

低碳环境下冷链物流企业库存-配送优化

杨玮, 杨白月, 王晓雅, 马晨佩, 吴莹莹

(陕西科技大学, 西安 710021)

摘要: **目的** 优化冷链物流企业库存-配送的路径, 以降低企业冷链物流的成本。**方法** 考虑冷链物流企业库存和配送环节产生成本的因素, 并结合我国关于碳减排的碳交易政策, 将企业的碳排放代价同其他代价综合考虑, 建立以总代价最低为目标的成本模型, 设计并改进麻雀搜索算法进行计算。**结果** 通过使用 MatlabR2018b 进行仿真实验, 将采用麻雀搜索算法计算的仓储-配送作业总代价与其他经典算法进行比较, 在 1 个仓储配送任务内, 代价可减少 2%~4%, 验证了麻雀搜索算法解决文中代价模型的有效性。**结论** 该研究为冷链物流企业库存-配送优化问题提供了一种新型的解决方法, 具有较强的操作性和实际意义。

关键词: 冷链物流; 库存-配送优化; 二氧化碳排放代价; 麻雀搜索算法

中图分类号: TB69 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)11-0045-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.11.007

Inventory-Distribution Optimization of Cold Chain Logistics Enterprises in Low-Carbon Environment

YANG Wei, YANG Bai-yue, WANG Xiao-ya, MA Chen-pei, WU Ying-ying

(Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China)

ABSTRACT: Considering the cost problem of cold chain logistics enterprises in the inventory-distribution operation, this paper aims to save the cost in the inventory-distribution link for enterprises. Taking into account the cost of inventory and distribution of cold chain logistics companies, combining my country's carbon trading policy on carbon emission reduction, and comprehensively considering the company's carbon emissions costs and other costs, a cost model with the lowest total cost as the goal is established and the sparrow search algorithm for calculation is designed and improved. Through the simulation experiment using MatlabR2018b, the total cost of the warehousing-distribution operation calculated by the mahjong search algorithm is compared with other classic algorithms. In a warehousing and distribution task, the cost can be reduced by 2%~4%, which verifies the validity of the sparrow search algorithm solution in solving the cost model in this paper. This research provides a new solution for the inventory-distribution optimization problem of cold chain logistics enterprises, which has strong operability and practical significance.

KEY WORDS: cold chain logistics; inventory-distribution optimization; CO₂ emission cost; sparrow search algorithm

随着社会的进步以及人们对美好生活水平的追求, 冷链市场需求不断扩大, 冷链物流越来越受到更多物流企业的重视。在冷链产品的整个供应链过程

中, 库存和配送作为物流作业过程的两大重要环节, 正确分析影响库存和配送过程中影响成本代价的因素, 对于促进行业发展具有重大意义。同时, 由于冷

收稿日期: 2020-12-02

基金项目: 西安市未央区科技计划 (201939)

作者简介: 杨玮 (1972—), 女, 博士, 陕西科技大学教授, 主要研究方向为现代物流技术。

链运输的特殊性,区别于一般常温物品,低碳物流也愈发受到全社会的关注,因此,将二氧化碳排放代价考虑到库存-配送的总代价当中,使其能兼顾经济效益和环境质量,具有更重要的实际意义。

近年来,国内外学者对冷链物流企业库存-配送联合优化问题已开展大量研究。首先,在考虑碳排放的冷链车辆路径问题中,Zhang等^[1]考虑了碳排放成本在内的冷链物流路径优化模型,将核糖核酸计算与蚁群优化相结合,应用于解决雄安的一家冷链物流公司的路线优化问题。结果表明,这种方法降低了物流的总体成本,并减少了碳排放量,为冷链物流公司的低碳转型发展提供了启示。Li等^[2]根据农产品易腐烂的特点,以总代价最小构建路径优化模型,并采用改进遗传算法求解,结果表明选择低碳环保的分配途径具有参考意义。其次,在考虑冷链物流配送的相关问题研究中,Liu等^[3]基于联合分配的思想,对终端问题进行具体研究,并建立联合分配节点,通过数学建模和时间窗约束分析来进行干扰物的运输,可以有效地节约物流配送过程中的总代价。最后,关于库存-配送的相关问题研究中,Kaihao等^[4]为节约冷链物流成本,提出了一种包含2个分配问题的优化模型,并使用GA对其进行仿真实验,用实例说明该模型的可行性。曾志雄等^[5]分析了某一水果在冷链运输过程中影响成本的原因,并构建各因素成本模型,采用ACA计算该模型,计算结果可以有效提高荔枝的配送效率。在求解碳排放的计算方法时,文献[6—13]通过建模来计算运输等过程的碳排放问题。王婉娟^[14]采用遗传退火进化算法将碳配额交易机制应用于冷链物流库存路径的研究中,为路径决策提供了方法。

上述研究中较多使用改进经典算法对库存或配送过程中仓库模型或路径规划问题进行求解,以达到路径最优或成本最小的目的,但对于冷链物流企业各个环节集成优化的研究甚少,也鲜有将绿色物流理念贯彻其中。文中将新型群体智能搜索算法(麻雀搜索算法)应用于冷链物流企业库存-配送集成问题的优化研究。通过分析商品流通环节产生代价的因素,秉持绿色物流理念,构建冷链物流代价模型,设计并改进麻雀搜索算法进行计算。

1 问题描述及基本假设

文中研究的优化问题描述为:供应商向多个采购商配送商品,车辆数量、采购商位置、采购量及车辆到达时间段已知,目标是实现总代价最小化的最优车辆路径规划。

根据冷链物流企业的规定,在建立模型之前首先作出如下假定:在1个仓储-配送周期中,冷藏库的备货量等于所有客户需求量;不考虑配送车辆交通拥堵和环境等因素对碳排放代价的影响;配送中心和所

需要配送的客户的位置已知且确定;冷藏车的数量可以满足1个周期内所有客户的需求;所有冷藏车辆为同一型号,且匀速行驶;所有车辆从配送中心出发,完成配送任务后需再次返回配送中心;冷藏车辆必须根据客户的指定时间段到达目的地,否则会产生相应的机会代价和惩罚代价;1辆冷藏配送车辆可以同时服务多个客户,但是每个客户只能由1辆车进行配送。文中将要用到的变量见表1。

表1 文中参数及其含义
Tab.1 Parameters of this article and their meaning

变量	含义
i, j	超市索引, $i, j = 1, 2, \dots, n+1$ ($n+1$ 表示仓库索引)
v	冷藏车索引, $v = 1, 2, \dots, m$
V	仓库所占体积 (m^3)
q_i	超市索引为 i 的订单量
t_0	商品在仓库的存放时间 (d)
h	存货持有代价
d_{ij}	零售商 i 与零售商 j 间的距离 (km)
d_{ij}^v	车辆 v 从零售商 i 行驶到零售商 j 的距离 (km)
a	车辆基础行驶距离 (km)
Q	冷藏车的最大载质量 (t)
Q_0	车辆质量 (t)
Q^*	配送中心货物量 (t)
k_0	统计月份温度修正系数
k	统计月份与冷藏库修正系数
$N_{\max}$	配送中心最大存储量 (t)
e_c	冷库单位体积日耗电量 (kW)
w_1	每度电的代价 (¥)
B_1	车辆固定配送费用 (¥)
C_1	单位距离运费 (¥)
C_2	车辆行驶单位距离的冷藏代价 (¥)
P	车辆过早到达目的地的惩罚代价 (¥)
p	车辆过晚到达目的地的等待代价 (¥)
et_j^v	车辆最早允许到达时间
lt_j^v	车辆最晚允许到达时间
t_i^v, t_j^v	车辆 v 到达超市 i 的时间, 车辆 v 到达超市 j 的时间
c	碳交易价格
C_{cap}	碳配额, 即政府分配给企业可以排放的二氧化碳量 (kg)
B_2	操作管理产生的 CO_2 (kg)
B_3	冷库每天固定产生 CO_2 排放量 (kg)
ζ_1	仓库的单位碳排放

续表 1

变量	含义
λ	电的二氧化碳排放因子
w_2	燃料的二氧化碳的二氧化子
μ	每 m^2 地板照明产生的耗电量 (kW)
A	冷库面积 (m^2)
t_1	冷库每天照明时间 (d)
T_1	货物入库前的温度 (6°C)
T_0	冷库的温度 (4°C)
φ_r	每个操作人员每天产生的二氧化碳 (kg)
nr	冷库操作人员数
ψ	燃料的平均低位发热量
u	CO_2 潜在排放系数 (kg/GJ)
ρ_0	单位距离燃油消耗量 (空载)
ρ^*	单位距离燃油消耗量 (满载)
δ	冷藏车耗油量
x_{ij}^v	决策变量, 当车辆 v 从超市 i 到超市 j 时为 1, 否则为 0
y_i^v	决策变量, 当车辆 v 服务超市 i 时为 1, 否则为 0

2 数学建模

2.1 数学模型

分析冷链物流企业的实际操作, 综合上述基本假设, 构建文中模型时主要考虑的代价有库存代价、配送代价、时间惩罚代价。文中结合我国绿色物流理念, 将碳排放代价考虑其中, 各项代价具体的描述及构建如下所述。

2.1.1 库存代价 (存货代价及冷藏代价)

库存代价的产生主要包括 2 个部分: 仓储代价和冷藏代价。仓储代价与单位存货代价和存货量呈正比例关系, 冷藏代价与耗电量呈正比例关系。冷链配送中心的平均存货代价见式 (1)。

$$F_1 = \frac{Q^*}{2} h t_0 + w_1 (k V e_c t_0 + 0.406 (T_1 - T_0) Q^*) \quad (1)$$

式中: F_1 表示冷链配送中心的平均存货代价; h 的单位为元/(t·d); $k = \frac{30k_0 - T_0}{30 - 2}$, 30 表示某市夏季日平均温度 ($^\circ\text{C}$), 2 为配送中心温度修正基准值 ($^\circ\text{C}$); 0.406 为单位商品每下降 1°C 所需的耗电量 (kW)。其余各项参数的含义见表 1。

2.1.2 配送代价 (运输和制冷代价)

运输代价主要包含不变代价和可变代价。其中, 不变代价由车辆启动产生, 可变代价与冷藏车行驶路程相关。其关系描述如下: 假设配送车辆的行驶路程为 d , 起步路程为 c , 当 $d \leq c$ 时, 可变代价的值为 0;

当 $d > c$ 时, 可变动价与行驶路程正相关。配送代价见式 (2)。

$$F_2 = \sum_{i,j=1}^n \sum_{v=1}^V (B_1 + C_1 \sum_{v=1}^m \max(0, \sum_{i,j=1}^n d_{ij} x_{ij}^v - a)) + \sum_{i,j=1}^n \sum_{v=1}^V C_2 d_{ij} x_{ij}^v \quad (2)$$

式中: F_2 表示配送代价; 其余各项参数的含义见表 1。

2.1.3 时间惩罚代价

时间惩罚代价为未在约束时间内到达所产生的延误代价, 时间惩罚公式见式 (3)。

$$F_3 = P \sum_{v=1}^V \sum_{i,j=1}^n \max(et_j^v - t_j^v, 0) + p \sum_{v=1}^V \sum_{i,j=1}^n \max(t_j^v - lt_j^v, 0) \quad (3)$$

式中: F_3 表示时间惩罚代价; 其余各项参数的含义见表 1。

2.1.4 碳排放代价 (库存碳排放和配送碳排放)

对比常温供应链, 冷链物流操作环节中碳排放不仅包含商品在仓库储存、人员操作以及配送运输过程中产生, 还有需要保持低温而产生的冷藏碳排放。基于假设条件及文献[15—18]中的碳排放计算方法, 提出文中的碳排放计算方法见式 (4)。

$$F_4 = c(\max((\lambda \mu A t_1 + \varphi_r n_r + B_3 + \xi_1 \frac{Q^*}{2}) t_0 + \psi u (\rho_0 (1 + d_{io} x_{io}^v) + Q(\frac{\rho^* - \rho_0}{Q} + \delta d_{ij} x_{ij}^v)) - C_{cap}), 0) \quad (4)$$

式中: ψ 的单位为 kJ/kg; ρ_0 , ρ^* 的单位为 kg/m; δ 的单位为 kg, 由配送时单位距离的单位货物产生; ξ_1 是由单位产品在单位时间产生的; 其余各项参数的含义见表 1。

2.2 综合模型

通过分析冷链物流企业库存-配送实际操作过程, 以总代价最小化为目标, 构建低碳冷链物流企业库存-配送代价优化模型, 模型见式 (5)。

$$\begin{aligned} \min C = & \sum_{i=1}^n h \frac{Q^*}{2} t + w_1 (\sum_{i=1}^n k V e_c t + 0.406 (T_1 - T_0) Q^*) + \\ & \sum_{i,j=1}^n \sum_{v=1}^V (B_1 + C_1 \sum_{v=1}^m \max(0, \sum_{i,j=1}^n (d_{ij} - 80)) x_{ij}^v) + \sum_{i,j=1}^n \sum_{v=1}^V C_2 d_{ij} x_{ij}^v + \\ & P \sum_{i,j=1}^n \sum_{v=1}^V \max(et_j^v - t_j^v, 0) + p \sum_{i,j=1}^n \sum_{v=1}^V \max(t_j^v - lt_j^v, 0) + \\ & c(\max((\lambda \mu A t_1 + \varphi_r n_r + B_3 + \xi_1 \frac{Q^*}{2}) t_0 + \psi u (\rho_0 (1 + d_{io} x_{io}^v) + \\ & Q(\frac{\rho^* - \rho_0}{Q} + \delta d_{ij} x_{ij}^v)) - C_{cap}), 0) \end{aligned} \quad (5)$$

其中:

$$Q^* \leq N_{\max} \quad (6)$$

$$\sum_{v=1}^V \sum_{i,j=0}^n q_i x_{ij}^v = Q^* \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n y_i^v q_i \leq Q \quad (8)$$

$$\sum_{v=1}^V \sum_{i=1}^n x_{i,j}^v < V, j = 0 \quad (9)$$

$$y_i^v = \begin{cases} 1 & i = 1, 2, \dots, n \\ 0 & i = 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{i,j}^v = \sum_{i=1}^n x_{j,i}^v \leq 1, v = \{1, 2, \dots, V\} \quad (11)$$

$$y_i^v = 0 \text{ or } 1, i = 0, 1, 2, \dots, n; v = \{1, 2, \dots, V\} \quad (12)$$

$$x_{ij}^v = 0 \text{ or } 1, i, j = 0, 1, 2, \dots, n; v = \{1, 2, \dots, V\} \quad (13)$$

式(6)表示配送中心的存储量小于最大仓储量;式(7)表示配送中心在1个周期内存储的货物量等于所有客户需求量;式(8)表示车辆不能超载;式(9)表示当日用车数量不能超出车辆总数;式(10)表示每个客户只能由1辆车负责;式(11)表示车辆必须在完成任务后回到原点;式(12)表示超市*i*由送货车*v*进行送货时*y*=1,否则*y*=0;式(13)表示冷藏车*v*由超市*i*到超市*j*时*x*=1,否则*x*=0。

3 算法求解

文中研究的冷链物流企业代价优化问题属于 NP 难问题。国内外学者为解决此类问题设计并改进了很多算法,比如 GA, ABC 等。2020 年薛建凯^[19]为更加便捷地解决 NP 难问题,提出了一种新型的群体智能优化算法——麻雀搜索算法(Sparrow Search Algorithm, SSA),文中将此算法改进并应用于文中模型的计算,为验证 SSA 的优越性,并与其他算法的结果进行对比分析。

麻雀搜索算法是根据麻雀觅食并逃避捕食者的行为而提出的群智能优化算法,在麻雀觅食的过程中,分为发现者和追随者,发现者在种群中负责寻找食物并为整个麻雀种群提供觅食区域和方向,而追随者则是利用发现者来获取食物。为了获得食物,麻雀通常可以采用发现者和追随者这2种行为策略进行觅食。种群中的个体会监视群体中其他个体的行为,且该种群中的攻击者会与高摄取量的同伴争夺食物资源,以提高自己的捕食率。此外,当麻雀种群意识到危险时会做出反捕食行为。

将麻雀搜索算法应用于文中研究,具体步骤见图1。

1) 参数初始化。初始化各变量与麻雀搜索算法各参数值。

2) 计算初始适应度值。得出初始适应度的最优

值及最劣值及位置并且进行标记。

3) 计算预警值。在 SSA 中,具有较好适应度值的发现者在搜索过程中会优先获取食物。因为发现者负责为整个麻雀种群寻找食物并为所有追随者提供觅食的方向,因此,发现者可以获得比追随者更大的觅食搜索范围。

以预警值大小为依据,当预警值小于或者大于安全值时,则根据式(14)更新发现者的位置。

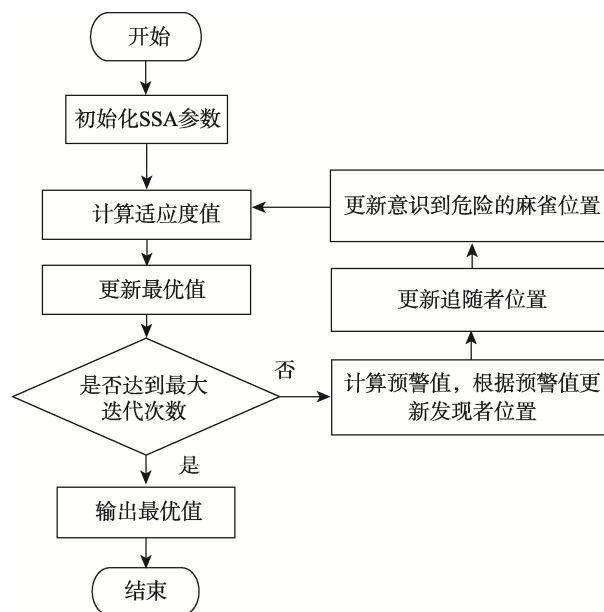


图1 麻雀搜索算法流程

Fig.1 Sparrow search algorithm flowchart

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} X_{i,j}^t \cdot \exp\left(\frac{-i}{\alpha \cdot I_{\max}}\right) & \text{if } R_2 < ST \\ X_{i,j}^t + Q \cdot L & \text{if } R_2 \geq ST \end{cases} \quad (14)$$

式中:*t*表示当前迭代次数;*L*是1行*d*列的矩阵且元素均为1;*I_{max}*表示最大的迭代次数,在文中为500;*X_{i,j}^t*表示第*i*个麻雀在第*j*维中的位置信息;*α*∈(0,1],是1个随机数;*R₂*(*R₂*∈[0,1])和*ST*(*ST*∈[0.5,1])分别表示预警值和安全值;*Q*服从正态分布。当*R₂*<*ST*,这意味着此时的觅食环境周围没有捕食者,发现者可以执行广泛的搜索操作;当*R₂*≥*ST*,这表示种群中的一些麻雀已经发现了捕食者,并向种群中其他麻雀发出了警报,此时所有麻雀都需要迅速飞到其他安全的地方进行觅食。

4) 更新追随者的位置。根据式(15)更新追随者的位置。

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} Q \cdot \exp\left(\frac{X_{\text{worst}}^t - X_{i,j}^t}{i^2}\right) & \text{if } i > n/2 \\ X_p^{t+1} + |X_{i,j}^t - X_p^{t+1}| \cdot A^+ \cdot L & \text{otherwise} \end{cases} \quad (15)$$

式中:*X_p*表示目前发现者所占据的最优位置;*X_{worst}*表示当前全局最差的位置;*A*表示1个1×*d*的

矩阵，其中每个元素随机赋值为 1 或 -1，且 $A^+ = A^T(AA^T)^{-1}$ 。当 $i > n/2$ 时，适应度值较低的第 i 个追随者没有获得食物，处于十分饥饿的状态，此时需要飞往其他地方觅食，以获得更多的能量。

5) 更新意识到危险的麻雀位置。当麻雀意识到危险时，麻雀种群会做出反捕食行为，其数学表达式见式 (16)。

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} X_{\text{best}}^t + \beta \cdot |X_{i,j}^t - X_{\text{best}}^t| & \text{if } f_i > f_g \\ X_{i,j}^t + K \cdot \left(\frac{|X_{i,j}^t - X_{\text{worst}}^t|}{(f_i - f_w) + \varepsilon} \right) & \text{if } f_i = f_g \end{cases} \quad (16)$$

式中： X_{best} 是当前全局最优的麻雀位置； $\beta \sim N(0,1)$ 为步长控制参数； $K \in [-1,1]$ 表示麻雀移动的方向，是一个随机数； ε 是最小的常数，用来保证分母不为 0； f_g 和 f_w 分别是当前全局最佳和最差的适应度值。当 $f_i < f_g$ 时，麻雀处于种群的边缘，容易受到捕食者的攻击；当 $f_i = f_g$ 时，种群中间的麻雀意识到了危险，需要靠近其它的麻雀以此减少被捕食的风险； f_i 则表示当前麻雀个体的适应度值。

6) 计算适应度值。在计算适应度值之前，由于上述公式已经对原始数值进行了破坏，所以需要对新得到的数值进行重新排序，将排序后的数值代入适应度计算公式，得出新麻雀位置的 f_i ，然后将最新的 f_i 与原来的进行比较，更新全局最优值及最优麻雀所在

位置。
7) 判断是否满足迭代终止条件。不满足则重复计算初始适应度值的步骤，满足则停止，输出最优值及相应参数。

4 案例分析

4.1 参数设置

以陕西省某物流公司为例进行实例研究，该公司为陕西省某城市 12 家超市配送某型号乳制品。每个超市的需求量、车辆到达时间窗、车辆货物装卸时长见表 2。该物流公司冷链仓的体积为 400 m³，最多可存放 50 t 商品，提供 4 辆冷藏配送车。

4.2 算法求解

假设文中研究的车辆匀速行驶，速度为 50 km/h，车辆满载和空载的耗油量分别是 0.17 L/km 和 0.084 L/km。将上述数据带入文中模型，为验证算法的切实性与良好性，采用 GA 和 PSO 以及 SSA 对模型求解分析。得到以下结果。

1) 不同算法优化结果。将模型分别代入遗传算法、粒子群算法和麻雀搜索算法进行求解，得出具体配送路径见表 3，优化后的结果分别见图 2—4(图 2—4 中实线均不代表车辆实际运输路线)。

表 2 超市的需求量、车辆到达时间窗及车辆货物装卸时长
Tab.2 Supermarket demand, vehicle arrival time window and service duration

序号	超市名称	需求量/t	车辆到达时间窗		服务时长/min
1	渭滨路店	0.85	4:00	6:00	15
2	高新店	0.74	5:00	7:00	15
3	莲湖店	1.25	4:00	6:00	15
4	雁塔店	0.88	4:00	8:00	15
5	咸宁店	2.1	5:00	8:00	15
6	科技路店	0.94	5:00	7:00	15
7	南二环店	1.9	6:00	8:00	15
8	未央路店	1.21	7:00	9:00	15
9	北关店	0.72	5:00	8:00	15
10	星火路店	0.8	6:00	7:00	15
11	西影路店	0.86	5:00	9:00	15
12	丈八路店	0.75	7:00	8:00	15

表 3 不同算法配送路径
Tab.3 Distribution routes of different algorithms

算法	车辆 1	车辆 2	车辆 3	车辆 4
GA	1—8	6—11—5—7—4	9—10	2—12—3
PSO	10—8	1—3	9—6	2—12—11—7—5—4
SSA	9—10	1	2—12—13	8—6—11—7—4—5

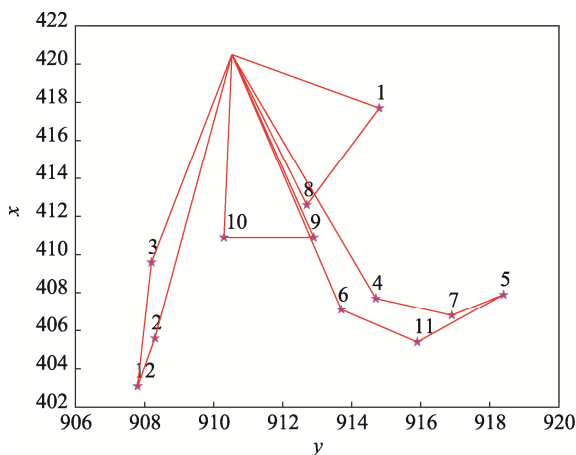


图2 遗传算法结果
Fig.2 Genetic algorithm result graph

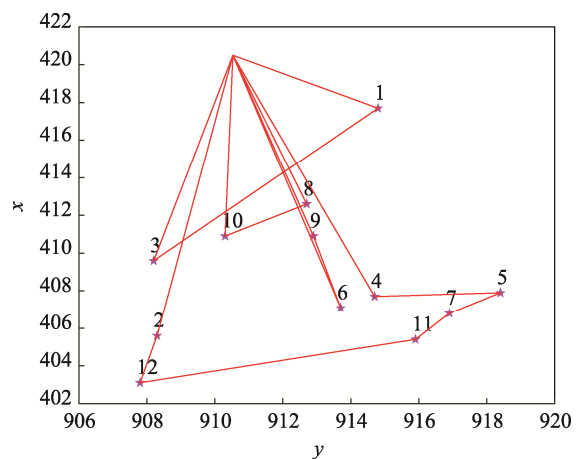


图3 粒子群算法结果
Fig.3 Particle swarm algorithm result graph

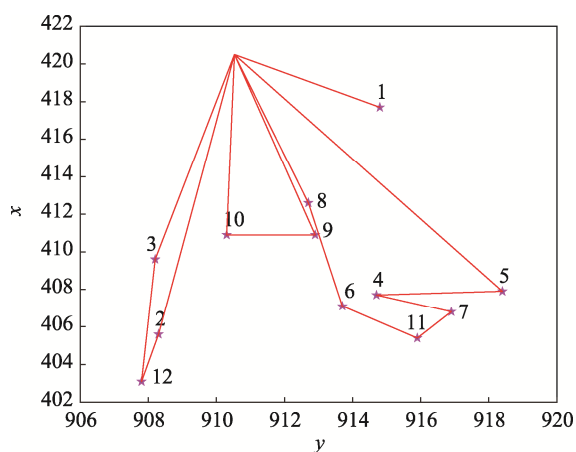


图4 麻雀搜索算法结果
Fig.4 Sparrow search algorithm result graph

由表4及图2可知,采用GA求解可以得到4辆冷藏车的配送路线。第1辆车需要为超市11,7,6,4,5,9进行配送(配送过程是车辆从仓库发出,先到超市11,再到超市7,6,4,5和超市9,然后回

到仓库);第2辆车为超市1进行配送;3号车辆服务超市10,8;4号车辆服务超市3,12,2。

2) 对比迭代结果。将基本数据分别带入考虑碳排放因子的冷链物流库存-配送代价优化模型中,通过遗传算法、粒子群算法和麻雀搜索算法对模型进行求解,3个算法初始种群均为100个,迭代500次。得出算法迭代收敛图及模型结果见图5及表4—5。

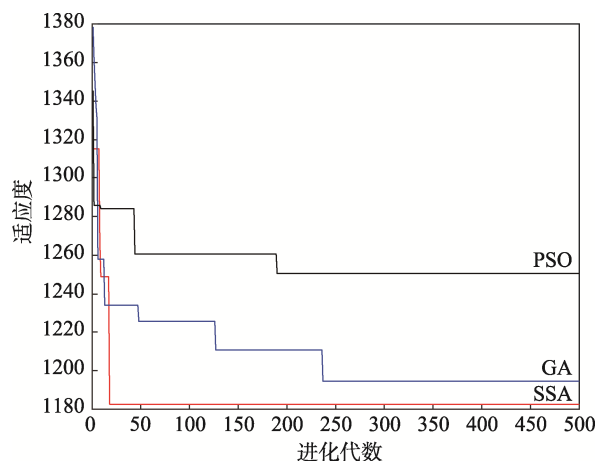


图5 算法迭代对比
Fig.5 Algorithm comparison chart

由图5及表4可知,在1个库存-配送作业周期中,经典GA求得的总代价为1194.5588元,PSO为1250.6571元,而SSA的总代价为1182.5772元。综上所述,利用麻雀搜索算法优化后的总代价比GA及PSO的更少,同时SSA在第18代就开始收敛,而遗传及粒子群分别在237代和190代开始收敛,这表明麻雀搜索算法的收敛速度比遗传算法更快。

由表5可知,在算法收敛代数上,GA收敛代数为237代,总耗时约为12.12s,相比于PSO和SSA效率最低,PSO收敛速度相比于GA和SSA更快。由于其收敛代数更高,所以收敛耗时并不是最优的。SSA的运算时间为11.24s,但其综合性能较好,运行到18代时开始收敛,所以得到的收敛耗时最低。综上所述,麻雀搜索算法的收敛耗时比粒子群算法约快2.84s,比遗传算法快5.34s,效果最佳。

将未考虑碳排放代价的库存-配送代价优化模型代入SSA中,通过与考虑碳排放因子的模型进行比较,得出的对比结果见图6。

由图6可知,考虑碳排放的代价为1182.5772元,未考虑碳排放因素的总代价为1138.5701元,考虑碳排放的冷链物流库存-配送路径优化问题的总代价高于不考虑碳排放,这是企业由碳排放大于碳配额所产生的碳交易代价,所以冷链物流公司可以通过降低二氧化碳的排放量,即优化配送路径来降低成本,同时保护环境。

表 4 不同算法优化结果比较
Tab.4 Comparison of optimization results of different algorithms

算法	库存代价/元	冷库冷藏代价/元	惩罚代价/元	冷藏车制冷代价/元	配送代价/元	碳排放代价/元	总代价/元
GA	0.227	281.7013	52.9371	22.7982	761.1989	84.9208	1194.5588
PSO	0.24	283.1142	42.7391	24.3525	814.0997	86.1116	1250.6571
SSA	0.2474	281.7013	37.8464	21.3598	772.6941	68.7282	1182.5772

表 5 不同算法收敛代数 and 运行时间比较
Tab. 5 Comparison of convergence algebra and running time of different algorithms

参数	收敛代数	每代耗时/s	收敛耗时/s	总耗时/s
GA	237	0.0242	5.7445	12.1193
PSO	190	0.0171	3.2484	8.5484
SSA	18	0.0225	0.4046	11.2401

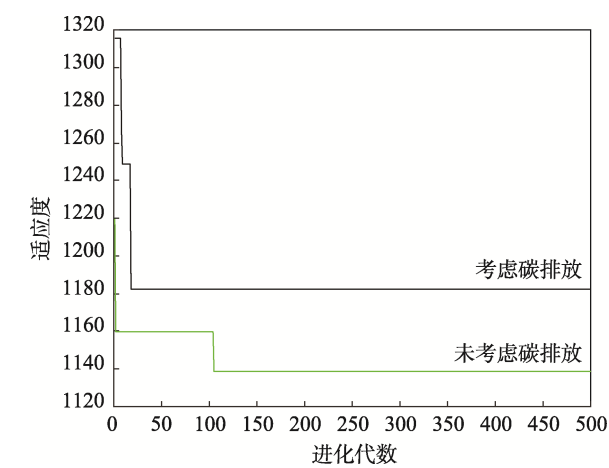


图 6 碳排放因素对比
Fig.6 Comparison of carbon emission factors

5 结语

文中分析了影响冷链物流库存和配送环节产生代价的因素，结合绿色物流理念，将碳排放代价综合考虑，建立了以代价最小化为目标的优化模型，将麻雀搜索算法改进并应用于模型的求解，有效地提高了收敛速度及收敛耗时，相较于 GA 和 PSO，SSA 得到的适应度值更好，求解出模型所要运行的路线代价更低。同时，冷链物流企业也可以根据政府的碳减排政策，通过文中所提出的冷链物流库存-配送模型，调整仓库布局 and 规划配送路径，以达到经济效益和环境保护整体最优的目标。由于算法中初始化种群比较高，导致算法运行时间也相对较长，因此下一步的工作旨在保证收敛速度和最佳适应度值的同时降低算法的时间复杂度，也可以通过其他智能优化算法解决此类 NP-hard 问题。

参考文献：

[1] ZHANG L Y, TSENG M L, WANG C H, et al. Low-Carbon Cold Chain Logistics Using Ribonucleic Acid-Ant Colony Optimization Algorithm[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 233(10): 169—180.

[2] LI J, FAN L, DONG D. A New Route Optimization Approach of Cold Chain Logistics Distribution Based on Fresh Agricultural Products[C]// 2018 Chinese Control and Decision Conference (CCDC), 2018.

[3] LIU H, PRETORIUS L, JIANG D. Optimization of Cold Chain Logistics Distribution Network Terminal[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2018(1): 158—167.

[4] KAIHAO, LIANG, WENFENG, et al. Optimization Model of Cold-Chain Logistics Network for Fresh Agricultural Products-Taking Guangdong Province as an Example[J]. Applied Mathematics and Applied Physics (English), 2019(3): 476—485.

[5] 曾志雄, 邹焱导, 韦鉴峰, 等. 基于蚁群算法的荔枝冷链物流配送成本模型优化[J]. 包装工程, 2019, 40(11): 58—65.

ZENG Zhi-xiong, ZOU Chi-dao, WEI Jian-feng, et al. Optimization of Distribution Cost Model of Cold Chain Logistics for Litchi Based on Ant Colony Algorithm[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(11): 58—65.

[6] SAIF A, ELHEDHLI S. Cold Supply Chain Design with Environmental Considerations: A Simulation-Optimization Approach[J]. European Journal of Operational Research, 2016(2): 274—287.

[7] 程豪. 碳排放怎么算为《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》[J]. 中国统计, 2014(11): 28—30.

CHENG Hao. How to Calculate Carbon Emissions as "2006 IPCC National Greenhouse Gas Inventory

- Guidelines"[J]. China Statistics, 2014(11): 28—30.
- [8] SOYSAL M, BLOEMHOF-RUWAARD J M, HAIJEMA R, et al. Modeling an Inventory Routing Problem for Perishable Products with Environmental Considerations and Demand Uncertainty[J]. International Journal of Production Economics, 2015, 164(12): 118—133.
- [9] BARTH M, YOUNGLOVE T, SCORA G. Development of a Heavy-Duty Diesel Modal Emissions and Fuel Consumption Model-Escholarship[J]. California Partner for Advanced Transportation Technology, 2005, 36(1): 48—55.
- [10] WEI R, LIU C. CO₂ Emission Reduction in Road Freight Transportation Sector Based on Regulation-Compliant Route Optimization Model and Case Study[J]. Sustainable Computing: Informatics and Systems, 2020, 28: 100408.
- [11] 顾名祥. 不确定环境下考虑碳排放的多式联运路径优化[D]. 长春: 吉林大学, 2020: 25—29.
GU Ming-xiang. Optimization of Multimodal Transport Path Considering Carbon Emissions Under Uncertain Environment[D]. Changchun: Jilin University, 2020: 25—29.
- [12] 任慧, 王东宇. 考虑拥堵路况下碳排放的选址-配送集成优化问题[J]. 运筹与管理, 2019, 28(7): 81—90.
REN Hui, WANG Dong-yu. The Integrated Optimization Problem of Site Selection and Distribution Considering Carbon Emissions Under Congested Road Conditions[J]. Operations Research and Management, 2019, 28(7): 81—90.
- [13] 王伟哲. 考虑碳排放的“仓到仓”冷链运输路径优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019: 42—44.
- WANG Wei-zhe. Research on Optimization of "Warehouse-to-Warehouse" Cold Chain Transportation Path Considering Carbon Emissions[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019: 42—44.
- [14] 王婉娟. 碳配额交易机制下的冷链物流库存路径问题研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018: 21—36.
WANG Wan-juan. Research on Cold Chain Logistics Inventory Path Problem Under Carbon Quota Trading Mechanism[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018: 21—36.
- [15] SAIDI S. Freight Transport and Energy Consumption: What Impact on Carbon Dioxide Emissions and Environmental Quality in MENA Countries[J]. Economic Change and Restructuring, 2020: 1—27.
- [16] NTM Road. Environmental Data for International Cargo Transport[J]. Technical Report, 2010, 19(6): 43—51.
- [17] BARTH M, YOUNGLOVE T, SCORA G. Development of a Heavy-Duty Diesel Modal Emissions and Fuel Consumption Model-Escholarship[J]. California Partner for Advanced Transportation Technology, 2005, 36(1): 48—55.
- [18] 周宏春. 低碳经济学—低碳经济理论与发展路径[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012: 289—292.
ZHOU Hong-chun. Low-Carbon Economics—Low-Carbon Economic Theory and Development Path[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2012: 289—292.
- [19] 薛建凯. 一种新型的群智能优化技术的研究与应用[D]. 上海: 东华大学, 2020: 15—20.
XUE Jian-kai. Research and Application of a New Type of Swarm Intelligence Optimization Technology[D]. Shanghai: Donghua University, 2020: 15—20.