

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2023.04.011

# 考虑碳排放的冷链物流配送路径优化

胡立和, 王素杰, 宾厚, 张路行

(湖南工业大学 商学院, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 为解决生鲜农产品配送成本和碳排放量的双高问题, 提出了一种以最小化配送成本为目标的冷链物流路径优化模型。该模型将配送过程中的碳排放量转化为碳排放成本, 并采用结合 2-opt 优化算子的改进遗传算法对模型进行求解。通过数值仿真实验证明: 虽然引入碳排放量约束配送路径距离增加了 3.205 km, 但是碳排放量和配送成本分别下降了 1.99% 和 22.10%, 此数据证明了该模型和算法的可行性。

**关键词:** 碳排放; 生鲜农产品; 遗传算法; 冷链物流

**中图分类号:** F542

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2023)04-0072-08

**引文格式:** 胡立和, 王素杰, 宾厚, 等. 考虑碳排放的冷链物流配送路径优化 [J]. 湖南工业大学学报, 2023, 37(4): 72-79.

## Cold Chain Logistics Route Optimization with Carbon Emission Taken into Consideration

HU Lihe, WANG Sujie, BIN Hou, ZHANG Luhang

(College of Business, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of high distribution cost and carbon emission of fresh agricultural products, a cold chain logistics routing optimization model aiming at minimizing distribution cost was proposed in this paper. The carbon emission in the distribution process is converted into carbon emission cost, and the improved genetic algorithm combined with 2-opt optimization operator is used to solve the model. Through numerical simulation experiments, it is proved that although the distribution path distance with the carbon emission constraint is increased by 3.205 km, the carbon emission and distribution cost are reduced by 1.99% and 22.10%, respectively. This data proves the feasibility of the model and algorithm.

**Keywords:** carbon emission; fresh agricultural products; genetic algorithm; cold chain logistics

### 1 研究背景

随着人民生活水平的提高, 健康和环保意识日益增强, 对冷链运输中的保鲜度提出了更高的要求。为满足客户日益增长的需求并提高其满意度, 冷链物流

企业在物流配送环节中加大了成本投入。与此同时, 为保证生鲜农产品的品质, 冷链物流过程中需消耗大量能源, 从而导致碳排放量大幅增加, 其碳排放量远高于普通物流。有研究报告表明, 冷链物流比普通物流配送成本高 40% 以上, 并且交通运输中的碳排放

收稿日期: 2022-08-23

基金项目: 国家社会科学基金资助项目 (19BGL177); 教育部人文社会科学研究规划基金资助项目 (18YJA630001); 湖南省教育厅科学研究基金资助重点项目 (21A0348); 湖南省研究生科研创新基金资助项目 (CX20220846); 湖南工业大学研究生科研创新基金资助项目 (CX2343)

作者简介: 胡立和 (1962-), 男, 安徽来安人, 湖南工业大学教授, 硕士生导师, 主要研究方向为区域经济与公共管理, E-mail: 854454221@qq.com

量70%来源于道路运输。随着“双碳”目标战略的不断推进和绿色物流发展理念的贯彻落实,低碳化、绿色化物流成为生鲜农产品冷链物流重点转型目标。冷链物流企业面对环境与经济的双重挑战时,必须采取降低成本和减少碳排放的措施以确保其可持续发展。物流企业通过优化生鲜农产品配送路径,不仅能够实现较低物流配送成本运作,提高企业服务水平,也会减少能源消耗对环境造成的碳污染。

近年来,国内外学者围绕生鲜农产品冷链物流配送领域做了大量研究。C. Tarantilis等<sup>[1]</sup>提出一种新的随机搜索元启发式算法求解肉类仓储配送路径优化模型。Zhang S.等<sup>[2]</sup>通过分析农产品易腐性与运输距离之间的关系,采用遗传算法求解易腐农产品转运的整车优化模型。S. C. H. Leung等<sup>[3]</sup>研究了多型号冷藏车路径配送模型,并用模拟退火算法求解。王淑云等<sup>[4]</sup>在针对顾客需求不确定的情况下提出了一种基于混合算法的配送模型,该模型的设计实现了最优化配送方案的求解。张文峰等<sup>[5]</sup>从降低冷链物流网点建设成本和运营成本的角度出发,构建了非线性规划优化模型,并采用量子粒子群算法求解。姚源果等<sup>[6]</sup>研究了考虑实际路况的冷链配送优化模型,并采用蚁群算法求解。丁秋雷等<sup>[7]</sup>在考虑农产品新鲜度的因素下,构建了一种受扰的冷链物流配送恢复模型,并运用启发式算法对该模型求解。

随着环保意识的增强,一些学者开始关注冷链物流配送中的碳排放问题。M. Figliozzi<sup>[8]</sup>研究了考虑时间窗约束的冷链配送优化问题,发现小幅度增加配送路程会减少碳排放量。Kwon Yongju等<sup>[9]</sup>研究了多车型低碳路径优化模型,并采用禁忌搜索算法求解。潘茜茜等<sup>[10]</sup>探讨了碳排放量与冷藏车载质量之间的关系,并对冷链路径优化问题进行了研究。范立南等<sup>[11]</sup>探讨了碳税对配送成本的影响,并用改进遗传算法求解冷链配送优化模型。康凯等<sup>[12]</sup>研究了同时考虑时间窗与碳排放量约束的配送模型。鲍春玲等<sup>[13]</sup>在车辆配送中考虑了碳排放成本,提出了一种联合配送方式。方文婷等<sup>[14]</sup>以总成本最小为优化目标,并设计蚁群算法求解模型,得到了较好的减排效果。Liu Guike等<sup>[15]</sup>在冷链物流车辆配送路径中研究了碳交易机制的联合配送模型。任腾等<sup>[16]</sup>采用改进蚁群算法求解考虑客户满意度低碳冷链路径优化模型。唐慧玲等<sup>[17]</sup>提出了一种以配送最短距离和碳排放最小为目标的优化模型,发现改进蚁群算法处理低碳车辆路径问题更有效。沈丽等<sup>[18]</sup>同时考虑了货损与碳排放成本,对生鲜农产品配送问题进行了研究。

综上所述,虽然部分学者对生鲜农产品冷链配送问题进行了多角度分析,但将是否考虑碳排放因素的成本方案,并对此做对比研究的较少,且现有文献在考虑配送成本时很少对货损、制冷成本进行细化分析。此外,虽然已有学者在路径优化问题中考虑到碳排放成本,但制冷设备能耗对碳排放的影响往往被忽视。基于此,本文在细化分析货损成本和制冷成本的同时,考虑了冷藏车运输和卸货过程中能源消耗产生的碳排放成本,构建了以配送成本最小为目标的生鲜农产品冷链物流配送路径优化模型,并引入结合2-opt算子的改进遗传算法求解该模型,寻找最优的车辆配送路径,以期降低整体车辆配送成本和碳排放量。

## 2 考虑碳排放的冷链物流配送路径优化方案

### 2.1 问题描述

为与现实相契合,本文旨在研究针对单个配送中心的配送路径优化问题,即如何在已知客户点地理位置、需求量和车辆载质量等限制条件下,合理规划物流配送路径,以降低配送成本为优化目标。具体而言,只考虑一个配送中心派遣同类型车为多个客户点进行配送任务,随后所有配送车辆返回配送中心。在保证完成所有客户点的配送任务的前提下,通过约束条件的满足,可实现该配送过程的最优化和高效化,从而大大提升物流运输质量和效率。

### 2.2 配送问题假设

为将抽象问题转变为数理模型,需要做出如下假设:

- 1) 配送车辆都是相同车型,每条路线上配送货物总量不能超过车辆最大载质量。
- 2) 车辆完成配送任务后回到配送中心。
- 3) 每个客户点只能被配送一次,且需要由唯一的一辆车进行配送。同时多个客户点可以被一辆车配送。
- 4) 配送中心库存充足,配送过程中不存在收货或缺货情况。
- 5) 配送过程中车辆总质量随着每次配送货物质量的变化而变化。
- 6) 客户点门店的地理位置、需求量、车辆的载质量都是已知。

### 2.3 模型建立

#### 2.3.1 已知参数

本文模型参数及定义如表1所示。

表1 参数符号及其定义

Table 1 Parameter symbols and definitions

参数符号	定义
$N$	物流配送中心服务的客户点数量
$K$	配送中心的冷藏车数量
$f_k$	使用第 $k$ 辆车的固定成本
$C_{ij}^k$	第 $k$ 辆车从客户点 $i$ 到客户点 $j$ 行驶每公里产生的费用
$d_{ij}$	客户点 $i$ 到 $j$ 之间的距离
$p$	生鲜农产品的单位价值
$q_i$	客户点 $i$ 对生鲜农产品的需求量
$\eta_1$	生鲜农产品运输过程中的腐败率
$\eta_2$	开启车门时农产品的变质率
$t_1^k$	车辆 $k$ 从配送中心出发的时间
$t_i^k$	车辆 $k$ 到达客户点 $i$ 的时间
$t_j^k$	车辆 $k$ 服务完最后一个客户点的时间
$z_i$	为客户点 $i$ 送完货后所剩农产品的质量
$s_i$	服务客户点 $i$ 所需的时间

### 2.3.2 变量分析

#### 1) 决策变量分析

本文将配送中心定为编号 1, 客户点由英文字母  $i, j$  表示 ( $i, j=1, 2, \dots, N$ )。决策变量  $y_k$  的取值如下:

$$y_k = \begin{cases} 1, & \text{车辆 } k \text{ 被使用;} \\ 0, & \text{其它。} \end{cases}$$

当车辆  $k$  被安排配送任务时,  $y_k$  值为 1, 否则为 0。

决策变量  $x_{ij}^k$  的取值如下:

$$x_{ij}^k = \begin{cases} 1, & \text{车辆 } k \text{ 从客户 } i \text{ 行驶到客户 } j; \\ 0, & \text{其它。} \end{cases}$$

当车辆  $k$  从客户  $i$  行驶到客户  $j$  时,  $x_{ij}^k$  值为 1, 否则为 0。

决策变量  $x_i^k$  的取值如下:

$$x_i^k = \begin{cases} 1, & \text{车辆 } k \text{ 为客户 } i \text{ 提供服务;} \\ 0, & \text{其它。} \end{cases}$$

当车辆  $k$  为客户  $i$  提供服务时,  $x_i^k$  值为 1, 否则为 0。

#### 2) 成本变量分析

本文所构建的目标函数包括配送车辆的固定成本、运输成本、货损成本、制冷成本、碳排放成本。

##### ①车辆的固定成本

车辆的固定成本主要有车辆的维修费用、保养费用和驾驶员的工资等。这部分成本与车辆行驶时间和车辆行驶距离无关, 一般为常数, 随着配送车辆数的增加而增加, 车辆的固定成本  $C_1$  为

$$C_1 = \sum_{k=1}^K f_k y_k \quad (1)$$

##### ②车辆运输成本

通常车辆运输成本与车辆行驶距离成正比, 车辆的运输成本  $C_2$  为

$$C_2 = \sum_{k=1}^K \sum_{i,j=1}^N c_{ij}^k x_{ij}^k d_{ij} \quad (2)$$

##### ③货损成本

本文讨论的货损成本, 主要是由于货物运输时间的积累和装卸过程中温度的变化对生鲜农产品造成的损坏。本研究引入生鲜农产品新鲜度衰减函数:

$$\theta(t) = \theta_0 e^{-\eta t} \quad (3)$$

式 (3) 表示生鲜农产品在一定温度下的腐败程度,  $\theta(t)$  为生鲜农产品在  $t$  时的新鲜程度,  $\theta_0$  为产品从配送中心出发时的新鲜程度。

在货物配送过程中, 由于生鲜农产品利用具有冷冻设备的物流车辆进行运输, 在运输过程中可以保持车厢内的温度保持不变, 但随着货物运输时间的增加, 微生物的增加和农产品本身的呼吸作用的影响会使得农产品品质下降, 产生货损成本, 运输途中产生的货损成本  $C_{31}$  为

$$C_{31} = \sum_{k=1}^K \sum_{i,j=1}^N x_i^k p q_i \left( 1 - e^{-\eta(t_j^k - t_i^k)} \right) \quad (4)$$

配送车辆对客户点进行卸货服务时, 车门频繁开启和关闭, 会造成空气对流, 使得车厢内的温度发生改变, 从而影响生鲜农产品的鲜活性, 卸货时间越长, 货物损失越严重, 车辆卸货过程中产生的货损成本  $C_{32}$  为

$$C_{32} = \sum_{k=1}^K \sum_{i,j=1}^N x_i^k p z_i \left( 1 - e^{-\eta_2 s_i} \right) \quad (5)$$

整个配送过程中所产生的货损成本  $C_3$  为

$$C_3 = \sum_{k=1}^K \sum_{i,j=1}^N x_i^k p \left[ q_i \left( 1 - e^{-\eta(t_j^k - t_i^k)} \right) + z_i \left( 1 - e^{-\eta_2 s_i} \right) \right] \quad (6)$$

##### ④制冷成本

不同于普通物流, 冷链物流配送过程中需要考虑制冷成本。本研究中的制冷成本包括车辆制冷设备和卸货时产生的成本。制冷成本  $C_4$  为

$$C_4 = F_1 \left( \sum_{k=1}^K (t_j^k - t_i^k) G_1^k + \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N G_2^k s_i x_i^k \right) \quad (7)$$

式中:  $F_1$  为单位制冷成本, 元/kg;

$G_1^k$  为第  $k$  辆车制冷过程中产生的热负荷, 表示为  $G_1^k = (1+a)RS\Delta T$ , 其中  $a$  为常数表示车厢体的老化程度,  $R$  为热传导系数,  $S$  为车厢受热面积 ( $\text{m}^2$ ),  $\Delta T$  为车辆内外温度之差;

$G_2^k$  为第  $k$  辆车开启车门时产生的热负荷, 计算式为  $G_2^k = r(0.54V_k + 3.22)\Delta T$ , 其中  $r$  为开门频度系数,  $V_k$  为第  $k$  辆车的箱体体积。

##### ⑤碳排放成本

碳排放成本主要是配送过程中能源消耗和货车制冷设备制冷产生的二氧化碳成本。能源消耗所产生的二氧化碳与货车载质量有关, 采用负载估计法进行

计算, 碳排放量为燃料消耗量与二氧化碳排放系数的乘积。设  $c_0$  为车辆空载时单位距离的燃油消耗量,  $c_1$  为车辆满载时单位距离的燃油消耗量,  $Q_0$  为车辆自身质量,  $L$  为最大装载量,  $l$  为车辆的装载量, 相关学者通过收集数据进行回归分析得到, 单位距离的燃料消耗能量  $c$  与车辆装载量  $l$  近似看成一个线性函数, 则单位距离燃料消耗量可以表示为

$$c(l) = a(Q_0 + l) + b, \quad (8)$$

车辆空载时单位距离燃料消耗量为

$$c_0 = aQ_0 + b, \quad (9)$$

车辆满载时单位距离燃料消耗量为

$$c_1 = a(Q_0 + L) + b, \quad (10)$$

则有单位距离燃料消耗量为

$$c(l) = \frac{c_1 - c_0}{L} l + c_0. \quad (11)$$

所以, 将  $Q_{ij}$  的生鲜农产品从客户点  $i$  配送到客户点  $j$  所产生的碳排放量可表示为

$$E_1 = w_c p(Q_{ij}) d_{ij},$$

式中  $w_c$  为二氧化碳的排放系数。

配送过程中制冷产生的二氧化碳排放量为

$$E_2 = e Q_{ij} d_{ij},$$

式中  $e$  为单位质量货物行驶单位距离制冷产生的碳排放量。

碳排放成本等于碳排放量与碳税的乘积, 设  $h$  为碳税, 配送过程中总的碳排放成本  $C_5$  为

$$C_5 = h(E_1 + E_2) x_{ij}^k. \quad (12)$$

综上所述, 配送路径优化模型为

$$\min Z = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5, \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^N q_i x_i^k \leq Q, \forall k \in K, \quad (14)$$

$$\sum_{k=1}^K x_i^k = 1, \forall i \in N \quad (15)$$

$$\sum_{j=2}^N x_{ij}^k = \sum_{j=2}^N x_{ij}^k \leq 1, i=1, \forall i, j \in N \quad (16)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_{ij}^k = 1, i \neq j, \forall i, j \in N \quad (17)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N x_{ij}^k = 1, i \neq j, \forall i, j \in N \quad (18)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N x_{ij}^k = 1, i \neq j, \forall i, j \in N \quad (19)$$

其中, 式(13)表示冷链配送总成本最小; 式(14)表示每条路线上的货物总量必须小于或等于其最大载质量; 式(15)表示每个客户点只能被一辆车服务; 式(16)表示所有车辆均需从配送中心出发, 然后返回配送中心; 式(17)表示两个客户点之间须有一辆

车服务; 式(18)和(19)表示每个客户点只能被服务一次。

### 3 改进遗传算法设计

遗传算法借鉴了生物进化中适者生存的法则和信息随机交换的两种机制, 其本质就是遗传算子和群体搜索策略, 在求解优化问题时, 以目标函数作为搜索信息, 全局寻优能力较强。因此, 本文为进一步提高初始种群的适应度和算法的搜索能力, 通过优化传统遗传算法的个体选择策略、交叉运算、变异运算, 并引入了 2-opt 优化算子, 设计了改进遗传算法求解模型。

#### 3.1 编码与生成初始种群

本文主要决策变量是每辆车服务的客户点数量、配送车辆数以及车辆服务顺序, 而自然数编码能清楚的将配送的车辆数、客户点数量与自然数列一一对应, 所以, 为避免出现无效解, 采用自然数编码方法。在满足车辆载质量的约束下, 产生的编码数列为“0378012054690”表示 3 辆冷藏车参与配送, 共形成 3 条路径的配送。路线 1: 0-3-7-8-0, 路线 2: 0-1-2-0, 路线 3: 0-5-4-6-9-0。

种群规模的大小是遗传算法运算性能的关键因素之一, 如果种群规模过大, 优化速度会很慢, 反之, 则会因为种群规模过小搜索效果不理想。在本文中, 随机生成一个规模为 100 的初始种群。

#### 3.2 适应度函数与选择策略确定

适应度值是用来判断个体质量的优劣程度的标准, 该值越高, 个体适应能力越强, 被选为下一代的机会越大。本文采用目标函数倒数的 1 000 倍表示适应度函数, 即  $fit(m) = 1000 / c(m)$ , 式中  $fit(m)$  表示适应度函数,  $c(m)$  为第  $m$  条染色体的总成本函数值。

本文采用竞赛制的方法选择个体, 首先, 随机从种群中筛选  $N$  个个体, 其次, 对个体进行适应度值排序, 得到适应度值最佳的个体, 被选为优秀的下一代个体, 直至种群初始规模终止。

#### 3.3 交叉运算

交叉运算是两条染色体上的部分基因相互交换产生两条新染色体的过程, 使得新染色体的适应度值优于原来个体。本文交叉运算方法的具体操作如下:

1) 确定需要交叉的染色体 A、B, 分别选择两个染色体的交叉点, 两个染色体交叉点之间的区域称为交叉子路径。

2) 从染色体 A 中选择一个交叉子路径, 并将其插入到 B 的前面, 选取染色体 B 中的交叉子路径置

于 A 的最后面。

3) 删除 A、B 中与插入的交叉子路径重复的片段, 形成新的子代染色体。交叉过程如图 1 所示。

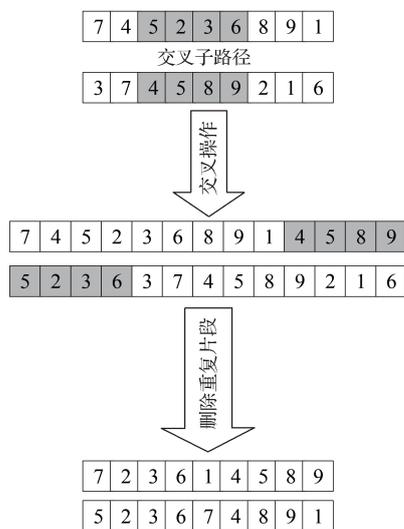


图 1 交叉过程

Fig. 1 Crossover process

### 3.4 变异运算

变异操作是将染色体上的基因点替换成其他基因点, 从而变异成新的染色体。本文采用交换变异, 提高算法的搜索能力。交换变异是染色体上两个基因位置的交换, 如图 2 所示。

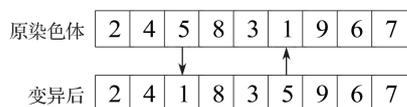


图 2 交换变异示意图

Fig. 2 Sketch of exchange variation

### 3.5 2-opt 优化算子

遗传算法虽然有很多优点, 但由于局部搜索能力较差, 容易陷入局部最优解, 为实现对最优解的精确搜索, 本文引入 2-opt 优化算子, 进一步优化算法。其具体操作如下:

1) 遗传算法完成一次迭代后, 取出本次迭代的最优解。

2) 将最优解染色体基因中的每一个基因点与其他所有基因点进行交换, 产生新的染色体, 并计算交换后染色体的适应度值。

3) 比较每次交换前后染色体的适应度值, 若交换后的适应度值变大, 则说明此次优化有效, 接受基因交换, 否则取消交换。

4) 对染色体继续进行优化直至迭代次数超过预先设定, 输出最优解, 否则返回第 2 步。

### 3.6 终止条件

终止标准是判断进化代数是否停止操作的条件。

在遗传代数达到设定的进化代数  $S=1\ 000$  后, 则停止进化, 选择适应度最好的染色体, 将染色体所对应的路径集合作为模型的最优解。

## 4 算例验证及分析

### 4.1 算例设计

本研究中的仿真实验数据来自湖南省湘潭县某冷链物流配送中心, 对该配送中心 10 km 范围内的 20 个客户点提供配送服务, 编号 1 为配送中心。假设冷链配送中心有足够多的冷藏车可供使用, 整车外形尺寸均为  $10.4\text{ m} \times 2.6\text{ m} \times 3.9\text{ m}$ , 箱体尺寸为  $7.80\text{ m} \times 2.44\text{ m} \times 2.40\text{ m}$ , 配送车辆最大载质量为 9 t, 速度为 50 km/h, 固定成本 200 元/辆, 单位距离运输成本 3 元/km, 生鲜产品单位价值为 6 000 元/t, 生鲜产品配送和装卸中的变质率分别为 0.002 和 0.003, 制冷设备每小时制冷成本为 1.5 元。假设配送过程中外界温度固定为 27 °C, 车内温度为 6 °C,  $a=0.08$ ,  $R=1\text{ kcal}/(\text{hm}^2 \cdot \text{°C})$ ,  $S=84.68\text{ m}^2$ , 车辆满载和空载时单位距离的燃油消耗量分别为 2 L 和 1 L, 单位燃油碳排放系数 2.63 kg/L, 单位碳排放价格 10 元/kg。客户点具体的位置和需求、服务时间见表 2。

表 2 客户点信息

Table 2 Customer point information

编号	x 坐标	y 坐标	需求量/t	服务时间/min
1	112.946	27.833	0	0
2	112.968	27.869	1.5	20
3	112.988	27.856	0.5	10
4	112.972	27.829	1.5	10
5	112.989	27.820	1.5	20
6	112.963	27.812	2.0	15
7	112.927	27.825	3.0	22
8	112.919	27.837	2.5	15
9	112.935	27.829	2.5	15
10	112.939	27.834	1.0	10
11	112.930	27.843	2.0	10
12	112.922	27.852	2.0	25
13	112.938	27.840	1.5	20
14	112.925	27.857	1.5	20
15	112.959	27.860	1.5	25
16	112.942	27.846	2.0	20
17	112.958	27.855	1.5	10
18	112.970	27.837	2.5	15
19	112.954	27.825	0.5	10
20	112.943	27.819	2.5	20
21	112.954	27.813	1.0	15

### 4.2 算例求解

根据前文所描述的改进遗传算法步骤进行编程, 将已知的客户点信息代入程序, 对考虑碳排放的配送

路径问题求解, 得到最优车辆配送路径如图3所示, 总成本收敛情况如图4所示。

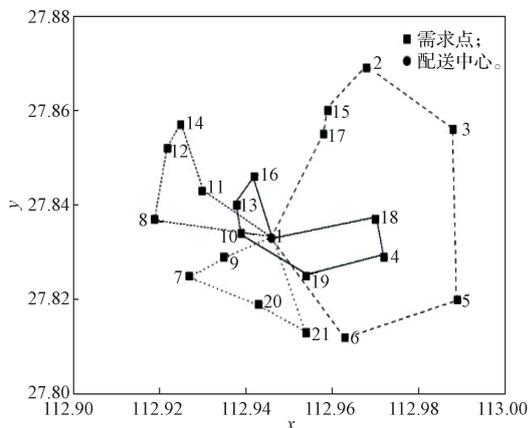


图3 车辆最优路径图

Fig. 3 Optimal path diagram of vehicles

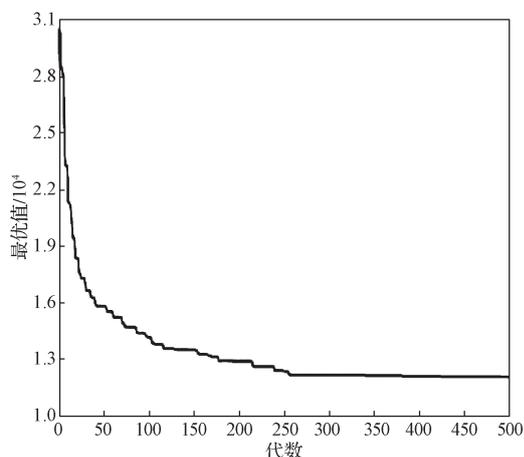


图4 总成本最优值收敛曲线

Fig. 4 Convergence curve of the total cost optimal value

### 4.3 数据结果分析

分别采用改进遗传算法和传统遗传算法对考虑

碳排放的配送路径问题求解输出最优方案, 纵向对比情况如表3和表4所示。采用改进遗传算法对是否考虑碳排放的配送路径优化求解输出最优方案, 横向对比情况如表5和表6所示。

从表3可知, 改进遗传算法求解的考虑碳排放配送路径方案, 配送中心需要派遣4辆冷藏车对20个客户点进行配送, 派遣的冷藏车辆数与传统遗传算法相同, 但路径安排与传统遗传算法求解路径有明显差距。

从表4可知, 在迭代次数上, 改进遗传算法在441次时达到收敛, 而传统遗传算法在715次时达到收敛。总路程、货损成本、碳排放量相比较于传统遗传算法分别减少了39%, 4.67%, 25.3%。由此可知, 物流企业不仅降低了配送成本, 而且在减少环境污染的同时保障了农产品的质量, 实现了经济效益和环境效益的最大化。此外, 改进的遗传算法比标准遗传算法收敛速度更快、求解效果更优, 配送方案更加符合低碳经济和绿色物流发展理念, 从而验证了该算法的可行性。

从表5可知, 两个方案都使用了4辆配送车辆, 是否考虑碳排放因素对配送车辆的使用数量没有影响, 但随着配送路径的变化, 配送成本和碳排放量会相应改变。

从表6可知, 考虑碳排放的配送方案比不考虑的配送方案多行驶了3.205 km, 但总配送成本降低了22.1%, 同时碳排放量降低了1.99%。前者总成本明显优于后者。尽管增加路程会导致运输成本增加, 但是增加的运输成本小于降低的碳排放成本, 从而实现了配送成本的下降。因此, 考虑碳排放成本的配送路径方案, 能够在一定程度上减少碳排放量, 同时又能降低物流企业总成本。

表3 算法改进前后路径对比

Table 3 Path comparison before and after an algorithm improvement

改进遗传算法			传统遗传算法		
车辆	最优路径	路程 /km	车辆	最优路径	路程 /km
1	1-9-7-20-21-1	7.421	1	1-12-8-7-21-1	12.442
2	1-8-12-14-11-1	8.584	2	1-9-10-19-20-6-1	9.902
3	1-16-13-10-19-4-18-1	9.877	3	1-5-4-18-3-2-15-1	18.892
4	1-17-15-2-3-5-6-1	16.658	4	1-17-16-13-11-14-1	11.247

表4 算法改进前后路程、成本、碳排放量、迭代次数对比

Table 4 Comparison of distance, cost, carbon emission and iteration times before and after an algorithm improvement

	固定成本 / 元	总路程 /km	制冷成本 / 元	货损成本 / 元	碳排放量 / kg	总成本 / 元	迭代次数
改进遗传算法	800	42.540	9 449.156	522.429 5	130.604 2	12 335.851 7	441
传统遗传算法	800	52.483	12 864.530	548.015 9	174.742 9	16 292.166 8	715

表5 两种方案配送路径对比

Table 5 Comparison of distribution routes between the two schemes

考虑碳排放的配送路径			不考虑碳排放的配送路径		
车辆	最优路径	路程 / km	车辆	最优路径	路程 / km
1	1-9-7-20-21-1	7.421	1	1-13-11-12-14-16-1	7.435
2	1-8-12-14-11-1	8.584	2	1-10-8-7-9-1	7.020
3	1-16-13-10-19-4-18-1	9.877	3	1-20-21-6-5-4-19-1	12.653
4	1-17-15-2-3-5-6-1	16.658	4	1-18-3-2-15-17-1	12.227

表6 两种方案路程、成本、碳排放量对比

Table 6 Comparison of distance, cost and carbon emission of the two schemes

	固定成本 / 元	路程 / km	制冷成本 / 元	货损成本 / 元	碳排放量 / kg	总成本 / 元
考虑碳排放	800	42.540	9 449.156	522.429 5	130.604 2	12 335.851 7
不考虑碳排放	800	39.335	12 882.330	568.479 0	133.250 1	15 834.565 1

## 5 结语

本文基于绿色物流发展理念,以客户点需求量、车辆载质量为约束,构建了考虑碳排放的配送成本最小化的生鲜农产品配送路径优化模型,对传统遗传算法的个体选择策略、交叉运算、变异运算进行了优化,并且引入了2-opt优化算子,设计了改进的遗传算法对模型求解。最后,采用算例对该算法进行模拟仿真,并进行方案与算法对比。结果表明,改进的新算法具有更优的运算效率和优化效果。同时,考虑碳排放的配送路径方案,可以达到降低成本和减少碳排放量的效果,能够为物流企业降本增效和节能减排目标的实现提供方法支持。

### 参考文献:

- [1] TARANTILIS C, KIRANOUDIS C. Distribution of Fresh Meat[J]. Journal of Food Engineering, 2002, 51(1): 85-91.
- [2] ZHANG S, HU Q H, WANG D W. Research of Fresh Agricultural Products Logistics Vehicle Optimization[J]. International Journal of Intelligent Information Processing, 2011, 2: 45-59.
- [3] LEUNG S C H, ZHANG Zhenzhen, ZHANG Defu, et al. A Meta-Heuristic Algorithm for Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problems with Two-Dimensional Loading Constraints[J]. European Journal of Operational Research, 2013, 225(2): 199-210.
- [4] 王淑云, 孙虹. 随机需求下冷链品多温共配路径优化研究[J]. 工业工程与管理, 2016, 21(2): 49-58.  
WANG Shuyun, SUN Hong. Optimization of Multi-Temperature Joint Distribution with Stochastic Demands[J]. Industrial Engineering and Management, 2016, 21(2): 49-58.
- [5] 张文峰, 梁凯豪. 生鲜农产品冷链物流网络节点和配送的优化[J]. 系统工程, 2017, 35(1): 119-123.  
ZHANG Wenfeng, LIANG Kaihao. Optimization of Cold-Chain Network Nodes and Delivery for Fresh Agricultural Products[J]. Systems Engineering, 2017, 35(1): 119-123.
- [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 Yuanguo, HE Shengyu. 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] 丁秋雷, 胡祥培, 姜洋, 等. 考虑新鲜度的农产品冷链物流配送受扰恢复模型[J]. 系统工程理论与实践, 2021, 41(3): 667-677.  
DING Qiulei, HU Xiangpei, JIANG Yang, et al. A Recovery Model for Cold Chain Delivery of Agricultural Products by Considering Freshness[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2021, 41(3): 667-677.
- [8] FIGLIOZZI M. Emissions Minimization Vehicle Routing Problem[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2010, 2197(1): 1-7.
- [9] KWON Yongju, CHOI Youngjae, LEE Dongho. Heterogeneous Fixed Fleet Vehicle Routing Considering Carbon Emission[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2013, 23: 81-89.
- [10] 潘茜茜, 干宏程. 考虑碳排放的冷链物流配送路径优化研究[J]. 数学的实践与认识, 2016, 46(2): 62-68.  
PAN Xixi, GAN Hongcheng. Study on Cold Chain Logistics Distribution Path Optimization of Considering Carbon Emissions[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2016, 46(2): 62-68.
- [11] 范立南, 董冬艳, 李佳洋, 等. 基于生鲜农产品的冷链物流配送路径优化[J]. 沈阳大学学报(自然科学版), 2017, 29(2): 125-131.  
FAN Linan, DONG Dongyan, LI Jiayang, et al. Route

- Optimization of Cold Chain Logistics Based on Fresh Agricultural Products[J]. Journal of Shenyang University (Natural Science), 2017, 29(2): 125-131.
- [12] 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.
- KANG Kai, HAN Jie, PU Wei, et al. Optimization Research on Cold Chain Distribution Routes Considering Carbon Emissions for Fresh Agricultural Products[J]. Computer Engineering and Applications, 2019, 55(2): 259-265.
- [13] 鲍春玲, 张世斌. 考虑碳排放的冷链物流联合配送路径优化[J]. 工业工程与管理, 2018, 23(5): 95-100, 107.
- BAO Chunling, ZHANG Shibin. Route Optimization of Cold Chain Logistics in Joint Distribution: With Consideration of Carbon Emission[J]. Industrial Engineering and Management, 2018, 23(5): 95-100, 107.
- [14] 方文婷, 艾时钟, 王晴, 等. 基于混合蚁群算法的冷链物流配送路径优化研究[J]. 中国管理科学, 2019, 27(11): 107-115.
- FANG Wenting, AI Shizhong, WANG Qing, et al. Research on Cold Chain Logistics Distribution Path Optimization Based on Hybrid Ant Colony Algorithm[J]. Chinese Journal of Management Science, 2019, 27(11): 107-115.
- [15] LIU Guike, HU Jiayao, YANG Yu, et al. Vehicle Routing Problem in Cold Chain Logistics: a Joint Distribution Model with Carbon Trading Mechanisms[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2020, 156: 104715.
- [16] 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 Yingchun, et al. Optimization of Low-Carbon Cold Chain Vehicle Path Considering Customer Satisfaction[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26(4): 1108-1117.
- [17] 唐慧玲, 唐恒书, 朱兴亮. 基于改进蚁群算法的低碳车辆路径问题研究[J]. 中国管理科学, 2021, 29(7): 118-127.
- TANG Huiling, TANG Hengshu, ZHU Xingliang. Research on Low-Carbon Vehicle Routing Problem Based on Modified Ant Colony Algorithm[J]. Chinese Journal of Management Science, 2021, 29(7): 118-127.
- [18] 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.
- SHEN Li, LI Chengyu, 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, 70.

(责任编辑: 姜利民)