

电商冷链配送：时间窗约束下的联合路径优化

孙琳, 干宏程, 陈雨蝶

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2025年10月15日; 录用日期: 2025年10月29日; 发布日期: 2025年11月21日

摘要

随着电商行业的蓬勃发展, 生鲜电商等细分领域逐渐兴起, 冷链物流配送需求不断增加, 成本控制与效率优化成为关键问题。针对带时间窗的电商冷链物流联合配送车辆路径问题展开研究, 构建融合制冷成本和损坏成本等在内的多维度成本优化模型, 并采用遗传算法与变邻域搜索算法相结合的混合算法进行求解。通过仿真实验得出: 联合配送在多方面均优于独立配送; 综合考虑全部成本可使配送总成本达到最优, 实现经济与环境效益的平衡; 电商企业在不同需求场景下可选择不同车型, 为电商冷链物流企业降本增效, 实现转型升级提供理论依据和决策支持。

关键词

电子商务, 冷链物流, 多中心, 联合配送, 时间窗

E-Commerce Cold Chain Distribution: Joint Path Optimization under Time-Window Constraints

Lin Sun, Hongcheng Gan, Yudie Chen

Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: October 15, 2025; accepted: October 29, 2025; published: November 21, 2025

Abstract

With the booming development of the e-commerce industry, fresh e-commerce and other subdivisions are gradually emerging, and the demand for cold chain logistics distribution is increasing. Cost control and efficiency optimization have become key issues. This study focuses on the joint distribution vehicle routing problem in e-commerce cold chain logistics with time windows. A multi-dimensional cost optimization model incorporating refrigeration costs and damage costs was constructed. A

文章引用: 孙琳, 干宏程, 陈雨蝶. 电商冷链配送: 时间窗约束下的联合路径优化[J]. 电子商务评论, 2025, 14(11): 1710-1722. DOI: 10.12677/ecl.2025.14113613

hybrid algorithm combining genetic algorithm and variable neighborhood search algorithm is used to solve the model. The simulation results showed that joint distribution outperforms independent distribution in many aspects. Considering all costs comprehensively can optimize the total distribution cost, achieving a balance between economic and environmental benefits. E-commerce enterprises can choose different vehicle types under different demand scenarios. This study provided theoretical basis and decision-making support for e-commerce cold chain logistics enterprises to reduce costs and improve efficiency, and to achieve transformation and upgrading.

Keywords

E-Commerce, The Cold Chain Logistics, Multi-Depot, Joint Distribution, Time Windows

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在现代电商供应链管理体系中，物流配送作为连接生产与消费的核心纽带，正随着技术革新和市场需求的不断变化而持续拓展。传统物流配送体系以常温货物运输集散为核心，而随着电商行业的消费升级及生鲜电商等细分领域的蓬勃发展，对温控物流的专业化需求逐渐增加，电商冷链物流配送新生态应运而生。

随着电商冷链市场规模的扩大，众多学者对电商冷链物流问题展开研究。方文婷等[1]将绿色成本纳入冷链物流配送总成本，并融合 A^* 算法和蚁群算法进行求解。徐泽水等[2]为避免制冷成本重复计算，将制冷过程拆分为预冷、运输、卸货、返程四阶段，同时在货损成本中引入病毒感染风险因子。Alkaabneh等[3]通过优化运输成本、库存成本以及碳排放成本来实现整体成本最小化。王勇等[4]针对生鲜电商产品易腐特性，建立温度-产品价值损坏模型，构建成本最小和商品价值损坏最小的双目标函数。Jiang等[5]针对电商冷链物流高排放、高能耗特点，构建两阶段优化模型，兼顾初始路径优化与动态需求响应。任腾等[6]将交通拥堵作为重要因素纳入电商冷链物流。Liu等[7]引入碳排放交易机制，构建绿色车辆路径模型。

电商冷链产品易腐坏且保鲜时效短，运输配送中温度波动、时长等因素易影响其品质。江云倩等[8]构建结合时间窗和碳排放约束的冷链物流路径优化模型，并采用改进遗传算法求解。M Huang等[9]构建同时考虑客户时间窗和产品新鲜度的客户满意度函数，并设计改进的自适应大领域搜索算法进行求解。何美玲等[10]构建软时间窗多温共配模型，并设计时间窗激励成本函数，并通过仿真实验验证模型的有效性。

随着城市群经济一体化进程加快与终端消费需求的碎片化发展，传统单一中心配送已难以满足多区域、多频次的配送需求。多中心联合配送模式成为电商冷链物流配送领域应对规模化、复杂化需求的重要发展方向。江雨燕等[11]构建多中心半开放式模型，并将动态因素考虑在内。王勇等[12]将总成本最少和车辆使用数量最少设为双重优化目标，对多中心车辆路径问题展开了系统性探讨，为物流企业优化决策提供参考。饶卫振等[13]提出依托平台的协作配送模式，并通过 Shapley 值进行成本分摊，为企业联合配送提供新参考。张颖钰等[14]以车辆配送距离最短和配送中心车辆进出平衡为目标建立数学模型，并通过实验验证了多中心半开放策略的有效性。

综上，关于电商冷链物流的研究已取得一定的进展，但通过文献梳理发现仍存在以下不足：(1) 部分

研究对电商冷链物流总成本的计算仍有不足，制冷成本和货损成本是冷链区别于常温物品的核心支出，文献[4] [6]未将其纳入模型，导致成本核算不够完整。(2) 部分学者在计算损坏成本时将新鲜度衰减系数定义为运输过程中和卸货过程中，造成损坏成本重复计算[1] [7]。(3) 联合配送的优点已在传统物流中得到验证[14]，但在电商冷链物流中，同时纳入时间窗约束的多中心联合配送研究仍显不足。

本文在现有研究的基础上开展以下主要工作：(1) 在总成本核算中，全面纳入固定成本、碳排放、油耗、制冷、货损以及处罚成本六大项。针对损坏成本，通过引入“车门关闭”和“车门开启”两种衰减度参数，有效避免成本重复计算。(2) 通过仿真实验对比独立配送和联合配送两种运作模式，为电商物流企业提供参考；通过对比不同决策目标为物流企业制定决策策略提供可行建议；对车辆最大载重进行敏感性分析，为电商物流企业车型选择提供决策参考。

2. 模型建立

2.1. 问题描述

某电商冷链物流企业设有 n 个配送中心和 m 个客户点，每个客户点的需求量已知。车辆从配送中心出发，逐一为客户提供服务后，返回当前距离最近的配送中心。车辆在行驶过程中速度保持不变，且配送中心均采用同一类型车辆。整个问题的优化目标是在满足所有客户需求的前提下，最小化配送成本。

模型假设如下：

- (1) 配送中心及客户点坐标位置已知。
- (2) 各客户点需求量已知，需求量固定，不会发生动态变化，且只能由一辆车满足。
- (3) 配送中心只有一种类型车辆，且车辆最大载重已知。
- (4) 车辆在行驶过程中不得超过车辆最大载重。
- (5) 在配送过程中，车辆行驶速度保持不变。
- (6) 客户期望服务时间窗已知，该时间窗为软约束，超出时间窗，仍可接受服务，但产生处罚成本。

2.2. 符号定义

相关符号定义如表 1 所示。

Table 1. Symbol definition

表 1. 符号定义

符号	定义	符号	定义
V	$V = \{1, 2, \dots, m+n\}$ ，其中 m 是客户点数量， n 是配送中心数量	Q_k	车辆 k 的最大载重
V_c	客户点集合， $V_c = \{1, 2, \dots, m\}$	Q_i	车辆离开客户点 i 处的载重
V_d	配送中心集合， $V_d = \{m+1, \dots, m+n\}$	Q_{ij}	车辆在节点 i 与节点 j 之间的载重
K	车辆集合， $K = \{1, 2, \dots, k, \dots\}$	C_1	每辆车的固定成本
x_{ijk}	0~1 变量，如果第 k 辆车从节点 i 到节点 j 则为 1，否则为 0	C_2	单位碳价格(元/kg)
y_{ik}	0~1 变量，如果第 k 辆车服务了节点 i 则为 1，否则为 0	C_3	单位燃油价格(元/L)
d_{ij}	节点 i 到节点 j 之间的距离	C_{41}	运输和等待时单位时间的制冷剂成本(元/h)
t_{ij}	从节点 i 到节点 j 之间的时间	C_{42}	服务时单位时间的制冷剂成本(元/h)

续表

v_k	车辆行驶速度	C_5	单位质量产品价格(元/t)
t_i	车辆到达节点 i 的时间	C_{61}	车辆早到时的单位时间惩罚成本(元/h)
s_i	车辆在客户点 i 处的服务时长	C_{62}	车辆晚到时的单位时间惩罚成本(元/h)
$[DET, DLT]$	配送中心时间窗	ω_1	运输和等待时单位时间制冷油耗(L/h)
$[ET_i, LT_i]$	客户点 i 的时间窗	ω_2	服务时单位时间制冷油耗(L/h)
ρ	车辆空载时单位距离油耗	δ_1	车门关闭时的产品新鲜度衰减系数
ρ^*	车辆满载时单位距离油耗	δ_2	车门打开时的产品新鲜度衰减系数
q_i	客户点 i 的送货需求	η	碳排放系数(kg/L)

2.3. 成本分析

(1) 固定成本

固定成本与车辆使用数量有关, 使用车辆数越多, 则固定成本越高。

$$Z_1 = \sum_{i \in V'} \sum_{j \in V'} \sum_{k \in K} C_1 * x_{ijk} \quad (1)$$

(2) 碳排放成本

在电商冷链物流配送中, 碳排放成本由两部分组成: 车辆行驶能耗碳排放和制冷系统运行能耗碳排放。

1. 车辆行驶能耗碳排放

基于参考文献[15]提出的负载估计法, 车辆行驶的燃油消耗量与车辆载重和运输距离有关。

$$f_1 = \sum_{i \in V'} \sum_{j \in V'} \sum_{k \in K} x_{ijk} \left(\rho + \frac{\rho^* - \rho}{Q_k} Q_{ij} \right) d_{ij} \quad (2)$$

2. 制冷系统运行碳排放

制冷系统油耗主要由车辆行驶过程中, 车辆早到时和服务过程中产生。

$$f_2 = \omega_1 \sum_{i \in V'} \sum_{j \in V'} \sum_{k \in K} \frac{d_{ij}}{v_k} + \omega_1 \sum_{i \in V'_c} \max\{(ET_i - t_i), 0\} + \omega_2 \sum_{i \in V'_c} s_i \quad (3)$$

碳排放成本为:

$$Z_2 = C_2 * \eta * (f_1 + f_2) \quad (4)$$

(3) 油耗成本

燃油量已在计算碳排放时详细给出, 故此处直接给出油耗成本。

$$Z_3 = C_3 * (f_1 + f_2) \quad (5)$$

(4) 制冷成本

电商冷链物流配送与普通物流的关键区别在于, 为确保产品在运输途中的新鲜度和品质的稳定性, 需要不断地使用制冷剂。因此, 在计算总成本时, 应将制冷成本作为一项核心变量纳入。

$$Z_4 = C_{41} \sum_{i \in V'} \sum_{j \in V'} \sum_{k \in K} x_{ijk} t_{ij} + C_{41} \sum_{i \in V'_c} \max\{(ET_i - t_i), 0\} + C_{42} \sum_{i \in V'_c} s_i \quad (6)$$

(5) 损坏成本

货物损坏通常与货物自身及暴露时间密切相关。为更好衡量货损成本,引入参考文献[16]的新鲜度衰减系数。配送车辆自配送中心驶出后抵达客户点前,车门始终紧闭;抵达后开始卸货,车门开启,内外温差增大,加速货损,故 $\delta_1 < \delta_2$ 。

$$Z_5 = C_5 y_{ik} \sum_{i \in V_c} \sum_{k \in K} \left[q_i \left(1 - e^{-\delta_1 (\max\{t_i, ET_i\} - DET)} \right) + Q_i \left(1 - e^{-\delta_2 s_i} \right) \right] \quad (7)$$

(6) 时间窗处罚成本

在配送过程中,每位客户均有预期的时间窗。当物流配送未能满足客户预设的时间窗口要求时,客户满意度呈现下降趋势。因此,在模型中引入时间窗处罚成本,以约束配送行为并降低时间窗违约风险。

$$Z_6 = \sum_{i \in V_c} \left[C_{61} * \max\{(ET_i - t_i), 0\} \right] + \sum_{i \in V_c} \left[C_{62} * \max\{(t_i - LT_i), 0\} \right] \quad (8)$$

2.4. 目标函数

$$\min Z = Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5 + Z_6 \quad (9)$$

$$\sum_{i \in V_d} \sum_{j \in V_c} x_{ijk} = \sum_{i \in V_d} \sum_{j \in V_c} x_{jik} = 1, \forall k \in K \quad (10)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in V} x_{ijk} = 1, \forall i \in V_c, j \neq i \quad (11)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in V} x_{ijk} = 1, \forall j \in V_c, i \neq j \quad (12)$$

$$\sum_{i \in V_c} q_i y_{ik} \leq Q_k, \forall k \in K \quad (13)$$

$$t_j = \sum_{i \in V_c} \sum_{k \in K} (\max\{t_i, ET_i\} + s_i + t_{ij}) x_{ijk} + \sum_{k \in K} \sum_{l \in V_d} (DET + t_{lj}) x_{ijk}, \forall j \in V_c \quad (14)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ijk} \leq |S| - 1, \forall S \subseteq V_c, \forall k \in K \quad (15)$$

$$DET \leq t_i \leq DLT, \forall i \in V \quad (16)$$

$$x_{ijk}, y_{ik} \in \{0, 1\}, \forall i \in V, \forall j \in V, \forall k \in K \quad (17)$$

式(9)表示成本最小化;式(10)表示车辆可返回任意配送中心;式(11)和式(12)表示客户只能被服务一次;式(13)送货量不能超过车辆最大载重;式(14)表示车辆到达客户点的时间;式(15)表示消除子回路;式(16)配送中心时间窗限制;式(17)为决策变量。

3. 算法设计

本文研究的带时间窗的多中心联合配送模型,属于典型的 NP-hard 问题。为求解该问题,本文提出一种将遗传算法(genetic algorithm, GA)和变邻域搜索算法(variable neighborhood search, VNS)相结合的混合算法(GA-VNS)。在此算法中,遗传算法负责全局搜索,广泛探索解空间;变邻域搜索算法通过不断地改变邻域结构来帮助算法跳出局部最优,有效避免早熟收敛。

3.1. 染色体编码和解码

本文采用自然数编码方式构建染色体。每个染色体通过离散的自然数序列映射为一个完整的配送方案,在解码过程中,明确车辆的归属、路径顺序及约束满足条件。如图1所示,客户点编号为1~9,共有两个配送中心A和B。车辆1从配送中心A出发,依次服务编号1、6、4、5的客户,若继续服务客户

点 7，则会超过车辆载重限制，故返回距客户点 5 最近的配送中心 B。车辆 2 负责配送 7、3、2、8、9 的客户。

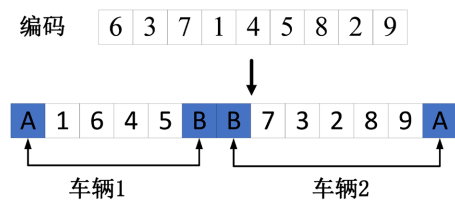


Figure 1. Chromosome coding and decoding diagram

图 1.染色体编码解码示意图

3.2. 适应度函数

适应度函数以总成本最小化为目标，故选择式(10)的倒数为适应度函数。

3.3. 遗传操作

3.3.1. 选择操作

本文采用锦标赛选择和精英保留策略的混合选择机制。在每一代的种群中，先用锦标赛的选择方法来挑选出父代，通过交叉和变异的方式来产生子代。后采用精英保留策略，在子代种群中识别出最优的个体，直接将其纳入下一代种群，以取代下一代中适应度较低的个体。

3.3.2. 交叉操作

本文采用顺序交叉策略。首先，从两个父代染色体上随机选择两个位置，两个位置中间个体组成一个中间段。将一个父代染色体的中间段复制到新子代染色体的前端。其次，从另一个父代染色体中依次复制剩余基因到子代的空余位置。若遇到已在子代中间段中存在的基因，则跳过该基因，继续复制后续基因，直至完成子代染色体的构建。交叉操作如图 2 所示。

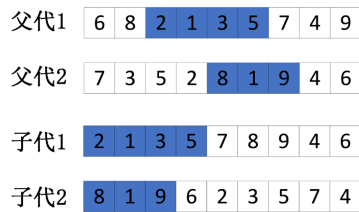


Figure 2. Crossover operation

图 2.交叉操作

3.3.3. 变异操作

采用两点变异。在父代染色体上随机选择两个不同的位置并进行基因交换，以产生新的子代。图 3 为变异操作。

3.4. 变邻域搜索操作

变邻域搜索通过“扰动 - 局部搜索 - 邻域切换”的循环机制来有效平衡全局探索与局部开发。在遗传算法的每一代迭代结束后，对当前种群中的最佳个体执行变邻域搜索操作。本文采用 4 种路径内邻域结构来提高求解质量。



Figure 3. Mutation operation
图 3. 变异操作

(1) 交换：从当前路径中随机选择两个节点，并互换其位置。(2) 单节点插入邻域：从当前路径中随机选择一个节点，将其从当前位置移除，并插入到路径中的新位置。(3) 双节点插入邻域：从当前路径中随机选择两个相邻节点，将其从当前位置移除，并插入到路径中的新位置。(4) 反转：从当前路径中，随机选择一段连续子路径，并反转其顺序。

4. 仿真实验

客户点坐标为 A-n36-k5，需求量为 Python 软件 rand()函数在[0, 1.5]之间随机生成。客户点和配送中心信息如表 2 所示。参数信息部分来源于文献[17]，具体如下： $v_k = 45 \text{ km/h}$ ，产品卸货速度 $v_i = 3.6 \text{ t/h}$ ，服务时间 $s_i = \frac{q_i}{v_i}$ ， $\rho = 0.18 \text{ L/km}$ ， $\rho^* = 0.41 \text{ L/km}$ ， $Q_k = 5 \text{ t}$ ， $C_1 = 180 \text{ 元/辆}$ ， $C_2 = 0.25 \text{ 元/kg}$ ， $C_3 = 6.68 \text{ 元/L}$ ， $C_{41} = 10 \text{ 元/L}$ ， $C_{42} = 15 \text{ 元/L}$ ， $C_5 = 5000 \text{ 元/t}$ ， $C_{61} = C_{62} = 100 \text{ 元/h}$ ， $\omega_1 = 1 \text{ L/h}$ ， $\omega_2 = 1.5 \text{ L/h}$ ， $\delta_1 = 0.001$ ， $\delta_2 = 0.002$ ， $\eta = 2.61 \text{ kg/L}$ 。

Table 2. Customer point and distribution center information
表 2. 客户点和配送中心相关信息

编号	坐标/km	需求/t	时间窗	编号	坐标/km	需求/t	时间窗
1	(15, 19)	0.2	(8:30~11:30)	21	(41, 23)	1.1	(9:30~11:00)
2	(1, 49)	0.5	(9:30~11:00)	22	(19, 75)	0.7	(8:00~11:30)
3	(87, 25)	1.1	(9:30~11:00)	23	(15, 79)	0.8	(9:00~11:30)
4	(69, 65)	0.8	(8:30~12:00)	24	(79, 47)	1.3	(8:00~11:00)
5	(93, 91)	1.4	(8:00~12:00)	25	(19, 65)	0.4	(9:00~11:30)
6	(33, 31)	0.3	(9:30~11:30)	26	(27, 49)	1.0	(10:00~12:30)
7	(71, 61)	1.2	(8:00~12:30)	27	(29, 17)	0.6	(10:00~12:30)
8	(29, 9)	0.7	(10:00~12:00)	28	(25, 65)	1.5	(9:00~11:30)
9	(93, 7)	0.9	(9:00~11:30)	29	(59, 51)	0.2	(9:30~11:00)
10	(55, 47)	1.3	(10:00~12:00)	30	(27, 95)	0.5	(8:30~12:00)
11	(23, 13)	0.4	(9:00~11:00)	31	(21, 91)	1.2	(8:00~11:00)
12	(19, 47)	1.5	(9:30~11:30)	32	(61, 83)	0.9	(8:30~12:00)
13	(57, 63)	0.6	(9:30~11:30)	33	(15, 83)	0.3	(8:30~11:00)
14	(5, 95)	1.0	(9:30~11:30)	34	(31, 87)	1.4	(9:30~11:00)
15	(65, 43)	0.1	(9:00~11:00)	35	(71, 41)	0.7	(10:00~12:30)
16	(69, 1)	1.2	(9:00~12:00)	36	(91, 21)	1.1	(9:00~11:30)
17	(3, 25)	0.5	(8:30~12:30)	D37	(20, 34)	/	(8:00~17:00)
18	(19, 91)	0.9	(9:30~12:30)	D38	(80, 25)	/	(8:00~17:00)
19	(21, 81)	1.4	(10:00~12:00)	D39	(21, 83)	/	(8:00~17:00)
20	(67, 91)	0.3	(9:30~12:00)	D40	(69, 60)	/	(8:00~17:00)

4.1. 不同配送方式对比分析

在多中心配送前提下，对比二种差异化配送模式的运营效能。独立配送实验中，采用分区配送策略，将 36 个电商客户点按顺序划分为四个服务区域，每个区域包含 9 个连续编号的客户节点。D37 配送中心负责客户节点 1~9 的电商配送服务，D38、D39、D40 配送中心则分别负责客户节点 10~18、19~27 及 28~36 的配送服务。在联合配送实验中，车辆对配送中心无强制规定，可任意返回距离较近的配送中心。[表 3](#) 为多中心独立配送最优路径表，[图 4](#) 为独立配送最优路径图，[表 4](#) 为多中心联合配送最优路径表，[图 5](#) 为多中心最优路径图。[表 5](#) 为不同配送模式下结果对比。

Table 3. Optimal route table for multi-center independent distribution

表 3. 多中心独立配送最优路径表

车辆	配送路径	装载量/t	装载率	平均装载率
1	D37-1-2-6-7-4-5-D37	4.4	88%	75%
2	D37-3-9-8-D37	2.7	54%	
3	D38-11-17-12-14-18-D38	4.3	86%	
4	D38-16-15-10-13-D38	3.2	64%	
5	D39-22-23-25-26-21-27-D39	4.6	92%	
6	D39-24-20-19-D39	3.0	60%	
7	D40-28-33-31-30-34-D40	4.9	98%	
8	D40-32-29-35-36-D40	2.9	58%	

Table 4. Optimal path table for multi-center joint distribution

表 4. 多中心联合配送最优路径表

车辆	配送路径	装载量/t	装载率	平均装载率
1	D37-17-1-11-8-27-21-6-D37	3.8	76%	85.71%
2	D38-16-9-36-3-D38	4.3	86%	
3	D40-7-4-32-20-5-D40	4.6	92%	
4	D39-31-30-34-19-D39	4.5	90%	
5	D39-22-33-23-14-18-D39	3.7	74%	
6	D40-24-13-29-10-15-35-D38	4.2	84%	
7	D39-28-25-2-12-26-D37	4.9	98%	

分析[表 3](#)和[表 4](#)可知，当采用独立配送策略时，配送中心固定服务特定的客户点，容易出现车辆装载率过低的问题。例如，配送中心 D37 第 2 辆车按照路径 D37-3-9-8-D37 进行服务，车辆装载率仅有 54%，D40 的第 2 辆车沿 D40-32-29-35-36-D40 的路径服务时，装载率为 58%，装载率均低于 60%。独立配送有两辆车配送效率达到 90%以上，而联合配送有 3 辆达到了 90%以上，独立配送的平均装载率为 75%，而联合配送的平均装载率则达到 85.71%。这表明，联合配送策略在提高车辆装载率方面具有显著优势，能够更有效地利用运输资源，减少资源浪费。

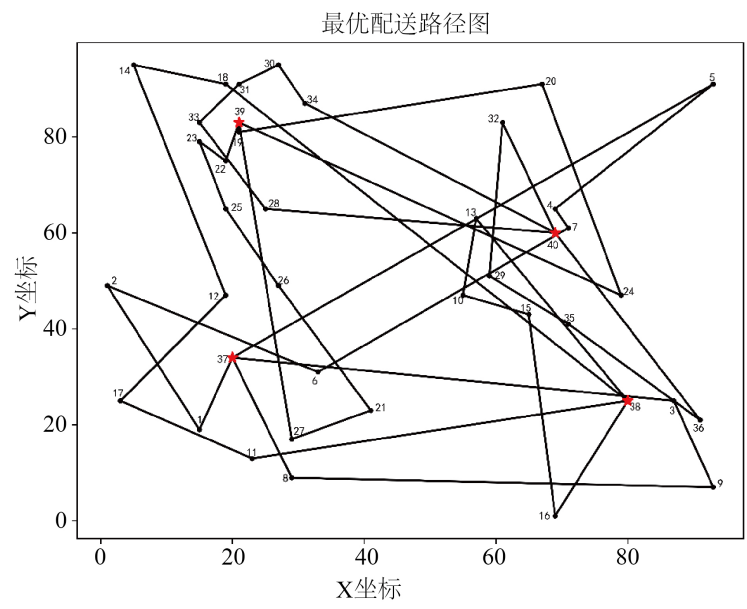


Figure 4. Optimal path map for independent distribution
图 4. 独立配送最优路径图

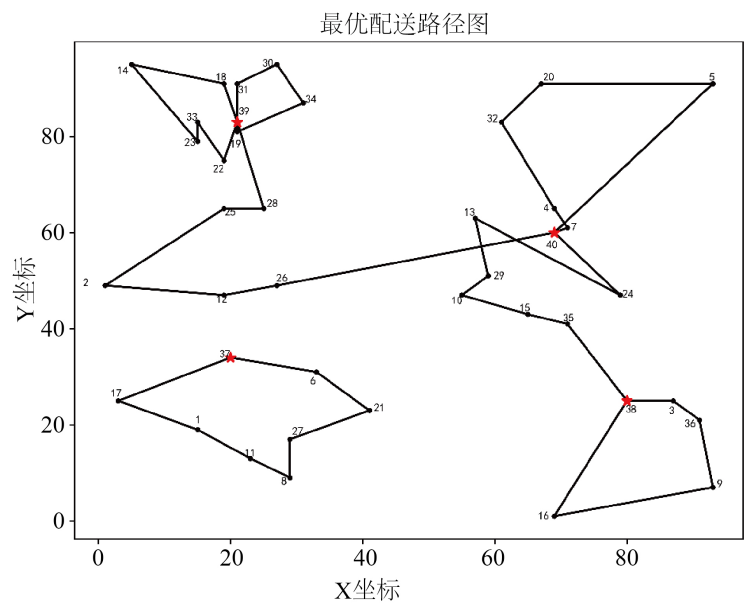


Figure 5. Optimal path map for joint distribution
图 5. 联合配送最优路径图

Table 5. Comparison table of results for different delivery modes
表 5. 不同配送模式结果对比表

	多中心配送	
	联合配送	独立配送
固定成本	1260	1440
碳排放成本	91.24	212.56

续表

油耗成本	934.03	2176.08
制冷成本	275.64	460.61
损坏成本	385.34	501.77
处罚成本	125.99	175.12
总成本	3072.23	4966.14
总配送距离	564.48	1448.28
车辆使用数量	7	8
碳排放量	364.94	850.24
满足客户时间窗	28	24

分析表 5 得出下列结论：

(1) 成本方面：联合配送模式较独立配送在各项成本上均呈现显著优势。其中，固定成本下降 12.50%，油耗成本优化效果最为突出，降幅达 57.08%。联合配送总成本为 3072.23 元，相较于独立配送的 4966.14 元，成本节约了 1893.91 元，降低了 38.14%。联合配送能有效实现规模经济效益，对于电商物流企业成本管控具有重要实践价值。

(2) 环境方面：联合配送碳排放量显著低于独立配送，降低 57.08%。联合配送通过减少无效里程和提高车辆装载率，显著降低了物流配送对环境的影响，响应了“双碳”战略对电商物流行业的要求。

(3) 配送效率方面：联合配送的总配送距离为 564.48 km，远低于独立配送的 1448.28 km，这表明联合配送在配送路径优化方面表现更好，减少了不必要的行驶距离。此外，联合配送使用了 7 辆车，而独立配送使用了 8 辆车，表明联合配送在车辆资源利用上更加高效。

(4) 客户满意度方面：通过合理规划配送路径，联合配送在规定时间内送达有 28 个电商客户，独立配送只有 24 个。在电商服务经济时代，“准时即达”的履约能力不仅是构建差异化竞争力的关键要素，而且能提升客户满意度，进而增强对电商企业的忠诚度和消费黏性。

综上所述，联合配送策略在成本效益、环境影响、配送效率和客户满意度等方面均优于独立配送策略。因此，采用联合配送策略可以显著提高电商物流配送效率，降低成本，减少环境影响，并提升客户满意度。在实际配送中企业可优先考虑联合配送策略，以实现更高的运营效率和更好的客户体验。

4.2. 不同决策目标对比分析

为了深入探讨不同决策目标对带时间窗的冷链物流多中心联合配送的影响，本文将设置以下几种决策目标进行对比分析，具体结果如表 6 所示：仅考虑距离最短 D、不考虑碳成本的其他成本 F1、碳成本最小 F2 和综合考虑全部成本 FT。

Table 6. Comparison table of results under different decision objectives
表 6. 不同决策目标下结果对比表

	D	F ₁	F ₂	F _T
总成本	3762.60	3088.63	3317.18	3072.23
固定成本	1260	1260	1260	1260
碳排放成本	90.64	96.91	85.79	91.24

续表

油耗成本	927.91	992.08	878.33	934.03
制冷成本	334.53	275.79	307.08	275.64
损坏成本	533.22	383.30	435.29	385.34
处罚成本	616.29	80.55	350.68	125.99
碳排放量	362.55	387.63	343.18	364.94
总配送距离	525.63	606.07	527.44	564.48
车辆使用数量	7	7	7	7
满足客户时间窗	22	28	24	28

从表 6 可知, (1)当仅追求运输距离最短时, 只有 22 个电商客户在规定时间内完成服务, 产生了最高的处罚成本和总成本。这表明运输成本和运输距离之间存在非线性相关关系 - 距离缩短并不必然带来成本降低。在规划电商物流配送路线时, 只考虑距离是不合理的。(2)当电商物流企业忽略碳成本时, 碳排放量、油耗成本、碳排放成本以及配送距离均为最高, 配送总成本也无法达到最优。在“双碳”战略背景下, 电商物流企业若希望向绿色物流转型, 碳排放是必不可少关键环节。(3)当电商物流企业仅以碳排放量最小为目标时, 超出客户服务时间窗的情况和总成本均有所增加。因此, 在制定决策目标时, 碳排放是重要的考率因素, 但不能将其作为唯一目标。单一目标的设定不利于企业配送成本的优化。(4)当电商企业综合考虑包括碳成本、处罚成本等因素时, 配送总成本达到最优值 3072.23 元, 同时碳排放量和处罚成本均处于较低水平。这一结果表明, 通过多维度成本的协同优化, 电商企业在满足客户需求的同时, 可实现经济环境效益的平衡, 验证了模型的有效性。

4.3. 敏感性分析

本文选取不同最大载重的车辆作为研究对象, 以探讨车辆载重对相关因素的影响。选取最大载重为 3 t、5 t、7 t 的车辆作为示例, 并相应地将其单车成本设置为 100 元、180 元和 300 元, 以此分析车辆最大载重变化所带来的影响, 表 7 为不同车辆最大载重下的结果对比。

Table 7. Comparison table of maximum load results of different vehicles
表 7. 不同车辆最大载重结果对比表

	3t	5t	7t
总成本	3239.28	3072.23	3426.46
固定成本	1100	1260	1500
碳排放成本	113.04	91.24	96.81
油耗成本	1157.21	934.03	991.05
制冷成本	332.86	275.64	264.68
损坏成本	276.27	385.34	532.83
处罚成本	259.90	125.99	41.08
碳排放量	452.14	364.94	387.22
总配送距离	701.47	564.48	612.01
车辆使用数量	11	7	5
满足客户时间窗	23	28	28

从表 7 可知,随着车辆最大载重的增加,车辆使用数量呈递减趋势。然而,损坏成本却随着载重的增加而显著上升,这是因为损坏成本和运输及服务时间相关。车辆载重增加时,单车服务客户点数量增多,导致运输与服务时间增加,进而推动损坏成本的上升。当车辆最大载重为 3 t 时,所需车辆数量最多为 11 辆。此时因装载量受限导致配送效率较低,配送距离、油耗成本、碳排放成本、制冷成本都最高。由于单车行驶时间较短,损坏成本相对较低,适用于品质要求较高的电商配送场景。当车辆最大载重为 7 t 时,所需车辆数量减少至 5 辆,多数可变成本(如配送距离、油耗等)随之降低。然而,购置大型车带来的固定成本增加,导致配送总成本达到最高值 3426.46 元。但其时效性方面表现优异,满足 28 个客户时间窗需求,处罚成本最低 41.08 元,超出时间窗服务时长约为 49 分钟,适用于对时效性要求较高的配送需求。当车辆最大载重为 5 t 时,包括碳排放成本和油耗成本在内的总成本达到最低为 3072.23 元。该载重方案在成本敏感型普通电商货运场景中有显著优势,其配送路径合理,总行驶距离最短,兼顾经济与环保双重目标。

5. 结论

本文以带时间窗的多中心电商冷链联合配送为研究对象,构建融合经济-环境-客户满意度的多目标优化模型,并提出遗传-变邻域混合算法求解。主要研究结论如下:(1)与独立配送相比,联合配送通过资源共享,显著降低电商配送成本与碳排放,且在客户满意度方面有所提升。(2)电商冷链物流企业在制定决策目标时应综合考虑成本、碳排放、货损及时间窗等多重目标,单目标最优不能提升整体运营绩效。(3)电商企业应依据不同需求量配置多型号冷藏车,实现经济型与环保性的协同优化。

参考文献

- [1] 方文婷,艾时钟,王晴,等.基于混合蚁群算法的冷链物流配送路径优化研究[J].中国管理科学,2019,27(11):107-115.
- [2] 徐泽水,温晶,王新鑫,等.改进制冷成本的冷链物流低碳车辆路径优化研究——基于 ALNS 遗传算法[J].软科学,2024,38(1):92-100.
- [3] Alkaabneh, F., Diabat, A. and Gao, H.O. (2020) Benders Decomposition for the Inventory Vehicle Routing Problem with Perishable Products and Environmental Costs. *Computers & Operations Research*, **113**, Article 104751. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2019.07.009>
- [4] 王勇,张杰,刘永,等.基于时间窗和温度控制的生鲜商品物流配送优化方法[J].控制与决策,2020,35(7):1606-1614.
- [5] Jiang, X., Liu, X., Pan, F. and Han, Z. (2024) Optimizing Cold Chain Distribution Routes Considering Dynamic Demand: A Low-Emission Perspective. *Sustainability*, **16**, Article 2013. <https://doi.org/10.3390/su16052013>
- [6] 任腾,罗天羽,李姝萱,等.面向冷链物流配送路径优化的知识型蚁群算法[J].控制与决策,2022,37(3):545-554.
- [7] Liu, G., Hu, J., Yang, Y., Xia, S. and Lim, M.K. (2020) Vehicle Routing Problem in Cold Chain Logistics: A Joint Distribution Model with Carbon Trading Mechanisms. *Resources, Conservation and Recycling*, **156**, Article 104715. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104715>
- [8] 江云倩,杨慧敏,彭程,等.考虑碳排放和时间窗的冷链物流配送路径优化研究[J].包装工程,2024,45(3):262-268.
- [9] Huang, M., Liu, M. and Kuang, H. (2024) Vehicle Routing Problem for Fresh Products Distribution Considering Customer Satisfaction through Adaptive Large Neighborhood Search. *Computers & Industrial Engineering*, **190**, Article 110022. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110022>
- [10] 何美玲,付文青,韩珣,等.软时间窗下考虑冷链物流多温共配的电动汽车路径优化[J].江苏大学学报(自然科学版),2024,45(6):629-635.
- [11] 江雨燕,尹莉,王付宇.多配送中心半开放式冷链物流配送路径优化[J].复杂系统与复杂性科学,2024,21(2):137-146.
- [12] 王勇,李慧星,罗思好,等.资源共享模式下多中心共同配送电动车辆路径优化问题[J].系统管理学报,2023,

- 32(6): 1119-1141.
- [13] 饶卫振, 孙远辰, 刘鹏, 等. 考虑产品损耗的生鲜产品协作配送模式研究[J/OL]. 系统工程理论与实践, 1-23. <https://link.cnki.net/urlid/11.2267.N.20250108.1411.006>, 2025-07-14.
 - [14] 张颖钰, 吴立云, 贾胜钦. 带时间窗的多中心半开放式 VRPSDP 问题研究[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(11): 2464-2475.
 - [15] Xiao, Y.Y., Zhao, Q.H., Kaku, I., *et al.* (2012) Development of a Fuel Consumption Optimization Model for the Capacitated Vehicle Routing Problem. *Computers & Operations Research*, **39**, 1419-1431.
 - [16] 李琳, 范体军. 零售商主导下生鲜农产品供应链的定价策略对比研究[J]. 中国管理科学, 2015, 23(12): 113-123.
 - [17] 陈雨蝶, 干宏程, 程亮. “双碳”背景下联合配送冷链物流模型及其求解算法[J]. 控制与决策, 2023, 38(7): 1951-1959.