

考虑碳排放和时间窗约束的冷链物流配送路径优化研究

周苏汉

江苏大学管理学院, 江苏 镇江

收稿日期: 2024年4月16日; 录用日期: 2024年6月23日; 发布日期: 2024年6月30日

摘要

针对冷链物流配送成本较高以及配送不畅导致客户满意度不高的问题, 本文在考虑时间窗、碳排放和货损成本的基础上, 建立了以总配送成本最小为目标的生鲜农产品冷链物流配送路径优化模型。通过引入X企业的案例, 采用遗传算法进行仿真实验, 得出优化后的物流配送方案, 并与企业原运输方案进行对比, 得出以下结论: 优化后物流配送总成本比原方案降低了8.38%。该结果表明本文模型能够有效降低物流配送成本, 能为企业规划合理的配送路线, 能为企业的决策提供建议。

关键词

冷链物流, 路径优化, 遗传算法, 配送成本

Research on Cold Chain Logistics Distribution Path Optimization Considering Carbon Emission and Time Window Constraints

Suhan Zhou

School of Management, Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu

Received: Apr. 16th, 2024; accepted: Jun. 23rd, 2024; published: Jun. 30th, 2024

Abstract

Aiming at the problems of high distribution cost of cold chain logistics and low customer satisfaction caused by poor distribution, this paper established a cold chain logistics distribution route optimization model of fresh agricultural products with the minimum total distribution cost as the

target based on the consideration of time window, carbon emission and freight damage cost. By introducing the case of X enterprise and using genetic algorithm to conduct simulation experiment, the optimized logistics distribution scheme is obtained, and compared with the original transportation scheme of the enterprise, the following conclusion is drawn: The total cost of logistics distribution after optimization is reduced by 8.38% compared with the original scheme. The results show that this model can effectively reduce the logistics distribution cost, and can provide suggestions for enterprises to plan reasonable distribution routes and make decisions.

Keywords

Cold Chain Logistics, Path Optimization, Genetic Algorithm, Distribution Cost

Copyright © 2024 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

随着生鲜电商的兴起，客户对生鲜品质和冷链运输时效性提出了更高的标准。由于生鲜产品运输时需要通过制冷来维持品质，在配送过程中会排放较多的二氧化碳。自“碳达峰、碳中和”概念提出后，学者愈发关注传统冷链物流能源消耗高、碳排放量大的问题。因此，如何制定合理高效的低碳冷链物流运输方案，优化配送路线，降低企业运输成本，兼顾客户的时间要求与体验，是物流学界的重点研究问题。

为了解决冷链物流配送成本过高的问题，Tao 等[1]在研究物流配送成本时，综合考虑了车辆的碳排放成本，建立以总成本最小为目标的冷链物流配送模式并使用了一种改进的量子细菌觅食优化算法进行求解。李想等[2]在需求不确定情况下，采用模拟退火算法，以制冷、时间窗惩罚、碳排放以及货损成本最低为目标，研究企业如何合理决策规划物流路径来降低配送成本。沈丽等[3]在研究农产品配送成本问题时，细化货损和碳排放的来源，发现虽然考虑上述两种因素后，物流总配送成本略微升高，但燃油成本和时间惩罚成本都有所降低。邓红星等[4]结合实例运用遗传算法，分别研究了在是否考虑碳排放的两种情况下生鲜农产品冷链物流路径优化方案，对比发现考虑碳排放后物流总配送成本更低。

通过分析已有相关研究，现有文献大多是从时间窗或碳排放单一角度，以冷链物流配送成本最小化为目标开展研究，但综合考虑时间窗和碳排放两者共同对物流成本影响的研究较少，且对物流总成本的构成也不够全面。因此本文在现有研究的基础上，综合考虑时间窗和碳排放要求，通过细化碳排放成本，建立带时间窗的低碳冷链物流配送路径模型，采用遗传算法进行求解，并通过实际案例验证该模型的有效性。

2. 模型构建

与传统的路径优化问题相比，本文在考虑物流运输距离成本因素和送货时间要求外，还将碳税政策对物流碳排放成本的影响引入到模型中进行分析。模型建立的基本情形如下：区域内存在一家配送中心，其服务能力与位置信息是已知的。该配送中心需要为区域内一定数量的门店提供生鲜配送服务(门店的位置、每日货品需求量、到货时间要求也是已知的)，车辆统一从配送中心出发开始配送任务，遵循一定的配送顺序，基于各门店的到货时间要求，在尽可能满载的情况下满足多个门店的运输需求，最后返回出发地。在配送过程中要满足各门店的时间窗和需求量要求，结合物流车辆在运行中产生的碳排放成本，

建立以总配送成本最小为目标的优化模型[5]，得到优化后的物流配送路线，降低企业的物流配送成本。

2.1. 模型假设

- 1) 该区域内只存在单个配送中心，并为区域内多个需求点提供配送服务。
- 2) 配送中心采用统一型号的冷藏车，即所有车辆在任何方面的花费是一致的，运输费用只会根据运输距离而改变，且不允许出现超载的问题。
- 3) 每条线路只能有一辆货车执行运输任务，且车辆对门店按照一定的次序进行送货，在完成任务后返回配送中心。
- 4) 假定企业所服务的门店日需求量是已知并且不变的，每日运输必须满足门店的销售需求，不存在因临时需求导致中途指派车辆的情况。
- 5) 配送中心的货物库存量远大于门店需求量，即不会有缺货。
- 6) 假定所有车辆以某一特定速度匀速行驶，在后续模型中采用定值。
- 7) 室外温度的变化对车辆正常运行的能耗几乎不会产生影响。

2.2. 参数符号说明

- N : 所有客户点的集合($N = 1, 2, \dots, n$)
- N_0 : 表示配送中心 0
- $V = N_0 \cup N$: 区域内所有点的集合($N = 0, 1, 2, \dots, n$)
- K : 配送中心持有的车辆集合($K = 1, 2, \dots, m$)
- Q : 车辆的最大载重量
- d_{ij} : 节点 i 和节点 j 之间的距离
- β_1 : 车门关闭条件下产品腐坏速率
- β_2 : 车门打开条件下产品腐坏速率
- v : 车辆行驶速度
- e_0 : 单位燃油消耗产生的碳排放量
- ω : 制冷设备工作时单位重量的货物在单位距离上所产生的碳排放量
- ρ_0 : 车辆空载时的单位距离油耗
- ρ^* : 车辆满载时的单位距离油耗
- q_i : 客户点 i 的需求量
- Q_i : 车辆离开客户点 i 时剩余产品装载量
- Q_{ij} : 车辆在节点 i 和 j 之间行驶时的载货量
- t_{ij}^k : 车辆 k 从节点 i 行驶至节点 j 的时间
- t_{si} : 客户点 i 的服务时间
- t_i^k : 车辆 k 到达客户点 i 的时刻
- t_0^k : 车辆 k 从配送中心出发的时刻
- $[T_{ei}, T_{li}]$: 客户点 i 的满意服务时间窗
- $[T'_{ei}, T'_{li}]$: 客户点 i 可接受服务时间窗
- c_1 : 单位车辆固定成本
- c_2 : 单位距离成本
- c_a : 运输过程单位时间制冷成本

c'_a : 卸货过程单位时间制冷成本

P : 单位产品价格

μ : 单位时间车辆提前到达所产生的惩罚成本

μ' : 单位时间车辆迟到所产生的惩罚成本

c_0 : 碳税价格(每吨 CO₂ 排放征税价格)

$x_{ij}^k = \begin{cases} 1, & \text{车辆从节点 } i \text{ 行驶到节点 } j, i, j \in V, \forall k \in K \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$

$y_i^k = \begin{cases} 1, & \text{当车辆 } k \text{ 为客户点 } i \text{ 提供服务}, i \in N, \forall k \in K \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$

2.3. 总配送成本分析

2.3.1. 固定成本 C_1

固定成本应包含车辆折旧费、人工费等, 其与使用车辆量成正比, 所以配送过程中车辆固定使用成本 C_1 可由下式进行表示:

$$C_1 = c_1 \sum_{k \in K} \sum_{j \in N} x_{0j}^k \quad (1)$$

其中, c_1 表示单位车辆的固定使用成本; k 表示该配送中心所有车辆的集合。

2.3.2. 运输成本 C_2

一般地, 车辆运输成本与行驶距离两者呈正比, 配送路线越长, 物流成本也就越高, 因此运输成本 C_2 可表示为:

$$C_2 = c_2 \sum_{k \in K} \sum_{i, j \in V} x_{ij}^k d_{ij} \quad (2)$$

其中, c_2 表示车辆单位距离运营成本; d_{ij} 表示从节点 i 到节点 j 之间的车辆行驶距离。

2.3.3. 货损成本 C_3

一般地, 生鲜产品的品质会随着时间推移发生变化, 在参考相关文献后, 本文将其生命周期函数表示为: $Q_t = Q_0 e^{-\beta t}$, 其中 Q_t 代表的是在 t 时刻生鲜产品的质量; Q_0 代表的是在离开配送中心时生鲜产品的最初始状态; β 代表生鲜的腐坏速率。为了便于研究, 本文假设运输时周围环境温度保持不变, 因此将 β 设定为一个特定值, 冷链产品的质量随时间的推移呈现指数变化的趋势[6]。考虑到运输和卸货过程中生鲜的腐坏速率不一致, 接下来将从两个角度对货损成本进行分析。

首先, 考虑运输中的情形, 本阶段冷藏车门全程关闭, 温度较为稳定, 货损成本 C_{31} 可以表示为:

$$C_{31} = P \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} y_i^k q_i \left(1 - e^{-\beta_1 (t_i^k - t_0^k)} \right) \quad (3)$$

其中, P 是单位产品价格; β_1 是车门关闭条件下产品腐坏速率; t_0^k 是第 k 辆车离开配送中心的时间点, t_i^k 表示第 k 辆车到达客户点 i 的时间点。

其次, 车辆在提供服务时, 冷藏车门打开, 产品的腐坏速率会加快, 此时的货损成本 C_{32} 可表示为:

$$C_{32} = P \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} y_i^k Q_i \left(1 - e^{-\beta_2 t_{si}} \right) \quad (4)$$

其中 Q_i 是车辆离开客户点 i 时剩余产品装载量; β_2 是车门打开条件下产品腐坏速率。

综上所述, 在冷链物流配送过程中, 总货损成本 C_3 可表示为:

$$C_3 = C_{31} + C_{32} = P \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} y_i^k \left[q_i \left(1 - e^{-\beta_1(t_i^k - t_0^k)} \right) + Q_i \left(1 - e^{-\beta_2 t_{si}} \right) \right] \quad (5)$$

2.3.4. 制冷成本 C_4

根据上述对于货损成本的考虑，接下来也将分别从运输和卸货过程两个角度对制冷成本进行分析。

首先，车辆在正常行驶时制冷成本 C_{41} 可表示为：

$$C_{41} = c_a \sum_{k \in K} \sum_{i, j \in V} x_{ij}^k t_{ij}^k \quad (6)$$

其中 c_a 表示车辆行驶过程中单位时间产生的制冷成本； t_{ij}^k 表示车辆 k 从节点 i 行驶至节点 j 的时间；

其次，车辆到达客户卸货点后，打开车门，进行卸货时的制冷成本 C_{42} 可表示为：

$$C_{42} = c'_a \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} y_i^k t_{si} \quad (7)$$

其中 c'_a 表示车辆卸货时单位时间产生的制冷成本； t_{si} 表示客户点 i 的服务时间；

综上所述，所有冷藏车辆在进行配送服务时产生的总制冷成本为：

$$C_4 = C_{41} + C_{42} = c_a \sum_{k \in K} \sum_{i, j \in V} x_{ij}^k t_{ij}^k + c'_a \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} y_i^k t_{si} \quad (8)$$

2.3.5. 碳排放成本 C_5

冷藏车在进行配送作业时的碳排放量与其燃油消耗量有关，即碳排放量 = 油耗量 × 碳排放系数。

车辆的燃油消耗主要体现在两个方面：包括车辆在正常行驶以及保证制冷设备正常工作的燃油消耗。

1) 在参考相关文献后，本文设定单位距离油耗量的计算公式为：

$$\rho(X) = \rho_0 + \frac{\rho^* - \rho_0}{Q} X \quad (9)$$

其中， ρ_0 是指运输车辆空载时单位距离所产生油耗； ρ^* 是指车辆满载时单位距离油耗水平； Q 是指车辆的最大装载量； X 是指车辆当前的载重重量。

因此，车辆在点 i 到点 j 之间行驶时，所产生的碳排放量 C_{p1} 可表示为：

$$C_{p1} = e_0 \rho(Q_{ij}) d_{ij} \quad (10)$$

其中， e_0 表示碳排放系数； Q_{ij} 表示车辆在点 i 到点 j 之间行驶时的货物重量； $\rho(Q_{ij})$ 表示车辆在点 i 和点 j 之间行驶时的单位距离油耗量。

2) 制冷设备产生的碳排放量，主要和运输距离、装载量有关。车辆在点 i 到点 j 之间行驶时，制冷产生的碳排放量 C_{p2} 可表示为：

$$C_{p2} = \omega Q_{ij} d_{ij} \quad (11)$$

其中， ω 表示制冷设备工作时单位重量货物在单位距离上所产生的碳排放量。

当冷藏车完成所有配送任务后返回出发地时，其载重量为 0，即当前过程中 $Q_{ij} = 0$ ，没有货物需要制冷，不会产生碳排放。所以返程过程中产生的碳排放量为 $e_0 \rho_0 d_{ij}$ 。

综上，在整个物流配送过程中，产生的总碳排放量 CP 可表示为：

$$CP = \sum_{k \in K} \sum_{i, j \in V} x_{ij}^k d_{ij} \left[e_0 \rho(Q_{ij}) + \omega Q_{ij} \right] \quad (12)$$

考虑该阶段碳税价格为 c_0 ，在配送过程中的总碳排放成本即可表示为：

$$C_5 = c_0 \sum_{k \in K} \sum_{i, j \in V} x_{ij}^k d_{ij} \left[e_0 \rho(Q_{ij}) + \omega Q_{ij} \right] \quad (13)$$

2.3.6. 惩罚成本 C_6

在实际运输过程中, 配送车辆可能会因为某些原因, 出现提前到达或者不能按时到达客户点的情况, 这些情况都会导致客户对配送服务的满意度下降。因此, 对于未能在客户要求时间内抵达的车辆, 将会产生一定的惩罚费用。

$[T_{ei}, T_{li}]$ 代表的是客户 i 的最满意到达时间窗, T_{ei} 是指客户 i 期望服务时间窗的最早时刻, T_{li} 是指期望服务时间窗的最晚时刻。 $[T'_{ei}, T'_{li}]$ 是指第 i 位客户可接受的服务时间窗, 同理, T'_{ei} 和 T'_{li} 则分别代表客户 i 可接受的最早与最晚时刻。若是配送车辆能在客户期望时间窗内抵达, 此时客户的满意度水平最高; 若配送服务在客户期望时间窗外, 但仍在可接受时间段内完成, 客户的满意度会出现一定的下降, 车辆需要承担违反时间所产生的惩罚成本。

惩罚成本主要和车辆在到达客户点的时间有关, 因此, 惩罚成本函数可表示为:

$$\varphi_i^k = \begin{cases} M, & t_i^k < T_{ei}, t_i^k > T_{li}' \\ \mu(T_{ei} - t_i^k), & T_{ei} \leq t_i^k < T_{li}' \\ 0, & T_{ei} \leq t_i^k \leq T_{li} \\ \mu'(t_i^k - T_{li}), & T_{li} < t_i^k \leq T_{li}' \end{cases} \quad (14)$$

其中 φ_i^k 表示车辆 k 服务客户点 i 的惩罚成本; μ 表示车辆提前到达产生的单位时间惩罚成本; μ' 表示车辆超出客户最晚服务时间窗的单位时间惩罚成本; M 设定为一个极大值。

综上所述, 本文推导出冷链物流配送过程中的总惩罚成本 C_6 为:

$$C_6 = \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} y_i^k \varphi_i^k \quad (15)$$

2.4. 目标函数及约束

通过前文对冷链配送过程中运输成本的分析, 建立数学模型如下:

$$\begin{aligned} \min C = & c_1 \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} x_{0j}^k + c_2 \sum_{k \in K} \sum_{i, j \in V} x_{ij}^k d_{ij} + P \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} y_i^k \left[q_i \left(1 - e^{-\beta_1(t_i^k - t_0^k)} \right) + Q_i \left(1 - e^{-\beta_2 t_{si}} \right) \right] \\ & + c_a \sum_{k \in K} \sum_{i, j \in V} x_{ij}^k t_{ij}^k + c'_a \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} y_i^k t_{si} + c_0 \sum_{k \in K} \sum_{i, j \in V} x_{ij}^k d_{ij} \left[e_0 \rho(Q_{ij}) + \omega Q_{ij} \right] + \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} y_i^k \varphi_i^k \end{aligned} \quad (16)$$

s.t.

$$\sum_{k \in K} y_i^k = 1, \quad \forall i \in N \quad (17)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in N} x_{0j}^k \leq m \quad (18)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in V} x_{ij}^k = 1, \quad \forall j \in N \quad (19)$$

$$\sum_{i \in N} y_i^k q_i \leq Q, \quad \forall k \in K \quad (20)$$

$$\sum_{i \in N} x_{i0}^k = \sum_{j \in N} x_{0j}^k \leq 1, \quad \forall k \in K \quad (21)$$

$$\sum_{i \in V} x_{ip}^k = \sum_{j \in V} x_{pj}^k, \quad \forall p \in N, k \in K \quad (22)$$

$$t_j^k = t_i^k + t_{si} + t_{ij}^k \quad (23)$$

$$t_{ij}^k = \frac{d_{ij}}{v} \quad (24)$$

其中, 式(16)表示目标函数的总成本最小; 式(17)表示每个客户只能由一辆车提供服务; 式(18)表示所有用于配送服务的车辆数目不超过配送中心的最大车辆数; 式(19)表示对所有客户都提供一次服务; 式(20)表示每辆车的装载量不得超过其额定载重量; 式(21)表示车辆从配送中心出发, 在完成配送后最终返回出发点; 式(22)表示到达和离开客户时的车辆数是一致的; 式(23)和(24)表示配送过程中不存在间断, 时间是连续的。

3. 遗传算法求解模型设置

3.1. 遗传算法染色体构造

在处理配送中心与门店信息时, 本文将配送中心的编码设置为 0, 门店的编号设置为 1, 2, 3, ..., N (在完成编码后, 门店编号不再改变), 由 K 辆冷藏车从配送中心出发对所有门店提供配送服务, 在完成任务后车辆回到出发点。此时一条配送线路的染色体长度为 $K + N + 1$ 。

3.2. 遗传算法种群初始化

在选用遗传算法后, 生成初始化种群是算法运行的关键环节。种群规模的大小与遗传算法的运算效率息息相关, 如果初始种群规模偏小, 样本容量不足, 算法的输出结果差异较大; 如果初始种群规模过大, 会出现算法计算量偏高、时间过长的问题。在参考相关文献后, 本文将初始种群规模设定为 100, 并通过随机方式生成为种群。

3.3. 遗传算法适应度计算

适应度值大小代表着染色体个体的优劣程度。一般地, 某个个体的适应度值越高, 则表示该个体越优; 适应度值低的个体质量也较低, 会逐渐淘汰。本文将冷链配送总配送成本作为目标函数, 该染色体的适应度值则是目标函数的倒数。

3.4. 遗传算法算子设计及算法终止设计

选择算子时采用考虑精英保留策略的轮盘赌选择法, 精英保留策略是指算法求解过程中的优秀个体留存到下一代计算中, 保留求解过程中潜在的最优解; 个体被选中的几率与相对适应度呈正相关, 且可以通过相对适应度来计算。最大迭代数设定为 300, 当迭代至 300 代时算法终止, 选择性能最好的染色体所对应的解当作最优解。

4. 实例验证

4.1. 门店距离及需求信息

X 公司位于武汉市汉口区, 其在武汉市多家门店提供冷链配送服务。本文选取 X 公司目前处于运营阶段的五条配送路线(分别为配送路线 1: $0 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 19 \rightarrow 20 \rightarrow 0$; 配送路线 2: $0 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 11 \rightarrow 10 \rightarrow 0$; 配送路线 3: $0 \rightarrow 8 \rightarrow 6 \rightarrow 0$; 配送路线 4: $0 \rightarrow 17 \rightarrow 18 \rightarrow 1 \rightarrow 7 \rightarrow 9 \rightarrow 16 \rightarrow 0$; 配送路线 5: $0 \rightarrow 12 \rightarrow 15 \rightarrow 14 \rightarrow 13 \rightarrow 0$), 共计 20 家客户门店进行配送路径优化。X 公司的配送中心和 20 个顾客门店的基本信息如表 1 所示。其中“0”代表 X 公司的配送中心, “1~20”代表需要提供服务的生鲜超市。

Table 1. Distribution center and customer information table
表 1. 配送中心与客户信息表

编码	经度	纬度	需求量/kg	期望时间窗	可接受时间窗	服务时间/min
0	114.289371	30.646886	0	0:00~24:00	0:00~24:00	0
1	114.313426	30.614688	1100	5:00~6:00	4:00~7:00	20
2	114.406944	30.642249	1250	5:20~6:10	4:00~7:00	25
3	114.381128	30.629602	1100	5:15~6:00	4:00~7:00	22
4	114.349741	30.597213	1200	5:00~6:00	4:00~7:00	20
5	114.331532	30.581061	1250	5:30~6:30	4:00~7:00	20
6	114.387005	30.600277	1450	5:10~6:00	4:30~7:00	18
7	114.269458	30.614287	800	5:15~6:00	4:00~7:00	15
8	114.313411	30.657419	1200	5:00~6:20	4:00~7:00	18
9	114.259837	30.584879	1300	5:30~6:40	4:00~7:00	26
10	114.353823	30.553470	850	6:45~7:50	5:00~8:00	12
11	114.359817	30.532377	1650	6:05~6:50	5:30~7:30	24
12	114.205881	30.602442	1500	5:15~6:15	4:00~7:00	20
13	114.272161	30.631795	1400	6:55~7:40	5:00~8:00	20
14	114.246591	30.645739	1200	6:15~7:00	6:00~7:30	16
15	114.300316	30.596639	2250	5:15~6:00	4:20~6:40	35
16	114.210655	30.636740	1400	7:15~7:45	6:30~8:00	15
17	114.339382	30.542672	1300	4:30~5:30	4:00~6:00	17
18	114.273048	30.555351	1400	4:50~6:00	4:00~7:00	20
19	114.261344	30.528856	2300	5:45~6:30	4:00~7:00	30
20	114.335267	30.647394	950	6:45~7:50	5:00~8:00	16

该企业采用解放 J6L 精英版 6.8 m 冷藏车作为主力物流车辆，通过查询工信部公布的信息，本文得到了解放 J6L 精英版 6.8 m 冷藏车的配置参数，具体数据如表 2 所示。

Table 2. Configuration parameters of refrigerated truck
表 2. 冷藏车配置参数

参数	值
总质量/kg	18,000 Kg
额定载重量/kg	9990 Kg
货箱尺寸/(mm*mm*mm)	6800 × 2420 × 2500 mm
油料类型	柴油
空载等速燃料消耗/(L/km)	18.5 L/100km
箱体容积/m ³	40 m ³
装备质量/kg	7880 kg
外形尺寸/(mm*mm*mm)	9160 × 2600 × 4000 mm
最高车速/(km/h)	90 km/h
综合燃料消耗量/(L/km)	27.5 (L/100km)

由于超市营业时间较早，所以生鲜产品一般在凌晨配送到店。通过分析门店的期望时间窗和可接受时间窗，配送任务一般发生在上午 4 点至 8 点，此时间段基本避开了早高峰，因此在研究中暂不考虑堵车问题对于配送时效的影响。该型号冷藏车最大载重为 9990 kg，假设车外环境温度为 18℃，车内冷藏温度设定为 5℃。由于服务对象都处于武汉市区，本文假定冷藏车以 30 km/h 的速度匀速行驶；参考 2024 年 1 月末发改委公布的湖北地区 0 号柴油价格为 7.48 元/升，将冷藏车行驶单位距离成本设定为 3.5 元/km，具体参数如表 3 所示。

Table 3. Parameters of refrigerated truck
表 3. 冷藏车参数

变量	变量名	值设定
Q	车辆的最大载重量	9990 kg
c_1	单位车辆固定成本	500 元/辆
c_2	单位距离成本	3.5 元/km
β_1	车门关闭条件下产品腐坏速率	0.02
β_2	车门打开条件下产品腐坏速率	0.03
c_a	运输过程单位时间制冷成本	8 元/小时
c'_a	卸货过程单位时间制冷成本	15 元/小时
μ	单位时间车辆提前到达所产生的惩罚成本	10 元/小时
μ'	单位时间车辆迟到所产生的惩罚成本	15 元/小时
v	车辆行驶速度	30 km/小时
ω	制冷设备单位货物在单位距离产生的碳排放量	0.0075 kg*km
P	单位产品价格	10 元/kg
ρ_0	车辆空载时的单位距离油耗	0.165 L/km
ρ^*	车辆满载时的单位距离油耗	0.377 L/km
e_0	单位燃油消耗产生的碳排放量	2.9 kg/L
c_0	碳税价格(每千克 CO ₂ 排放征税价格)	0.15 元/kg

4.2. 求解结果分析

本文根据上述 X 公司实际运行案例，采用 Matlab R2018a 软件对模型进行仿真实验。在遗传算法中，将种群规模设定为 100，交叉概率为 0.8，变异概率为 0.1，最大迭代次数为 300。为了减小偶然性造成的误差，本文对连续五次算法求解结果进行记录，如表 4 所示。

Table 4. Comparison of 5 consecutive solution results
表 4. 连续 5 次求解结果对比

序号	车辆使用数(辆)	运输总成本(元)	算法运行时间(s)
1	5	4235.73	23.11
2	5	4143.12	20.97
3	5	4154.14	19.12
4	5	4161.33	20.67
5	5	4167.94	20.18

由仿真结果可知，本文建立的模型和遗传算法是可行的。通过对上表连续 5 次的求解结果分析，选择运输总成本最小的一次结果作为本算例的最优解，其对应的优化过程图与最优路线图如图 1、图 2 所示。

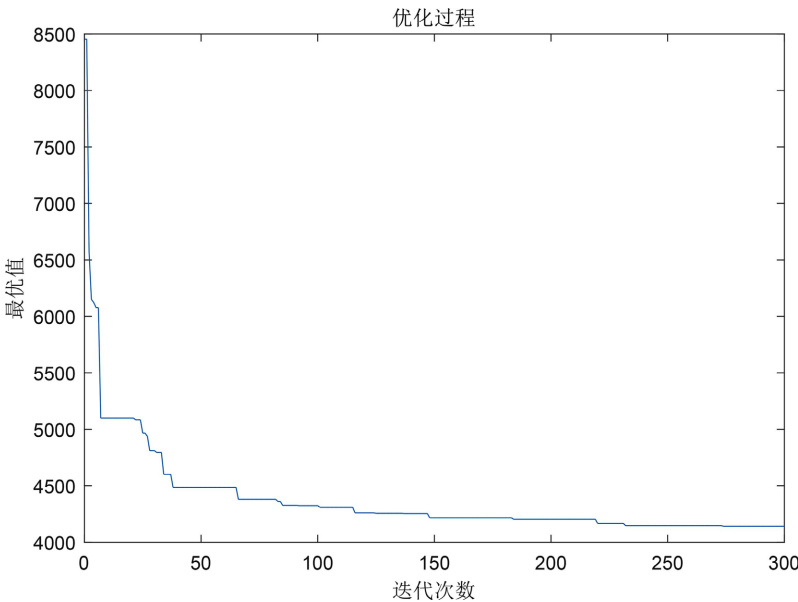


Figure 1. Optimization process diagram
图 1. 优化过程图

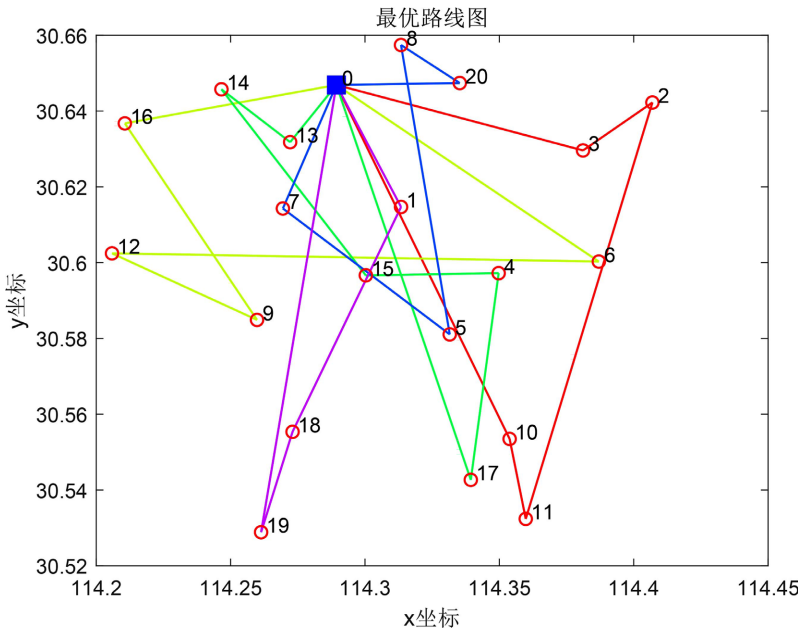


Figure 2. The best distribution path diagram
图 2. 最优配送路线图

当算法运行迭代至 230 代左右时，总配送成本趋于稳定，在运行 19.12 秒，完成 300 次迭代后，生成最优配送方案。此时，X 公司可用 5 辆冷藏车满足 20 家门店的配送需求，最小配送成本为 4143.12 元，各项子成本如表 5 所示。

Table 5. Cost analysis of the best distribution scheme
表 5. 最优配送方案成本分析

成本	金额
车辆固定成本	2500
运输成本	626.79
货损成本	366.87
制冷成本	102.03
碳排放成本	547.43
惩罚成本	0
总成本	4143.12

具体配送路线为：

配送路线 1 (图 2 红线所示)：0 → 3 → 2 → 11 → 10 → 0

配送路线 2 (图 2 黄线所示)：0 → 6 → 12 → 9 → 16 → 0

配送路线 3 (图 2 绿线所示)：0 → 17 → 4 → 15 → 14 → 13 → 0

配送路线 4 (图 2 蓝线所示)：0 → 7 → 5 → 8 → 20 → 0

配送路线 5 (图 2 紫线所示)：0 → 1 → 18 → 19 → 0

4.3. 数据对比分析

通过对 X 公司原有规划的 5 个条线进行分析，在同样的门店需求下，总配送成本为 4522 元。优化前与优化后的各项物流成本对比如表 6 所示：

Table 6. Cost comparison before and after optimization
表 6. 优化前后成本对比

成本项目	优化前成本	优化后成本	成本差异%
车辆固定成本	2500	2500	-
运输成本	645.13	626.79	-2.84%
货损成本	374.22	366.87	-1.96%
制冷成本	140.34	102.03	-27.30%
碳排放成本	577.38	547.43	-5.19%
惩罚成本	284.94	0	-100.00%
总成本	4522	4143.12	-8.38%

由上表可知，在考虑碳排放和时间窗的约束后，除了车辆固定成本未发生变化外，其余各项成本较优化前都有所下降。其中运输成本下降了 2.84%，货损成本下降了 1.96%，制冷成本下降了 27.3%，碳排放成本下降了 5.19%，惩罚成本下降了 100%，总成本降低了 8.38%。

5. 结论

本文针对冷链物流配送成本较高以及配送不畅导致客户满意度不高的问题，在考虑时间窗、碳排放和货损成本的基础上，构建了以总配送成本最小为目标的生鲜农产品冷链物流配送路径优化模型进行研

究。以武汉市 X 公司冷链物流配送中心为例，对公司现有的 5 条配送路线上共 20 家门店进行分析，并通过 MATLAB 软件进行模型求解。通过对比求解结果和 X 公司现有的配送方案，得出优化后的配送路径运输距离更短、总配送成本更低，证明了本文考虑碳排放与时间窗约束模型和算法的可行性。对 X 企业未来的物流配送优化有一定的参考意义。

参考文献

- [1] Ning, T., An, L. and Duan, X.D. (2021) Optimization of Cold Chain Distribution Path of Fresh Agricultural Products under Carbon Tax Mechanism: A Case Study in China. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, **40**, 10549-10558.
- [2] 李想, 闵德权, 张祺. 随机需求下半开放式冷链物流车辆路径优化[J]. 包装工程, 2022, 43(7): 10.
- [3] 沈丽, 李成玉, 甘彦, 等. 考虑货损和碳排放的生鲜产品配送路径优化[J]. 上海海事大学学报, 2021, 42(1): 44-49+70.
- [4] 邓红星, 周洁, 胡翼. 考虑碳排放的生鲜农产品冷链物流配送路径优化模型[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2023, 37(2): 289-297.
- [5] Gharehyakheh, A., Krejci, C.C., Cantu, J., et al. (2020) A Multi-Objective Model for Sustainable Perishable Food Distribution Considering the Impact of Temperature on Vehicle Emissions and Product Shelf Life. *Sustainability*, **12**, 6668. <https://doi.org/10.3390/su12166668>
- [6] 康凯, 韩杰, 普玮, 等. 生鲜农产品冷链物流低碳配送路径优化研究[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(2): 259-265.