

基于客户满意度的低碳冷链多式联运路径优化

孟建军^{1,2,3}, 石坤¹, 刘亚彤¹, 李德仓^{1,2,3}, 姜泰华¹, 蒋小一¹, 刘潇¹

(1.兰州交通大学 机电技术研究所, 兰州 730070; 2.甘肃省物流及运输装备信息化工程技术研究中心, 兰州 730070; 3.甘肃省物流与运输装备行业技术中心, 兰州 730070)

摘要: **目的** 实现生鲜产品的高效配送, 尽可能提高客户满意度。**方法** 分析多式联运和冷链物流的特点, 选择最优物流路径。在路径选择模型的建立中, 结合客户对生鲜产品的质量及到货时间的满意程度, 引入顾客满意度参数。同时响应国家“碳中和”政策的号召, 在模型构建中考虑了低碳策略, 以总成本最小、客户满意度最大为目标函数。以 15 个枢纽城市及公路、铁路、水路 3 种方式的冷链运输为例, 将目前较新的帝企鹅算法与传统的启发式算法(遗传算法、粒子群算法)进行对比, 并针对转运时间进行灵敏度分析。**结果** 最优联运路线对应的客户满意度为 0.96, 转运时间的增加导致总成本上升、客户满意度下降和最优路径发生变化。**结论** 帝企鹅算法在求解多式联运问题上具有较好的收敛速度和收敛精度, 为多式联运承运人的决策提供了依据。转运时间的波动导致适应度函数发生变化, 因此在兼顾客户满意度的前提下, 选择合适的运输方式和路径, 减少非必要的转运。

关键词: 多式联运; 冷链物流; 客户满意度; 帝企鹅优化算法; 路径优化

中图分类号: TB485.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3563(2024)13-0268-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.13.031

Multimodal Transport Path Optimization of Low-carbon Cold Chain Based on Customer Satisfaction

MENG Jianjun^{1,2,3}, SHI Kun¹, LIU Yatong¹, LI Decang^{1,2,3}, JIANG Taihua¹, JIANG Xiaoyi¹, LIU Xiao¹

(1. Mechatronics T & R Institute, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Gansu Provincial Engineering Technology Center for Informatization of Logistics & Transport Equipment, Lanzhou 730070, China; 3. Gansu Provincial Industry Technology Center of Logistics & Transport Equipment, Lanzhou 730070, China)

ABSTRACT: The work aims to achieve the efficient distribution of fresh products, so as to improve customer satisfaction as much as possible. The characteristics of multimodal transport and cold chain logistics were analyzed to select the optimal logistics path. In the establishment of the path selection model, customer satisfaction was introduced as a parameter based on customer satisfaction with the quality and arrival time of fresh products. At the same time, in response to the national "carbon neutrality" policy call, consideration was given to the model construction. A low-carbon policy was adopted, with the objective function of minimizing total cost and maximizing customer satisfaction. With the cold chain transport of 15 node cities and three transport modes of highway, railway and water as an example, the relatively new Emperor Penguin Optimizer was compared with the traditional classic heuristic algorithm (Genetic Algorithm, Particle Swarm Algorithm) and the sensitivity analysis was conducted on the parameter of transshipment time. The customer satisfaction corresponding to the optimal intermodal path was 0.96 and the increase in transshipment time would lead to an increase in total costs, a decrease in customer satisfaction, and a change in the optimal path. The Emperor

Penguin Optimizer has good convergence speed and convergence accuracy in solving multimodal transport problems, which provides a basis for the decision-making of multimodal transport carriers. The fluctuation of transshipment time can lead to changes in the fitness function value, so it is crucial to choose the appropriate transport method and route while considering customer satisfaction, and reduce unnecessary transshipment.

KEY WORDS: multimodal transport; cold chain logistics; customer satisfaction; Emperor Penguin Optimizer; path optimization

随着中国经济的迅猛发展, 生鲜产品的需求逐年增加。在 2016—2022 年, 我国冷链物流市场规模稳步增加。截至 2022 年底, 中国冷链物流市场规模已达 4 916 亿元^[1], 增速保持在 10%~20%。预计到 2025 年, 我国冷链市场物流总量将达到 4.5 亿 t, 年均复合增长率约为 12%^[2]。由于我国冷链产业整体处于起步阶段, 因此冷链物流市场供远小于求^[3]。

现阶段, 针对冷链物流, 大多数学者的研究集中于冷链物流配送中心选址和车辆路径优化问题。Calvete 等^[3]构建了基于进化算法的两层优化模型, 以解决供应地和配送中心双决策主体的选址问题。Marinakos^[4]在需求不确定的情况下, 针对无容量限制、多目标配送的分配枢纽站选址问题进行了研究分析, 提高了选址模型的鲁棒性。赵泉午等^[5]建立了一种综合考虑多个生鲜新零售特征的模型, 包括门店选址布局、覆盖范围、冷链设施配置和冷藏品类选择, 并采用混合拉格朗日松弛算法求解。在冷链配送中心地址确定的情况下, 部分学者考虑了多种实际情况, 对车辆配送路径优化模型进行了研究。Chen 等^[6]提出了一种带时间窗的冷链运输车辆路径非线性数学模型, 并设计了启发式算法求解该模型。潘茜茜等^[7]在普通冷链物流配送中引入了碳排放指标, 形成了一个考虑碳排放成本的冷链物流配送路径优化模型。闵德权等^[8]在研究冷链配送路径问题时, 考虑了道路坡度对油耗和碳排放的影响, 使配送模型更贴近实际路网。

根据国务院办公厅印发的《关于推进多式联运发展优化调整运输结构工作实施方案(2021—2025 年)》, 到 2025 年, 我国铁-水多式联运货运量相较于 2020 年将实现年均 15% 的增长。在多式联运蓬勃发展的背景下, 冷链物流也应该创新组织模式, 改变过去以公路运输为主的现状, 推动冷链物流多式联运发展^[9]。考虑生鲜产品在运输过程中的易腐性、时效性, 在冷链多式联运方式选择上, 针对不同运输方式的优缺点进行合理的挑选和组合十分必要。相较于冷链配送, 当前针对冷链多式联运路径方面的研究较少。黄虹等^[9]提出了一种公铁联运背景下的多温蓄冷箱全程冷链集配模式, 为冷链运输主体提供了新的思路。王嘉玥^[10]研究了碳排放限制下的中欧冷链多式联运方案优化, 同时构建了单目标和多目标优化模型。张珂一等^[11]在冷链多式联运模型构建中考虑了时间窗约束, 但未考虑碳排放和货物品质变化的情况。

李玉民等^[12]提出一种将高铁作为运输方式, 并参与到冷链多式联运中的模型, 但依然未考虑客户满意度和碳排放。

综上所述, 当前国内外学者针对冷链物流的研究多集中于末端配送环节, 将冷链物流与多式联运问题相结合的研究相对较少, 并且在构建模型时考虑的因素也不够全面。同时, 在解决多式联运路径优化问题过程中, 大多数学者采取经典启发式算法^[13-16]。主流启发式算法包括遗传算法(Genetic Algorithm, GA)、粒子群算法(Particle Swarm Algorithm, PSO)、蚁群算法、模拟退火算法等。在解决 NP-hard 问题时, 采用遗传算法的全局搜索能力较强, 但存在对参数敏感、收敛速度较慢等缺点; 采用粒子群算法具有便于理解、收敛速度快等优点, 但容易陷入局部最优^[17]。相比之下, 目前较新的帝企鹅优化算法^[18](Emperor Penguin Optimizer, EPO) 简单易懂, 在保证搜索能力的前提下具有较好的收敛速度和精度。由此, 本文在分析联运成本、冷链成本, 以及客户对生鲜产品的时间和品质满意程度等要素后, 考虑运输中的碳排放, 建立一种以总成本最小、客户满意度最大为目标函数的数学模型, 并引入实例, 采用帝企鹅优化算法, 得到总成本和客户满意度均较理想的结果, 还针对转运时间进行灵敏度分析。

1 问题的描述与假设

本文讨论的冷链多式联运路径优化问题的目标是使总成本(包括运输成本、转运成本、碳排放成本、制冷成本)最低, 同时使得客户满意度(包括生鲜产品品质满意度和时间满意度)最大。决策者需要在保证客户满意度和最低成本的前提下, 选择合适的运输路径和运输方式, 这里做出如下假设。

- 1) 货物的运输路径为单向、无环。
- 2) 在同一转运节点, 货物仅可转运 1 次。
- 3) 在运输过程中, 速度、制冷温度恒定。
- 4) 在货物运输过程中, 不能分散运输。

2 模型的构建

2.1 参数设计

模型参数的设计如表 1 所示。

表 1 模型参数设计
Tab.1 Design of model parameters

参数符号	参数含义
Z	总成本与客户满意度的比值
M	运输节点集合
T	转运节点集合
K	运输方式集合
Q	货物总量
C_{ij}^k	从节点 i 到节点 j 采取运输方式 k 产生的单位运输成本, 元/(kg·km)
C_R	运输过程中的单位制冷费用, 元/(kg·h)
e_{ij}^k	从节点 i 到节点 j 采取运输方式 k 产生的单位碳排放量, kg/km
e	制冷设备的单位碳排放量, kg/(kg·h)
v_{ij}^k	从节点 i 到节点 j 采取运输方式 k 的运输速度
$t_i^{kk'}$	在节点 i 由运输方式 k 转为 k' 的转运时间
$C_i^{kk'}$	在节点 i 由运输方式 k 转为 k' 产生的单位转运费用
$C_{R'}$	转运过程中的单位制冷费用, 元/(kg·h)
r_{co2}	单位碳税, 元/kg
$e_i^{kk'}$	单位货物在节点 i 由运输方式 k 转为 k' 产生的碳排放量, kg/kg
s_{ij}^k	从节点 i 到节点 j 采取运输方式 k 的运输距离
t_{ij}^k	从节点 i 到节点 j 采取运输方式 k 的运输时间
S_Q	客户品质满意度
S_T	客户时间满意度
t	冷链产品从起始地到目的地耗费的总时间
x_{ij}^k	从节点 i 到节点 j 是否采用运输方式 k , 若是则该值取 1, 否则取 0
$x_i^{kk'}$	在节点 i 是否将运输方式由 k 转为 k' , 若是则该值取 1, 否则取 0

2.2 客户满意度

基于生鲜产品的易腐性, 客户接受到的产品与服务往往存在一定瑕疵, 因此客户对运输产品的满意程度可以直接体现冷链运输的水平。客户满意度包括生鲜产品品质满意度和时间满意度^[19-20], 满意度的范围为[0, 1]。采用品质满意度与时间窗满意度的乘积来表示本次运输作业中的顾客满意度。

2.2.1 品质满意度的计算

生鲜产品的保质期较短, 在运输过程中需要通过全程控温处理来延缓生鲜产品的腐败进程。随着运输时间的增加, 生鲜产品的品质逐渐降低, 客户对产品品质的满意度随之降低。Osvald 等^[21]认为, 生鲜产品的品质可分为有效质量和可见质量, 有效质量为产品本身的品质水平, 可见质量为产品表面呈现的品质水平。将 2 种质量随时间的变化视作线性函数, 生鲜质量与运输时间的关系如图 1 所示。

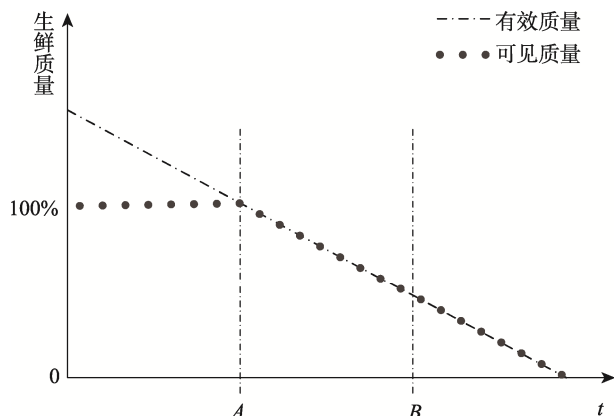


图 1 生鲜质量与运输时间的关系
Fig.1 Relationship between fresh product quality and transport time

由图 1 可知, 在时间点 A 之前, 有效质量已经开始下降, 但可见质量未发生改变, 客户对生鲜产品的满意度依然可视作 100%; 在时间点 B 之后, 尽管有效质量和可见质量均有剩余, 但是生鲜产品已经失去被客户选择的可能。可采取分段函数来表示不同到货时间的客户品质满意度见式 (1)。

$$S_Q = \begin{cases} 1 & t \leq t_1 \\ 1 - \frac{t - t_1}{t_2 - t_1} & t_1 \leq t \leq t_2 \\ 0 & t \geq t_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: t_1 、 t_2 分别为 A 点和 B 点对应的时间。

2.2.2 时间满意度的计算

当承运人对生鲜产品进行冷链运输时, 若货物提前到达, 则客户需要承担更多的仓储成本; 若延迟到达, 则客户需要承担更多的缺货成本。由此可见, 必须确保货物在规定时间内到达, 该时间范围即为运输时间窗。时间窗通常分为软时间窗、硬时间窗和混合时间窗^[22]。混合时间窗在实际问题中更为实用, 它允许运输时间存在提前或延后, 但需要付出一定的惩罚费用。其中, 货物最早到达时间为 $t_{\min}$, 最晚到达时间为 $t_{\max}$, t_l 和 t_u 表示时间满意度为 1 的时间窗上下限, 即 $[t_l, t_u]$ 为最佳服务时间窗, $[t_{\min}, t_{\max}]$ 为客户所能接受的最大服务时间范围, 超过这个范围则惩罚费用无穷大。这里将混合时间窗惩罚成本换算为客户时间满意度 S_T , 其函数表示为式 (2)。

$$S_T = \begin{cases} 0 & t \leq t_{\min} \\ 1 + \frac{t - T_l}{T_l - T_{\min}} & t_{\min} < t < t_l \\ 1 & t_l \leq t \leq t_u \\ 1 - \frac{t - T_u}{T_{\max} - T_u} & t_u < t < t_{\max} \\ 0 & t \geq t_{\max} \end{cases} \quad (2)$$

2.3 模型的建立

冷链多式联运方案要求在最小化相关成本的同时最大化客户满意度, 因此将各要素整合, 构建以下数学模型, 见式 (3) ~ (14)。

$$\min Z = \frac{C}{S} \quad (3)$$

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 \quad (4)$$

$$S = S_Q S_T \quad (5)$$

$$C_1 = \sum_{i,j \in M} \sum_{k \in K} C_{ij}^k Q_{ij}^k x_{ij}^k \quad (6)$$

$$C_2 = \sum_{i \in M} \sum_{k,k' \in K} C_i^{kk'} Q_{ii}^{kk'} x_i^{kk'} \quad (7)$$

$$C_3 = r_{co_2} \cdot (\sum_{i,j \in M} \sum_{k \in K} e_{ij}^k s_{ij}^k x_{ij}^k + \sum_{i \in M} \sum_{k,k' \in K} Q e_i^{kk'} x_i^{kk'} + Q_{et}) \quad (8)$$

$$C_4 = C_R \sum_{i,j \in M} \sum_{k \in K} Q_{ij}^k x_{ij}^k + C_{R'} \sum_{i \in M} \sum_{k,k' \in K} Q_{ii}^{kk'} x_i^{kk'} \quad (9)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{k \in K} x_{ij}^k \leq 1, \quad \forall i, j \in M \quad (10)$$

$$\sum_{k,k' \in K} x_i^{kk'} \leq 1, \quad \forall i \in M \quad (11)$$

$$\sum_{i,j \in M} \sum_{k \in K} t_{ij}^k x_{ij}^k + \sum_{i \in M} \sum_{k,k' \in K} t_i^{kk'} x_i^{kk'} = t \quad (12)$$

$$x_{i_0 i}^k + x_{ij}^{k'} \geq 2x_i^{kk'}, \quad \forall i_0, i, j \in M, \forall k, k' \in K \quad (13)$$

$$x_{ij}^k, x_i^{kk'} \in (0, 1) \quad (14)$$

式中: C_1 为运输成本; C_2 为转运成本; C_3 为碳排放成本; C_4 为制冷成本。

式 (3) 为目标函数, 表示总成本与客户满意度的比值最小。式 (5) 表示客户满意度等于时间满意度与品质满意度的乘积, 表示客户对冷链物流所提供服务的整体满意程度。式 (10) 表示相邻两节点之间只可采取 1 种运输方式。式 (11) 表示同一转运节点只能完成 1 次转运作业。式 (12) 表示各节点之间的运输时间和转运时间等于总时间。式 (13) 表示运输和转运的过程是连续的。式 (14) 表示 x_{ij}^k 、 $x_i^{kk'}$ 是 0-1 变量。

3 算法分析

帝企鹅优化算法 (EPO) 是由 Dhiman、Kumar^[18] 于 2018 年提出的一种智能优化算法, 其特点为参数少、收敛速度快。该算法模拟帝企鹅冬季抱团取暖现象, 群体中心温度最高的个体被视为最优个体, 其他个体向最优个体移动, 逐步达到最优。其迭代规则见式 (15)。

$$\overrightarrow{P_{ep}}(g+1) = \overrightarrow{P(g)} - \vec{A} \cdot \overrightarrow{D_{ep}} \quad (15)$$

式中: g 为当前迭代次数; $\overrightarrow{P(g)}$ 为当前最优个体位置; $\overrightarrow{D_{ep}}$ 为最优个体与当前个体之间的距离, 见式 (16)。

$$\overrightarrow{D_{ep}} = |S(\vec{A}) \cdot \overrightarrow{P(g)} - \vec{C} \cdot \overrightarrow{P_{ep}}(g)| \quad (16)$$

式中: $\overrightarrow{P_{ep}}(g)$ 为当前个体位置; S 为群体向最优方向移动的趋势, 见式 (17)。

$$S(\vec{A}) = (\sqrt{f \cdot e^{-g/l}} - e^{-g})^2 \quad (17)$$

式中: f 、 l 分别为算法迭代中探索 and 开发的 2 个参数, 其取值一般为 [2, 3]、[1.5, 2]。

$\vec{A}$ 、 $\vec{C}$ 为用来避免相邻帝企鹅之间碰撞的 2 个参数, 计算见式 (18) ~ (20)。

$$\vec{A} = (M \times (T' + P_{\text{grid}}(\text{Accuracy})) \times \text{Rand}()) - T' \quad (18)$$

$$P_{\text{grid}}(\text{Accuracy}) = \text{Abs}(\vec{P} - \vec{P}_{\text{ep}}) \quad (19)$$

$$\vec{C} = \text{Rand}() \quad (20)$$

式中: M 为一个移动控制参数, 取值一般为 2, 用于保持个体之间的间距, 避免碰撞; T' 为企鹅群周围的温度分布, 表达式见 (21) ~ (22); $P_{\text{grid}}(\text{Accuracy})$ 为帝企鹅最优个体与其他个体之间位置的绝对值; $\text{Rand}()$ 是一个随机数, 范围为 [0, 1]。

$$T' = \left(t - \frac{M_{\text{iteration}}}{x - M_{\text{iteration}}} \right) \quad (21)$$

$$t = \begin{cases} 0 & R > 1 \\ 1 & R < 1 \end{cases} \quad (22)$$

式中: x 为当前迭代次数; $M_{\text{iteration}}$ 为最大迭代次数; t 为在搜索空间中找到最佳最优解的时间; R 为搜索半径。

EPO 算法的步骤如下。

- 1) 初始化帝企鹅种群 $\overrightarrow{P_{ep}}(x)$, 其中 $x=1, 2, \dots, n$ 。
- 2) 选定初始参数 T' 、 $\vec{A}$ 、 $\vec{C}$ 、 S 、 R 、 $M_{\text{iteration}}$, 计算每个个体的目标函数值和当前最优个体的位置及其目标函数值。
- 3) 利用式 (21) ~ (22) 确定群体温度的变化范围。
- 4) 根据式 (15)、(16)、(18) 来更新群体当前位置。
- 5) 更新种群当前最优个体位置和最优个体目标函数值。
- 6) 判断是否达到终止条件。若满足, 则输出最优值, 否则转到步骤 3)。

4 案例验证

4.1 案例描述

假设某承运人计划承运某公司的一批生鲜货物, 采用冷藏集装箱将这批货物由城市 1 运送至城市 15, 冷藏温度为 5 °C^[23], 运输量为 170 t。利用 3 种运输方式: 铁路、公路、水路, 运输速度分别为 60、80、30 km/h, 单位运价分别为 0.2、0.3、0.1 元/km, 碳排放量分别为 0.028、0.796、0.049 kg/(t·km), C_R 、 $C_{R'}$ 分别为 4、6 t·h, r_{co_2} 为 0.5 元/kg, $t_{\min}$ 、 $t_{\max}$ 、 t_1 、 t_u 、 t_1 、 t_2 分别为 16、24、48、72、60、96 h。在两节点之间可能存在部分运输方式无法选择, 各节点不同运输方式的距离如表 2 所示, 各节点之间的转运参数如表 3 所示。本文的实例数据来自文献[24], 并修改其节点距离, 增至 15 个, 转运参数、碳排放、单位运价等参照文献数据。

表 2 各节点不同运输方式的距离
Tab.2 Distance between nodes under different transport modes

起始节点	终止节点	距离/km		
		公路	铁路	水路
1	2	201	167	251
1	3	135		181
1	4	208	265	
2	3	355		450
2	5	318	335	469
2	6	362	391	282
3	5	291	398	
3	6	298	324	
4	5	274	265	333
4	6	277	289	333
5	7	151	261	
5	8	359		335
5	9	290	228	
6	7	241	498	287
6	8	445	451	
6	9	412	291	419
7	10	220	268	262
8	10	78		
9	10	63		
7	11	508	555	
12	14	369		
10	12	291	398	
11	12	298	324	
11	13	274	265	333
10	14	277	289	
13	15	121	258	119
14	15	359		
11	15	300	282	357

4.2 案例分析

为了验证帝企鹅算法的性能,这里分别采用遗传算法、粒子群算法、帝企鹅优化算法对该问题进行求解,种群数量均为 20,迭代次数均为 100 次。其中,遗传算法的变异概率 $p_m=0.01$,交叉概率 $p_c=0.9$;在粒子群算法中, $c_1=c_2=1$, $\omega_{\max}=1.3$, $\omega_{\min}=0.6$ 。将 3 种算法的结果进行对比,经多次实验后得到如图 2 所示的结果,具体求解结果见表 4。

3 种算法收敛曲线对比如图 3 所示,从迭代次数来看, PSO 和 EPO 算法具有更快的收敛速度,但是 PSO 算法在多次实验中均表现出易陷入局部最优解的特点,最优适应度函数值分别为 126 929.19 (GA)、96 864.63 (PSO)、72 603.28 (EPO)。其中,最优解对应的最低成本为 69 699.15 元,碳税成本为 4 529.38 元,客户满意度为 0.96。可以看出, EPO 算法求解的结果在碳税成本上比 PSO 算法高 2.42%,即在碳排放控制水平上并未达到最优,但在综合总成本和客户满意度的适应度函数值上, EPO 算法更具有优势。

4.3 灵敏度分析

为了进一步探究不同运输方式转运耗时对路径优化的影响,针对转运时间进行改变。其中,公路—铁路、铁路—水路的转运时间以 2 h 为变化步长;公路—水路的转运时间以 3 h 为变化步长。采取帝企鹅优化算法进行求解,并进行灵敏度分析,结果如表 5 所示。

其中, S_1 为表 3 中的转运时间, S_2 — S_5 所表示的转运时间则以规定步长依次递增。从最优路径和运输方式的选择来看,随着转运时间的增加,运输路径和方式整体变化不大。由于公路—水路的转运时间较长,且公路的运输成本较高,因此大多数方案不选择公路运输。从适应度函数的变化情况来看,随着转运时间的增加,总成本呈上升趋势,客户满意度呈下降趋势,如图 3 所示。因为随着转运时间的增加,转运碳排放成本、制冷成本等呈上升趋势,货物品质水平呈下降趋势,到货时间进一步推迟。为了尽可能兼顾客户满意度,在转运时间 S_5 对应的最优路径中选择成本最高和碳排放更多的公路运输。

表 3 转运参数
Tab.3 Transshipment parameters

运输方式	铁路			公路			水路		
	成本/(元·t ⁻¹)	时间/h	碳排放/(kg·t ⁻¹)	成本/(元·t ⁻¹)	时间/h	碳排放/(kg·t ⁻¹)	成本/(元·t ⁻¹)	时间/h	碳排放/(kg·t ⁻¹)
铁路				3.09	1	1.56	5.23	1	6
公路	3.09	1	1.56				26.62	2	3.12
水路	5.23	1	6	26.62	2	3.12			

注:成本包括装卸费、仓储费、接驳费、包装整理费等在内的转运费用。

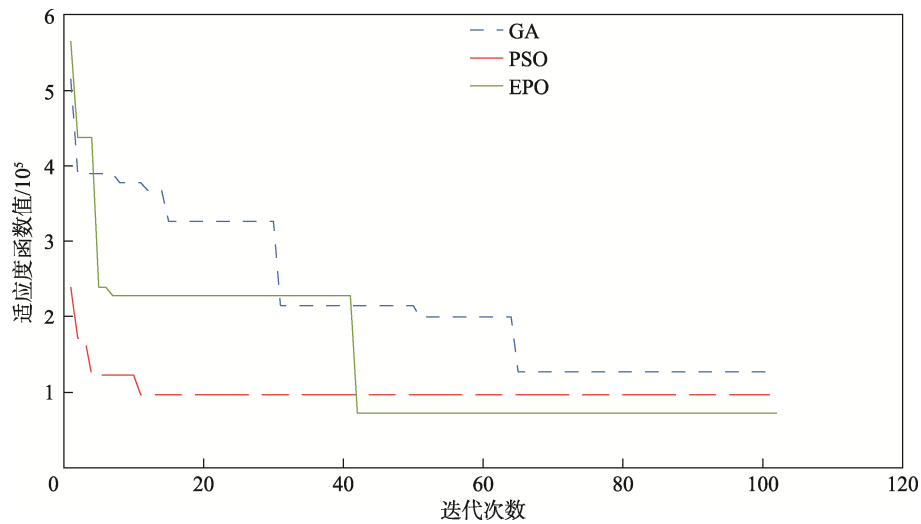


图 2 3 种算法的收敛曲线
Fig.2 Convergence curves of three algorithms

表 4 3 种算法的求解结果
Tab.4 Solution results of three algorithms

算法	最优路径	运输方式	适应度函数值	总成本/元	碳税成本/元	客户满意度
GA	1→4→6→7→11→15	铁路→水路→水路→铁路→铁路	126 929.19	112 966.98	7 134.52	0.89
PSO	1→2→5→7→11→15	铁路→水路→公路→铁路→铁路	96 864.63	88 146.81	4 422.52	0.91
EPO	1→2→5→7→11→15	铁路→水路→铁路→铁路→铁路	72 603.28	69 699.15	4529.38	0.96

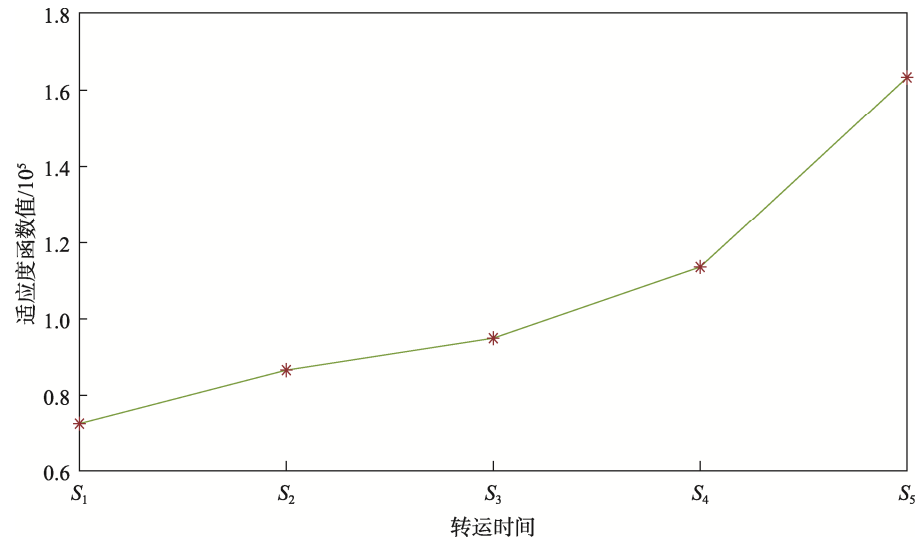


图 3 适应度函数值随转运时间的变化
Fig.3 Variation of fitness function value with transshipment time

表 5 求解结果随转运时间的变化
Tab.5 Variation of solution results with transshipment time

转运时间	最优路径	运输方式	适应度函数值	总成本/元	碳税成本/元	客户满意度
S ₁	1→2→5→7→11→15	铁路→水路→铁路→铁路→铁路	72 603.28	69 699.15	4 529.38	0.96
S ₂	1→2→6→7→11→15	铁路→水路→铁路→铁路→铁路	86 597.50	77 937.75	5 832.29	0.90
S ₃	1→4→5→7→11→15	铁路→水路→铁路→铁路→铁路	94 953.21	85 457.89	6 646.72	0.88
S ₄	1→2→6→7→11→15	铁路→水路→水路→铁路→铁路	113 591.58	98 824.67	7 465.59	0.86
S ₅	1→2→6→7→11→15	铁路→水路→公路→铁路→铁路	163 292.84	117 570.84	10 545.61	0.72

5 结语

首先将冷链运输与多式联运相结合,并同时考虑二者的特点来建立模型。其次,结合品质满意度、时间满意度,定义了客户满意度这一参数,考虑了节能减排因素,建立了考虑多式联运影响因素的路径选择模型。最后,以15个枢纽城市的多式联运网络为例,验证了所提出的路径优化模型,并针对转运时间这一参数进行了灵敏度分析。通过对结果进行讨论和分析,提出了路径选择方案的建议,为联运承运人提供了决策思路和方案。在实际应用中,企业应考虑多方面因素,提高计划制定的抗风险能力,如不同季节和天气对冷链运输的影响,笔者后续会将运输过程中的不确定性情况纳入建模。

参考文献:

- [1] 丁艳,朱晓玲.生鲜农产品电商“最先一公里”冷链物流标准化建设研究[J].广州城市职业学院学报,2019,13(1):40-44.
DING Y, ZHU X L. Research on the Construction of the Cold-Chain Logistic Standard for "the First Kilometer" Delivery of Fresh Agricultural Products in Chinese E-Commerce Context[J]. Journal of Guangzhou City Polytechnic, 2019, 13(1): 40-44.
- [2] 李春雨,李长淮,王言.铁路冷链物流基地设施布局优化设计研究[J].铁道运输与经济,2020,42(9):57-62.
LI C Y, LI C H, WANG Y. Design of Facility Layout Optimization of Railway Cold Chain Logistics Centers[J]. Railway Transport and Economy, 2020, 42(9): 57-62.
- [3] CALVETE H I, GALÉ C, IRANZO J A. Planning of a Decentralized Distribution Network Using Bilevel Optimization[J]. Omega, 2014, 49: 30-41.
- [4] MARINAKIS Y. An Improved Particle Swarm Optimization Algorithm for the Capacitated Location Routing Problem and for the Location Routing Problem with Stochastic Demands[J]. Applied Soft Computing, 2015, 37: 680-701.
- [5] 赵泉午,姚珍珍,林娅.面向新零售的生鲜连锁企业城市配送网络优化研究[J].中国管理科学,2021,29(9):168-179.
ZHAO Q W, YAO Z Z, LIN Y. Research on Urban Distribution Network Optimization of Fresh Chain Enterprises under New Retail[J]. Chinese Journal of Management Science, 2021, 29(9): 168-179.
- [6] CHEN H K, HSUEH C F, CHANG M S. Production Scheduling and Vehicle Routing with Time Windows for Perishable Food Products[J]. Computers & Operations Research, 2009, 36(7): 2311-2319.
- [7] 潘茜茜,干宏程.考虑碳排放的冷链物流配送路径优化研究[J].数学的实践与认识,2016,46(2):62-68.
PAN X X, GAN H C. Study on Cold Chain Logistics Distribution Path Optimization of Considering Carbon Emissions[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2016, 46(2): 62-68.
- [8] 闵德权,孙晓娜,李宇航,等.考虑道路坡度影响的多约束冷链配送问题研究[J].包装工程,2023,44(13):236-244.
MIN D Q, SUN X N, LI Y H, et al. Research on Multi Constraint Cold Chain Distribution Problem Considering the Effect of Road Slope[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(13): 236-244.
- [9] 黄虹,谢如鹤,罗嵩,等.基于公铁联运的多温蓄冷链全程冷链集配优化[J].包装工程,2023,44(17):237-245.
HUANG H, XIE R H, LUO S, et al. Optimization of Whole Cold Chain Joint Pickup and Distribution Based on Road-Rail Transportation with Multi-Temperature Refrigerated Container[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(17): 237-245.
- [10] 王嘉玥.碳排放限制下中欧冷链多式联运运输方案研究[D].重庆:重庆大学,2021:53-58.
WANG J Y. Research on Sino-European Cold Chain Multimodal Transport Scheme under Carbon Emission Restriction[D]. Chongqing: Chongqing University, 2021: 53-58.
- [11] 张珂一,刘玲丽,代天浩,等.考虑风险和时间窗约束的冷链多式联运路径优化研究[J].物流工程与管理,2023,45(11):107-112.
ZHANG K Y, LIU L L, DAI T H, et al. Research on Optimization of Cold Chain Multimodal Transport Paths Considering Risk and Time Window Constraints[J]. Logistics Engineering and Management, 2023, 45(11): 107-112.
- [12] 李玉民,邱梦,闫凯丽,等.高铁参与下考虑时间窗的生鲜品多式联运路径选择[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2021,40(4):54-61.
LI Y M, QIU M, YAN K L, et al. Multimodal Transportation Route Selection of Fresh Products Considering Time Window with the Participation of High-Speed Rail[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2021, 40(4): 54-61.
- [13] 杨玮,杨白月,王晓雅,等.低碳环境下冷链物流企业库存-配送优化[J].包装工程,2021,42(11):45-52.

- YANG W, YANG B Y, WANG X Y, et al. Inventory-Distribution Optimization of Cold Chain Logistics Enterprises in Low-Carbon Environment[J]. *Packaging Engineering*, 2021, 42(11): 45-52.
- [14] 黄琴, 张惠珍, 魏欣, 等. 改进麻雀算法求解带模糊需求的低碳路径优化[J]. *包装工程*, 2023, 44(17): 220-228.
- HUANG Q, ZHANG H Z, WEI X, et al. Improved Sparrow Algorithm for Low-Carbon Routing Optimization with Fuzzy Demand[J]. *Packaging Engineering*, 2023, 44(17): 220-228.
- [15] ZHANG D Z, HE R Z, LI S Y, et al. A Multimodal Logistics Service Network Design with Time Windows and Environmental Concerns[J]. *PLoS One*, 2017, 12(9): e0185001.
- [16] WANG X C, MENG Q. Discrete Intermodal Freight Transportation Network Design with Route Choice Behavior of Intermodal Operators[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2017, 95: 76-104.
- [17] 王浩. 四种智能算法的比较研究[J]. *火力与指挥控制*, 2008, 33(S2): 71-75.
- WANG H. Research on the Comparison of Four Intelligent Algorithm[J]. *Fire Control & Command Control*, 2008, 33(S2): 71-75.
- [18] DHIMAN G, KUMAR V. Emperor Penguin Optimizer: A Bio-Inspired Algorithm for Engineering Problems[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2018, 159: 20-50.
- [19] ZHENG C, SUN K, GU Y, et al. Multimodal Transport Path Selection of Cold Chain Logistics Based on Improved Particle Swarm Optimization Algorithm[J]. *Journal of advanced transportation*, 2022(7): 2022.
- [20] 高浩然, 张玉林, 张顺顺. 考虑时效性和品质性满意度约束的易腐品冷链物流配送[J]. *控制与决策*, 2024, 39(4): 1342-1350.
- GAO H R, ZHANG Y L, ZHANG S S. Cold Chain Logistics Distribution of Perishable Products Considering[J]. *Control and Decision*, 2024, 39(4): 1342-1350.
- [21] OSVALD A, STIRN L Z. A Vehicle Routing Algorithm for the Distribution of Fresh Vegetables and Similar Perishable Food[J]. *Journal of Food Engineering*, 2008, 85(2): 285-295.
- [22] 杨文东, 王文芳. 有时间窗的多式联运问题分析与建模[J]. *南京航空航天大学学报*, 2009, 41(1): 111-115.
- YANG W D, WANG W F. Analyzing and Modeling of Multimodal Transportation with Time Window[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2009, 41(1): 111-115.
- [23] 刘松, 邵毅明, 彭勇. 碳排放限制下的冷藏集装箱多式联运路径优化[J]. *应用数学和力学*, 2020, 41(2): 204-215.
- LIU S, SHAO Y M, PENG Y. Optimization of Multimodal Transport Paths for Refrigerated Containers under Carbon Emission Restriction[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2020, 41(2): 204-215.
- [24] 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.
- DENG X P, CHEN L, TIAN S H. Multimodal Transport Path Optimization Considering Mixed Time Windows under Uncertain Demand[J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition)*, 2021, 33(4): 689-698.