

绿色包装与循环经济

基于车辆共享的生鲜商品多车舱装载配送路径优化问题

王勇^{a,b}, 谢红霞^{a,b}, 苟梦圆^{a,b}, 赵小琴^{a,b}

(重庆交通大学 a.经济与管理学院 b.绿色物流智能技术重庆市重点实验室, 重庆 400074)

摘要: **目的** 针对生鲜商品物流配送优化研究在车辆共享调度和多车舱装载配送合理结合方面存在的不足, 研究了基于车辆共享的生鲜商品多车舱装载配送路径优化问题。**方法** 首先, 结合生鲜商品温控条件和多车舱装载约束, 建立了生鲜商品多车舱装载配送的物流运营总成本最小化的数学模型; 其次, 设计了蚁群-禁忌搜索混合算法求解模型, 并引入选择性赋予机制和车辆共享策略以提高算法的寻优性能; 然后, 通过与粒子群算法、大邻域搜索算法和差分进化算法的对比分析, 验证了所提模型和算法的有效性; 最后, 结合实例, 比较分析了生鲜商品多车舱装载配送优化前后的相关指标, 提出车辆路径优化方案, 并从服务时间段划分和车舱容量选择 2 方面进行敏感性分析。**结果** 优化后的物流运营总成本降低了 43.53%, 平均装载率提高了 25%, 并验证了合理划分服务时间段和选择车舱容量可有效提高车辆平均装载率和降低生鲜商品价值损失。**结论** 所提模型、算法和车辆共享策略可合理规划配送路径, 降低运营总成本和生鲜商品价值损失, 进而为基于车辆共享的生鲜商品多车舱装载配送路径优化问题提供方法参考和理论支撑。

关键词: 生鲜商品配送; 多车舱装载; 车辆共享; 车辆路径问题; 蚁群-禁忌搜索混合算法

中图分类号: F505; TB48

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2025)03-0210-11

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2025.03.025

Fresh Commodity Multi-compartment Loading Distribution Routing Optimization Problem Based on Vehicle Sharing

WANG Yong^{a,b}, XIE Hongxia^{a,b}, GOU Mengyuan^{a,b}, ZHAO Xiaoqin^{a,b}

(a. School of Economics and Management, b. Chongqing Key Laboratory of Intelligent Logistics Network, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

ABSTRACT: The work aims to explore the fresh commodity multi-compartment loading distribution routing optimization problem based on vehicle sharing to deal with the deficiencies of fresh commodities logistics distribution optimization research in the reasonable combination of vehicle sharing scheduling and multi-compartment loading distribution. First, a mathematical model to minimize the operating cost was established based on the temperature control conditions of fresh commodities and the loading constraints of the multi-compartment. Second, a hybrid ant colony-tabu search algorithm was designed to solve the model, and a selective assignment mechanism and a vehicle-sharing strategy were introduced to improve the optimization capability. Then, the effectiveness of the proposed model and algorithm was verified through comparative analysis with particle swarm optimization, large neighborhood search algorithm, and differential evolution algorithm. Finally, combined with examples, relevant indexes before and after optimization were compared and analyzed, a vehicle route optimization scheme was proposed, and a sensitivity analysis of compartment capacity was conducted. The optimized operating cost was reduced by 43.53%, the average loading rate was increased by

收稿日期: 2024-09-24

基金项目: 国家自然科学基金 (72371044, 71871035); 重庆市教委科学技术研究重大项目 (KJZD-M202300704); 巴渝学者青年项目 (YS2021058); 重庆市研究生科研创新项目 (CYS240511)

25%, and the reasonable segmentation of service period and selection of compartment capacity could effectively improve the average loading rate of vehicles and reduce the value loss of fresh commodities. The proposed model, algorithm, and vehicle-sharing strategy can reasonably schedule the distribution route and reduce the operating cost and value loss of fresh commodity, which provides methodological references and theoretical supports for the fresh commodities multi-compartment loading distribution routing optimization based on vehicle sharing.

KEY WORDS: fresh commodity distribution; multi-compartment loading; vehicle sharing; vehicle routing problem; hybrid ACO-TS algorithm

随着消费者对食品安全的日益重视,高质量、新鲜的生鲜商品成为市场新宠,进而导致生鲜商品的物流需求急剧增加。作为保障食品供应链安全的关键环节,生鲜商品配送的重要性日益凸显^[1]。由于生鲜商品具有易腐性和时效性等特征,在配送过程中需提供适宜的车舱温度,进而确保生鲜商品的新鲜度和品质。同时,不同种类生鲜商品的存储温度区间存在显著差异,传统单车舱冷藏车辆无法同时满足多种温度需求的生鲜商品配送需求,多车舱冷藏车可通过设置不同舱室温度,同时满足多类型生鲜商品的温控配送需求。此外,由于不同生鲜商品需求的客户服务时间窗分布存在差异,通过合理的车辆共享调度策略设计和生鲜商品的多车舱装载配送,能有效满足客户的多样化配送需求,进而有助于提高生鲜商品物流配送的效率和响应能力。因此,研究基于车辆共享的生鲜商品多车舱装载配送路径优化问题有利于建立低损耗、高效的城市生鲜商品物流配送体系,进而有助于推动生鲜商品物流系统的健康可持续发展。国内外学者在生鲜商品物流配送车辆路径和多车舱装载的共享调度2方面进行了一系列相关研究。

在生鲜商品物流配送车辆路径研究方面,Chen等^[2]考虑生鲜商品的易腐性,构建了价值损失最小化的数学模型,并提出了蚁群算法求解模型。Ahmadi-Javid等^[3]从生鲜商品时效性角度出发,构建了考虑客户时间窗约束的总成本最小化模型。鲍春玲等^[4]以总成本最小化为优化目标,建立了生鲜商品物流配送的车辆路径规划模型,研究了有限车辆调度的生鲜商品配送问题。Liu等^[5]针对生鲜商品物流配送车辆路径问题,建立了运营成本最小化的数学模型,并提出了一种自适应蚁群算法求解模型。Guo等^[6]研究了考虑时间窗约束的生鲜商品配送问题,构建了运营成本最小化的数学模型,并设计了大邻域搜索-最短路径混合算法求解模型。李想等^[7]在考虑客户时间窗约束和商品质量约束的基础上,构建了包含惩罚成本和温控成本的总成本最小化优化模型,并设计了模拟退火算法求解模型。Liang等^[8]探讨了考虑客户满意度的生鲜商品物流配送车辆路径问题,建立了总成本最小化和客户满意度最大化的双目标数学模型,进而设计了变邻域搜索-模拟退火混合算法求解模型。丁秋雷等^[9]考虑生鲜商品配送车辆装载率,构建了总成本最小化和客

户满意度最大化的双目标优化模型,并设计了蚁群算法优化配送路径。上述文献主要集中于从生鲜商品时效性和温控特性方面探究生鲜商品物流配送车辆路径优化问题,而在生鲜商品多车舱配送车辆路径优化与车辆资源共享调度相结合方面还有待进一步深入研究。

在考虑多车舱装载的车辆共享调度相关研究方面,王旭坪等^[10]建立了多车舱装载配送的车辆路径优化模型,并引入车辆共享调度策略、设计大邻域搜索算法求解模型,进而最小化总成本。肖建华等^[11]建立了以总成本最小化为目标的优化模型,设计了大邻域搜索算法求解模型,并通过车辆共享机制实现车辆在多周期间的共享调度。Chen等^[12]构建了考虑车辆共享的配送车辆路径优化模型,并提出了模拟退火-变邻域搜索混合算法求解模型。Wang等^[13]构建了总成本最小化和车辆使用数最小化的双目标优化模型,并设计了集成车辆共享调度的禁忌搜索-非支配排序遗传混合算法求解模型以解决生鲜商品配送问题。Zhang等^[14]以总成本最小化为目标,研究了考虑运输资源共享的车辆路径问题。Chen等^[15]针对多车舱配送车辆路径问题,建立了运输成本最小化的数学优化模型,并设计了模拟退火-变邻域搜索混合算法求解模型。王锋等^[16]建立了总成本最小化的数学模型,研究了生鲜商品多车舱装载配送问题,进而提出了变邻域搜索算法求解模型。Chen等^[17]构建了总成本最小化的数学模型,并设计了大邻域搜索算法进行模型求解。上述文献在多车舱车辆共享调度方面进行了一系列的探索研究,而在集成生鲜商品配送与多车舱装载的车辆资源共享调度方面还有待拓展。

本研究在优化生鲜商品多车舱装载配送路径过程中,首先,基于生鲜商品温控类型和配送车辆装载约束,建立了生鲜商品物流运营总成本最小化的数学模型;其次,提出了一种集成选择性赋予机制和车辆共享策略的蚁群-禁忌搜索混合算法(Hybrid Ant Colony Optimization-Tabu Search Algorithm, ACO-TS)求解模型,进而研究了基于车辆共享的生鲜商品多车舱装载配送路径优化问题;然后,通过与粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)、大邻域搜索算法(Large Neighborhood Search Algorithm, LNS)和差分进化算法(Differential Evolutionary Algorithm, DE)的

对比分析,验证了所提模型和算法的有效性;最后,结合实例研究了基于车辆共享的生鲜商品多车舱装载配送路径优化方案,并从服务时间段划分和车舱容量选择2方面进行了敏感性分析,进而为基于车辆共享的生鲜商品多车舱装载配送路径优化提供了新的研究思路。

1 问题描述与模型构建

1.1 问题描述

针对生鲜客户需求的多样性和生鲜商品适宜存储条件的异质性,生鲜配送中心采用多车舱冷藏车辆提供温控配送服务,以满足多种类型生鲜商品配送需求。同时,基于生鲜商品的类型,设定适宜的车舱温度,从而保证生鲜商品品质,有效降低生鲜商品价值损失。此外,结合客户时间窗的特点,将生鲜配送中心的配送时间划分为多个服务时间段,并结合客户的地理位置、生鲜商品需求类型和多车舱冷藏车装载限制,引入配送车辆共享策略实现多车舱冷藏车在多服务时间段的共享调度,进而减少配送车辆使用数,降低生鲜商品物流配送运营总成本并提高生鲜商品物流配送网络的运营效率。基于车辆共享的生鲜商品多车舱装载配送路径优化前后对比如图1所示。

相比于基于车辆共享的生鲜商品多车舱装载配送路径优化前(图1a),优化后的生鲜商品多车舱装载配送路径方案(图1b)有效降低了配送次数和配送车辆使用数,减少了车辆交叉配送和违反客户时

间窗现象,并实现了配送车辆在多服务时间段的共享调度。

1.2 模型构建

模型构建的相关变量定义见表1。

本研究以运营总成本 M 最小化为优化目标,构建基于车辆共享的生鲜商品多车舱装载配送路径优化模型见式(1)。

$$\min M = m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5 + m_6 \quad (1)$$

式中: m_1 为配送成本; m_2 为司机的服务成本; m_3 为生鲜商品的价值损失^[6]; m_4 为温控成本; m_5 为违反客户时间窗的惩罚成本; m_6 为多车舱冷藏车的租赁成本,具体见式(2)~(7)。

$$m_1 = \sum_{i,j \in I_0} \sum_{v \in V'} \sum_{r \in R_v^w} \sum_{w \in W} x_{ijvr}^w \cdot s_{ij} \cdot \delta \quad (2)$$

$$m_2 = \sum_{i,j \in I_0} \sum_{v \in V'} \sum_{r \in R_v^w} \sum_{w \in W} x_{ijvr}^w \cdot (s_{ij} / \sigma) \cdot o \quad (3)$$

$$m_3 = \sum_{i \in I} \sum_{v \in V'} \sum_{r \in R_v^w} \sum_{l \in L} \sum_{h \in H} \sum_{w \in W} y_{ivrlh}^w \cdot \left[1 - e^{-\theta_{lf} \cdot (At_{ivrlh}^w - Dt_{ivrlh}^w)} \right] \cdot d_{ihf} \cdot \alpha_f \quad (4)$$

$$m_4 = \sum_{i \in I_0} \sum_{j \in I} \sum_{v \in V'} \sum_{r \in R_v^w} \sum_{h \in H} \sum_{l \in L} \sum_{w \in W} x_{ijvr}^w \cdot y_{jvrlh}^w \cdot T_{ijvr}^w \cdot p_h \quad (5)$$

$$m_5 = \sum_{i \in I} \sum_{v \in V'} \sum_{r \in R_v^w} \sum_{w \in W} C_1 \cdot \left[\max \{ et_i - At_{ivrlh}^w, 0 \} \right] + \sum_{i \in I} \sum_{v \in V'} \sum_{r \in R_v^w} \sum_{w \in W} C_2 \cdot \left[\max \{ At_{ivrlh}^w - lt_i, 0 \} \right] \quad (6)$$

$$m_6 = \max_{w \in W} \{ U^w \} \cdot \kappa \quad (7)$$

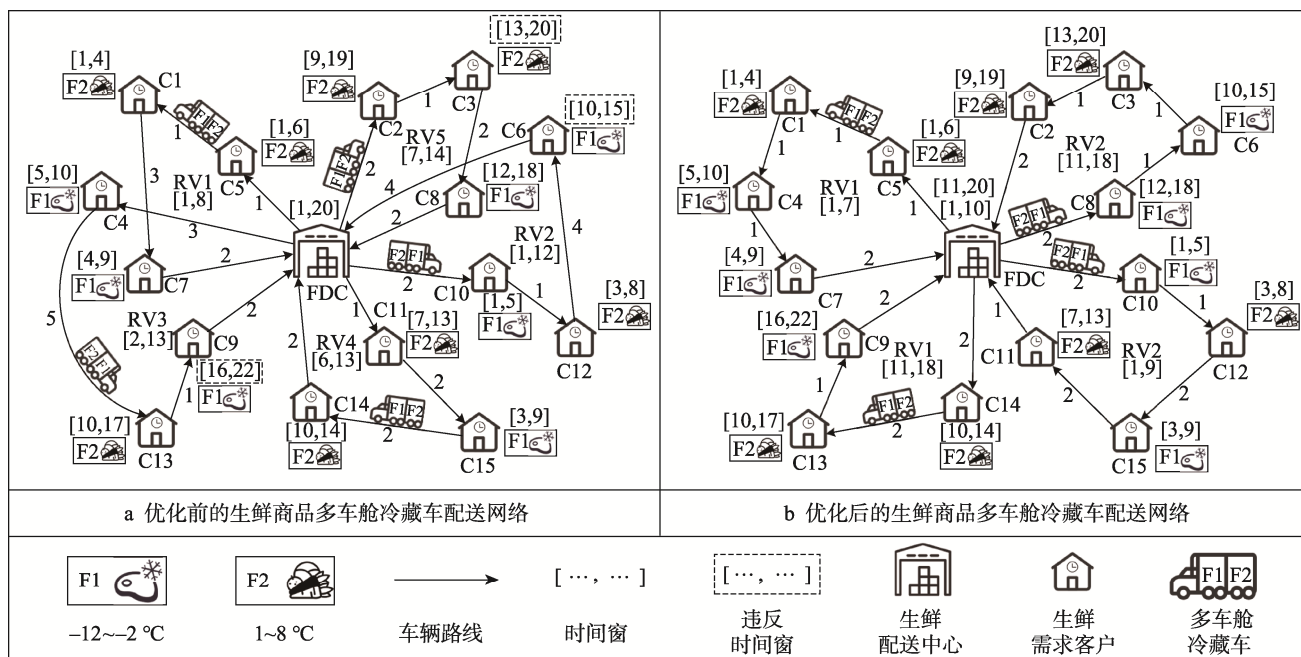


图1 基于车辆共享的生鲜商品多车舱装载配送路径优化前后对比

Fig.1 Comparison before and after optimization of fresh commodity multi-compartment loading distribution routing optimization problem based on vehicle sharing

表 1 变量定义
Tab.1 Variable definitions

集合	定义
I	客户点集合, $i \in I$
I_0	客户点和生鲜配送中心构成的集合, $I_0 = I \cup \{0\}$, 0 表示生鲜配送中心
V	多车舱冷藏车的集合, $v \in V$
L	多车舱冷藏车的车舱集合, $l \in L$
H	温控区间的集合, $h \in H$
F	生鲜商品种类的集合, $f \in F$
W	生鲜配送中心服务时间段的集合, $w \in W$
U^w	在服务时间段 w 内, 生鲜配送中心使用的多车舱冷藏车的集合, $w \in W$
R_v^w	在服务时间段 w 内, 多车舱冷藏车 v 的配送路径集合, $v \in V, w \in W$
Γ_{vr}^w	在服务时间段 w 内, 多车舱冷藏车 v 在配送路径 r 中所服务客户点的集合, $\Gamma_v^w \subset I, v \in V, r \in R_v^w, w \in W$
参数	定义
s_{ij}	节点 i, j 之间的距离, $i, j \in I_0, i \neq j$
σ	多车舱冷藏车的行驶速度
δ	多车舱冷藏车单位距离的行驶成本(元/km)
o	多车舱冷藏车司机单位时间的服务成本(元/h)
κ	多车舱冷藏车的租赁费用(元/辆)
p_h	在温控区间 h 下, 车舱的单位时间温控成本, $h \in H$ (元/h)
θ_{hf}	在温控区间 h 下, 生鲜商品 f 的新鲜度衰减系数, $h \in H, f \in F$
α_f	生鲜商品 f 的价值, $f \in F$
d_{ihf}	客户 i 对温控区间为 h 的生鲜商品 f 的需求量, $i \in I, h \in H, f \in F$
Q	生鲜配送中心的最大配送量
β_l	多车舱冷藏车的车舱 l 的最大装载量, $l \in L$
∂_l	多车舱冷藏车的车舱 l 的最小装载率, $l \in L$
C_1	单位时间的车辆早到惩罚成本(元/h)
C_2	单位时间的车辆晚到惩罚成本(元/h)
e	自然对数
MM	一个足够大的正数
$ U^w $	在服务时间段 w 内, 生鲜配送中心使用多车舱冷藏车的数量, $w \in W$
$ R_v^w $	在服务时间段 w 内, 多车舱冷藏车 v 的配送路径数量, $v \in V, w \in W$
$ \Gamma_{vr}^w $	在服务时间段 w 内, 多车舱冷藏车 v 在路径 r 中服务客户点的数量, $\Gamma_v^w \subset I, v \in V, r \in R_v^w, w \in W$
Dt_{0vr}^w	在服务时间段 w 内, 多车舱冷藏车 v 在路径 r 中从生鲜配送中心出发的时间, $v \in V, r \in R_v^w, w \in W$
Rt_{0vr}^w	在服务时间段 w 内, 多车舱冷藏车 v 在路径 r 中回到生鲜配送中心的时间, $v \in V, r \in R_v^w, w \in W$
At_{ivr}^w	在服务时间段 w 内, 多车舱冷藏车 v 在路径 r 中到达节点 i 的时间, $i \in I_0, v \in V, r \in R_v^w, w \in W$
Tt_{ijvr}^w	在服务时间段 w 内, 多车舱冷藏车 v 在路径 r 中从节点 i 到 j 的时间, $i, j \in I_0, v \in V, r \in R_v^w, w \in W$
$[ET_0^w, LT_0^w]$	在服务时间段 w 内, 生鲜配送中心的服务时间窗, $w \in W$
$[et_i, lt_i]$	客户点 i 的服务时间窗, $i \in I$
决策变量	定义
x_{ijv}^w	若在服务时间段 w 内, 多车舱冷藏车 v 从节点 i 驶向 j , 则 $x_{ijv}^w = 1$, 否则, $x_{ijv}^w = 0$, $i, j \in I_0, v \in V, w \in W$
x_{ijvr}^w	若在服务时间段 w 内, 多车舱冷藏车 v 在路径 r 中从节点 i 驶向 j , 则 $x_{ijvr}^w = 1$, 否则, $x_{ijvr}^w = 0$, $i, j \in I_0, v \in V, r \in R_v^w, w \in W$
y_{ivrlh}^w	若在服务时间段 w 内, 多车舱冷藏车 v 在路径 r 中车舱 l 以温控区间 h 服务客户点 i , 则 $y_{ivrlh}^w = 1$, 否则, $y_{ivrlh}^w = 0$, $i \in I, v \in V, r \in R_v^w, l \in L, h \in H, w \in W$
b_v^w	若在服务时间段 w 内, 多车舱冷藏车 v 服务客户, 则 $b_v^w = 1$, 否则, $b_v^w = 0$, $v \in V, w \in W$

约束条件见式 (8) ~ (26)。其中, 式 (8) 表示每个客户点只被冷藏车访问 1 次; 式 (9) 表示冷藏车 v 的车舱 l 在 1 次配送任务中只能设定 1 个温控区间; 式 (10) 表示多车舱冷藏车各车舱的装载量不得超过其装载量限制; 式 (11) 表示多车舱冷藏车各车舱的装载率约束; 式 (12) 表示所有客户的生鲜商品需求不得超过生鲜配送中心的配送能力; 式 (13) 表示任意服务时间段内冷藏车的路线顺序约束; 式 (14) 表示 1 个服务时间段内冷藏车 v 行驶的路径总数; 式 (15) 表示每个周期内的冷藏车使用数; 式 (16) 表示冷藏车须从生鲜配送中心出发, 完成配送任务后须回到生鲜配送中心; 式 (17) 表示冷藏车的流量约束; 式 (18) 表示消除线路上的子回路; 式 (19) ~ (20) 表示冷藏车的配送时间连续性; 式 (21) ~ (22) 表示冷藏车须在生鲜配送中心的服务时间窗内进行客户服务; 式 (23) ~ (26) 表示变量约束。

$$\sum_{i \in I_0} \sum_{v \in V} \sum_{r \in R_v^w} \sum_{w \in W} x_{jvr}^w = 1, \forall j \in I \quad (8)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{h \in H} y_{ivrlh}^w = 1, \forall v \in V, r \in R_v^w, l \in L, w \in W \quad (9)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{h \in H} \sum_{f \in F} y_{ivrlh}^w \cdot d_{ihf} \leq \beta_l, \forall v \in V, r \in R_v^w, l \in L, w \in W \quad (10)$$

$$\left(\sum_{i \in I} \sum_{h \in H} \sum_{f \in F} y_{ivrlh}^w \cdot d_{ihf} \right) / \beta_l \geq \partial_l, \forall v \in V, r \in R_v^w, l \in L, w \in W \quad (11)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{v \in V} \sum_{r \in R_v^w} \sum_{l \in L} \sum_{h \in H} \sum_{f \in F} \sum_{w \in W} y_{ivrlh}^w \cdot d_{ihf} \leq Q \quad (12)$$

$$\sum_{i \in I} x_{0ivr}^w \geq \sum_{j \in I} x_{jv(r+1)}^w, \forall v \in V, r \in R_v^w, r \neq |R_v^w|, w \in W \quad (13)$$

$$\sum_{i \in I} x_{0iv}^w = |R_v^w|, \forall v \in V, w \in W \quad (14)$$

$$\sum_{v \in V} b_v^w \cdot \left(\min \left\{ |R_v^w|, 1 \right\} \right) = |U^w|, w \in W \quad (15)$$

$$\sum_{j \in I} x_{0jvr}^w = \sum_{j \in I} x_{j0vr}^w, \forall v \in V, r \in R_v^w, w \in W \quad (16)$$

$$\sum_{i \in I_0} x_{ijvr}^w - \sum_{i \in I_0} x_{jivv}^w = 0, \forall j \in I, i \neq j, v \in V, r \in R_v^w, w \in W \quad (17)$$

$$\sum_{i, j \in \Gamma_v^w} x_{jivv}^w \leq |\Gamma_v^w| - 1, \forall v \in V, r \in R_v^w, w \in W \quad (18)$$

$$At_{ivr}^w + Tt_{jvr}^w - MM \cdot (1 - x_{ijvr}^w) \leq At_{jvr}^w, \forall i, j \in I_0, v \in V, r \in R_v^w, w \in W \quad (19)$$

$$At_{ivr}^w + Tt_{jvr}^w + MM \cdot (1 - x_{ijvr}^w) \geq At_{jvr}^w, \forall i, j \in I_0, v \in V, r \in R_v^w, w \in W \quad (20)$$

$$ET_0^w \leq Dt_{0vr}^w \leq LT_0^w, \forall v \in V, r \in R_v^w, w \in W \quad (21)$$

$$ET_0^w \leq Rt_{0vr}^w \leq LT_0^w, \forall v \in V, r \in R_v^w, w \in W \quad (22)$$

$$x_{jv}^w = \{0, 1\}, \forall i, j \in I_0, v \in V, w \in W \quad (23)$$

$$x_{jvr}^w = \{0, 1\}, \forall i, j \in I_0, v \in V, r \in R_v^w, w \in W \quad (24)$$

$$y_{ivrlh}^w = \{0, 1\}, \forall i \in I, v \in V, r \in R_v^w, l \in L, h \in H, w \in W \quad (25)$$

$$b_v^w = \{0, 1\}, \forall v \in V, w \in W \quad (26)$$

2 ACO-TS 混合算法

本研究探讨问题涉及多品类生鲜商品和多车舱分区存储配送等特征, 对求解算法的搜索能力与收敛速度具有较高要求^[17]。传统的 ACO 算法具有全局搜索能力强、鲁棒性好等特点, 但易陷入局部最优^[18-19]。然而, 将 ACO 的全局搜索能力与 TS 算法的局部寻优能力^[20]相结合, 有助于提高算法性能、增强解的多样性。此外, 本研究设计的 ACO-TS 混合算法引入了算法间的选择性赋予机制^[21], 有效加速了算法收敛, 并基于多车舱装载配送特点, 设计了状态转移概率计算模型和车辆共享策略, 提高了解的质量, 算法流程如图 2 所示。

2.1 状态转移概率

本研究结合信息素浓度、节点间距离、客户时间窗匹配度、客户时间窗跨度和装载率, 设计了转移概率计算公式, 进而辅助蚂蚁构造优化路径^[22]。蚂蚁从节点 i 移动到节点 j 的状态转移概率见式 (27) ~ (31)。

$$p_{ij} = \begin{cases} \frac{(\tau_{ij})^{\alpha} \cdot (\omega_{ij})^{\mu} \cdot (\zeta_{ij})^{\nu} \cdot (wd_j)^{\rho} \cdot (\partial_j)^{\gamma}}{\sum_{u \in AL_i} (\tau_{iu})^{\alpha} \cdot (\omega_{iu})^{\mu} \cdot (\zeta_{iu})^{\nu} \cdot (wd_u)^{\rho} \cdot (\partial_u)^{\gamma}}, & j \in AL_i \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (27)$$

$$\omega_{ij} = (s_{ij})^{-1} \quad (28)$$

$$\zeta_{ij} = \begin{cases} \left(et_j - At_{jvr}^{\pi} + 1 \right)^{-1}, & At_{jvr}^{\pi} < et_j \\ 1, & et_j \leq At_{jvr}^{\pi} \leq lt_j \\ \left(At_{jvr}^{\pi} - lt_j + 1 \right)^{-1}, & lt_j < At_{jvr}^{\pi} \end{cases} \quad (29)$$

$$wd_j = (lt_j - et_j)^{-1} \quad (30)$$

$$\partial_j = \frac{\chi_i + d_{jhf}}{\beta_l} \quad (31)$$

式中: p_{ij} 为蚂蚁位于节点 i 时选择节点 j 作为下一服务节点的概率; AL_i 为满足装载量和温控需求的候选节点集合; τ_{ij} 表示边 ij 上的信息素浓度; ω_{ij} 表示节点 i 与 j 之间距离的倒数, 即蚂蚁倾向前往距离较近的节点; ζ_{ij} 表示时间窗的匹配度; wd_j 表示节点 j 时间窗跨度的倒数, 即蚂蚁优先前往时间窗要求严格的节点; ∂_j 表示节点 j 被选中为下一个服务节点后

车舱的装载率, χ_i 表示蚂蚁在节点 i 的已知车辆或车舱的装载量; ϑ 、 μ 、 ν 、 φ 、 γ 为权重系数。

2.2 车辆共享策略

为提高生鲜配送中心的配送车辆利用率, 本研究设计了多车舱冷藏车辆共享策略, 以实现多车舱冷藏车在不同服务时间段共享调度。首先, 获取生成的多

车舱冷藏车配送路径, 并结合生鲜配送中心的服务时间段和各配送路径的起止时间, 将路径划归到生鲜配送中心相应的服务时间段; 其次, 计算每条配送路径的服务时间窗中值; 最后, 按照配送路径时间窗中值的先后顺序, 派遣多车舱冷藏车辆在各服务时间段配送任务, 以实现配送车辆的高效利用, 配送车辆共享调度策略如图 3 所示。

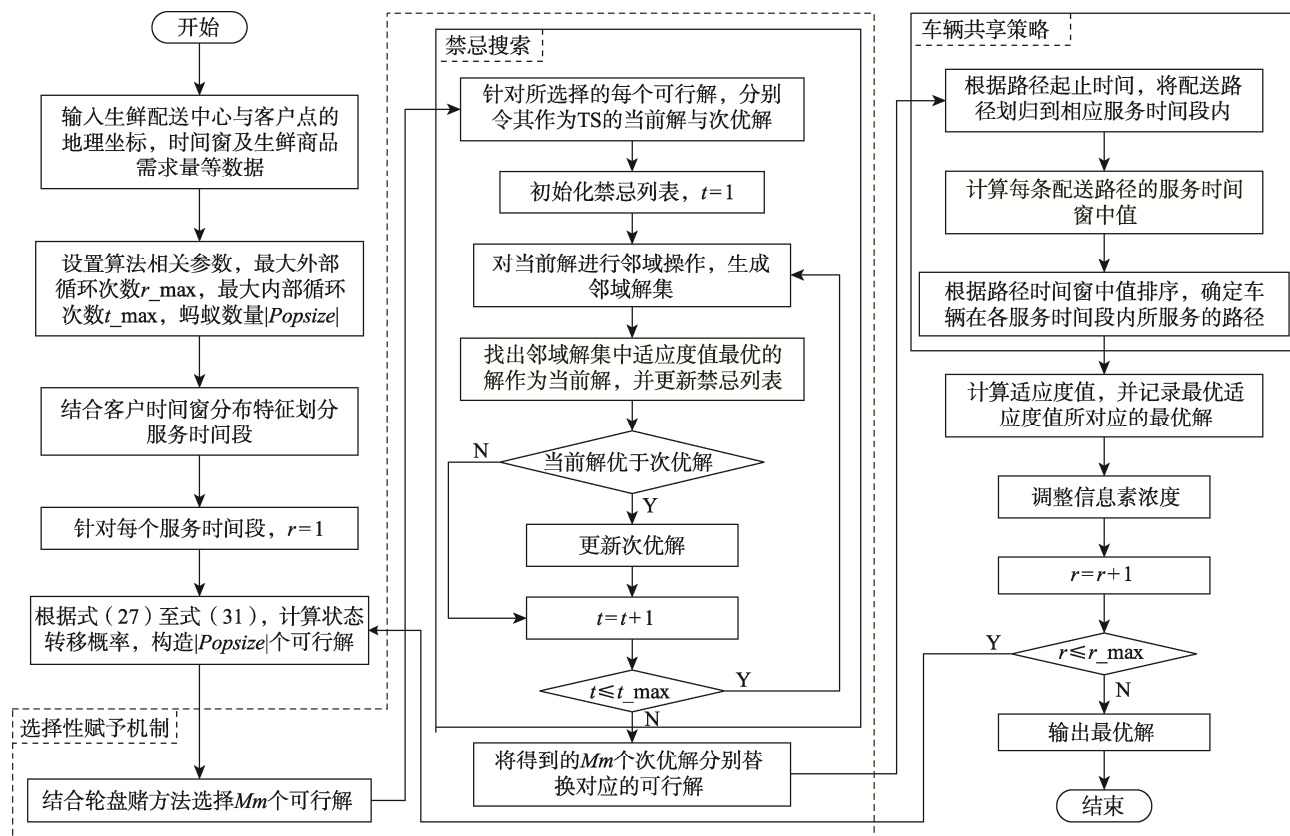


图 2 ACO-TS 混合算法流程
Fig.2 Flowchart of hybrid ACO-TS algorithm

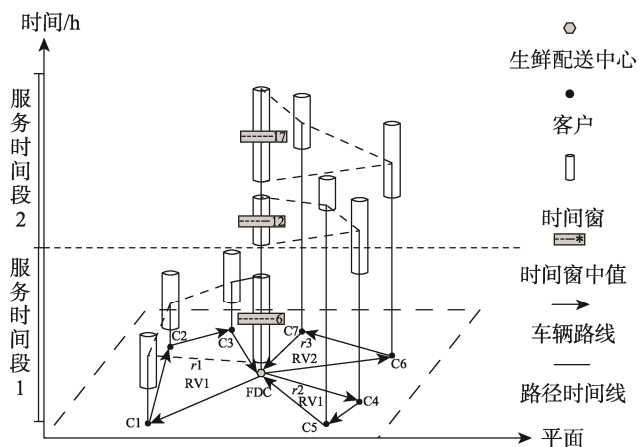


图 3 车辆共享策略示意图
Fig.3 Schematic of vehicle sharing strategy

在图 3 中, 生鲜配送中心的服务时间划分为 2 个时间段, 共有 7 个生鲜商品需求客户, 3 条配送

路径。首先, 基于生鲜配送中心服务时间段和配送路径的起止时间, 将 r_1 划归到服务时间段 1, 将 r_2 和 r_3 划归到服务时间段 2; 其次, 计算配送路径的服务时间窗中值, r_1 、 r_2 、 r_3 的时间窗中值分别为 6、12 和 17; 最后, 按照配送路径时间窗中值的先后顺序, 即 $r_1 < r_2 < r_3$, 在各服务时间段安排多车舱冷藏车实现车辆共享调度, 则派遣 RV1 服务 r_1 与 r_2 , RV2 服务 r_3 。

2.3 算法检验

为了验证 ACO-TS 混合算法的有效性, 将 ACO-TS 混合算法与 PSO^[23]、LNS^[24]和 DE^[25]算法进行比较, 算法参数设置见表 2。结合问题特征, 在 Solomon 数据集^[26]加入生鲜商品相关数据, 构建了 20 组测试数据, 数据集特征见表 3。应用上述 4 种算法对每组算例运算 10 次, 选取最优的计算结果进行比较, 优化结果见表 4。

表 2 算法参数设置
Tab.2 Parameter settings

算法名称	参数设置
ACO-TS	$ Popsiz e =100, r_{\max}=500, t_{\max}=20, \rho=0.8$
PSO	$ Popsiz e =100, r_{\max}=500, c_1=1, c_2=1$
LNS	$ Popsiz e =100, r_{\max}=500, \beta_1=90, \beta_2=70$
DE	$ Popsiz e =100, r_{\max}=500, CR=0.85, F=0.7$

由表 4 可知,在总成本方面,ACO-TS 混合算法结果的平均值为 2 638 元,比 PSO、LNS 和 DE 分别减少了 16.76%、14.66%和 22.27%;在生鲜商品价值损失和温控成本方面,ACO-TS 的平均值分别为 490 元和 283 元,均优于其他算法的平均值。此外,由 t 检验和 p 值的统计比较结果可知,ACO-TS 混合算法与其他 3 种算法的计算结果具有显著差异。因此,在求解基于车辆共享的生鲜商品多车舱装载配送路径优化问题方面,本研究提出的 ACO-TS 混合算法比其他 3 种算法具有更好的寻优能力。

表 3 数据集特征
Tab.3 Characteristics of datasets

算例	数据集	客户数量	车舱数	生鲜商品类型	生鲜商品温控区间/ $^{\circ}\text{C}$
1~5	C101, C102, C103, C104, C105	60	2	2	-11~-16, 2~7
6~10	C201, C202, C203, C204, C205	80	2	3	-11~-16, -6~-1, 2~7
11~15	R101, R102, R103, R104, R105	100	3	4	-23~-18, -11~-16, -6~-1, 2~7
16~20	R201, R202, R203, R204, R205	100	3	4	-23~-18, -11~-16, -6~-1, 2~7

表 4 不同优化算法计算结果比较
Tab.4 Comparison of optimization results of different algorithms

算例	ACO-TS			PSO			LNS			DE			元
	成本	价值损失	温控成本	成本	价值损失	温控成本	成本	价值损失	温控成本	成本	价值损失	温控成本	
1	2 184	396	231	2 623	510	275	2 602	475	281	2 870	547	311	
2	2 107	379	222	2 529	478	267	2 417	430	254	2 741	487	297	
3	1 854	333	198	2 244	424	246	2 211	420	236	2 414	428	255	
4	1 632	313	176	2 057	400	218	1 964	361	214	2 179	424	231	
5	1 889	360	206	2 398	428	259	2 347	435	248	2 513	464	270	
6	2 031	379	218	2 483	480	269	2 414	429	262	2 606	468	284	
7	1 997	353	214	2 501	467	267	2 428	474	255	2 579	476	275	
8	2 092	373	229	2 578	455	275	2 558	494	268	2 692	488	292	
9	2 317	453	248	2 767	541	300	2 765	536	299	2 945	546	309	
10	2 265	432	247	2 728	526	288	2 664	505	281	2 975	560	315	
11	3 097	588	336	3 723	700	406	3 484	619	369	3 960	713	415	
12	3 106	578	325	3 799	727	397	3 671	697	399	3 913	707	421	
13	3 237	614	347	3 760	669	409	3 699	699	402	4 127	794	435	
14	3 214	589	349	3 741	728	409	3 677	649	393	4 111	758	449	
15	3 157	558	342	3 684	661	396	3 649	670	391	4 072	767	437	
16	3 398	647	358	4 055	738	438	3 967	735	422	4 364	847	468	
17	3 218	603	340	3 947	699	420	3 830	742	409	4 136	808	437	
18	3 272	618	347	3 871	735	406	3 842	727	417	4 184	761	447	
19	3 321	618	364	3 972	701	433	3 802	676	411	4 156	733	450	
20	3 367	615	358	3 917	692	419	3 839	684	412	4 336	785	453	
平均值	2 638	490	283	3 169	588	340	3 091	573	331	3 394	628	363	
t 检验					-2.478 5			-2.150 4			-3.340 9		
p					4.67×10^{-16}			2.98×10^{-16}			2.86×10^{-15}		

3 实例分析

3.1 实例相关数据

以重庆市某生鲜配送中心及其服务的 120 个生鲜需求客户点为研究对象, 地理位置分布如图 4 所示。该生鲜配送中心的每辆多车舱冷藏车配置 4 个车舱, 配送的生鲜商品类型包含 4 种: F1、F2、F3 和 F4, 对应的温控区间为 $-23\sim 18\text{ }^{\circ}\text{C}$ (T_1)、 $-11\sim 16\text{ }^{\circ}\text{C}$ (T_2)、 $-6\sim 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (T_3) 和 $2\sim 7\text{ }^{\circ}\text{C}$ (T_4)。此外, 根据生鲜配送中心与客户的时间窗, 将生鲜配送时间的服务时间划分为 $[300, 720]$ 和 $[720, 1\ 140]$ 2 个时间段进行研究。根据实例的数据规模和相关研究文献^[5,27-28], 参数设置如下: $|Popsizel|=100, r_{\max}=1\ 000, t_{\max}=30, \sigma=40, \delta=1.2, o=18, \kappa=150, \beta_l=400, \partial_l=0.75, \vartheta=3, \mu=2, \nu=1, \varphi=1, \gamma=2, \rho=0.8$ 。

3.2 优化结果

应用本研究提出的 ACO-TS 混合算法, 求解生鲜商品多车舱装载配送路径优化模型, 优化前后的运营

总成本及其相关指标见表 5。

由表 5 可知, 在优化后的生鲜商品多车舱装载配送中, 运营总成本减少了 43.53%, 生鲜商品的价值损失和温控成本分别减少了 38%和 26.85%。同时, 引入多时间段的车辆共享策略, 使多车舱冷藏车使用数减少了 9 辆, 且平均装载率提高了 25%。通过基于车辆共享的生鲜商品多车舱装载配送路径优化, 有效降低了生鲜商品的价值损失和温控成本, 并减少了物流运营总成本和多车舱冷藏车使用量, 进而提高了生鲜商品的物流配送网络运营效率。表 6 为基于车辆共享的生鲜商品多车舱装载配送路径优化方案。

由表 6 可知, 优化后的生鲜商品多车舱装载配送方案中规划了 12 条配送路径, 仅需派遣 6 辆多车舱冷藏车为 120 位客户提供配送服务, 其中 RV1~RV6 在服务时间段 $[300, 720]$ 和 $[720, 1\ 140]$ 均实现了车辆共享调度。此外, 冷藏车的车舱温度是依据路径上客户需求生鲜商品类型设定的, 例如, RV3 在时间段 $[300, 720]$ 中, 3 个车舱设定的温控区间分别为 T_2 、 T_3 和 T_4 , 而在时间段 $[300, 1\ 140]$ 中设定的温控区间为 T_1 、 T_2 和 T_4 。

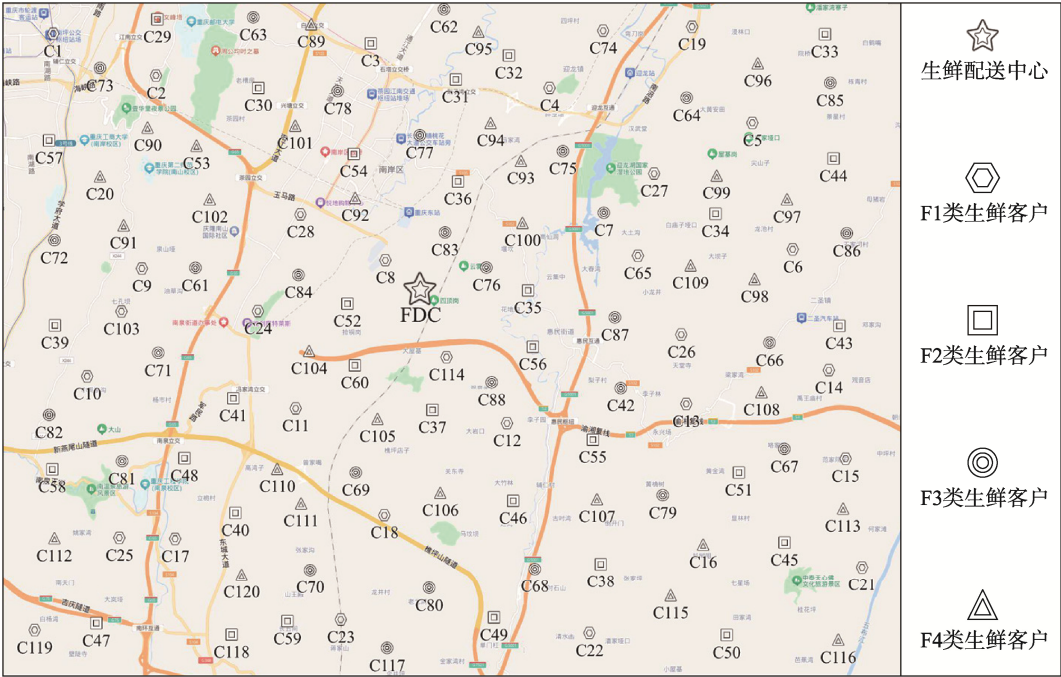


图 4 生鲜配送中心与客户地理位置分布
Fig.4 Geographical location of fresh distribution center and customers

表 5 优化前后结果对比
Tab.5 Comparison of results before and after optimization

情景	配送成本/元	服务成本/元	惩罚成本/元	价值损失/元	温控成本/元	租赁成本/元	运营成本/元	多车舱冷藏车使用数/辆	平均装载率/%
优化前	1 283	487	491	679	324	2 250	5 514	15	69.03
优化后	956	358	242	421	237	900	3 114	6	86.28

3.3 不同服务时间段划分的敏感性分析

为探讨不同服务时间段划分下生鲜商品多车舱装载配送方案相关指标的变化情况,本研究对比了3种不同服务时间段划分方案:Case 1(划分1个服务时间段:[300, 1 140]), Case 2(划分2个服务时间段:[300, 720]、[720, 1 140])和 Case 3(划分3个服务时间段:[300, 580]、[580, 860]、[860, 1 140]),计算得到的优化结果见表7。

由表7可知,与Case1和Case3相比,Case2的运营总成本分别降低了1 091元和65元,平均装

载率分别提高了8.32%和16.66%,且车辆共享率达到了100%。因此,合理划分服务时间段可有效提高平均装载率和车辆共享率,进而有效降低生鲜商品多车舱装载配送的运营总成本。

3.4 不同车舱容量的敏感性分析

为了进一步验证不同车舱容量对基于车辆共享的生鲜商品多车舱装载配送路径优化的影响,选取车舱容量为300、400、500 kg的多车舱冷藏配送车辆进行优化方案的对比分析,相关指标的变化情况见表8。

表6 优化后配送方案
Tab.6 Optimized vehicle distribution schemes

服务时间段	共享车辆	配送路径	温控区间
[300, 720]	RV1	FDC→C42 _{F3} →C13 _{F1} →C108 _{F4} →C15 _{F1} →C15 _{F1} →C21 _{F1} →C116 _{F4} →C79 _{F3} →C107 _{F4} →C12 _{F1} →FDC	T1, T3, T4
	RV2	FDC→C52 _{F1} →C24 _{F1} →C61 _{F3} →C91 _{F3} →C72 _{F3} →C1 _{F1} →C73 _{F3} →C2 _{F1} →C90 _{F3} →C53 _{F4} →C102 _{F4} →FDC	T1, T3, T4
	RV3	FDC→C92 _{F4} →C101 _{F4} →C30 _{F2} →C29 _{F2} →C63 _{F3} →C89 _{F4} →C3 _{F2} →C78 _{F3} →C62 _{F3} →C31 _{F2} →C83 _{F3} →FDC	T2, T3, T4
	RV4	FDC→C114 _{F1} →C51 _{F2} →C50 _{F2} →C22 _{F1} →C80 _{F3} →C117 _{F3} →C23 _{F1} →C59 _{F2} →C70 _{F3} →FDC	T1, T2, T3
	RV5	FDC→C60 _{F2} →C11 _{F1} →C41 _{F2} →C71 _{F3} →C103 _{F1} →C82 _{F3} →C81 _{F3} →C25 _{F1} →C40 _{F2} →C69 _{F3} →FDC	T1, T2, T3
	RV6	FDC→C100 _{F4} →C4 _{F1} →C32 _{F2} →C74 _{F1} →C33 _{F2} →C5 _{F1} →C44 _{F2} →C99 _{F4} →C109 _{F4} →C98 _{F4} →C43 _{F2} →FDC	T1, T2, T4
[720, 1 140]	RV1	FDC→C56 _{F2} →C45 _{F2} →C67 _{F3} →C66 _{F3} →C6 _{F1} →C86 _{F3} →C85 _{F3} →C34 _{F2} →C65 _{F1} →C7 _{F3} →C76 _{F3} →FDC	T1, T2, T3
	RV2	FDC→C104 _{F4} →C110 _{F4} →C48 _{F2} →C58 _{F2} →C10 _{F1} →C39 _{F2} →C9 _{F1} →C28 _{F1} →C8 _{F1} →FDC	T1, T2, T4
	RV3	FDC→C37 _{F2} →C18 _{F1} →C120 _{F4} →C118 _{F2} →C47 _{F2} →C119 _{F4} →C112 _{F4} →C17 _{F1} →C111 _{F1} →C105 _{F4} →FDC	T1, T2, T4
	RV4	FDC→C93 _{F4} →C75 _{F3} →C27 _{F1} →C64 _{F3} →C19 _{F1} →C96 _{F4} →C97 _{F4} →C26 _{F1} →C87 _{F3} →C35 _{F3} →FDC	T1, T3, T4
	RV5	FDC→C36 _{F2} →C94 _{F4} →C95 _{F4} →C77 _{F3} →C54 _{F2} →C57 _{F2} →C20 _{F4} →C84 _{F3} →FDC	T2, T3, T4
	RV6	FDC→C88 _{F3} →C106 _{F4} →C46 _{F2} →C68 _{F3} →C49 _{F2} →C38 _{F2} →C115 _{F4} →C16 _{F4} →C113 _{F4} →C55 _{F2} →FDC	T2, T3, T4

注: C_{F1}为F1类生鲜客户, C_{F2}为F2类生鲜客户, C_{F3}为F3类生鲜客户, C_{F4}为F4类生鲜客户。

表7 不同服务时间段划分下的优化结果对比
Tab.7 Comparison of optimization results with different service period segmentation methods

方案	配送成本/元	服务成本/元	惩罚成本/元	价值损失/元	温控成本/元	租赁成本/元	运营总成本/元	多车舱冷藏车使用数/辆	平均装载率/%	车辆共享率/%
Case 1	908	341	311	476	219	1 950	4 205	13	79.65	0
Case 2	956	358	242	421	237	900	3 114	6	86.28	100
Case 3	1 134	425	196	398	276	750	3 179	5	73.96	80

表8 不同车舱容量下的优化结果对比
Tab.8 Comparison of optimization results with different compartment capacity

容量/kg	配送成本/元	服务成本/元	惩罚成本/元	价值损失/元	温控成本/元	租赁成本/元	运营总成本/元	多车舱冷藏车使用数/辆			平均装载率/%	车辆共享率/%
								[300, 720]时段	[720, 1 140]时段	合计		
300	1 160	435	291	398	295	1 080	3 659	9	8	9	76.7	88.89
400	956	358	242	421	237	900	3 114	6	6	6	86.28	100
500	916	343	368	632	224	1 080	3 563	6	5	6	75.3	83.33

由表8可知,随着车舱容量由300 kg增至500 kg,价值损失从398元逐渐增至632元,温控成本由295元逐渐降至224元。与车舱容量为300 kg和500 kg相比,400 kg车舱容量的运营总成本(3 114元)最优,且平均装载率(86.28%)和车辆共享率(100%)最高。综上所述,在生鲜商品多车舱装载配送中,合理选择车舱容量能提高平均装载率,并有利于实现车辆在不同服务时间段内的共享调度,进而有效降低生鲜商品的物流运营总成本。

4 结语

针对基于车辆共享的生鲜商品多车舱装载配送路径优化问题,首先构建了包含配送成本、服务成本、生鲜商品价值损失、温控成本、惩罚成本和租赁成本的运营总成本最小化优化模型。然后,提出了应用ACO-TS混合算法求解模型,该算法引入了ACO与TS之间的选择性赋予机制扩大解空间,并设计了车辆共享策略增强算法的寻优能力。最后,将所设计的ACO-TS混合算法与PSO、LNS和DE进行对比分析,验证了本研究所提混合算法的有效性。

本研究以重庆某生鲜商品物流配送企业的实际数据为例,对基于车辆共享的生鲜商品多车舱装载配送路径优化问题进行研究,并进一步分析讨论了不同服务时间段划分和不同车舱容量下相关运营指标的变化情况。研究结果表明,优化后的平均装载率提高了25%,运营总成本降低了43.53%。当服务时间段划分为2段时,运营总成本(3 114元)最低、平均装载率最大(86.28%)和车辆共享率(100%)最高;当车舱容量设置为400 kg时,所得到的配送方案优于车舱容量为300、500 kg的配送方案。本研究提出的基于车辆共享的生鲜商品多车舱装载配送路径优化方法为生鲜商品物流配送路径优化提供了新的研究视角。未来可以结合多车舱多车型以及多中心多车舱装载研究生鲜商品物流配送路径设计问题,进而完善生鲜商品物流配送体系和促进生鲜商品物流配送行业的高质量发展。

参考文献:

- [1] JANJEVIC M, WINKENBACH M. Characterizing Urban Last-Mile Distribution Strategies in Mature and Emerging E-Commerce Markets[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2020, 133: 164-196.
- [2] CHEN J Y, FAN T J, PAN F. Urban Delivery of Fresh Products with Total Deterioration Value[J]. *International Journal of Production Research*, 2021, 59(7): 2218-2228.
- [3] AHMADI-JAVID A, MANSOURFAR M, LEE C G, et al. Optimal Distribution of Perishable Foods with Storage Temperature Control and Quality Requirements: An Integrated Vehicle Routing Problem[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2023, 182: 109215.
- [4] 鲍春玲, 张世斌. 考虑碳排放的冷链物流联合配送路径优化[J]. *工业工程与管理*, 2018, 23(5): 95-100.
- BAO C L, ZHANG S B. Route Optimization of Cold Chain Logistics in Joint Distribution: With Consideration of Carbon Emission[J]. *Industrial Engineering and Management*, 2018, 23(5): 95-100.
- [5] LIU Z S, ZUO X Q, ZHOU M C, et al. Electric Vehicle Routing Problem with Variable Vehicle Speed and Soft Time Windows for Perishable Product Delivery[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023, 24(6): 6178-6190.
- [6] GUO X L, ZHANG W, LIU B B. Low-Carbon Routing for Cold-Chain Logistics Considering the Time-Dependent Effects of Traffic Congestion[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2022, 113: 103502.
- [7] 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): 160-169.
- LI X, MIN D Q, ZHANG Q. Routing Optimization of Semi-Open Cold-Chain Logistics Vehicle Under Random Demand[J]. *Packaging Engineering*, 2022, 43(7): 160-169.
- [8] LIANG X Y, WANG N M, ZHANG M, et al. Bi-Objective Multi-Period Vehicle Routing for Perishable Goods Delivery Considering Customer Satisfaction[J]. *Expert Systems with Applications*, 2023, 220: 119712.
- [9] 丁秋雷, 胡祥培, 位娟, 等. 动态需求下蓄冷式多温共配多目标优化模型及算法[J]. *运筹与管理*, 2021, 30(12): 13-19.
- DING Q L, HU X P, WEI J, et al. Research on Multi-Objective Optimization Model and Algorithm of Cold Storage Multi-Temperature Joint Delivery Under Dynamic Demand[J]. *Operations Research and Management Science*, 2021, 30(12): 13-19.
- [10] 王旭坪, 詹红鑫, 孙自来, 等. 多行程带补货时间窗的成品油多舱配送路径优化[J]. *管理工程学报*, 2020, 34(4): 182-195.
- WANG X P, ZHAN H X, SUN Z L, et al. Optimization of Routes for Multi-Compartment, Multi-Trip Refined Oil Distribution with Replenishment Time[J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2020, 34(4): 182-195.
- [11] 肖建华, 张文雪, 潘钰雅, 等. 基于分类垃圾收运时效性的多周期多车舱路径优化研究[J/OL]. *中国管理科学*,

- 2023: 1-15. (2023-07-13) [2025-02-07]. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2023.0050>.
- XIAO J H, ZHANG W X, PAN Y Y, et al. A Multi-Period Multi-Compartment Vehicle Routing Problem for Sorted-Waste Collection with Timeliness[J/OL]. Chinese Journal of Management Science, 2023: 1-15. (2023-07-13) [2025-02-07]. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2023.0050>.
- [12] CHEN J M, DAN B, SHI J. A Variable Neighborhood Search Approach for the Multi-Compartment Vehicle Routing Problem with Time Windows Considering Carbon Emission[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 277: 123932.
- [13] WANG Y, ZHANG J, GUAN X Y, et al. Collaborative Multiple Centers Fresh Logistics Distribution Network Optimization with Resource Sharing and Temperature Control Constraints[J]. Expert Systems with Applications, 2021, 165: 113838.
- [14] ZHANG Q H, WANG Z T, HUANG M, et al. Heterogeneous Multi-Depot Collaborative Vehicle Routing Problem[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2022, 160: 1-20.
- [15] CHEN T T, CHU F, ZHANG J T, et al. Sustainable Collaborative Strategy in Pharmaceutical Refrigerated Logistics Routing Problem[J]. International Journal of Production Research, 2024, 62(14): 5036-5060.
- [16] 王锋, 张令荣, 鲁渤. 考虑碳排放的冷链物流多温共配时变路径研究[J/OL]. 中国管理科学, 2024: 1-12. (2024-01-18)[2025-02-07]. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2022.2318>.
- WANG F, ZHANG L R, LU B. Research on Time-Varying Path of Multi-Temperature Co-Distribution in Cold Chain Logistics Considering Carbon Emissions[J/OL]. Chinese Journal of Management Science, 2024: 1-12. (2024-01-18) [2025-02-07]. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2022.2318>.
- [17] CHEN L, LIU Y, LANGEVIN A. A Multi-Compartment Vehicle Routing Problem in Cold-Chain Distribution[J]. Computers & Operations Research, 2019, 111: 58-66.
- [18] DANG Y B, ALLEN T T, SINGH M. A Heterogeneous Vehicle Routing Problem with Common Carriers and Time Regulations: Mathematical Formulation and a Two-Color Ant Colony Search[J]. Computers & Industrial Engineering, 2022, 168: 108036.
- [19] KYRIAKAKIS N A, MARINAKI M, MARINAKIS Y. A Hybrid Ant Colony Optimization-Variable Neighborhood Descent Approach for the Cumulative Capacitated Vehicle Routing Problem[J]. Computers & Operations Research, 2021, 134: 105397.
- [20] 张政, 季彬. 考虑随机旅行时间与二维装载约束的越库配送车辆路径优化[J]. 控制与决策, 2023, 38(3): 769-778.
- ZHANG Z, JI B. Optimization for Two-Dimensional Loading Constrained Vehicle Routing Problem with Cross-Docking and Stochastic Travel Time[J]. Control and Decision, 2023, 38(3): 769-778.
- [21] WANG Y, LUO S Y, FAN J X, et al. The Multidepot Vehicle Routing Problem with Intelligent Recycling Prices and Transportation Resource Sharing[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2024, 185: 103503.
- [22] 雷金羨, 孙宇, 朱洪杰. 改进蚁群算法在带时间窗车辆路径规划问题中的应用[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(11): 3535-3544.
- LEI J X, SUN Y, ZHU H J. Improved Ant Colony Optimization Algorithm for Vehicle Routing Problems with Time Window[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2022, 28(11): 3535-3544.
- [23] SALEHI SARBIJAN M, BEHNAMIAN J. Multi-Fleet Feeder Vehicle Routing Problem Using Hybrid Metaheuristic[J]. Computers & Operations Research, 2022, 141: 105696.
- [24] DUMEZ D, LEHUÉDÉ F, PÉTON O. A Large Neighborhood Search Approach to the Vehicle Routing Problem with Delivery Options[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2021, 144: 103-132.
- [25] SETHANAN K, JAMRUS T. Hybrid Differential Evolution Algorithm and Genetic Operator for Multi-Trip Vehicle Routing Problem with Backhauls and Heterogeneous Fleet in the Beverage Logistics Industry[J]. Computers & Industrial Engineering, 2020, 146: 106571.
- [26] SOLOMON M M. Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Window Constraints[J]. Operations Research, 1987, 35(2): 254-265.
- [27] 杨超, 张惠珍, 钱陇骏. 改进麻雀搜索算法求解多目标低碳冷链物流车辆路径问题[J]. 包装工程, 2024, 45(3): 251-261.
- YANG C, ZHANG H Z, QIAN L J. Improved Sparrow Search Algorithm to Solve the Routing Problem of Multi-Objective Low-Carbon Cold Chain Logistics Vehicle[J]. Packaging Engineering, 2024, 45(3): 251-261.
- [28] HÜBNER A, OSTERMEIER M. A Multi-Compartment Vehicle Routing Problem with Loading and Unloading Costs[J]. Transportation Science, 2019, 53(1): 282-300.