

基于公铁联运的多温蓄冷箱全程冷链集配优化

黄虹¹, 谢如鹤^{2*}, 罗嵩³, 陈欢², 章桂永¹

(1.广州工商学院, 广州 510850; 2.广州大学, 广州 510006;

3.中国铁路广州局集团有限公司, 广州 510088)

摘要: **目的** 针对多品种、高频次、小批量、高时效及高附加值等特点的消费者订单需求, 借助自主研发设计的多温蓄冷箱, 提出基于公铁联运的多温蓄冷箱全程冷链集配模式, 并展开实证研究。**方法** 以总成本最小化为目标, 构建基于公铁联运的多温蓄冷箱全程运输及配送优化模型, 对比全程机械式冷藏汽车多温共配模式, 采用遗传算法优化求解, 并对配送时效和高铁运价进行灵敏性分析。**结果** 基于公铁联运的多温蓄冷箱全程冷链集配相较于全程机械式冷藏汽车多温共配的总成本减少了38%, 其中, 制冷成本、碳排放成本及时间惩罚成本明显减少; 以正常配送时间约束为参照, 延长或缩短时间窗, 基于公铁联运的多温蓄冷箱全程冷链集配的时间惩罚成本比全程机械式冷藏汽车多温共配的减少了61%~83%。与铁路整车货运价格相比, 高铁货运价格在上浮不超过220%的情况下, 基于公铁联运的多温蓄冷箱全程冷链集配模式相较于全程机械式冷藏汽车多温共配模式在经济效益和社会效益两方面更具优势。**结论** 公铁联运的多温蓄冷箱全程冷链集配能为企业降本增效、节能减排, 为运输主体提供新思路, 为整合闲置运力提供一种新型的运营模式。

关键词: 冷链物流; 公铁联运; 多温蓄冷箱; 配送模式

中图分类号: U15; F53 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)17-0237-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.17.029

Optimization of Whole Cold Chain Joint Pickup and Distribution Based on Road-rail Transportation with Multi-temperature Refrigerated Container

HUANG Hong¹, XIE Ru-he^{2*}, LUO Song³, CHEN Huan², ZHANG Gui-yong¹

(1. Guangzhou College of Technology and Business, Guangzhou 510850, China; 2. Guangzhou University, Guangzhou 510006, China; 3. China Railway Guangzhou Group Corporation, Guangzhou 510088, China)

ABSTRACT: In view of the consumer order demand of multi-variety, high frequency, small batch, high timeliness and high added value, the work aims to propose a whole cold chain joint pickup and distribution model based on road-rail transportation with the help of self-developed and designed multi-temperature refrigerated container, and conduct empirical research on it. With the objective of minimizing the total cost, a whole joint pickup and distribution optimization model of multi-temperature refrigerated container based on road-rail transportation was constructed and compared with the multi-temperature joint distribution model of whole mechanical refrigerated vehicles. The genetic algorithm was used to optimize the solution, and sensitivity analysis was carried out in terms of distribution time efficiency and high-speed railway transportation price. Compared with the multi-temperature joint distribution model of whole mechanical refrigerated vehicles, the total cost of whole cold chain joint pickup distribution of multi-temperature refrigerated container based

收稿日期: 2023-01-17

基金项目: 广东省农产品保鲜物流共性关键技术研发创新团队项目(2021KJ145); 国家统计局重点项目(2022LZ); 广东省重点建设学科项目(2021ZDJS122)

on road-rail transportation was reduced by 38%, with the cost of refrigeration, carbon emissions and time penalties being particularly reduced. With the normal distribution time constraint as the reference, extending or shortening the time window, the time penalty costs was reduced by 61% to 83%. Compared with the railway freight prices, under the condition that the high-speed rail freight prices would not rise by no more than 220%, the whole cold chain joint pickup and distribution model of multi-temperature refrigerated container based on road-rail transportation was more advantageous in terms of both economic and social benefits. The whole cold chain joint pickup and distribution model of multi-temperature refrigerated container based on road-rail transportation can reduce costs and increase efficiency, save energy, reduce emissions for enterprises, and provide a new model of operation for transport entities to integrate idle transport capacity.

KEY WORDS: cold chain logistics; road-rail transportation; multi-temperature refrigerated container; multi-temperature joint pickup and distribution model

2022 年 4 月,交通运输部等联合印发的《关于加快推进冷链物流运输高质量发展的意见》明确指出,创新冷链运输组织模式,积极推进冷链物流多式联运发展。2019 年,我国高铁行业开始参与冷链物流生鲜农产品运输的相关业务,但以公路为主的机械式多温共配模式目前在冷链物流市场中仍占主导地位。针对多品种、高频次、小批量、高时效、高附加值等特点的生鲜农产品运输及配送,机械式冷藏汽车多温共配具有成本高、效率低、碳排放高等缺点,在运输过程中频繁开关车厢门会造成“断链”,最终影响生鲜产品的品质。

近年来,生鲜农产品的多温共配逐渐成为行业关注的问题。Kuo 和 Chen^[1]最早提出一种基于多温联合配送的城市物流服务模式,为企业实现高效配送、降低企业成本、保障食品安全、提高顾客满意度等提供了参考,且与传统多车多温配送模式相比,蓄冷式多温共配更具经济价值^[2-3]。王淑云和陈莒伟^[4]对比了机械式多温共配和蓄冷式多温共配 2 种模式的效益,结果表明蓄冷式多温共配运作模式更具应用价值。近年来,多温共配研究主要集中在不同视角下的优化问题,丁秋雷等^[5]探究了动态需求下的蓄冷式多温共配多目标优化问题。姚源果和贺盛瑜^[6]运用数学建模法进行了研究,结果表明,基于实时路况信息分析和接驳点的农产品冷链物流配送可以显著降低冷链配送成本。Chen 和 Hsu^[7]在绿色低碳视角下,考虑不同温度食品的时间依赖性需求的交货计划,通过实证研究发现,多温共配的温室气体排放量少于传统多车配送系统的排放量。沈丽等^[8]在考虑碳排放的基础上,结合货损探究了机械式冷藏车下多温共配的路径优化问题。杨玮等^[9]采用改进的麻雀搜索算法对低碳环境下的冷链物流企业库存-配送进行了优化。牟进进等^[10]研究发现,具有虚拟接驳点的蓄冷式多温集配比自配送中心的总成本较低,尤其有利于低碳环保冷链系统的构建。

虽然上述研究表明,在不同视角下的配送优化能

有效降低冷链物流成本,减少碳排放,但针对多温共配的研究皆以公路运输为主,仅关注了城市末端的配送优化,鲜少关注冷链物流的多式联运,如公铁联运。李五双等^[11]探究了碳交易政策下的冷链物流多式联运路径选择问题,研究表明,当碳交易价格不断升高时,铁路运输在冷链多式联运中能有效降低成本、减少碳排放,但该研究未涉及多温共配。在运输市场中,高铁快运与公路运输和航空运输相比,能最大程度地排除不可抗力因素的影响,降低经济发展中流通环节的物流成本和时间成本,减少碳排放^[12-13]。由此可见,结合高铁快运开展基于公铁联运的多温共配模式的探索,对减少全程冷链物流的总成本和碳排放,满足企业的经济效益和社会效益具有较大的意义。

基于多温共配的研究现状,结合相关政策及冷链生鲜农产品的特性,文中的研究与以往不同,一方面,采用自主研发设计的多温蓄冷箱,提出基于公铁联运的多温蓄冷箱全程冷链集配模式,并与全程机械式多温共配模式进行对比研究;另一方面,高铁中转站或配送中心具有从供应商共同集货和向自提门店共同配送等 2 个功能,适用于蓄冷箱的冷冻、冷藏、中温 3 种温度的生鲜农产品。该研究更符合冷链的运作实践,拟为冷链物流集配实践的创新提供理论参考。

1 全程冷链运营模式分析

1.1 多温蓄冷箱

多温蓄冷箱由新能源锂电池供电,单次充电续航时间为 10 h,箱体外尺寸为 1 200 mm×1 000 mm×1 500 mm,内尺寸为 1 050 mm×875 mm×1 345 mm,储存容积约为 1 235 L(含设备仓和蓄冷板仓),货物装载容积为 0.93 m³,多温蓄冷箱的质量为 180 kg,装载货物后的总质量为 500~600 kg。采用隔温板将箱体划分为 3 个温区,其中,冷冻区的容积为 0.23 m³,温度为-18 ℃;冷藏

区的容积为 0.47 m³，温度为 0~9 ℃；中温区的容积为 0.23 m³，温度为 10~16 ℃。各温区之间独立且灵活，可装载不同类型和不同温度要求的生鲜农产品，区别于单温蓄冷箱或保温箱，多温蓄冷箱可将冷冻产品、冷藏产品及中温产品分区置于同一蓄冷箱或保温箱中。微信小程序绑定多温蓄冷箱的监控系统可实时监控箱内货物的基本情况。

1.2 运营场景

1.2.1 基于公铁联运的多温蓄冷箱全程冷链集配运营场景

基于公铁联运的多温蓄冷箱全程冷链集配模式主要运输及配送多品种、高频次、小批量、高效、高附加值的生鲜农产品，利用闲置的高铁运力，按照枢纽辐射网络，在生鲜农产品货源充足的始发地和目的地开展省内或邻近省际间生鲜农产品的双向运输及配送。

生鲜供应商（生鲜企业）、第三方物流企业、终

端客户三者是运营场景的主体。前端供应商集货指配送中心采用公路运输方式将生鲜农产品发出。中间高铁运输采用客货混合模式，即高铁在客运时，充分利用闲置的车厢运输装有生鲜农产品的多温蓄冷箱，实现客货混合运输。城市公路末端配送采用“独立门店+自提”的社区生鲜电商模式。多温蓄冷箱回收指卸载完生鲜农产品的多温蓄冷箱由配送员送至邻近的末端供应商，随后进行清洗、消毒、预冷、装载生鲜农产品，重复该模式的运作流程。如图 1 所示。

1.2.2 全程机械式冷藏汽车多温共配运营场景

全程机械式冷藏汽车多温共配是冷链物流市场运用最广泛的一种方式，不同温层的冷链生鲜农产品由划分为 3 个温区的机械式冷藏汽车实现全程公路运输及配送。首先，生鲜农产品供应商将商品运输至配送中心集货，其次，由机械式冷藏汽车分拨配送至各客户或自提点，最后将配送完的机械式冷藏汽车空车返回配送中心。如图 2 所示。

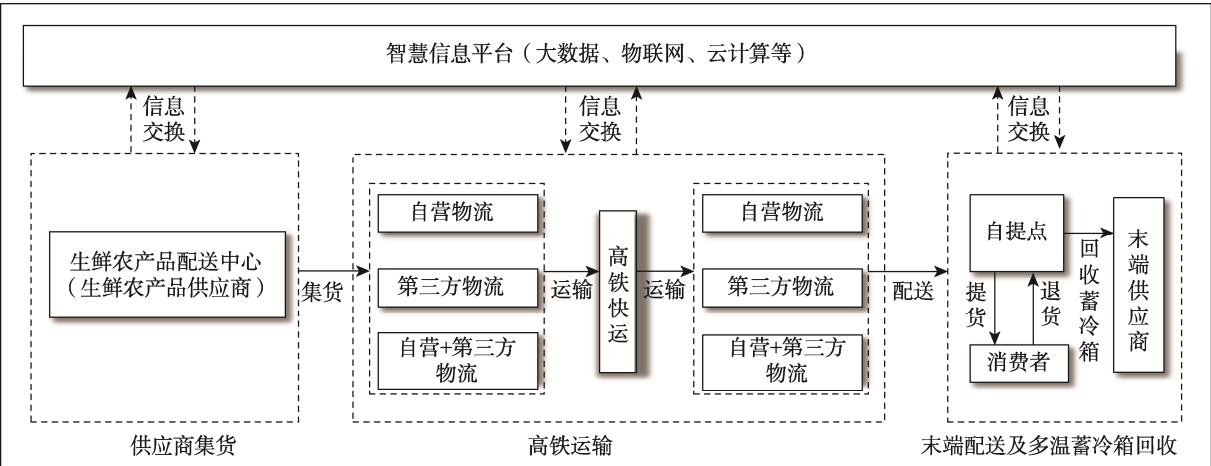


图 1 基于公铁联运的多温蓄冷箱全程冷链集配模式
Fig.1 Multi-temperature refrigerated container joint pickup and distribution model for whole cold chain based on rail-road transportation

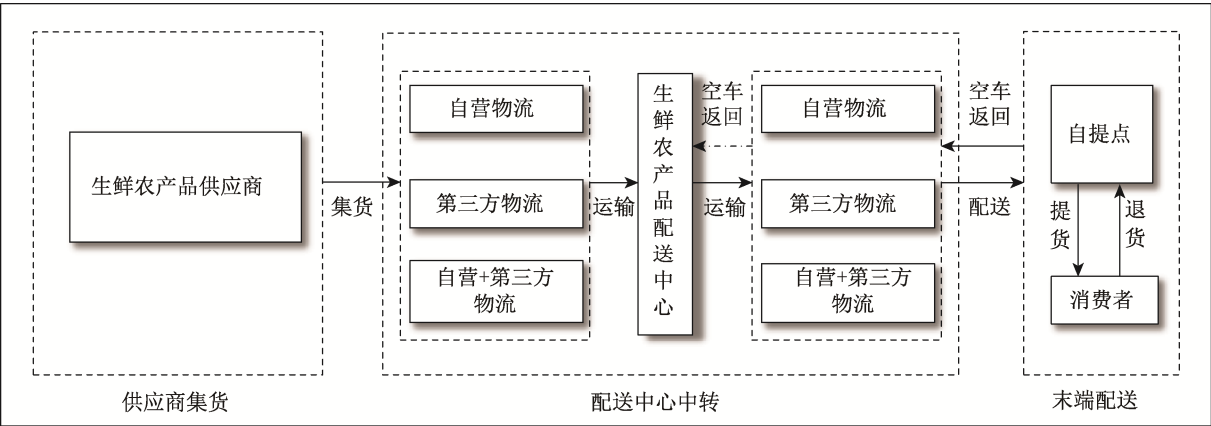


图 2 全程机械式冷藏汽车多温共配模式
Fig.2 Multi-temperature joint distribution model for whole mechanical refrigerated vehicles

2 问题描述与假设符号

2.1 问题描述

某物流企业将多批不同数量和不同温层的生鲜农产品从不同的运输起点 O 经支线运输—干线运输—支线运输（配送），将生鲜农产品运输至各自的自提点 D 。干线运输包括枢纽节点间的运输路径及枢纽节点内的运输作业，有公路和高铁 2 种运输方式。支线运输包括发货点到枢纽节点和枢纽节点到自提点的路径及枢纽节点内的运输作业，只有公路运输方式。运输时间由运输距离和运输方式决定。基于公铁联运的多温蓄冷箱全程冷链集配模式的干线运输采用高铁快运，支线运输采用普通厢式汽车，全程只需装卸多温蓄冷箱。全程机械式冷藏汽车多温共配模式采用机械式冷藏汽车进行支线和干线的运输。

2.2 模型假设

结合现实情况，将实际问题转换为数学模型，做出如下假设。

- 1) 冷链运输任务的起点和客户自提点已知。
- 2) 在一个冷链运输任务内，只能选择 1 种运输方式进行两节点间的运输。
- 3) 每条冷链运输路径都有足够的能力实现货物的中转运输。
- 4) 每个中转节点都有足够的能力实现货物的中转运输。
- 5) 高铁有规定的出发时间，汽车无出发时间限制。

2.3 符号说明

模型符号及含义： V 为节点集合； $i=1, 2, \dots, n$ ； H 为线路集合， $h_{ij} \in H$ ； h_{ij} 为 ij 间的路径； O 为起始点集合， $o \in O$ ； D 为客户自提点集合， $d \in D$ ； M 为运输方式集合； $a=1$ ，为高铁运输； $b=2$ ，表示公路运输； F 为货物的种类， $\lambda \in F$ ， λ_1 、 λ_2 、 λ_3 分别表示冷藏、冷冻和中温； N 为运输任务集合， $n \in N$ ； x_{ija}^n 、 x_{ijb}^n 为任务 n 以 a 或 b 运输方式将货物从节点 i 运输到节点 j ，该值为 1，否则为 0； y_{iab}^n 为任务 n 在节点 i 以 a 运输方式转换成 b 运输方式，该值为 1，否则为 0； t_{ija}^n 为任务 n 以 a 运输方式将货物从节点 i 运输到节点 j 提供的卸货服务时间，该值为 1，否则为 0。

3 模型建立

3.1 基于公铁联运的多温蓄冷箱全程冷链集配模型

基于公铁联运的多温蓄冷箱全程冷链集配模式运输及配送生鲜农产品的成本主要包括线路启动成

本、行驶成本、换装成本、制冷成本、碳排放成本、时间惩罚成本。

3.1.1 线路启动成本

线路启动成本指当节点位于某类型车辆的服务线路时，配送中心进行相关处理所发生的成本。该成本因线路使用车辆类型的不同而有所差异，也包含车载租赁设备，如多温蓄冷箱。具体成本核算见式（1）。

$$C_1 = g \sum_{\lambda \in F} \sum_{n \in N} Y^n + f_1 \sum_{i \in V} \sum_{n \in N} x_{0i}^n \quad (1)$$

式中： g 为多温蓄冷箱的使用成本，元/次； Y^n 为任务 n 采用多温蓄冷箱数量； f_1 为普通厢式汽车的使用成本，元/次。

3.1.2 行驶成本

假设车辆匀速行驶，不同车辆的行驶成本与行驶时间呈正相关，行驶成本的计算见式（2）。

$$C_2 = c_1 \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{a \in W} \sum_{n \in N} q_{od}^n s_{ija}^n x_{ija}^n + c_2 \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{b \in W} \sum_{n \in N} q_{od}^n s_{ijb}^n x_{ijb}^n \quad (2)$$

式中： c_1 、 c_2 分别为普通厢式汽车和高铁的单位运输成本，元/km； q_{od}^n 为任务 n 从起始点 O 到自提点 D 的运量，t； s_{ija}^n 、 s_{ijb}^n 分别为任务 n 采用 a 运输方式或 b 运输方式从节点 i 运输到节点 j 的运输距离，km。

3.1.3 换装成本

在公铁联运网络中，因运输方式和运输班列的改变都会产生换装成本，换装成本的计算见式（3）。

$$C_3 = \sum_{i \in V} \sum_{a \in W} \sum_{b \in W} \sum_{n \in N} q_{od}^n c_{iab}^n x_{iab}^n \quad (3)$$

式中： c_{iab}^n 为任务 n 在节点 i 由 a 运输方式转换为 b 运输方式的单位换装成本，元/kg。

3.1.4 制冷成本

多温蓄冷箱分为冷冻区、冷藏区、中温区，不同区间的温湿度不同。其中，中温区由冷藏区的冷量调节，多温蓄冷箱的冷量来源于充电的蓄冷板（将电能转化成冷量），故计算蓄冷板 1 次充电的成本即可，制冷成本的计算见式（4）。

$$C_4 = \sum_{\lambda \in F} \sum_{n \in N} Y^n W \varphi \quad (4)$$

式中： W 为多温蓄冷箱单位时间的电力成本，元/(kW·h)； φ 为单个多温蓄冷箱中蓄冷板的耗电量，kW·h。

3.1.5 碳排放成本

碳排放成本=单位碳税成本×碳排放量^[14]，则生鲜农产品在运输及配送过程中的碳排放成本计算见式（5）。

$$C_5 = C_e \left(\sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{a \in W} \sum_{n \in N} e_0 \rho_1 s_{ija}^n x_{ija}^n + \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{\lambda \in F} \sum_{n \in N} Y^n \varphi \theta x_{ij}^n \right) + \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{b \in W} \sum_{n \in N} \eta q_{ij}^n s_{ijb}^n x_{ijb}^n \quad (5)$$

式中: C_e 为单位碳排放成本, 元/kg; e_0 为 CO_2 排放系数, kg/L; ρ_1 为普通厢式汽车装载货物时单位距离的燃料消耗量, L/km; θ 为电力系统碳排放系数, kg/(kw·h); η 为高铁单位碳排放量, kg/t。

3.1.6 时间惩罚成本

基于公铁联运的多温蓄冷箱全程冷链物流模式中的高铁运输为固定班列, 不考虑时间惩罚成本。在城市末端自提点配送存在产品配送的延迟或提前, 计 1 个大于末端配送目的地指定时间窗可接受的时间段^[15], 惩罚成本的计算见式 (6)。

$$C_4 = \begin{cases} u_1(e_d - E_d) & t_d^n \in [E_d, e_d) \\ 0 & t_d^n \in [e_d, l_d) \\ u_2(L_d - l_d) & t_d^n \in [l_d, L_d) \\ \infty & \text{其他} \end{cases} = \sum_{d \in D} \sum_{n \in N} (u_1 A_d^n + u_2 B_d^n) \quad (6)$$

式中: u_1 、 u_2 分别为货物提前配送和延迟配送的惩罚系数, 元/h; e_d 、 l_d 分别为自提点 d 满意服务时间的下限和上限; E_d 、 L_d 分别为自提点 d 可接受配送的最早时间和最晚时间; t_d^n 为任务 n 到达自提点 d 的时间; A_d^n 为满意服务时间下限 e_d 减去到达自提点时间 t_d^n ; B_d^n 为到达自提点时间 t_d^n 减去满意服务时间上限 l_d 。

基于公铁联运的多温蓄冷箱全程冷链优化目标函数: 式 (7) 表示目标函数运输及配送成本最小化, 由线路启动成本、行驶成本、换装成本、制冷成本、碳排放成本、时间惩罚成本构成; 式 (8—9) 表示每个任务只能对应 1 个起点和终点; 式 (10) 表示每个任务中相邻节点只能选择 1 种运输方式; 式 (11) 表示每个运输任务只能在节点 i 进行中转, 且中转次数不超过 1 次; 式 (12) 表示自提点可接受的时间窗范围。

$$\min C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6 \quad (7)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{a \in W} \sum_{b \in W} x_{i,i+1,a}^n \leq 1 \quad \forall n \in N \quad (8)$$

$$\sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{a \in W} x_{ija}^n \leq 1 \quad \forall n \in N \quad (9)$$

$$\sum_{a \in W} x_{ija}^n \leq 1 \quad \forall n \in N, \forall i \in V, \forall j \in V \quad (10)$$

$$\sum_{a \in W} \sum_{b \in W} y_{iab}^n \leq 1 \quad \forall n \in N, \forall i \in V \quad (11)$$

$$E_d \leq t_d^n \leq L_d \quad \forall n \in N, \forall d \in D \quad (12)$$

3.2 全程机械式冷藏汽车多温共配模型

为了进一步探讨基于公铁联运的多温蓄冷箱全程冷链集配模式的影响, 在前文相关假设的基础上构建全程机械式冷藏汽车多温共配模型, 相关成本核算如下。

1) 线路启动成本。机械式冷藏汽车的线路启动成本的计算见式 (13)。

$$Z_1 = f_2 \sum_{i \in V} \sum_{n \in N} x_{0i}^n \quad (13)$$

式中: f_2 为机械式冷藏汽车单位线路使用成本, 元/次。

2) 车辆行驶成本的计算见式 (14)。

$$Z_2 = c_3 \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{a \in W} \sum_{n \in N} q_{od}^n s_{ija}^n x_{ija}^n \quad (14)$$

式中: c_3 为机械式冷藏汽车的单位运输成本, 元/km。

3) 换装成本的计算见式 (15)。

$$Z_3 = \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{a \in W} \sum_{n \in N} q_{od}^n c_{ija}^n x_{ija}^n \quad (15)$$

式中: c_{ija}^n 为任务 n 以 a 运输方式从节点 i 运输到节点 j 的单位换装成本, 元/kg。

4) 制冷成本。机械式冷藏汽车运输及配送的制冷成本主要包括 2 个方面: 一方面是车辆配送过程中的制冷能耗成本; 另一方面是开关车厢门能耗成本^[16]。制冷成本的计算见式 (16)。

$$Z_4 = c_4 Q_1 \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{a \in W} \sum_{n \in N} t_{ij}^n x_{ija}^n + c_4 Q_2 \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{a \in W} \sum_{n \in N} t_i^n x_{ija}^n \quad (16)$$

式中: c_4 为单位制冷成本, 元/kg; Q_1 为冷藏车车厢壁内外热交换热负荷, W; Q_2 为车厢开门时内外空气交换热负荷, W; t_{ij}^n 为任务 n 从节点 i 运输到节点 j 的时间, h; t_i^n 为任务 n 在节点 i 处的服务时间, h。

5) 碳排放成本的计算见式 (17)。

$$Z_5 = C_e \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{a \in W} \sum_{n \in N} e_0 \rho_2 s_{ija}^n x_{ija}^n \quad (17)$$

式中: ρ_2 为机械式冷藏汽车装载货物时单位距离燃料消耗量, L/km。

6) 时间惩罚成本的计算见式 (18)。

$$Z_6 = \begin{cases} u_1(e_d - E_d) & t_d^n \in [E_d, e_d) \\ 0 & t_d^n \in [e_d, l_d) \\ u_2(L_d - l_d) & t_d^n \in [l_d, L_d) \\ \infty & \text{其他} \end{cases} = \sum_{d \in D} \sum_{n \in N} (u_1 A_d^n + u_2 B_d^n) \quad (18)$$

综上所述, 全程机械式冷藏汽车多温共配模型目标函数的计算见式 (19) — (24)。

$$\min Z = Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5 + Z_6 \quad (19)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{a \in W} \sum_{b \in W} x_{i,i+1,a}^n \leq 1 \quad \forall n \in N \quad (20)$$

$$\sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{a \in W} x_{ija}^n \leq 1 \quad \forall n \in N \quad (21)$$

$$\sum_{a \in W} x_{ija}^n \leq 1 \quad \forall n \in N, \forall i \in V, \forall j \in V \quad (22)$$

$$\sum_{a \in W} y_{ia}^n \leq 1 \quad \forall n \in N, \forall i \in V \quad (23)$$

$$E_d \leq t_d^n \leq L_d \quad \forall n \in N, \forall d \in D \quad (24)$$

4 算法设计

根据所构建的优化模型, 结合遗传算法的寻优特

点和求解步骤,设计适合求解优化模型的遗传算法,最后利用 Matlab 2019 软件编程求解。算法求解的设计步骤如下。

1) 染色体编码。因涉及不同运输方式的组合,这里运用实值编码的方式对染色体进行编码。染色体由运输节点 V 和运输方式 W 组成,奇数位表示运输节点,偶数位表示运输方式,如图 3 所示。

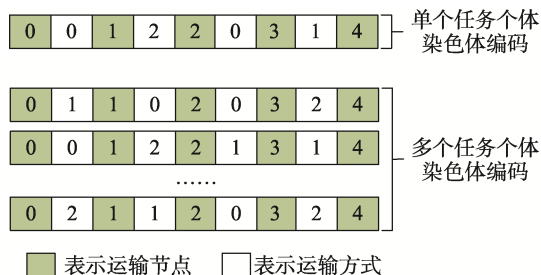


图 3 个体染色体编码示意图

Fig.3 Changes in banana quality evaluation indicators testing

2) 生成初始种群。采用染色体编码方式生成个体,将个体留存在种群中。当种群内个体数量达到预先设置的种群规模时,则停止生成个体。

3) 选择适应度函数。基于公铁联运的多温蓄冷箱全程冷链集配和全程机械式多温共配的路径优化

都以总成本最小为目标,这里直接采用目标函数总成本之和最小的倒数构造适应度函数,获得对应的个体适应度。

4) 选择策略。采用锦标赛选择法,在 m 个体中随机挑选 n ($n < m$) 个体,挑选其中最大的个体,并遗传到下一代,直到得到新的 m 个体。

5) 交叉运算。采用顺序交叉法。

6) 变异运算。采用逆转变异法,在父代染色体中,随机挑选 2 个基因位上的基因,互换这 2 个基因,得到子代。

7) 终止准则。这里预先设置最大迭代数 1 000 为终止条件,持续进行若干次连续迭代,达到 1 000 次迭代后终止迭代循环,从历次迭代中找出最优解的编码串并解码,得出最优的可行解和目标函数值。

5 实证研究

5.1 实例分析

求解算例的起点为 A 市蔬菜水产品批发市场,批发市场的 10.94 t 生鲜农产品需要配送至 B 市 20 个生鲜自提点,中间中转节点处可供选择的运输方式有高铁和公路,自提点需求量和和服务时间窗的相关参数如表 1 所示。

表 1 自提点需求量和和服务时间窗
Tab.1 Self pick-up site demand and service time window

自提点	需求量/kg			$[E_d, e_d, l_d, L_d]$	服务时间 t/h
	λ_1	λ_2	λ_3		
d1	130	180	110	[5:30, 6:00, 8:00, 9:00]	0.22
d2	50	120	170	[7:00, 7:30, 9:00, 9:30]	0.20
d3	40	80	60	[5:30, 6:00, 8:00, 8:30]	0.17
d4	180	160	50	[6:00, 6:30, 8:20, 9:00]	0.20
d5	120	40	50	[6:10, 6:40, 8:30, 10:00]	0.18
d6	140	100	90	[6:30, 7:00, 9:00, 10:20]	0.22
d7	100	150	160	[7:00, 7:20, 9:00, 9:30]	0.27
d8	90	40	150	[7:00, 7:30, 9:00, 10:00]	0.17
d9	120	180	170	[6:40, 7:00, 8:30, 9:30]	0.23
d10	120	200	180	[6:30, 7:00, 9:00, 9:40]	0.25
d11	130	80	30	[7:00, 7:30, 9:30, 10:30]	0.17
d12	180	40	60	[7:00, 7:30, 9:00, 10:00]	0.17
d13	120	180	90	[7:00, 7:30, 9:30, 10:30]	0.20
d14	120	100	200	[7:00, 7:30, 9:00, 10:00]	0.20
d15	140	120	160	[6:20, 6:50, 8:30, 9:30]	0.17
d16	180	220	160	[6:40, 7:00, 8:40, 9:30]	0.25
d17	60	40	200	[6:40, 7:00, 8:40, 9:30]	0.18
d18	200	200	30	[7:00, 7:50, 9:00, 10:00]	0.22
d19	160	120	140	[6:00, 6:30, 8:30, 9:30]	0.23
d20	80	120	150	[7:00, 7:50, 9:00, 10:00]	0.25

根据委托第三方定制的多温蓄冷箱总成本,残值率的比例统一按原价的 5%计算,折旧年限按 4 a 计算,确定单个蓄冷箱使用成本为 20.57 元/次。依据固定成本的固定资产折旧费、司机工资和保险费等成本计算,常温配送车辆的使用成本为 384 元/次,机械式冷藏车辆的使用成本为 508 元/次。依据 2022 年的柴油均价,常温车辆的单位行驶成本为 0.67 元/km,设定 4.2 m 普通厢式货车的单位运输成本为 1.3 元/km,机械式冷藏汽车的单位运输成本为 1.6 元/km,车辆满载时单位距离的燃料消耗量为 2 L/km,车辆空载时单位距离的燃料消耗量为 1 L/km。依据我国交通运输部公布的数据,按高铁票价为普铁票价的 4 倍计算,铁路与公路之间的单位换装成本为 0.024 元/kg。依据《中华人民共和国交通部公路汽车货运站收费规则》可知,每 50 kg 特种货物的费率为 0.5 元,鲜活易腐货物按特种货物计算,机械式冷藏汽车的单位换装成本为 0.01 元/kg。依据国家发改委能源研究所的推荐值和国家电网中公布的工业用电低谷时段电价,设定电力系统的碳排放系数为 0.67 kg/(kW·h),单位电力成本为 0.425 元/(kW·h),单个蓄冷箱蓄冷板的充电量 2.11 kW·h。依据《省级温室气体清单编制指南》,设定燃油碳排放系数为 2.61 kg/L。依据我国各地排放交易所的成交均价,设定单位碳排放成本为 0.05 元/kg,高铁单位碳排放量为 0.009 1 kg/t。依据文献[8, 17],设定货物提前配送的惩罚系数为 20 元/h,货物延迟配送的惩罚系数为 15 元/h,外界温度为 30 ℃,冷冻厢内的温度为-10 ℃,冷藏厢内的温度为 2 ℃,冷冻厢的传热系数为 0.4 W/(m²·K),冷藏厢的传热系数为 0.7 W/(m²·K)。

5.2 结果与分析

采用 Matlab 2019 对文中模型进行优化求解,在

遗传算法中将种群规模设置为 200,最大迭代次数为 1 000,交叉概率为 0.9,变异概率为 0.05。将程序反复运行 20 次,得到城市末端配送路径,如表 2 所示。MODEL 1 需 10 辆普通厢式汽车配送 20 个自提点,每辆车配送 2 个自提点,共 10 条配送路径,而 MODEL 2 需 6 辆冷藏汽车完成 20 个自提点配送。

表 2 不同模式的配送路径	
Tab.2 Distribution routes for different models	
模式	配送路径
MODEL 1	0—d5—d12—0, 0—d1—d19—0,
	0—d9—d8—0, 0—d3—d16—0,
	0—d10—d20—0, 0—d11—d2—0,
	0—d4—d7—0, 0—d15—d18—0,
	0—d6—d13—0, 0—d17—d14—0
MODEL 2	0—d5—d11—d2—0,
	0—d19—d9—d18—0,
	0—d3—d4—d17—d14—0,
	0—d10—d20—d13—0,
	0—d12—d8—d16—0,
	0—d1—d15—d6—d7—0

注: MODEL 1 表示基于高铁快运的多温蓄冷箱全程冷链集配模式; MODEL 2 表示基于全程机械式冷藏汽车多温共配模式。

MODEL 2 的总成本为 15 436.736 元,而 MODEL 1 的总成本为 9 603.371 元,减少了 5 833.365 元。对比 2 种模式的制冷成本、碳排放成本、时间惩罚成本,表明 MODEL 1 比 MODEL 2 更具优势,如表 3 所示。

5.2.1 基于配送时限灵敏度分析

分别求解各客户自提点的最晚服务时间窗在延长或缩短 0.25 h 和 0.5 h 场景下,MODEL 1 和 MODEL 2 末端路径的最佳结果,如表 4 所示。

表 3 冷链集配全程成本对比
Tab.3 Comparison of whole cold chain joint pickup and distribution costs

模式	运输成本	制冷成本	碳排放成本	时间惩罚成本	合计
MODEL 1	8 662.749	26.40	51.822	862.4	9 603.371
MODEL 2	9 159.415	2 246.503	1 585.218	2 445.6	15 436.736

表 4 不同配送时限下 2 种模式全程冷链集配信息
Tab.4 Whole cold chain joint pickup and distribution information for both models with different delivery timescales

模式	配送时间约束	目标函数最优值/元	惩罚成本/元	平均配送时间/h	车辆数目/辆
MODEL 1	延长 0.5 h	9 390.897	665.067	5.027	10
	延长 0.25 h	9 490.897	765.067	5.027	10
	正常	9 603.371	862.400	5.064	10
	缩短 0.25 h	9 697.624	952.600	5.065	10
	缩短 0.5 h	9 790.897	1 065.067	5.132	10
MODEL 2	延长 0.5 h	14 807.986	1 787.867	9.536	6
	延长 0.25 h	14 886.486	1 983.067	9.389	6
	正常	15 436.736	2 445.600	9.389	6
	缩短 0.25 h	16 552.006	3 538.200	9.516	6
	缩短 0.5 h	19 099.924	6 161.733	9.350	6

以正常配送时间约束为参照,延长或缩短时间窗,2种模式的配送车辆数量不变,平均配送时间变化差异不大,但MODEL 2的平均配送时间远高于MODEL 1的平均配送时间。随着约束配送时间的延长,2种模式的目标函数最优值呈递减趋势,其中MODEL 2的惩罚成本比MODEL 1的高。随着配送时间约束的缩减,2种模式的目标函数最优值呈递增趋势。其中,MODEL 2的惩罚成本的增长幅度大于MODEL 1,且在配送时限约束缩减至0.5 h的情况下,MODEL 2的惩罚成本约为MODEL 1的6倍。

5.2.2 基于高铁运价灵敏度分析

根据2018年实行的发改委【2017】2163号运价规则,运价=基价1+基价2×运价公里,铁路整车货物运输按6号运价计算,基价1为26元/t,基价2为0.138元/(t·km),铁路整车货运与高铁整车货运运价的比值为1:2.19,计算得出MODEL 1的高铁正常

运价。此高铁运价在现实货物运价中极低,因而运价敏感性分析仅考虑高铁运价上浮时货运运输成本的变化情况,如表5所示。

在中间高铁正常运价下的运输成本为2 669.94元,对比机械式冷藏汽车的运输成本(7 269.536元),高铁运输成本远低于机械式冷藏汽车运输成本。当高铁运价上浮20%时,总运输成本超过机械式冷藏汽车总运输成本,但中间高铁的运输成本仍低于机械式冷藏汽车运输成本。当高铁运价上浮173%时,中间高铁运输成本超过机械式冷藏汽车运输成本。当高铁运价上浮至220%时,MODEL 1的总成本超过MODEL 2的总成本。当高铁货运运价按高铁客运票价计算时,中间高铁的运输费用为13 440元,价格远高于正常运价及上浮运价下的中间高铁运输成本。由此可见,当高铁运价上浮不超过220%时,MODEL 1比MODEL 2更具经济价值。

表5 高铁运价敏感性变化对比
Tab.5 Comparison of high-speed railway tariff sensitivity change

模式	成本	中间运输成本/元	总运输及配送成本/元	总成本/元
MODEL 1	正常运价	2 669.94	9 159.415	9 603.371
	高铁运价上浮 20%	3 203.928	9 196.737	10 137.359
	高铁运价上浮 173%	7 288.936	13 281.745	14 222.367
	高铁运价上浮 220%	8 543.808	14 536.617	15 477.239
	高铁客运运价	13 440	19 432.809	20 373.431
MODEL2	正常运价	7 269.536	9 159.415	15 436.736

6 结语

针对多品种、高频次、小批量、高时效、高附加值等特点的消费者订单需求,结合自主研发的多温蓄冷箱,提出了一种新型的基于公铁联运的多温蓄冷箱全程冷链集配的运营模式。对比全程机械式冷藏汽车多温共配模式,建立以总成本最小化为目标的优化模型。采用遗传算法求解,计算出最优路径下的总成本,并分别从配送时效和高铁运价两方面进行灵敏性分析。基于公铁联运的多温蓄冷箱全程冷链集配模式的运营总成本较低,该模式对企业实现节能减排、降本增效的目标具有促进作用,结合高铁开展的多式联运,能为运输主体开拓新市场、整合闲置运力提供一种新的运营模式。由于提出的模式尚处于初步构想,未投入实际运作,多温蓄冷箱的配送优化也存在假设前提,多温蓄冷箱的回收阶段仅停留在定性分析,因此还需进一步结合实际多式联运需求,梳理配送模式的组织流程,完善多温蓄冷箱回收利用的定量分析。此外,在冷链集配优化问题中,货损成本是总成本中需考虑的必要组成部分之一,本文在前期通过货损实验验证了2种模式在集配过程中的货损成本可忽略

不计,故文中未计算货损成本。

参考文献:

- [1] KUO J C, CHEN Mu-chen. Developing an Advanced Multi-Temperature Joint Distribution System for the Food Cold Chain[J]. Food Control, 2010, 21(4): 559-566.
 - [2] HSU C I, LIU Kang-po. A Model for Facilities Planning for Multi-Temperature Joint Distribution System[J]. Food Control, 2011, 22(12): 1873-1882.
 - [3] HSU C I, CHEN Wei-ting. Optimizing Fleet Size and Delivery Scheduling for Multi-Temperature Food Distribution[J]. Applied Mathematical Modelling, 2014, 38(3): 1077-1091.
 - [4] 王淑云, 陈菖伟. 冷链品配送系统双目标优化研究——基于多温共配的比较研究[J]. 工业技术经济, 2017, 36(11): 71-78.
- WANG Shu-yun, CHEN Ju-wei. Double Objective Optimization of Cold Chain Production Delivery System—Comparative Study Based on Multi-Temperature

- Joint Distribution[J]. Journal of Industrial Technological & Economics, 2017, 36(11): 71-78.
- [5] 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 Qiu-lei, HU Xiang-pei, WEI Juan, 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.
- [6] 姚源果, 贺盛瑜. 基于交通大数据的农产品冷链物流配送路径优化研究[J]. 管理评论, 2019, 31(4): 240-253.
- YAO Yuan-guo, HE Sheng-yu. Research on Optimization of Distribution Route for Cold Chain Logistics of Agricultural Products Based on Traffic Big Data[J]. Management Review, 2019, 31(4): 240-253.
- [7] CHEN Wei-ting, HSU C I. Greenhouse Gas Emission Estimation for Temperature-Controlled Food Distribution Systems[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 104: 139-147.
- [8] 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.
- SHEN Li, LI Cheng-yu, GAN Yan, et al. Distribution Route Optimization of Fresh Products Considering Cargo Damage and Carbon Emission[J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2021, 42(1): 44-49.
- [9] 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 Wei, YANG Bai-yue, WANG Xiao-ya, et al. Inventory-Distribution Optimization of Cold Chain Logistics Enterprises in Low-Carbon Environment[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(11): 45-52.
- [10] 牟进进, 陈莒伟, 王淑云. 蓄冷式多温集配路径优化模型[J]. 中国管理科学, 2022, 30(10): 236-246.
- MOU Jin-jin, CHEN Ju-wei, WANG Shu-yun. Optimization Model of Cold Storage Multi-Temperature Distribution Path[J]. Chinese Journal of Management Science, 2022, 30(10): 236-246.
- [11] 李五双, 朱成明, 李阳, 等. 基于碳交易的冷链物流多式联运路径选择[J]. 物流技术, 2022, 41(10): 77-82.
- LI Wu-shuang, ZHU Cheng-ming, LI Yang, et al. Path Selection of Cold Chain Logistics Multimodal Transport Based on Carbon Trading[J]. Logistics Technology, 2022, 41(10): 77-82.
- [12] YU Ke-mei, STRAUSS J, LIU Shu-li, et al. Effects of Railway Speed on Aviation Demand and CO₂ Emissions in China[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2021, 94: 102772.
- [13] PAZOUR J A, MELLER R D, POHL L M. A Model to Design a National High-Speed Rail Network for Freight Distribution[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2010, 44(3): 119-135.
- [14] 李珍萍, 杨梦月. 基于低碳排放的车辆路径优化问题研究[J]. 数学的实践与认识, 2017, 47(11): 44-49.
- LI Zhen-ping, YANG Meng-yue. Research on Vehicle Routing Problem under Low Carbon Emission[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2017, 47(11): 44-49.
- [15] 任腾, 陈玥, 向迎春, 等. 考虑客户满意度的低碳冷链车辆路径优化[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(4): 1108-1117.
- REN Teng, CHEN Yue, XIANG Ying-chun, et al. Optimization of Low-Carbon Cold Chain Vehicle Path Considering Customer Satisfaction[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26(4): 1108-1117.
- [16] 景晓腾. A 公司需求可拆分的多温共配车辆路径问题[D]. 北京: 北京交通大学, 2020: 1-90.
- JING Xiao-teng. A Company Needs a Detachable Multi-Temperature Shared Vehicle Routing Problem[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020: 1-90.
- [17] 王旭坪, 董杰, 韩涛, 等. 考虑碳排放与时空距离的冷链配送路径优化研究[J]. 系统工程学报, 2019, 34(4): 555-565.
- WANG Xu-ping, DONG Jie, HAN Tao, et al. The Optimization of Cold Chain Delivery Routes Considering Carbon Emission and Temporal-Spatial Distance[J]. Journal of Systems Engineering, 2019, 34(4): 555-565.

责任编辑: 彭颀