

文章编号: 1000-5862(2019)02-0188-08

考虑碳排放与新鲜度的冷链物流配送路径优化

刘炎宝¹, 王珂^{1*}, 杨智勇², 王思静¹

(1. 上海大学管理学院, 上海 200444; 2. 江西师范大学数学与信息科学学院, 江西 南昌 330022)

摘要: 针对生鲜农产品品质保障和低碳绿色物流的要求, 考虑在固定成本、燃油成本、时间窗惩罚成本的基础上增加新鲜度下降惩罚成本和碳排放成本, 从而建立生鲜农产品冷链物流配送路径优化模型. 结合遗传算法全局搜索能力较强和禁忌搜索算法局部寻优能力较好的优势, 设计基于禁忌搜索的改进遗传算法对其求解. 通过实际案例验证了模型的实用性和算法的有效性.

关键词: 绿色冷链物流; 碳排放; 生鲜农产品; 路径优化; 遗传算法

中图分类号: F 506; F 253 **文献标志码:** A **DOI:** 10. 16357/j. cnki. issn1000-5862. 2019. 02. 13

0 引言

随着经济的发展和居民生活质量的提高, 我国生鲜农产品冷链物流发展迅速, 对配送的要求也在不断提高. 与传统物流运输相比, 农产品冷链物流对产品的品质和时效性要求更高, 导致成本会增加. 此外, 在冷链物流配送过程中除了行驶车辆本身的碳排放, 还有车内各种冷冻设备的碳排放; 碳排放的增多不仅污染环境, 而且由于国家碳税政策的实施也会使物流企业增加配送成本. 因此, 确保农产品的新鲜度, 实现低碳运输, 是实际生活中冷链物流配送亟待解决的问题.

近年来, 冷链物流配送路径优化问题受到了学者的广泛关注. 许多学者在物流配送路径优化过程中考虑时间窗约束的影响^[1-2]. 王君等^[3]进一步考虑了具有模糊顾客需求的带时间窗车辆路径问题, 建立了车辆行驶距离和配送服务延迟时间最小化的多目标模糊概率约束规划模型. 张晓楠等^[4]则将需求和行驶时间都模糊化, 考虑时间窗约束建立变动补偿的机会约束预优化模型.

由于冷链物流的特殊性, 运输过程中需要更多油耗, 产生大量的碳排放, 因此考虑碳排放的绿色车辆路径优化成为重要的研究方向. A. Tiwari 等^[5]以最小化车辆行驶距离和二氧化碳排放量为目标对冷链车辆路径进行优化. R. S. Kumar 等^[6]以最小化总运营成本和总排放为目标研究带时间窗的多目标多

车辆路径问题. 葛显龙等^[7]提出碳排放的计算方法. 根据开放污染路径问题的负荷和工作时间约束建立整数规划模型. 唐金环等^[8]考虑车辆行驶时间和碳排放量, 针对城市配送中的车辆调度与路径分配问题建立非线性混合整数规划模型, 采用改进的多目标粒子群优化算法求解. 马秋卓等^[9]以珠海速递公司为例, 将车载量作为影响燃油消耗和二氧化碳排放量的因素建立配送路径优化模型. 王智忆等^[10]基于冷链物流车辆配送节能减排的必要性, 建立以碳排放量最低为目标的配送路径优化模型. 康凯等^[11]考虑冷藏车门打开所导致运输过程和卸载过程中不同的能源消耗, 以最低成本为目标函数构建考虑碳排放的生鲜农产品配送路径优化模型.

同时, 由于冷链物流运输的产品具有易腐性, 客户对产品新鲜度有一定要求. 为了提高客户满意度, 在冷链物流配送路径优化时需要考虑产品的新鲜度. M. Rabbani 等^[12]提出将易腐食品的新鲜度作为衡量最优配送路径的一个标准, 以运输成本、车辆行驶时间以及产品易腐性最小化为目标研究多配送中心冷链车辆路径问题. 邵举平等^[13]引入生鲜度损耗系数, 考虑顾客满意度与总成本建立生鲜农产品配送路径多目标优化模型. 张亚明等^[14]根据顾客服务时间和产品品质的要求建立多配送中心车辆路径问题模型.

虽然上述研究分别考虑了多种成本因素对冷链物流配送的影响, 但同时考虑产品新鲜度与车辆碳排放等成本因素的研究还相对较少. 而黄星星等^[15]

收稿日期: 2018-11-10

基金项目: 国家自然科学基金(71501123)资助项目.

通信作者: 王珂(1982-), 男, 重庆人, 副教授, 博士, 主要从事物流与供应链管理研究. E-mail: kwang@shu.edu.cn

研究了在碳税和碳限额下考虑货损成本和燃油消耗率的带时间窗的生鲜农产品冷链配送路径优化问题,所讨论的成本因素较为全面且符合实际需求,但所采用的求解方法的效率和精度还有进一步的提升空间.如何根据实际情况在模型中更全面地考虑成本因素,以及设计更有效的算法来提高求解的效率等问题都是值得进一步深入研究的方

因此,根据生鲜农产品易腐的特性以及碳排放量对企业经济效益和社会效益的影响,将产品新鲜度损耗成本与车辆碳排放成本引入到总成本核算中,同时考虑车辆载重量和服务时间窗约束,构建生鲜农产品冷链物流配送路径优化模型,更加切合实际需求.另外,由于车辆路径问题的复杂性,本文结合遗传算法和禁忌搜索算法的各自优势,采用遗传算法较强的全局搜索能力对车辆路径整体优化,应用禁忌搜索算法较好的局部寻优能力对单条车辆配送路径局部搜索,设计了基于禁忌搜索的改进遗传算法来提高模型的求解效率,并以上海浩旗冷藏物流有限公司对上海市黄浦区进行生鲜农产品配送服务为实际案例对模型和算法进行验证.

1 问题描述与模型构建

1.1 问题描述及参数说明

考虑碳排放的生鲜农产品冷链物流配送路径优化问题可以描述为:一个生鲜农产品配送中心服务多个顾客点,配有冷冻设备的同一型号冷链运输车辆匀速行驶,从配送中心出发为每个顾客点提供生鲜农产品服务,完成所有配送后再返回配送中心.每个顾客点的位置与产品需求量都为已知,且每个顾客点仅由一辆车提供服务,同时有服务时间的约束,将车辆从配送中心出发时的时间设为 0.在配送过程中产品有一定程度的新鲜度损耗,会产生因顾客满意度降低而导致的惩罚成本;产品在配送中心的新鲜度设为 100%,但不存在顾客因新鲜度过低而发生退货的情况.在满足顾客点产品需求量、时间窗要求以及运输车辆最大载重量的前提下,考虑碳排放成本和新鲜度惩罚成本,以配送总成本最小为目标,给冷链物流企业规划出效率高、成本低的最佳配送路径.

根据问题的描述对所涉及的参数变量进行说明.首先定义一个完全对称网络图 $G = [N, A]$. $N = \{0, 1, 2, \dots, n, n+1\}$ 表示所有节点的集合,其中 0 和 $n+1$ 为配送中心, $h=0$ 表示车辆从配送中心出发, $h=n+1$ 表示车辆返回至配送中心; $N' = \{1,$

$2, \dots, n\}$ 为顾客点的集合. $A = \{(i, j) : i, j \in N, i \neq j\}$ 为路径的集合.其他的符号以及符号说明如表 1 所示.

表 1 模型符号以及说明

符号	符号说明
x_{ij}^k	0-1 决策变量,若第 k 辆车服务完顾客点 i 后去服务顾客点 j ,则 $x_{ij}^k = 1$,否则 $x_{ij}^k = 0$
d_{ij}	顾客点 i 到顾客点 j 的距离/km
P_1	所运输生鲜农产品的价格/(元 \cdot t $^{-1}$)
P_2	配送车辆所用燃油的价格/(元 \cdot L $^{-1}$)
P_3	碳交易所的实时碳交易价格/(元 \cdot t $^{-1}$)
P_4	配送车辆出车的固定成本/(元 \cdot 辆 $^{-1}$)
S_i	配送车辆在顾客点 i 的服务时间/min
$[t_i^l, t_i^u]$	顾客点 i 的时间窗要求,其中 $[t_i^l, t_i^u]$ 为顾客的最佳收货时间, \bar{t}_i 为顾客可容忍的最晚收货时间
\bar{K}	配送车辆集合 $\bar{K} = \{1, 2, 3, \dots, K\}$,其中 K 表示配送中心拥有车辆数的最大值
Q	配送车辆的最大载重量/t
q_i	顾客点 i 的需求量/t
ρ	二氧化碳的排放系数
F_i	顾客点 i 的农产品新鲜度要求
v_0	配送车辆行驶速度/(km \cdot h $^{-1}$)
∂	生鲜农产品的新鲜度下降系数
θ	时间窗惩罚系数

1.2 成本分析

考虑农产品冷链物流配送的总成本由以下几个部分构成:车辆固定使用成本、车辆制动燃油消耗与制冷燃油消耗产生的燃油成本、碳排放成本、时间窗惩罚成本以及新鲜度下降惩罚成本.

1.2.1 固定成本 车辆的固定费用,主要包括车辆行驶过程中的磨损、折旧费用和车辆驾驶人员单次出车的工资等.决策变量 $x_{0j}^k = 1$ 表示车辆 k 从配送中心出发行驶到顾客点 j (否则为 0),则可以用

$\sum_{j=1}^n x_{0j}^k$ 表示车辆 k 是否使用,因此车辆固定成本为

$$C_1 = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^n x_{0j}^k P_4.$$

1.2.2 燃油成本和碳排放成本 根据绿色物流的要求,除了考虑燃油成本外,还增加了碳排放成本,即企业通过碳交易所购买相应的碳排放指标所花费的费用.燃油成本与碳排放成本,都是基于燃油消耗量计算的.燃油成本是燃油消耗量乘以油价;碳排放成本等于燃油二氧化碳排放系数与燃油消耗量、碳交易价格之积.车辆的燃油消耗量与车辆发动机型号、行驶速度、载重量相关,具体参数如表 2 所示.配送车辆 k 从顾客点 i 到顾客点 j 的燃油消耗量的计算公式如下^[16]:

$$F_{ij}^k = \lambda (bMV + \omega\gamma\alpha v + U_j^k\gamma\alpha v + \beta\gamma v^3) d_{ij}/v,$$

其中 $\lambda = \xi/(\kappa\psi)$ $\gamma = 1/(1000n_g\eta)$ $\alpha = \tau + g\sin \varepsilon + gC_r\cos \varepsilon$ $\beta = 0.5C_dPS$.

此外,车辆的单位油耗主要与车辆速度和载重量相关,本文设定配送车辆在水平公路上以 $v = v_0$ 匀速行驶,则车辆加速度 τ 、道路坡度 ε 均为 0,即 $\alpha = gC_r$. U_j^k 的计算方式为

$$U_j^k = \sum_{i=1}^K \sum_{i=1}^n (U_i^k - q_i) x_{ij}^k, \forall j \in N',$$

则燃油成本为

$$C_2 = \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^{n+1} \sum_{k=1}^K x_{ij}^k P_2 F_{ij}^k,$$

碳排放成本为

$$C_3 = \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^{n+1} \sum_{k=1}^K x_{ij}^k P_3 \rho F_{ij}^k.$$

表 2 车辆排放参数表

参数	参数说明
ξ	燃料与空气质量比
κ	燃油发动机热值/(kJ·g ⁻¹)
ψ	转换系数/(从 g·s ⁻¹ 到 L·s ⁻¹)
b	发动机摩擦系数
M	引擎速度
ω	车辆空载质量/kg
g	重力加速度
ε	道路坡度
C_r	滚动阻力系数
v	车辆速度
C_d	空气阻力系数
n_g	车辆传动效率
η	燃油发动机效率参数
τ	车辆加速度
U_j^k	车辆 k 到达顾客点 j 时的车载量
P	空气密度/(kg·m ⁻³)
V	发动机排量/VL
S	正面表面积

1.2.3 新鲜度下降惩罚成本 生鲜农产品具有易腐性,在配送过程中由于产品自身新陈代谢等因素会使产品新鲜度下降^[17],导致顾客满意度降低,此时物流企业需要对顾客做出适当的补偿.这要求建立农产品冷链车辆路径模型时必须考虑配送过程中因新鲜度下降而导致的惩罚成本.

农产品新鲜度下降系数 ϑ 与产品本身特性和所处的温度有关,由于本文假设在运输过程中产品所处环境的温度不变,则产品的新鲜度下降系数可认为是常数.生鲜农产品的质量随时间呈现指数变化的特征^[18],假设顾客点 j 需要的产品在配送中心的新鲜度是 100%,那么顾客点 j 被接受服务时产品的

新鲜度 \bar{F}_j 计算如下:

$$\bar{F}_j = \rho^{-\vartheta[\max\{\ell_j, \pi_j\}]},$$

其中 ℓ_j 为顾客点 j 可接受服务的最早时间, π_j 是配送车辆到达顾客点 j 的时间,计算如下:

$$\tau_j = \sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^n x_{ij}^k (S_i + d_{ij}/v + \max\{\ell_j, \pi_i\}), \forall j \in N'.$$

因生鲜农产品新鲜度下降产生的惩罚成本与农产品价格、顾客需求量成正比,计算如下:

$$C_4 = \sum_{i=1}^n P_1 q_i \max(F_i - \bar{F}_i, 0).$$

1.2.4 时间窗惩罚成本 每个顾客点都设有相应可接受服务的时间范围.以顾客点 i 为例,其可接受服务时间窗为 $[\ell_i, \bar{\ell}_i]$,当配送车辆在 ℓ_i 时刻之前到达顾客点是不接受服务的,此时配送车辆只能等到 ℓ_i 时再进行服务;当配送车辆到达时间在 $[\ell_i, \bar{\ell}_i]$ 之间,顾客点接受服务,但配送公司必须付出一定的惩罚成本,惩罚成本与货物的价值以及迟到的时间成正比;当配送车辆在 $\bar{\ell}_i$ 时刻之后到达,顾客点不接受服务.

本文的时间窗惩罚成本计算公式为

$$C_5 = P_1 \theta \sum_{i=1}^n q_i \max(\tau_i - \bar{\ell}_i, 0),$$

其中 θ 为时间窗惩罚系数且 $0 < \theta < 1$.

1.3 模型建立

构建的生鲜农产品冷链配送路径模型为

$$\min C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5, \quad (1)$$

s. t.

$$\sum_{i=1}^n x_{0i}^k \leq 1, \forall k \in \bar{K}, \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{n+1} x_{ij}^k = 1, \forall i \in N', \quad (3)$$

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^n x_{ij}^k q_j \leq Q, \forall k \in \bar{K}, \quad (4)$$

$$U_j^k = \sum_{i=1}^K \sum_{i=1}^n (U_i^k - q_i) x_{ij}^k, \forall j \in N', \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^n x_{i(n+1)}^k (U_i^k - q_i) = 0, \quad (6)$$

$$\tau_j = \sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^n x_{ij}^k (S_i + d_{ij}/v + \max\{\ell_j, \pi_i\}), \forall j \in N', \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n (\max\{\ell_j, \pi_j\} + S_i + d_{i(n+1)}/v) x_{i(n+1)}^k \leq 240, \quad (8)$$

$$\forall k \in \bar{K}, \quad (8)$$

$$\tau_i \leq \bar{\ell}_i, \forall i \in N', \quad (9)$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\}, \forall i, j \in N, \forall k \in \bar{K}.$$

(1) 式为目标函数,由固定成本、燃油成本、碳排放成本、时间窗惩罚成本以及新鲜度下降惩罚成本5个部分构成,要求配送总成本最小。

(2) 式、(3) 式分别表示配送车辆出车及顾客接受服务的基础条件,即同一时间内每辆车只能出车1次,顾客点 i 只有1辆车对其服务。

(4) ~ (6) 式表示车辆载重方面的限制。(4) 式是每辆配送车辆在进行配送之前,必须保证其配送路径上所有顾客点的需求量之和不能超过车辆的最大承载量 Q ;(5) 式是当车辆到达顾客点 j 进行服务时,其车载量 U_j^k 为车辆 k 出发时的总车载量减去已配送完的顾客点需求总量;(6) 式表示每辆配送车辆从配送中心出发时所运载的货物量等于该车辆所提供服务的顾客点需求量的总和。

(7) ~ (9) 式表示有关时间的限制。(7) 式表示车辆 k 到达顾客点 j 时的时间 τ_j 是通过车辆 k 在到达顾客点 j 之前所服务过的所有顾客点所用时间的累加;(8) 式是为了防止驾驶员疲劳驾驶,设置一个单次行车最大时间为4 h,即要求每辆车配送路径的完成时间不得超过4 h;(9) 式是每个顾客点的时间窗限制,要求配送车辆在最晚时间点 \bar{t}_i 前到达顾客点 i 进行服务。

2 算法求解

遗传算法是通过对生物遗传和进化过程中选择、交叉、变异操作的模拟,自适应搜索问题最优解,适用于求解全局优化问题,具有很强的全局寻优能力,但局部搜索能力较差,后期收敛速度慢。禁忌搜索是一种基于禁忌技术的邻域搜索算法,给一个初始解,产生当前解的邻域,在邻域里搜索一个最优解作为当前解,重复操作直到满足收敛条件,并利用禁忌表和相应的禁忌准则来避免迂回搜索,在一定程度上能避开局部最优,具有较强的局部搜索能力。

本文结合全局搜索能力较强的遗传算法与局部寻优能力较好的禁忌搜索算法,设计基于禁忌搜索的改进遗传算法对模型求解。即在全局空间的整个配送路径优化时采用遗传算法,在局部空间单个车辆的配送路径优化时采用禁忌搜索算法,从而提高算法求解效率。

2.1 改进的遗传算法

Step 1 设置参数。如种群规模 P_s 、交叉概率 P_c 、变异概率 P_m 、终止代数 m_g 以及初始代数 $t = 0$;

Step 2 初始化种群。产生 P_s 个染色体,染色体

长度为 $n + K + 1$ 。采用自然数编码的方式,随机产生一组初始解。有 n 个顾客点,将 $1 \sim n$ 的自然数随机排列,用0表示配送中心,有 K 辆配送车,将 $K - 1$ 个0随机插入该排列中,则2个0之间表示一条子路径,即配送车辆从配送中心出发,依次完成该车辆负责的对顾客点配送服务,然后再返回配送中心;

Step 3 染色体禁忌优化操作。根据一辆车所行驶的子路径对应一个基因段将染色体划分多个基因段,将基因段作为禁忌算法的初始解,利用禁忌搜索算法对基因段优化,产生后代染色体并计算染色体的适应度;

Step 4 选择操作。通过锦标赛策略对种群随机选择2条染色体进行比较,保留适应度好的染色体,重复 P_s 次后获得新种群,产生后代染色体;并利用保留精英策略对原种群中最优染色体是否存在新种群中进行判断,若不存在则将原种群的最优染色体替换新种群中适应度最低的染色体;

Step 5 交叉操作。根据交叉概率 P_c 选择进行交叉操作的染色体,从中随机选择2个交叉染色体的基因进行交叉,产生后代染色体,计算后代染色体的适应度,若后代染色体的适应度优于父代染色体,则替换;

Step 6 变异操作。根据变异概率 P_m 确定每次种群中进行变异操作的染色体,对变异染色体随机选择其中2个基因进行交换,产生后代染色体,并检验后代染色体的可行性;

Step 7 按照比例选择的方法选择后代染色体;

Step 8 重复步骤3 ~ 7直到设置的循环次数 $t = m_g$,选择其中最适应度的染色体作为最优解。

2.2 算法中的关键改进

2.2.1 可行化过程 首先初始化种群产生染色体,根据每一辆车所服务的顾客点将染色体划分基因段,确定配送车辆数量以及每辆车所服务的顾客点,即一个基因段代表一辆配送车辆所服务配送点的行驶路径;然后通过禁忌搜索算法优化染色体的基因段,对单条的配送车辆行驶路径进行优化(保持每辆车所服务的顾客点不变,优化每一辆车所服务顾客点的顺序);最后计算染色体适应度以及对车辆容量和各顾客点时间窗约束是否满足进行检查,若满足则该染色体对应一个可行解。

对不满足约束的染色体采用惩罚函数法,将时间窗约束条件转化为惩罚函数形式加入到目标函数中,使违反约束条件的个体适应度下降,从而被淘汰。

2.2.2 染色体适应度函数 考虑到时间窗的约束,本文的适应度函数以目标函数加一个违背最大

服务时间的罚函数构成, 计算如下:

$$f(x) = C + P_1 \varphi \sum_{i=1}^n q_i \max\{\tau_i - \bar{l}_i, 0\} + f_1,$$

其中 f_1 为违背最大服务时间的罚函数, 计算如下:

$$f_1 = \Omega \max\left\{\sum_{i=1}^n (\max\{\tau_j - \bar{l}_j, 0\} + S_i +$$

$$d_{i(n+1)} / v) x_{i(n+1)}^k - 240, 0\right\},$$

其中 φ, Ω 为罚函数系数, 取一个足够大的正整数. 当某条车辆服务路径违背约束时, 其适应度函数值远远大于其他路径适应度函数值, 在算法运行过程中被淘汰.

2.2.3 禁忌优化操作 由于遗传算法局部搜索能力较弱, 无法快速对局部的配送路径进行优化. 利用禁忌搜索优化单辆配送车辆的服务路径, 形成禁忌优化操作. 禁忌优化操作的具体过程如下:

1) 将遗传算法产生的染色体基因段作为禁忌搜索的初始解, 初始化禁忌表 H ;

2) 构造邻域 $N(x)$. 用 2-opt 实施邻域搜索, 即随机选择基因段 n 个顾客点中的其中 2 个进行交换, 得到 C_n^2 个邻域作为候选解;

3) 构建禁忌表 H . 在候选解中选取适应度最优的解, 放入禁忌表中;

4) 将在候选集中的非禁忌解选取最优解作为当前解, 替换最早进入禁忌表的解. 其中若候选解满足藐视准则, 则用藐视准则的候选解集中的最优解替代当前解;

5) 重复步骤 2 ~ 4 直至满足终止条件为止.

3 实例分析

3.1 数据获取

本文以上海浩旗冷藏物流有限公司对上海市黄浦区 191 个居民小区进行生鲜农产品配送服务为背景. 由于黄浦区各个居民小区之间的距离较小, 若对每个小区进行单独配送会增加公司的配送成本且效率较低, 所以本文以均乐居委会为配送中心, 采用 k -means 聚类方法根据距离对剩下的 190 个居民小区聚合成 20 个配送点. 将配送点的实际经纬度坐标转换成直角坐标, 并以配送中心为原点; 通过每个配送点所服务小区的常住人口数来估算配送点每日的生鲜农产品需求量, 服务时间是其所覆盖居民点的服务时间总和. 关于配送中心以及配送点的基本信息如表 3 所示.

表 3 配送中心以及配送点基本信息

序号	横坐标/m	纵坐标/m	规定时间窗	可接受时间窗	需求量/t	服务时间/min
0	0	0	5:30 ~ 17:00	5:00 ~ 17:00	0	0
1	-193.5	466	6:00 ~ 7:00	6:00 ~ 7:30	0.80	15
2	105.9	1 246	6:20 ~ 7:30	6:20 ~ 8:00	3.35	20
3	1 132.8	405	6:00 ~ 6:50	6:00 ~ 7:20	2.95	15
4	1 264.7	1 320	7:00 ~ 8:00	7:00 ~ 8:20	2.40	10
5	1 221.2	-1 842	6:40 ~ 7:30	6:40 ~ 8:00	2.75	15
6	1 436.6	-2 568	6:00 ~ 7:00	6:00 ~ 7:40	3.30	20
7	2 508.6	-621	6:30 ~ 7:00	6:30 ~ 7:30	2.80	15
8	2 935.0	-1 391	6:20 ~ 7:30	6:20 ~ 8:00	3.25	10
9	1 282.6	-437	6:00 ~ 7:30	6:00 ~ 8:30	2.15	15
10	1 956.2	-38	6:20 ~ 8:00	6:20 ~ 9:00	3.05	20
11	889.6	-1 313	6:20 ~ 7:40	6:20 ~ 8:00	3.20	15
12	1 814.6	-981	7:30 ~ 8:50	7:30 ~ 9:20	3.50	10
13	682.4	-3 483	6:00 ~ 7:30	6:00 ~ 8:00	0.55	15
14	121.6	-2 917	6:40 ~ 7:50	6:40 ~ 8:30	2.70	20
15	-491.4	-1 563	6:20 ~ 7:00	6:20 ~ 8:00	1.70	15
16	423.1	-2 196	6:00 ~ 7:00	6:00 ~ 7:30	2.25	10
17	444.3	-983	6:00 ~ 6:40	6:00 ~ 7:10	2.75	15
18	1 167.8	-1 807	7:00 ~ 8:00	7:00 ~ 9:00	1.90	20
19	-569.3	-631	6:00 ~ 6:50	6:00 ~ 7:20	3.15	15
20	-734.5	-2 106	6:50 ~ 7:30	6:50 ~ 8:10	1.00	10

3.2 参数设置

本文选用福田瑞沃 6.8 m 冷藏车作为冷链配送车辆,其车辆排放参数如表 4 所示。

综合实际情况,设置生鲜农产品的价格为 4 000 元·t⁻¹,时间窗惩罚系数为 0.000 6,车辆行驶速度为 30 km·h⁻¹,每辆车每次出车固定费用为 500 元,新鲜度下降系数为 0.002,所有顾客点可接受的农产品新鲜度为 95%,燃油二氧化碳排放系数为 2.63 kg·L⁻¹,燃油价格为 6.43 元·L⁻¹,二氧化碳排放价格为 5 元·kg⁻¹,最大的车载量为 10 t。

3.3 计算结果分析

根据上述实例,设置改进的遗传算法的相关参数为种群规模 $P_s=50$,交叉概率 $P_c=0.8$,变异概率 $P_m=0.15$,最大迭代次数 $m_g=600$ 。利用 MATLAB 编程,运行算法 20 次,得到平均总成本为 3 625.68 元,平均总花费时间为 482.06 min,平均二氧化碳总排放量为 44.48 kg。其中最优配送方案是:使用 6 辆运输车辆完成配送任务,总成本为 3 602.73 元,总花费时间为 477.33 min,二氧化碳总排放量为

43.02 kg,具体配送路径信息如表 5 所示。

表 4 福田瑞沃 6.8 m 冷藏车排放参数表

参数	含义	取值
ω	车辆重量/kg	6 350
ξ	燃料与空气质量比	1
b	发动机摩擦系数	0.2
M	引擎速度	33
V	发动机排量/L	5
g	重力加速度	9.81
C_r	滚动阻力系数	0.01
η	燃油发动机效率参数	0.9
κ	燃油发动机热值/(kJ·g ⁻¹)	44
ψ	转换系数	737
n_{ef}	车辆传动效率	0.4
C_d	空气阻力系数	0.7
P	空气密度/(kg·m ⁻³)	1.204 1
S	正面表面积/m ²	3.912

表 5 车辆配送路径优化结果

车辆序号	配送路径	成本/元	装载率/%	二氧化碳排放量/kg	总时间/min
1	0-19-2-8-0	613.18	97.5	8.04	64.92
2	0-17-15-14-0	561.61	71.5	4.30	65.84
3	0-1-10-6-20-0	603.28	81.5	8.81	84.49
4	0-16-11-4-0	609.24	78.5	7.05	73.66
5	0-13-5-12-0	589.71	68.0	7.87	104.13
6	0-9-3-7-18-0	625.71	98.0	6.95	84.30

为了体现改进的遗传算法的可行性与优越性,将改进的遗传算法与标准的遗传算法进行比较,种群进化过程如图 1 所示。

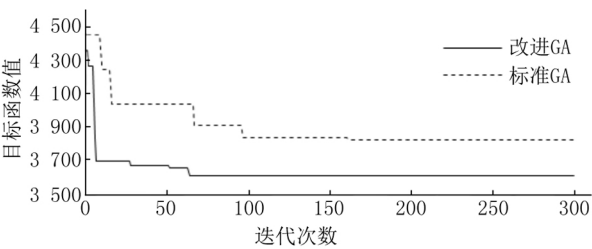


图 1 标准遗传算法与改进遗传算法进化过程比较

从图 1 可以看出,在算法的运算前期,改进的遗传算法成本目标函数值小于标准遗传算法;在进化过程中,改进的遗传算法收敛速度比标准遗传算法要快,这表明禁忌算法的引入增加了遗传算法的

“爬山能力”,加快了收敛速度;而且改进的遗传算法优化结果更靠近全局最优,其成本目标函数值 3 602.73 明显优于标准遗传算法的 3 823.39。

为了进一步验证算法的有效性,对算法参数取不同的值进行试验,如表 6 所示。结果表明本文设计的算法并不完全依赖于参数的取值,算法稳定性较好。

表 6 不同算法参数取值及优化结果

参数	种群规模			
	50	80	100	150
交叉概率	0.80	0.80	0.70	0.70
变异概率	0.15	0.10	0.15	0.20
最大迭代次数	100	150	200	300
总成本	3 602.73	3 608.64	3 600.68	3 601.06

3.4 参数灵敏性分析

为了研究燃油价格和二氧化碳排放价格的变动对生鲜农产品冷链配送路径优化中碳排放量和配送成本的关系,将燃油价格与二氧化碳排放价格以一定幅度进行调整,如图2、图3所示。

由图2可知,随着燃油价格的提高,总成本和燃油成本会有所增加,新鲜度下降成本也有所变化,二氧化碳排放量会下降;从图3可以看出,在碳排放价格增加的情况下总成本会上升,新鲜度下降成本总体也呈现上升趋势,碳排放量会下降。因此,为了促使冷链物流配送走低碳之路,适当的提高燃油价格或者碳排放价格可以减少二氧化碳排放量和能源消耗,但对企业的配送成本也会产生一定的影响。分析结果可以给政府出台相应的政策法规以及企业低碳物流配送路径的选择提供一定的参考。

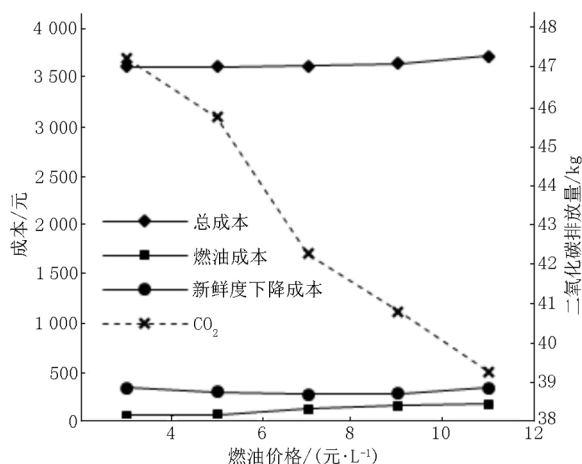


图2 燃油价格与成本、碳排放量的关系

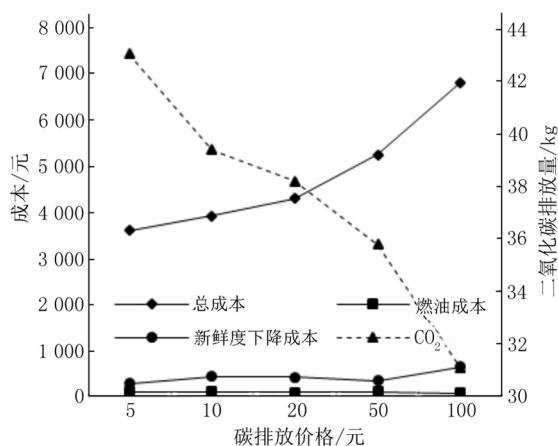


图3 二氧化碳排放价格与成本、碳排放量关系

4 结论

本文针对考虑碳排放和产品新鲜度的冷链物流

配送路径优化问题进行研究,主要结论如下:

1) 根据冷链物流产品易腐的特殊性以及低碳绿色物流的要求,在固定成本、燃油成本、时间窗惩罚成本的基础上新增了新鲜度下降惩罚成本和碳排放成本,建立以配送总成本最小化为目标的冷链物流车辆配送路径优化模型,使模型更为合理、符合实际需求;

2) 由于物流配送车辆调度问题是一个典型的NP问题,设计基于禁忌搜索算法改进的遗传算法对模型求解,并通过实际案例分析表明改进的遗传算法具有更好的收敛效率和寻优能力;

3) 实例研究表明,考虑碳排放和产品新鲜度的冷链物流配送路径优化模型及其求解算法是有效的,可以为冷链物流配送公司日常配送路径优化提供科学的理论指导,有助于解决实际的农产品冷链配送问题。

5 参考文献

- [1] 刘家利,马祖军. 存在车辆租赁及共享且有时间窗的多配送中心开环VRP[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(3): 666-675.
- [2] 周蓉,沈维蕾,刘明周,等. 带时间窗装卸一体化车辆路径问题的混合离散粒子群优化算法[J]. 中国机械工程, 2016, 27(4): 494-502.
- [3] 王君,李波. 基于多目标优化的模糊需求VRPTW动态管理[J]. 管理学报, 2013, 10(2): 238-243, 279.
- [4] 张晓楠,范厚明,李剑锋. 变动补偿的多模糊选址-路径机会约束模型及算法[J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(2): 442-453.
- [5] Tiwari A, Chang Peichann. A block recombination approach to solve green vehicle routing problem[J]. International Journal of Production Economics, 2015, 164: 379-387.
- [6] Kumar R S, Kondapaneni K, Dixit V et al. Multi-objective modeling of production and pollution routing problem with time window: a self-learning particle swarm optimization approach[J]. Computers and Industrial Engineering, 2016, 99: 29-40.
- [7] 葛显龙,苗国庆,谭柏川. 开放式污染路径问题优化建模与算法研究[J]. 工业工程与管理, 2015, 20(4): 46-53.
- [8] 唐金环,戴守峰,沈贵财. 时变网络下考虑碳排放的车辆路径优化[J]. 系统工程, 2015, 33(9): 37-44.
- [9] 马秋卓,王健,宋海清. 市区小范围多车辆低碳VRP: 以珠海速递公司区域收件网络为例[J]. 管理工程学报, 2016, 30(4): 153-159.

- [10] 王智忆, 陆敬筠. 考虑低碳的冷链物流车辆配送路径优化 [J]. 科技管理研究, 2017, 37(17): 228-232.
- [11] 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.
- [12] Rabbani M, Farshbaf-Geranmayeh A, Haghjoo N. Vehicle routing problem with considering multi-middle depots for perishable food delivery [J]. Uncertain Supply Chain Management, 2016(4): 171-182.
- [13] 邵举平, 曹倩, 沈敏燕, 等. 生鲜农产品配送中带时窗的 VRP 模型与算法 [J]. 工业工程与管理, 2015, 20(1): 122-127, 134.
- [14] 张亚明, 李娜. 基于精英单亲遗传算法的冷链物流 VRP 模型优化研究 [J]. 数学的实践与认识, 2016, 46(4): 87-96.
- [15] 黄星星, 胡坚堃, 黄有方. 碳税和碳限规则下生鲜农产品冷链配送路径优化 [J]. 上海海事大学学报, 2018, 39(1): 74-79, 110.
- [16] Eshtehadi R, Fathian M, Demir E. Robust solutions to the pollution-routing problem with demand and travel time uncertainty [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2017, 51: 351-363.
- [17] Osvald A, Stirn L Z. A vehicle routing algorithm for the distribution of fresh vegetables and similar perishable food [J]. Journal of Food Engineering, 2008, 85(2): 285-295.
- [18] 钱光宇. 考虑碳排放的生鲜农产品冷链配送路径优化研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2016.

The Routing Optimization for Cold Chain Distribution Considering Carbon Emissions and Freshness

LIU Yanbao¹, WANG Ke^{1*}, YANG Zhiyong², WANG Sijing¹

(1. School of Management, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. College of Mathematics of Informatics, Jiangxi Normal University, Nanchang Jiangxi 330022, China)

Abstract: In order to meet the requirements for quality guarantee of fresh agricultural products and low-carbon green logistics, a routing optimization model for cold chain distribution of fresh agricultural products is established, considering the costs of quality deterioration and carbon emission, as well as the fixed cost, fuel cost and penalty for violating time windows. According to the advantages of genetic algorithm in global search and tabu search algorithm in local search, a tabu search based improved genetic algorithm is proposed to solve the model. The practicability of the model and the effectiveness of the improved algorithm are verified by a practical case.

Key words: green cold chain logistics; carbon emission; fresh agricultural products; routing optimization; genetic algorithm

(责任编辑: 曾剑锋)