3. 在潜在减碳路径的组合矩阵方案中，采用电动化转型可以实现最大的减排效益。

- 在仅替换能源类型的情景中，减碳程度随电动化比例的提升而提升。具有最大减排效应的方案为传统运输网络结构下全程采用电动车辆，该方案减少了41.78%碳排放；其次为设置UFCC并采用“干线柴油重卡+末端纯电小货车”的模式，该方案能减少30.38%排放；再次为设置UFCC，并采

用“干线纯电重卡+末端纯电小货车”的模式，能减排30.35%。而减排效应最低的为仅采用UFCC模式（减少14.95%）。

- 在2030年场景中，相较于未来基础场景，最具减排效应的方案仍为全程采用电车，可减少55.26%的排放；其次为设置UFCC，并采用“干线纯电重卡+末端纯电小货车”模式，能减排45.26%；再次为不采用UFCC，且除干线以外的运输采用电动车替换，该方案可减少32.81%的排放。

5.2 建议

1. 推进车队能源类型的切换

车辆能源转型是货运领域减碳的核心路径，建议快递企业尽快启动车队能源类型的切换工作。传统燃油车辆在碳排放方面的高强度特性已经明确，而可再生能源占比逐步提高是大势所趋，电动化、氢能化等新兴能源的技术成熟度和市场覆盖率正在逐步提升。因此，企业应评估现有车队的技术改造可行性，制定分阶段的替换计划。同时，企业可与新能源供应商、充电设施运营商等合作，加快货运场景的基础设施建设，为新能源货运车辆的运营创造便利条件。

2. 探索货运中转优化方案

在新能源车辆技术尚存瓶颈（如纯电重卡续航能力不足、补能方案未完善等）的情况下，快递企业可以呼吁行业内的统筹、协调与协作，共同推动物流资源的优化配置。例如通过建设区域性货运枢纽，整合各企业的货物以进行更集约的分拣处理，提高车辆的装载率和运输效率，减少车辆空载率和重复运输带来的能源浪费等。此外，政府和行业协会的支持

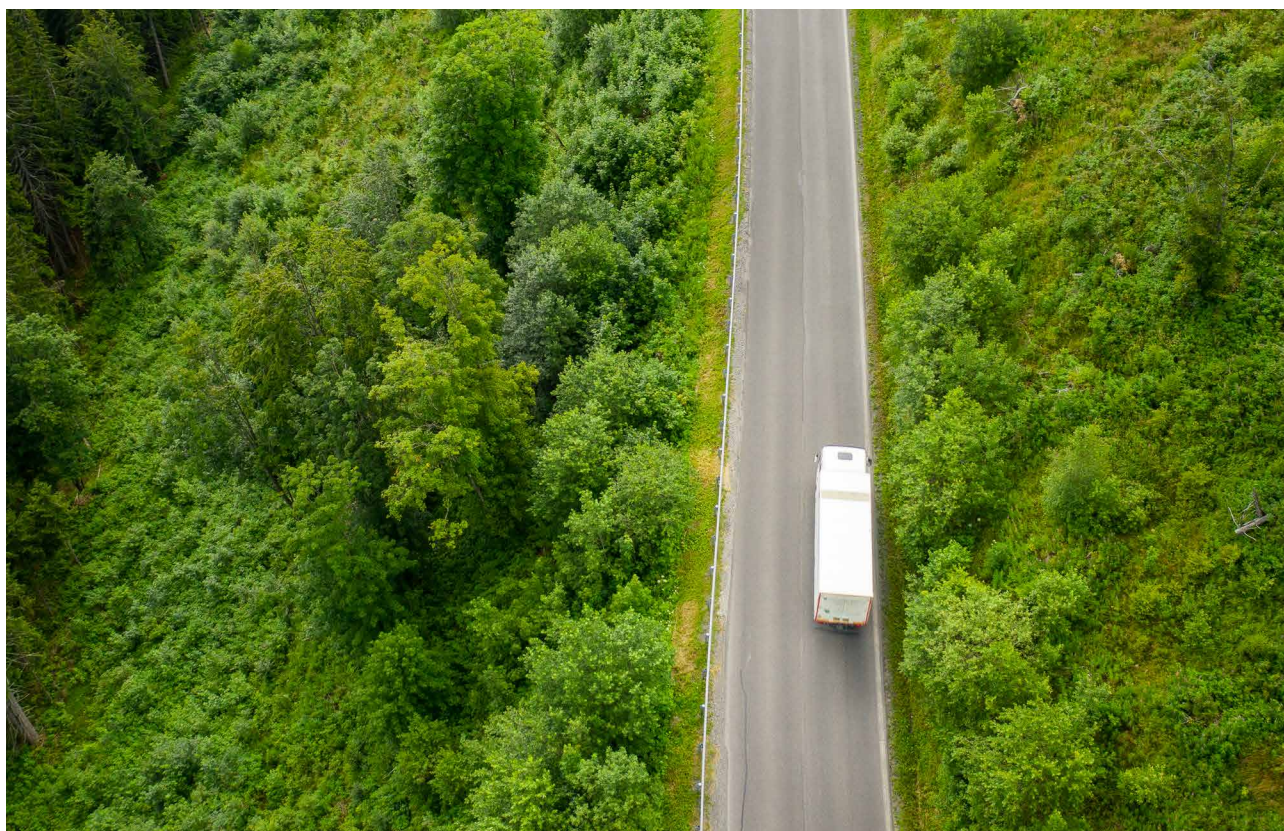
与参与，能推动这些枢纽的建设，适宜的政策激励和资源调度将促进行业内各企业的广泛合作，以实现更加合理的区域枢纽布局和资源利用，进一步提升整体行业的减碳效果。

3. 提升运输效率与绿色管理水平

快递企业应加强对运输环节的绿色管理和实时监控，以数字化手段提升运输效率并减少能源消耗，以降低碳排放。借助先进的物联网（IoT）技术和大数据分析平台，企业实时采集运输过程中的车辆状态、路况信息和交通拥堵情况，动态优化配送路径。例如，在高峰时段避开拥堵区域，或根据车辆类型调整能源利用方案，从而减少不必要的燃油消耗和温室气体排放。此外，通过对物流数据的长期积累和分析，企业还能够逐步完善运输管理策略，形成更具可持续性的物流运营模式。

4. 推动本地货运排放数据库的建设

建议业界与学界深化合作，共同推动中国本地货运领域排放数据库的建设，为未来更精确的碳排放核算提供坚实基础。数据库应具有全面性和系统性，涵盖不同车型、道路条件、货物种类、运输距离以及季节性和区域性差异等多维度的排放数据，以反映中国实际运输活动的复杂性和多样性。这一工作不仅有助于深入分析和明确各类运输模式的碳排放特征，还能为政府部门制定科学精准的碳减排政策提供可靠依据，从而助力货运行业的绿色低碳转型，推动国家“双碳”目标的实现。



附录

方法论



附录1.1 快递网络结构模型

1 三级快递运输网络模型

研究构建了一个基于真实快递运输方式的三级物流网络模型，总结出物流节点间的动态联系和运输路径，用于追踪和分析整个快递运输过程。三级物流网络一般包括商品的加工工厂、配送节点、商品需求地及各节点之间的运输通道。该模型假设大型物流节点主要分布在交通便利和具有重要交通枢纽的物流园区周边，根据快递运输流量的分布情况和运输方向，在人口密集区域或靠近城市商业中心的位置建立中小型物流节点（二级、N级物流站）。在三级物流网络模型下，货物在大型物流节点内经过处理后运输至中小型物流节点，最终送达客户。

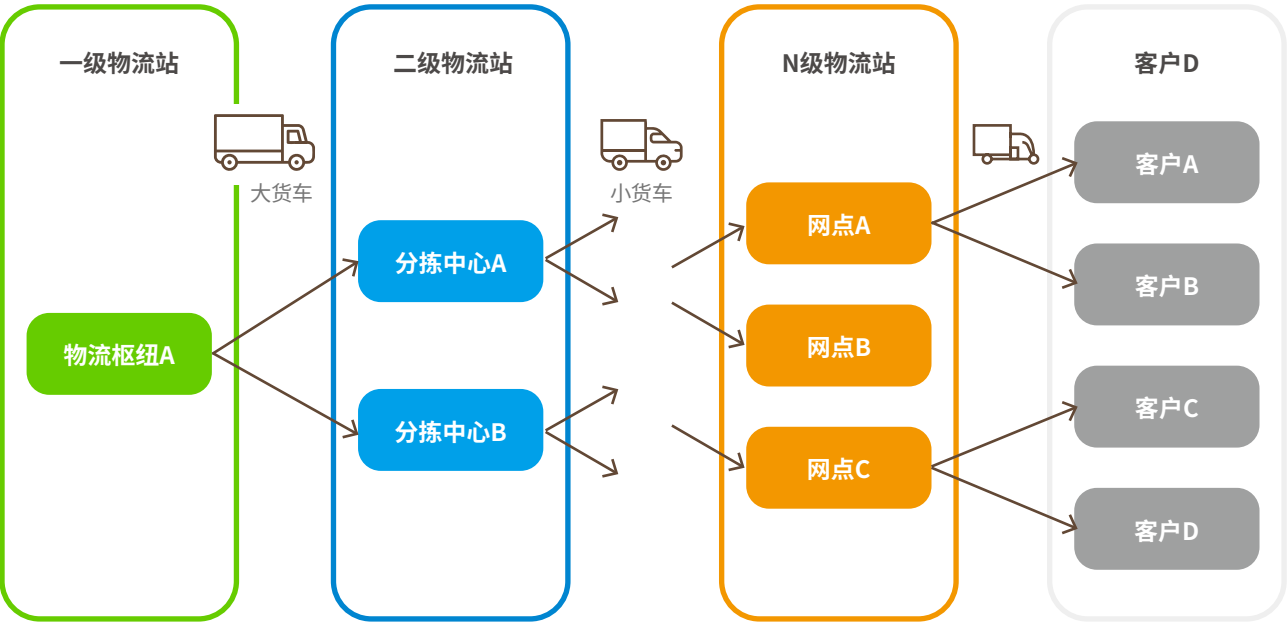
因此，该模型涉及一级物流站、二级物流站和N级物流站（见附录图1）。在一级物流站，货物通过物流枢纽进行分拣和初步处理后，使用重型卡车运输

到二级物流站，随后，分拣中心进一步处理货物。最后，用大货车将货物送至N级物流站的各个网点，最终由末端配送到达客户手中。

因此，研究根据典型物流轨迹，总结出两种不同类型的三级物流网络。第一种是区域性的物流网络，这种网络主要在同一城市或地区内进行配送，节点之间的运输距离相对较短，适用于本地化配送需求。区域性的物流网络通常涉及多个小型物流节点和较少的干线运输。这种模式的优势在于配送速度快、成本低且能够较好地满足本地客户的需求。

第二种是跨区域的物流网络，这种网络涉及多个城市或地区，节点之间的运输距离较长，适用于跨区域配送需求。跨区域物流网络需要通过大型物流节点进行集中管理和长途运输，再由中小型物流节点进行区域内的分发。其优势在于能够覆盖更广泛的客户群体，但也面临着更高的运输成本和复杂的物流管理挑战。

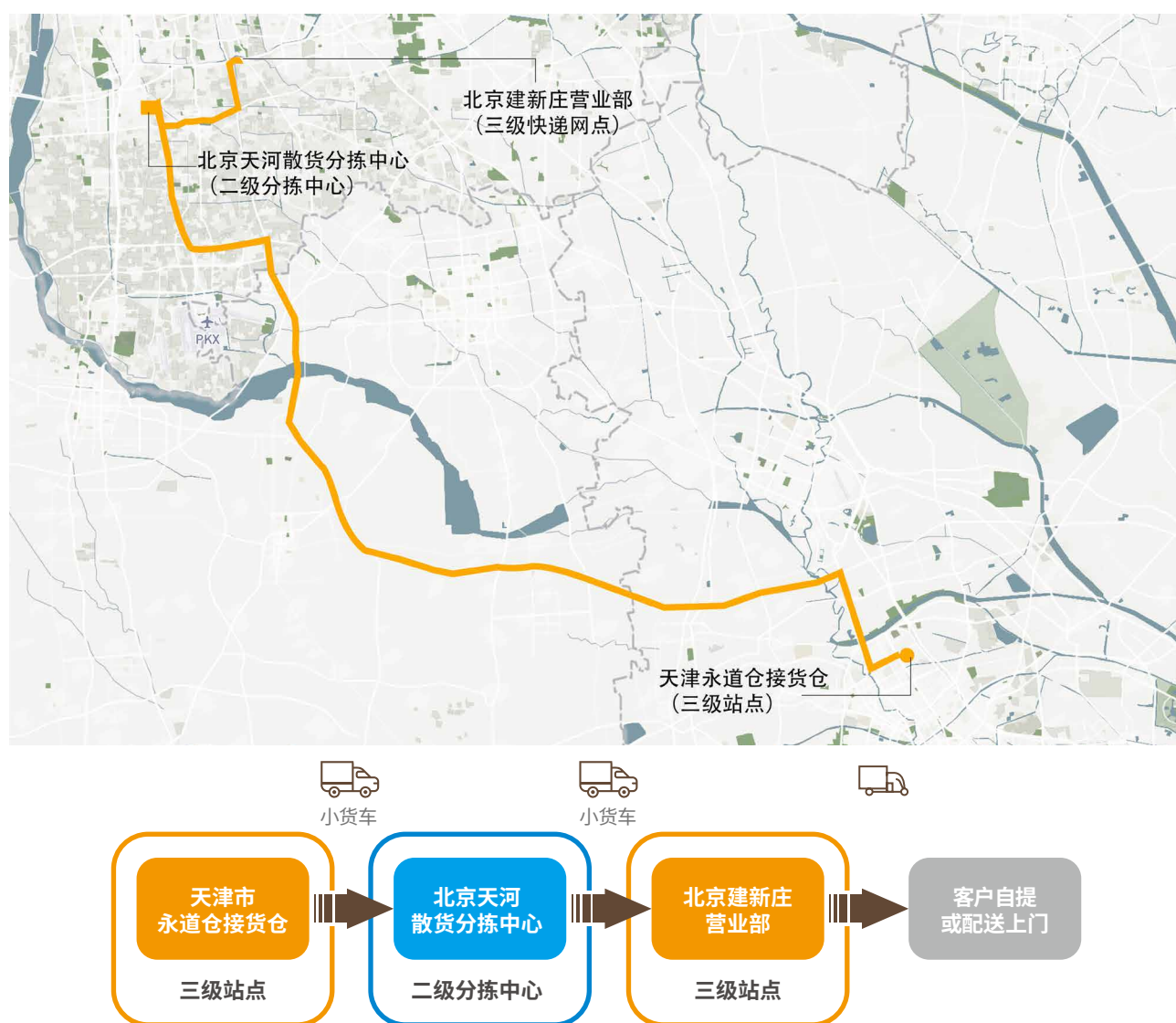
快递运输网络的三级配送网络概念模型 | 附录图 1

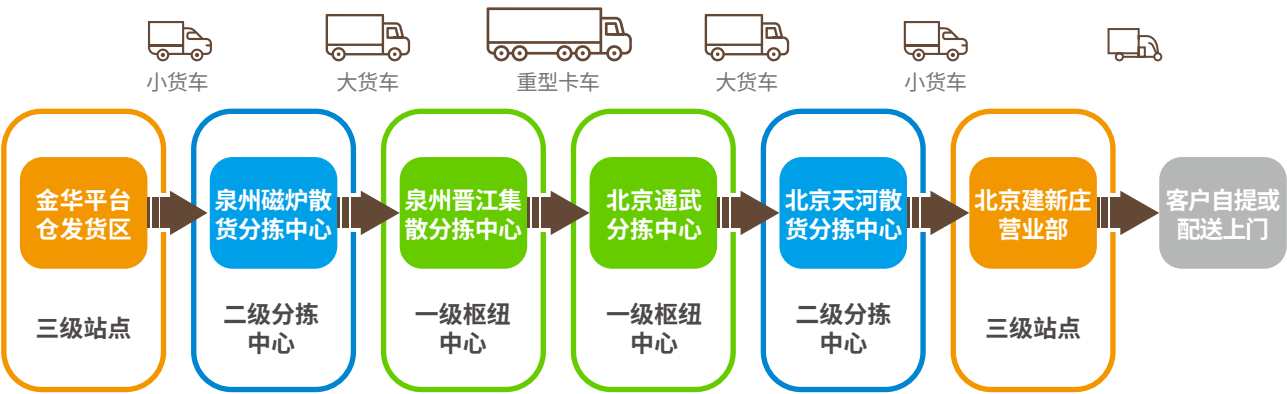


以实际物流轨迹为例，附录图2展示了第一种区域性物流网络的全过程，总体呈3-2-3的网络模式。其中，货物从某电商平台天津接货仓（三级物流站）出发，途经北京天河散货分拣中心（二级物流站），最终到达北京建新庄营业部网点（三级物流站），并送达客户。该轨迹通过物流信息的追踪，反映了从出发地到目的地的各个物流节点的详细情况，展示了物流网络的实际运行过程。

附录图3说明了第二种跨区域物流网络的全过程，总体呈3-2-1-1-2-3的网络模式。其中，货物从金华平台仓发货区（三级物流站）出发，途经泉州磁灶散货分拣中心（二级物流站），然后到泉州晋江集货分拣中心（一级枢纽中心），然后抵达北京通武分拣中心（一级枢纽中心），途径北京天河散货分拣中心（二级物流站点），最终到达北京建新庄营业部网点（三级物流站），并送达客户。

区域性快递运输网络模型案例 | 附录图 2





2 共享集散中心网络优化模型

本研究创新性地提出了共享集散中心网络优化模型，该模型整合并取代了传统的一级物流站与二级物流站，并将末端配送过程中的小货车从燃油驱动更改为电力驱动（见附录图4）。

对比传统的三级物流配送模式，共享集散中心配送模式通过集中布局共享集散中心，优化车辆行驶路线，从而减少城市内部密集人群区域的碳排放和有害气体的排放。同时，集中的物流中转中心产生规模效应，降低物流过程中仓储部分的建设和运营成本。

具体而言，引入干线中转节点后的运输方案优化模型是一种带有时间窗口的多行程车辆路径问题。通过优化车辆行驶路线和中转方案，减少了车辆总

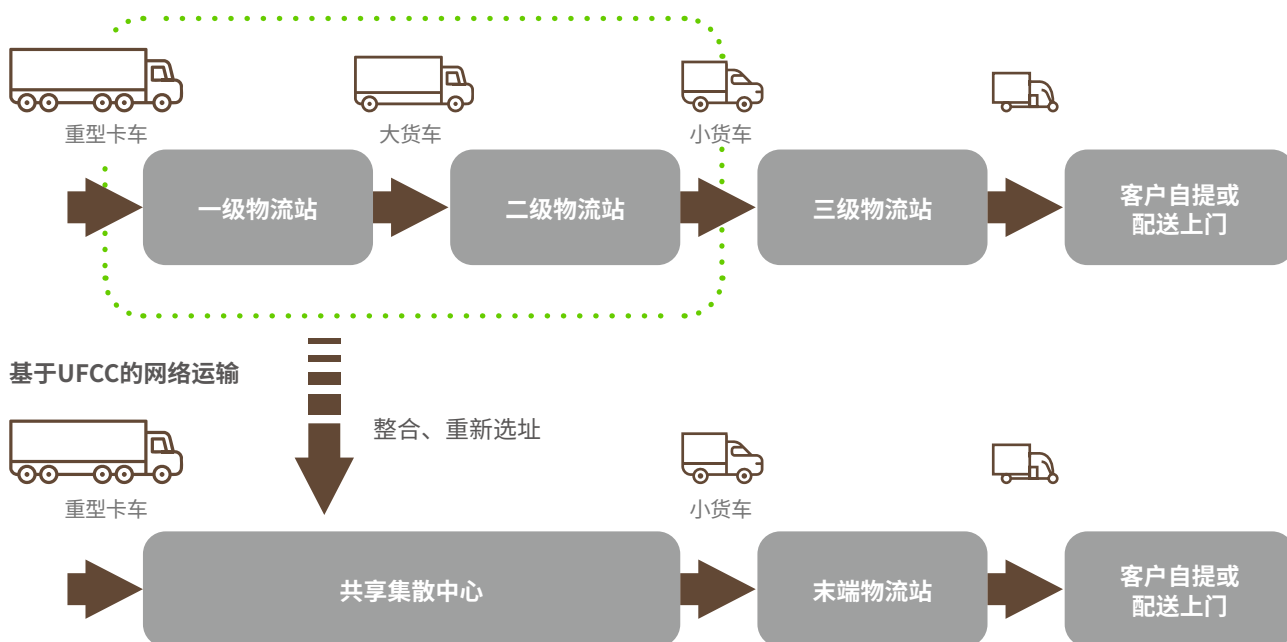
行驶距离和能源消耗，最大限度地降低碳排放，同时提高物流集散效率。

附录1.2 PEMS实测排放因子与MOVES本地化模型校验

为更精确地模拟物流车辆在实际道路上的排放情况，本研究采用了便携式排放测量系统 (Portable Emissions Measurement System, PEMS) 技术，针对样本车辆和路段进行实地排放测试，获取货运卡车的实际排放因子数据，并结合MOVES模型因子库的模拟结果进行校准，从而构建了一套更贴近真实情况的排放因子库，为后续对其碳排放特性进行详细评估以及模拟快递的运输排放提供精确的数据支持^[16]。同时，也为后续科学制定减碳策略提供了重要的基础。

传统三级物流网络配送模式与物流中转中心配送模式对比图 | 附录图 4

传统三级快递网络运输



1. PEMS实测数据收集方法

PEMS技术是一种用于道路实地测试的有效工具。与传统的实验室测试不同，PEMS能够在实际道路环境中实时采集排放数据，涵盖不同交通状况、道路类型及驾驶行为，因此其测量结果具有较高的代表性和准确性^[17]。PEMS设备主要包括气体分析仪、颗粒物分析仪、流量计、GPS模块及数据记录仪，分别用于测量CO₂、NO_x、CO等气体浓度，颗粒物浓度、排气流量以及车辆的地理位置信息和行驶速度^[18]。

排放因子的计算是评估车辆排放特性的关键步骤。排放因子通常表示为车辆行驶每公里产生的污染物质量，单位为克每公里 (g/km)。计算排放因子的基本公式为：

$$E_i = \frac{\sum_{j=1}^n (C_{i,j} \times Q_j)}{\sum_{j=1}^n D_j}$$
 (1)

其中，为第*i*种污染物的排放因子，*C_{i,j}*为第*j*个测量点第*i*种污染物浓度，*Q_j*为第*j*个测量点的排气流量，*D_j*为第*j*个测量点的行驶距离，*n*为测量点的总数。

通过上述公式，可以计算出每种车型在不同路况下的CO₂、NO_x、PM等污染物的排放因子。

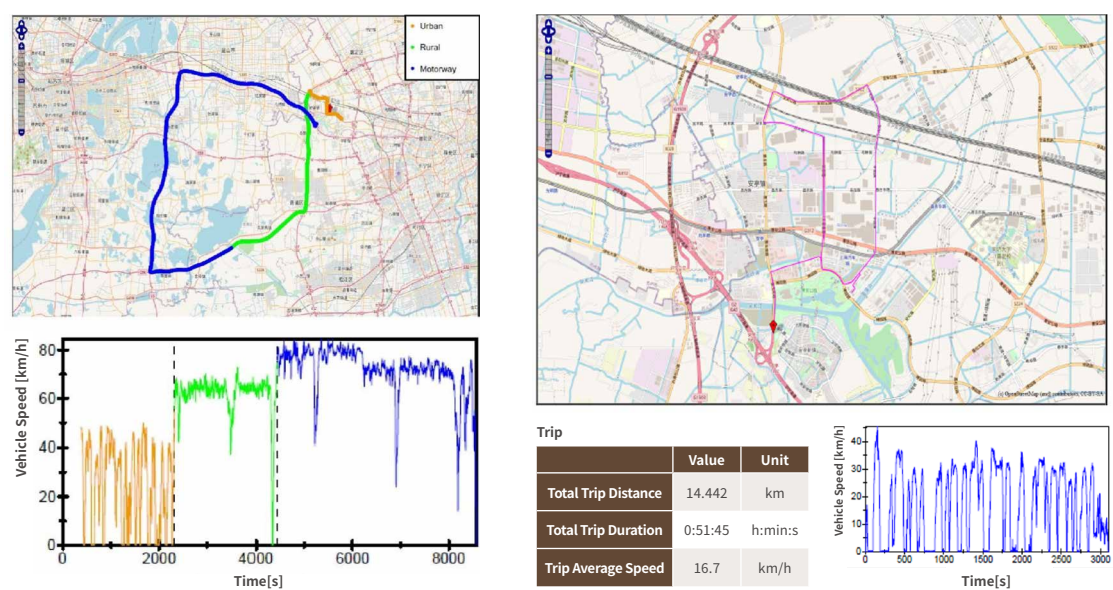
测试过程中，PEMS设备安装于车辆的排气系统，通过传感器和数据采集系统实时记录车辆在不同工况下的排放数据^[19]。为了获得全面的排放特性，测试路线设计涵盖城市道路、高速公路和郊区道路，并在高峰和非高峰时段分别进行，以捕捉不同路况及时段的排放差异。

2. 具体实验设计

实验的测量方法依据了GB17691-2018《重型柴油车污染物排放限值及测量方法（中国第六阶段）》重型汽车排气污染物（车载法）^[20]。

实验路线选择覆盖了上海市的主要干线运输路段，包括高速公路和连接市区与郊区的交通干线通道，全程约80公里，涵盖了不同的交通状况和路况特征，有助于全面评估车辆在实际运营中的排放特性。

货车标准工况下实测路线和运行速度分布示意图(左) 非标准工况路线速度分布(右) | 附录图 5



其中，市区道路平均运行速度为22.5km/h；市郊道路平均运行速度为57.5km/h；高速公路平均运行速度为90km/h。此外，为了进一步表征上海道路实际运行状况，本次实验也采集了非标准工况下的数据。实测路线包括上海市嘉定区宝安公路-于田路路段，全程约14.5km。途径道路主要包括主干路、次干路和支路。本研究将结合标准工况（见附录图5左）与非标准工况（见附录图5右）结果，以提高排放因子的计算精度，从而准确反映上海市重型卡车碳排放因子情况。

实验车辆选取了三辆国6排放标准下的常见货车，基本情况如附录表1所示。

根据MOVES模型中影响碳排放的变量，结合实际运输环节中影响车辆燃油消耗的因素与国家第六

阶段机动车污染物排放标准，本研究设定的影响车辆碳排放的因素如附录表2所示。

3. 建立排放因子修正模型

为量化MOVES模型结果与实测数据之间的差异，并分析车辆类型、道路类型、行驶工况等因素对排放因子的影响，开展了排放因子修正工作。具体步骤如下：

3.1 MOVES模型的本地化修正

1. 第一轮本地化校正：

鉴于美国与中国上海地区在道路类型、地理位置及排放标准等方面存在差异，需对美国MOVES模型进行校正。根据中国实际情况，筛选影响碳排放的

测试车辆基本信息 | 附录表 1

车型	年份	分类	测试时间	测试距离	CO ₂ 平均排放	CO ₂ 平均比排放 ¹⁴
江铃多用途乘用车 JX6555T-M6	2022	小货车	2小时20分钟	141km	213502.7 mg/km	740883.0 mg/kWh
上汽大通多用途乘用车 SH6551A2DB	2022	小货车	2小时20分钟	151km	208354.5 mg/km	702725.0 mg/kWh
东风天锦载货车 DFH1180EX7	2022	大货车	2小时20分钟	132km	440557.2 mg/km	724608.1 mg/kWh

碳排放影响因子库 | 附录表 2

影响因子名称	名称解释	影响因子取值
车型	货车型号，影响货车的载重量和污染物排放量	重型卡车、大货车、小货车
排放标准	国家规定的机动车污染物排放标准	国三、国四、国五、国六
道路类型	货车行驶的道路类型	城市道路、高速公路
载重	给定载重量的情况下，货车的载重情况	半载、满载
车速	货车的行驶速度，取货车行驶一公里的平均速度	5至80km/h
燃油类型	货车所使用的燃油类型	柴油、汽油

¹⁴ 注：平均比排放在这里指发动机每单位输出功率产生的二氧化碳排放量。

关键因子，对MOVES模型进行第一轮本地化，得到初步排放因子结果。

2. 第二轮本地化校正：

考虑MOVES模型未纳入工况等难以量化的因子，导致结果与实测数据存在偏差，需基于实测数据建立排放因子修正模型与修正系数表。

a. 模型建立：将实测排放结果作为因变量，MOVES模型输出结果作为自变量，并引入车辆类型、道路类型及行驶工况等影响因子，运用统计方法与机器学习算法，建立排放修正模型，表征实测与模型结果之间的关系。

$$E_{ij} = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n$$

其中， E_{ij} 表示车型*i*在道路类型*j*上的排放因子， $X_1, X_2, \dots, X_n$ 表示速度、载重、工况等变量。

b. 修正系数矩阵：通过改变MOVES模型的输入变量（如车辆类型、道路类型和行驶工况），计算修正系数矩阵，并将MOVES模型输出结果与修正系数相乘，得到更精确的排放因子。

3.2 城市道路类型下排放因子模型的细化

MOVES模型仅区分城市道路和高速公路，未能进一步细化城市主干路、次干路和支路的排放因子，难以准确反映不同道路类型下的车辆运行工况与排放规律。因此，有必要基于实测数据，完善排放因子库，具体方法如下：

a. 车辆工况分析：分析不同城市道路类型下的车辆运行工况差异，识别各类道路的排放特征。

b. 关系模型构建：运用线性回归、多项式回

归、逻辑回归等方法，建立道路类型与排放因子之间的关系模型，实现排放因子的进一步细化。

排放因子库完善：通过修正后的关系模型，补充和完善MOVES模型中不同城市道路类型的排放因子库，使其更贴合实际情况。

附录1.3 车型优化减碳效益评估模型

本研究构建了一个车型优化减碳效益评估模型，以分析不同能耗效率和载重的配送车型在碳排放方面的表现。研究引入基础排放计算公式，该公式通过路径总里程、车型单位里程排放系数、换算系数和车辆数来计算每条运输路径的二氧化碳排放量（假定各车辆行驶速度均为该车型平均速度）^[21]。

$$E_i = \sum_{j \in J} D_i \times \alpha_j \times \beta_j \times \delta_{i,j}, \forall i \in I \quad (5)$$

式中 E_i 为第*i*条路径的二氧化碳排放量（吨）， D_i 为第*i*条路径的总里程（公里）， $\delta_{i,j}$ 表示第*i*条路径运输上车型*j*的车量数（假定一条路径只由一种车型运输）， α_j 为车型*j*的单位里程排放系数（吨/公里）¹⁵， β_j 为车型*j*的换算系数。换算系数考虑了车辆载重量和货厢容积，以确保不同车型之间具有可比性：

$$\beta_j = \frac{W_j}{W_s}, \forall j \in J \quad (6)$$

式中 W_j 表示车型*j*的载重量（吨）， W_s 表示标准车型的载重量（吨）。

虚拟货车数量计算则基于如下公式：

$$\delta_{i,j} = \frac{R_i}{W_j}, \forall i \in I, j \in J \quad (7)$$

¹⁵ 注：对于电动货车，使用电网间接排放因子换算。

式中, R_i 表示第*i*条路径的总货物需求量(吨), W_j 表示车型*j*的载重量(吨)。在此基础上, 综合排放量通过累加所有运输路径的排放量来获得:

$$\Delta E = E_o - \sum_{i \in I, j \in J} D_i \times \alpha_j \times \beta_j \times \delta_{i,j} \quad (8)$$

式中, ΔE 为减碳量(吨), E_o 表示更换前使用车型的总排放量(吨)。进一步地, 减碳百分比 γ 提供了相对减排效果的度量, 使得不同优化方案的对比更加直观:

$$\gamma = \left(1 - \frac{\sum_{i \in I, j \in J} D_i \times \alpha_j \times \beta_j \times \delta_{i,j}}{E_o} \right) \times 100\% \quad (9)$$

通过上述方法, 本研究能够系统化地评估不同配送车型在实际运输路径中的碳排放情况, 为物流企业在车型选择上提供科学依据。

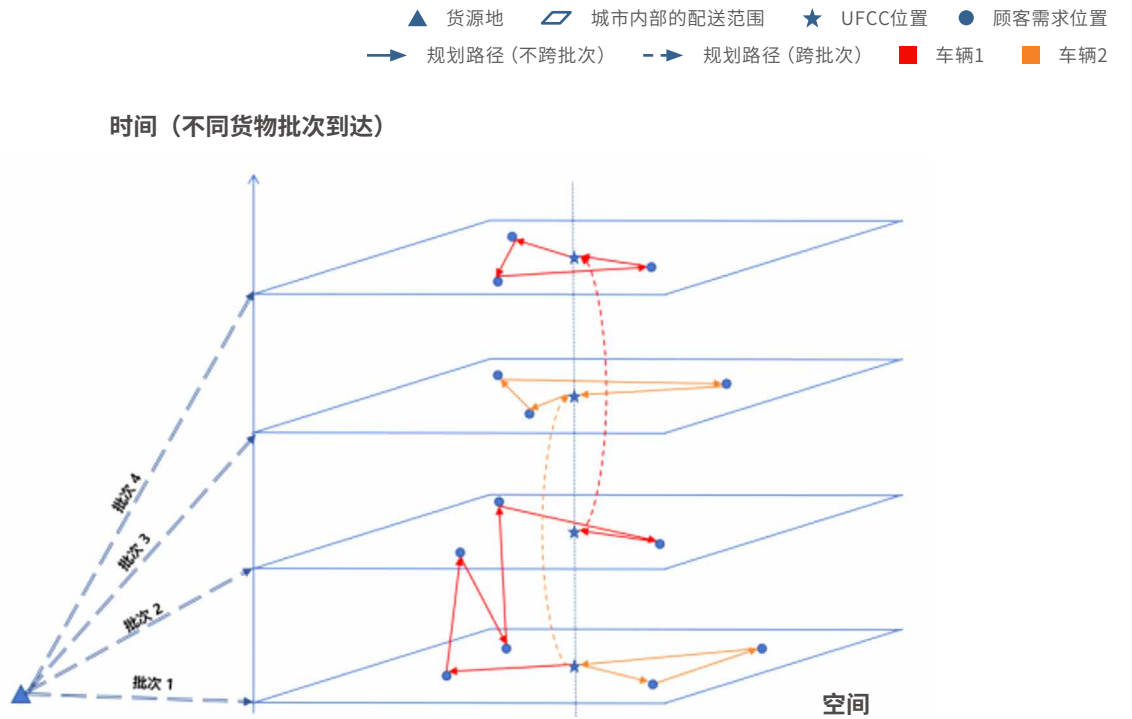
附录1.4 共享集散中心布局优化模型

干线运输中转指通过在运输网络中设置中转节点, 并通过优化运输路径和资源配置来提升运输效率及降低运营成本的一种物流策略^[22]。快递业务通常涉及大量的长途运输, 其碳排放量显著^[23]。本研究提出一种引入干线中转节点后的运输方案优化模型^[24], 减少碳排放量的同时提高物流集散效率。

1 共享集散中心布局优化方案定义

引入干线中转节点后的运输方案优化模型是一种带有时间窗口的多行程车辆路径问题 (Multi-Trip Vehicle Routing Problem with Time Window, MTRPTW), 该问题是经典车辆路径问题 (VRPTW) 的扩展^[25]。在MTRPTW中, 车辆可以在规划周期内多

MB-MTRPTW问题示意图 | 附录图 6



次往返于枢纽和客户之间，每次往返被定义为一个行程 (trip)，多个行程的组合构成车辆的路线 (route)。在此基础上，本文提出并探讨了多批次多行程车辆路径问题 (Multi-Batch and Multi-Trip Vehicle Routing Problem with Time Window, MB-MTVRPTW)，以更贴近实际物流运营中的复杂场景。

MB-MTVRPTW问题可以被描述为：货物从主要枢纽 (Main Freight Terminal, MFT) 不断运送到中转节点 (共享集散中心, Urban Freight Consolidation Center, UFCC)，再由货车从中转节点将货物配送至客户^[26]。形式上，MB-MTVRPTW问题可以定义为一个有向图，其中节点集合包括枢纽和客户节点，弧集合表示节点间的路径，每条弧都有对应的运输阻抗^[16]和行驶时间^[27]。车队由若干同质车辆组成，每辆车的运输能力相同。货物批次集中，每个批次都有其到达时间和总货物量。对于每个客户，定义了服务时间^[17]、服务需求和时间窗口^[18]，确保货车能够在规定时间窗口内完成服务^[28]。

建立共享集散中心布局优化模型的首要优化目标是通过设计高效的干线运输中转方案，减少干线运输和城市配送环节的碳排放^[29]。具体而言，通过优化车辆行驶路线和中转方案，最大限度地减少车辆总行驶距离和能源消耗，从而降低碳排放。其次，通过合理的调度和行程安排，提高物流枢纽的集散效率^[30]。为此，本研究构建了一个多目标优化模型，模型不仅关注碳排放的最小化，同时也重视枢纽集散效率^[19]的最大化^[31]。

2 模型假设及符号声明

为了简化并有效解决引入干线中转节点后的运输方案优化问题，研究对模型进行了若干假设：

(1) 主要枢纽运往共享集散中心的不同批次货物的所有信息 (包括每个批次的到达时间、总货物量等) 都是已知的。

(2) 每次运往枢纽的货物容量均小于枢纽的最大容量。此假设确保每批次到达的货物都能被有效处理，不会导致枢纽过载，从而影响后续的运输和调度工作。实际物流操作中，枢纽通常具有一定的储存和处理能力限制，以确保在货物到达时能够进行有效处理和转运。

(3) 城市配送车每次出发和返回可以同时服务不同批次的货物，但对于同一批次的货物，同一辆车不能进行多次服务。

(4) 用于配送的货车类型存在差异，包括大、中、小型货车，且能源类型不同。每种类型的货车有不同的载重能力和燃料消耗特点。

(5) 运输过程中所有车辆的行驶路线和时间窗口都是预先已知且固定的。在规划和调度过程中，所有车辆的出发时间、行驶路径和预计到达时间都已确定，同时假设车辆行驶过程中不存在突发事件，如交通堵塞或车辆故障。减少不确定性带来的复杂性，使得优化过程更加可控和精确。

¹⁶ 注：运输阻抗描述了一个节点（如枢纽或中转节点）到另一个节点（如客户或中转节点）之间货物运输的难易程度，通常以运输成本、距离、时间或能源消耗等综合因素表示。

¹⁷ 注：服务时间是指货车为客户提供服务的时间长度，包括货物卸载或其他配送相关操作所需的时间。

¹⁸ 注：时间窗口是指每个客户规定的允许接收服务的时间段，通常以起始时间和结束时间表示（如 [10:00, 12:00]）。

¹⁹ 注：集散效率是衡量物流枢纽在货物中转和配送过程中资源利用率和运作效率的指标，通常以单位时间内处理货物的数量、车辆的利用率、或中转节点的吞吐能力等作为参考。

本研究所使用符号及含义说明 | 附录表 3

符号	含义
集合以及索引	
V	节点集合
N	客户节点集合
A	弧集合
K	货车集合
P	货物批次集合
R	Trip集合
i, j, h	用户索引
r, l	Trip索引
k	货车索引
P	货物批次索引
N_p	货物批次 p 对应的用户集合
参数	
$c_{i,j}$	弧 (i,j) 的里程
e_k	货车的排放因子(基于PEMS获取)
$t_{i,j}$	弧 (i,j) 的行驶时间
$[T_i^{start}, T_i^{end}]$	客户 i 的服务时间窗
st_i	客户 i 的服务时间长度
d_i	客户 i 的货物需求量
p_i	客户 i 对应的批次
Q_k	货车 k 的载运能力
T_p^{arrive}	货物批次 p 到达UFCC的时间
q_p	货物批次 p 的运输总量
$[0, T]$	规划周期窗口
$T^{transition}$	两个间隔批次的转场时间
$T^{prepare}$	货物到达之后的整備时间
决策变量+	
$x_{i,j}^r$	(0-1决策变量) 表示 r 是否经过弧 (i,j)
$y_k^{r,l}$	(0-1决策变量) 表示 k 的行程 r 是否在行程 l 之前
$z_{k,r,p}$	(0-1决策变量) 表示 k 的行程 r 是否服务货物批次 p
$\delta_{i,r}$	(0-1决策变量) 表示行程 r 是否服务客户 i
$w_{k,r}$	(0-1决策变量) 表示 k 是否执行行程 r
T_r^{start}	(连续决策变量) 表示行程 r 从UFCC出发的时间
T_r^{back}	(连续决策变量) 表示行程 r 返回UFCC的时间
$S_{i,r}$	(连续决策变量) 表示行程 r 开始服务客户 i 的时间

3 目标函数及约束条件

基于上述讨论，本研究构建的引入干线运输中转方案(UFCC)后的配送优化模型可以表述为：

$$\min \sum_{r \in R} \sum_{(i,j) \in A} \sum_{k \in K} c_{i,j} \cdot x_{i,j}^r \cdot w_{k,r} \cdot e_k \quad (23)$$

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{r,l \in R, r \neq l} y_k^{r,l} \cdot (T_l^{start} \cdot T_r^{back}) + \sum_{p \in P} \sum_{i \in N_p} \sum_{r \in R} \delta_{i,r} \cdot (T_r^{start} \cdot T_p^{back}) \quad (24)$$

Subject to:

$$\sum_{r \in R} \delta_{i,r} = 1, \forall i \in N \quad (25)$$

$$\sum_{r \in R} z_{k,r,p} \leq 1, \forall k \in K, \forall p \in P \quad (26)$$

$$z_{k,r,p} \leq w_{k,r}, \forall k \in K, \forall r \in R, \forall p \in P \quad (27)$$

$$\delta_{i,r} \leq \sum_{k \in K} z_{k,r,p}, \forall i \in N, \forall r \in R, \forall p \in P \quad (28)$$

$$\sum_{k \in K} w_{k,r} \leq 1, \forall r \in R \quad (29)$$

$$y_k^{r,l} \leq w_{k,r}, \forall k \in K, \forall r, l \in R, r \neq l \quad (30)$$

$$y_k^{l,r} \leq w_{k,r}, \forall k \in K, \forall r, l \in R, r \neq l \quad (31)$$

$$y_k^{r,l} + y_k^{l,r} \leq 1, \forall k \in K, \forall r, l \in R, r \neq l \quad (32)$$

$$w_{k,r} + w_{k,l} - y_k^{r,l} - y_k^{l,r} \leq 1, \forall k \in K, \forall r, l \in R, r \neq l \quad (33)$$

$$T_r^{back} + T^{transition} + M \cdot (y_k^{r,l} - 1) \leq T_l^{start}, \forall k \in K, \forall r, l \in R, r \neq l \quad (34)$$

$$T_p^{arrive} + T^{prepare} + M \cdot (\sum_{k \in K} z_{k,r,p} - 1) \leq T_l^{start}, \forall r \in R, p \in P \quad (35)$$

$$\sum_{j \in N \cup \{0\}, i \neq j} x_{i,j}^r = \delta_{i,r}, \forall i \in N, \forall r \in R \quad (36)$$

$$\sum_{i \in N \cup \{0\}, i \neq j} x_{i,j}^r - \sum_{h \in N \cup \{N+1\}, h \neq j} x_{j,h}^r = 0, \forall j \in N, \forall r \in R \quad (37)$$

$$\sum_{j \in N} x_{0,j}^r - \sum_{k \in K} w_{k,r} = 0, \forall r \in R \quad (38)$$

$$\sum_{i \in N} x_{i,n+1}^r - \sum_{k \in K} w_{k,r} = 0, \forall r \in R \quad (39)$$

$$\sum_{i \in N} d_i \cdot \delta_{i,r} \cdot w_{k,r} \leq Q_k, \forall r \in R, k \in K \quad (40)$$

$$s_{i,r} + st_i + t_{i,j} + M \cdot (x_{i,j}^r - 1) \leq s_{j,r}, \forall r \in R, \forall i, j \in V, i \neq j \quad (41)$$

$$T_r^{start} + t_{0,i} + M \cdot (x_{0,i}^r - 1) \leq s_{i,r}, \forall r \in R, \forall i \in N \quad (42)$$

$$s_{i,r} + st_i + t_{i,n+1} + M \cdot (x_{i,n+1}^r - 1) \leq T_r^{back}, \forall r \in R, \forall i \in N \quad (43)$$

$$T_i^{begin} \cdot \delta_{i,r} \leq s_{i,r} \leq T_i^{end} \cdot \delta_{i,r}, \forall r \in R, \forall i \in N \quad (44)$$

$$x_{i,j}^r \in \{0,1\}, \forall r \in R, \forall i, j \in V, i \neq j \quad (45)$$

$$y_k^{r,l} \in \{0,1\}, \forall k \in K, \forall r, l \in R, r \neq l \quad (46)$$

$$z_{k,r,p} \in \{0,1\}, \forall k \in K, \forall r \in R, \forall p \in P \quad (47)$$

$$\delta_{i,r} \in \{0,1\}, \forall i \in N, \forall r \in R \quad (48)$$

$$w_{k,r} \in \{0,1\}, \forall k \in K, \forall r \in R \quad (49)$$

$$0 \leq T_r^{start} \leq T, \forall r \in R \quad (50)$$

$$0 \leq T_r^{back} \leq T, \forall r \in R \quad (51)$$

其中，目标函数1（公式23）为最小化运输环节碳排放，由行程和车辆的指派变量、运输距离和排放因子的乘积累加得到；目标函数2（公式24）为最大化共享集散中心的集散效率，由两部分组成：第一部分关注的是货车在涉及多个行程时，这些行程之间的间隔时间。较短的间隔时间意味着车辆在UFCC内的停留时间减少。第二部分关注的是货物在UFCC的积压时间，指货物到达UFCC的时间与对应行程从UFCC出发时间之间的差值。较短的积压时间意味着货物在UFCC内的停留时间减少，能够更快地被转运至目的地，从而提高了货物的流转速度，减少了库存成本和潜在的延误风险。

约束条件中，公式(25)表示每个客户都应被服务。这意味着物流配送场景中，所有客户的需求必须得到满足，确保没有客户被遗漏。此约束确保了服务

的全面性和客户满意度，也是物流系统高效运转的基础要求。

约束(26)旨在使得车货匹配方案服从假设(3)。具体来说，货车在一次出发和返回的行程中可以同时服务不同的批次，但对于同一批次货物，同一辆车不能进行多次服务。这一约束确保了运输效率，避免重复配送的浪费。

约束(27)表示只有当某个运输行程被确定执行时，货物批次才能被分配给该行程。该约束确保运输安排的有效性，避免将货物分配到未执行的行程，从而防止资源浪费和运输过程中的混乱。

约束(28)表示只有该批次被某个行程服务，该批次中的顾客才能被对应行程服务。这意味着一个货物批次的所有客户必须由同一个行程来服务，从而简

化了调度过程，确保每个批次的货物能够在同一时间段内完成配送。

约束(29)表示某个行程最多被某个批次执行一次。这一约束保证了调度的明确性和一致性，避免了调度冲突和资源浪费，确保了运输计划的可行性和高效性。

约束(30)到约束(34)涉及将行程指派给车辆，并产生对于同一车辆不同行程的接续关系。这些约束确保了在特定车辆完成一个行程后，能够尽快衔接到下一个行程，从而优化车辆利用率，减少空驶时间和能耗，提高整体运输效率。

约束(35)表示如果某个行程要服务某个批次，那么这个行程的出发时间必须大于该批次的到达时间与UFCC整备时间的和。这确保了货物在到达UFCC后，有足够的时间进行必要的整备和处理，保证了后续配送的顺利进行。

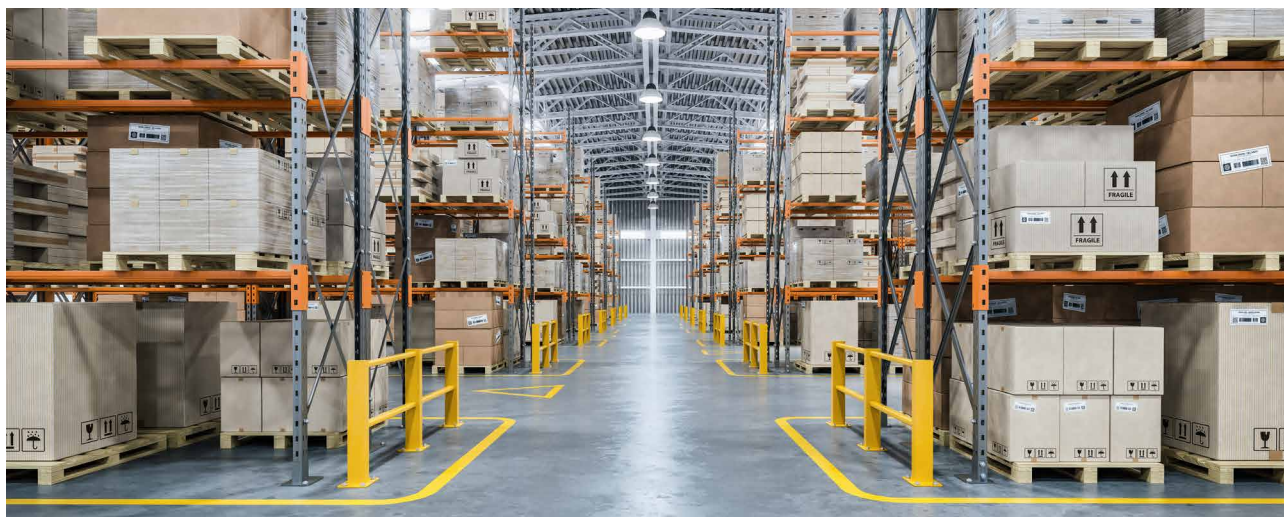
约束(36)到约束(39)表示如果该行程被执行，那么该行程在图中应该满足的流量约束。这些约束确保每个行程的物流路径在整个网络中是合理和连贯的，避免了路径规划中的断点或重复，确保车辆在各个节点之间的顺畅流通和高效运行。

约束(40)表示对任意的行程，服务对象的总需求必须小于车辆的能力。这一约束反映了车辆的载重限制，确保每辆车在其承载能力范围内运行，避免超载问题，保证了运输的安全性和合规性。

约束(41)到约束(43)涉及行程的行驶时间限制。这些约束确保每个行程的运输时间在合理范围内，避免了不必要的延误和等待，提高运输的时效性和可靠性。

约束(44)表示时间窗约束。每个行程必须在客户的时间窗口内完成服务，确保及时配送，提升客户满意度。这一约束对物流系统的精确调度提出了要求，也是实现高效、可靠配送的重要保障。

约束(45)到(51)为各个变量类型及取值范围约束。



参考文献

- [1]. 中国互联网络信息中心. 第55次《中国互联网络发展状况统计报告》[EB/OL]. (2025-01-17)[2025-02-05]. <https://www.cnnic.net.cn/NMediaFile/2025/0117/MAIN1737100758200NNZ5AVJ3C1.pdf>.
- [2]. 人民日报. 连续十年, 我国快递业务量居世界第一! [EB/OL]. (2023-12-06)[2025-02-05]. <https://www.peopleapp.com/column/30035515152-500004940405>.
- [3]. 央视网. 2024年我国快递业务量达1745亿件 连续11年稳居世界第一[EB/OL]. (2025-01-08)[2025-02-05]. https://www.gov.cn/yaowen/shipin/202501/content_6997303.htm.
- [4]. 中国快递行业的碳排放 研究发现摘要,绿色和平[R].2023.06.
- [5]. 汪旭晖,谢寻.数字科技创新引领物流业绿色低碳转型的机制与路径——基于京东物流的案例研究[J].经济与管理研究,2024,45(05):21-40.
- [6]. UNFCCC. The Role of Electric Vehicles in Achieving Net Zero Emissions. United Nations Framework Convention on Climate Change, 2021.
- [7]. Wang T, Li H, Zhang J, et al. Influencing factors of carbon emission in China's road freight transport[J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2012, 43: 54-64.
- [8]. Zhu L, Xiong Q. Key influencing factor and future scenario simulation of China's CO2 emissions from road freight transportation[J]. Sustainable Production and Consumption, 2023, 37: 11-25.
- [9]. Tian Y, Zhu Q, Lai K, et al. Analysis of greenhouse gas emissions of freight transport sector in China[J]. Journal of Transport Geography, 2014, 40: 43-52.
- [10]. Liimatainen H, Hovi I B, Arvidsson N, et al. Driving forces of road freight CO2 in 2030[J]. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 2015, 45(3): 260-285.
- [11]. 腾讯新闻. 中国新能源重卡销量激增, 预计全年突破7万辆 [EB/OL]. 腾讯新闻, 2024-12-04[2025-01-13]. <https://news.qq.com/rain/a/20241204A09DCH00>.
- [12]. 中华人民共和国工业和信息化部. 轻型商用车燃料消耗量限值: 征求意见稿[S]. 北京: 工业和信息化部, 2023.
- [13]. 中华人民共和国工业和信息化部. 重型商用车燃料消耗量限值: 征求意见稿. 2022-06-17. [引用日期2025-01-05].
- [14]. 零排放货运行动. 中国零排放货运年度进展报告2023. 2023-05-09.
- [15]. 生态环境部环境规划院碳达峰碳中和研究中心. 中国区域电网二氧化碳排放因子研究 (2023) . 2023-10-27.
- [16]. 黄文伟,强明明,孙龙林,张欣.基于MOVES的车辆排放因子测试 [J].交通运输工程学报,2017,17(01):140-148.
- [17]. 于津涛,熊兴旺,刘嘉伟,等.重型车Pems试验工况与中国工况对比研究[J].车用发动机,2020,(05):80-86.
- [18]. 任烁今,仝畅,李刚,张超,李腾腾,刘栋,张朋,刘志伟,关敏.重型车远程监控与实际道路试验对比研究及统计分析[J].汽车安全与节能学报,2023,14(02):239-248.
- [19]. 程颖,于雷,王宏图,郝艳召,宋国华.基于PEMS的MOBILE与COPERT排放模型对比研究[J].交通运输系统工程与信息,2011,11(03):176-181.DOI:10.16097/j.cnki.1009-6744.2011.03.027.
- [20]. 中华人民共和国生态环境部,国家市场监督管理总局. GB 17691-2018 重型柴油车污染物排放限值及测量方法 (中国第六阶段) [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2018.
- [21]. 侯跃,杨斌,许波桅,等.考虑碳交易的多车型运输车辆配送路径优化[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2015,34(05):647-652.
- [22]. 公路运输碳排放空间关联性及其影响因素研究[J/OL].三峡生态环境监测,1-18[2024-06-21].

- [23]. Daniela P, Paolo F, Gianfranco F, et al. Reduced urban traffic and emissions within urban consolidation centre schemes: The case of Bristol[J]. Transportation Research Procedia, 2014, 3: 508-517.
- [24]. 庄玉良,郭鹏宇,张衍晗,徐宁.多车型开放式公路运输低碳路径优化[J].物流技术,2024,43(02):148-160.
- [25]. 宋慧心,吴影辉.考虑多时间窗的多行程车辆路径优化问题研究[J].物流技术,2024,43(04):34-46.
- [26]. 李蕾.基于遗传算法的城市物流中心选址问题研究[J].青海师范大学学报(自然科学版),2015,31(04):73-78.DOI:10.16229/j.cnki.issn1001-7542.2015.04.017.
- [27]. 袁光辉,韩景侗,梁贺君.城市物流中心节点多目标识别模型及仿真[J].计算机应用研究,2019,36(06):1748-1752. DOI:10.19734/j.issn.1001-3695.2018.01.0018.
- [28]. 王永,田铖.城市配送中心多目标选址模型与车辆调度仿真研究[J].物流科技,2020,43(06):15-20.DOI:10.13714/j.cnki.1002-3100.2020.06.005.
- [29]. 高子健,初良勇.考虑订单优先级带时间窗的多车型开放式车辆路径问题研究[J].科学技术与工程,2024,24(06):2521-2529.
- [30]. 葛显龙,许茂增,王伟鑫.基于联合配送的城市物流配送路径优化[J].控制与决策,2016,31(03):503-512.DOI:10.13195/j.kzyjc.2014.1912.
- [31]. Malindretos G, Mavrommati S, Bakogianni M A. City logistics models in the framework of smart cities: urban freight consolidation centers[C]//4th international conference of supply chain. 2018, 14: 15.

GREENPEACE 绿色和平

绿色和平是一个全球性环保机构，致力于以实际行动推动积极的改变，保护地球环境。

地 址：北京东城区东四十条94号亮点文创园A座201室

邮 编：100007

电 话：86 (10) 65546931

传 真：86 (10) 64087851

www.greenpeace.org.cn