

考虑碳排放和时间窗的冷链物流配送路径优化研究

江云倩, 杨慧敏*, 彭程, 赵文

(东北林业大学 土木与交通学院, 哈尔滨 150000)

摘要: **目的** 确保生鲜农产品在短时间内完成从配送中心到客户点的配送, 提高配送效率, 降低配送成本。**方法** 综合考虑温度变化对卸货过程中生鲜腐烂率的影响, 运输过程和冷藏过程中的碳排放成本, 以及违反时间窗的惩罚成本等因素, 构建配送成本最小化模型, 引入碳税机制定量分析碳排放成本, 运用改进的自适应遗传算法进行求解, 并对碳排放价格进行灵敏度分析。**结果** 优化后的总配送成本相较于优化前减少了 3.8%, 碳排放成本相较于优化前减少了 27.8%, 总配送时间相较于优化前减少了 3.3%。**结论** 优化后的遗传算法在降低配送成本和碳排放成本上具有显著效果, 可以通过合理控制碳排放价格等手段来降低配送成本和碳排放成本。

关键词: 冷链物流; 路径优化; 碳排放; 遗传算法

中图分类号: F252; TP18 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3563(2024)03-0262-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.03.030

Optimization of Cold Chain Logistics Distribution Route Considering Carbon Emission and Time Window

JIANG Yunqian, YANG Huimin*, PENG Cheng, ZHAO Wen

(School of civil Engineering and Transportation, Northeast Forestry University, Harbin 150000, China)

ABSTRACT: The work aims to ensure that fresh agricultural products can be distributed from the distribution center to the customer site in a short time, improve the distribution efficiency and reduce the distribution cost. With comprehensively consideration to the influence of temperature change on the fresh decay rate during unloading, the carbon emission cost during transportation and refrigeration, and the cost of violating the time window, a minimum distribution cost model was constructed. The carbon tax mechanism was introduced to analyze the carbon emission cost quantitatively. The optimization genetic algorithm was used to solve the problem to analyze the sensitivity of carbon emission price. The results showed that the optimized distribution cost was reduced by 3.8%. Compared with that before optimization, the carbon emission cost was reduced by 27.8%. The delivery time was 3.3% shorter than that before optimization. The optimized genetic algorithm is effective in reducing distribution cost and carbon emission cost. Distribution cost and carbon emission cost can be reduced through reasonable control of carbon emission price and other means.

KEY WORDS: cold chain logistics; path optimization; carbon emissions; genetic algorithm

自 2020 年中国提出“碳达峰、碳中和”以来, 各行各业掀起了一波绿色发展的浪潮。交通运输业的碳

排放量占全社会总碳排放量的比例较大, 除了大力发展新能源, 优化物流和运输路线也是降低碳排放的有

收稿日期: 2023-05-05

基金项目: 中央高校业务经费 (2572016CB11); 校级教育教学研究项目 (DGY2020-42)

*通信作者

效途径^[1]。特别是优化具有高能耗和高时间效率要求的冷链物流路径,对于节约能源、减少碳排放、寻求可持续的经济和环境发展具有重要意义^[2-3]。

为了解决冷链运输过程中高排放、高能耗的问题,Ning等^[4]将碳排放成本引入基本配送成本中,建立了综合成本最小化模型,从而提出一种改进的量子细菌觅食优化算法。Deng等^[5]综合考虑了冷藏车车门打开时冷热空气对流对产品腐坏率的影响,以及冷藏运输过程中产生的碳排放成本,利用改进的遗传算法求解,对不同客户需求进行了敏感性分析。从易腐食品的时效性和品质角度出发,高浩然等^[6]构建了一个优化易腐品配送路径的模型,该模型以最小化配送成本为目标函数,并在传统遗传算法的基础上引入了局部搜索操作来解决该问题。邹建成等^[7-10]众多学者都考虑到碳排放因素对车辆路径选择的影响,并将其纳入数学模型中。

1959年,Ramser和Dantzig等^[11]首次提出车辆路径问题,自此越来越多学者聚焦于这一重要的研究领域。在优化物流路径时,通常只考虑车辆的固定成本和基本的运输成本,而忽略了其他潜在的成本因素。随着现代经济技术的发展,以及人们对食品安全问题的日益重视,在生鲜农产品冷链物流配送过程中越来越多地关注到时间因素的影响。Solomon和Desrosiers等^[12]首次将带有时间窗的约束条件应用于车辆路径,为未来生鲜物流车辆的路径规划提供了有益指引。在全面考虑运输成本、固定成本、货损成本等多种因素的基础上,葛显龙等^[13]构建了带有时间窗生鲜损耗的配送模型,并利用自适应遗传算法对其进行了求解。在考虑新鲜度、多产品、多车型情景下的配送中心选址-路径优化问题时,刘琳等^[14]提出了一个双层规划模型,并结合模型特点,运用两阶段启发式算法对其进行求解。李泽华^[15]、Zhu等^[16]建立了带有时间窗约束的路径优化模型。

在以往的研究中,很多学者只考虑了碳排放因素或时间窗约束,全面综合考虑两者共同的影响并建立数学模型的研究较少,文中从这个角度出发,构建考虑时间窗和碳排放约束的配送成本最小化模型,采用优化的遗传算法进行求解,并通过实际案例验证该模型的有效性。

1 问题描述与模型建立

1.1 问题描述与假设

这里研究的冷链物流路径优化问题是在传统路径优化模型的基础上引入时间窗和碳排放约束。该问题可描述为:由1个配送中心向多个客户点配送货物,客户点的位置、需求量、时间窗等信息已知,车辆统一从配送中心出发,在满足客户需求、时间窗约束和车辆载重等约束条件的同时,将碳排放成

本引入总成本,以总成本最小为目标,合理规划配送路线。文中提出以下假设:配送中心冷藏车辆的数量有限,冷藏车辆具有容量限制,且不得超载;考虑交通拥堵情况,车辆在不同时间段的行驶速度不同;随着时间的推移,货物的新鲜度下降,将产生一定的货损成本;冷藏车辆的起点和终点都是配送中心。

1.2 符号和参数

1) 集合。 N 表示配送中心和客户点集合, $N=\{0, 1, 2, \dots, n\}$; K 表示配送中心所有车辆的集合, $K=\{0, 1, 2, \dots, k\}$; i, j 表示节点索引, $i, j=\{1, 2, 3, \dots, n\}$; k 表示车辆索引, $k=\{1, 2, 3, \dots, k\}$ 。

2) 参数。车辆参数: Q_{ij} 表示冷藏车辆离开超市*i*时车上剩余的生鲜农产品的质量; $\gamma(q_{ij})$ 表示配送车辆从超市*i*驶向超市*j*过程中,装载 Q_{ij} 货物的单位距离燃油消耗量; η 表示车辆配送单位货物行驶单位距离产生的碳排放量; β 为常数; H 表示冷藏车的厢体热负荷; ΔT 表示车厢内外部温度差; H_r 表示冷藏车门打开时的热负荷。成本参数: f_k 表示每辆冷藏运输车的固定成本; P_1 表示生鲜农产品的单位价格; P_2 表示冷藏车单位制冷成本; P_3 表示燃油的单位价格; C_{CO_2} 表示消耗单位碳排放的环境成本,即碳税; M 表示无穷大的常数; Φ_1 、 Φ_2 分别表示车辆早于、晚于时间窗到达的惩罚成本。客户参数: q_i 表示超市*i*的生鲜农产品的需求量; d_{ij} 表示节点*i*与节点*j*之间的直线距离; β_1 表示生鲜农产品处于适宜温度下的腐坏率; β_2 表示卸货打开车门时产品的腐坏率。时间参数: t_0^k 、 t_i^k 分别表示车辆*k*从配送中心出发后到达超市*i*的时刻; t_{si} 表示超市*i*所需的服务时间; t_f^k 表示车辆*k*服务完最后一个超市的时刻; t_{ij}^k 表示车辆*k*从超市*i*行驶至超市*j*所需的时间; $[t_{i,E}, t_{i,L}]$ 、 $[t_{i,EE}, t_{i,LL}]$ 分别表示超市*i*期望的被服务时间窗范围和可接受的服务时间窗范围。

4) 决策变量。 x_{ij}^k 为0-1决策变量,如果冷藏运输车辆*k*从客户点*i*出发到客户点*j*,该值为1,否则为0; y_i^k 为0-1决策变量,当冷藏运输车辆*k*为客户点*i*服务时,该值为1,否则为0; S_k 为0-1决策变量,当冷藏运输车辆*k*参与配送时,该值为1,否则为0。

1.3 数学模型

以总配送成本最小为目标的数学模型见式(1)~(12)。

$$Z_{\min} = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 + E_6 \quad (1)$$

$$E_1 = \sum_{k=1}^k f_k S_k \quad (2)$$

$$E_2 = \sum_{k=1}^k \sum_{i,j=0}^n P_3 \gamma(q_{ij}) x_{ij}^k d_{ij} \quad (3)$$

$$E_3 = \sum_{k=1}^k \sum_{i=0}^n y_i^k P_1 [q_i (1 - e^{-\beta(t_i^k - t_0^k)}) + Q_m (1 - e^{-\beta_2 t_{si}})] \quad (4)$$

$$E_4 = \sum_{k=1}^k H \times (t_i^k - t_0^k) \times P_2 + \sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^n P_2 H_r' t_{si} y_i^k \quad (5)$$

$$E_5 = 2M + \phi_1 \sum_{i=0}^n \max\{t_{i,E} - t_i, 0\} + \phi_2 \sum_{i=0}^n \max\{t_i - t_{i,L}, 0\} \quad (6)$$

$$E_6 = C_{co_2} \sum_{k=1}^k \sum_{i,j=0}^n x_{ij}^k d_{ij} (\lambda \gamma(q_{ij}) + \eta q_{ij}) \quad (7)$$

s. t.

$$\sum_{k=1}^k y_i^k = \begin{cases} 1 & i=1, 2, \dots, n \\ k & i=0 \end{cases} \quad \forall k \in K \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij}^k = \sum_{j=1}^n x_{ij}^k \leq 1 \quad i=0, \forall k \in K \quad (9)$$

$$\sum_{i,j=0}^n x_{ij} d_{ij} \leq D \quad \forall i, j \in n \quad (10)$$

$$\sum_{k=1}^k \sum_{i=1}^n y_i^k = n \quad \forall i \in n, \forall k \in K \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^n y_i^k q_i \leq Q_m \quad \forall i \in n, \forall k \in K \quad (12)$$

如果车辆 k 服务完客户点 i 后, 则 j 表示下一个客户点, 见式 (13)。

$$t_j^k = \sum_{i=0}^n \sum_{k=1}^k t_i^k + t_{si} + t_{ij}^k \quad (13)$$

式 (1) 为目标函数, 表示总配送成本最小。式 (2) 表示冷藏运输车辆的固定成本。式 (3) 表示车辆的运输成本。式 (4) 表示货损成本。式 (5) 表示车辆制冷成本。式 (6) 表示惩罚成本。式 (7) 表示碳排放成本。式 (8) 表示配送车辆共有 k 辆。式 (9) 表示车辆从配送中心出发, 完成配送后回到配送中心。式 (10) 表示车辆行驶距离约束。式 (11) 表示客户点的数量。式 (12) 表示车辆载重约束。式 (13) 表示配送过程是连续的。

2 算法设计

为了能更有效地求解上述目标函数, 采用随机遍历抽样选择算子代替传统遗传算法中的轮盘赌选择, 并引入自适应的交叉变异算子。利用精英保留策略保护最优解, 改进了遗传过程中的交叉变异方式, 相关算法流程如下。

2.1 染色体编码

采用自然数编码, 编号 0 代表配送中心, 编号 1, 2, ..., N 为客户点。当客户点数量为 n 、冷藏车数量为 K 时, 染色体长度为 $n+K+1$ 。

2.2 种群初始化及适应度函数

在通常情况下, 种群的初始规模被设定在 30~150 之间。当种群数量不足或较大时, 均会降低算法的运行效率。随机函数生成法的种群生成速度较快、计算难度较小, 所以这里采取此种方法生成初始种群规模为 100 的种群。

在遗传算法中, 适应度函数是度量个体质量好坏的标准之一, 种群中个体的适应度越高, 则个体表现越好, 因此这里将适应度函数取目标函数的倒数, 见式 (14)。

$$\text{fitness}(i) = \frac{1}{E_i} \quad (i=1, 2, \dots, N_p) \quad (14)$$

式中: $\text{fitness}(i)$ 为染色体 i 的适应度函数; E_i 为染色体的目标函数; N_p 为种群数目。

2.3 选择算子

这里采用精英保留策略与随机遍历抽样选择法相结合的方法, 如图 1 所示。为了避免父代的优良基因被后续的交叉变异操作破坏, 运用精英保留策略将每代的最优值进行存储, 防止优秀解的流失, 从而提高算法的运行效率。

采用随机遍历抽样选择法, 在选择时可以同时使用多个选择点, 1 次即可选出所有个体。每个选择点之间都是等距的, 每个选择点之间的距离用累计适应度 F 除以需要选择的个体数 N 得到。起始点 r 在 $[0, F/N]$ 之间随机产生, 然后再等距离产生其他选择点。

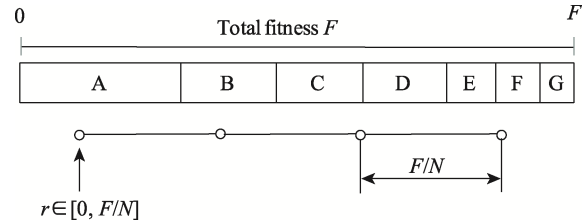


图 1 随机遍历选择操作
Fig.1 Random traversal selection operation

2.4 交叉算子

在父代中, 随机设定 2 个交叉点, 将 2 个个体交叉点之间的基因分别放到另一个个体的最前边, 然后删除 2 个个体中与插入部分相同的基因, 从而生成 2 个新个体。具体操作如图 2 所示。在进行交叉操作后, 需要对新生成的子代进行评估。若新生成的子代的适应度优于父代, 则直接将交叉后的子代纳入下一代种群; 反之, 则需进行变异。

2.5 变异算子

将逆转变异和插入变异 2 种策略相结合, 具体操作如下。

1) 在父代中随机选取 2 个逆转点, 将它们之间的基因进行逆向排序, 如图 3 所示。

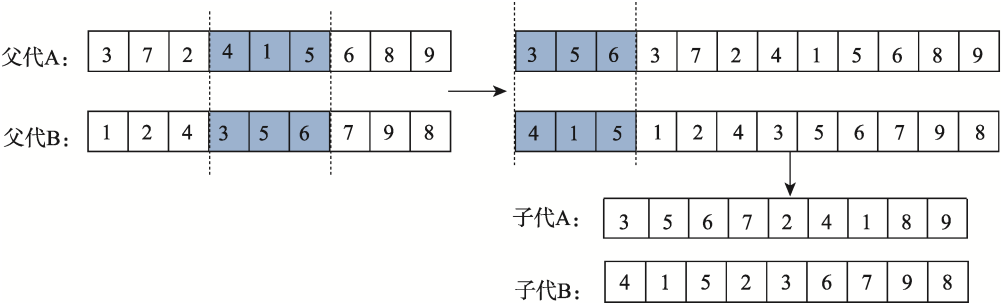


图 2 交叉过程
Fig.2 Crosstabs procedures

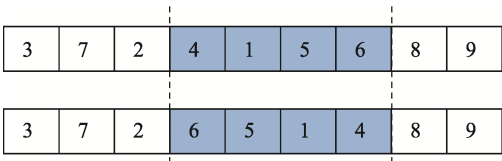


图 3 逆转变异操作
Fig.3 Reverse mutation operation

2) 在父代中随机挑选 2 个点 a 、 b , 将 a 插到 b 位置前面。具体操作如图 4 所示。

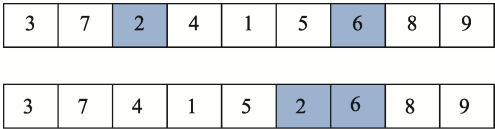


图 4 插入变异操作
Fig.4 Insertion mutation operation

在进行逆转和插入变异后, 比较变异后染色体的适应度。若变异后染色体的适应度优于上一代的适应度, 则直接将其纳入下一代种群, 与其他适应度较高的染色体共同构成新的种群; 反之, 则保留上一代在交叉后得到的染色体。通过这种策略, 可以确保每代种群都由适应度较高的染色体组成, 从而逐步优化整个种群的适应度水平。

3 实例验证

3.1 基础数据

以山东省临沂市某区某生鲜产品配送中心为研究对象, 配送中心需向 20 个客户点配送生鲜产品。配送中心和客户点信息如表 1 所示, 配送中心的坐标为 (39 020, 396 178.5), 配送中心共有 10 辆福田奥铃冷藏运输车。参数设置: 车辆的固定成本 $f_k=220$ 元,

表 1 客户信息
Tab.1 Customer information sheet

编号	坐标		需求质量/kg	可接受时间窗	期望时间窗	服务时间/min
0	39 020	39 6178.5	0	05:30—17:00	05:30—17:30	0
1	118.269 127	35.237 205	650	05:55—09:50	06:10—09:20	20
2	118.269 694	35.251 608	250	06:05—10:20	06:30—09:50	10
3	118.272 926	35.232 689	400	06:00—09:30	06:25—09:10	20
4	118.285 219	35.242 01	650	06:15—10:20	06:45—09:50	30
5	118.296 873	35.256 349	400	06:30—10:05	07:00—09:50	20
6	118.285 211	35.242 083	400	06:15—10:20	06:45—09:50	20
7	118.290 848	35.245 112	500	06:00—09:20	06:15—09:05	25
8	118.294 403	35.247 227	150	06:30—10:20	07:00—10:05	10
9	118.287 326	35.236 193	500	06:15—09:50	06:30—09:35	25
10	118.283 402	35.236 051	250	05:45—09:35	06:00—09:20	15
11	118.295 687	35.243 521	250	06:00—10:20	06:30—09:35	15
12	118.294 219	35.235 379	250	05:55—09:50	06:15—09:35	10
13	118.294 019	35.222 919	400	06:15—10:20	06:30—09:50	20
14	118.338 225	35.240 237	650	06:15—09:50	06:30—10:05	25
15	118.315 92	35.241 178	400	06:00—09:50	06:30—09:35	25
16	118.310 914	35.244 739	650	06:05—10:30	06:30—10:05	30
17	118.311 229	35.249 615	400	06:15—10:20	06:25—10:05	20
18	118.307 422	35.241 573	250	06:00—09:50	06:15—09:35	10
19	118.307 873	35.253 209	650	06:35—10:35	07:00—10:05	30
20	118.319 394	35.232 842	250	05:45—10:05	06:05—09:20	15

冷藏车在 7:30 至 8:30 之间的速度 $v=25$ km/h, 在其他时间段的车速为 30 km/h^[17]。车辆载质量 $q_m=1\ 500$ kg, 生鲜产品的价格 $P_1=8$ 元/kg, 冷藏车单位制冷成本 $P_2=2$ 元/h^[18], 燃油价格 $P_3=6.8$ 元/L, CO_2 排放系数 $\lambda=2.67$ kg/L, 车辆行驶单位距离产生的碳排放 $\eta=0.007\ 5$ kg/km, 碳税 $C_{\text{CO}_2}=50$ 元/t, 车厢体裂化程度 $\beta=0.08$, 车厢内外温度差 $\Delta T=20$ °C, 惩罚成本 $\Phi_1=40$ 元/h, $\Phi_2=80$ 元/h, 车辆的燃料消耗 $\gamma_0=0.13$ L/km, $\gamma^*=0.18$ L/km, 传热率 $R=2.89$ W/(m²·k), 车厢体受太阳辐射的面积 $S=36$ m², 车厢体积 $V_k=4\ 160\ \text{mm}\times 2\ 180\ \text{mm}\times 2\ 180\ \text{mm}$,

生鲜农产品的腐坏率 $\beta_1=0.002$, $\beta_2=0.003$, 开门频度系数 $\omega=0.625$ 。

3.2 对比分析

采用 Matlab R2020a 软件进行编程, 利用上述算例分别对优化前后的遗传算法进行仿真试验。设置种群规模为 100, 交叉概率为 0.9, 变异概率为 0.2, 最大迭代次数为 400。在仿真试验后, 得到该算例在 2 种算法下的最优规划路径。运行结果如图 5、图 6 所示, 结果分析如表 2、表 3 所示。

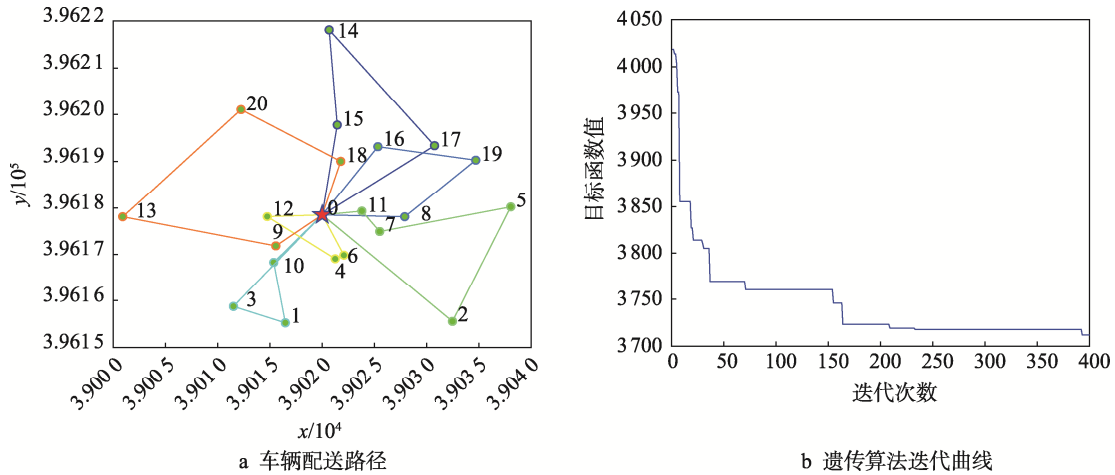


图 5 算法优化前运行结果

Fig.5 Schematic diagram of running results before algorithm optimization

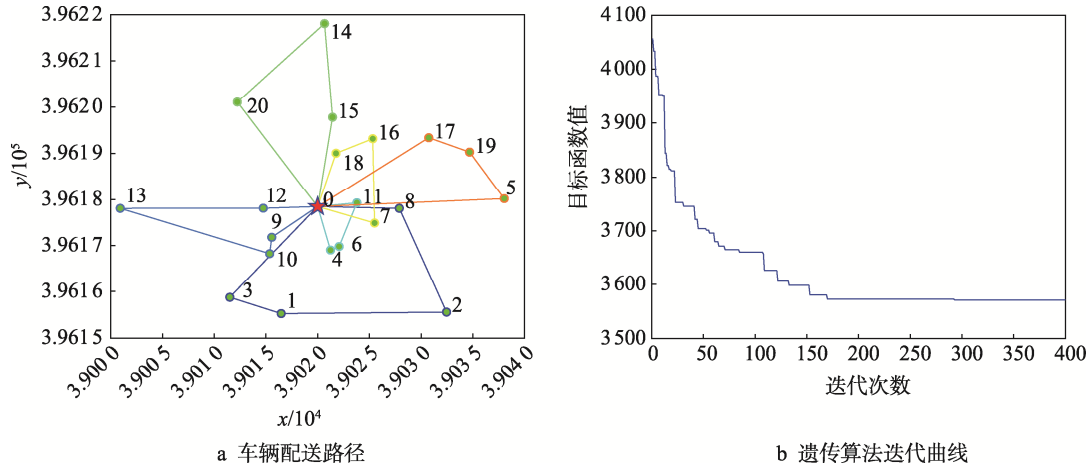


图 6 算法优化后运行结果

Fig.6 Schematic diagram of running results after algorithm optimization

表 2 算法优化前、后最优配送路线

Tab.2 Optimal delivery route before and after algorithm optimization

车辆	优化前			优化后		
	最优路径	里程/km	成本/元	最优路径	里程/km	成本/元
1	0—17—14—15—0	84.709	727.439	0—3—1—2—8—0	74.476	659.912
2	0—16—19—8—0	47.248	581.802	0—12—13—10—9—0	48.178	590.173
3	0—10—1—3—0	51.882	558.444	0—4—6—11—0	24.245	477.039
4	0—11—7—5—2—0	73.654	666.250	0—15—14—20—0	82.537	694.877
5	0—6—4—12—0	26.511	475.477	0—7—16—18—0	41.257	544.659
6	0—18—20—13—9—0	75.807	702.557	0—5—19—17—0	52.104	604.338

表 3 算法优化前后求解结果对比
Tab.3 Comparison of results before and after optimization

状态	总路程/km	总配送时间	碳排放成本/元	总成本/元
优化前	359.811	18'21"	9.21	3 711.968
优化后	322.797	17'45"	6.65	3 570.997
同比减少比例/%	10.3	3.3	27.8	3.8

根据表 2、表 3 可以看出,在算法优化前后,配送中心向客户配送货物都需要派出 6 辆冷藏运输车,均未超出车辆上限,但算法在优化前后的迭代次数和车辆路径的安排上呈现出明显差异:在迭代次数方面,优化前的遗传算法在迭代到 240 代左右开始收敛,而优化后在 170 代左右便开始收敛,优化后遗传算法收敛过程更加平稳、收敛速度更快、效率更高;不管是在总配送时间、总里程、碳排放成本,还是总成本上,优化后路径都优于优化前,优化后的总成本减少了 3.8%,碳排放成本减少了 27.8%,车辆行驶的总路程减少了 10.3%,总配送时间减少了 3.3%。在车辆运行时,使用固定速度和时变速度所耗费的成本不同,分析结果如表 4 所示。

表 4 不同速度的成本对比
Tab.4 Cost comparison of different speeds

状态	总成本/元	碳排放成本/元
固定速度	3 687.976	8.43
时变速度	3 570.997	6.65
同比减少比例/%	3.2	21.2

由表 4 可知,在保证配送货物准点率的情况下,在冷藏车运输过程中采用时变速度的配送总成本相较于固定速度减少了 3.2%,碳排放成本降低了 21.2%。由此可见,采用时变速度降低碳排放成本和配送总成本更符合车辆在现实中的运行状况,更具有实际意义。

4 碳排放价格灵敏度分析

碳税价格的变化会导致碳排放成本发生变化,碳排放成本的变化也会影响运输车辆的路径安排。在求解文中模型时,设定碳税价格为 0.05 元/kg,现将碳税价格设计为 0.01、0.03、0.08、0.1 元/kg 等不同情况进行求解,分别运行 5 次,取其平均值进行分析,结果如表 5、图 7 所示。

首先,由图 7 中的误差线可以看出,总配送成本和碳排放量的数据分布较均匀,离散程度较低,说明优化后算法的稳定性较好。其次,从表 5、图 7 可以看出,碳税价格与配送总成本成正比,碳税价格与碳排放量成反比。当碳价格增长到 0.05 元/kg 时,碳排放成本的增加幅度远大于碳排放量的减少幅度。由此可以

表 5 碳税价格对总配送成本和碳排放量的影响
Tab.5 Effect of carbon tax price on total cost and carbon emissions

碳税/(元·kg ⁻¹)	碳排放量/kg	总配送成本/元
0.01	134.074	3 565.973 8
0.03	133.564	3 568.658 2
0.05	132.852	3 576.013 0
0.08	132.686	3 605.366 2
0.10	132.560	3 632.065 0

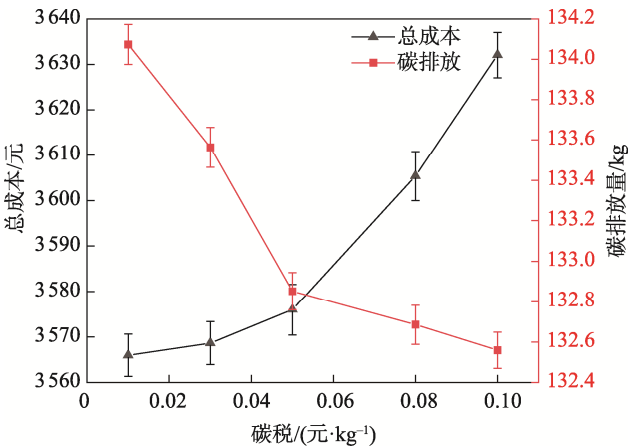


图 7 总成本和碳排放量随碳税价格变化的趋势
Fig.7 Trend graph of total cost and carbon emissions with the carbon tax price

看出,随着碳税价格的攀升,企业所面临的碳排放成本增加幅度远远超过了碳排放量的减少幅度,表明降低碳排放量并不能简单地提高碳税价格,而是需要在一定范围内进行控制,合理的碳税价格对于企业减少碳排放量、降低运输成本具有重要的价值和意义。

5 结语

随着冷链物流行业的迅速发展,基于冷链物流高能耗和高时间效率要求的特性,研究了冷链物流路径优化问题。首先,在传统路径优化模型的基础上,引入时间窗和碳排放约束。其次,对碳排放成本进行了定量分析,构建了路径优化模型,将总成本最小化作为优化目标。最后,利用改进的遗传算法对该模型进行求解。结果表明,与传统遗传算法相比,改进后的

遗传算法对求解考虑碳排放和时间窗 2 个约束条件下的配送路径优化问题具有更好的适应性和收敛性;缩短了配送时间,提高了配送效率,可以保证在客户要求的时间窗内完成配送任务,并进一步降低了配送总成本和碳排放成本;时变速度可以在保证准点率的情况下降低碳排放成本和配送总成本,可见文中研究更符合实际情况;在研究中引入碳税制度定量分析碳排放成本,可以更好地衡量企业的碳排放成本,分析配送成本和碳排放量如何随碳税价格变化。

参考文献:

- [1] XIE Y L, LI Y Y. Optimizing Method of Cold Link Path for Agricultural Products Transportation Facing Environmental Protection[J]. Ekoloji, 2019, 28(107): 2083-2095.
- [2] SHEN Y. Optimization of Urban Logistics Distribution Path under Dynamic Traffic Network[J]. International Core Journal of Engineering, 2020, 6(1): 243-248.
- [3] WANG J X. Research on the Optimization of Path Information in the Process of Logistics Distribution by Improved Ant Colony Algorithm[J]. Italian Journal of Pure and Applied Mathematics, 2019, 2019(41): 343-352.
- [4] NING T, AN L, DUAN X D. Optimization of Cold Chain Distribution Path of Fresh Agricultural Products under Carbon Tax Mechanism: A Case Study in China[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2021, 40(6): 10549-10558.
- [5] DENG H X, WANG M, HU Y, et al. An Improved Distribution Cost Model Considering Various Temperatures and Random Demands: A Case Study of Harbin Cold-Chain Logistics[J]. IEEE Access, 2021, 9: 105521-105531.
- [6] 高浩然, 张玉林, 张顺顺. 考虑时效性和品质性满意度约束的易腐品冷链物流配送研究[J]. 控制与决策, 2023, 38: 1-10.
GAO H R, ZHANG Y L, ZHANG S S. Study on Cold Chain Logistics Distribution of Perishable Products Considering Constraints of Timeliness and Quality Satisfaction[J]. Control and Decision, 2023, 38: 1-10.
- [7] 邹建城, 路正南. 考虑碳排放的生鲜农产品冷链物流配送路径优化研究[J]. 物流科技, 2019, 42(8): 46-52.
ZOU J C, LU Z N. Optimization Research of Cold Chain Distribution Routes Based on Carbon Emissions for Fresh Agricultural Products[J]. Logistics Sci-Tech, 2019, 42(8): 46-52.
- [8] FU Q M, LI J, CHEN H H. Resource Scheduling Method for Optimizing the Distribution Path of Fresh Agricultural Products under Low-Carbon Environmental Constraints[J]. Scientific Programming, 2022, 2022: 7692135.
- [9] LIU Z, GUO H X, ZHAO Y J, et al. Research on the Optimized Route of Cold Chain Logistics Transportation of Fresh Products in Context of Energy-Saving and Emission Reduction[J]. Mathematical Biosciences and Engineering: MBE, 2021, 18(2): 1926-1940.
- [10] 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.
- [11] DANTZIG G B, RAMSER J H. The Truck Dispatching Problem[J]. Management Science, 1959, 6(1): 80-91.
- [12] SOLOMON M M, DESROSIERS J. Survey Paper—Time Window Constrained Routing and Scheduling Problems[J]. Transportation Science, 1988, 22(1): 1-13.
- [13] 葛显龙, 孔阳. 带有时间窗的生鲜物流配送路径优化研究[J]. 数学的实践与认识, 2016, 46(12): 78-87.
GE X L, KONG Y. Research on the Vehicle Routing Problem of Fresh Logistics Distribution with Time Window[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2016, 46(12): 78-87.
- [14] 刘琳, 贾鹏, 高桦, 等. 新鲜度限制约束下物流配送中心选址-路径优化[J]. 包装工程, 2022, 43(5): 232-241.
LIU L, JIA P, GAO B, et al. Location Routing Optimization of Logistics Distribution Center under Freshness Limitation[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(5): 232-241.
- [15] 李泽华. 带时间窗约束的生鲜产品配送车辆路径优化问题研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2009: 21-31.
LI Z H. The Study on Vehicle Routing Problem with Time Windows for Fresh Product[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2009: 21-31.
- [16] ZHU A Q, WEN Y Y. Green Logistics Location-Routing Optimization Solution Based on Improved GA Algorithm Considering Low-Carbon and Environmental Protection[J]. Journal of Mathematics, 2021, 2021: 6101194.
- [17] 林殿盛. 生鲜农产品低碳冷链物流网络优化研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2021: 71-124.
LIN D S. Research on Optimization of Low Carbon Cold Chain Distribution Network for Fresh Agricultural Products[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021: 71-124.
- [18] 白雪. 考虑碳交易与新能源车辆的多车型冷链物流配送优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021: 51-70.
BAI X. Research on Optimization of Multi-Vehicle Cold Chain Logistics Distribution Considering Carbon Trading and New Energy Vehicles[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021: 51-70.