

电商经济下考虑班期时间的冷链多式联运 路径优化

方青, 朱孝成

武汉科技大学管理学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2025年8月10日; 录用日期: 2025年8月21日; 发布日期: 2025年9月16日

摘要

在电商经济蓬勃发展的背景下, 多式联运冷链物流需求呈爆发式增长, 但同时也面临着碳排放制约可持续发展以及运输过程中不确定性因素多等问题。如何在应对不确定需求、时间窗、班期时间等因素的同时, 实现运输路径的最优规划与成本的有效控制, 成为电商冷链物流行业关注的重点。本文针对电商场景下的冷链多式联运路径优化问题, 综合考虑不确定需求、时间窗、班期时间, 以最小化运输成本为目标构建优化模型。采用三角模糊数描述电商订单中常见的不确定需求, 运用改进遗传算法对模型进行求解。研究结果显示, 改进算法对比两种传统遗传算法分别能减少6.93%和5.65%的成本。通过综合分析可知, 运输成本随不确定需求置信水平 α 增大而上升; 合理设置收货时间窗有助于优化路径并降低成本; 班期间隔时间增加会使总运输成本上升, 且运输方式随时间增加更趋向于铁路运输; 碳税价格增加会导致总成本上升, 运输方式选择也趋向于铁路运输。本研究为电商经济下冷链多式联运的路径优化和成本控制提供了一定参考价值。

关键词

电商经济, 碳交易政策, 冷链多式联运, 三角模糊数, 班期时间, 遗传算法

Optimization of Cold-Chain Multimodal Transport Routes Considering Scheduled Departure Times in the Context of E-Commerce Economy

Qing Fang, Xiaocheng Zhu

School of Management, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan Hubei

Received: Aug. 10th, 2025; accepted: Aug. 21st, 2025; published: Sep. 16th, 2025

Abstract

Against the backdrop of the vigorous development of the e-commerce economy, the demand for multimodal transport cold chain logistics has seen explosive growth. However, it also faces problems such as carbon emissions restricting sustainable development and numerous uncertainties during the transportation process. How to achieve the optimal planning of transportation routes and effective cost control while dealing with uncertain demands, time Windows, flight schedules and other factors has become the focus of attention in the e-commerce cold chain logistics industry. This paper focuses on the problem of cold chain multimodal transport route optimization in the e-commerce scenario. By comprehensively considering uncertain demand, time Windows, and flight schedules, an optimization model is constructed with the goal of minimizing transportation costs. Triangular fuzzy numbers are adopted to describe the common uncertain demands in e-commerce orders, and the improved genetic algorithm is used to solve the model. The research results show that the improved algorithm can reduce costs by 6.93% and 5.65% respectively compared with the two traditional genetic algorithms. Through comprehensive analysis, it can be known that the transportation cost increases with the increase of the confidence level α of uncertain demand. Reasonable setting of the receiving time window helps optimize the path and reduce costs. An increase in the interval between flights will lead to a rise in the total transportation cost, and the mode of transportation tends to be more inclined towards railway transportation as time goes by. The increase in carbon tax prices will lead to a rise in total costs, and the choice of transportation methods will also tend to be railway transportation. This study provides certain reference value for the path optimization and cost control of cold chain multimodal transport in the e-commerce economy.

Keywords

E-Commerce Economy, Carbon Trading Policy, Cold Chain Multimodal Transport, Triangular Fuzzy Number, Schedule Time, 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

近年来,随着跨境电商的蓬勃发展,其对物流的需求日益增长,多式联运作为高效的物流模式,在电商领域的应用愈发重要。目前,铁路等多式联运虽有发展,但存在物流功能薄弱、管理体系不完善、价格优势不足等问题。同时,跨境电商综合试验区形成了“互联网企业+大数据应用”“政策叠加”“多式联运协同联动”等驱动模式,电商物流配送系统也面临成本控制、无缝衔接等挑战,而不同商品类别对多式联运模式的选择有不同需求。在此背景下,探索适应电商特点的多式联运路径优化尤为关键。肖武等指出跨境物流存在成本高、时效差、退换货难等问题[1],认为多式联运能有效降低30%以上的综合物流成本;王坤等提出“多式联运协同联动驱动模式”,通过铁水空联运数据平台实现“一单到底”,郑州综试区应用该模式使国际配送时效缩短至7天[2];张姗姗强调自贸区、保税区与综试区政策叠加可提升物流效率,深圳通过“保税+新零售”创新使通关时间压缩50%[3]。

上述研究仍聚焦在需求、时间等确定性环境下的相关问题,而电商经济下的实际物流运输中,订单需求波动大、配送地址分散、温控要求多样等不确定因素更为突出。对此,李珺等考虑时间和需求的不确定性,利用随机情景来求解绿色多式联运问题[4];Mohammadi等针对多式联运需求、运输时间和转运

时间的不确定性, 构建了多重不确定条件下的多式联运随机优化模型[5]; 邓明君等采用鲁棒优化方法, 考虑高中低三种不确定需求情景[6]; 于雪娇引入三角模糊数, 利用模糊机会约束规划模型将不确定需求清晰化[7]; 张旭等构建了需求与碳交易价格不确定下的鲁棒随机优化模型, 并通过蒙特卡洛采样技术处理不确定性[8]。

在运输时间窗问题上, 电商客户对商品时效性要求极高, “次日达” “当日达” 已成为标配服务, 这使得时间窗约束在冷链多式联运中更为关键。范志强和乐美龙考虑到随机环境对运输时间的影响, 提出带软时间窗约束的多式联运路径优化模型[9]; 邓学平引入混合时间窗, 对运输中间节点设置软时间窗, 对运输终点设置硬时间窗, 构建了混合时间窗下多式联运路径优化模型[10]; 辜勇和文洁考虑冷藏箱多式联运过程中货物到达节点时间的不确定性, 以各节点时间窗为约束, 建立了考虑碳排放的机会约束规划模型[11]; Fazayeli 等引入软时间窗约束, 设计带惩罚费用的软时间窗机制, 并展示了软时间窗对路径优化的影响[12]; Gui 等引入混合时间窗, 建立了改进的高维多目标路径优化算法在不确定需求下的多式联运模型[13]。

考虑到低碳政策对多式联运的影响, 电商企业为履行社会责任、提升品牌形象, 纷纷将低碳物流纳入发展战略。Chen 等从货物时间和价值属性出发, 探讨了不同碳税价格对路径选择的影响[14]; Zhang 等提出模糊需求和模糊时间的多式联运路径优化问题, 讨论了不同碳税政策下的路径选择[15]; 杨华龙、于果考虑碳交易价格不确定, 利用三角模糊数描述不确定碳交易价格, 建立了考虑运输总成本最小与客户满意度最高为目标的双目标优化模型[16]; 本研究在系统梳理现有文献的基础上, 发现当前研究在考虑不确定条件、时间窗和低碳政策上已取得一定进展, 但结合电商经济特点, 综合考虑三者对冷链多式联运的研究仍较少。因此, 本文在上述文献基础上提出综合考虑电商场景下不确定需求、时间窗、低碳政策的冷链多式联运路径优化模型。

首先, 在不确定条件处理方面, 现有研究多采用三角模糊数处理不确定需求, 但在清晰化过程中往往仅考虑单一区间的影响, 缺乏对模糊数完整区间的综合分析, 难以适配电商订单“波峰波谷”显著的特点。因此本研究借鉴文献[16]的方法, 通过全面考察三角模糊数的完整区间, 更准确地刻画电商环境下不确定条件的影响; 其次, 关于时间窗约束的研究, 现有研究大多只考虑节点收货时间窗而忽略班期时间对运输时间的影响, 但在实际运输过程中水路与铁路往往都拥有各自的班期时间, 且电商客户对送达时效的敏感度极高, 因此本文将中间节点的时间窗约束描述为班期时间约束, 对运输终点采用混合时间窗约束, 并研究班期时间和收货时间窗对于路径优化结果的影响; 最后, 在低碳政策研究方面, 现有方法多将碳排放量作为独立约束条件或多目标优化的单一目标, 本研究通过引入碳税机制将碳排放量转化为碳排放成本, 更贴合电商企业成本核算逻辑, 使碳排放价格对总成本的影响分析更具现实指导意义。

基于上述研究创新点, 研究构建了碳交易政策下综合考虑电商场景不确定需求、时间窗约束和班期时间的多式联运路径优化模型。在方法上, 采用三角模糊数处理不确定性, 并设计改进遗传算法进行求解。研究重点分析以下关键因素对路径决策的影响:

- (1) 电商不确定需求的置信水平;
- (2) 电商客户导向的不同类型时间窗约束;
- (3) 不同班期间隔时间;
- (4) 碳交易价格波动。

通过量化评估这些因素对路径选择的具体影响程度, 研究在一定程度上丰富电商背景下多式联运的理论体系, 为低碳政策背景下的电商运输实践提供借鉴。

2. 问题描述

2.1. 问题描述与模型假设

多式联运承运人面临着将一批电商货物以冷藏集装箱的形式从起点城市 O 运输至终点城市 D 的任务。这些电商货物的需求量受市场波动、促销活动等因素影响而不确定。OD 之间分布着多个节点城市, 这些节点城市可能是电商仓库所在地、区域物流中心或者配送中转站。每两个城市之间凭借其不同的基础设施建设, 拥有多种运输方式可供选择。鉴于公路、铁路、水路这三种运输方式基础设施完善、运量大且成本效益高, 因此本文仅考虑这三种运输方式。其中, 铁路与水路有着各自的班期时间, 货物可在节点处进行运输方式的转换。电商客户对货物送达时间有着严格要求, 承运人需在客户允许的时间窗内将货物送达终点。为了实现电商物流的高效与可持续发展, 本文以运输成本、中转成本、冷藏成本、等待成本、碳排放成本、货损成本最小化为目标, 致力于找到 OD 之间的最优运输方案。考虑到铁路和水路的班期时间和发车频率, 本文将铁路与水路班期间隔时间分别设置为 1 小时与 2 小时, 并且在整点发车。针对碳交易政策下考虑班期时间的冷链多式联运路径优化问题, 本文提出以下基本假设:

- (1) 货量在运输过程中不可拆分;
- (2) 在两个节点的运输过程中运输方式直到下个节点处才能转变, 且一个节点处运输方式至多发生一次转变;
- (3) 运输总费用仅与运输成本、中转成本、冷藏成本、惩罚成本、碳排放成本、货损成本有关, 不考虑其他费用和突发事件;
- (4) 假设运输速度保持匀速。

根据本文提出的假设绘制的节点运输路线图见图 1:

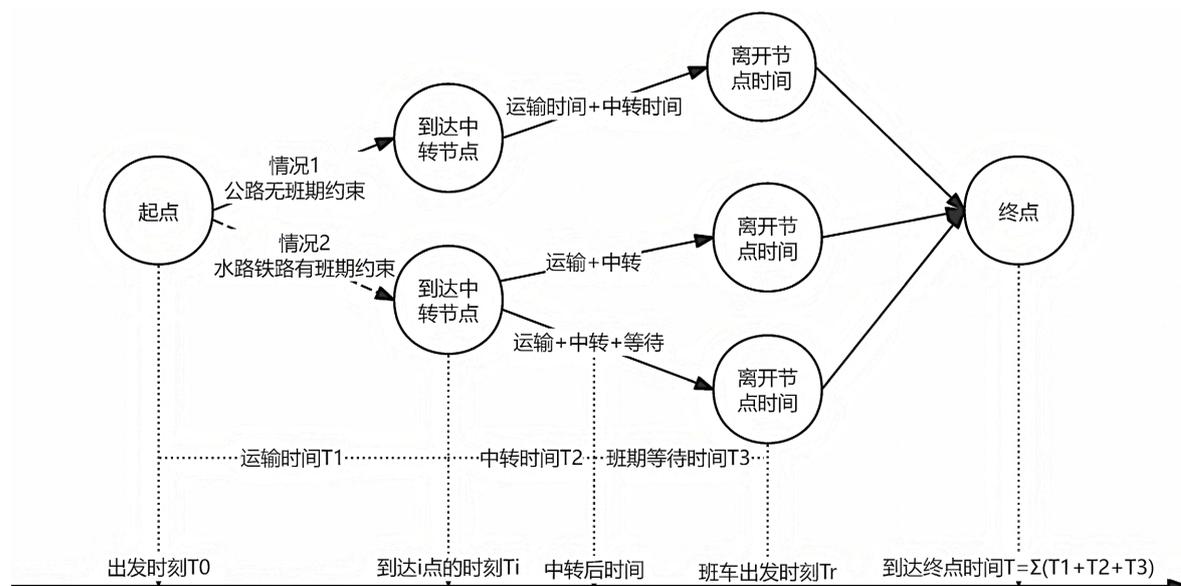


Figure 1. Node transportation diagram

图 1. 节点运输图

图 1 说明节点运输总时间(T)与运输时间(T_1), 中转时间(T_2)以及班期待待时间(T_3)有关, 本文考虑铁路与水路的班期时间, 并将中转分为 2 种情况, 情景 1 为公路运输与铁路和水路运输中班期待待时间为 0 的情况, 情景 2 为班期待待时间不为 0 的情景, 因此总运输时间 $T = \Sigma(T_1 + T_2 + T_3)$ 。

2.2. 模糊需求分析

在电商经济飞速发展的大背景下, 实际的货物运输需求与电商业务紧密相连。货物需求量极易受到多种因素的显著影响, 这些因素与电商行业的特性息息相关。为了有效应对这种不确定性, 我们引入了三角模糊变量 \tilde{q} 。具体来说, q^l 表示最小需求量, q^m 为交易次数最多的需求量, q^u 而则为最大需求量。这种三角模糊数的定义允许我们在面对动态市场条件时, 灵活地评估和调整运输计划。它不仅能够有效描述需求量的波动, 还为制定合理的运输方案提供了帮助, 通过更精准的需求量区间识别, 企业可降低库存风险与运输成本, 提高整体供应链的效率。因此, 采用这种方法能够帮助我们更好地适应市场变化, 提升对客户需求的响应能力。本文引用文献[16]中隶属度函数表示方式, 得出本文不确定需求的隶属度函数为:

$$C_r(q \geq \tilde{q}) = \begin{cases} 0, q \leq q^l \\ \frac{q - q^l}{2(q^m - q^l)}, q^l \leq q \leq q^m \\ \frac{q^u - q}{2(q^u - q^m)}, q^m \leq q \leq q^u \\ 1, q \geq q^u \end{cases} \quad (1)$$

风险偏好值 α ($0 \leq \alpha \leq 1$) 是物流企业在面对碳交易价格不确定时决策者风险态度的量化指标, 其取值反映企业对风险的承受水平: α 趋近 0 表示极端风险厌恶, 企业倾向于接受较低但更不确定的碳价以规避风险; $\alpha = 0.5$ 代表风险中性, 此时可以描述为需求确定的情景; α 趋近 1 则体现风险追求, 企业愿意承担高价风险以换取更高确定性。此时, 物流企业可以结合自身的风险偏好程度, 确定一个合理的风险偏好值 α , 使 $C_r\{q \geq \tilde{q}\} \geq \alpha$ 成立。由式可得, 当 $\alpha \in [0, 0.5]$ 时, 若 $C_r\{q \geq \tilde{q}\} \geq \alpha$ 成立, 则有 $q \geq 2\alpha q^m + (1 - 2\alpha)q^l$; 同理, 当 $\alpha \in [0.5, 1]$ 时, 则有 $q \geq 2(1 - \alpha)q^m + (2\alpha - 1)q^u$ 。因此, 在不同的风险偏好值下, 可将模糊需求量 \tilde{q} 转为清晰值, 即

$$\tilde{q} = \begin{cases} 2\alpha q^m + (1 - 2\alpha)q^l, 0 \leq \alpha \leq 0.5 \\ 2(1 - \alpha)q^m + (2\alpha - 1)q^u, 0.5 < \alpha \leq 1 \end{cases} \quad (2)$$

3. 模型建立

本文电商经济下考虑班期时间的冷链多式联运路径优化符号描述见表 1:

Table 1. Symbol description table

表 1. 符号描述表

参数	描述说明
N	运输节点集合, $N = \{1, 2, \dots, n\}$, $i, j \in N$, O 为起点, D 为终点
K	运输方式集合, $k, l \in K, k, l = 1, 2, 3$ (1, 2, 3 分别为公路, 铁路, 水路)
\tilde{q}	模糊需求量
T, T_1, T_2, T_3	总时间、运输时间、中转时间、班期待待时间
S_i	i 地的到达时间
t_i^{kl}	在 i 地以运输方式 k 转换为运输方式 l 的转运时间

续表

β_i^k	运输方式 k 在节点 i 的班期时间
t_{ij}^k	在 i 地以运输方式 k 至 j 地的运输时间
ET_{\min}, LT_{\max}	货物的硬时间窗上限和下限
ET, LT	货物的软时间窗上限和下限
D_{ij}^k	在 i 地以运输方式 k 至 j 地的运输距离
C_{ij}^k	在 i 地以运输方式 k 至 j 地的单位运输成本
C_i^{kl}	在 i 地以运输方式 k 转换为 l 的单位转运成本
P_E	提前到达终点的存储成本
P_L	延迟到达终点的惩罚成本
h_1	冷藏箱损坏程度, $1 - h_1$ 为实际制冷效率, $(0, 1)$
E	单位碳税
U	碳排放配额
u_1, u_2, u_3	运输, 等待和中转单位制冷成本
δ	冷藏集装箱传热系数
S	冷藏集装箱内外部传热表面积
Δt	冷藏集装箱内外部温差
$\omega_1, \omega_2, \omega_3$	运输, 等待与转运的单位制冷碳排放量
e_i^{kl}	在 i 地以运输方式 k 转换为 l 的单位碳排放成本
e_{ij}^k	在 i 地以运输方式 k 至 j 地的单位碳排放成本
q_{ij}^k	i, j 之间的采用运输方式 k 的最大运输能力
q_i^{kl}	在 i 点运输方式由 k 转换成 l 的最大转运能力
p_1, p_2, p_3	运输, 等待与转运货损率, $(0, 1)$
x_{ij}^k	决策变量, 从 i 地到 j 地以运输方式 k 运输则为 1, 否则为 0
y_i^{kl}	决策变量, 从 i 地以运输方式 k 转换为 l 则为 1, 否则为 0

根据上表 1 模型的运输成本为运输起点至运输终点各成本之和

$$\min C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6 \quad (3)$$

式(3)表示总成本为运输、中转、冷藏、惩罚、碳排放、货损这六项成本之和;

$$T_1 = \sum_{i \in n} \sum_{j \in n} \sum_{k \in K} t_{ij}^k x_{ij}^k \quad (4)$$

$$T_2 = \sum_{i \in n} \sum_{k, l \in K} t_i^{kl} y_i^{kl} \quad (5)$$

$$T_3 = \sum_{i \in n} \sum_{k, l \in K} x_i^{kh} \min[\beta_i^k - (S_i + t_i^{kl})] \quad (6)$$

式(4)~(6)分别表示运输总时间、转运总时间、等待班期总时间;

$$C_1 = \tilde{q} \sum_{i \in n} \sum_{j \in n} \sum_{k \in K} x_{ij}^k D_{ij}^k C_{ij}^k \quad (7)$$

式(7)表示运输成本为运输距离和运输单价以及模糊运输量的乘积;

$$C_2 = \tilde{q} \sum_{i \in n} \sum_{k, l \in K} y_i^{kl} C_i^{kl} \quad (8)$$

式(8)表示转运成本为对应转运方式的转运单价与模糊运输量的乘积;

$$C_3 = \tilde{q}(1 - h_1) S \delta \Delta t (u_1 T_1 + u_2 T_2 + u_3 T_3) \quad (9)$$

式(9)表示冷藏成本为运输冷藏成本、中转冷藏成本、等待冷藏成本之和;

$$C_4 = \tilde{q} [P_E (T_3 + \max(ET - S_n, 0)) + P_L \max(S_n - LT, 0)] \quad (10)$$

式(10)表示货物的惩罚成本为等待班期的存储成本、提前到达时间窗的存储成本、延迟达到时间窗的惩罚成本三者之和;

$$E \left[q \left(\sum_{i \in n} \sum_{j \in n} \sum_{k \in K} x_{ij}^k e_{ij}^k D_{ij}^k + \sum_{i \in n} \sum_{k, h \in K} y_i^{kh} e_i^{kh} + \omega_1 T_1 + \omega_2 T_2 + \omega_3 T_3 \right) - U \right] \quad (11)$$

式(11)表示碳排放成本或收入为实际需要购买或出售的碳排放量(运输、中转和冷藏碳排放之和减去碳税配额)和单位碳税价格的乘积;

$$C_6 = \tilde{q} \left\{ 1 - \left[(1 - p_1)^{T_1} + (1 - p_2)^{T_2} + (1 - p_3)^{T_3} \right] \right\} \quad (12)$$

式(12)表示货损成本为运输货损成本、中转货损成本、等待班期货损成本之和;

$$\sum_{k \in K} x_{ij}^k \leq 1, \forall i, j \in N, \forall k \in K \quad (13)$$

式(13)表示在运输途中的运输路段有且仅有一种运输方式;

$$\sum_{k \in K} y_i^{kl} \leq 1, \forall i \in N, \forall k, h \in K \quad (14)$$

式(14)表示在运输途中的运输节点有且仅有一种中转方式;

$$\sum_{i, j \in N, k \in M} x_{ij}^k - \sum_{j, h \in N, k \in M} x_{jh}^k = \begin{cases} 1, j = D \\ 0, j \in N \setminus \{O, D\} \\ -1, j = O \end{cases} \quad (15)$$

式(15)保证运输过程中的货物流量守恒;

$$x_{io_i}^k + x_{ij}^h \geq 2x_i^{kl}, \forall i, j \in N, \forall k, l \in K \quad (16)$$

式(16)保证中转的连续性;

$$\tilde{q} x_{ij}^k \leq q x_{ij}^k \quad (17)$$

式(17)表示模糊中转量不超过运输节点运输限制;

$$\tilde{q} x_i^{kl} \leq q_i^h x_i^{kl} \quad (18)$$

式(18)表示模糊需求量不超过运输节点中转限制;

$$T = T_1 + T_2 + T_3 \quad (19)$$

式(19)表示总时间为运输时间、转运时间与等待时间之和;

$$S_j = S_i + t_{ij}^k + t_j^{kl} + \min(\beta_i^k - (S_i + t_{ij}^k + t_j^{kl})) \quad (20)$$

式(20)保障运输时间的连续性;

$$ET_{\min} \leq S_n \leq LT_{\max} \quad (21)$$

式(21)确保货物运输至终点的时间在硬时间窗约束内;

$$x_{ij}^k, y_i^{kl} \in (0, 1) \quad (22)$$

式(22)表示其是决策变量。

由于不确定需求可以利用三角模糊数和置信水平清晰化表示出来, 因此将公式 2 的清晰化方法引入本文模型, 得到本文不确定需求下的清晰化模型。

$$\min C = \begin{cases} (2\alpha q^m + (1-2\alpha)q^l)(C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_6)/q + \\ E \left[(2\alpha q^m + (1-2\alpha)q^l) \left(\sum_{i \in n} \sum_{j \in n} \sum_{k \in K} x_{ij}^k e_{ij}^k D_{ij}^k + \sum_{i \in n} \sum_{k, h \in K} x_i^{kl} e_i^{kl} + \omega_1 T_1 + \omega_2 T_2 + \omega_3 T_3 \right) - U \right] \\ 0 \leq \alpha \leq 0.5 \\ 2(1-\alpha)q^m + (2\alpha-1)q^u (C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_6)/q + \\ E \left[2(1-\alpha)q^m + (2\alpha-1)q^u \left(\sum_{i \in n} \sum_{j \in n} \sum_{k \in K} x_{ij}^k e_{ij}^k D_{ij}^k + \sum_{i \in n} \sum_{k, h \in K} x_i^{kl} e_i^{kl} + \omega_1 T_1 + \omega_2 T_2 + \omega_3 T_3 \right) - U \right] \\ 0.5 \leq \alpha \leq 1 \end{cases} \quad (23)$$

约束条件为

$$\begin{cases} (2\alpha q^m + (1-2\alpha)q^l)x_{ij}^k \leq qx_{ij}^k, 0 \leq \alpha \leq 0.5 \\ 2(1-\alpha)q^m + (2\alpha-1)x_{ij}^k \leq qx_{ij}^k, 0.5 < \alpha \leq 1 \end{cases} \quad (24)$$

$$\begin{cases} (2\alpha q^m + (1-2\alpha)q^l)x_i^{kl} \leq qx_i^{kl}, 0 \leq \alpha \leq 0.5 \\ 2(1-\alpha)q^m + (2\alpha-1)x_i^{kl} \leq qx_i^{kl}, 0.5 < \alpha \leq 1 \end{cases} \quad (25)$$

不确定需求清晰化后的模型为公式(23), 约束条件为公式(13)~(16), (19)~(22), (24)~(25)。

4. 算法设计

针对组合优化问题的求解方法, 目前的研究主要分为精确算法和启发式算法。本文研究的多式联运路径优化问题涵盖多项成本和约束, 其求解过程中计算量较大, 属于 NP-hard 问题, 因此不宜采用精确算法解决。在启发式算法中, 遗传算法(GA)作为一种高效的方法被广泛应用于解决组合优化问题。然而, 传统的 GA 在解决复杂优化问题时, 由于交叉和变异的随机性容易导致部分个体重复, 种群中个体的浓度提高会减小算法的搜索范围, 因此本文将引用去重与灾变策略, 在每次交叉变异后检查重复的个体并删除, 然后重新生成新的种群将缺失的个体补齐, 再利用灾变策略检查算法是否陷入局部最优, 从而提高算法的全局搜索能力。改进遗传算法的主要步骤如下:

步骤 1. 问题编码设计

在多式联运路径优化问题中, 路径和运输方式的选择是关键决策因素。本文采用基于拓扑排序的实数编码方式, 确保路径的有效性和连贯性。编码结构分为两部分: 路径节点序列和运输方式序列。具体而言, 编码向量的奇数节点表示路径节点序列, 从起始节点到终止节点, 最多包含 M 个节点; 偶数部分表示运输方式序列, 每种运输方式对应路径的某一阶段, 共有 N 种可能方式(公路、铁路、水路), 其中 $N = M - 1$ 。这种编码方式能够清晰地表示路径和运输方式的组合。染色体编码图见图 2:

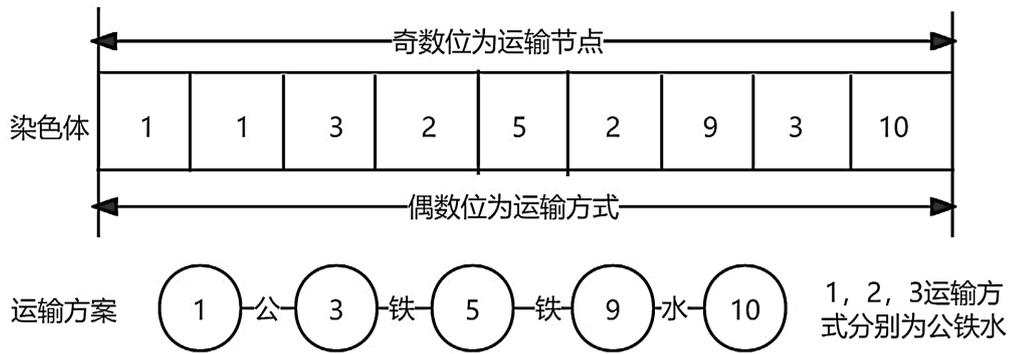


Figure 2. Colored graph encoding graph
图 2. 染色图编码图

以 10 个运输节点为例, 图 2 表示从运输节点 1 经公路至节点 3 经铁路至节点 5 经铁路至节点 9 经水路至节点 10。

步骤 2. 初始化种群

将多式联运节点作为顶点, 运输路径(公路/铁路/水路)作为有向边, 并赋予权重, 对节点进行拓扑排序, 确保路径方向性生成顺序依赖的运输链, 随机选择满足约束的运输节点和运输方式, 生成满足拓扑排序的初始化种群, 多式联运拓扑排序图见图 3:

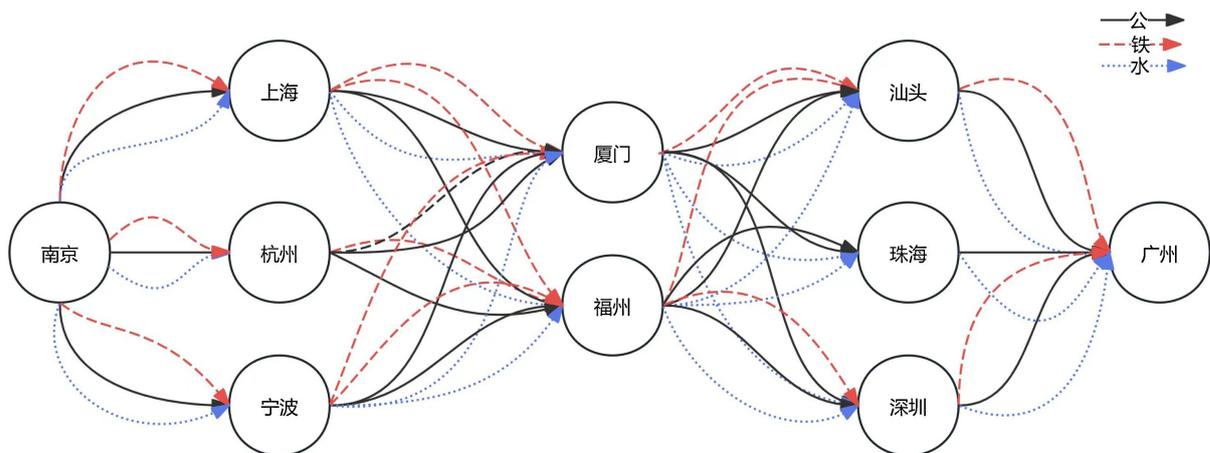


Figure 3. Topological sorting diagram of Nanjing-Guangzhou multimodal transport
图 3. 南京 - 广州多式联运拓扑排序图

步骤 3. 解码计算适应度

解码过程用于将编码中的路径和运输方式转换为实际的运输参数, 例如距离、时间、成本和碳排放等。适应度函数用于评估个体的优劣, 其取值为总成本的倒数。

$$\rho = \frac{1}{\min C} \quad (26)$$

步骤 4. 轮盘赌选择

$$prob_i = \frac{\rho_i}{\sum_{i=1}^N \rho_i} \quad (27)$$

轮盘赌选择概率为适应度值和累计适应度值的比例, 即选择概率为归一适应度值, 值越大则轮盘赌中占比越大被选择的概率即越高。

步骤 5. 单点交叉和变异

由于本文的编码方式, 奇数位为城市节点, 偶数位为运输方式。因此, 根据交叉概率随机选择一个共同的运输节点, 然后交叉相同运输节点的后半部分, 并验证路径有效性, 若交叉后结果比上一代更好则进行替换, 否则不变。

若变异节点为偶数则为运输方式变异, 从可替换的运输方式中随机选择, 没有其他方式则进行保留, 若变异节点为奇数则进行节点变异, 对该节点之后的路径进行重新生成。

步骤 6. 去重

由于遗传算法的随机性, 导致种群在交叉变异后有一些重复的个体, 本文将引入去重策略寻找重复个体, 只保留一个相同的路径, 并调用初始化种群函数对缺失的个体进行补齐形成新种群。

步骤 7. 灾变算子

为了提高算法的全局搜索能力, 减少种群“早熟”现象, 我们在传统遗传算法中引入灾变算子。当算法在寻优过程中长时间没有生成更优解时, 将启动灾变算子, 主动跳出局部搜索, 增强算法的全局搜索能力。我们设计了一个灾变计数器来判断灾变条件, 具体灾变方式如下:

设置一个灾变计数器, 初始值为 0。每产生一代新个体, 灾变计数器数值加 1。当计数器数值超过特定值 10 时, 意味着结果多次未改变, 局部搜索已经充分进行, 即可启动灾变, 重新生成种群, 灾变计数器归零。

综上所述, 论文所设计的在碳交易政策下考虑时间窗的多式联运路径优化问题的改进遗传算法流程见图 4 所示。

5. 数值实验

5.1. 算例分析

本研究的数据来源于文献[10] [11], 物流网络的具体拓扑结构如图 3 所示, 节点间距离数据见表 1。研究对象为一批运量不确定的货物, 需从起始节点南京运输至目标广州。货物重量以三角模糊数形式表示为 \tilde{q} (120 t, 150 t, 180 t), 其中 120、150、180 分别代表货物重量的最小可能值、最多交易次数值和最大可能值。在该网络中, 任意两个直接相连的节点之间均可选择公路、铁路和水路三种运输方式。各运输方式的运行速度分别为 76 km/h、60 km/h 和 20 km/h, 运输和中转相关参数借鉴文献[10]的数据。为了验证本文设计的改进遗传算法性能, 运用 MATLAB 编程, 分别采用文献[11]遗传算法与本文改建的遗传算法对本文的多式联运模型进行求解。参数设置 N 为 50, G 为 200 次, 交叉概率为 0.8, 变异概率为 0.2, 灾变最大次数为 10 次, 风险态度 $\alpha = 90\%$; 碳交易价格参考国内碳交易价格 50 元/t, 碳税配额为 5000 kg, 等待、运输和中转货损率分为 0.1%、0.2%、0.3%, 货物单位价值为 2000/t; 收货时间窗中点设置为 40, 软时间窗范围为时间窗中点范围的 5%即[38, 42], 硬时间窗设置为收获时间中点范围的 10%即[36, 44]; 分别对本文改进的遗传算法和文献[11]算法做对比, 求解 10 次取平均值, 得到见图 5 的收敛曲线。

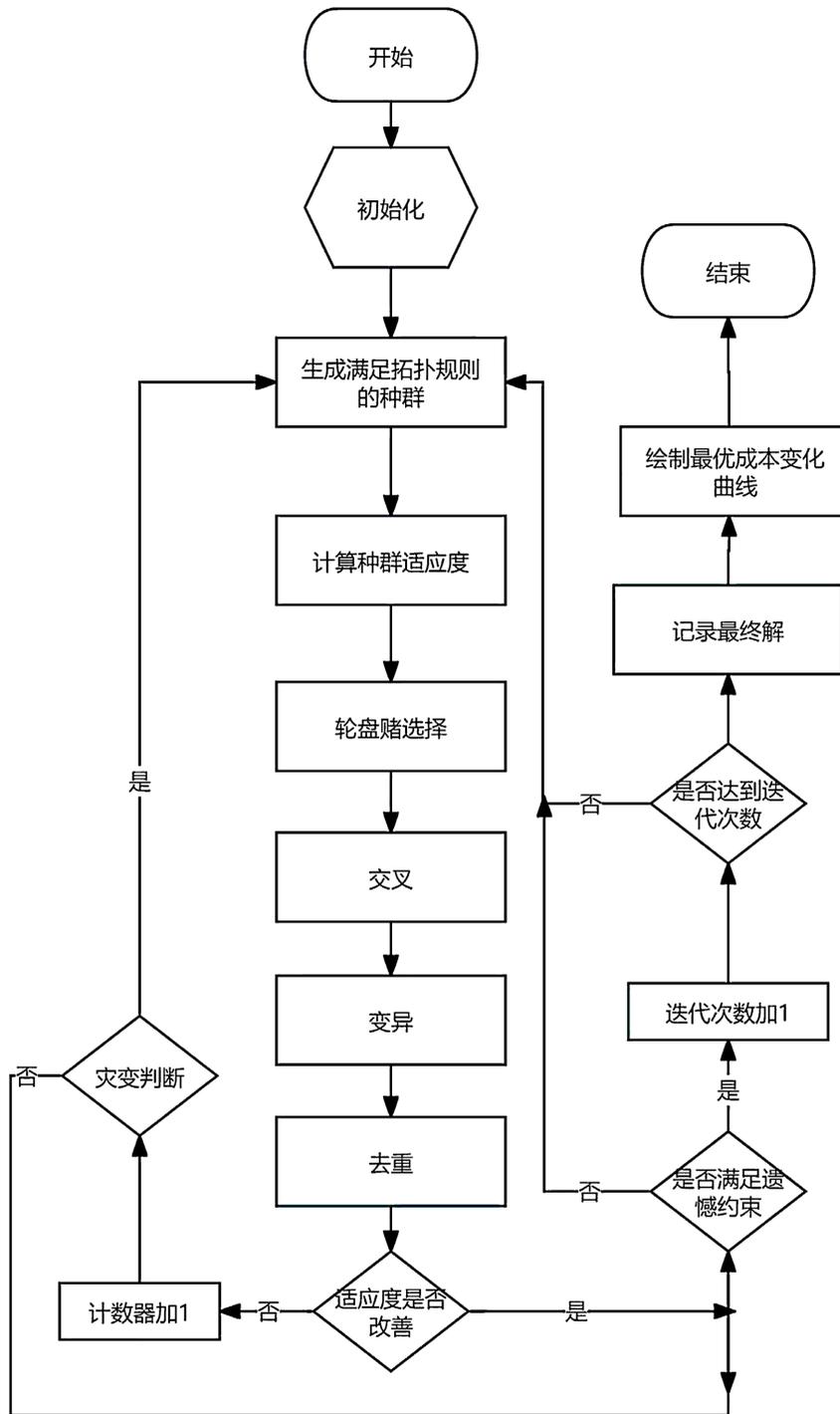


Figure 4. Algorithm flowchart
图 4. 算法流程图

由图 5 的迭代曲线可得, 从收敛速度看, 改进算法在 4 代左右收敛, 文献[11]算法在 30 代左右收敛, 改进算法的收敛速度更快; 从搜索速度来看, 改进算法的搜索速度和搜索频率更快, 改进算法在迭代过程中, 其目标函数值迅速下降并趋于稳定, 说明其求解精度较高, 能够快速找到较优解。为了更加直观的分析改进算法的改善效果, 通过表 1 和表 2 的数据进行进一步分析, 表 2 和表 3 如下:

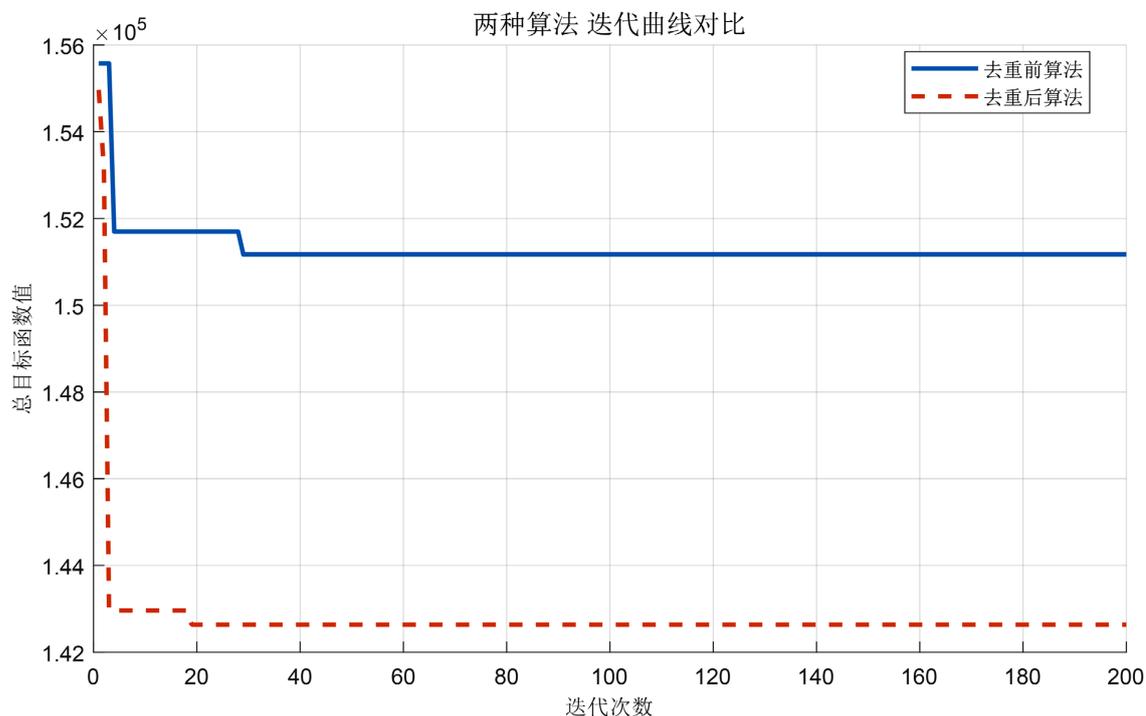


Figure 5. Comparison chart of algorithm iteration curves

图 5. 算法迭代曲线对比图

Table 2. Comparison table of algorithm results

表 2. 算法结果对比表

算法	路径	运输方式	总成本	总时间/h
文献[11]算法	南京 - 上海 - 福州 - 深圳 - 广州	铁 - 铁 - 铁 - 铁	151,172.382	35.300
改进算法	南京 - 宁波 - 厦门 - 深圳 - 广州	铁 - 铁 - 铁 - 水	142,636.778	39.300

Table 3. Cost composition table

表 3. 成本构成表

算法	运输	中转	冷藏	惩罚	货损	碳排放
文献[11]算法	109,794.000	1985.340	2166.416	3915.000	25,448.504	7863.121
改进算法	100,850.400	910.020	2411.902	8484.000	30,230.113	2207.495
文献[10]算法	108,365.52	910.020	0	0	0	0

由表 3 可得, 改进算法与文献[11]算法结果相比, 总成本减少了 5.65%, 这是由于改进算法选择了性价比较高的水路, 减少了一部分运输成本和碳排放成本; 改进算法与文献[10]相比, 总成本减少了 6.93%, 并且考虑的成本更加详细, 因此证明本文改进的算法具有一定的有效性。

5.2. 灵敏度分析

5.2.1. 置信水平分析

为了进一步分析置信水平 a 对路径选择的影响, 改变置信水平 a 的取值, 从 0 到 1 步长为 0.1 进行灵敏度分析, 实验数据见表 4:

Table 4. Transportation schemes under different α conditions
表 4. 不同 α 下运输方案表

α	运输路径	运输方式	总成本(元)
0	南京→宁波→福州→深圳→广州	铁路→铁路→铁路→水运	92,252.81
0.1	南京→宁波→福州→深圳→广州	水运→铁路→铁路→铁路	89,266.72
0.2	南京→宁波→福州→深圳→广州	水运→铁路→铁路→铁路	93,421.03
0.3	南京→宁波→福州→深圳→广州	水运→铁路→铁路→铁路	97,575.33
0.4	南京→宁波→福州→深圳→广州	水运→公路→铁路→铁路	109,401.41
0.5	南京→宁波→福州→深圳→广州	水运→公路→铁路→铁路	113,865.58
0.6	南京→宁波→福州→深圳→广州	水运→公路→铁路→铁路	118,329.76
0.7	南京→宁波→福州→深圳→广州	公路→公路→铁路→铁路	127,996.81
0.8	南京→宁波→福州→深圳→广州	水运→公路→铁路→铁路	127,540.76
0.9	南京→宁波→厦门→深圳→广州	铁路→铁路→铁路→水运	142,636.78
1	南京→宁波→厦门→深圳→广州	铁路→铁路→铁路→水运	147,472.12

置信水平 $\alpha = 0$ 即风险厌恶的情景, $\alpha = 0.5$ 表示为风险中性的情景, $\alpha = 1$ 则为风险追求下的情景。由表 4 可得, 运输成本随着运输随着置信水平 α 的增大而增大。运输路径在 $\alpha > 0.8$ 时发生改变, 这是由于运输量 q 在置信水平超过 0.8 时(0.9)需要运输至少 174 t 的货物才能满足需求, 此时超过了宁波—福州的公路运输限制 170, 因此需要改变运输路径以满足增加的需求, 同理, 运输方式由于中转限制随着货运量的增大而产生改变。综上运输成本随着置信水平 α 的增大而增大, 增加速度随着运输路径或运输方式的改变而加快, 灵敏度曲线近似成一条直线。

5.2.2. 收货时间窗分析

不同收货时间窗和不同软硬时间窗区间长度会影响路径选择的方式, 因此本文将收货时间窗中点以步长为 5, 从 30 到 80 共 11 种情况。在此基础上 3 种设置软硬时间窗长度, 分别为软时间为中点范围的 5%, 7.5%, 10%; 硬时间窗为中点范围的 10%, 15%, 20%, 累计 33 种情景, 分析不同时间窗情况下的最优成本, 见表 5:

Table 5. Transportation routes in different time windows
表 5. 不同时间窗的运输路径

时间窗	中点	总成本(万)	运输路径	运输方式	总时间(h)	运输成本(万)	惩罚成本(万)
5~10	30	15.17	南→杭→厦→深→广	铁→公→铁→铁	31.5	11.47	0.39
5~10	45	12.8	南→宁→厦→深→广	水→铁→铁→铁	44.5	8.27	0.83
5~10	60	11.92	南→上→福→深→广	水→水→铁→铁	56.5	5.93	1.35
5~10	80	11.51	南→宁→厦→汕→广	水→水→水→水	79.5	4.03	1.15
7.5~15	30	15.17	南→杭→厦→深→广	铁→公→铁→铁	31.5	11.47	0.39
7.5~15	45	12.8	南→宁→厦→深→广	水→铁→铁→铁	44.5	8.27	0.83
7.5~15	60	11.92	南→上→福→深→广	水→水→铁→铁	56.5	5.93	1.35
7.5~15	80	11.43	南→上→厦→汕→广	水→水→水→水	79.5	4.04	1.08

续表

15~20	30	15.17	南→杭→厦→深→广	铁→公→铁→铁	31.5	11.47	0.39
15~20	45	12.8	南→宁→厦→深→广	水→铁→铁→铁	44.5	8.27	0.83
15~20	60	11.92	南→上→福→深→广	水→水→铁→铁	56.5	5.93	1.35
15~20	80	11.43	南→上→厦→汕→广	水→水→水→水	79.5	4.04	1.08

结果显示, 随着时间窗中点的增加, 运输成本逐渐减少; 此外, 不同时间窗长度设置对运输路径、方式、总时间和成本也有影响。在 5%~10% 的软时间窗下, 运输路径为南→杭→厦→深→广, 运输方式为铁→公→铁→铁, 总成本为 15.17 万元。随着时间窗的调整, 运输路径和方式也发生变化, 如南→宁→厦→深→广, 运输方式为水→铁→铁→铁, 总成本为 12.8 万元。总体来看, 时间窗设置对运输效率和成本控制有重要影响, 合理设置时间窗有助于优化运输路径, 降低总成本。

5.2.3. 班期时间分析

不同的班期时间可能会对运输路径产生影响, 在其他参数不变的情况下, 本文将铁路与水路的班期时间间隔分别 1 小时、2 小时、4 小时, 共 9 种不同的情况, 以研究在不同班期时间组合下的路径选择情况见表 6:

Table 6. Transportation plans under different intervals of schedules
表 6. 不同班期间隔下运输方案

班期组合	路线分段	运输方式	运输成本
铁 1 水 1	南→宁→厦→深→广	铁→铁→铁→水	142,636.78
铁 1 水 2	南→宁→厦→深→广	铁→铁→铁→水	142,636.78
铁 1 水 4	南→宁→厦→深→广	铁→铁→铁→铁	142,946.48
铁 2 水 1	南→宁→厦→深→广	铁→铁→铁→水	149,123.26
铁 2 水 2	南→宁→厦→深→广	铁→铁→铁→铁	149,346.84
铁 2 水 4	南→宁→厦→深→广	铁→铁→铁→铁	149,346.84
铁 4 水 1	南→杭→厦→深→广	铁→铁→铁→铁	154,456.78
铁 4 水 2	南→杭→厦→深→广	铁→铁→铁→铁	154,456.78
铁 4 水 4	南→杭→厦→深→广	铁→铁→铁→铁	154,456.78

由表 6 可得, 随着班期间隔时间的逐渐增加, 总运输成本逐渐增加; 当铁路运输间隔为 1 小时, 水路间隔时间增加到 4 小时时运输方式变为全程铁路运输, 当铁路运输和水路运输间隔都超过 2 小时运输方式变为全程铁路运输, 这是由于随着班期时间增加, 相关的时间成本增加, 转运需要付出更多的时间成本和存储成本, 转运次数随之减少, 直到为单一运输方式。因此, 班期间隔时间增加, 运输方式和运输路线也会发生改变。

5.2.4. 碳税价格分析

截至 2023 年我国碳交易价格大约为 0.05 元/千克, 虑到我国目前碳交易市场处于起步阶段, 市场碳交易价格相比于欧洲、北美等发达国家相差十倍左右。考虑到在碳交易市场不成熟时, 碳交易产生的减排效果较弱。为此, 分析碳交易价格为 0.05 步长为 0.05 增加直到 0.5 这 11 种情景下的路径优化结果, 见表 7:

Table 7. Path selection of different carbon tax prices
表 7. 不同碳税价格的路径选择情况

碳税价格	总成本(元)	碳排放成本(元)	运输路径	运输方式
0.05	142,636.78	2207.5	南→宁→厦→深→广	铁→铁→铁→水
0.1	144,844.27	4414.99	南→宁→厦→深→广	铁→铁→铁→水
0.15	147,051.77	6622.48	南→宁→厦→深→广	铁→铁→铁→水
0.2	149,120.59	7945.05	南→宁→厦→深→广	铁→铁→铁→铁
0.25	151,106.85	9931.31	南→宁→厦→深→广	铁→铁→铁→铁
0.3	153,093.11	11,917.57	南→宁→厦→深→广	铁→铁→铁→铁
0.35	155,079.37	13,903.84	南→宁→厦→深→广	铁→铁→铁→铁
0.4	157,065.64	15,890.1	南→宁→厦→深→广	铁→铁→铁→铁
0.45	159,051.89	17,852.24	南→宁→厦→深→广	铁→铁→铁→铁
0.5	161,038.16	19,862.62	南→宁→厦→深→广	铁→铁→铁→铁

由表 7 可知总成本随着碳税价格的增加而增加, 增加幅度几乎为一条直线, 碳税价格增加到 0.2 后运输方式发生改变, 深圳至广州路段由水路改变为铁路, 运输方式由铁水联运转变为铁路运输, 说明碳税价格提高会导致运输方式趋向于碳排放较少的铁路运输, 并且会减少中转次数以规避中转带来的碳排放费用; 碳税价格提高后运输路径无变化, 表明碳税价格对运输路径影响较小。

6. 结论

本文聚焦于电商场景下碳交易政策下冷链多式联运路径优化这一研究背景。在电商业务中, 由于消费者需求的多样性、促销活动的不确定性以及市场环境的动态变化, 实际运输存在诸多不确定因素, 这些因素对冷链多式联运的路径选择及成本产生显著影响。

为解决这一问题, 构建了综合考虑电商不确定需求、时间窗和班期时间的冷藏多式联运路径优化模型。在电商环境里, 消费者对商品送达时间有不同要求, 电商订单的需求也难以精确预估, 同时运输工具的班期时间也会影响运输安排。该模型以运输成本、中转成本、冷藏成本、等待成本、碳排放成本、货损成本最小化为目标, 充分考虑了电商模糊需求量、运输时间、中转时间、班期待时间等因素及相关约束条件。

通过研究发现, 多个关键因素会对电商冷链多式联运的路径决策产生显著影响:

(1) 不确定需求的置信水平: 在电商业务中, 不确定需求的置信水平反映了对需求预估的可靠程度。运输成本随置信水平 α 增大而上升, 当 $\alpha > 0.8$ 时, 运输路径和方式改变导致成本增速加快。例如, 在大型促销活动期间, 若对需求的置信水平过高, 可能会选择不合理的运输路径和方式, 从而增加成本。

(2) 收货时间窗: 电商消费者对收货时间有一定期望, 收货时间窗中点增加会使运输成本降低。合理设置时间窗有助于电商冷链多式联运优化路径与降低成本。比如, 根据消费者的普遍需求, 将收货时间窗设置在合理区间, 可以避免不必要的等待成本和加急运输成本。

(3) 班期间隔时间: 在电商物流中, 班期间隔时间影响着货物的运输效率和成本。班期间隔时间增加会使总运输成本上升, 运输方式也会随时间变化而改变。例如, 班期间隔时间过长, 可能会导致货物等待时间增加, 从而选择其他运输方式。

(4) 碳税价格: 随着碳交易政策的实施, 碳税价格对电商冷链多式联运的成本和运输方式选择有重要

影响。碳税价格增加使总成本上升, 对运输路径影响较小, 但对运输方式选择趋向于铁路运输。因为铁路运输相对更环保, 在碳税价格上升时, 选择铁路运输可以降低碳排放成本。

最后, 为优化电商冷链多式联运的路径选择, 采用三角模糊数处理电商订单中的不确定性, 并设计改进遗传算法求解模型。此外, 在研究电商冷链多式联运路径优化时, 还可以进一步深入分析其他不确定因素, 如不同地区电商运输价格的影响、不同地区温度的变化等, 结合更完善的模型, 使路径选择结果更贴合电商实际运输情况。

参考文献

- [1] 肖武, 陈昱霏, 石林. 跨境电商与多式联运融合发展探索[J]. 物流工程与管理, 2017, 39(11): 5-6.
- [2] 王坤, 吴崑. 基于扎根理论的跨境电商综合试验区发展模式研究[J]. 电子商务, 2020(9): 25-28, 30.
- [3] 张姗姗, 江七一. 基于多式联运的电子商务物流配送系统研究[J]. 金融理论与教学, 2020(6): 92-98, 106.
- [4] 李珺, 杨斌, 朱小林. 混合不确定条件下绿色多式联运路径优化[J]. 交通运输系统工程与信息, 2019, 19(4): 13-19, 27.
- [5] Mohammadi, M., Shahparvari, S. and Soleimani, H. (2021) Multi-modal Cargo Logistics Distribution Problem: Decomposition of the Stochastic Risk-Averse Models. *Computers & Operations Research*, **131**, Article ID: 105280. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2021.105280>
- [6] 邓明君, 代玉珍, 李响. 需求不确定下低碳多式联运路径鲁棒优化[J]. 工业工程, 2023, 26(4): 104-113.
- [7] 于雪娇, 郎茂祥, 王伟哲, 等. 考虑模糊需求的多式联运路径优化[J]. 北京交通大学学报, 2018(3): 23-29, 36.
- [8] 张旭, 袁旭梅, 降亚迪. 需求与碳交易价格不确定下多式联运路径优化[J]. 系统工程理论与实践, 2021, 41(10): 2609-2620.
- [9] 范志强, 乐美龙. 面向随机环境的带软时间窗多式联运路径优化[J]. 工业工程与管理, 2011, 16(5): 68-72.
- [10] 邓学平, 陈露, 田帅辉. 不确定需求下考虑混合时间窗的多式联运路径优化[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2021, 33(4): 689-698.
- [11] 辜勇, 文洁. 运输时间不确定下冷藏集装箱多式联运路径优化研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2025, 49(3): 469-475.
- [12] Fazayeli, S., Eydi, A. and Kamalabadi, I.N. (2018) Location-Routing Problem in Multimodal Transportation Network with Time Windows and Fuzzy Demands: Presenting a Two-Part Genetic Algorithm. *Computers & Industrial Engineering*, **119**, 233-246. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.03.041>
- [13] Cui, T., Shi, Y., Wang, J., Ding, R., Li, J. and Li, K. (2025) Practice of an Improved Many-Objective Route Optimization Algorithm in a Multimodal Transportation Case under Uncertain Demand. *Complex & Intelligent Systems*, **11**, Article No. 136. <https://doi.org/10.1007/s40747-024-01725-4>
- [14] Chen, X., Hu, X. and Liu, H. (2024) Low-Carbon Route Optimization Model for Multimodal Freight Transport Considering Value and Time Attributes. *Socio-Economic Planning Sciences*, **96**, Article ID: 102108. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2024.102108>
- [15] Zhang, H., Huang, Q., Ma, L. and Zhang, Z. (2024) Sparrow Search Algorithm with Adaptive T Distribution for Multi-Objective Low-Carbon Multimodal Transportation Planning Problem with Fuzzy Demand and Fuzzy Time. *Expert Systems with Applications*, **238**, Article ID: 122042. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.122042>
- [16] 杨华龙, 于果. 碳交易价格不确定下冷链多式联运路径优化[J]. 交通运输系统工程与信息, 2024, 24(6): 5-14.