

多车型冷链物流同时送取货车辆路径优化

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4月1日; 录用日期: 2025年5月1日; 发布日期: 2025年5月12日

摘要

在“双碳”目标驱动下, 冷链物流亟需兼顾低碳减排与运营成本双重目标。针对现有研究多维度协同不足、碳排放测算简化等问题, 文章提出时空耦合的多车型协同机制, 构建车型配置-中心协作-正逆向路径的三维决策模型, 集成制冷成本、时间窗柔性处罚等冷链特性约束, 建立多目标优化函数。针对模型特点, 设计动态自适应遗传算法, 通过种群演化状态感知和样本集中度反馈, 动态调整交叉率和变异率。仿真实验得出: 相比单一车型配送, 多车型策略降低总成本25.15%, 减少碳排放12%; 多中心模式相较于单中心配送距离缩减38.79%, 碳排放降低31.03%; 同时送取货模式较独立模式节约成本36.95%, 验证了模型在资源协同配置与低碳转型中的有效性, 为冷链物流企业提供了“车型-网络-流向”多要素联动的决策范式。

关键词

多车型, 多中心, 同时送取货, 冷链物流, 改进遗传算法

Research on the Vehicle Routing Optimization with Heterogeneous Fleet for Simultaneous Delivery and Pickup in Cold Chain Logistics

Lin Sun, Hongcheng Gan, Yudie Chen

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

Received: Apr. 1st, 2025; accepted: May 1st, 2025; published: May 12th, 2025

Abstract

Driven by the “dual carbon” goal, cold chain logistics urgently needs to balance the dual goals of low-

carbon emissions reduction and operating costs. Aiming at the problems of insufficient multidimensional collaboration and simplified carbon emission measurement in existing research, a spatio-temporal coupled multi-vehicle collaboration mechanism is proposed, and a three-dimensional decision model of vehicle configuration, center collaboration, and forward-reverse reverse paths is constructed. The cold chain characteristic constraints, such as refrigeration cost and flexible time window penalty, are integrated, and a multi-objective optimization function is established. Design a dynamic adaptive genetic algorithm based on the characteristics of the model, which dynamically adjusts the crossover and mutation rates through population evolution state perception and sample concentration feedback. Through simulation experiments, it was found that compared to single-vehicle delivery, the multi-vehicle strategy reduces total costs by 25.15% and carbon emissions by 12%. Compared to single-center distribution, the multi-center mode reduces the delivery distance by 38.79% and carbon emissions by 31.03%. The simultaneous delivery and pickup mode saves 36.95% of costs compared to the independent mode, verifying the effectiveness of the model in resource collaborative allocation and low-carbon transformation and providing a decision-making paradigm of “vehicle model-network-flow” multi-factor linkage for cold chain logistics enterprises.

Keywords

Heterogeneous Fleet Vehicle, Multiple Centers, Simultaneous Pickup and Delivery, Cold Chain Logistics, Adaptive Genetic Algorithm

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

随着消费升级和食品安全意识的提升，冷链物流作为保障生鲜农产品、医药制品等温敏商品质量的核心环节，已成为现代物流体系的重要支柱。《中国冷链物流发展报告(2024)版》显示，2023 年我国冷链市场规模占全球比重约为 25%，行业规模持续扩张。然而，在“双碳”战略背景下，冷链物流面临严峻挑战：一方面，其运输环节制冷能耗高，碳排放强度显著高于普通物流；国际能源署数据显示，公路运输占全球交通碳排放的 70% 以上，而冷链车辆的单位里程碳排放量较普通货车高出 30%~40% [1]。另一方面，电商渗透率提升催生了逆向物流需求，同时送取货场景的复杂性进一步增加了路径优化难度。如何在保障时效性与服务质量的前提下，实现运营成本与碳排放的协同优化，成为冷链物流企业亟待解决的关键问题。

在绿色低碳目标的驱动下，碳排放成本逐渐被纳入路径优化模型。Stellingwerf 等[2]构建了负载依赖型车辆路径模型(Load Dependent VRP, LDVRP)，通过引入载重 - 油耗动态耦合机制优化路线决策，并将制冷设备运行产生的碳排放纳入目标函数。方文婷等[3]提出基于油耗 - 碳排放转化函数的绿色成本核算框架，但其碳排放计算未考虑载重动态变化的影响。周鲜成等[4]进一步引入载重 - 速度交互作用，构建双变量碳排放函数，提升了测算精度，但模型未整合多车型与多中心调度机制。

多车型混合配送因灵活适配需求差异而备受国内外学者关注。杨珍花等[5]通过模拟退火算法验证多车型配送的经济与环境效益，但其模型未考虑冷链场景的温控能耗。李军涛等[6]引入交通拥堵系数构建多车型优化模型，但局限于固定配送中心场景。宾厚等[7]通过改进遗传算法和动态调整策略，证明了多车型配送在降低总成本和提升效率方面优于单一车型。Molina 等[8]提出异构车辆路径问题的分层求解框架，优先最大化客户服务量，其次降低运输成本，利用混合变邻域下降元启发式算法来求解模型。

随着城市化进程的加速,传统单一配送中心模式已无法适应大规模城市客户日益增长的配送需求。鲍春玲和张世斌[9]借助虚拟车场,将多配送中心问题转化为单一配送中心问题,并通过仿真实验验证了联合配送模式在优化配送效率和降低碳排放方面的显著优势。范厚明等[10]提出了一种针对生鲜品配送的半开放式多配送中心联合配送模式,并利用蚁群算法来优化配送路径,有效降低了物流成本并提高了配送效率。Liu等[11]提出融合冷链物流企业间合作与碳排放交易政策的联合配送绿色车辆路径问题模型。张颖钰等[12]构建了最小化车辆配送距离和平衡配送中心车辆进出的数学模型,验证了多中心半开放策略的有效性,为物流企业提供了决策参考。王祺和肖青[13]在客户需求不确定的情况下,以降低配送成本和提升客户满意度为目标,构建了基于可信性测度理论的模糊机会约束优化模型,通过仿真实验验证了在需求不明确时,多配送中心优于单配送中心模式。

近年来,随着电子商务的快速崛起,物流行业开始关注逆向物流的发展与优化,集送货一体化的车辆路径问题逐渐成为学者们关注的焦点。自Min[14]1989年首次探讨该课题以来,该研究领域得到了持续的扩展和深化。Wang等[15]进一步在VRPSPD (Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery)模型中引入时间窗限制,构建了混合二进制整数规划模型,并通过改进协同进化遗传算法进行求解。Sun等[16]针对城市配送中的动态变化,特别是新请求的到达、请求的变更或取消、交通拥堵和车辆故障等因素,建立了一个同时考虑送取货的动态车辆路径模型。

现有研究涵盖了绿色车辆路径问题、多车型混合配送、多中心模式、逆向物流等多个方面,对车辆路径问题进行不同维度的深入探索,并从多个角度为物流企业的运营管理提供了理论指导和实践支持。然而,通过文献梳理发现,现有研究仍存在以下不足:1) 多维度协同不足:多数研究仅聚焦单一维度(如:车型、网络 and 流向),缺乏“车型-网络-流向”多维要素的集成优化,未能充分发挥各维度之间的协同效应,实现整体物流系统的优化运行,难以全面应对复杂多变的实际配送场景。2) 碳排放测算简化:多数碳排放计算采用线性简化模型,忽略载重与速度的动态交互作用,导致碳成本测算偏差较高,无法准确反映实际运营中的碳排放情况,影响绿色车辆路径优化决策的科学性和有效性。

本文在现有研究的基础上,开展以下具有创新和特色的探索工作:

- 1) 构建时空耦合的多车型协同机制,打破传统研究中各要素相对独立优化的局限。通过动态车辆编组算法,实现冷链车型配置、配送中心协作与正逆向路径规划的三维决策联动。
- 2) 在通用车辆路径问题仅考虑固定成本和油耗成本的基础上,为确保食品安全、客户时效性要求和低碳发展要求,增加了制冷成本、损坏成本、处罚成本以及碳排放成本,提升成本核算的有效性,为物流企业的成本控制和决策提供了更可靠的依据。
- 3) 针对现有研究中碳排放计算模型简化的不足,采用载重-速度双变量碳排放函数,运用更为贴近现实的综合计算方法,能更准确地测算车辆在实际运行过程中的碳排放量,减少碳成本测算偏差,为绿色车辆路径问题提供参考,推动冷链物流行业低碳发展。

2. 模型建立

2.1. 问题描述和符号定义

道路网络中存在多个配送中心和多种类型的车辆,按照一定顺序为客户提供送取货服务,在行驶过程中,车辆行驶速度会随时间发生改变,服务完成后就近返回配送中心。该模型的优化目标为在确保满足客户需求的基础上,最大限度地减少整个配送流程的总成本,以实现成本效益的最大化,并提升物流配送的效率和经济性。各符号的具体定义如表1所示。

模型假设如下:

- 1) 客户点的需求(送货需求和取货需求)均已知,且只能由一辆车满足。

- 2) 配送中心拥有多种类型车辆, 为简便计算, 本文只设置不同类型车辆固定费用和车辆最大载重不同。
- 3) 在提供服务的过程中, 车辆的最大载重不得超过该车型的上限。
- 4) 时间窗信息已知。时间窗为柔性条件, 超出时间客户仍可接受服务, 但会产生处罚成本。

Table 1. System resulting data of standard experiment
表 1. 标准试验系统结果数据

符号	定义	符号	定义
V	$V = \{1, 2, \dots, m+n\}$, 其中 m 是客户点数目, n 是配送中心数目	C_2	单位燃油价格(元/L)
V_c	客户点集合, $V_c = \{1, 2, \dots, m\}$	C_3	单位碳价格(元/kg)
V_d	配送中心集合, $V_d = \{m+1, \dots, m+n\}$	C_{41}	运输和等待时单位时间的制冷剂成本(元/h)
R	车型集合, $R = \{1, 2, \dots, r, \dots\}$	C_{42}	服务时单位时间的制冷剂成本(元/h)
K_r	r 车型车辆集合, $K_r = \{1, 2, \dots, k_r, \dots\}$	C_5	单位质量产品价格(元/t)
x_{ijk_r}	0~1 变量, 如果 r 车型第 k 辆车从节点 i 到节点 j 则为 1, 否则为 0	C_{61}	车辆早到时的单位时间惩罚成本(元/h)
y_{ik_r}	0~1 变量, 如果 r 车型第 k 辆车服务了节点 i 则为 1, 否则为 0	C_{62}	车辆晚到时的单位时间惩罚成本(元/h)
d_{ij}	节点 i 到节点 j 之间的距离(km)	ω_1	运输和等待时单位时间制冷油耗(L/h)
t_{ij}	从节点 i 到节点 j 之间的时间	ω_2	服务时单位时间制冷油耗(L/h)
v_{ij}	车辆从节点 i 到节点 j 的平均行驶速度(km/h)	δ_1	运输和等待时的产品新鲜度衰减系数
t_i	车辆到达节点 i 的时刻	δ_2	服务时的产品新鲜度衰减系数
t'_i	车辆从节点 i 出发的时刻	η	碳排放系数(kg/L)
t''_i	从客户点 i 出发返回配送中心的时长	ξ	能量单位转化系数
s_i	车辆在客户点 i 处的服务时长	ψ	车辆引擎效率
$[DET, DLT]$	配送中心时间窗	g_e	每单位燃油消耗产生的能量(kW·h/L)
$[ET_i, LT_i]$	客户点 i 的时间窗	a_v	车辆行驶过程中的加速度(m/s ²)
q_i	客户点 i 的送货需求(t)	g	重量加速度(m/s ²)
d_i	客户点 i 的取货需求(t)	θ_{ij}	节点 i 到节点 j 之间的道路坡度
q_r	r 车型车辆自重(t)	C_r	滚动摩擦系数
Q_r	r 车型的最大载重(t)	C_d	空气阻力系数
Q_{ik_r}	r 车型第 k 辆车从客户点 i 处离开时的载重(t)	A	迎风表面积(m ²)
Q_{ijk_r}	r 车型第 k 辆车在节点 i 与节点 j 之间的载重(t)	ρ_A	空气密度(kg/m ³)
C_1^r	r 车型的固定成本(元/辆)		

2.2. 目标函数

- 1) 固定成本。固定成本主要由车辆驾驶员工资、固定资产折旧费及维修费等组成, 与车辆数量成正比。

$$F_1 = \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{r \in R} \sum_{k_r \in K_r} C_1^r * x_{ijk_r} \quad (1)$$

2) 油耗成本 F_2 。本文采用 Bektas 和 Laporte [17] 在 2011 年提出的 CMEM (Chemical Mechanical Energy Management) 模型。该模型综合考虑了路况和车辆类型等因素, 能更准确地计算燃油消耗。车辆在行驶过程中所消耗的燃油量 f_1 可通过公式(2)来计算。计算 f_1 时要将 d_{ij} 、 q 、 Q_{ijk_r} 、 v_{ij} 的单位转化为 m、kg 和 m/s。公式(3)和公式(4)可计算出路况系数 a_{ij} 和车型相关参数 ϕ 。

车辆因制冷所消耗的燃油量 f_2 与各节点之间的行驶时间 t_{ij} 密切相关。具体行驶时间的计算方法在 2.3 节中给出。

$$f_1 = \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{r \in R} \sum_{k_r \in K_r} \left\{ x_{ijk_r} d_{ij} * \left[a_{ij} (q_r + Q_{ijk_r}) + \phi * v_{ij}^2 \right] \right\} / (\xi * \psi * g_e) \quad (2)$$

$$a_{ij} = a_v + g \sin \theta_{ij} + g C_r \cos \theta_{ij} \quad (3)$$

$$\phi = 0.5 C_d A \rho_A \quad (4)$$

$$f_2 = \omega_1 \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{r \in R} \sum_{k_r \in K_r} x_{ijk_r} t_{ij} + \omega_1 \sum_{i \in V_c} \max \{ (ET_i - t_i), 0 \} + \omega_2 \sum_{i \in V_c} s_i \quad (5)$$

$$F_2 = C_2 * (f_1 + f_2) \quad (6)$$

3) 碳排放成本 F_3 。随着全球低碳发展趋势的推进, 冷链配送企业在决策时也应考虑环境成本。车辆在行驶过程中所消耗的燃油量 f_1 和车辆因制冷所消耗的燃油量 f_2 在计算油耗时已详细说明, 故此处直接给出碳成本。

$$F_3 = C_3 * \eta * (f_1 + f_2) \quad (7)$$

4) 制冷成本 F_4 。为确保运输途中产品温控适宜, 保证产品质量与安全, 须消耗一定量的冷冻剂, 从而产生制冷成本。

$$F_4 = C_{41} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{r \in R} \sum_{k_r \in K_r} x_{ijk_r} t_{ij} + C_{41} \sum_{i \in V_c} \max \{ (ET_i - t_i), 0 \} + C_{42} \sum_{i \in V_c} s_i \quad (8)$$

5) 损坏成本 F_5 。该模型涵盖了送货和取货服务。在评估损坏成本时, 应综合考虑送货和取货过程中发现的产品损坏, 以确保全面计算损坏成本。

$$F_{51} = \sum_{i \in V_c} \sum_{r \in R} \sum_{k_r \in K_r} y_{ik_r} C_5 \left[q_i \left(1 - e^{-\delta_1 (\max \{ t_i, ET_i \} - DET)} \right) + d_i \left(1 - e^{-\delta_1 * t_i^*} \right) \right] \quad (9)$$

$$F_{52} = \sum_{i \in V_c} \sum_{r \in R} \sum_{k_r \in K_r} y_{ik_r} C_5 Q_{ik_r} \left(1 - e^{-\delta_2 s_i} \right) \quad (10)$$

$$F_5 = F_{51} + F_{52} \quad (11)$$

6) 时间窗处罚成本 F_6 。在冷链物流模型中, 为确保配送服务的时效性, 本文引入了处罚成本。该成本目的是对未能在客户指定的时间窗内完成配送的行为施加经济惩罚。

$$F_6 = \sum_{i \in V_c} \left[C_{61} * \max \{ (ET_i - t_i), 0 \} \right] + \sum_{i \in V_c} \left[C_{62} * \max \{ (t_i - LT_i), 0 \} \right] \quad (12)$$

2.3. 车辆行驶时间计算

为了更真实地反映车速的连续变化, 本文引入参考文献[18]提出的三角函数模型来模拟不同时间段的车辆行驶速度。

$$v(t) = \begin{cases} A_1 * \sin[(B_1 * t - C_1) * \pi] + D_1, & 0 \leq t < T_1 \\ A_2 * \sin[(B_2 * t - C_2) * \pi] + D_2, & T_1 \leq t < T_2 \\ \dots & \\ A_L * \sin[(B_L * t - C_L) * \pi] + D_L, & T_{L-1} \leq t < 24 \end{cases} \quad (13)$$

假设车辆从节点 i 出发的时刻 t'_i 在 $[T_l, T_{l+1}]$ 之间, 存在以下两种情况:

情况 1: 若 $d_{ij} \leq \int_{t'_i}^{T_{l+1}} v(t) dt$, 则车辆在时段 $[T_l, T_{l+1}]$ 内完成配送, d_{ij} 、 t'_i 、 $v(t)$ 已知, 车辆到达节点 j 的时间 t_j 由 $\int_{t'_i}^{t_j} v(t) dt = d_{ij}$ 求出, 进而 $t_{ij} = t_j - t'_i$ 。

情况 2: 若 $d_{ij} > \int_{t'_i}^{T_{l+1}} v(t) dt$, 车辆需跨越多个时段。假设车辆从 i 到 j 跨越 N 个时段, 各时段距离依次为 d_{ij}^β 、 $d_{ij}^{\beta+1}$ 、 $\dots$ 、 $d_{ij}^{\beta+N-2}$ 、 $d_{ij}^{\beta+N-1}$ 。用 d_{ij} 减去前 $N-1$ 个时段的累计距离, 得到最后一个时段 $[T_{l+N-1}, T_{l+N}]$ 中的距离 d'_{ij} , 通过 $\int_{T_{l+N-1}}^{t_j} v(t) dt = d'_{ij}$ 求出 t_j , 再得 $t_{ij} = t_j - t'_i$ 。

2.4. 模型构建

$$\min F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 + F_6 \quad (14)$$

$$\sum_{i \in V_d} \sum_{j \in V_c} x_{ijk_r} = \sum_{i \in V_d} \sum_{j \in V_c} x_{jik_r} = 1, \forall r \in R, \forall k_r \in K_r \quad (15)$$

$$\sum_{r \in R} \sum_{k_r \in K_r} \sum_{j \in V} x_{ijk_r} = 1, \forall i \in V_c, j \neq i \quad (16)$$

$$\sum_{r \in R} \sum_{k_r \in K_r} \sum_{i \in V} x_{ijk_r} = 1, \forall j \in V_c, i \neq j \quad (17)$$

$$\sum_{i \in V_c} q_j y_{ik_r} \leq Q_r, \forall k_r \in K_r \quad (18)$$

$$\sum_{i \in V_c} d_j y_{ik_r} \leq Q_r, \forall k_r \in K_r \quad (19)$$

$$0 = Q_{ik_r} - \sum_{j \in V_c} x_{ijk_r} (q_i - d_i) \leq Q_r \quad (20)$$

$$t_j = \sum_{r \in R} \sum_{k_r \in K_r} \sum_{i \in V_c} (\max\{t_i, ET_i\} + s_i + t_{ij}) x_{ijk_r} + \sum_{r \in R} \sum_{k_r \in K_r} \sum_{i \in V_d} (DET + t_{ij}) x_{ijk_r}, \forall j \in V_c \quad (21)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ijk_r} \leq |S| - 1, \forall S \subseteq V_c, \forall r \in R, \forall k_r \in K_r \quad (22)$$

$$DET \leq t_i \leq DLT, \forall i \in V \quad (23)$$

$$x_{ijk_r}, y_{ik_r} \in \{0, 1\}, \forall i \in V, \forall j \in V, \forall r \in R, \forall k_r \in K_r \quad (24)$$

式(14)表示成本最小化; 式(15)表示车辆可返回任意配送中心; 式(16)和式(17)表示客户只被服务一次; 式(18)表示每辆车的送货量不得超过车容量; 式(19)表示每辆车的取货量不得超过车容量; 式(20)表示在执行配送任务时, 任一客户点的载货量不得超过车容量; 式(21)表示车辆到达客户点的时间; 式(22)表示消除子回路; 式(23)表示配送中心时间窗约束; 式(24)表示 0~1 变量。

3. 算法设计

多中心半开放式多车型冷链物流同时送取货车辆路径问题属于一种复杂的 NP-hard 问题, 对于该类

问题无法直接找到最优解。考虑到模型的多维度特性，提出一种具有参数自适应机制的遗传算法 (Improved Adaptive Genetic Algorithm, IAGA) 进行求解。

3.1. 染色体编码和解码

本文采用自然数编码，每个染色体表征一个完整的车辆路径规划方案，其基因序列精确映射了从配送中心出发，有序遍历客户节点至最终返回配送中心的闭环路径结构。在解码阶段，采用动态路径分割策略，依据实时载重约束将染色体序列解析为多车辆可行路径：首先基于基因位点特征将运输单元动态分配给最优配送中心，继而通过载重量化评估实施路径分解。如图 1 所示，节点 1~10 为顾客节点，11~14 表示配送中心。典型解码示例如：当车辆 1 从配送中心 11 出发并依次服务顾客节点 6、3、7、1 后，在拟服务节点 9 时检测到载重约束冲突，则返回至最近的配送中心 13。

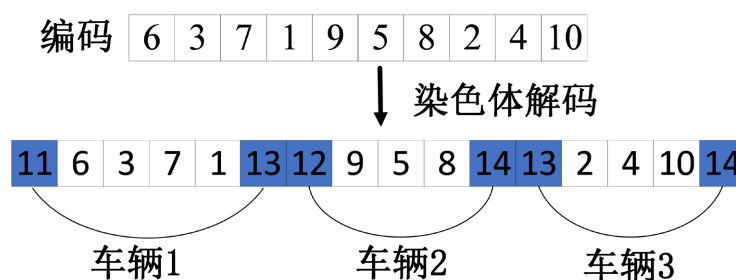


Figure 1. Chromosome coding and decoding diagram
图 1. 染色体编码解码示意图

3.2. 适应度函数

适应度函数用于衡量染色体的优劣性。配送方案的总成本越低，其适应度值越高，表明该方案更优。因此选择式(14)的倒数作为适应度函数，即 $f = \frac{1}{F}$ 。

3.3. 遗传操作

3.3.1. 选择算子

本文采用锦标赛选择机制，从当前种群中随机抽取若干个体，挑选出适应度最高的个体进入下一代，以促进种群适应度提升并防止早熟收敛。

3.3.2. 交叉与变异算子

为提高自适应遗传算法的收敛速度并避免局部最优，本文引入了文献[19]中的改进交叉、变异算子，根据样本总数和迭代次数动态调整交叉率 $f_{acr} = \sqrt{\frac{1}{N}} \frac{f_{\max} - f'}{t^2 \cdot (f_{\max} - f_{avg})} d$ 和变异率 $f_{mut} = \sqrt{\frac{1}{N}} \cdot \sqrt{\frac{1}{t^2}} d$ 。

其中： t 为迭代次数、 N 为样本总数、 d 为样本集中程度即中间区域样本数量与样本总数之比、 $f_{\max}$ 为种群中个体的最大适应度值、 f' 为参与交叉的两个个体中适应度值较大的个体的适应度值、 f_{avg} 为种群中个体的平均适应度值。

1) 交叉操作。本文采用顺序交叉策略。首先随机选取两个父代染色体中的一个子路径将其前置；然后，根据另一个父代染色体的顺序，对剩余未访问节点排序；最后，将这些节点随机分割成多个子路径，与初始子路径结合，生成多个可能的完整路径。交叉操作如图 2 所示。

2) 变异操作。采用 2-opt 变异，随机选择染色体上的两个位置交换其基因，并计算适应度值，仅当

新染色体适应度优于原染色体时才予以保留。图 3 为变异操作。

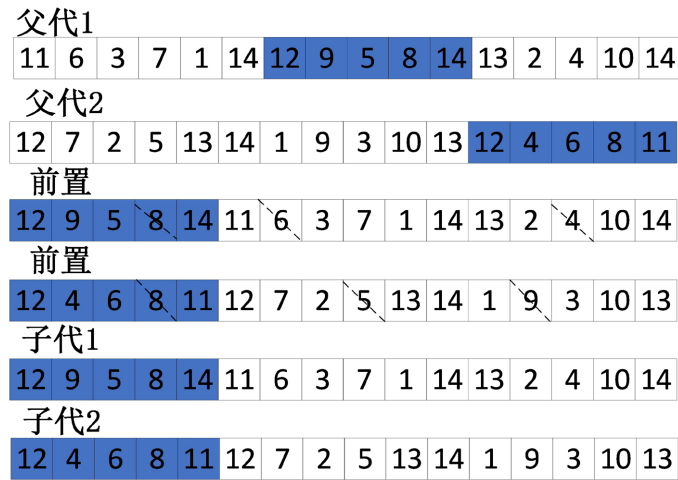


Figure 2. Crossover operation

图 2. 交叉操作



Figure 3. Mutation operation

图 3. 变异操作

3.4. 逆转操作

在当前染色体中随机断裂两点，逆转两点间路径以生成新染色体。若新染色体适应度更高，则保留；否则，维持原染色体不变。逆转操作如图 4 所示。

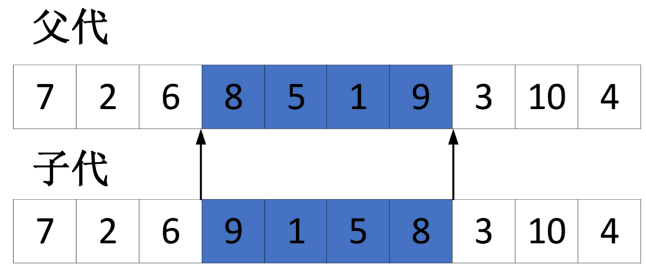


Figure 4. Reverse operation

图 4. 逆转操作

4. 实验与结果分析

为了验证模型的有效性，本文设计了一个中等规模的仿真实验。通过 Python 3.80 平台构建仿真环境（硬件配置：Intel i5-8250U CPU, 8G RAM），种群规模为 100，最大迭代次数为 2000，初始交叉概率 $P_c = 0.9$ ，初始变异概率 $P_m = 0.08$ 。实验具体设置参数如下：客户点和配送中心相关信息如表 2 所示，时变速度函

数相关参数如表 3 所示, 车型信息如表 4 所示。油耗计算相关参数: $\xi = 3.6 \times 10^6$ 、 $\psi = 30\%$ 、 $g_e = 8.8 \text{ kW} \cdot \text{h/L}$ 、 $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ 、 $\theta_{ij} = 0$ 、 $C_r = 0.01$ 、 $C_d = 0.7$ 、 $A = 5 \text{ m}^2$ 、 $a_v = 0 \text{ m/s}^2$ 、 $\rho_A = 1.204 \text{ kg/m}^3$ 、 $q_r = 3.5 \text{ t}$ 。其余相关参数信息来自[20]: $C_2 = 7.5 \text{ 元/L}$ 、 $C_3 = 0.25 \text{ 元/kg}$ 、 $C_{41} = 10 \text{ 元/L}$ 、 $C_{42} = 15 \text{ 元/L}$ 、 $C_5 = 5000 \text{ 元/t}$ 、 $C_{61} = 50 \text{ 元/L}$ 、 $C_{62} = 50 \text{ 元/L}$ 、 $\omega_1 = 1 \text{ L/h}$ 、 $\omega_2 = 1.5 \text{ L/h}$ 、 $\delta_1 = 0.0005$ 、 $\delta_2 = 0.001$ 、 $\eta = 2.61 \text{ kg/L}$ 。产品装卸速度为 3.6 t/h , 故客户点 i 服务时间为 $s_i = (q_i + d_i)/3.6$ 。

Table 2. Customer point and distribution center information

表 2. 客户点和配送中心相关信息

编号	X/km	Y/km	送货量/t	取货量/t	ET	LT	编号	X/km	Y/km	送货量/t	取货量/t	ET	LT
1	31	60	1.6	1.1	8.5	11.5	18	81	32	0.8	0.3	9.5	12.5
2	61	98	1.1	0.5	9.5	11	19	84	69	1	0.8	10	12
3	67	22	1.3	0.1	9.5	11	20	2	53	0.6	0.5	9.5	12
4	59	16	1.8	0.8	8.5	12	21	66	29	1.2	1.1	9.5	11
5	69	9	1.6	1	8	12	22	36	3	1.2	0.7	8	11.5
6	96	3	0.5	1.4	9.5	11.5	23	41	78	0.6	0.4	9	11.5
7	40	15	1.3	1.4	8	12.5	24	65	98	1.8	0.9	10	12.5
8	96	24	0.8	0.7	10	12	25	94	73	0.3	1.1	10	12.5
9	49	3	0.9	0.8	9	11.5	26	80	100	0.9	0.9	9	11.5
10	35	67	1.1	0.5	10	12	27	58	73	0.8	1	9.5	11
11	23	63	1	0.3	9	11	28	81	37	1.5	0.6	8.5	12
12	52	23	1.5	0.2	9.5	11.5	29	54	94	1.5	0.8	8	11
13	31	88	1.2	1.7	9.5	11.5	30	11	8	1	0.6	8.5	12
14	12	51	0.9	0.7	9.5	11.5	D31	17	82	0	0	8	16
15	24	26	1.1	0.7	9	11	D32	81	80	0	0	8	16
16	67	52	1	0.4	9	12	D33	20	32	0	0	8	16
17	90	45	1.5	1.2	8.5	12.5	D34	76	25	0	0	8	16

注: ET 和 LT 中的 8.5 表示为 8:30, 11 表示 11:00。

Table 3. Time varying velocity function related parameters

表 3. 时变速度函数相关参数

时段	A	B	C	D
[0,4)	2.5	0.125	0	43
[4,8)	7.5	0.125	0	38
[8,10)	2.5	0.25	1	38
[10,18)	3	1/6	10/6	35.5
[18,24)	10.09	1/12	0	43

Table 4. Vehicle type information

表 4. 车型信息

车型	车辆最大载重(t)	车辆固定费用 C_1^r (元)
A	16	180
B	8	100
C	6	70

4.1. 单车型与多车型对比分析

为了验证多车型配送策略的有效性，本研究对比了单一车型配送与多车型配送。表 5 为多车型最优路径表，表 6 为单车型与多车型结果对比表。

Table 5. Optimal route table for multiple vehicle models
表 5. 多车型最优路径表

车辆	车型	车辆配送路径	行驶距离/km
1	B	D31-11-29-6-D34	193.72
2	C	D33-20-1-10-D31	88.98
3	C	D34-12-D34	48.17
4	C	D34-21-D34	21.54
5	C	D34-4-9-3-8-15-D33	170.12
6	B	D34-28-26-17-D34	156.32
7	B	D32-27-2-24-5-D34	159.78
8	C	D33-30-14-D33	89.26
9	B	D34-18-16-19-25-D32	82.59
10	A	D31-13-23-D31	53.70
11	C	D33-7-22-D33	72.02

Table 6. Comparison table of single-model and multi-model results
表 6. 单车型与多车型结果对比表

项目	单一车型			多车型
	单车型 A	单车型 B	单车型 C	
车辆数/辆	9	9	9	11
固定成本/元	1620	900	630	1000
油耗成本/元	1442.04	1478.51	1334.05	1268.96
制冷成本/元	641.47	666.71	589.44	618.03
损坏成本/元	714.41	732.52	765.54	556.05
处罚成本/元	1418.17	1377.44	1227.59	908.83
碳排放成本/元	125.46	128.63	116.02	110.40
总成本/元	5961.55	5283.80	4662.68	4462.27
碳排放量/kg	501.83	514.52	464.25	441.60

从表 5、表 6 可以看出，尽管多车型配送策略使用车辆数多于单一车型配送策略，但因其能灵活调配车辆以满足不同配送任务的需求，故在多项成本控制上展现出优势。使用多车型配送策略，与车型 A 相比总成本降低了 25.15%；与车型 B 相比总成本降低了 15.54%；与车型 C 相比总成本降低了 4.3%。在油耗成本计算中，多车型相较于油耗成本最高的车型 B 降低了 14.17%，相较于油耗成本最少的车型 C 降低了 4.88%。在损坏成本方面，多车型配送依次降低了 22.16%、24.09%和 27.37%。在处罚成本方面，与单车型相比依次降低了 35.93%、34.02%和 25.97%。

在碳排放量方面，多车型配送策略也展现了其优势。根据表 6 的数据，多车型配送的碳排放量为 441.6 kg，相较于车型 A 的 501.83 kg 降低了约 12%，与车型 B 的 514.52 kg 相比降低了约 14.17%，而与车型 C 的 464.25 kg 相比也有 4.88% 的降低。这一结果凸显了多车型配送在减少环境污染和助力实现“双碳目标”方面的积极作用。

综上所述，多车型配送策略在降低物流成本和减少碳排放方面展现出显著优势，这凸显了在配送策略中考虑多车型配置的重要性。企业通过购置不同型号的车辆，能够灵活应对多样化的配送需求，并通过优化车型组合，实现成本节约和环境效益的双重目标。

4.2. 单配送中心与多配送中心对比分析

为了评估多配送中心在冷链物流中的有效性，在多车型配送的基础上，对比了单一配送中心与多配送中心两种模式，在其余条件不变的前提下，设置 D34 作为单配送中心，对比结果如表 7 所示。

Table 7. Comparison table of results between single and multiple distribution centers
表 7. 单配送中心与多配送中心对比分析表

配送类型 (碳排放量/kg)	总配送距离 /km	固定成本 (元)	油耗成本 (元)	制冷成本 (元)	损坏成本 (元)	处罚成本 (元)	碳排放成本 (元)	总成本 (元)
单中心 (584.09)	1725.78	970	1678.41	731.41	624.14	877.69	146.02	5027.67
多中心 (441.60)	1136.20	1000	1268.96	618.03	556.05	908.83	110.40	4462.27

分析表 7 可知，相较于单中心配送模式，多中心配送模式可通过分散配送中心，减少单个配送中心集中配送的压力，促进资源的共享与优化配置，以实现经济和环保的双重优势。相较于单一配送中心，多中心配送模式，在总配送距离方面减少约 34.16%，且在多项成本中均有所降低，其中最显著的是油耗成本降低 24.39%，其次是制冷成本降低 15.50%，配送总成本降低了 11.24%，表明多中心配送模式更经济。此外，相较于单一配送中心，多配送中心碳排放量减少了约 24.40%，显示出多中心配送模式的环保优势。

综上所述，多中心配送模式在优化资源利用、降低成本以及减少环境影响等方面均表现出色。中小型物流企业通过建立战略联盟共享配送中心和资源，可有效降低运营成本，提高竞争力，促进资源的高效利用，减少环境影响。

4.3. 独立送取货和同时送取货对比分析

Table 8. Comparison table of independent and combined shipping results
表 8. 独立配送与联合配送结果对比表

	独立配送与取货			同时送取货
	仅送货	仅取货	仅送货 + 仅取货	
总成本(元)	3748.77	3327.82	7076.59	4462.67
固定成本(元)	920.00	760.00	1680.00	1000.00
油耗成本(元)	1179.82	1057.05	2236.87	1268.96
制冷成本(元)	520.87	502.20	1023.06	618.03
损坏成本(元)	327.37	184.66	512.02	556.05
处罚成本(元)	698.07	731.95	1430.02	908.83
碳排放成本(元)	102.64	91.96	194.61	110.40
碳排放量(kg)	410.58	367.85	778.43	441.60

随着环保意识的提升和成本控制的需要，企业需要在保证服务质量的同时，寻求更加经济环保的配送模式。本研究在考虑多中心及多车型配送的前提下，对独立送取货和同时送取货两种配送模式的成本效益和环境影响进行了对比分析，具体实验结果详见表 8。

由表 8 可知：1) 同时送取货相较于独立送取货总成本节约了 2613.92 元，降低了 36.95%。其中固定成本降低 40.48%、油耗成本降低 43.27%、制冷成本降低 39.59%、处罚成本降低 36.41%和碳排放成本降低 43.31%，这表明同时送取货在成本控制方面具有显著优势。2) 相较于单一的送货和取货模式，采用同时送取货模式的碳排放量为 441.6 kg，降低了 43.30%。这一数据表明，同时送取货模式更有助于冷链物流企业降低碳排放，助力实现“双碳”目标。

4.4. IAGA 和 GA 对比分析

在对多车型冷链物流路径优化模型的求解过程中，采用了两种不同的算法 IAGA 和 GA，对其分别进行了五次测试，并记录了每次测试中两种算法得到的总成本。表 9 展示了这两种算法在五次测试中的总成本对比结果。

Table 9. Comparison table of IAGA and GA results
表 9. IAGA 和 GA 结果对比表

测试序号	IAGA 总成本(元)	GA 总成本(元)
1	4367.02	4688.98
2	4457.31	4676.34
3	4368.45	4513.06
4	4410.21	4690.21
5	4462.27	4565.77
平均值	4418.97	4621.51

从表 9 可以得出，五次实验 IAGA 总成本平均值为 4418.97，标准差为 34.01，GA 总成本平均值为 4621.51，标准差为 81.58，IAGA 算法总成本在五次运行中波动较小，GA 算法得出的总成本波动较大。这表明 IAGA 算法不仅在总成本上优于 GA 算法，而且在成本稳定性方面也表现得更好，能够更有效地找到成本效益更高的解决方案。

4.5. 结果分析

基于仿真实验结果与模型优化策略，冷链物流企业在实际运营中可采取以下措施来实现成本效益和低碳目标的双重突破：

- 1) 企业应打破传统单一车型模式，根据客户需求量、货物载重及配送距离，灵活配置高、中、低载重车辆组合。通过动态调度降低空载率与能耗，提升车辆使用率。
- 2) 企业可通过战略联盟或共享仓库模式建立区域多中心网络，将集中式配送转为分布式协作，缓解单配送中心的压力。
- 3) 企业需打破传统送货取货分离的操作，依托智能调度系统将客户退货、回收需求纳入正向配送路径。

5. 结论

本文针对冷链物流的低碳化与协同化需求，构建了时空耦合的多车型 - 多中心 - 同时送取货集成优

化模型，并通过改进自适应遗传算法进行求解。主要结论如下：

1) 多车型配送策略通过异构车辆动态编组与载重 - 速度双变量碳排放建模，实现了总成本降低 25.15% 与碳排放减少 12%，验证了车型配置柔性化对资源适配性与环境效益的双重提升作用。

2) 相较于单一配送中心，多中心配送通过优化资源配置和资源共享，显著降低配送距离与碳排放量，为中小物流企业构建区域配送联盟提供了理论依据。

3) 在处理退货和回收等逆向物流需求时，同时送取货模式相较于独立送取货模式更为高效，为冷链物流企业整合正向和逆向物流活动提供参考。

未来的研究将致力于构建更加精细的路况变化模型，纳入动态需求、多产品特征等复杂因素，并探索更为高效的求解方法，以应对冷链物流配送需求的持续增长和更加复杂多变的现实场景。

基金项目

国家自然科学基金(71871143)；上海科技行动创新计划(22dz1203405)。

参考文献

- [1] 肖智豪, 胡志华, 朱琳. 求解冷链物流时间依赖型车辆路径问题的混合自适应大邻域搜索算法[J]. 计算机应用, 2022, 42(9): 2926-2935.
- [2] Stellingwerf, H.M., Kanellopoulos, A., van der Vorst, J.G.A.J. and Bloemhof, J.M. (2018) Reducing CO₂ Emissions in Temperature-Controlled Road Transportation Using the LDVRP Model. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, **58**, 80-93. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.11.008>
- [3] 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.
- [4] 周鲜成, 蒋涛营, 贺彩虹, 等. 冷链物流配送的绿色车辆路径模型及其求解算法[J]. 中国管理科学, 2023, 31(12): 203-214.
- [5] 杨珍花, 赖平仲, 汤洋, 等. 冷藏车多车型混合配送调度优化[J]. 系统工程, 2015, 33(10): 28-36.
- [6] 李军涛, 刘明月, 刘朋飞. 生鲜农产品多车型冷链物流车辆路径优化[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(7): 115-123.
- [7] 宾厚, 徐晶晶, 王素杰, 等. 生鲜冷链物流配送多车型动态车辆路径优化[J]. 管理现代化, 2025, 45(1): 182-191.
- [8] Molina, J.C., Salmeron, J.L., Eguia, I. and Racero, J. (2020) The Heterogeneous Vehicle Routing Problem with Time Windows and a Limited Number of Resources. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, **94**, Article 103745. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2020.103745>
- [9] 鲍春玲, 张世斌. 考虑碳排放的冷链物流联合配送路径优化[J]. 工业工程与管理, 2018, 23(5): 95-100+107.
- [10] 范厚明, 杨翔, 李荡, 等. 基于生鲜品多中心联合配送的半开放式车辆路径问题[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(1): 256-266.
- [11] 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>
- [12] 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.
- [13] 王祺, 肖青. 模糊需求下的多中心冷链配送车辆路径问题[J]. 计算机工程与应用, 2023, 59(23): 341-350.
- [14] Min, H. (1989) The Multiple Vehicle Routing Problem with Simultaneous Delivery and Pick-Up Points. *Transportation Research Part A: General*, **23**, 377-386. [https://doi.org/10.1016/0191-2607\(89\)90085-x](https://doi.org/10.1016/0191-2607(89)90085-x)
- [15] Wang, H. and Chen, Y. (2012) A Genetic Algorithm for the Simultaneous Delivery and Pickup Problems with Time Window. *Computers & Industrial Engineering*, **62**, 84-95. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2011.08.018>
- [16] Sun, B., Yang, Y., Shi, J. and Zheng, L. (2019) Dynamic Pick-Up and Delivery Optimization with Multiple Dynamic Events in Real-World Environment. *IEEE Access*, **7**, 146209-146220. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2944739>
- [17] Bektaş, T. and Laporte, G. (2011) The Pollution-Routing Problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, **45**, 1232-1250. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2011.02.004>
- [18] Xu, Z., Elomri, A., Pokharel, S. and Mutlu, F. (2019) A Model for Capacitated Green Vehicle Routing Problem with the

Time-Varying Vehicle Speed and Soft Time Windows. *Computers & Industrial Engineering*, **137**, Article 106011.
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106011>

- [19] 姜广田, 纪皎月, 董佳伟. 绿色物流配送下的多车型动态车辆路径优化[J]. 系统工程理论与实践, 2024, 44(7): 2362-2380.
- [20] 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.