



## 考虑碳排放的生鲜农产品冷链物流配送路径优化模型

邓红星, 周洁, 胡翼

引用本文:

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.

---

### 相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

#### 考虑碳排放的多式联运多目标路径规划

重庆理工大学学报(自然科学). 2022, 36(11): 219–225 [https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425\(z\).2022.11.026](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425(z).2022.11.026)

#### 改进ACO算法的UAV航迹规划在山区物流配送中的应用研究

重庆理工大学学报(自然科学). 2022, 36(10): 185–191 [https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425\(z\).2022.10.022](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425(z).2022.10.022)

#### 融合区块链的能源协同降碳电力交易福利模型

重庆理工大学学报(自然科学). 2022, 36(11): 234–240 [https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425\(z\).2022.11.028](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425(z).2022.11.028)

#### 考虑低碳因素的无水港扩展以及运量分配方案

重庆理工大学学报(自然科学). 2022, 36(9): 226–234 [https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425\(z\).2022.09.028](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425(z).2022.09.028)

#### 基于区块链多链的农产品供应链追溯应用

Application of Agricultural Products Supply Chain Traceability Based on Multi-Blockchain

重庆理工大学学报(自然科学). 2021, 35(10): 172–179 [https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425\(z\).2021.10.022](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425(z).2021.10.022)



# 考虑碳排放的生鲜农产品冷链物流配送路径优化模型

邓红星, 周洁, 胡翼

(东北林业大学 交通学院, 哈尔滨 150040)

**摘 要:**考虑碳排放、时间窗、货损等因素,通过碳税计算碳排放成本,以最小化配送成本为目标,构建了生鲜农产品冷链物流配送路径优化模型,结合实例运用遗传算法求解,分别计算不考虑碳排放和考虑碳排放的生鲜农产品冷链物流路径优化方案,对比分析结果得出结论:考虑碳排放因素可以有效控制和提升生鲜农产品的流通率,降低生鲜农产品的货损率,控制物流配送成本以及减少碳排放量。本模型可为生鲜超市冷链物流配送优化提供有效决策信息。

**关键词:**碳排放;生鲜农产品;冷链;路径优化

中图分类号:F5

文献标识码:A

文章编号:1674-8425(2023)02-0289-09

## 0 引言

随着电子商务的快速发展,人们对生鲜农产品的要求不仅是新鲜,而且注重口感和品质。由于生鲜农产品运输的特殊性,存储和运输过程中都需要制冷控制温度,这样会产生大量的二氧化碳。冷链物流具有能源消耗高和高碳排放量的特点,研究时要考虑经济效益和环境影响,低碳冷链物流愈发受到重视。生鲜农产品相较于其他产品而言对冷链物流配送的要求更高且成本更大<sup>[1]</sup>。因此,通过配送路径规划降低生鲜农产品的配送成本成为生鲜农产品冷链物流研究的一个重点。

李娜<sup>[2]</sup>结合冷链物流的特点,考虑能耗成本

和货损成本构建了具有满意度约束的多配送中心冷链车辆路径优化模型,提出了单亲遗传算法对模型进行求解。El Raoui等<sup>[3]</sup>针对具有时间窗的车辆路径问题研究得出,由于交通堵塞和时间窗限制造成延误会导致额外的成本并增加二氧化碳排放的结论。沈丽等<sup>[4]</sup>研究生鲜农产品路径问题时对货损和碳排放量这2个因素进行详细分析,得出考虑货损和碳排放量这2个因素的燃油成本和时间惩罚成本低于不考虑这2个因素的燃油成本和时间惩罚成本。王彩虹<sup>[5]</sup>建立了一个生鲜农产品冷链配送路径优化模型,采用遗传算法对其进行求解,然后用随机生成的数据验证模型和算法的有效性。

收稿日期:2022-06-10

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金D类项目碳中和专项(2572021DT09)

作者简介:邓红星,男,博士,教授,主要从事物流技术与管理、交通运输系统管理研究,E-mail:1969dhx@163.com;周洁,女,硕士,主要从事物流系统规划与设计研究,E-mail:1826426369@qq.com。

本文引用格式: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.

Citation format: DENG Hongxing, ZHOU Jie, HU Yi. Optimization model of the cold chain logistics distribution path of fresh agricultural products considering carbon emission[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2023, 37(2): 289-297.

通过对比文献研究发现,现有的研究存在以下不足:冷链物流车辆路径问题模型构建不完善。在众多目标模型研究中,现有模型中除路径和车辆数目外,考虑因素比较单一,比如送达时间对客户满意度水平的描述,冷链运输过程中的碳排放问题等等。在构建模型时将这些因素考虑其中,通过细化碳排放成本,建立考虑碳排放的配送路径优化模型,将碳排放成本纳入到总配送成本中,建立总配送成本最小的目标函数<sup>[6]</sup>。

## 1 模型构建

区别于传统路径优化问题,不仅考虑距离成本因素,还考虑碳税政策对碳排量成本的影响。已知配送中心和每个生鲜超市门店的地理位置、需求量和时间窗约束,研究的模型考虑情形如下:一个配送中心向多个门店配送货物,车辆统一从配送中心出发按照一定的配送顺序,配送到几个需求点,最后返回到配送中心,并且基于生鲜超市门店的时间窗约束和需求约束,将碳排放成本纳入总配送成本,以最小化总配送成本为目标从长远角度出发降低生鲜超市的冷链配送成本和碳排放成本<sup>[7]</sup>。

### 1.1 模型假设

1) 只考虑单个配送中心为配送范围内的多个生鲜超市门店提供配送服务的问题。

2) 冷藏车对各个门店按照一定的次序进行送货最后回到配送中心。

3) 配送中心的冷藏车辆都是同一型号,车辆的载重量一致且容量有限,冷藏车数量足够。

4) 每个生鲜超市门店的生鲜农产品只能由一辆冷藏车一次性配送完成。

5) 在配送过程中,每个生鲜超市门店的需求是恒定的,不存在中途指派车辆。

6) 配送中心的货物数量充足,货物短缺及备货不在考虑范围之内。

7) 配送过程中的车辆速度虽然实时都在变化,但为了研究方便和简化,假定车辆匀速行驶。

8) 外界温度的变化对于运输车辆能耗的影响忽略不计。

### 1.2 符号说明

$M=1,2,3,\dots,m$  表示所有车辆的集合; $N=$

$0,1,2,\dots,n$  表示配送中心和门店节点的集合,其中0表示配送中心,剩余节点表示生鲜超市门店。

### 1.3 总配送成本分析

#### 1.3.1 固定成本

固定成本与配送车辆的运输距离和运输时长无关,通常与员工的固定工资、车辆的折旧费用、车辆的维修费用有关。所有车辆的总固定成本为:

$$C_1 = f_m \sum_{m=1}^M G_m \quad (1)$$

式中: $f_m$  为第  $m$  辆车的固定使用费用; $G_m$  为 0、1 变量,若  $G_m = 1$ ,表示第  $m$  辆冷藏车被使用,否则  $G_m = 0$ 。

#### 1.3.2 运输成本

车辆运输成本主要包括车辆燃油费用,车辆运输成本主要与配送车辆的行驶距离有关。运输成本为:

$$C_2 = \sum_{m=1}^M \sum_{i,j=0}^n f_2 d_{ij} x_{i,j}^m \quad (2)$$

式中: $f_2$  为冷藏车单位配送距离的运输成本; $d_{ij}$  为配送中心  $i$  与超市门店  $j$  之间的距离; $x_{i,j}^m$  为 0、1 变量,当冷藏车  $m$  从配送中心  $i$  配送到超市门店  $j$  时, $x_{i,j}^m = 1$ ,否则, $x_{i,j}^m = 0$ 。

#### 1.3.3 货损成本

由于生鲜产品运输过程中对存储的环境要求较高,而运输的过程往往很难达到要求,因此会产生一定的货损成本,货损成本由冷藏车在生鲜农产品配送期间产生的货损成本和超市门店服务期间产生的货损成本组成。生鲜农产品货损成本与配送时间呈指数级关系。根据生鲜农产品变质的客观规律构造函数  $I(t) = I_0 e^{-\varepsilon t}$  来定量地描述生鲜农产品的变质程度,其中  $I(t)$  表示生鲜农产品在  $t$  时刻的变质程度, $I_0$  是货物开始的总质量, $\varepsilon$  是生鲜农产品的变质率,与生鲜农产品本身的特性以及所处的环境有关<sup>[8]</sup>。为降低模型的复杂性,在模型的假设中,假设冷链车内的温度不变,腐败率为某个常数,生鲜农产品的腐败率随运输时间变化呈现出一个指数温度变化的特征<sup>[9]</sup>。运输车辆到达门店  $j$  时,打开车门在行驶过程中产生的货损成本为:

$$C_3 = \sum_{m=1}^M \sum_{i,j=0}^n p a_i (1 - e^{-\varepsilon_1 (t_j^m - t_i^0)}) y_i^m \quad (3)$$

由于装卸货物,会使冷链车内的冷空气流失,则冷链车内的温度也因此会发生相应的变化而上升,假设运输车辆在停靠装卸货物时,车门敞开所造成的变质率为  $\varepsilon_2$ ,则由货物从车辆卸下所消耗的成本为:

$$C_3'' = \sum_{m=1}^M \sum_{i,j=0}^n pa_i(1 - e^{-\varepsilon_2 t_i^m}) y_i^m \quad (4)$$

式中: $p$ 为生鲜农产品的平均单位价格; $a_i$ 为生鲜超市门店  $i$  对生鲜农产品的需求量; $t_{ij}^m$ 为第  $m$  辆车从生鲜超市门店  $i$  到生鲜超市门店  $j$  的时间; $\varepsilon_1$ 为生鲜农产品在特定温度下的变质率; $y_i^m$ 为 0、1 变量,当车辆为生鲜超市门店  $i$  服务时,则  $y_i^m = 1$ ,否则  $y_i^m = 0$ ; $\varepsilon_2$ 为在生鲜超市门店服务期间的生鲜农产品货损率; $t_i$ 为在生鲜超市门店  $i$  的冷藏车的服务时间。

货损成本  $C_3 = C_3' + C_3''$ ,则

$$C_3 = \sum_{m=1}^M \sum_{i,j=0}^n pa_i(1 - e^{-\varepsilon_1(t_i^m - t_j^m)}) y_i^m + \sum_{m=1}^M \sum_{i,j=0}^n pa_i(1 - e^{-\varepsilon_2 t_i^m}) y_i^m \quad (5)$$

### 1.3.4 制冷成本

1) 车辆在运输货物的过程中产生的总制冷成本

机械制冷冷藏车的制冷原理是通过压缩机驱动制冷剂循环流动状态改变制冷的。制冷成本可以通过计算消耗这部分热负荷需要使用的制冷剂费用表示出来,车辆在运输货物的过程中侵入的热负荷为:

$$L_1 = (1 + \delta) \times \gamma \times S \times (T_1 - T_2) \quad (6)$$

车辆在运输货物的过程中产生的总制冷成本为:

$$C_4' = \sum_{m=1}^M p_2 L_1 (t_i^m - t_0^m) \quad (7)$$

式中: $\delta$ 为固定常数,表示恶化程度; $\gamma$ 为热传率; $S$ 为运输货物的车辆车厢受到外界太阳的具体辐射面积; $T_1$ 为运输货物的车辆车厢外界温度; $T_2$ 为运输货物的车辆车厢内货物所处的温度; $p_2$ 为单位制冷成本; $t_i^m$ 为每辆车回到配送中心的时刻。

2) 运输货物装卸货物产生的制冷成本

在运输车辆卸货时,外界的暖空气会根据热学第一定律与车内的冷空气产生对流,使得在制

冷系统中的冷热负荷进入车厢内,其中,第  $m$  辆运输车辆在车门打开时造成空气对流而侵入的热负荷为:

$$L_2 = \mu(0.54V_m + 3.22)(T_1 - T_2) \quad (8)$$

式中: $V_m$ 为运输货物的第  $m$  辆车的车厢体积; $\mu$ 为运输车辆的开口频度系数,设为 1。在货物送达客户或交接过程中,运输的第  $m$  辆冷藏车为了对客户或交接进行服务所需要车辆门开关所造成的制冷成本为:

$$C_4'' = \sum_{m=1}^M \sum_{i=0}^n p_2 L_2 t_i^s y_i^k \quad (9)$$

式中: $t_i^s$ 为停留在超市门店  $j$  的时间; $y_i^k$ 为 0、1 变量,若  $k$  经过  $i$ ,则  $y_i^k = 1$ ;否则, $y_i^k = 0$ 。

总的制冷成本  $C_4 = C_4' + C_4''$ 。

### 1.3.5 碳排放成本

碳排放成本  $C_6$  是生鲜农产品配送过程中产生的  $CO_2$  排放成本,由生鲜农产品配送期间消耗汽油、柴油等能源产生的碳排放成本和冷藏车消耗制冷剂产生的碳排放成本组成。冷藏车的燃油消耗量主要与车辆的配送距离和生鲜农产品的载重量有关<sup>[10]</sup>,冷藏配送车辆单位配送距离的燃油消耗量与实际冷藏货物载重量呈现出如下函数关系:

$$E(X) = \frac{e_1 - e_0}{Q} X + e_0 \quad (10)$$

式中: $e_1$ 为满载时冷藏车的单位配送距离燃油消耗量; $e_0$ 为空载时冷藏车的单位配送距离燃油消耗量; $Q$ 为冷藏车的额定载重量, $m = 1, 2, 3$ ;  $X$ 为车辆载重量。

在生鲜农产品配送过程中,从超市  $i$  到超市  $j$  运送货物量为  $Q_{ij}$ ,在超市间行驶所产生的碳排放量可表示为: $H_1 = \rho E(Q_{ij}) d_{ij}$ ,配送过程中冷冻冷藏设备产生的  $CO_2$  排放量也与运输距离和载货量相关,如果从超市  $i$  到超市  $j$  运送货物量为  $Q_{ij}$ ,那么行驶时因制冷所产生的  $CO_2$  排放量可表示为: $H_2 = \lambda Q_{ij} d_{ij}$ 。整个配送货车产生的  $CO_2$  排放量  $H = H_1 + H_2$ ,通过碳税计算碳排放成本,即碳排放成本 = 碳税  $\times$  碳排放量<sup>[11]</sup>。生鲜农产品配送期间消耗汽油、柴油等能源产生的碳排放成本为:

$$C_5' = \sum_{m=1}^M \sum_{i,j=0}^n p_c \rho E(Q_{ij}) d_{ij} x_{i,j}^m \quad (11)$$

行驶时因制冷所产生的碳排放成本为:

$$C_5'' = \sum_{m=1}^M \sum_{j=0}^n p_c \lambda Q_{ij} d_{ij} x_{i,j}^m \quad (12)$$

式中:  $p_c$  为单位碳税价格;  $\rho$  为碳排放系数;  $H_1$  为冷藏车单位配送距离的燃油消耗量与实际生鲜农产品载重量的函数关系;  $H_2$  为冷藏车单位时间内制冷剂产生的能源消耗;  $\lambda$  为配送单位重量货物行驶单位距离制冷产生的排放;  $Q_{ij}$  为从超市  $i$  到超市  $j$  运送的货物量。

碳排放成本  $C_5 = C_5' + C_5''$ 。

### 1.3.6 惩罚成本

时间惩罚成本与时间关系如图 1 所示。 $[ET_i, LT_i]$  为超市门店  $i$  期望被服务的时间窗;  $[EET_i, LLT_i]$  为超市门店  $i$  可以接受被服务的时间窗; 实际情况中超过时间窗约束并不会产生惩罚成本, 但是会影响顾客的满意度, 所以需要考虑时间窗, 但是总配送成本里不加上惩罚成本, 将时间窗约束转化成本对路径选择进行约束, 时间窗惩罚成本只作为约束条件, 若时间窗惩罚成本较高, 则选择该路径的可能性小<sup>[12]</sup>。

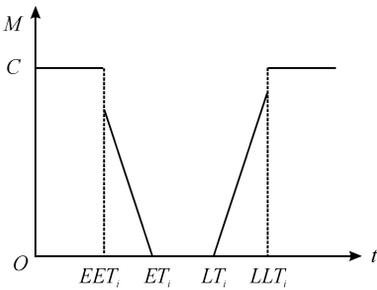


图 1 时间惩罚成本与时间关系图

货物运输中产生的时间惩罚成本  $\varphi_i(t_i)$  如下式所示:

$$\varphi_i(t_i) = \begin{cases} M, & \text{其他} \\ \partial_1(ET_i - T_{ik}), & EET_i \leq T_{ik} \leq ET_i \\ \partial_2(T_{ik} - LT_i), & LT_i \leq T_{ik} \leq LLT_i \\ 0, & ET_i \leq T_{ik} \leq LT_i \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $\partial_1$  为冷藏车单位时间的等待惩罚成本;  $\partial_2$  为冷藏车单位时间的延迟惩罚成本。

### 1.4 目标函数及约束条件

$$C = f_m \sum_{m=1}^M G_m + \sum_{m=1}^M \sum_{j=0}^n f_2 d_{ij} x_{i,j}^m +$$

$$\begin{aligned} & \sum_{m=1}^M \sum_{j=0}^n p a_i (1 - e^{-\varepsilon_1(t_i^m - t_0^m)}) y_i^m + \\ & \sum_{m=1}^M \sum_{j=0}^n p a_i (1 - e^{-\varepsilon_2 t_i}) y_i^m + \\ & \sum_{m=1}^M p_2 L_1 (t_i^m - t_0^m) + \sum_{m=1}^M \sum_{i=0}^n p_2 L_2 t_i^s y_i^k + \\ & \sum_{m=1}^M \sum_{j=0}^n p_c \rho H_1 d_{ij} x_{i,j}^m + \\ & \sum_{m=1}^M \sum_{j=0}^n p_c \rho H_2 t_{i,j}^m x_{i,j}^m \end{aligned} \quad (14)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{j=0}^m m x_{ij}^m \leq M, \quad i, j = 0, 1, 2, \dots, n; m = 1, 2, \dots, M \quad (15)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij}^m = \sum_{i=1}^n x_{ji}^m \leq 1, \quad i, j = 0, 1, 2, \dots, n; m = 1, 2, \dots, M \quad (16)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{j=0}^n v_j x_{ij}^m \leq V_m, \quad i, j = 0, 1, 2, \dots, n; m = 1, 2, \dots, M \quad (17)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{j=0}^n x_{ji}^m = 1, \quad i, j = 0, 1, 2, \dots, n; m = 1, 2, \dots, M \quad (18)$$

$$x_j^m = \{0, 1\}, \quad j = 0, 1, 2, \dots, n; m = 1, 2, \dots, M \quad (19)$$

$$x_{ij}^m = \{0, 1\}, \quad i, j = 0, 1, 2, \dots, n; m = 1, 2, \dots, M \quad (20)$$

$$\varphi_i(t_i) = \begin{cases} M, & \text{其他} \\ \partial_1(ET_i - T_{ik}), & EET_i \leq T_{ik} \leq ET_i \\ \partial_2(T_{ik} - LT_i), & LT_i \leq T_{ik} \leq LLT_i \\ 0, & ET_i \leq T_{ik} \leq LT_i \end{cases} \quad (21)$$

$$t_i^m = t_j^m + t_j^s + t_{ij}^m \quad (22)$$

约束条件(15)表示配送所需冷藏车数量不超过配送中心拥有的冷藏车辆数  $M$ ; 约束条件(16)表示冷藏车从配送中心对门店逐一配送, 配送完成后回到配送中心的冷藏配送车; 约束条件(17)表示每条配送路径的冷藏车辆实际装载量不超过冷藏车的最大容量  $V_m$ ; 约束条件(18)表示每个配送点的配送任务必须由一辆冷藏车完成配送, 而且每个配送点有且只有一次配送机会; 约束条件(19)和(20)表示 0,1 约束, 其值为 0 或 1; 约束条件(21)表示不同时间到达的时间窗惩罚成

本;约束条件(22)表示配送过程的连续性。

## 2 遗传算法求解考虑碳排放的冷链物流路径优化问题 (VRP)

### 2.1 考虑碳排放的冷链物流 VRP 的染色体构造

染色体构造采用自然数编码,编号 0 代表配送中心,由  $M$  辆冷藏车从配送中心出发对编号为  $1, 2, 3, \dots, N$  的生鲜超市门店进行配送然后再回到配送中心,一旦对生鲜超市门店编号后,生鲜超市门店的编号就不再更改。一条配送线路的染色体长度为  $M + N + 1$ 。

### 2.2 考虑碳排放的冷链物流 VRP 的种群初始化

遗传算法的进化起点是生成初始化种群,种群规模的大小会对遗传算法的运算性能造成影响,如果规模过小,样本不充足,有可能导致搜索结果不好;如果规模过大,计算量太大,有可能收敛时间很长。这里采用随机方式生成初始种群规模为 100 的种群。

### 2.3 考虑碳排放的冷链物流 VRP 的适应度计算

染色体个体的优劣可以通过适应度值大小来表示。染色体个体的适应度值越高表示个体越优;适应度值越低则表示个体质量不高,会被淘汰掉。这里将总配送成本作为目标函数,目标函数的倒数为该染色体的适应度值。 $f_i = \frac{1}{Z_i}$ ,  $f_i$  表示染色体  $i$  的适应度值,  $Z_i$  表示第  $i$  条染色体的目标函数值。

### 2.4 考虑碳排放的冷链物流 VRP 的遗传算子设计及算法终止设计

选择算子采用轮盘赌法,个体被选择的概率通过个体的适应度值计算,某个体被选择的概率与相对适应度呈正比<sup>[13]</sup>。交叉算子采取双点交叉法,在相互配对的 2 个个体编码串随机选择 2 个交叉点,不变动交叉点的位置,交换 2 个交叉点前后的染色体基因。依表现型进行概率变异,这里变异操作采用 2-交换变异算子方法,随机从染色体上选择 2 个非零基因,对 2 个非零基因的位置进行交换<sup>[14]</sup>。最大进化代数为 500,当进化代数为 500 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。

## 3 实例验证

### 3.1 门店距离及需求信息

七鲜配送中心位于北京市,选取了北京市 24 家门店十月份某天的数据进行研究,各超市门店的基本需求信息(需求量、时间窗要求、所需服务时间)如表 1 所示。其中“0”表示配送中心,“1~24”表示需要服务的门店。配送中心和 24 家超市门店的具体地址信息如图 2 所示。

表 1 生鲜超市门店的需求量及时间窗

编码	需求量/t	期望时间窗	可接受时间窗	服务时间/min
A	-	0:00—24:00	0:00—24:00	0
1	2.3	5:10—6:10	4:00—7:00	20
2	2.0	5:20—6:20	4:00—7:00	15
3	1.4	5:30—6:35	4:00—7:00	10
4	1.7	5:10—6:10	4:00—7:00	15
5	1.3	5:00—6:00	4:00—7:00	10
6	2.2	5:40—6:40	4:00—7:00	15
7	1.8	5:00—6:00	4:00—7:00	15
8	0.4	5:00—6:00	4:00—7:00	10
9	1.5	6:45—7:45	5:00—8:00	20
10	2.3	6:55—7:55	5:00—8:00	10
11	0.5	6:05—7:05	5:00—8:00	10
12	1.2	6:10—7:10	5:00—8:00	20
13	2.3	6:00—7:00	5:00—8:00	20
14	0.4	6:35—7:35	5:00—8:00	10
15	2.0	6:45—7:45	5:00—8:00	20
16	2.3	6:50—7:50	5:00—8:00	20
17	1.1	4:30—5:30	4:00—6:00	15
18	2.0	4:25—5:25	4:00—6:00	15
19	1.2	4:50—5:50	4:00—6:00	10
20	0.8	4:45—5:45	4:00—6:00	20
21	0.9	4:30—5:35	4:00—6:00	20
22	1.6	4:20—5:20	4:00—6:00	10
23	1.4	4:50—5:50	4:00—6:00	15
24	2.0	4:45—5:45	4:00—6:00	15



图2 配送中心及门店位置分布图

配送中心选用福田瑞沃 6.8 m 冷藏车作为冷链配送车辆,配送车辆的最大载重量为 10 t,因配送发生在上午 4:00—8:00,假定车外温度设定为 21 ℃,车厢内温度设定为 4 ℃。从服务时间窗信息可知各个超市门店要求的服务时间段都比较早,基本避开了车流量的高峰期,因此在研究中暂时不考虑交通堵塞对配送车辆运行速度的影响,假定运输车辆以 40 km/h 的速度匀速行驶,冷藏车行驶单位距离成本是 1.7 元/km,每辆配送车辆的固定使用成本是  $f_m = 250$  元/辆,单位制冷成本为 2.5 元/kcal。遗传算法涉及的相应参数,初始化种群数  $P(0)$  为 100,最大迭代次数为 500,交叉概率  $p_c$  为 0.5,变异概率  $p_m$  为 0.02。通过查询资料得到福田瑞沃 6.8 m 冷藏车的车辆参数,车辆数据如表 2 所示,优化模型中的基础参数部分来源于七鲜门店和相关资料,基础参数设置如表 3 所示。

表2 车辆数据

参数	值
总质量/kg	16 350
额定载重量/kg	10 000
货箱尺寸/(mm × mm × mm)	6 720 × 2 320 × 2 315
油料类型	柴油
空载等速燃料消耗/(L · km <sup>-1</sup> )	18.5/100
箱体容积/m <sup>3</sup>	36
装备质量/kg	6 350
外形尺寸/(mm × mm × mm)	9 115 × 2 490 × 3 765
最高车速/(km · h <sup>-1</sup> )	90
综合燃料消耗量/(L · km <sup>-1</sup> )	27.5/100

表3 基础参数设置

基础参数设置	值
单位制冷成本 $p_2$ /(元 · kcal <sup>-1</sup> )	1.5
生鲜农产品的平均单位价格 $p$ /(元 · t <sup>-1</sup> )	10 000
运输过程中处于某一特定温度下产品的变质率 $\varepsilon_1$	0.002
在生鲜超市门店服务期间的生鲜农产品货损率 $\varepsilon_2$	0.003
运输箱体恶化程度 $\delta$	0.008
热传率 $\gamma$ /(kcal · h <sup>-1</sup> · m <sup>-2</sup> · ℃ <sup>-1</sup> )	0.3
运输车辆的开口频度系数 $\mu$	1
空载时冷藏车的单位配送距离燃油消耗量 $e_0$ /(L · km <sup>-1</sup> )	0.116 5
满载时冷藏车的单位配送距离燃油消耗量 $e_1$ /(L · km <sup>-1</sup> )	0.377
碳排放系数 $\rho$ /(kg · L <sup>-1</sup> )	2.9
单位碳税价格 $p_c$ /(元 · kg <sup>-1</sup> )	0.15
配送单位重量货物行驶单位距离制冷产生的排放 $\lambda$ /(g · kg <sup>-1</sup> · km <sup>-1</sup> )	0.007 5
冷藏车单位时间的等待惩罚成本 $\theta_1$	0.001
冷藏车单位时间的延迟惩罚成本 $\theta_2$	0.002
车辆固定使用成本 $f_m$ /(元 · 辆 <sup>-1</sup> )	250
冷藏车行驶单位距离成本 $f_2$ /(元 · km <sup>-1</sup> )	1.7

### 3.2 碳排放价格灵敏度分析

设定碳税价格,不同二氧化碳排放量下的碳排放成本不同,碳排放成本影响着配送车辆的路径,碳排放价格的高低也对碳排放量有影响<sup>[15]</sup>,这里将碳税价格设计为 0.05 元/kg、0.15 元/kg、0.5 元/kg、2 元/kg、5 元/kg,不同价格水平下的碳排放成本和碳排放量如表 4 所示。

随着碳税价格的增加,算法性能比分析碳排放量有所下降,得到有效控制,碳税价格设置在 0.05 ~ 5 元/kg 时,碳排放量都在下降,但是当碳税价格设置为 10 时,可以发现碳排放量不降低反而上升,可见碳税价格不是设置得越高效果越明显,所以合理的设置碳税价格非常重要。可以参考碳税价格 0.05 ~ 5 元/kg 这个区间。目前我国还没有实行碳税政策,实现双碳目标需要财税政策相关制度的支撑。碳税税率  $p_c$  的设置参考了相关文献以及 2020 年部分国家的碳税税率,具体如表 5 所示。因此将碳税税率  $p_c$  设置为 0.15 元/kg。

表4 不同碳税价格下的碳排放情况

税率	0.05 元/kg		0.15 元/kg		5 元/kg		10 元/kg	
	成本/元	碳排放量/kg	成本/元	碳排放量/kg	成本/元	碳排放量/kg	成本/元	碳排放量/kg
1	14.3	285	37	244	1 243	248	2 496	249
2	12.8	255	40	266	1 266	253	2 525	252
3	13.5	270	38	255	1 264	252	2 417	241
4	13.3	266	42	277	1 201	240	2 591	259
5	12.9	258	36	238	1 195	239	2 374	237
6	14.6	291	45	298	1 266	253	2 336	234
7	13.3	266	37	243	1 188	237	2 295	230
8	12.6	251	44	293	1 145	229	2 592	259
9	13.5	270	43	284	1 347	269	2 498	250
10	12.7	254	40	263	1 157	231	2 503	250
均值	13.4	267	40	266	1 227	245	2 463	246

表5 部分发达国家(地区)碳税税率 (美元·吨<sup>-1</sup>)

国家(地区)	碳税初始税率	2020 年碳税税率	2030 年预计达到的碳税税率
加拿大	15.92	23.88	135.3
西班牙	15	17	23
日本	22	3	13
挪威	21	59	200
瑞典	27	114	145
法国	25	59	200
芬兰	7	50	90

3,8,17,18,4,15,0] }。车辆数 4,固定成本 1 000 元,运输成本 534.8 元,货损成本 1 164.9 元,制冷成本 9 060.7 元,碳排放量 230 kg,碳排放成本 34.5 元,总成本 11 794.9 元。

3.3 不考虑碳排放的配送路径优化模型求解

不考虑碳排放成本情况下,最终求得的最优路径规划如图 3 所示,最优路线为 { [0,20,16,19,14,8,7,9,0], [0,4,6,5,13,3,0], [0,2,18,11,12,10,15,0], [0,17,23,21,22,24,1,0] }。车辆数为 4,固定成本为 1 000 元,运输成本为 593.9 元,货损成本为 1 214.4 元,制冷成本为 9 305.6 元,总成本为 12 158.75 元。

3.4 考虑碳排放的配送路径优化模型求解

考虑碳排放情况下设置碳排放价格为 0.15 元/kg,最终求得的最优路径规划如图 4 所示,此时最优路线为 { [0,24,16,20,9,7,0], [0,19,23,22,21,14,13,6,0], [0,2,11,12,10,1,0], [0,5,

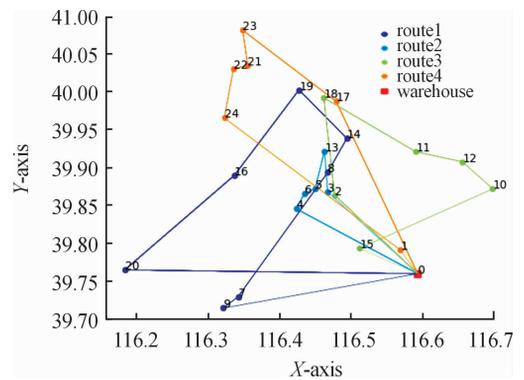


图3 不考虑碳排放的车辆路径规划

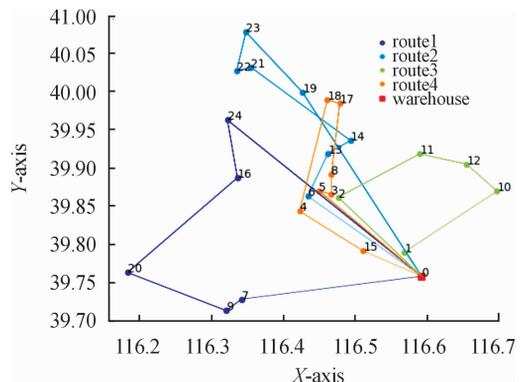


图4 考虑碳排放的车辆路径规划

### 3.5 数据结果分析

将碳排放成本纳入该配送方案的总配送成本中,是否考虑碳排放2个模型求得的最优解如表6所示。考虑碳排放后,碳排放量从299 kg降低为230 kg,降低30.0%。

表6 考虑碳排放和不考虑碳排放各项成本组成

成本项目	不考虑碳排放最优解/元	考虑碳排放最优解/元	成本差异/%
固定成本	1 000	1 000	0
运输成本	593.9	534.8	-11.1
货损成本	1 214.4	1 164.9	-4.2
制冷成本	9 305.6	9 060.7	-2.7
碳排放成本	44.85	34.5	-30.0
总配送成本	12 158.7	11 794.9	-3.1

由表6可以看出,考虑碳排放模型求得的最优解的各个成本组成都比不考虑碳排放的模型求得的最优解的各项成本低,其中,运输成本降低11.1%,货损成本降低4.2%,制冷成本降低2.7%,碳排放成本降低30.0%,总成本降低3.1%。产生上述成本差异的原因如下:考虑碳排放因素时,碳排放成本在总成本中所占比例较大,且与配送时间紧密相关,而配送时间又是影响变动成本、制冷成本和货损成本的关键因素,在进行路径规划时,为减少碳排放成本,必须尽量缩短配送时间,从而能够得到与行使时间相关的各项成本的节约;但同时,会造成在路径规划时无法兼顾时间窗的满足,从而增加了惩罚成本;对于固定成本,由于车辆载重和给定的客户需求量的限制,难以进一步优化。

## 4 结论

通过比较不考虑碳排放和考虑碳排放2种情况下生鲜超市的生鲜农产品冷链配送优化路径,发现考虑碳排放下的碳排放量和总配送成本相比较于不考虑碳排放情况下的碳排放量和总配送成本有所减少。在进行路径规划时,考虑碳排放有助于节约路径行驶时间,降低碳排放量,减少总配送成本。对于生鲜冷链类产品,应该综合考虑车辆制冷、时间窗、碳排放等因素,降低配送中的碳

排放,保证客户服务水平,在碳税政策下实现企业和社会的效益最大化。

## 参考文献:

- [1] 康迪. 碳排放政策下的生鲜农产品冷链物流配送路径优化[J]. 湖北开放职业学院学报, 2019, 32(12): 115-116.
- [2] 李娜. 单亲遗传算法的冷链物流车辆路径问题(VRP)优化研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2016.
- [3] EL RAOUI H, OUDANI M, ALAOUI A E H, et al. ABM-GIS simulation for urban freight distribution of perishable food[J]. MATEC Web of Conferences, 2018, 200: 6.
- [4] 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.
- [5] 王彩虹. 考虑碳排放的生鲜农产品冷链物流车辆路径问题[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2019.
- [6] 甘卫华, 刘郑, 苏雷. 考虑碳排放和时间约束的O2O零售企业配送中心选址优化[J]. 生态经济, 2020, 36(11): 32-37.
- [7] GHAREHYAKHEH A, KREJCI C C, CANTU J, et al. A multi-objective model for sustainable perishable food distribution considering the impact of temperature on vehicle emissions and product shelf life[J]. Sustainability, 2020, 12(16): 6668.
- [8] GIALLANZA A, PUMA G L. Fuzzy green vehicle routing problem for designing a three echelons supply chain[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 259: 120774.
- [9] 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.
- [10] 李峥. 生鲜农产品冷链物流共同配送路径优化研究[D]. 昆明: 云南财经大学, 2018.
- [11] MATSKUL V, KOVALYOV A, SAIENSUS M. Optimization of the cold supply chain logistics network with an environmental dimension[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 628(1): 012018.
- [12] LIU G, HU J, YANG Y, et al. Vehicle routing problem in cold chain logistics: A joint distribution model with carbon trading mechanisms[J]. Resources, Conservation & Recycling, 2020, 156: 104715.
- [13] 潘登. 遗传算法及多目标决策方法在铁路线路整体优化中的应用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2007.

[14] 侯玉梅,贾震环,田歆,等.带软时间窗整车物流配送路径优化研究[J].系统工程学报,2015,30(2):240-250.

[15] CAI L, LV W, XIAO L, et al. Total carbon emissions min-

imization in connected and automated vehicle routing problem with speed variables [J]. Expert Systems with Applications, 2021, 165: 113910.

## Optimization model of the cold chain logistics distribution path of fresh agricultural products considering carbon emission

DENG Hongxing, ZHOU Jie, HU Yi

(School of Traffic and Transportation, Northeast Forestry University, Harbin 150004, China)

**Abstract:** Considering carbon emission, time windows, cargo loss and other factors, with the goal of minimizing distribution costs, this paper constructs an optimization model of the cold chain logistics distribution path of fresh agricultural products by calculating cost of carbon emission through carbon tax. Combined with the examples, the genetic algorithm is used to gain the solution, and the cold chain logistics path optimization scheme of fresh agricultural products is calculated with and without considering carbon emission respectively. The comparative analysis results show that considering carbon emission factors can effectively control and improve circulation rate of fresh agricultural products and reduce loss rate of fresh agricultural products. Logistic distribution costs are controlled and carbon emission is reduced, which provides effective decision-making for fresh supermarkets to optimize cold chain logistics and distribution.

**Key words:** carbon emission; fresh agricultural products; cold chain; route optimization

(责任编辑 辛亮)