

# 时变路网下考虑碳排放的冷链配送路径优化

程元栋, 丁晨阳

安徽理工大学经济与管理学院, 安徽 淮南 232001

**摘要:**针对冷链物流运输成本较高、货损率较大及碳排放突出等问题,基于时变路网,综合考虑冷藏车固定使用成本、运输成本、制冷成本、货损成本、时间惩罚成本以及碳排放成本等,构建以总成本最小化为目标的生鲜产品冷链配送路径优化模型。通过引入基于时间窗中心值与空间位置节约值的初始化策略、自适应参数控制机制、多层次局部搜索策略,并结合天鹰优化算法的全局搜索策略,提出改进非洲秃鹫优化算法,用于求解模型。仿真算例结果表明:在考虑碳排放成本的情况下,改进非洲秃鹫优化算法的总成本比原始非洲秃鹫优化算法降低约25.7%,所需车辆数从9辆减至7辆;目标函数中考虑碳排放成本时的配送总成本比忽略碳排放成本时降低约1.13%;改进非洲秃鹫优化算法的路径寻优能力显著优于传统算法,在兼顾碳排放成本的同时优化配送路径,达到物流成本降低与低碳配送的目标,为冷链物流配送路径优化提供有效解决方案。

**关键词:**冷链物流;时变路网;路径优化;碳排放;非洲秃鹫优化算法

**中图分类号:**U116.2

**文献标志码:**A

**文章编号:**1672-0032(2026)01-0034-10

**引用格式:**程元栋, 丁晨阳. 时变路网下考虑碳排放的冷链配送路径优化[J]. 山东交通学院学报, 2026, 34(1): 34-43.

CHENG Yuandong, DING Chenyang. Cold-chain distribution routing optimization in time-dependent road networks considering carbon emissions[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2026, 34(1): 34-43.

## 0 引言

随着我国经济的快速发展和居民生活水平的持续提高,冷链物流作为保障生鲜食品、医药产品等物资品质与安全的关键环节,其市场需求日益增长。然而,冷链物流在发展过程中面临能源消耗较高、时效性要求严格、配送成本较高以及碳排放量较大等多重挑战。国务院于2021年印发《“十四五”冷链物流发展规划》,明确提出要加快建立畅通高效、安全绿色、智慧便捷、保障有力的现代冷链物流体系,同时强调了绿色智慧发展的重要性,要求把绿色发展理念贯穿到冷链物流全链条、各领域。

Dantzig等<sup>[1]</sup>首次提出车辆路径问题(vehicle routing problem, VRP),其核心目标是在满足车辆容量、时间窗等系列约束条件下,以总行驶距离或总成本最小化为目标,为一组车辆规划最优配送路径。随着我国物流行业规模持续扩大与运作复杂度不断提高,VRP的研究也日趋深入,对模型构建与求解算法提出了更高要求。在模型构建方面,温廷新等<sup>[2]</sup>将软时间窗引入模型,在规定时间内窗前送达产生一定机会成本,在时间窗后送达产生一定的惩罚成本;李倩等<sup>[3]</sup>基于时间窗引入客户满意度函数,综合考虑多种成本,构建模糊时间窗下的多目标冷链物流配送模型;张济风等<sup>[4]</sup>考虑配送车辆在城市路网中不同时段的不同行驶速度,在模型中引入时变速度函数,研究时变路网下多温区产品配送车辆调度问题;罗亮等<sup>[5]</sup>基于交通状况与天气状况双重作用的车速预测函数,以总成本最小化为目标建立带时间窗的车辆路径规划模型;Chen等<sup>[6]</sup>考虑交通拥堵效应和碳税效应,通过交通拥堵指数描述交通拥堵程度,从低碳经济的角

收稿日期:2025-03-06

基金项目:安徽省教育厅人文社科重点项目(SK2020A0212)

第一作者简介:程元栋(1979—),男,山东泰安人,副教授,硕士研究生导师,管理学博士,主要研究方向为物流系统工程, E-mail: andoncheng@foxmail.com。

度提出适用于时间依赖的绿色车辆路径问题的冷链物流路径优化模型;Zhang 等<sup>[7]</sup>考虑交通状况对总配送成本、冷链产品新鲜度和碳排放的多重影响,改进道路阻抗函数,构建低碳冷链物流配送路径优化模型;江云倩等<sup>[8]</sup>综合考虑温度变化对卸货过程中生鲜腐烂率的影响、运输过程和冷藏过程中的碳排放成本,以及违反时间窗的惩罚成本等,构建以配送成本最小化为目标的冷链物流配送路径优化模型。在求解算法方面,Gan<sup>[9]</sup>引入人工鱼群算法中的拥塞概念与传递系数概念,改进传统蚁群算法;Zhao 等<sup>[10]</sup>采用改进的带精英策略的快速非支配排序遗传算法求解多目标优化问题;方文婷等<sup>[11]</sup>将 A\* 搜索算法的全局收敛性和蚁群算法的正反馈性机制相结合,提出一种混合蚁群算法;石春花等<sup>[12]</sup>针对传统灰狼优化算法易早熟、收敛慢等缺陷,引入正弦与余弦搜索策略,并加入自适应交叉变异机制提高算法求解性能。当前 VRP 问题模型全面性与精准性不足,对交通拥堵等时变路网特征的适应性较弱,难以准确反映真实配送场景;传统算法存在计算效率较低、耗时较长等问题,求解得到的配送路径在质量与实用性方面仍有待提高。

本文在传统冷链配送路径优化模型基础上,引入更符合城市交通特征的时变路网,并在模型中考虑碳排放成本,通过引入基于时间窗中心值与空间位置节约值的初始化策略、自适应参数控制机制、多层次局部搜索策略及天鹰优化算法的全局搜索策略,改进原始非洲秃鹫优化算法<sup>[13]</sup>求解冷链配送路径优化模型,并以生鲜产品配送算例进行验证,以期冷链物流企业的配送路径规划提供决策参考。

## 1 问题描述与模型建立

### 1.1 问题描述

在一定区域内,设有 1 个生鲜产品配送中心,配备若干同型号的冷藏车,需服务多个客户点,已知各客户点的位置坐标、生鲜产品需求量、期待与可接受服务时间窗及服务时间。任务要求以该生鲜产品配送中心为起点,由冷藏车在时变路网条件沿合理路径依次为客户配送生鲜产品。以总成本最小化为目标函数,配送过程中涉及的成本主要包括冷藏车固定使用成本、运输成本、制冷成本、货损成本、时间惩罚成本和碳排放成本等。

配送中心与车辆假设:区域内只有 1 个生鲜产品配送中心,配备足够数量的冷藏车,每辆车均从该中心出发,完成配送任务后返回该中心。每辆冷藏车的型号、载质量、冷藏性能完全相同,每辆车可为多个客户点进行配送服务,每条配送路径上的生鲜产品需求总质量不超过车辆最大载质量。

客户点服务假设:每个客户点仅由一辆冷藏车服务一次,且其货物需求质量不超过单辆冷藏车的额定载质量。

路网时变假设:配送过程中,考虑交通流量随时间变化对冷藏车行驶速度的影响,即路网具有时变特性。

### 1.2 模型建立

#### 1.2.1 冷藏车时变速度分析

在传统冷链配送路径优化模型中,通常假设天气及路况不变,冷藏车匀速行驶。但在实际配送过程中,受交通流量和天气影响,冷藏车速度具有显著的时变性。本文考虑冷藏车送货作业路段早晚高峰对行驶速度的影响,建立在正常天气下基于时段划分的冷藏车速度模型<sup>[14]</sup>。每天 6:00—7:00 与 14:00—17:00,交通流量逐渐增大,冷藏车行驶速度随高峰临近逐步下降;7:00—14:00 与 17:00—22:00,路网车辆逐渐减少,车速逐步回升。其余时段交通流量稳定,对冷藏车速度无影响。

正常天气下各时段对冷藏车速度的影响率

$$\beta_t = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < 6 \text{ 或 } 22 \leq t < 24 \\ 0.225t - 1.35, & 6 \leq t < 7 \\ -0.05t + 0.85, & 7 \leq t < 14 \\ t/30 - 0.15, & 14 \leq t < 17 \\ -0.1125t + 2.475, & 17 \leq t < 22 \end{cases},$$

式中  $t$  为时刻的数值,  $t \in [0, 24)$ 。

正常天气下的冷藏车的速度

$$v = \bar{v}(1 - \beta_1) ,$$

式中  $\bar{v}$  为冷藏车的平均车速, km/h。

冷藏车从客户点  $i$  到客户点  $j$  的行驶时间

$$t_{ij} = d_{ij}/v ,$$

式中  $d_{ij}$  为客户点  $i$  到客户点  $j$  的距离,  $i, j = \{0, 1, 2, \dots, n\}$ ,  $i \neq j$ ,  $n$  为配送客户点总数, 0 为配送中心, 其他为配送客户点。

### 1.2.2 目标函数

#### 1) 冷藏车固定使用成本

冷藏车固定使用成本包括司机及配送人员工资、车辆保养成本、车辆折旧费等。冷藏车固定使用成本

$$C_1 = \sum_{s=1}^m c_s ,$$

式中:  $m$  为冷藏车总数,  $c_s$  为第  $s$  辆冷藏车的固定使用成本。

#### 2) 运输成本

冷藏车的运输成本主要为燃料消耗成本, 燃料消耗量与车辆行驶距离成正比。运输成本

$$C_2 = \sum_{s=1}^m \sum_{i,j=0}^n f_i d_{ij} X_{sij} ,$$

式中:  $f_i$  为冷藏车单位行驶距离的运输成本;  $X_{sij}$  为 0-1 变量, 冷藏车  $s$  由客户点  $i$  行驶到客户点  $j$  时,  $X_{sij} = 1$ , 否则,  $X_{sij} = 0$ 。

#### 3) 制冷成本

为保证生鲜产品在配送过程中的品质, 冷藏车需通过制冷系统持续控温, 由此产生制冷能耗成本。该成本主要由两部分构成: 一是在运输途中车门关闭状态下的基础制冷成本; 二是在客户点停靠服务、开门装卸货物时因冷量散失而增加的额外制冷成本。总制冷成本

$$C_3 = \sum_{s=1}^m \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n (f_r \alpha_1 t_{sij} X_{sij} + f_r \alpha_2 t_i Y_{si}) ,$$

式中:  $f_r$  为制冷剂单价;  $\alpha_1$  为冷藏车制冷剂在运输途中的消耗系数;  $\alpha_2$  为冷藏车制冷剂在开门装卸货物时的消耗系数;  $t_{sij}$  为冷藏车  $s$  从客户点  $i$  到客户点  $j$  的时间, min;  $t_i$  为冷藏车在客户点  $i$  的服务时间, min;  $Y_{si}$  为 0-1 变量, 当冷藏车  $s$  服务客户点  $i$  时,  $Y_{si} = 1$ , 否则,  $Y_{si} = 0$ 。

#### 4) 货损成本

生鲜产品的损耗成本包括运输途中损耗成本与装卸环节损耗成本。运输途中损耗是指在冷链配送过程中, 随运输时间延长, 产品的新鲜度逐步下降, 品质降低, 经济价值减少。装卸环节损耗成本是指在抵达客户点后的卸货过程中, 因操作造成的物理损伤或温控中断而产生的额外损失。货损成本

$$C_4 = \sum_{s=1}^m \sum_{i=0}^n Y_{si} p [q_i (1 - e^{-\omega_1 t_{si}}) + Q_s (1 - e^{-\omega_2 t_i})] ,$$

式中:  $p$  为生鲜产品的单价, 元/kg;  $q_i$  为配送客户点  $i$  对生鲜产品的需求质量, kg;  $\omega_1$  为生鲜产品在运输过程中的腐败率;  $t_{si}$  为配送车  $s$  从配送中心出发到配送客户点  $i$  的时间, min;  $Q_s$  为离开客户点  $i$  时冷藏车上剩余的生鲜产品质量, kg;  $\omega_2$  为生鲜产品在装卸货过程的腐败率。

#### 5) 时间惩罚成本

考虑到生鲜产品易腐坏、保质期较短的特性, 客户往往对送达时间有明确要求, 通常包括期望时间窗和可接受时间窗, 本文引入软时间窗约束描述客户对生鲜送达产品时间的敏感需求。客户点  $i$  对应 4 个时间参数: 期望最早送达时刻  $E_i^*$ 、期望最晚送达时刻  $L_i^*$ 、可接受最早送达时刻  $E_i$ 、可接受最晚送达时刻

$L_i$ ,按早晚顺序依次为  $E_i, E_i^*, L_i^*, L_i$ 。若冷藏车在客户期望的时间窗  $[E_i^*, L_i^*]$  送达,不产生惩罚成本;若冷藏车在  $[E_i, E_i^*)$  内送达,虽不影响产品使用,但会降低客户满意度,惩罚系数为  $P$ ;若冷藏车在  $(L_i^*, L_i]$  内送达,将对客户销售安排造成较大影响,显著降低服务信任度,惩罚系数为  $P^*$  ( $P^* > P$ )。若冷藏车不在客户可接受的时间窗内送达,那么客户将拒绝收货,此时产生极高的惩罚成本  $X$ ,视为订单损失。客户点  $i$  产生的时间惩罚成本

$$c_{ti} = \begin{cases} 0, T_i \in [E_i^*, L_i^*] \\ P(E_i^* - T_i), T_i \in [E_i, E_i^*) \\ P^*(T_i - L_i^*), T_i \in (L_i^*, L_i] \\ X, T_i \in (0, E_i) \cup (L_i, +\infty) \end{cases},$$

式中  $T_i$  为冷藏车实际到达客户点  $i$  的时刻。

时间惩罚成本

$$C_5 = \sum_{i=1}^n c_{ti}。$$

#### 6) 碳排放成本

碳排放成本主要来源于冷藏车行驶过程中的燃料消耗以及制冷系统运行所产生的  $\text{CO}_2$  排放。燃料消耗量主要受行驶里程与车辆载质量影响,本文采用基于负载的估算方法进行计算。冷藏车单位行驶距离的燃料消耗量

$$\rho(M_Q) = \rho_1 + M_Q(\rho_2 - \rho_1) / M_G,$$

式中:  $M_Q$  为冷藏车实际载质量,  $\rho_1$  为冷藏车空载时单位行驶距离的燃料消耗量,  $\rho_2$  为冷藏车满载时单位行驶距离的燃料消耗量,  $M_G$  为冷藏车最大载质量。

配送过程中,冷藏车行驶产生的碳排放成本

$$C_6^1 = C_1 \sum_{s=1}^m \sum_{i,j=0}^n \lambda \rho(m_{ij}) d_{ij} X_{sij},$$

式中:  $C_1$  为碳税单价,  $\lambda$  为燃料的  $\text{CO}_2$  排放系数,  $m_{ij}$  为冷藏车从客户点  $i$  到客户点  $j$  的货运量。

冷藏车制冷机器工作产生的碳排放成本

$$C_6^2 = C_1 \sum_{s=1}^m \sum_{i,j=0}^n \mu m_{ij} d_{ij} X_{sij},$$

式中  $\mu$  为单位载质量下单位行驶距离制冷  $\text{CO}_2$  排放量。

冷藏车碳排放总成本

$$C_6 = C_6^1 + C_6^2。$$

#### 7) 配送路径优化模型

以总配送成本  $C$  最小化为目标构建生鲜产品冷链物流配送路径优化模型,公式为:

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

s. t.

$$\sum_{i=1}^n q_i Y_{si} \leq M_G, \forall s \in S, \quad (1)$$

$$\sum_{i,j=0}^n d_{ij} X_{sij} \leq D, i \neq j, \forall s \in S, \quad (2)$$

$$\sum_{s=1}^m \sum_{i=0}^n Y_{si} \leq m, \quad (3)$$

$$\sum_{s=0}^m Y_{si} = 1, \forall i \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad (4)$$

式中:  $S$  为冷藏车编号集合,  $D$  为冷藏车最大行驶里程。

式(1)用于约束任意冷藏车单次配送路径上的生鲜产品总需求质量不大于其最大载质量,式(2)用于约束冷藏车单次配送路径里程不大于其最大行驶里程,式(3)用于约束参加配送任务的冷藏车数量不大于该配送中心拥有冷藏车总数,式(4)用于约束每个客户点有且仅有1辆冷藏车进行服务。

## 2 求解算法

### 2.1 算法改进策略

#### 2.1.1 初始化策略

算法初始化是影响寻优效率与最终解质量的关键环节。为构造高质量的初始解群体,采用多样化的初始化策略<sup>[15]</sup>。第一阶段分析所有客户点时间窗特征,计算客户点*i*的时间窗中心值 $u_i = (E_i + L_i) / 2$ ,基于时间窗中心值,将客户点划分为若干时间簇,同一簇内的客户点具有相近的时间窗特征,这种分簇方式有助于后续构建满足时间约束的配送路线。

第二阶段引入空间位置节约值,属于同一簇或相邻簇的客户点*i*和客户点*j*的节约值

$$s_{ij} = c_{0i} + c_{0j} - \theta c_{ij},$$

式中: $c_{0i}$ 、 $c_{0j}$ 分别为从配送中心到客户点*i*和客户点*j*间的行驶成本, $\theta$ 为距离调节系数, $c_{ij}$ 为客户点*i*和客户点*j*间的行驶成本。

第三阶段采用改进的Solomon插入启发式方法优化初始路线,为每条路线选择1个种子客户点,选择标准综合考虑客户点的时间窗紧迫性和配送位置,评分函数为:

$$s(i) = w_1(1/u_i) + w_2(1/d_{0i}),$$

式中: $w_1$ 和 $w_2$ 分别为时间窗中心值和节约值的权重, $d_{0i}$ 为配送中心到客户点*i*的距离。评分越高,该客户点越适合作为优先服务的种子点。

#### 2.1.2 局部搜索策略

在确定潜在优质解区域后,通过非洲秃鹫优化算法的局部搜索机制进行精细的区域开发。该阶段采用多层次局部搜索策略,具体包括以下4类策略。

1) 2-opt局部优化<sup>[16]</sup>:交换单条路径的两条非相邻边,若交换后路径总距离缩短,则接受该结构调整。

2) 客户点重定位:将某客户点从当前路径移出,插入其他路径的最佳可行位置,该过程需严格满足冷藏车载质量与时间窗约束。

3) 路径间客户点交换:在不同路径间交换若干客户点,尤其适用于相邻服务区域的重新分配,缩短整体行驶距离。

4) 路径交叉重组<sup>[17]</sup>:选取两条路径,在空间邻近或交叉区段进行片段交换与重组,改善区域服务的布局效率。

通过轮盘赌选择机制动态调整上述策略的选择概率,以各策略的历史改进效果为调整依据,第*k*种策略的选择概率

$$P_k = f_k / \sum_{k=1}^4 f_k,$$

式中 $f_k$ 为第*k*种策略的适应度。

#### 2.1.3 全局搜索策略

天鹰优化算法模拟天鹰在高空滑翔并搜寻猎物的行为,主要目标是在解空间中进行广泛的全局搜索<sup>[18]</sup>。该阶段通过自适应步长策略平衡搜索的广度和深度。步长

$$\alpha(t) = \alpha_0(1 - g/g_{\max})^\lambda,$$

式中: $\alpha_0$ 为初始步长, $g$ 为当前迭代次数, $g_{\max}$ 为最大迭代次数, $\lambda$ 为衰减系数。

在搜索过程中,个体位置更新受全局最优解位置、次优解位置和群体平均位置的共同影响<sup>[19]</sup>,个体

新位置

$$X_{new} = X + \alpha(t)L(X_{best} - X) + \beta(t)R(X_{mean} - X) + \omega(X_{second} - X),$$

式中: $X$  为个体当前位置; $L$  为 Lévy 飞行随机参数; $X_{best}$  为当前全局最优解位置; $\beta(t)$  为随迭代变化的权重; $R$  为均匀分布随机数,  $R \in [0, 1]$  ; $X_{mean}$  为群体平均位置; $\omega$  为次优解影响权重; $X_{second}$  为当前全局次优解位置。

天鹰优化算法能在保持局部精细搜索能力的同时,偶尔进行大范围跳跃,跳出局部最优。搜索过程中,通过动态调整各影响因子的权重,适应搜索空间的特征变化。

### 2.1.4 自适应参数控制机制

采用基于搜索过程性能反馈策略,动态调整变异率  $p_m$  和局部搜索率  $p_l$  等自适应参数。调整原则为当算法表现良好时,倾向于提高局部搜索率,精细化当前解;当搜索陷入停滞时,提高变异率增强扰动,增加种群多样性,跳出局部最优<sup>[20]</sup>。第  $g+1$  次迭代的变异率

$$p_m(g + 1) = p_m(g) + \alpha(1 - \Delta F / \Delta F_{max}),$$

式中: $p_m(g)$  为第  $g$  次迭代的变异率, $\alpha$  为学习率, $\Delta F$  为最近  $g$  次迭代的平均改进量, $\Delta F_{max}$  为历史最大单次改进量。

第  $g+1$  次迭代的局部搜索率

$$p_l(g + 1) = p_l(g) + \delta[(f_{best} - f) / f_{best}],$$

式中: $p_l(g)$  为第  $g$  次迭代的局部搜索率, $\delta$  为调节系数, $f_{best}$  为历史最优解的目标函数值, $f$  为当前最优解的目标函数值。

## 2.2 算法求解流程

改进算法以非洲秃鹫优化算法为基础框架,融合天鹰优化算法的全局搜索机制与多种局部搜索策略,算法求解流程如图 1 所示。

步骤 1:导入客户点信息、路网时变数据及模型参数,设置种群大小、最大迭代次数、初始变异率与局部搜索率等,采用初始化策略生成初始化种群。

步骤 2:进行局部搜索,在非洲秃鹫优化算法基础上执行 2-opt 局部优化、客户点重定位、路径间客户点交换与路径交叉重组操作,基于当前搜索性能,完成自适应参数的更新。

步骤 3:进行全局搜索,执行天鹰优化算法的高空探索机制,引入 Lévy 飞行进行随机步长跳跃,增强逃逸局部最优的能力,对更新后的解进行位置标准化与可行性修复。

步骤 4:收敛判断与输出,若满足收敛条件(如达到最大迭代次数或最优解连续多代无改进),则输出历史最优解及其对应的配送路径方案;否则,返回步骤 2 继续执行迭代优化。

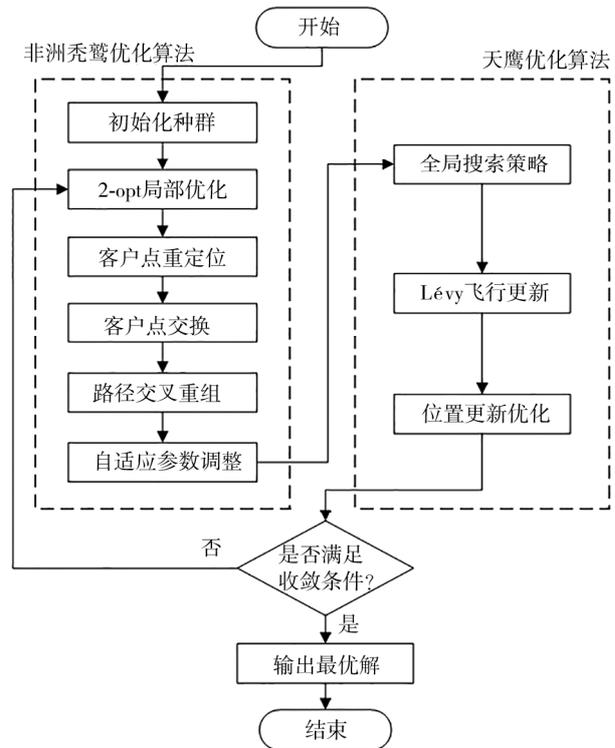


图 1 改进非洲秃鹫优化算法求解流程

## 3 算例分析

### 3.1 算例描述

本文以某生鲜海产品配送中心向周边 30 个客户点完成配送任务为背景开展算例分析。配送中心编号为 0,位置坐标为(35,35),工作时间为 5:00—23:00,配备 10 辆同型号冷藏车,每辆车的额定载质量为

5 t。客户点随机编号为1~30,各客户点的位置坐标、需求量、期望与可接受配送时间窗以及服务时长等信息如表1所示。

表1 配送中心与客户点基础数据

客户点编号	位置坐标/km	需求量/t	期望配送时间窗	可接受配送时间窗	服务时间/min
1	(39,45)	0.21	[5:30,6:00]	[5:00,7:00]	10
2	(50,18)	0.65	[5:35,5:55]	[5:00,6:30]	30
3	(29,56)	0.32	[5:55,6:15]	[5:15,7:00]	16
4	(28,8)	0.44	[6:00,7:00]	[5:40,8:00]	21
5	(22,38)	0.12	[6:30,7:20]	[6:20,7:50]	6
6	(45,20)	0.25	[7:15,7:45]	[7:00,8:15]	13
7	(62,32)	1.22	[7:25,8:25]	[7:00,9:00]	62
8	(30,35)	0.05	[8:00,9:00]	[7:30,11:00]	3
9	(32,55)	0.15	[8:45,10:00]	[8:00,10:30]	8
10	(62,50)	0.86	[9:15,10:15]	[9:00,10:30]	40
11	(18,18)	0.56	[9:30,10:00]	[9:00,11:00]	28
12	(60,14)	0.35	[9:40,10:30]	[9:15,10:45]	16
13	(22,12)	1.15	[10:25,11:00]	[10:00,11:25]	56
14	(10,14)	0.88	[10:55,11:25]	[10:15,13:00]	40
15	(9,55)	0.79	[11:15,12:00]	[11:00,13:00]	35
16	(45,45)	0.62	[12:00,13:00]	[11:15,14:00]	30
17	(35,30)	0.05	[13:15,14:00]	[12:45,15:00]	2
18	(60,20)	0.11	[13:50,14:20]	[13:30,14:50]	5
19	(20,22)	0.16	[14:20,15:20]	[13:45,16:15]	7
20	(26,65)	0.28	[15:05,15:55]	[14:30,16:30]	14
21	(37,47)	0.68	[16:25,16:55]	[15:30,17:45]	35
22	(55,65)	0.07	[16:50,17:25]	[16:20,18:00]	4
23	(46,38)	0.54	[17:35,18:15]	[17:05,20:00]	28
24	(60,50)	0.66	[18:05,18:55]	[17:15,20:15]	35
25	(15,25)	1.84	[19:30,21:00]	[19:00,22:30]	90
26	(22,26)	0.74	[19:50,20:35]	[19:25,21:10]	35
27	(15,45)	0.28	[20:15,20:50]	[19:50,22:00]	13
28	(33,46)	0.63	[21:00,21:25]	[20:10,22:15]	32
29	(8,32)	0.19	[21:15,21:40]	[20:30,22:30]	10
30	(44,21)	1.56	[21:40,22:00]	[21:15,23:00]	80

在路网方面,考虑交通高峰时段对车速的动态影响,设定静态路网下冷藏车平均行驶速度为60 km/h。冷藏车固定使用成本为450元/辆,行驶成本为3元/km;空载时燃料消耗量为1 L/km,满载时燃料消耗量为2 L/km;运输途中制冷剂消耗系数为0.10元/min,装卸货物时制冷剂消耗系数为0.25元/min,制冷剂单价为26元/L;单位载质量下单位行驶距离制冷的CO<sub>2</sub>排放量为0.0075 g/(kg·km),燃料消耗的CO<sub>2</sub>排放系数为2.5 kg/L,碳税单价为0.3元/kg;生鲜产品运输途中的腐败率为0.002,装卸货物时的腐败率为0.005,生鲜海产品的平均单价为45元/kg;在 $[E_i, E_i^*]$ 送达的惩罚成本系数 $P=0.25$ 元/min,在 $[L_i^*, L_i]$

送达的惩罚成本系数  $P^* = 0.85$  元/min。

### 3.2 模型计算结果与分析

在软件 MATLAB R2018a 上采用改进非洲秃鹫优化算法求解生鲜产品冷链配送路径优化模型,为兼顾求解质量与计算效率,求解算法参数设置为:种群规模为 50,最大迭代次数为 100;初始变异率为 0.1,初始局部搜索率为 0.2;惯性权重为 0.5,位置更新概率为 0.6;探索概率与开发概率分别为 0.4 和 0.6;探索因子为 0.1,开发因子为 0.8;社会学习因子与个体学习因子均为 2.0;飞行距离系数为 0.2,视野范围系数为 0.3。为降低随机性影响,共进行 20 次模拟仿真,从中选取最优解作为最终配送方案。

#### 3.2.1 考虑碳排放成本下不同算法求解结果对比

考虑碳排放成本,分别采用原始非洲秃鹫优化算法与改进非洲秃鹫优化算法对生鲜产品冷链配送路径优化模型进行求解。两种算法均迭代 100 次,求解迭代曲线如图 2 所示。

由图 2 可知:原始非洲秃鹫优化算法约在第 5 次迭代后迅速收敛,并在第 75 次迭代后陷入局部最优;改进非洲秃鹫优化算法收敛速度相对平缓,约在第 50 次迭代后趋于稳定,在第 80 次迭代后获得最优结果。尽管改进非洲秃鹫优化算法的收敛过程较长,但其最终获得的总配送成本显著低于原始非洲秃鹫优化算法,说明通过更充分的搜索,改进非洲秃鹫优化算法有效避免了早熟收敛,整体寻优性能提高。

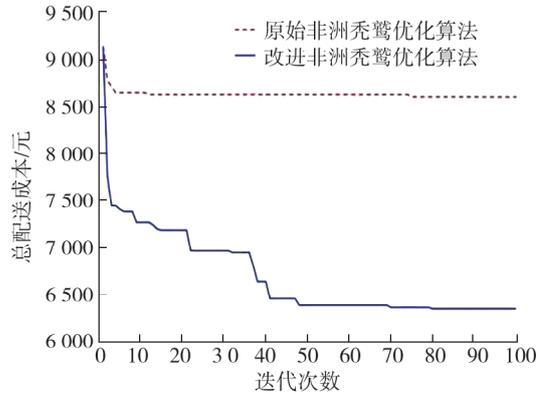


图 2 两种算法求解迭代曲线

考虑碳排放成本下,原始非洲秃鹫算法与改进非洲秃鹫算法求解所得配送路径可视化示意图分别如图 3、4 所示。对比图 3、4 可知:原始非洲秃鹫优化算法生成的配送路径存在明显的交叉、迂回和长距离跳跃现象,部分冷藏车仅服务 1~2 个客户点,车辆利用率较低,资源浪费严重;改进非洲秃鹫优化算法生成的配送路径交叉与迂回减少,走向更平滑,长距离跳跃大幅减少,每辆车服务的客户点数量更均衡,所需冷藏车从 9 辆减至 7 辆,提高了车辆负载率。改进非洲秃鹫优化算法在冷链配送场景下路径整合与资源利用方面更具优势。

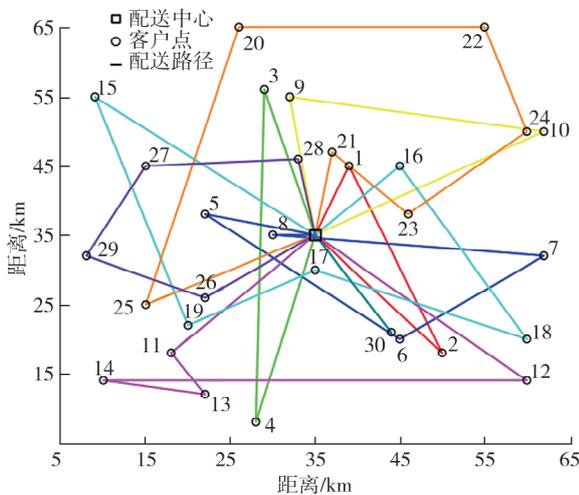


图 3 原始非洲秃鹫优化算法配送路径

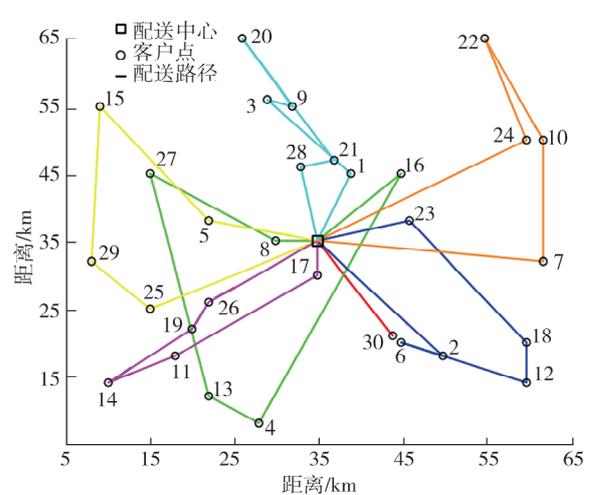


图 4 改进非洲秃鹫优化算法配送路径

考虑碳排放成本下,两种求解算法所得配送方案的各项成本及总配送成本如表 2 所示。由表 2 可知:考虑碳排放成本下,改进算法的总配送成本比原始算法降低约 25.7%,且运输成本、制冷成本、碳排放成本、货损成本及时间惩罚成本等均不同程度减小。

表2 考虑碳排放成本下2种求解算法所得配送方案的各项成本及总成本

单位:元

算法	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$C$
原始秃鹫优化算法	4 050.00	2 650.00	251.27	675.49	132.41	851.79	8 545.78
改进秃鹫优化算法	3 150.00	1 733.85	236.90	653.00	5.35	574.03	6 353.13

### 3.2.2 碳排放对算法求解结果的影响

为分析碳排放成本对配送路径与总配送成本的影响,基于改进非洲秃鹫优化算法,对不考虑碳排放成本下的生鲜产品冷链配送路径优化模型进行求解,配送路径可视化示意图如图5所示。

对比图4、5可知:不考虑碳排放成本时,采用改进非洲秃鹫优化算法求解得到的配送方案需6辆冷藏车完成配送任务,部分配送路径存在交叉与迂回,客户点间出现长距离折返,整体路径布局较松散。将碳排放成本纳入目标函数后,算法更倾向于规划行驶距离更短、空间结构更紧凑的配送路径,从路径规划层面主动降低不必要的行驶能耗与碳排放。

生鲜产品冷链配送路径优化模型的目标函数中

不考虑碳排放成本时,改进非洲秃鹫优化算法求解所得配送方案的冷藏车固定使用成本、运输成本、制冷成本、货损成本、时间惩罚成本、碳排放成本及总配送成本分别为2 700.00、1 940.19、287.08、769.63、53.68、674.94、6 425.52元。与考虑碳排放成本时的配送方案相比,虽冷藏车固定使用成本降低,但运输成本、制冷成本等均不同程度的增大,总配送成本增大1.13%,表明在配送路径优化模型中考虑碳排放成本,有助于获得成本更低的配送方案。

## 4 结束语

针对生鲜产品冷链配送路径优化问题,基于受交通流量影响而车速随时变化的时变路网,综合考虑冷藏车固定使用成本、运输成本、制冷成本、损成本、时间惩罚成本以及碳排放成本等,建立以总配送成本最小化为目标的生鲜产品冷链配送路径优化模型。采用天鹰优化算法改进非洲秃鹫优化算法,通过引入基于时间窗中心值与空间位置节约值的初始化策略、多层次局部搜索策略、基于性能反馈的自适应参数控制策略,增强了算法的全局探索与局部开发能力。算例仿真结果表明:在考虑碳排放成本的情形下,改进非洲秃鹫优化算法相较于原始非洲秃鹫优化算法的总配送成本降低约25.7%,所需车辆从9辆减至7辆,显示出更优的路径整合与资源调度能力;考虑碳排放成本时的总配送成本比忽略碳排放成本时降低约1.13%,说明将碳排放成本纳入优化目标有助于获得更经济、更绿色的配送方案。考虑碳排放成本构建的生鲜产品冷链配送路径优化模型与改进非洲秃鹫优化算法可为冷链物流企业提高经济效益、实现绿色低碳配送提供参考。

后续研究可在模型动态性、算法可扩展性、数据实时性以及系统协同性等方面持续推进,构建更智能、绿色、高效的冷链物流配送体系。

### 参考文献:

- [1] DANTZIG G B, RAMSER J H. The truck dispatching problem[J]. Management Science, 1959, 6(1):80-91.
- [2] 温廷新,李可昕,胡迎春. 基于软时间窗的多车舱生鲜品配送路径优化[J]. 公路交通科技, 2023, 40(9):232-238.

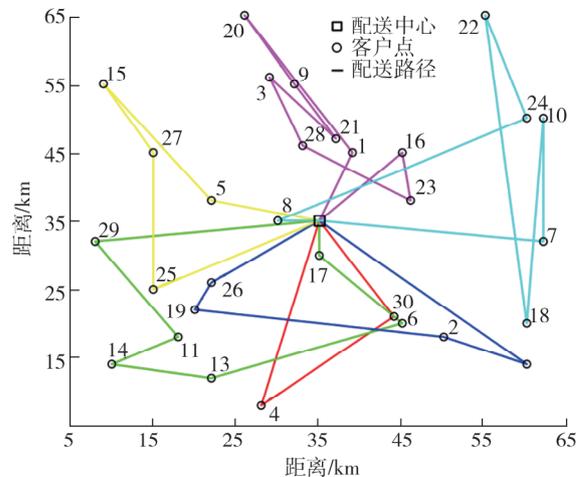


图5 不考虑碳排放成本的配送路径

- [3] 李倩, 蒋丽, 梁昌勇. 基于模糊时间窗的多目标冷链配送优化[J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(23):255-262.
- [4] 张济风, 杨中华. 时变路网环境下多温冷链配送路径优化研究[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2020, 37(1):119-126.
- [5] 罗亮, 陈慧璇, 吴张, 等. 交通与天气状况双重作用下生鲜农产品冷链配送的 VRPTW[J]. 系统工程, 2022, 40(6):67-75.
- [6] CHEN J X, LIAO W Z, YU C W. Route optimization for cold chain logistics of front warehouses based on traffic congestion and carbon emission[J]. Computers & Industrial Engineering, 2021, 161:107663.
- [7] ZHANG X, CHEN H Z, HAO Y C, et al. A low-carbon route optimization method for cold chain logistics considering traffic status in China[J]. Computers & Industrial Engineering, 2024, 193:110304.
- [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] GAN Q. A logistics distribution route optimization model based on hybrid intelligent algorithm and its application[J]. Annals of Operations Research, 2022:04854.
- [10] ZHAO J, XIANG H, LI J B, et al. Research on logistics distribution route based on multi-objective sorting genetic algorithm[J]. International Journal on Artificial Intelligence Tools, 2020, 29(7n08):2040020.
- [11] 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.
- [12] 石春花, 刘环. 基于正余双弦自适应灰狼优化算法的医药物流配送路径规划[J]. 数学的实践与认识, 2020, 50(14):114-127.
- [13] ABDOLLAHZADEH B, GHAREHCHOPOGH F S, MIRJALILI S. African vultures optimization algorithm: a new nature-inspired metaheuristic algorithm for global optimization problems [J]. Computers & Industrial Engineering, 2021, 158:107408.
- [14] 刘思远, 陈天恩, 陈栋, 等. 时变多车型下的生鲜农产品配送路径优化模型[J]. 智慧农业(中英文), 2021, 3(3):139-151.
- [15] 陈麒羽, 邵洁, 王超群, 等. 基于双重动态调整的改进非洲秃鹫优化算法[J]. 国外电子测量技术, 2024, 43(1):20-29.
- [16] 张润发, 邱建龙, 郭明, 等. 基于改进 2-opt 蚁群算法的生鲜车辆路径优化[J]. 数学的实践与认识, 2021, 51(24):160-170.
- [17] AIT-SAAD A, MERAIHI Y, SOUKANE A, et al. An enhanced African vulture optimization algorithm for solving the Unmanned Aerial Vehicles path planning problem[J]. Computers and Electrical Engineering, 2023, 110:108802.
- [18] 李雅梅, 孟嗣博, 陈雪莲. 多策略改进的天鹰优化算法及其应用[J]. 计算机应用研究, 2023, 40(5):1352-1359.
- [19] 石小娟, 赵兴方, 闫龙, 等. 改进天鹰算法求解时间依赖型车辆路径问题[J]. 计算机工程与应用, 2024, 60(4):355-365.
- [20] ABED M S, LUTFY O F, AL-DOORI Q F. Online path planning of mobile robots based on African vultures optimization algorithm in unknown environments[J]. Journal Européen des Systèmes Automatisés, 2022, 55(3):405-412.

## Cold-chain distribution routing optimization in time-dependent road networks considering carbon emissions

CHENG Yuandong, DING Chenyang

College of Economic and Management, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China

**Abstract:** To address the challenges of high transportation costs, elevated spoilage rates, and prominent carbon emissions in cold-chain logistics, this study develops a fresh-product cold-chain vehicle routing optimization model

(下转第 72 页)

and guide safe construction practices, systematic and high-precision on-site monitoring methods are implemented. Total station instruments are employed for continuous non-contact measurement of tunnel crown settlement, surrounding convergence, and surface settlement to precisely capture spatial deformation. Combined with geophysical radar for early detection of adverse geological formations ahead, automated data acquisition systems and specialized analysis software enable real-time transmission, processing, visualization, and early warning analysis of massive monitoring data. Post-excavation monitoring data indicate that the deformation of the surrounding rock after tunnel excavation follows a three-stage change pattern, transitioning from rapid change to slow change and finally to basic stability as construction progresses. This validates the applicability of the designed support parameters in most sections, but indicates insufficient support strength in specific weak surrounding rock sections. To address challenges including vulnerable monitoring points, significant construction interference, and humid dust environments, measures such as reinforcing protection points, optimizing workflows to reduce interference, selecting environment-resistant equipment, and enhancing calibration are adopted. A real-time monitoring system is established for dynamic analysis and early warning, ensuring data reliability and guiding construction safety.

**Keywords:** tunnel engineering; monitor; vault settlement; peripheral convergence; surface settlement

(责任编辑:王惠)

.....  
(上接第 43 页)

over a time-dependent road network, aiming to minimize total cost. The model jointly considers fixed vehicle usage cost, transportation cost, refrigeration cost, spoilage cost, carbon-emission cost, and time-window penalty cost. An improved African vulture optimization algorithm (AVOA) is proposed to solve the model by introducing an initialization strategy based on time-window centers and spatial savings, an adaptive parameter-control mechanism, and a multi-level local search strategy, while incorporating the global search strategy of the aquila optimizer. Computational experiments show that, when carbon emissions are considered, the improved AVOA reduces total cost by about 25.7% compared with the original AVOA and decreases the required fleet size from 9 to 7 vehicles. Furthermore, the total cost when accounting for carbon emissions is about 1.13% lower than when carbon emissions are not considered. The improved AVOA demonstrates markedly superior route-search capability over traditional algorithms, simultaneously optimizing distribution routes while internalizing carbon-emission costs to achieve both cost reduction and low-carbon delivery. The proposed approach provides an effective solution for cold-chain logistics routing.

**Keywords:** cold chain logistics; time-dependent road network; path optimization; carbon emission; AVOA

(责任编辑:赵玉真)