

进出口食品视角下的不确定条件多式联运路径优化研究

林燕奎^{1,2} 黄锦云¹ 郑文丽² 蔡伊娜^{1,2*}
LIN Yankui HUANG Jinyun ZHENG Wenli CAI Yina

摘要

面向国际贸易环境瞬息万变导致的进出口食品货运量随机性波动的现象,文章基于多式联运的进出口食品运输路径优化问题,统筹考虑运输费用、运输时间及碳排放量等因素,构建以运输综合成本上限最小为目标的多式联运模型。利用模糊逻辑理论自适应调整模型求解过程中种群交叉及变异概率,提升问题求解效率。结果表明,所提模型的寻优能力优于传统遗传算法,迭代次数减少约 62.5%;在货运量随机情况下运输策略综合成本下降超过 10%,与最低成本差距小于 10%,可有效节省多式联运综合成本,实现进出口食品货运量存在波动情况下多式联运路径的最优解。

关键词

进出口食品; 货运量随机; 多式联运; 路径优化; 运输综合成本

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2026.06.017

0 引言

随着食品贸易日益频繁,尤其是食品以其易腐败易变质且保质期短的特殊物流属性,对食品物流在不确定条件下的多式联运路径优化提出了高效、低成本和环保性的更严苛的要求,成为国际贸易研究的热点之一^[1-2]。多式联运被视为一种协调不同模式的食物物流运输方式,实现资源共享、成本降低和效率提升的解决方案,已成为现代物流中的一种重要的运输组织模式^[3-4]。

当前,关于多式联运相关的研究不少,对提高食品物流性价比及时效性极具借鉴意义。在确定性条件模型中,研究均假设运输参数已知且固定,侧重运输路径与方式的组合优化。例如,綦潘安等^[5]针对集装箱多式联运中的班期限制与运力约束,提出了多任务路径优化方案,但未考虑动态环境下的参数波动。Ko 等^[6]通过构建多目标随机模型验证了多式联运在降低碳排放方面的潜力,但其模型仍以确定性碳排放系数为基础。Xu 等^[7]和董佳等^[8]分别结合物联网技术与高时效性货物场景优化路径,采用遗传算法与禁忌搜索的混合策略求解,但均默认运输需求与成本参数为固定值。此类研究为多式联运优化提供了基础框架,但难以应对实际进出口食品物流普遍存在的不确定性,如同类生鲜水果因不同季节而采用不同运输方式形成的到港货运量存在不确定性,无法实时获得精确数值,这给运输方案设计增加了不确定性。

针对不确定条件下的多式联运问题,为提升模型鲁棒性,学者逐步引入随机规划等理论处理不确定性。李孟良等^[9]建

立了灾后应急物资联运模型,根据需求和路况不确定性来解决调配问题。邓明君等^[10-11]以经济成本最小为目标,构建了基于运量和碳交易政策不确定的优化模型并使用遗传算法检验模型的合理性和有效性。蒋琦玮等^[12]证实了遗传算法对于求解不同需求导致的具有机会约束的多式联运模型具有良好的适应性。杨喆等^[13]使用模糊规划理论处理实际货物运量,提出了带启发式因子的差分进化算法降低运输成本。户佐安等^[14-15]以总费用最小为目标,建立了随机运输时间和随机货物运量条件下的多式联运路径优化模型,设计了遗传算法进行模型求解。万杰等^[16]将中俄货物往来作为研究主体,建立了一个存在不确定性运量的多目标优化模型,设计了低成本高时效的环保运输方案。陈汨梨等^[17]采用蒙特卡罗方法结合遗传算法有效处理了上述问题,但该算法需要大量迭代计算,且收敛速度慢,难以满足实时决策需要。耿娜娜等^[18]以低成本短时间为目标,建立最优路径的双目标模型并在模型中增添不确定时间发生概率。选取中欧班列为例,采用 Dijkstra 算法对案例进行求解。

综上所述,现有研究侧重在建模时将多式联运过程中的不确定因素进行假设,通常通过设定固定的概率分布或利用统计期望值来构造模型,所得结果是一种特定概率下期望值最小的鲁棒解。尽管这种方法在一定程度上能够应对食品贸易过程中的随机性,但由于其假设条件较为理想化,往往无法充分反映实际货运量波动的复杂性,导致所获得的解决方案仅在特定情境下具有最优或近似最优的效果,难以实现进出口食品货运量不确定场景中综合成本上限的最优性。因此,针对上述不足,本文从进出口食品视角切入,聚焦其贸易货运量随机波动导致的综合成本优化难题,构建以综合成本(运

1. 深圳海关食品检验检疫技术中心 广东深圳 518000

2. 深圳市检验检疫科学研究院 广东深圳 518045

输费用、时间、碳排放)上限最小化为目标的多式联运模型,通过模糊隶属函数量化运量不确定性,突破传统期望最优解的局限性。同时设计基于模糊逻辑的自适应遗传算法,动态调整交叉/变异概率以平衡种群多样性与收敛速度,更贴合口岸调度实时决策需求。

1 模型创建

1.1 概述

在公路、铁路、水路3种混合运输的多式联运方案中,口岸决策部门作为口岸物流体系中的核心管理机构,承担着协调、调度和监管多式联运作业的重任。需负责制定和调整口岸转运调度方案,优化进出口食品物流规划,及时响应市场需求及突发事件,同时统筹各运输方式之间的衔接与配合,确保进出口食品在口岸之间实现高效转运。考虑到口岸货运量的需求不确定,口岸决策部门应提前制定运输方案。为方便模型的建立和求解,本文提出以下约束条件:

- ①同一运输批次的进出口食品不可分割;
- ②任意节点间进出口食品可采用的运输方式及运输成本是已知条件;
- ③各运输路径的食品货运量均小于等于该路径的承载能力;
- ④进出口食品抵达任意节点进行转运所需要的等待时间及花销是已知条件;
- ⑤进出口食品在任意节点最多可转换一次运输方式;
- ⑥进出口食品在两个节点间运输只能选择一种运输方式;
- ⑦进出口食品在运输过程中,其质量不会发生变化,即不考虑运输的货物损耗;
- ⑧不考虑恶劣天气或设备故障等外界因素对运输造成的影响。

1.2 综合分析

1.2.1 费用

(1) 运输费用

运输费用指货物通过运输工具在运输途中产生的费用,与运输方式、运量、距离和单位运输成本等相关,用公式表示为:

$$C_1(x, q) = \sum_{(i,j) \in A} \sum_{h \in M} q c_{(i,j)}^h d_{(i,j)}^h x_{(i,j)}^h \quad (1)$$

式中: i, j 表示路途中运输节点, $c_{(i,j)}^h$ 表示单位货物在节点 i 与节点 j 中间选择运输方式 h 的运输单位成本, $d_{(i,j)}^h$ 表示单位货物在节点 i 与节点 j 中间选择运输方式 h 的运输距离。

(2) 中转费用

中转费用指货物在某一中转节点进行运输方式转换时产

生的费用,与货物运量、单位转换成本有关,用公式表示为:

$$C_2(y, q) = \sum_{i \in N} \sum_{h \in M} \sum_{r \in M} q c_i^{h,r} y_i^{h,r} \quad (2)$$

式中: $c_i^{h,r}$ 表示单位货物在节点 i 处由运输方式 h 转换为 r 所需成本, q 表示实际货物总量。

1.2.2 时间

货物运输时间指包括货物通过运输工具在运输途中的时间和在中转节点进行运输方式转换时需要的用时,用公式表示为:

$$T(x, y, q) = \sum_{(i,j) \in A} \sum_{h \in M} x_{(i,j)}^h d_{(i,j)}^h / v_{(i,j)}^h + \sum_{i \in N} \sum_{h \in M} \sum_{r \in M} y_i^{h,r} t_i^{h,r} q \quad (3)$$

式中: $t_i^{h,r}$ 表示单位货物在节点 i 处由运输方式 h 转换为 r 所需时间, $v_{(i,j)}^h$ 表示单位货物在节点 i 与节点 j 中间选择运输方式 h 的运输速度, $x = \{x_{(i,j)}^h\}_{(i,j) \in A, h \in M}$ 表示节点间运输方式决策变量集, $y = \{y_i^{h,r}\}_{i \in N, h, r \in M}$ 表示运输方式转换决策变量集,其中 $x_{(i,j)}^h$ 和 $y_i^{h,r}$ 是 0-1 决策变量,分别表示是否在节点 i 与节点 j 中间选择运输方式 h 和在节点 i 处将运输方式 h 转换为运输方式 r 。

1.2.3 碳排放量

碳排放量指货物运输过程中运输工具所产生的温室气体排放量,与运输方式、货物运量及运输距离有关。

$$O(x, q) = \sum_{(i,j) \in A} \sum_{h \in M} q x_{(i,j)}^h e_{(i,j)}^h d_{(i,j)}^h \quad (4)$$

式中: $e_{(i,j)}^h$ 表示单位货物在节点 i 与 j 中间选择运输方式 h 单位距离的碳排放量;

1.2.4 不确定性运量

运量不确定,通常指在多种运输方式组合运输过程中,货物运量存在无法准确预测或较大波动的情况。这种不确定性主要受市场需求变化、运输方式衔接效率、交通基础设施状况、政策法规调整以及供应链管理等因素的影响。

$$q = q_u + \delta_u$$

$$\delta_u \in \mathcal{N}(0, 0.25 \times (q_{\max} - q_{\min})^2) \quad (5)$$

式中: δ_u 表示运量波动参数。

1.3 目标函数及约束条件

目标函数为:

$$\min_{x, y, q} C(x, y, q) = w_1 [C_1(x, q) + C_2(y, q)] + w_2 C_3(x, y, q) + w_3 C_4(x, q) \quad (6)$$

其中, $w_1 + w_2 + w_3 = 1$ 。

$$C_3(x, y, q) = q \{c_{\text{before}} \max[(T_{\text{ob}} - T), 0] + c_{\text{after}} \max[(T - T_{\text{ob}}), 0]\} \quad (7)$$

式中: c_{before} 表示单位货物过早到达终点所产生的存储费用, c_{after} 表示单位货物过晚到达终点所产生的惩罚费用, T_{ob} 表示约定送货时间。

$$C_4(x, q) = \max[\sum_{(i,j) \in A} \sum_{h \in M} q x_{(i,j)}^h e_{(i,j)}^h d_{(i,j)}^h - E_{\text{allow}}, 0] e_p \quad (8)$$

式中: E_{allow} 表示允许碳排放量, e_p 表示单位重量碳排放价格。

约束条件为:

$$\sum_{(i,j) \in A} \sum_{h \in M} x_{(i,j)}^h - \sum_{(j,k) \in A} \sum_{h \in M} x_{(j,k)}^h = \begin{cases} 1 & j = d \\ 0 & j \neq o, d \\ -1 & j = o \end{cases} \quad (9)$$

$$\sum_{h \in M} x_{(i,j)}^h \leq 1 \quad (10)$$

$$0 \leq \sum_{h \in M} \sum_{r \in M} y_i^{h,r} \leq 1 \quad (11)$$

$$\sum_{(i,j) \in A} x_{(i,j)}^h + \sum_{(j,k) \in A} x_{(j,k)}^r \geq 2y_j^{h,r} \quad (12)$$

$$q_{\min} \leq q \leq q_{\max} \quad (13)$$

式中: $q_{\max}$ 表示最大货物量, $q_{\min}$ 表示最小货物量。

$$x_{(i,j)}^h \in \{0,1\} \quad (14)$$

$$y_i^{h,r} \in \{0,1\} \quad (15)$$

式(8)表示路径中所有节点均符合货物流量守恒,其中 o 为起点, d 为终点;式(9)表示货物在同一运输路径上只能使用一种运输方式;式(10)表示货物在一个中转节点上最多能改变一次运输方式;式(11)表示各运输节点前后的运输方式信息与节点运输方式转换信息具有一致性;式(12)表示运输货物重量处于固定区间范围内;式(13)表示运输方式决策变量为 0-1 变量;式(14)表示节点中转决策变量为 0-1 变量。

2 模型求解

2.1 基于模糊逻辑的自适应遗传算法

2.1.1 算法原理

针对陈泊梨等^[16]使用蒙特卡罗方法结合遗传算法的多式联运规划方法中,由于过度枚举导致迭代次数多、计算量大等问题,本文提出了一种基于模糊逻辑自适应调整种群交叉及变异概率的改进遗传算法,综合考虑种群多样性及个体适应度,使用模糊推理系统进行种群交叉和变异概率的自适应调整,提高算法探索性,加快收敛速度。模糊推理工作流程如图 1 所示。

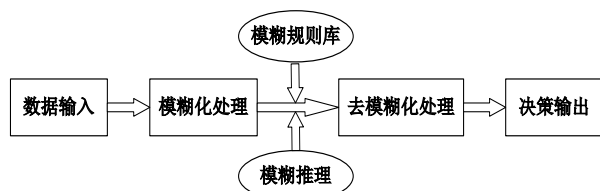


图 1 模糊推理工作流程

在当前迭代轮次货物运量参数确定后完成染色体编码,并计算初始种群中各个体适应度。利用个体间适应度距离方差与极值差分别衡量种群密度与种群多样性,将两者进行归

一化处理作为模糊推理系统的数据输入,经模糊化处理映射到不同的模糊指标上,再使用规定的模糊推理规则转化为与变异及交叉概率有关的模糊指标上,最后进行去模糊化处理得到当前种群自适应的交叉及变异概率。

2.1.2 概率更新原理

首先针对当前轮次生成的种群个体 n 求其对应的目标函数值 $C_n(x, y, q)$, 以其倒数作为该个体当前情况下的适应度 l_n 。

$$l_n = \frac{1}{C_n(x, y, q)} \quad (16)$$

根据种群规模 N 和 l_n 求出当前居中个体适应度 $\bar{l}$ 及确定个体适应度极值差 R 。

$$\bar{l} = \frac{1}{N} \sum_n l_n \quad (17)$$

$$R = \max_n(l_n) - \min_n(l_n) \quad (18)$$

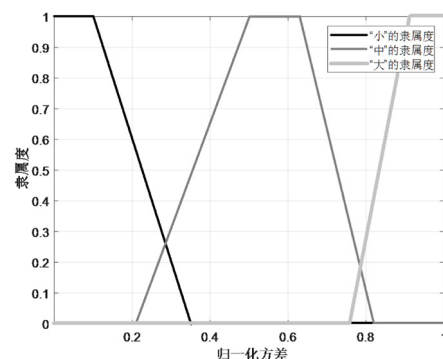
再根据 $\bar{l}$ 计算种群中各个体与居中个体的适应度距离 d_n , 求出种群适应度方差 V 。

$$d_n = \sqrt{(l_n - \bar{l})^2} \quad (19)$$

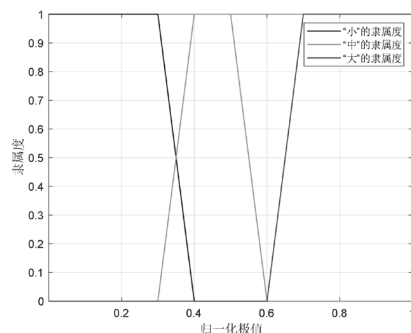
$$V = \frac{\sum_n d_n^2}{N} \quad (20)$$

最后对 V 和 R 进行归一化处理。

为便于计算,模糊推理系统中隶属度函数取三角隶属函数。方差 V 、极值差 R 、交叉概率 P_c 和变异概率 P_m 的隶属度函数如图 2~3 所示。

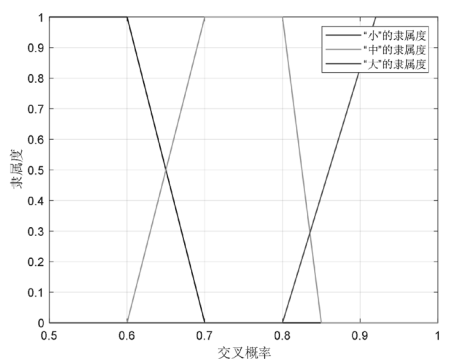


(a) 方差隶属度

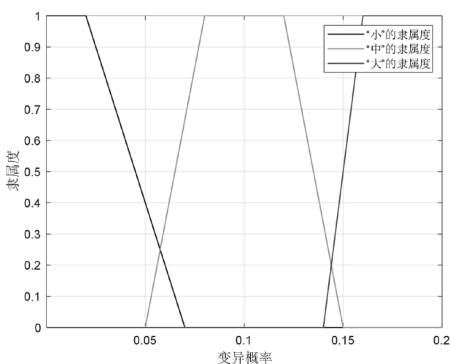


(b) 极值隶属度

图 2 方差、极值隶属度函数



(a) 交叉概率隶属度



(b) 变异概率隶属度

图3 交叉、变异概率隶属度函数

本文设定的模糊推理规则如下:

规则 n : 如果 V 是 W_{n1} , R 是 O_{n1} , 则 P_c 是 X_{n1} , P_m 是 X_{n2} , 其中 $n = 1, 2, \dots, N$ 表示第 n 条规则, W_{n1} 、 O_{n1} 、 X_{n1} 、 X_{n2} 均为各变量的模糊表示形式。将模糊变量划分为大、中、小共 3 个等级, 可确定模糊规则如下:

- (1) 若 V 是小, R 是小, 则 P_c 是小, P_m 是大;
- (2) 若 V 是小, R 是中, 则 P_c 是小, P_m 是大;
- (3) 若 V 是小, R 是大, 则 P_c 是中, P_m 是中;
- (4) 若 V 是中, R 是小, 则 P_c 是中, P_m 是中;
- (5) 若 V 是中, R 是中, 则 P_c 是中, P_m 是中;
- (6) 若 V 是中, R 是大, 则 P_c 是大, P_m 是小;
- (7) 若 V 是大, R 是小, 则 P_c 是中, P_m 是中;
- (8) 若 V 是大, R 是中, 则 P_c 是大, P_m 是小;
- (9) 若 V 是大, R 是大, 则 P_c 是大, P_m 是小。

完成模糊推理后将自适应的交叉及变异概率代入染色体个体的选择和更新过程中进行优化问题求解。

2.1.3 模型求解步骤

针对所处理模型的特点, 改进后的遗传算法流程如图 4 所示。具体步骤如下:

步骤 1: 编码。染色体编码包括从起点至终点的运输路径节点编码和运输方式编码。路径节点采用序号编码, 运输方式选择字母编码, 其中 H 为公路运输, R 为铁路运输, W 为水路运输。

为水路运输。个体染色体编码结构如图 5 所示。

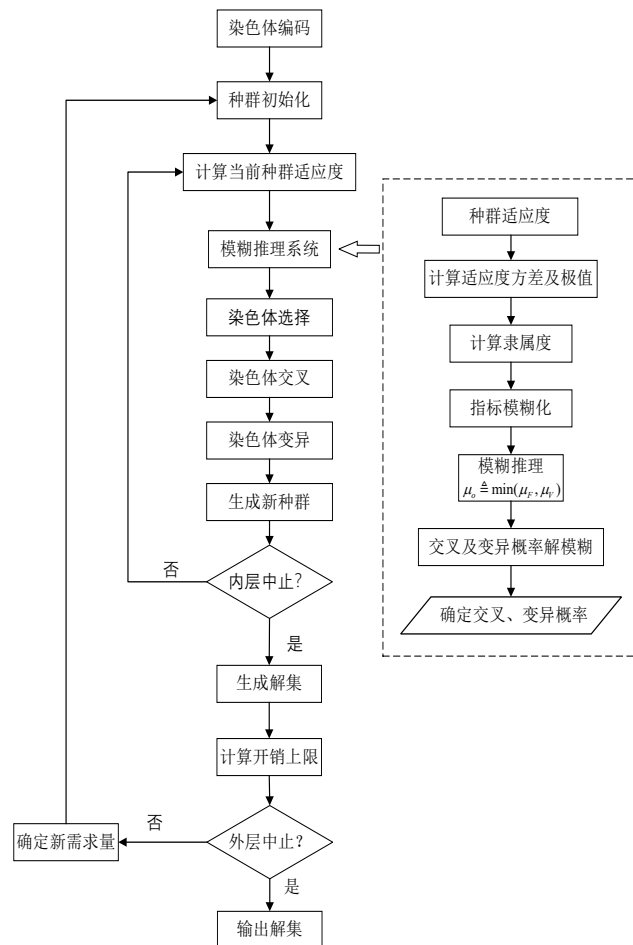


图4 算法流程

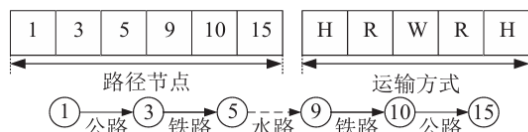


图5 染色体编码结构

步骤 2: 种群初始化。通过随机生成法生成 T 个以口岸序号开始目的地序号结束的连续片段, 计算路径节点片段长度, 根据长度随机生成对应的运输方式染色体片段, T 为种群规模。

步骤 3: 适应度、自适应交叉概率及变异概率计算。选择目标函数的相反数作为该染色体的适应度, 将种群的适应度集合代入定义的模糊推理系统进行交叉及变异概率计算。

步骤 4: 选择。使用轮盘选择的回放式采样方法。设定每个染色体进入下一代的概率等于其适应度值与整个种群中个体适应度值和的比值, 进行随机采样。

步骤 5: 交叉。采用部分匹配交叉算子, 对两条染色体的路径节点基因片段执行交叉操作, 再交叉对应运输方式的基因片段。

步骤 6：变异。采用基本位变异算子，传输路径节点基因可突变为传输网络中任意节点序号，运输方式基因可突变为 {M, R, W} 集合中任意符号，从而产生新种群。

步骤 7：验证内层终止条件。设定最大内层迭代次数，若生成最优个体较上一次迭代没有提升或达到最大次数，则结束内层循环，进入步骤 8；若存在提升，返回步骤 3。

步骤 8：验证外层收敛。设定最大外层迭代次数，计算当前开销上限，若上限较上一次迭代没有明显下降或达到最大次数，则结束外层循环，输出解集；若存在明显下降，返回步骤 2。

3 算例分析

本节对上述模型进行仿真实验，假设现有一批运量不确定的进出口食品需要从深圳口岸转运至目的地上海。深圳和上海均具有大型港口，因此大宗货物运输通常选择水运方式降低运输成本。但水运运输速度较慢，不利于高价值高时效货物的送达。同时水运航线可能因港口拥堵、排队等待和调度不稳定而影响运输效率，因此本文考虑在深圳上海之间货物多式联运的运输方式。可选择的中间节点为厦门、泉州、漳州、福州、宁德、莆田、温州、台州、丽水、宁波、杭州和绍兴 12 个城市，每个节点间能够承载覆盖全部货物量的运输及装卸任务。网络中两个节点间的运输方式可分为单一运输和多式联运。具体运输网络结构如图 6 所示。

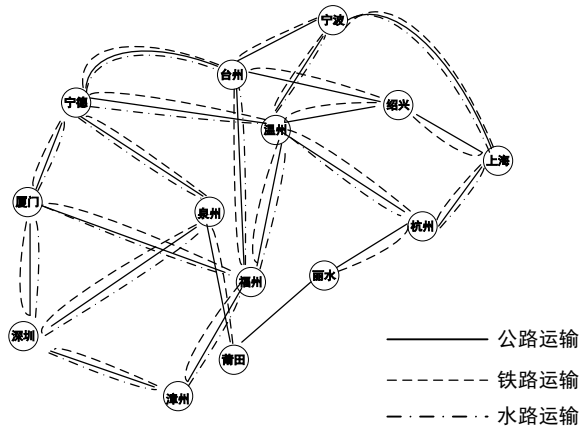


图 6 运输网络结构

3.1 参数设置

口岸转运调度决策部门需将该批食品从深圳口岸运输到上海，且在规定的收货时间窗内到达目的地。若货物提前到达目的地，将产生 8 元/(h·kg) 的单位存储费用；若延迟到达，则会产生 20 元/(h·kg) 的单位惩罚成本。本文其他参数设置引用了《中国物流统计年鉴（2022）》及行业报告（如碳排放系数来自 IPCC 标准）等，具有一定的合理性和准确性。网络中各传输路径的不同运输方式对应的传输距离如表 1 所示。

表 1 城市间不同运输方式的运输距离

运输路径	公路 /km	铁路 /km	水路 /km
深圳 — 厦门	578	527	501
深圳 — 泉州	665	585	607
深圳 — 漳州	531	472	516
厦门 — 福州	254	226	423
厦门 — 宁德	345	314	432
泉州 — 宁德	268	243	347
泉州 — 莆田	94	69	—
漳州 — 福州	289	268	419
福州 — 温州	317	294	323
福州 — 台州	440	417	418
宁德 — 温州	233	206	202
宁德 — 台州	341	329	317
莆田 — 台州	526	503	—
莆田 — 丽水	450	—	—
温州 — 宁波	263	257	431
温州 — 杭州	304	430	738
温州 — 绍兴	278	387	—
台州 — 宁波	174	152	200
台州 — 绍兴	217	264	—
丽水 — 杭州	261	247	542
宁波 — 上海	226	314	328
杭州 — 上海	174	159	396

不同运输方式的运输速度、单位距离运输成本、单位距离碳排放量如表 2 所示。

表 2 不同运输方式的运输参数

运输方式	速度 / (km·h ⁻¹)	单位运输成本 / (元·km ⁻¹ ·t ⁻¹)	单位碳排放量 / (kg·km ⁻¹ ·t ⁻¹)
公路	80	0.526	0.053
铁路	110	0.392	0.010
水路	30	0.090	0.012

根据网络节点具体情况可以得到包括单位中转成本、单位中转时间等中转参数如表 3 所示。

表 3 不同运输方式的中转参数

运输方式	单位中转成本 / (元·t ⁻¹)	单位中转时间 / (h·t ⁻¹)	单位中转碳排放量 / (kg·t ⁻¹)
公路—铁路	3.5	0.2	0.5
铁路—水路	3	0.4	0.8
水路—公路	4	0.1	0.1

由于运输计划具有超前性，决策部门无法提前确定实际的运输货运重量。结合日常口岸货物运量的特征及相关文献，

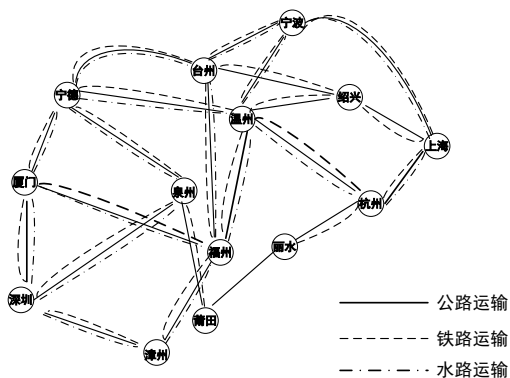
假设低货物量、中货物量、高货物量 3 种不同场景，其货运重量分别限制在 [100 kg, 150 kg]、[150 kg, 200 kg]、[200 kg, 250 kg] 内。

本文利用 Matlab R2022b 程序进行仿真编程，部分模型参数设置为种群规模 200，迭代次数 300。

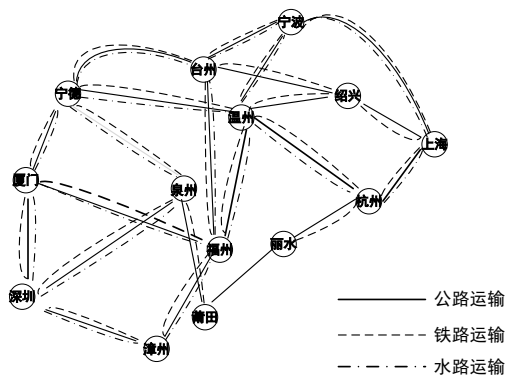
3.2 结果分析

3.2.1 有效性分析

利用本文提出模型并将文献 [16] 中蒙特卡罗方法结合遗传算法作为对比模型，分别对运量不确定条件下进行多式联运路径优化仿真测试。在设定的仿真参数下，本文提出模型及对比模型所得路径决策如图 7 所示。



(a) 所提模型路线决策



(b) 对比模型路线决策

图 7 多式联运路线决策

由图 7 可知，根据仿真设定参数，本文构造模型求解出的运输路线为“深圳—厦门—福州—温州—杭州—上海”，运输方式为“公—铁—公—铁—公”，综合成本为 17.38 万元；对比模型的运输路线为“深圳—厦门—福州—温州—杭州—上海”，运输方式为“公—铁—公—公—公”，综合成本为 19.11 万元。可以看出，相较于对比模型，所构建模型的运输开销下降约 10%，表明所构建模型在运量不确定场景下能够减少多式联运综合成本。

不同模型所得路径决策产生的综合成本与基于枚举法获得的最低综合成本之间的差距如图 8 所示。

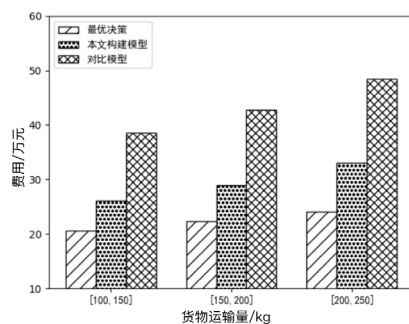
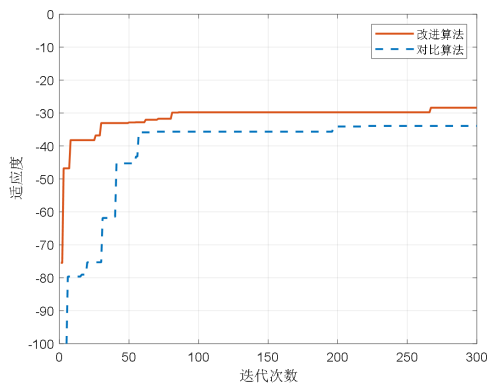


图 8 不同运量下多式联运综合成本

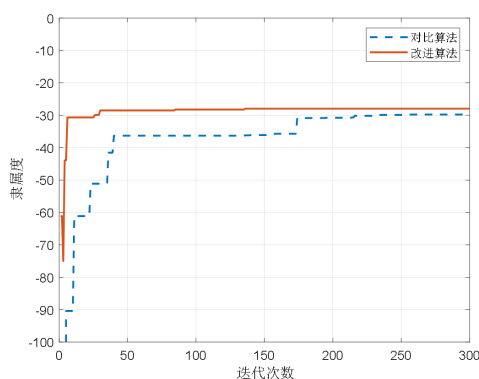
由图 8 可知，在不同的货物运量场景中，三种路径方案的综合成本均存在明显差异。在货物运量为 [100 kg, 150 kg] 时，基于枚举法的最优决策方案的综合成本为 20.56 万元，所提模型路径方案的综合成本为 22.13 万元，对比模型路径方案的综合成本为 24.15 万元，所提模型路径方案的成本比最优决策方案高 7.6%，对比模型路径方案低约 8.3%；在货物运量为 [150 kg, 200 kg] 时，最优决策方案的综合成本为 26.14 万元，所提模型路径方案的综合成本为 28.98 万元，对比模型路径方案的综合成本为 32.97 万元。此时，所提模型路径方案的成本比最优决策方案高 10.8%，对比模型路径方案低约 12.1%。在货物运量为 [200 kg, 250 kg] 时，最优决策方案的综合成本为 38.63 万元，所提模型路径方案的综合成本为 42.77 万元，对比模型路径方案的综合成本为 48.42 万元。所提模型路径方案的成本比最优决策方案高 10.7%，但对比模型路径方案低约 11.7%。综合来看，所提模型路径方案在不同运量场景下的成本均显著低于对比模型路径方案，接近最优决策方案。在控制不确定因素对运输成本的影响方面，所提模型表现出显著优势，能够有效减少不确定因素带来的不良影响，有效降低进出口食品的综合运输成本。

3.2.2 收敛性分析

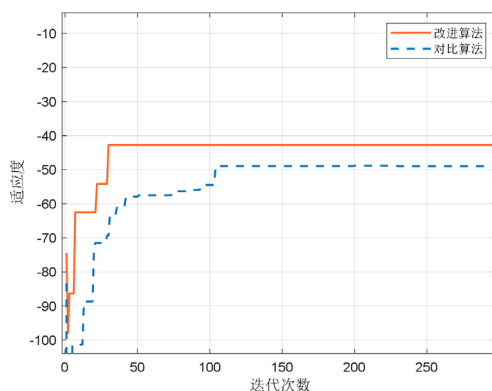
在进行模型求解过程中，寻找解集所需的循环迭代次数随着货物需求量的增加而增加。不同运量场景下，不同模型优化过程中，种群适应度变化情况如图 9 所示。



(a) [100 kg, 150 kg] 运量适应度变化



(b) [150 kg, 200 kg] 运量适应度变化



(c) [200 kg, 250 kg] 运量适应度变化

图 9 种群适应度变化情况

由图 9 可知,在进出口食品货运量为 [100 kg, 150 kg] 情况下,对比模型的适应度经过超过 50 次迭代后提升至 -35 左右,而所提出的模型则能在迭代 30 次后迅速提升至 -30。对于 [150 kg, 200 kg] 及 [200 kg, 250 kg] 的货物运量场景,本文所提出模型的适应度仍然能够稳定在 30 次迭代内完成收敛,而对比模型的提升速度进一步减缓,只能在近 100 次迭代后趋于平稳。数据表明,本文所提出的模型在不同运量下都表现出较快的收敛速度和较好的适应度提升效果,在优化复杂运输任务时更为高效,尤其在优化初期阶段优势明显。

不同运量场景下,不同模型得到路径决策所需要的循环迭代次数变化情况如图 10 所示。

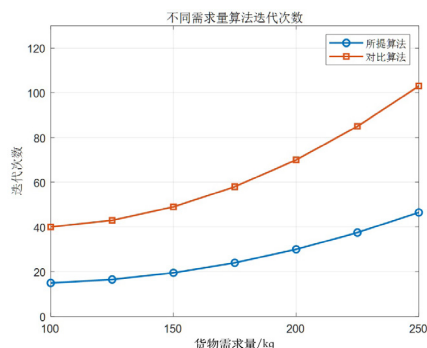


图 10 不同算法迭代次数对比

由图 10 可知,进出口食品货运量在 [100 kg, 250 kg] 范围内,该模型的最优运输路线及运输方式的迭代次数范围为 [15, 50];对比模型的最优的运输路线及运输方式的迭代次数范围为 [40, 110]。该模型的迭代次数从对比模型的平均 75 次下降到平均 28 次左右。相较于对比模型,本文提出的模型的优化迭代次数下降约 62.5%。迭代次数的减少表明了模型收敛速度的提升,其通过自适应的概率变化实现了更高效的优化策略,能够在更短的时间内达到收敛,大幅减少了计算量,从而满足了实际进出口食品多式联运路径及其运输方式决策的快速响应需求。

4 结论

针对国际市场环境易变导致的进出口食品货运量随机性波动现象,研究货运量不确定下多式联运路径优化问题,以运输综合成本上限最小为目标建立了多式联运模型,并使用改进的遗传算法对模型进行求解。在货运量不确定情况下,该模型能显著减少进出口食品多式联运的综合成本,且通过自适应的概率变化实现了更高效的优化策略,能在更短时间内达到收敛效应。由于多式联运具有很强的实操性和复杂性,后续进一步的研究将考虑混合多种不确定因素对进出口食品路径选择的影响,为构建全链条、全覆盖的食品安全监管提供科学可控的路径。

参考文献:

- [1] 陈秧分,徐邵文,钱静斐.农产品现代流通体系建设的国际经验及对我国的启示[J].中国流通经济,2025,39(7):22-36.
- [2] 宣昌勇,郭燕.“一带一路”倡议下基于信息化视角的口岸物流发展策略研究[J].现代经济探讨,2020(12):68-73.
- [3] 彭勇,肖云鹏,罗义娟.不确定环境下多式联运路径多目标优化[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2021,40(10):154-160.
- [4] 邓学平,陈露,田帅辉.不确定需求下考虑混合时间窗的多式联运路径优化[J].重庆邮电大学学报(自然科学版),2021,33(4):689-698.
- [5] 蔡潘安,计明军,冯泽,等.考虑多任务集装箱多式联运路径优化方案研究[J].工业工程与管理,2022,27(3):54-63.
- [6] Ko S, Choi K, Yu S, et al. A stochastic optimization model for sustainable multimodal transportation for bioenergy production[J]. Sustainability, 2022, 14(3):1889.
- [7] Xu Wen, Rong Mei. Research on optimization of expressway logistics path based on the advantages of multimodal transport in the environment of internet of things[J]. Wireless Personal Communications, 2022, 126(3): 1981-1997.

(下转第 89 页)

- Technology, 1990,8(11):1536-1540.
- [9] Numkam Fokoua E, Michaud-Belleau V, Genest J, et al. Theoretical analysis of backscattering in hollow-core antiresonant fibers[J]. APL Photonics, 2021, 6: 096106.
- [10] Jackle J, Kawasaki K. Intrinsic roughness of glass surfaces[J]. Journal of Physics: Condensed Matter, 1995, 7(23): 4431-4436.
- [11] Gardner W B. Microbending loss in optical fibers[J]. Bell System Technical Journal, 1975, 54(2): 457-476.
- [12] Marcuse D. Microbending losses of single-mode, step-index and multimode, parabolic-index fibers[J]. The Bell System Technical Journal, 1976, 55(7): 937-955.
- [13] 中国移动通信集团有限公司. 中国移动开通全球首个 800G 空芯光纤传输技术试验网 [EB/OL]. (2024-06-06)[2026-05-29]. https://www.10086.cn/aboutus/news/groupnews/index_detail_50009.html.
- [14] 中国移动官方. 全国首条空芯光纤正式商用! 中国移动在深圳点亮“光速”新未来 [EB/OL]. (2025-08-05)[2026-05-29]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1839690316778282618&wfr=spider&for=pc>.
- [15] 亨通集团有限公司. 亨通光电联合中国联通成功部署中国联通首条商用空芯光缆线路 [EB/OL]. (2025-10-30)[2026-05-29]. <https://www.hengtonggroup.com/en/home/news/detail/id/401>.
- [16] 通信世界网. 中国移动携手暨南大学、烽火通信、北京大学在 OFC 2024 发表全球首个基于空芯光纤的超 200 Tb/s 实时传输研究成果 [EB/OL]. (2024-03-11)[2026-05-29]. <https://www.c114.com.cn/news/118/a1263271.html>.
- [17] 中国电信官网. 中国电信实现 800G/1.2T 空芯光纤超长距无中继传输突破 [EB/OL]. (2025-10-30)[2026-05-29]. <http://www.chinatelecom.com.cn/ct/news/gdxw/162285.html>.
- [18] Wei Xuhao, Shi Bo, Richardson D J, et al. Distributed characterization of low-loss hollow core fibers using EDFA-assisted low-cost OTDR instrument[C/OL]// 2023 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). Piscataway: IEEE, 2023[2026-05-29]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10117143>. DOI:10.1364/OFC.2023.W1C.4.

【作者简介】

王传瑞 (1981—), 男, 江苏徐州人, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向: 骨干光缆网规划咨询、光纤光缆技术。

(收稿日期: 2025-11-05 修回日期: 2026-06-09)

(上接第 85 页)

- [8] 董佳, 齐博, 马昌喜, 等. 基于组合算法的易腐货物多式联运路径优化 [J]. 兰州交通大学学报, 2022, 41(1): 40-51.
- [9] 李孟良, 王喜富, 孙全欣, 等. 基于鲁棒优化的应急物资多式联运调配策略研究 [J]. 铁道学报, 2017, 39(7): 1-9.
- [10] 邓明君, 代玉珍, 李响. 需求不确定下低碳多式联运路径鲁棒优化 [J]. 工业工程, 2023, 26(4): 104-113.
- [11] 张旭, 袁旭梅, 降亚迪. 需求与碳交易价格不确定下多式联运路径优化 [J]. 系统工程理论与实践, 2021, 41(10): 2609-2620.
- [12] 蒋琦玮, 林艺, 冯芬玲. 模糊时间下考虑碳税值变化的多式联运路径优化问题研究 [J]. 工业技术经济, 2020, 39(4): 81-88.
- [13] 杨喆, 邓立宝, 狄原竹, 等. 基于模糊需求和模糊运输时间的多式联运路径优化 [J]. 控制理论与应用, 2024, 41(6): 967-976.
- [14] 户佐安, 蔡佳, 罗涸. 混合不确定条件下多式联运路径优化 [J]. 北京交通大学学报, 2023, 47(6): 32-40.
- [15] 李珺, 杨斌, 朱小林. 混合不确定条件下绿色多式联运路径优化 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2019, 19(4): 13-19.
- [16] 万杰, 龙云飞, 陈星瀚. 基于改进烟花算法的中俄商品多式联运路径优化 [J]. 天津大学学报 (自然科学与工程技术版), 2022, 55(3): 291-298.
- [17] 陈汨梨, 赵孝进, 邓夕贵, 等. 不确定条件下的多式联运路径优化 [J]. 公路交通科技, 2021, 38(1): 143-158.
- [18] 耿娜娜, 何燕, 高海瑛, 等. 不确定条件下的物流运输路径优化研究: 以中欧班列多式联运为例 [J]. 物流工程与管理, 2021, 43(10): 112-115.

【作者简介】

林燕奎 (1973—), 男, 广东南雄人, 本科, 研究员, 研究方向: 食品安全及其信息化。

黄锦云 (1984—), 女, 广东云浮人, 本科, 工程师, 研究方向: 食品安全及其信息化。

郑文丽 (1975—), 女, 广东汕头人, 本科, 高级工程师, 研究方向: 进出口贸易便利化及信息化。

蔡伊娜 (1979—), 通信作者 (email: 1530210935@qq.com), 女, 广东汕头人, 本科, 研究员, 研究方向: 食品安全及其信息化。

(收稿日期: 2025-11-28 修回日期: 2026-06-17)