

分类号：
学号：20222108006

密级：公开
单位代码：10759

石河子大学 硕士学位论文



考虑碳排放的多中心冷链智能联合配送系统设计 与实现

学位申请人	张柏涛
指导教师	肖婧 教授
申请学位门类级别	专业硕士
学科、专业名称	电子信息
研究方向	计算机技术
所在学院	信息科学与技术学院

中国·新疆·石河子
2025年6月

分类号：
学号：20222108006

密级：公开
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



考虑碳排放的多中心冷链智能联合配送系统设计 与实现

学位申请人	张柏涛
指导教师	肖婧 教授
申请学位门类级别	专业硕士
学科、专业名称	电子信息
研究方向	计算机技术
所在学院	信息科学与技术学院

中国·新疆·石河子
2025年6月

**Design and implementation of multi-center cold chain intelligent joint
distribution system considering carbon emissions**

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Engineering

By

Zhang baitao

Computing Technology

Dissertation Supervisor: Prof. Xiao Jing

June, 2025

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明

本人所呈交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：张柏清 时间：2025年5月26日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：张柏清 时间：2025年5月26日

导师签名：肖婧 时间：2025年5月26日

摘要

随着人民生活水平提高，生鲜食品市场需求增长推动冷链物流快速发展。2024 年我国生鲜食品冷链物流需求总量约 3.565 亿吨，冷藏车保有量和冷库总量也不断增加。然而，冷链物流面临能源消耗和碳排放问题，降低碳排放、提高冷链物流效率和可持续性成为难题。联合配送模式成为解决小批量、高频次配送导致物流成本上升的有效途径，配送路径优化是冷链物流提高效率和降低成本的核心环节。本文以乌鲁木齐 W 冷链物流公司为研究对象，主要工作如下：

(1) 针对冷冻肉类、速冻食品等时效敏感性较低商品的配送需求，提出了基于小生境多精英变异灰狼优化算法 (NMEMGWO) 的多中心冷链低碳联合配送路径优化方法，可以有效降低碳排放，显著降低配送总成本。通过考虑车辆载重、联合配送和碳排放等因素，构建了以固定成本、运输成本、制冷成本和碳排放成本为总成本的多中心冷链低碳联合配送 (MDCCLCJD) 模型，并以总成本最小化为优化目标。为验证所提算法的有效性，借助 W 冷链物流公司的多中心冷链配送数据，将 NMEMGWO 与 IACA、HASATA 和 HGA 三种近些年所提出的路径优化算法进行对比。仿真实验表明，本文所提出的 NMEMGWO 相比于其他三种算法在碳排放上降低了 9.94% 以上，在配送距离上降低了 13.66% 以上，在总成本上降低了 14.77% 以上。

(2) 针对蔬菜、鲜肉等高时效敏感商品的配送需求，提出了混沌自适应差分进化搜索算法 (CADESA) 的带时间窗多中心冷链低碳联合配送路径优化方法，可以提高用户满意度和配送效率，有效降低配送总成本。在 MDCCLCJD 模型基础上考虑用户时间窗约束，并设置满意机制，把变质成本和时间惩罚成本加入总目标优化中，建立带时间窗多中心冷链低碳联合配送模型。将 CADESA 与近些年提出的 ALNS_ACO 和 IFA 路径优化方法以及 NMEMGWO 进行对比。仿真实验表明，CADESA 相比于其他算法在碳排放上减少 7.82% 以上，在总成本上降低了 12.48% 以上，在满意度上提高了 2.77% 以上。最后基于 CADESA 对多中心联合配送、多中心独立配送和单中心配送 3 种不同配送模式进行仿真实验，结果表明多中心联合配送在不同指标上均优于其他配送模式。

(3) 设计并实现了多中心冷链低碳联合配送系统。系统前端采用 Vue3 框架，后端基于 Spring Boot 框架实现。系统包括用户模块、后台管理模块、订单管理模块、多中心路径规划及数据可视化分析模块等。通过嵌入 NMEMGWO 与 CADESA 算法，系统可依据配送需求选择无时间窗或带时间窗优化模型，生成兼顾成本、碳排放与时效性的配送方案。最后，为了验证系统的可靠性，本系统基于乌鲁木齐 W 冷链物流企业的实际业务场景进行了初步应用示范，应用效果良好，并对其进行了全面的系统功能测试，该系统所设计的各项功能均被有效地展示，系统能够依据不同配送模式灵活抉择配送方案，全方位优化配送路径，降低综合运营成本与碳排放。

关键词：多中心联合配送；冷链物流；低碳物流；车辆路径优化；启发式算法

Abstract

With the improvement of people's living standards, the market demand for fresh food is increasing, which has driven the rapid development of the cold chain logistics industry. In 2024, the total demand for fresh food cold chain logistics in China was approximately 356.5 million tons, and the stock of refrigerated vehicles and the total amount of cold storage facilities are also on the rise. However, the cold chain logistics industry is confronted with issues related to energy consumption and carbon emissions. Reducing carbon emissions and enhancing the efficiency and sustainability of cold chain logistics have become significant challenges. The joint distribution model has emerged as an effective solution to address the problem of increased logistics costs caused by small-batch and high-frequency deliveries. Optimizing delivery routes is a core aspect of improving the efficiency and reducing the costs of cold chain logistics.

This thesis takes the W Cold Chain Logistics Company in Urumqi as the research object and conducts the following main works:

(1) For low time-sensitive goods such as frozen meat and quick-frozen food, a multi-center low-carbon joint distribution route optimization method based on the Niche Multi-Elite Mutation Grey Wolf Optimizer (NMEMGWO) is proposed, effectively reducing carbon emissions and significantly lowering total distribution costs. Considering factors such as vehicle load, joint distribution, and carbon emissions, a Multi-Depot Cold Chain Low-Carbon Joint Distribution (MDCCLCJD) model is constructed, minimizing total costs, including fixed costs, transportation costs, refrigeration costs, and carbon emission costs. To validate the algorithm, NMEMGWO is compared with three recent route optimization algorithms (IACA, HASATA, and HGA) using W Company's multi-depot distribution data. Simulation results show that NMEMGWO reduces carbon emissions by over 9.94%, decreases delivery distance by over 13.66%, and lowers total costs by over 14.77% compared to the other algorithms.

(2) For highly time-sensitive goods such as vegetables and fresh meat, a time-window multi-center low-carbon joint distribution route optimization method based on the Chaotic Adaptive Differential Evolution Search Algorithm (CADESA) is proposed, improving customer satisfaction and delivery efficiency while reducing total costs. Building on the MDCCLCJD model, time window constraints and a satisfaction mechanism are incorporated, adding spoilage costs and time penalty costs to the optimization objective. CADESA is compared with ALNS_ACO, IFA, and NMEMGWO. Simulations demonstrate that CADESA reduces carbon emissions by over 7.82%, decreases total costs by over 12.48%, and improves satisfaction by over 2.77%. Additionally, CADESA is applied to compare three distribution modes: multi-depot joint distribution, multi-depot independent distribution, and single-depot distribution, showing that multi-depot

joint distribution outperforms the others across all metrics.

(3) A multi-center low-carbon joint distribution system is designed and implemented. The front-end of the system is developed using the Vue3 framework, and the back-end is based on the Spring Boot framework. It integrates modules such as user management, back-end management, order management, multi-center route planning, and data visualization analysis. By embedding the NMEMGWO and CADESA algorithms, the system can generate distribution plans that balance cost, carbon emissions, and timeliness according to the distribution requirements, choosing between time-window-free and time-window optimization models. Finally, to verify the reliability of the system, it has been preliminarily applied and demonstrated in the actual business scenario of W Cold Chain Logistics Company in Urumqi. The application results are satisfactory, and a comprehensive system function test has been conducted. All the designed functions of the system are effectively demonstrated, and the system can flexibly select distribution plans based on different distribution modes, optimize distribution routes in an all-round way, and reduce comprehensive operating costs and carbon emissions.

Key words: Multi-center Joint Delivery; Cold Chain Logistics; Low-carbon Logistics; Vehicle routing optimization; Heuristic Algorithm

目录

摘要.....	I
Abstract.....	II
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 国内外研究现状.....	3
1.2.1 冷链物流配送路径优化研究现状.....	3
1.2.2 多中心车辆路径配送模型研究现状.....	4
1.2.3 联合配送路径规划研究现状.....	5
1.2.4 考虑碳排放的物流配送路径优化研究现状.....	6
1.3 论文研究内容.....	7
1.4 论文组织与安排.....	8
第 2 章 相关理论和技术工作.....	10
2.1 冷链物流相关理论.....	10
2.1.1 冷链物流的定义.....	10
2.1.2 冷链物流的特点.....	10
2.2 低碳物流的相关理论.....	11
2.2.1 低碳物流的定义.....	11
2.2.2 低碳物流的特点.....	11
2.2.3 碳排放相关概念.....	11
2.2.4 碳排放成本的计算.....	12
2.3 多中心联合配送相关概念.....	13
2.3.1 多中心联合配送的定义.....	13
2.3.2 车辆配送路径问题的相关研究.....	13
2.4 车辆路径问题求解方法.....	14
2.5 本章小结.....	15
第 3 章 基于 NMEMGWO 的多中心冷链低碳联合配送方法.....	16
3.1 多中心冷链低碳联合配送路径规划问题.....	16
3.1.1 多中心冷链低碳联合配送问题分析.....	16
3.1.2 问题描述.....	17
3.2 多中心冷链低碳联合配送模型假设及说明.....	17
3.2.1 模型假设.....	17

3.2.2 参数说明.....	18
3.3 成本描述.....	19
3.3.1 固定成本.....	19
3.3.2 运输成本.....	19
3.3.3 制冷成本.....	19
3.3.4 碳排放成本.....	20
3.4 多中心冷链低碳联合配送模型建立.....	21
3.5 基于 NMEMGWO 的多中心冷链低碳联合配送路径优化.....	22
3.5.1 种群编码与初始化.....	22
3.5.2 适应度计算.....	23
3.5.3 小生境策略.....	24
3.5.4 小生境灰狼位置更新.....	25
3.5.5 克隆变异策略.....	26
3.5.6 多精英池交换策略.....	27
3.6 W 公司多中心冷链联合配送模型与分析.....	28
3.6.1 W 公司多中心冷链联合配送基本数据.....	28
3.6.2 模型参数设置.....	31
3.6.3 模型求解.....	31
3.6.4 配送方案结果对比分析.....	36
3.7 本章小结.....	38
第 4 章 基于 CADESA 的带时间窗多中心冷链低碳联合配送方法.....	39
4.1 问题描述.....	39
4.2 带时间窗的多中心冷链低碳联合配送模型假设及说明.....	40
4.2.1 模型假设.....	40
4.2.2 参数说明.....	41
4.3 成本描述.....	41
4.3.1 固定成本.....	42
4.3.2 运输成本.....	42
4.3.3 制冷成本.....	42
4.3.4 变质成本.....	43
4.3.5 时间惩罚成本.....	43
4.3.6 碳排放成本.....	44
4.3.7 用户满意度计算.....	45
4.4 带时间窗的多中心冷链低碳联合配送模型建立.....	45

4.5 基于 CADESA 的带时间窗多中心冷链低碳联合配送优化	46
4.5.1 种群编码	47
4.5.2 混沌初始化	47
4.5.3 适应度计算	48
4.5.4 突变策略池机制	48
4.5.5 自适应变异选择	49
4.5.6 改进的交叉操作	49
4.5.7 选择操作	50
4.5.8 分层邻域搜索策略	50
4.6 实验求解与分析	51
4.6.1 W 公司带时间窗的多中心冷链低碳联合配送基本数据	51
4.6.2 模型参数设置	54
4.6.3 模型求解	55
4.6.4 优化方案结果分析	61
4.6.5 不同配送模式下的方案对比	63
4.7 本章小结	65
第 5 章 多中心冷链低碳联合配送系统设计与实现	66
5.1 系统需求分析	66
5.1.1 功能性需求	67
5.1.2 非功能性需求	68
5.2 系统总体架构设计	69
5.3 模块设计与实现	70
5.4 系统测试和结果展示	74
5.5 本章小结	76
第 6 章 结论与展望	77
6.1 结论	77
6.2 展望	78
参考文献	79
致谢	84
作者简介	85

第1章 绪论

1.1 研究背景

随着人民生活水平的提升和消费观念的转变，生鲜食品市场需求不断增长，我国冷链物流行业已迈入高速发展期，成为支撑内需增长与民生保障的核心基础设施^[1-3]。如图 1-1 所示，根据《中国冷链物流发展报告 2024》的数据，2023 年我国生鲜食品冷链物流需求总量达到 3.5 亿吨，同比增长 6.1%，2024 年受预制菜市场规模扩张至 6300 亿元和生鲜电商渗透率提升至 15.6% 的双重拉动，需求总量达到 3.65 亿吨，同比增速跃升至 4.3%^[4]。与此同时，冷链物流总额从 2023 年的 8.9 万亿元增至 2024 年前三季度的 9.2 万亿元，占社会物流总额比重提升至 4.7%，其经济枢纽功能日益凸显。目前，全国冷藏车保有量达到 46.5 万辆，较 2023 年增长 13.8%，其中新能源车型占比突破 8%；冷库总容量扩张至 2.45 亿立方米，智慧化冷库占比提升至 35%，仓储分拣效率同比提高 40%，规模体量稳居全球首位^[5-6]。这一增长不仅体现于数据维度，更通过“生鲜产品上行+消费品下沉”的双向流通，直接拉动农业增值与县域消费升级，形成“冷链-产业-经济”的良性循环^[7]。

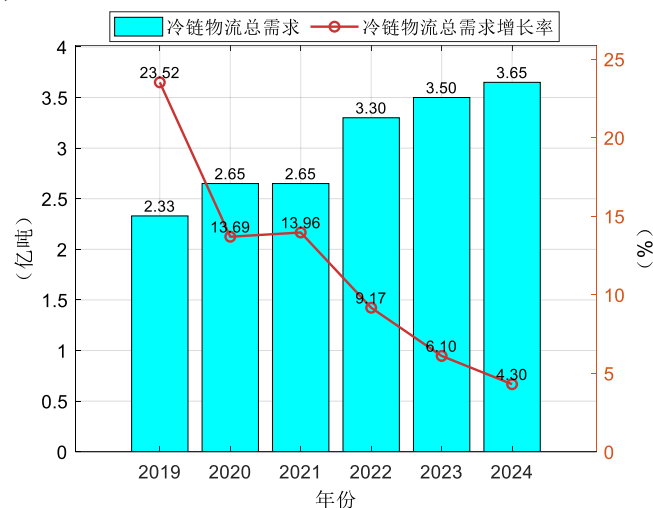


图 1-1 2019-2024 年我国冷链物流发展状况^①

Fig. 1-1 Development of cold chain logistics in China from 2019 to 2024

然而，冷链物流的规模化扩张与能源密集型特征使其成为碳排放治理的关键矛盾点。由图 1-2 所示，根据《中国能源统计年鉴 2023》数据，交通运输在我国总的碳排放占比达到 9.8%，以及根据碳排放统计，冷链运输能耗占全社会物流总能耗的 28%，其中冷藏车燃油消耗与冷库电力需求分别贡献 54% 和 36% 的碳排放量。2023 年冷链物

^①数据来源《中国冷链物流发展报告 2024》

流行业碳排放总量达 1.2 亿吨，占交通运输领域排放量的 15.3%，且年均增速超 7%。高碳排放不仅加剧气候压力，更与“双碳”目标形成直接冲突。若维持现有模式，2030 年冷链碳排放或将突破 2 亿吨，远超行业减排容限^[8-9]。因此，如何在降低碳排放的同时提升冷链物流的效率与可持续性，已成为行业亟待解决的难题。为应对这一挑战，低碳环保的冷链物流逐渐成为研究的热点。优化冷链物流配送网络，不仅需要关注经济效益、降低物流成本，还应注重碳排放控制和环境保护。所以，优化运输路径、减少能源消耗、降低运输成本并实现低碳目标，已成为实现绿色物流的关键策略^[10-12]。

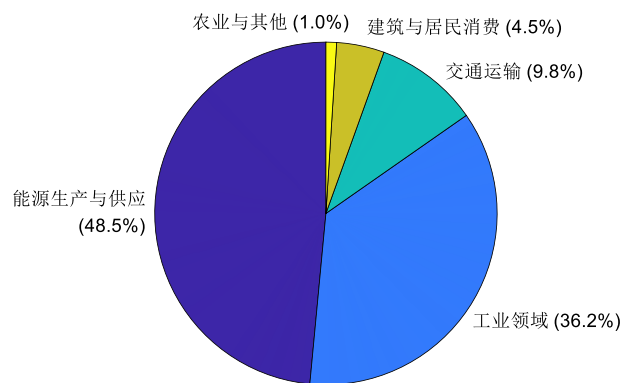


图 1-2 各行业碳排放占比分布图^②

Fig. 1-2 Distribution map of carbon emissions proportion in various industries

另外，随着消费者个性化需求的增加，同时对冷链产品的质量和安全性的重视逐渐增高，越来越多的企业采取小批量、高频次的配送模式，这导致物流成本不断上升^[13]。在这一背景下，联合配送模式逐渐成为解决这一问题的有效途径。通过多个企业或物流公司共享配送资源并合理规划配送路径，联合配送能够在提高物流效率、降低运输成本的同时，还能减少碳排放，推动绿色物流的发展。此外，联合配送可以提高运输车辆的装载率，节省人力资源，减少车辆总投入，并有效缓解交通压力。从宏观角度看，联合配送不仅提升了物流系统的资源配置效率，还减少了运输过程中的碳排放和环境污染，是推动低碳物流发展的重要策略^[14-15]。在冷链物流领域，运输路径优化是提高效率和降低成本的核心环节。合理规划运输路径、缩短运输时间和距离，能够有效降低运输成本并提升服务质量^[16-18]。因此，针对冷链物流的多中心配送问题，如何在实现经济效益的同时优化碳排放和运输成本，提高用户满意度，成为该领域的研究重点^[19-20]。

基于此，本文以乌鲁木齐 W 冷链物流公司的多中心冷链配送场景和具体需求为研究对象，结合重点领域兵团科技攻关项目《***物流信息服务平台》的技术框架与数据支撑，开展多中心冷链低碳联合配送路径优化研究。首先，针对冷冻肉类、速冻食品

^② 数据来源《中国能源统计年鉴 2023》

等时效敏感性较低商品，融合 W 公司运营场景与能耗监测数据，建立以固定成本、运输成本、制冷成本和碳排放成本的综合运营成本最小的多中心冷链低碳联合配送路径优化模型，来实现配送总成本最小化；其次，针对蔬菜、预制菜等高时效商品，引入混合时间窗约束机制和用户满意度机制，进一步考虑生鲜品变质成本和时间惩罚成本对综合运营成本的影响，建立带时间窗的多中心冷链低碳联合配送路径优化模型，旨在降低总成本的优化目标，减少碳排放，提高配送效率和用户满意度。本文研究不仅能降低冷链物流运营总成本、提升配送时效性以及提供定制化配送解决方案，还将通过标准化接口设计，形成可迁移的低碳配送决策支持系统，为同类型企业优化冷链物流网络、平衡经济效益与环境效益提供理论模型与实施路径，进而推动行业级绿色冷链物流体系的构建。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 冷链物流配送路径优化研究现状

自 1959 年 Dantzig 和 Ramser^[21]首次提出车辆路径优化问题（Vehicle Routing Problem, VRP）以来，国内外众多学者纷纷投身于这一领域的研究，通过引入不同的场景、约束条件和研究方法，对 VRP 在冷链物流中的应用进行了深入探讨和拓展。随着我国经济的持续发展和人民生活水平的逐步提升，居民对于生鲜农产品的品质和新鲜度要求日益严格。与普通物流相比，生鲜农产品的物流具有更高的复杂性和挑战性，主要体现在其易腐性和对时间的敏感性。

冷链物流配送路径优化是经典车辆路径问题（Vehicle Routing Problem, VRP）在冷链物流领域的具体应用与拓展。经典 VRP 主要关注如何在满足客户配送需求的前提下，通过合理规划车辆行驶路径，以最小化总行驶距离或成本。冷链物流配送路径优化则在此基础上，进一步考虑了冷链运输的特殊性，如温控要求、商品易腐性、配送时效性以及碳排放等约束条件。这些特殊性使得冷链物流配送路径优化问题更加复杂，但也为经典 VRP 的理论和方法提供了新的应用场景和研究方向。

在冷链物流配送路径优化的研究中，国内外学者围绕算法创新、约束条件精细化及多目标协同等方向持续深化探索。基础路径优化模型方面，陈晔娜和陈暄^[22]基于鲸鱼优化算法提出无时间约束下的车辆路径规划框架，其全局搜索能力有效降低了配送成本；张佳莹和石小法^[23]则通过多车型动态调度模型验证了车型适配对能耗的优化潜力，降幅达 18%。算法改进上，解玉蝶^[24]的改进遗传算法通过自适应交叉策略将求解精度显著提升，而 Wang^[25]进一步优化蚁群算法的信息素更新机制，在复杂路网中的收敛速度较传统方法明显提高。在国外研究中，Zeng^[26]开发的混合遗传算法，结合车辆

调度与路径规划，有效提升运输效率，体现了多算法融合的趋势。

时间约束的引入显著提高了模型现实适配性。李季^[27]构建硬时间窗下的生鲜配送模型，证明时间限制虽增加了配送成本，但有效降低了货损率；李倩等人^[28]提出的模糊时间窗模型，通过弹性时间区间设计，在客户满意度提升时总成本降低。国际学者 Tang 等人^[29]进一步将时间窗与遗传算法结合，实现时间敏感场景下的路径优化，其模型在准时交付率上优于传统方法。此外，Bai 等人^[30]在低碳路径规划中嵌入实时交通数据，动态调整时间窗约束，有效降低配送延误率，凸显了时空耦合优化的必要性。

另外，多目标协同优化成为近年研究焦点。吴瑶等人^[31]提出的“订单拆分-多车舱”模型，在车辆装载率提升的同时减少碳排放；田炜和廖名岩^[32]构建成本-满意度双目标体系，量化显示客户时间敏感度的增加会使总成本上升。国际研究进一步扩展目标维度，Zhang 等人^[33]对比电动车与柴油车的多目标优化，发现电动车可减少碳排放但成本会增加，而柴油车成本-碳排放均衡性更优；Shi 等人^[34]开发的智能绿色调度系统，整合碳排放、能耗与时间窗，通过实时数据驱动决策，有效降低综合成本。

1.2.2 多中心车辆路径配送模型研究现状

在 VRP 模型的基础上，通过考虑多个配送中心从而发展为多中心路径问题（Multi-Depot Vehicle Routing Problem, MDVRP），该模式下多个配送中心对配送需求进行独立配送。王祺和肖青^[35]构建了模糊需求下的多中心车辆路径模型，证明当需求波动幅度超过 20% 时，其鲁棒性优化方案可使车辆空驶率减少，并通过模糊集理论有效平衡了资源利用率与需求不确定性风险。Luo^[36]等人针对多车场车辆路径及其时间窗问题（MDVRP/TW）的复杂约束，提出融合极值优化的多阶段混合蛙跳算法（MSFLA-EO），通过动态分阶段搜索平衡全局探索与局部开发。该方法可有效降低路径成本，提高求解速度。

在此基础上增加时间窗约束条件，MDVRP 问题进一步演变为多中心带时间窗车辆路径问题（Multi-Depot Vehicle Routing Problem with Time Windows, MDVRPTW）。郭嘉炜等人^[37]聚焦时变路网下的多中心多车型电动卡车联合配送问题，提出动态路径-车型匹配模型，通过实时路况预测与车辆能耗优化，使总配送成本降低；范厚明等人^[38]则构建了混合时间窗约束下的多中心混合车队路径优化模型，发现灵活时间窗较严格时间窗可有效降低运输成本，同时提升客户满意度。国际学者 Li 等人^[39]针对多仓库车辆路径问题中的需求不确定性，开发了基于鲁棒优化的两阶段决策模型，在需求波动幅度较大时仍能保持路径稳定性。进一步地，X. Li 等人^[40]提出时间窗敏感的两阶段优化框架，第一阶段通过聚类算法划分配送区域，第二阶段采用改进遗传算法生成路径，有效提高了高峰期配送准时率。

通过改变 MDVRP 的配送原则，衍生出了开放式车辆路径问题（Open Vehicle

Routing Problem, OVRP)，这一模型引起了广泛关注。在 OVRP 中，配送车辆在完成所有任务后，无需返回起始配送中心。刘建仁^[41]率先提出基于双层规划模型的冷链物流开放式车辆路径优化框架，通过上层规划最小化配送成本、下层规划控制货损率，验证了该模型在中小规模农村配送网络中可有效降低总成本；刘长石等人^[42]进一步引入时变路网约束，构建联合配送的开放式路径模型，发现高峰时段动态路径调整策略可缩短车辆行驶时间，同时减少冷链货损率。针对生鲜电商场景，付朝晖和刘长石^[43]提出开放式时变车辆路径问题的混合整数规划模型，证明当配送时间窗弹性增加时，可降低车辆空载率。

在算法优化层面，韩荣腾^[44]将鲸鱼优化算法（WOA）应用于农村开放式车辆路径规划，其自适应搜索机制使路径成本较传统遗传算法有效降低；而韩荣腾^[45]进一步对比蚁群优化算法（ACO）与 WOA 的性能，发现 ACO 在路径收敛速度上优于 WOA，但 WOA 在复杂路网中的全局优化能力更强，可使总成本降低。

1.2.3 联合配送路径规划研究现状

联合配送指的是对多个配送中心进行统一资源共享，联合调度和规划配送，这种配送模式属于半开放式车辆路径问题（Half Open Vehicle Routing Problem, HOVRP），HOVRP 有效结合了 MDVRP 和 OVRP 的配送特点，在该模式在车辆在配送完成后可返回最近的配送中心。初良勇等人^[46]针对城市物流场景，构建了多中心半开放式异构电动车辆路径模型，通过电动车辆续航里程与载重协同优化，使总成本降低，且充电频率减少；周莉芸和韩曙光^[47]进一步引入配送距离限制，提出多仓库半开放式路径规划模型，有效使车辆空驶率下降，同时避免超长距离配送导致的货损风险。针对复杂服务需求，陈荣虎等^[48]设计了多中心半开放式同时送取货车辆路径模型，其动态装卸策略使车辆装载率提升，并通过双向路径优化减少重复行驶里程。

在冷链物流场景深化研究中，江雨燕等人^[49]通过整合时间窗与客户满意度，构建双目标优化框架，发现通过收紧时间窗约束，可提升客户满意度，但配送成本增加；其后续研究^[50]进一步聚焦多配送中心半开放式冷链配送问题，提出基于货品温控需求的路径优化模型，在保证冷链完整性的前提下，可降低总成本和货损率。

国外研究中，Gao 和 Tang^[51]针对生鲜多中心联合配送问题，提出碳排放-成本双目标均衡模型，验证电动车队替代方案可使碳排放减少，但需额外建设充电设施；Xu 和 Zhang^[52]将蚁群算法与多中心车辆路径结合，应用于城市洪水救援场景，通过智能体仿真优化救援路径，使应急响应效率提升 23%；Xu 等人^[53]则研究了复杂约束下的冷链运输方案，开发鲁棒性优化模型，在异常事件发生下仍能保持 85% 的路径可行性，并实现成本-风险-时效的帕累托均衡。

1.2.4 考虑碳排放的物流配送路径优化研究现状

随着低碳经济的兴起，低碳物流逐渐成为全球物流领域的研究热点。低碳物流旨在降低物流运输过程中的碳排放，减少对环境的污染。在低碳冷链物流路径优化的研究中，学者们通过算法改进与多目标融合持续推动模型精细化与场景适配性。廖列法和张幸平^[54]较早提出客户满意度与碳排放协同优化的多配送站路径模型，证明随着满意度每提升，碳排放量会增加，但通过动态路径调整可实现帕累托均衡；赵江利^[55]进一步开发基于改进蚁群算法的低碳配送中心选址系统，其自适应信息素更新机制使选址成本降低，同时减少运输碳排放。算法创新层面，蒋一波等人^[56]设计遗传算法的低碳物流中心配送模型，通过交叉变异策略优化路径-能耗匹配，有效降低总成本；邓嘉鑫等^[57]改进模拟退火算法，引入动态冷却系数与邻域搜索策略，在生鲜农产品配送中使碳排放减少。

针对复杂运输场景，杨骐鸣等人^[58]提出改进沙猫群优化算法的绿色多式联运路径模型，整合公路-铁路运输优势，碳排放较单一公路运输有效降低；丁澍和邱玉琢^[59]构建多目标冷链混合车队路径规划模型，量化显示电动车占比提高同时，总碳排放减少，但充电设施投资需增加。聚焦生鲜冷链，邓红星等人^[60]与许浩等人^[61]分别验证了时间-温度耦合约束对碳排放的影响，发现配送时效压缩将导致制冷能耗上升，需通过路径动态优化平衡时效与碳足迹。

国际研究则扩展了低碳优化的理论边界。Yin^[62]开发的多目标车辆路径模型，集成实时交通数据与碳排放预测，在智能交通系统中实现碳排放-成本-时效的三维均衡；Yao等人^[63]针对生鲜农产品绿色车辆路径问题，提出碳排放敏感度分级策略，高敏感区域路径优化可使碳排放减少；Liu等人^[64]针对社区团购场景设计碳-成本双目标模型，通过用户聚类与路径协同，使社区配送碳排放降低。理论层面，Fernández Gil等人^[65]系统综述了绿色车辆路径问题的启发式与混合算法，指出多目标分解算法（NSGA-III）在复杂场景中的求解效率较传统方法提升30%-40%。

尽管现有研究在多中心配送路径优化领域取得了一定进展，但针对低碳冷链联合运输场景的探索仍存在显著局限：一方面，多数模型未充分考虑生鲜商品的差异化运输特性，导致路径规划与实际需求适配性不足；另一方面，现有研究多聚焦单一成本维度，难以满足企业在经济、环境与服务质量间的综合决策需求。

本文针对上述研究空白，提出基于时间窗差异的多中心冷链低碳联合配送路径优化框架，针对时效敏感性较低商品设计无时间窗约束的协同调度模型，降低冗余成本；针对高时效商品引入混合时间窗约束机制，建立变质模型与碳排放量化方法，构建多目标综合成本最小化模型。通过改进的启发式算法，实现各项成本的全局均衡，填补多约束条件下多中心冷链联合配送路径优化研究的理论缺口，为企业低碳转型提供可