

考虑交通拥堵与碳排放影响的城市生鲜冷链物流路径优化的研究

钱佳辉

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2025年10月13日; 录用日期: 2025年10月29日; 发布日期: 2025年11月28日

摘要

针对目前电商生鲜产品配送环节中存在高成本、高碳排放等问题, 本文基于传统生鲜冷链物流配送模型, 在考虑碳排放的同时加入交通拥堵因素, 构建以固定成本、运输成本、制冷成本、货损成本、碳排放成本和惩罚成本之和最小为目标的路径优化模型, 并使用设计的人工鱼群灰狼混合优化算法来对模型进行求解。通过对算例中的原始配送路径和优化过后的优化路径的总成本比较, 发现优化过后的总成本对比降低了约26.66%, 从而验证了模型及算法的可行性。

关键词

交通拥堵, 碳排放, 冷链物流, 路径优化, 人工鱼群灰狼算法, 总成本

Research on Urban Fresh Food Cold Chain Logistics Route Optimization Considering Traffic Congestion and Carbon Emission Impact

Jiahui Qian

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

Received: October 13, 2025; accepted: October 29, 2025; published: November 28, 2025

Abstract

Addressing the issues of high costs and high carbon emissions in the current distribution of fresh

products, along with the growing problem of urban traffic congestion, this study develops a path optimization model based on the traditional cold chain logistics distribution model. The model incorporates carbon emissions and traffic congestion factors, aiming to minimize the sum of fixed costs, transportation costs, refrigeration costs, product spoilage costs, carbon emission costs, and penalty costs. A designed hybrid optimization algorithm, the Artificial Fish Swarm and Grey Wolf Optimizer (AFS-GWO), is used to solve the model. By comparing the total costs of the original distribution path and the optimized path in a case study, it was found that the total cost after optimization decreased by approximately 26.66%, thus verifying the feasibility of the model and the algorithm.

Keywords

Traffic Congestion, Carbon Emissions, Cold Chain Logistics, Path Optimization, Artificial Fish Swarm and Grey Wolf Algorithm, Total Cost

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

随着互联网技术的飞速发展以及居民生活品质的不断提升，也加剧了生鲜电商市场的竞争趋势，生鲜电商正经历着竞争不断加剧的阶段。生鲜电商逐渐改变传统生鲜产品分销模式的格局，采用 B2B 等多渠道网络式配送，虽然减少了中间环节，但同时也导致物流网络变得更为复杂。在此背景下，生鲜电商的发展也带动了冷链物流运输规模的不断壮大，如何在冷链配送过程中降低配送成本获得最大经济效益成为目前的热点问题。

在对冷链物流配送路径优化的问题研究上，国内外学者都取得了许多的研究成果。研究者研究视角主要包括考虑生鲜物品的易腐易损特性、碳排放量和能耗等，以最小化车辆运输成本为总目标，将交通拥堵状况、客户需求量、时间窗、最大装载量等要素影响纳入考量。Amorim 和 Almada-Lobo (2014)针对易腐食品物流场景构建了双目标优化模型，以物流成本最小化与最高产品新鲜度为两个主要目标[1]。Esmizadeh (2021)构建了一个考虑需求随机性和产品新鲜度衰减特性的多目标决策模型，建立了基于韦伯-费希纳定律的新鲜度量化函数，将农产品品质衰减过程转化为动态时间窗约束[2]。轩苗苗(2025)整合运输成本、货损成本、碳排放成本及弹性时间窗惩罚等核心指标构建成本最小化目标函数[3]。马佳等(2025)建立了考虑新鲜度的生鲜冷链物流同时取送货车辆路径优化模型，考虑同时取送货的场景和生鲜产品在不同场景下的新鲜度衰减速度，同时以车辆使用成本、货损成本、时间惩罚成本之和最小为目标[4]。

而对于考虑交通拥堵下的城市生鲜冷链物流路径优化问题，虽然目前也有了一定的研究，但仍存在着不足之处。葛显龙、冉小芬(2021)针对城市配送过程中引发的交通拥堵问题，研究时变拥堵情况下车辆路径优化对碳排放的影响，文中引入车辆在行驶弧上的等待策略，建立以碳排放最小和行驶时间最小的双目标优化模型，并设计改进的禁忌搜索算法对模型进行求解，但研究没有考虑客户本身对配送时间的要求，即客户具有针对性的时间窗要求[5]。胡熙(2024)着重考虑交通拥堵对运输路径和时效的影响，构建以综合运输成本、碳排放与拥堵程度的适应度函数，构建了一种带 ALNS 的改进遗传算法，通过小规模算例与大规模算例结果的分析对比，证明了在大规模算例在面对更复杂问题时可以路径进行更有效规划，但该研究同样没有考虑客户本身对配送时间的要求，在配送点方面，存在目前大多数路径优化问题

研究中存在的局限,即仅采用了单配送中心来进行多客户配送[6]。王一婕(2025)以上海市W企业生鲜农产品冷链物流路径规划为研究对象,考虑时变路网情况下配送路线对各项成本的影响,构建了一个以最小总成本为优化目标的数学模型,通过引入最大最小蚂蚁系统对基础蚁群算法进行改进得出最优配送路线,但该研究仅聚焦于早高峰时段交通状况对路网通行效率,在算例方面也仅采用了单配送中心的简化假设影响,存在一定的局限性[7]。

而随着“双碳”战略目标推进下,学者们也更加重视物流配送过程中的碳排放。宁涛(2022)等学者针对生鲜农产品配送过程中因新鲜度要求导致碳排放增加的问题,构建了兼顾碳排放最小化与配送成本优化的双目标数学模型,并提出了一种改进的基于自适应旋转角的量子蚁群算法[8]。罗瑞(2022)等将差异化碳定价机制引入冷链路径优化研究,构建了包含分级满意度指标、碳排放约束和经济效益的多目标优化框架,为低碳冷链配送提供了新的决策支持工具[9]。于惠也(2025)将研究聚焦于碳交易背景下,以经济成本与客户满意度为最优要素去构建冷链物流配送路径优化模型,为政府完善碳交易价格政策及企业发展提供决策参考[10]。

因此,本文在现有研究的基础上,将城市的交通拥堵因素影响纳入模型中,综合考虑碳排放等各要素的影响,通过细化碳排放成本,建立带时间窗的多配送中心冷链物流配送路径模型,采用人工鱼群灰狼混合优化算法来对配送路径进行优化,以追求物流总成本最小。希望通过研究可以为生鲜电商企业配送提供参考。

2. 问题描述

模型建立的基本情形如下:存在多个配送中心为 N 个客户执行冷链产品配送任务,各客户点的地理位置、货物需求量、时间窗已知,车辆在两个节点之间进行配送的时间根据该时间段的拥堵系数来计算,综合考虑冷链物流配送中的各项成本,旨在满足碳排放、车辆额定载重、客户时间窗等约束的前提下,寻求车辆运行总成本最低的路径。

2.1. 假设与符号描述

2.1.1. 相关假设

为构建本文模型,基于以下假设进行研究:

- (1) 冷链配送中心设有多个且位置始终固定;
- (2) 配送中心提供的车辆同质,且车辆的最大载货量已知;
- (3) 一辆配送车辆可以为多个配送点服务;
- (4) 不允许车辆违规超重;
- (5) 车辆均同时从配送中心出发完成各自配送任务后返回配送中心;
- (6) 配送车辆只完成配送任务,不考虑取货的情况;
- (7) 在车辆出发之前,所有客户的取送货需求均已知,且每个客户点的物品需求仅由一辆车一次性满足;
- (8) 取送货服务的货物品类无差异;
- (9) 货物腐败变质状况仅与时间指数存在关联;
- (10) 车辆完成最后一个客户点的配送任务后,关闭冷库独立制冷机组,然后空载返回配送中心;
- (11) 客户点的位置、软时间窗、货物需求量等均为确定性信息;

2.1.2. 符号说明

冷链物流路径优化模型相关符号见表1:

Table 1. Symbol description table**表 1.** 符号说明表

符号	含义
j	冷链配送中心集合($j = 1, 2, \dots, D$)
k	冷链配送中心持有的车辆集合($k = 1, 2, \dots, K$)
l, m	客户节点集合。 $(l, m = 0, 1, 2, \dots, N)$ ，其中节点 m 是车辆离开节点 l 后的下一个节点，若 $l, m = 0$ 则代表冷链配送中心
p_1	单位车辆用车成本
y_k	如果使用车辆 y_k 则为 1，否则为 0
x_{lmj}^k	如果车辆 k 从节点 l 行驶到节点 m ，且路径归属冷链配送中心，则 x_{lmj}^k 为 1，否则 x_{lmj}^k 为 0
p_2	单位距离配送成本
d_{lm}	节点 l 到节点 m 之间的距离
x_{m0j}^k	如果车辆 k 从节点 m 行驶回到原冷链配送中心 j ，则 x_{m0j}^k 为 1，否则 x_{m0j}^k 为 0
p_{31}	运输过程中单位时间制冷成本
p_{32}	卸载过程中单位时间制冷成本
P_x	独立制冷机组在卸载过程中的功率
t_m^A	车辆到达节点 m 的时间
t_l^L	车辆离开节点 l 的时间
y_{ij}^k	如果节点 l 中的产品由车辆 k 进行配送，则 y_{ij}^k 为 1，否则 y_{ij}^k 为 0
T^*	在节点进行卸货的时间
E_2	制冷设备在运输和卸载过程中单位时间的能耗率
p_4	商品的单价
q_l	节点 l 的需求量
q_l^A	到达节点 l 时的商品运输量
q_l^L	离开节点 l 时的商品运输量
α_1	运输过程中的新鲜度衰减系数
α_2	卸货过程中的新鲜度衰减系数
q_{lm}	节点 l 到节点 m 的商品运输量
ε_m	运输车辆在满载时单位距离燃油消耗量
ε_0	运输车辆在空载时单位距离燃油消耗量
q_M	冷链车的最大载重量
$E_1(q_{lm})$	节点 l 到节点 m 的单位距离的油耗量
E_2	制冷设备在运输和卸载过程中单位时间的能耗率
p_5	单位碳排放成本
σ	碳排放系数值
a_1	配送车辆提前到达产生的单位时间机会成本
a_2	配送车辆延后到达产生的单位时间延误成本

2.2. 模型构建

2.2.1. 冷链配送成本构成

为了更贴近实际道路状况, 本文结合百度地图智慧交通的交通拥堵大数据在线监测平台, 通过对 Z 市 2025 年 4 月份的拥堵指数数据的采集与整理, 建立了全天各个时间段下的城市道路拥堵指数特征模型与特征图[11], 本文研究对象所在地为 Z 市, 因此所建立的城市道路拥堵指数特征模型以 Z 市为基准, 具体算式如下:

$$Y(t) = \begin{cases} 1 & (0,6] \\ 1.09 + 0.50 * (t - 6) & (6,7] \\ 1.59 + 0.25 * (t - 7) & (7,8] \\ 1.84 - 0.25 * (t - 8) & (8,9] \\ 1.59 - 0.13 * (t - 9) & (9,10] \\ 1.46 - 0.15 * (t - 10) & (10,11] \\ 1.31 + 0.01 * (t - 11) & (11,12] \\ 1.32 + 0.07 * (t - 12) & (12,13] \\ 1.39 + 0.08 * (t - 13) & (13,14] \\ 1.39 + 0.09 * (t - 14) & (14,15] \\ 1.48 + 0.06 * (t - 15) & (15,16] \\ 1.54 + 0.30 * (t - 16) & (16,17] \\ 1.84 - 0.12 * (t - 17) & (17,18] \\ 1.72 - 0.25 * (t - 18) & (18,19] \\ 1.47 - 0.14 * (t - 19) & (19,20] \\ 1.33 - 0.06 * (t - 20) & (20,21] \\ 1.27 - 0.13 * (t - 21) & (21,22] \\ 1.14 - 0.06 * (t - 22) & (22,23] \\ 1.08 - 0.08 * (t - 23) & (23,24] \end{cases} \quad (1)$$

其中 $Y(t)$ 为城市的交通拥堵指数; t 为车辆离开节点时的时间点; 单位为小时。为了使得交通拥堵指数更加精准, 因此对根据车辆配送所处的时间段的交通拥堵指数利用二分法来提高其精准度, 具体为利用相应时间段求解出车辆离开节点 l 时的交通拥堵指数并与该时间段最后时刻的交通拥堵指数相加后再整体除二, 算式如下:

$$Y(h) = \frac{Y(t) + Y(z)}{2} \quad (2)$$

其中 $Y(h)$ 为时间段 h 中时间点 t 和 z 的拥堵指数加和的平均数; $Y(z)$ 为该时间段最后时刻的交通拥堵指数; z 为对应时间点 t 所在时间段的整数时间点, 并且时间点 z 始终大于等于时间点 t 。

车辆行驶时间分析:

假设车辆在不外界其他因素的干扰下所能达到的常规速度为 V , 配送车辆从离开节点 l 到节点 m 经过的各个时间段所对应的交通拥堵指数为 $Y(h)$, 并且周期 h 的结束时间为 T_z 。车辆从节点 l 到节点 m 的时间包含下列三种情况:

当配送车辆仅通过一个时间段 h 时, 车辆速度不产生变化, 节点 m 到节点 l 的时间为:

$$t_m^A - t_l^L = \frac{d_{ij}}{V} Y(h) \quad (3)$$

当车辆从时间段 h 出发, 经过两个时间段 h 和 $h+1$ 时, 期间速度会随着跨越时间段进行一次变化, 节点 m 到节点 l 的时间表示为:

$$t_m^A - t_l^L = T_z - t_l^L + \frac{d_{ij} - \frac{V(T_z - t_l^L)}{Y(h)}}{V} Y(h+1) \quad (4)$$

当车辆经过两个以上的时间段, 经过时间段 h 到达时间段 H ($H > h+1$), 期间车辆速度进行多次变化, 节点 m 到节点 l 的时间表示为:

$$t_m^A - t_l^L = T_z - t_l^L + \sum_r^{H-1} (T_{z+r} - t_{z+r-1}) + \frac{d_{ij} - \frac{V(T_z - t_l^L)}{Y(h)} - \sum_r^{H-1} \frac{T_{z+r} - t_{z+r-1}}{Y(h+r)}}{V} Y(h) \quad (5)$$

2.2.2. 总配送成本分析

(1) 固定成本: 冷链车辆相对于传统的配送车辆多了冷藏和冷冻的储存环境, 因此其固定成本相对较高, 固定成本 C_1 主要与员工工资、车辆折旧及日常维修等费用有关, 并且与动用的车辆数量成正比。动用的冷链车辆总固定成本如下:

$$C_1 = \sum_{k=1}^k y_k p_1 \quad (6)$$

(2) 运输成本: 冷链运输成本 C_2 主要由冷藏车的燃料消耗所决定, 并且通常认为冷藏车辆运输成本与行驶距离两者之间呈正比, 配送距离越长, 运输成本也就越高, 因此, 运输成本 C_2 可表示为:

$$C_2 = \sum_{j \in D} \sum_{l=0}^M \sum_{m=0}^M \sum_{k=1}^N x_{lmj}^k p_2 d_{lm} \quad (7)$$

(3) 制冷成本: 制冷成本 C_3 是冷链物流区别于传统物流配送的重要因素, 一般来说, 由于生鲜产品对于环境的要求较之一般货物更加严格, 因此选用具有冷藏或冷冻功能的车辆进行配送, 而在配送或称中车辆的制冷成本可以分为两部分, 分别是行驶过程中的制冷成本和卸货过程中的制冷成本。在行驶过程中, 车辆需要将车内环境保持低温状态, 这会产生制冷成本, 而在完成最后的客户节点配送后, 制冷机组关闭, 然后空载返回配送中心。因此, 这部分制冷成本表示为:

$$C_{31} = \sum_{j \in D} \sum_{l=0}^M \sum_{m=0}^M \sum_{k=1}^N x_{lmj}^k p_{31} (t_m^A - t_l^L) - x_{lmj}^k p_{31} (t_0^A - t_l^L) \quad (8)$$

卸货过程中, 由于车门在此期间一直打开, 内外温差突然增大, 为了维持低温状态, 需要提高制冷效果, 从而增加了制冷成本。这部分制冷成本可表示为:

$$C_{32} = \sum_{j \in D} \sum_{m=0}^M \sum_{k=1}^N y_{mj}^k p_{32} T^* \quad (9)$$

综上所述, 总制冷成本 C_3 表示为:

$$C_3 = \sum_{j \in D} \left[\sum_{l=0}^M \sum_{m=0}^M \sum_{k=1}^N x_{lmj}^k p_{31} (t_m^A - t_l^L) - x_{lmj}^k p_{31} (t_0^A - t_l^L) + \sum_{m=0}^M \sum_{k=1}^N y_{mj}^k p_{32} T^* \right] \quad (10)$$

(4) 货损成本: 一般来说, 冷链物流车运输的生鲜产品在低温下保持新鲜, 但流通过程中会因挤压、腐烂等因素导致生鲜产品的品质会随着时间推移发生变化。与制冷成本一样, 配送过程中的货损成本由运输过程中的货损成本和卸货过程中的货损成本两部分组成。配送过程中的货损成本可表示为:

$$C_{41} = \sum_{j \in D} \sum_{l=0}^M \sum_{m=0}^M \sum_{k=1}^N x_{lmj}^k p_4 q_l^L \left(1 - e^{-a_l(t_m^A - t_l^L)} \right) \quad (11)$$

在卸货过程中, 由于需要打开车门进行卸货操作, 此时外来因素的影响对于产品的新鲜度对比配送过程中更大, 产品的新鲜度会衰减得更加厉害, 因此, 卸货过程中的新鲜度衰减系数 α_2 会大于配送过程中的新鲜度衰减系数 α_1 , 此时卸货过程中的货损成本可表示为:

$$C_{42} = \sum_{j \in D} \sum_{l=1}^M x_{lmj}^k p_4 q_l^L (1 - e^{-\alpha_2 T^*}) \quad (12)$$

因此, 总货损成本 C_4 表示为:

$$C_4 = \sum_{j \in D} \left[\sum_{l=0}^M \sum_{m=0}^M \sum_{k=1}^N x_{lmj}^k p_4 q_l^L \left(1 - e^{-\alpha_1 (t_m^A - t_l^L)} \right) + x_{lmj}^k p_4 q_l^L (1 - e^{-\alpha_2 T^*}) \right] \quad (13)$$

(5) 碳排放成本: 在冷链物流配送路径优化问题中, 碳排放成本主要包含两个部分, 分别是运输过程中汽车消耗燃料产生的二氧化碳以及制冷过程中为提供货物所需的低温环境所产生的二氧化碳。其中, 运输车辆的燃料消耗由货物重量、行驶距离和行驶速度决定, 公式如下:

$$E_1(q_{lm}) = \frac{\varepsilon_m - \varepsilon_o}{q_M} q_{lm} + \varepsilon_o \quad (14)$$

通过公式(13)将运输过程中汽车消耗燃料产生的碳排放成本表示如下:

$$C_{51} = p_5 \sum_{j \in D} \sum_{l=1}^M x_{lmj}^k d_{ij} E_1(q_{lm}) \quad (15)$$

制冷过程中为提供货物所需的低温环境所产生的碳排放成本为:

$$C_{52} = p_5 \sigma E_2 \sum_{j \in D} \left[\sum_{l=0}^M \sum_{m=0}^M \sum_{k=1}^N x_{lmj}^k p_4 q_l^L \left(1 - e^{-\alpha_1 (t_m^A - t_l^L)} \right) + x_{lmj}^k p_4 q_l^L (1 - e^{-\alpha_2 T^*}) \right] \quad (16)$$

总碳排放成本表示如下:

$$C_5 = p_5 \sigma E_2 \sum_{j \in D} \left[\sum_{l=0}^M \sum_{m=0}^M \sum_{k=1}^N x_{lmj}^k p_4 q_l^L \left(1 - e^{-\alpha_1 (t_m^A - t_l^L)} \right) + x_{lmj}^k p_4 q_l^L (1 - e^{-\alpha_2 T^*}) \right] + p_5 \sigma \sum_{j \in D} \sum_{l=1}^M x_{lmj}^k d_{ij} E_1(q_{lm}) \quad (17)$$

(6) 惩罚成本: 惩罚成本是指在对配送任务中由于配送车辆未能在客户所期望的时间范围内完成配送任务而导致产生的成本, 其目的是将路径优化中的约束违转化可量化的经济代价, 生成总成本最优的可行方案。本研究采用软时间窗作为惩罚成本的依据。在软时间窗中, 如果车辆能够在客户节点所期望的时间范围 $[ET, LT]$ 内到达并完成对客户的配送任务, 则此次配送任务无惩罚成本; 若是车辆无法在要求的服务时间范围内到达并完成配送任务, 则将根据违反服务时间窗的时间长短来进行惩罚。软时间窗的惩罚函数公式如下所示:

$$F(t_l^A) = \begin{cases} a_1 (ET_l - t_m^A), t_l^A < ET_l \\ 0, ET_l \leq t_l^A \leq LT_l \\ a_2 (t_l^A - LT_l), t_l^A > LT_l \end{cases} \quad (18)$$

总惩罚成本表示如下:

$$C_6 = \sum_{l=1}^M F(t_l^A) \quad (19)$$

综上, 根据行程时间分析和成本分析, 将上述各项成本进行加和并使得总成本最小化, 构建以总成本最小为目标的 VRP 模型:

$$\min C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6 \quad (20)$$

约束条件:

$$\sum_{l=0}^M \sum_{m=0}^M \sum_{k=1}^N x_{lmj}^k = \sum_{j=1}^N y_{lj}^k = 1; m \in N, j \in D \quad (21)$$

表示每个客户节点只能由一个配送中心出发的一辆车进行一次服务配送;

$$\sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^N q_l y_{lj}^k \leq q_M \quad (22)$$

表示车辆一次配送的货物量要满足其最大载重量的约束;

$$\sum_{l=0}^M \sum_{m=0}^M \sum_{k=1}^N x_{lmj}^k = \sum_{l=0}^M \sum_{m=0}^M \sum_{k=1}^N x_{m0j}^k \leq 1, l = 0 \quad (23)$$

表示保证每辆车的起始节点以及最终节点都是原冷链配送中心;

$$\sum_{l=0}^M \sum_{m=0}^M \sum_{k=1}^N x_{lmj}^k - \sum_{l=0}^M \sum_{m=0}^M \sum_{k=1}^N x_{m0j}^k = 0 \quad (24)$$

表示每辆车到达节点 m 后必须离开 m , $m \neq 0$

$$\sum_{l=1}^M (q_l^A - q_l^L) = q_l \quad (25)$$

表示在服务完节点 l 后的减载量为节点 l 的需求量

$$\sum_{j \in D} \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^N y_{mj}^k = N \quad (26)$$

表示被选中的多个冷链配送中心为 N 个客户节点进行配送服务。

3. 算法求解

3.1. 算法核心设计

本文所提出的考虑交通拥堵与碳排放影响的城市生鲜冷链物流路径优化问题是传统 VRP 问题的延展, 属于 NP-hard 问题, 采用精确算法难以求解, 因此本文提出混合元启发式算法人工鱼群灰狼混合优化算法(AFSA-GWO)进行求解, 旨在获得总成本更低、鲁棒性更强的配送路径。

该算法前期以人工鱼群算法的并行搜索为主, 融合人工鱼群算法的强全局探索能力, 以维持种群多样性, 避免早熟收敛; 中后期引入灰狼算法的精英引导策略(社会层级与捕食策略)嵌入 AFSA 的群体行为框架(聚群、追尾、觅食)中, 当检测到公告板在连续多次迭代无明显变化, 便会触发 GWO 的精英引导策略, 驱使种群向全局最优区域稳健收敛, 从而深度优化求解复杂路径方案。

3.2. 算法求解模型实现步骤

GWO-AFSA 混合算法求解模型图 1, 具体步骤如下:

在模型中输入参数和数据。如消费者的坐标、需求和时间窗以及车辆的容量和车速等; 如最大迭代次数、公告板上不变或极小变化的阈值、人工鱼的数量、步长、视野、迭代次等。

初始化人工鱼, 生成高质量初始解。

初始化公告板, 用于记录每个人工鱼的初始解, 取最优人工鱼状态及其值赋予公告板。

对每一条“鱼”(即路径方案)进行迭代优化, 对每一条人工鱼都进行行为模拟: 觅食、追尾、聚群与随机移动行为, 选取其中最优的一种行为来操作。

将各个人工鱼迭代后所得最新结果与之前公告板的状态相比较, 若自身状态优于原公告板, 则并将较小的状态记录在公告板上更新公告板。

检查公告板改善情况, 若在多次迭代后, 公告板无变化或变化极小, 且当前迭代次数已达到最大迭

代次数阈值，则引入灰狼算法进行步骤 7；否则，进行步骤 8。

利用灰狼算法的社会层级和捕食策略跳出停滞。

判断 gen 是否达到最大迭代次数 $MAXGEN$ 。若达到了最大迭代次数，则输出公告板上最优解；否则，则继续重复步骤 4~6，直到迭代次数 gen 达到最大迭代次数 $MAXGEN$ ，届时输出公告板上的全局最优解。

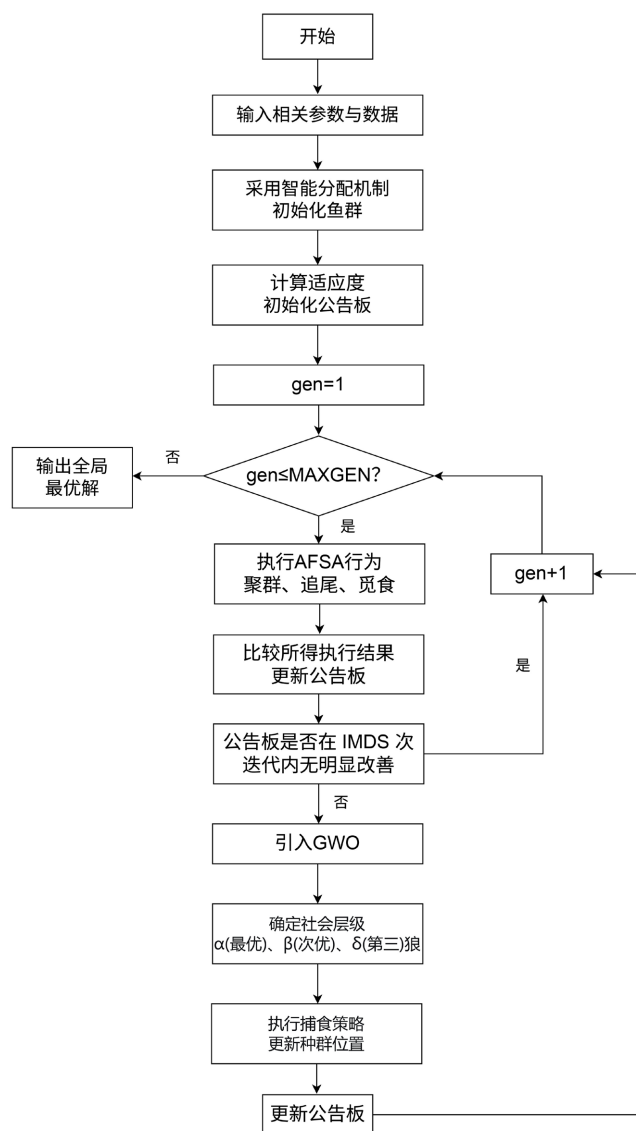


Figure 1. Algorithm step flow

图 1. 算法步骤流程

4. 算例分析

Z 市某大型电商生鲜企业在 Z 市内拥有 4 家冷链配送中心以及多个客户节点。本研究将其 4 家冷链配送中心以及 50 个日采客户节点作为算例样本，从早上 6:00 开始从各配送中心出发。其中“I-IV”代表冷链配送中心见表 2 所示；“1~50”代表需要提供服务的客户节点，见表 3。假设拥有足够的冷藏车，且都是同一型号的冷藏车，车辆容量、品质、自重及最大负荷相同，冷藏车的相关参数见表 4，模型相关参数见表 5。

Table 2. Cold chain distribution center, costs, and capacity**表 2.** 冷链配送中心、成本及容量

编号	经度	纬度	固定成本/元	容量/kg
I	121.227	31.03	3000	2000
II	121.25	31.383	3500	2200
III	121.474	30.912	3400	2300
IV	121.489	31.398	3100	2100

Table 3. Node coordinates, demand, time windows, and service times**表 3.** 节点坐标、需求量、时间窗及服务时间

编号	经度	纬度	需求量/kg	服务时间/h	时间窗上限	时间窗下限
1	120.91060543241407	30.844930169444837	119	0.2	8:00	12:00
2	120.95951342323625	30.898786586718334	182	0.2	8:00	12:00
3	120.92459840071112	31.073617122531633	175	0.2	10:00	14:00
4	120.93665707736821	31.222362197542356	219	0.2	13:00	17:00
5	120.87633052918711	31.267993018145493	219	0.2	8:00	12:00
6	120.90440606730013	31.4676063944322	171	0.2	13:00	17:00
7	120.87382618891075	31.597272008376134	121	0.2	15:00	19:00
8	120.89603797568589	31.730168212629046	251	0.2	16:00	20:00
9	121.09485249374009	30.857145763028957	173	0.2	14:00	18:00
10	121.14255784336197	30.900072715204896	124	0.2	13:00	17:00
11	121.12323266373444	31.10670371968426	117	0.2	9:00	13:00
12	121.12846035910455	31.140468553551	252	0.2	13:00	17:00
13	121.11433102143472	31.262899684331547	151	0.2	10:00	14:00
14	121.05904137726134	31.40142154801716	166	0.2	10:00	14:00
15	121.08428166392918	31.604581325798712	202	0.2	12:00	16:00
16	121.07841394095767	31.731201571635673	189	0.2	9:00	13:00
17	121.27001960903253	30.809948161723632	154	0.2	11:00	15:00
18	121.22819422907257	30.891009473626994	234	0.2	15:00	19:00
19	121.30979813159135	31.019504299012546	202	0.2	12:00	16:00
20	121.25223851301234	31.233748950051215	143	0.2	16:00	20:00
21	121.27532302157873	31.33016079249451	245	0.2	9:00	13:00
22	121.24135329484761	31.474726870158424	238	0.2	16:00	20:00
23	121.30798620065816	31.53944050435241	105	0.2	11:00	15:00
24	121.21891539889538	31.735201475881937	261	0.2	15:00	19:00
25	121.45033756951649	30.81169402253735	193	0.2	14:00	18:00
26	121.47224245543772	30.98523729162833	269	0.2	14:00	18:00
27	121.43786668232202	31.041419009523636	167	0.2	12:00	16:00
28	121.46313574264319	31.18855925894775	102	0.2	8:00	12:00
29	121.4682793214043	31.290179229312727	105	0.2	10:00	14:00
30	121.36149997840245	31.439402987468544	234	0.2	9:00	13:00

续表

31	121.46740960854035	31.562774804107153	192	0.2	15:00	19:00
32	121.42919858620076	31.696467701387114	159	0.2	8:00	12:00
33	121.61464138718291	30.82283206795918	108	0.2	9:00	13:00
34	121.61180488465516	30.938041649052728	129	0.2	16:00	20:00
35	121.62307942508737	31.10331270017285	186	0.2	13:00	17:00
36	121.59706623616313	31.171907507306972	245	0.2	12:00	16:00
37	121.60097247196856	31.314764674266428	164	0.2	14:00	18:00
38	121.62752068746907	31.4686122863992	272	0.2	10:00	14:00
39	121.63274590477236	31.582998737731337	257	0.2	9:00	13:00
40	121.61569048973257	31.711451423836035	117	0.2	10:00	14:00
41	121.68141009364275	30.766437969880048	182	0.2	13:00	17:00
42	121.70156578161942	30.899205666908667	209	0.2	13:00	17:00
43	121.68511365582897	31.02535959174306	164	0.2	8:00	12:00
44	121.71773936127784	31.149579334227816	118	0.2	11:00	15:00
45	121.76686727374266	31.3533593737971	205	0.2	16:00	20:00
46	121.78170650122773	31.42000617622322	116	0.2	12:00	16:00
47	121.76870094781276	31.582042349954804	218	0.2	9:00	13:00
48	121.68536918023821	31.68523280988552	278	0.2	12:00	16:00
49	121.92662392333688	30.806597646976204	147	0.2	13:00	17:00
50	121.9226055057504	30.96505846514575	256	0.2	12:00	16:00

Table 4. Related parameters of refrigerated truck
表 4. 冷藏车相关参数

参数	数值	参数	数值
车辆重量	5400 公斤	空载燃料消耗	16 升/100 公里
最大负载能力	4000 公斤	满载燃料消耗	20 升/100 公里
燃料类型	柴油	制冷机组额定功率	18 千瓦

Table 5. Model-related parameters
表 5. 模型相关参数

参数	数值	参数	数值
V	50 公里/h	E_2	0.0025 L/t 或 km
p_1	200 元/辆	σ	2.61 kg
p_2	0.5 元/公里	ε_0	0.165 L/km
p_{31}	15 元/h	ε_m	0.255 L/km
p_{32}	20 元/h	a_1	30 元/h
p_4	30 元/公斤	a_2	60 元/h
α_1	0.03	E_2	0.0025 L/t 或 km
α_2	0.06	σ	2.61 kg
p_4	2 元/公斤		

4.1. 模型求解

4.1.1. 原始路径

该生鲜公司的配送路线并没有专门的规划，而是以司机为主导进行路线的决策，其原始配送路线见表 6 与图 2：

Table 6. Original delivery route information table
表 6. 原始配送路线信息表

配送路线			配送路线		
配送中心I	车辆 1	I-14-22-13-12-I	配送中心III	车辆 1	III-8-9-11-18-17-III
	车辆 2	I-7-6-23-19-21-I		车辆 2	III-10-1-2-0-III
	车辆 3	I-4-15-20-29-I		车辆 3	IV-40-26-49-34-IV
	车辆 4	I-3-5-I		车辆 4	IV-33-25-24-IV
配送中心II	车辆 1	II-38-31-27-46-II	配送中心IV	车辆 1	IV-42-32-16-43-IV
	车辆 2	II-37-28-39-35-II		车辆 2	IV-41-48-IV
	车辆 3	II-36-44-30-II		车辆 3	III-8-9-11-18-17-III
	车辆 4	II-45-47-II		车辆 4	III-10-1-2-0-III

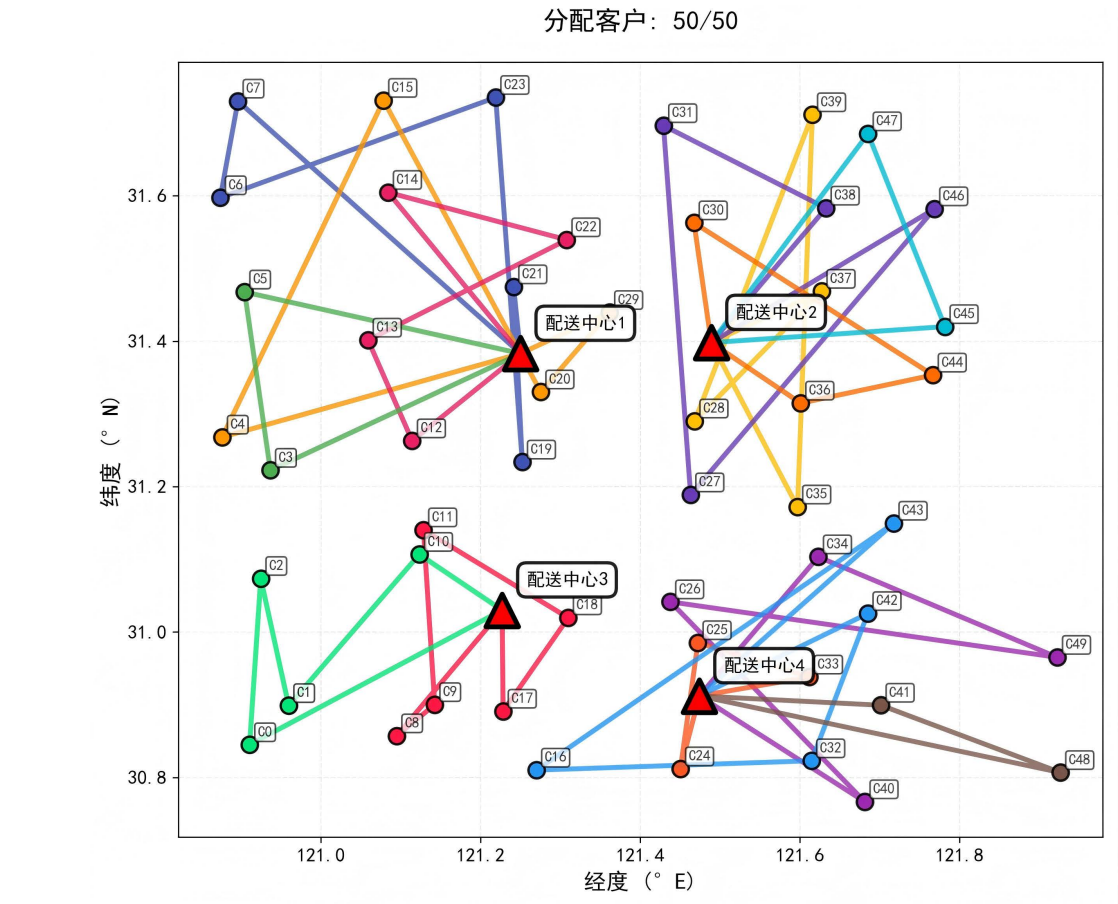


Figure 2. Original path map
图 2. 原始路径图

4.1.2. 优化后情况

本文基于人工鱼群灰狼算法来对模型进行求解为了得到较好的解，经过前期测试，将最大迭代次数设置为 200 次，人工鱼群数 30 条，最多尝试次数 5 次，拥挤因子为 0.6，视野范围为 65，步长为 20，触发灰狼算法的最大不变迭代次数阈值为 5。本文通过 Python 2022.1.3 软件仿真实现模型，从而验证模型的有效性。其优化后的配送路线见表 7 与图 3：

Table 7. Optimized distribution route information
表 7. 优化后的配送路线信息表

配送路线			配送路线		
配送中心I	车辆 1	I-29-20-12-4-13-15-I	配送中心III	车辆 1	III-10-2-0-1-III
	车辆 2	I-22-23-14-6-5-3-I		车辆 2	III-8-17-11-III
	车辆 3	I-19-21-17-I		车辆 3	III-18-9-III
配送中心II	车辆 1	II-27-28-37-46-38-31-II	配送中心IV	车辆 1	IV-48-40-41-34-25-24-IV
	车辆 2	II-35-36-44-45-47-39-30-II		车辆 2	IV-49-43-42-33-32-26-16-IV

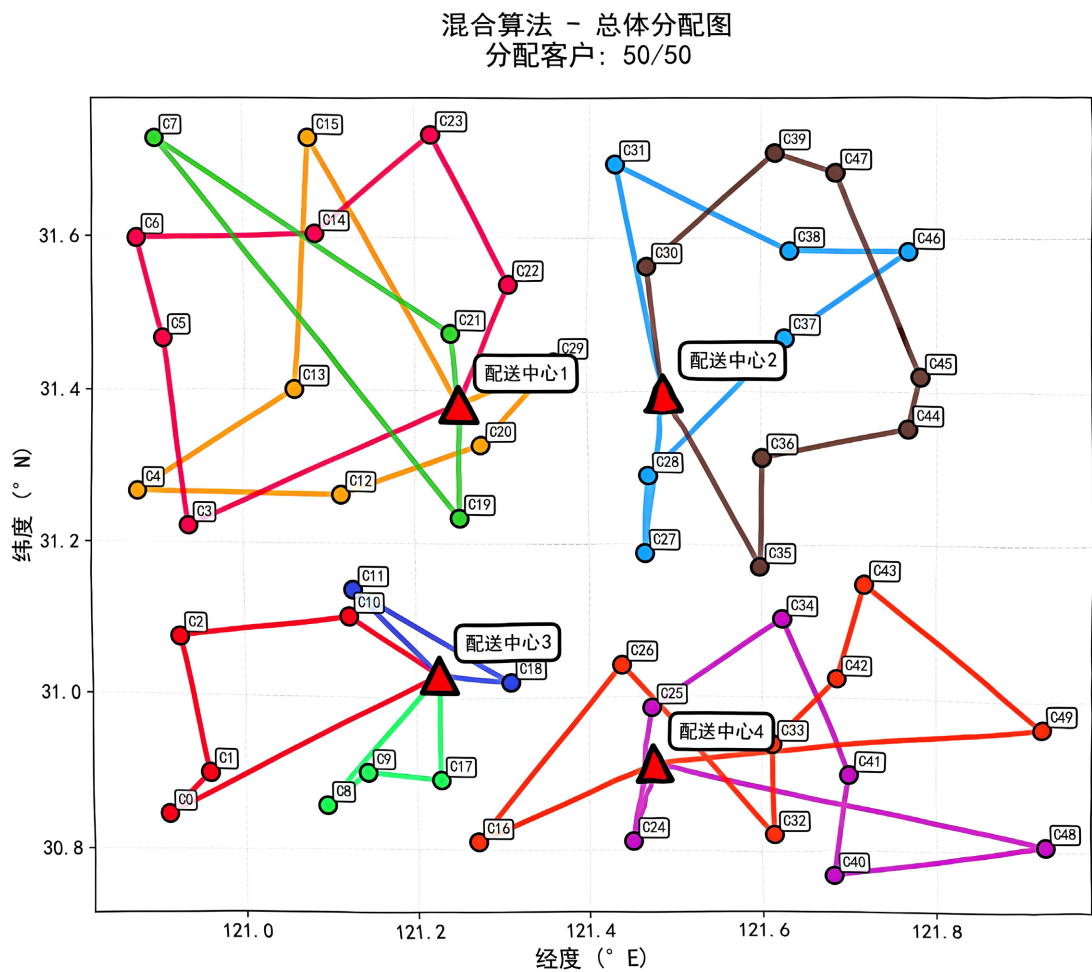


Figure 3. Path map optimized by the artificial fish swarm and gray wolf hybrid algorithm
图 3. 人工鱼群灰狼混合算法优化后的路径图

4.2. 结果分析

由图 4 可知随着迭代次数的增加, 优化后的目标函数值逐渐降低, 迭代约 55 次后达到稳定不变状态, 取得最优解, 此时成本为 7451.35 元。

由表 8 可知, 在考虑交通拥堵与碳排放的前提下, 通过人工鱼群灰狼算法优化后求得的配送总成本为 7451.35 元, 对比原始配送路线虽然在惩罚成本方面成本提高了较多, 但是在固定成本、运输成本、制冷成本、货损成本以及碳排放成本上都有了明显的降低, 使得优化过后进行配送的总成本对比原始配送路线进行配送的总成本降低约 26.66%。综合来看, 通过人工鱼群灰狼算法优化过后的路径配送能够大大降低配送过程中的成本, 有利于为企业的成本控制提供更优的解决方案。

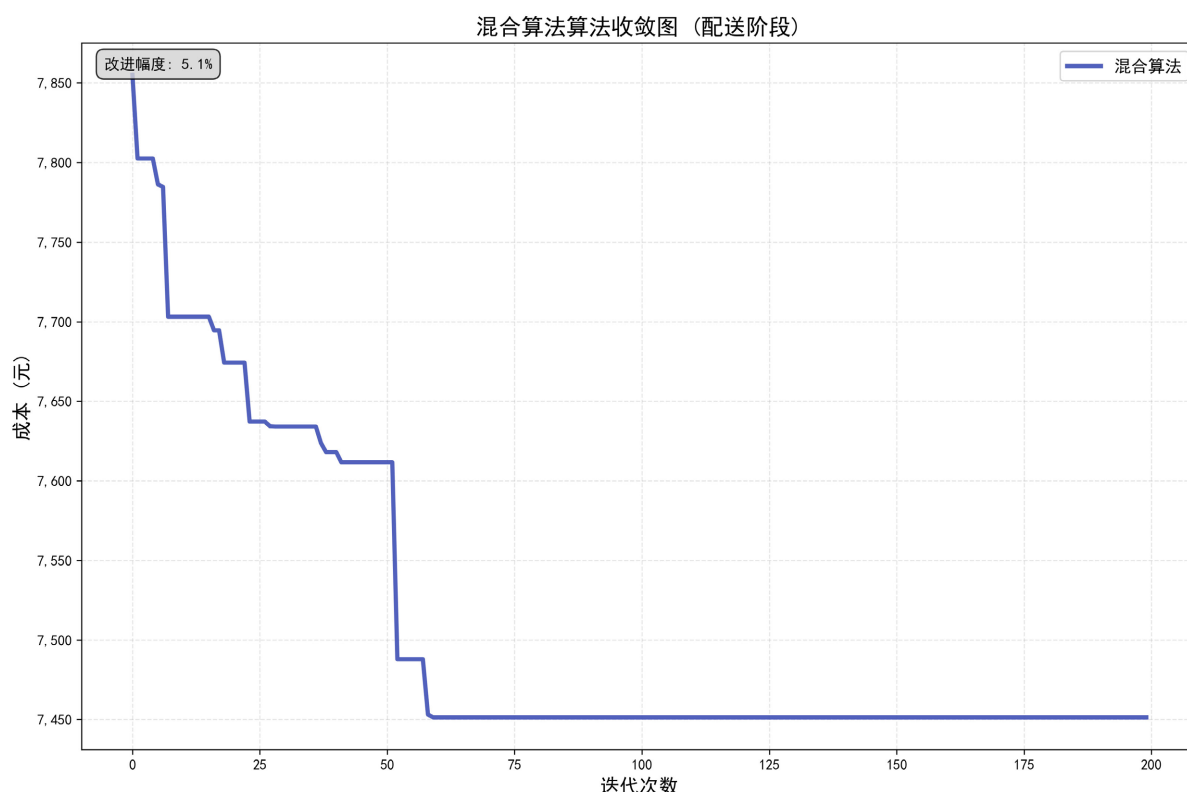


Figure 4. Convergence flowchart of the artificial fish swarm gray wolf algorithm

图 4. 人工鱼群灰狼算法收敛流程图

Table 8. Cost comparison of two routes

表 8. 两种路线成本对比

	车辆数量/ 辆	总成本/ 元	固定成本/ 元	运输成本/ 元	制冷成本/ 元	货损成本/ 元	碳排放成本/ 元	惩罚成本/ 元
原始配送路线	14	9437.70	2800.00	4119.21	588.33	342.84	1509.41	77.92
优化后的配送路线	10	7451.35	2000.00	2983.84	478.33	293.53	1093.66	602.00

5. 结语

本文针对目前城市交通拥堵日益严重的客观现实, 构建了 Z 市的城市交通拥堵指数模型, 在考虑碳排放以及其他因素约束下, 将交通拥堵指数引入模型当中, 以成本最低为最优目标, 使得路径优化模型

更加贴近于现实，再通过设计的人工鱼群灰狼混合算法对模型进行求解，最后以 Z 市某大型电商生鲜企业拥有的冷链配送中心为例进行分析，验证了模型及算法的有效性。通过对比求解结果和该企业的现有配送方案，优化过后的路径在总成本上对比原配送路径总成本降低了约 26.66%，证明了本文考虑交通拥堵与碳排放影响的电商生鲜冷链物流路径优化模型和人工鱼群灰狼混合优化算法的可行性，对电商企业未来的冷链配送优化有一定的参考意义。

参考文献

- [1] Amorim, P. and Almada-Lobo, B. (2014) The Impact of Food Perishability Issues in the Vehicle Routing Problem. *Computers & Industrial Engineering*, **67**, 223-233. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2013.11.006>
- [2] Esmizadeh, Y., Bashiri, M., Jahani, H. and Almada-Lobo, B. (2021) Cold Chain Management in Hierarchical Operational Hub Networks. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **147**, Article ID: 102202. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.102202>
- [3] 轩苗苗. 基于改进遗传算法的冷链物流配送路径优化研究[D]: [硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2025.
- [4] 马佳, 李楚连, 李桐言. 考虑新鲜度的生鲜冷链物流同时取送货车辆路径及求解算法[J]. *包装工程*, 2025, **46**(13): 269-279.
- [5] 葛显龙, 冉小芬. 考虑时变交通拥堵的污染路径优化研究[J]. *工业工程与管理*, 2020, **25**(3): 75-85, 93.
- [6] 胡熙. 时变路网下冷链物流的绿色车辆路径优化[J]. *物流工程与管理*, 2024, **46**(12): 42-45.
- [7] 王一婕. 时变路网下 W 企业生鲜农产品冷链配送路径优化研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连交通大学, 2025.
- [8] 宁涛, 苟涛, 刘向东. 考虑低碳约束的生鲜农产品冷链物流策略仿真研究[J]. *系统仿真学报*, 2022, **34**(4): 797-805.
- [9] 罗瑞, 王展青. 基于碳排放和分类用户满意度的冷链物流路径优化[J]. *武汉理工大学学报*, 2022, **44**(1): 100-108.
- [10] 于惠也. 基于碳交易和客户满意度的冷链物流配送路径优化研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连交通大学, 2025.
- [11] 孙翊航. 考虑拥堵与低碳的冷链物流车辆路径问题研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 河南工业大学, 2022.