**文章编号**：1003-1421(2026)03-0042-17
**引用格式**：常祎妹，李博. 不同碳政策下考虑多重不确定的多式联运路径优化[J]. 铁道运输与经济，2026，48(3)：42-58.
CHANG Yimei，LI Bo. Optimization of Multimodal Transport Path Considering Multiple Uncertainties under Different Carbon Policies[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(3)：42-58.

# 不同碳政策下考虑多重不确定的多式联运路径优化

常祎妹，李　博

(北京物资学院 智能工程与供应链创新学院，北京　101149)

**摘　要**：针对突发补货与恶劣天气引发的需求、运输及中转时间不确定性，采用三角、梯形模糊函数表征。在碳强制、碳税、碳交易与碳补偿政策下量化碳排放成本，分别构建总成本与时间最小的多目标模型，并基于模糊机会约束规划对不确定模型进行处理。结合模型特点，引入模糊控制器，设计改进模糊自适应非支配遗传算法(FANSGA-Ⅱ)求解。案例验证表明，所提FANSGA-Ⅱ性能优越，且不同碳政策对最优路径影响显著：碳强制倾向成本最优，碳税倾向时间效率最优，碳交易则在成本、效率与减排间平衡性最佳。研究为不确定环境下低碳多式联运路径优化提供支撑，并且指出无单一最优碳政策，其中碳交易机制凭借市场化激励优势，在推动行业可持续减排方面最具潜力，可为政策制定提供参考。

**关键词**：多式联运；路径优化；多重不确定性；模糊自适应NSGA-Ⅱ；碳政策
**中图分类号**：U116.2；U2　　**文献标识码**：A　　**DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250722001

# Optimization of Multimodal Transport Path Considering Multiple Uncertainties under Different Carbon Policies

CHANG Yimei，LI Bo

(School of Smart Engineering and Supply Chain Innovation, Beijing Wuzi University, Beijing 101149, China)

**Abstract**: In response to the uncertainties in demand, transport, and transshipment time caused by emergency replenishment and severe weather, triangular and trapezoidal fuzzy functions were adopted for characterization. Under the policies of carbon mandates, carbon taxes, carbon trading, and carbon offsets, carbon emission costs were quantified, and multi-objective models aiming to minimize the total cost and time were constructed, respectively. The uncertain models were processed based on fuzzy chance-constrained programming. In light of the characteristics of the models, a fuzzy controller was introduced, and an improved fuzzy adaptive non-dominated sorting genetic algorithm (FANSGA-Ⅱ) was designed for the solution. Case verification results show that the proposed FANSGA-Ⅱ exhibits superior performance, and different carbon policies exert significant impacts on the optimal paths: Carbon mandates tend to prioritize cost optimization; carbon taxes favor time efficiency optimization, while carbon trading achieves the best balance among cost, efficiency, and emission reduction. This study provides support for low-carbon multimodal transport path optimization under uncertain environments and indicates that there is no single optimal carbon policy. Among these policies, the carbon trading mechanism, by virtue of its market-oriented incentive advantages, holds

**收稿日期**：2025-07-22
**基金项目**：国家自然科学基金项目(52202394)

the greatest potential in promoting sustainable emission reduction in the industry and can offer references for policy formulation.

**Keywords:** Multimodal Transport; Path Optimization; Multiple Uncertainties; Fuzzy Adaptive NSGA-Ⅱ; Carbon Policy

## 0　引言

在全球贸易与供应链网络日趋复杂的背景下，多式联运通过有效整合海、陆、空等运输方式的比较优势，已成为提升物流效率、优化资源配置及降低成本的关键途径，对保障经济社会的可持续发展具有核心作用[1]。然而，运输部门显著的碳足迹是全球温室气体排放的主要构成部分，给全球气候变化带来了严峻挑战[2]。为应对此问题，世界各国相继设定了“碳达峰”与“碳中和”的战略目标，并推行了包括碳税、排放交易机制在内的一系列政策工具，旨在引导和规制运输行业的低碳化转型[3]。这些政策的实施，使得运输企业在进行路径决策时，除了传统的成本和效率因素外，需将碳排放作为一个核心考量因素。而从这些政策工具的具体运作模式与实施逻辑进行划分，目前全球范围内主流的碳减排政策工具可大致分为2类：一类是以碳强制和碳税为代表的政府强制性手段，通过设定排放上限或直接征税来抑制排放行为；另一类是以碳交易和碳补偿为代表的市场化激励机制，通过构建碳市场或允许购买减排量来赋予企业更大的履约灵活性。因此，研究碳政策下的低碳多式联运路径优化问题，对于推动行业绿色发展、响应国家“双碳”战略具有迫切的现实需求和重要的理论价值。

目前学者们对多式联运问题进行了诸多研究，在低碳多式联运路径优化方面，早期研究多将碳排放作为约束条件。例如，Bauer等[4]量化了不同运输方式的碳排放差异，并将其作为路径选择的约束。Janic[5]则首次将碳排放的外部成本纳入多式联运的总成本模型中。随着研究的深入，学者们开始将碳排放作为优化目标之一。刘杰等[6]和邓红星等[7]均构建了以运输总成本和碳排放总量最小为目标的多目标规划模型。孟建军等[8]和常祎妹等[9]则进一步结合客户满意度，研究了低碳冷链多式联运路径优化问题。在碳减排政策对路径选择影响的研究中，学者们重点关注碳税与碳交易机制。在碳税方面，Wang等[10]和闫全伟[11]的研究均表明，合理的碳税机制能有效引导企业转向铁路等低碳运输方式。康禄[12]和Chen等[13]的研究也得出了相似结论，即碳税征收能显著降低公路运输比例。在碳交易方面，段力伟等[14]和程兴群等[15]的研究证实，碳交易机制能够有效引导货运企业选择低碳联运方式，从而实现减排目标。Li等[16]则考虑了碳交易价格的随机性，构建了鲁棒随机优化模型。更有部分学者对多种碳政策进行了对比研究，如吴鹏等[17]探讨了碳强制、碳税及碳交易政策对运输路径的综合影响；张旭等[18]和Zhang等[19]则同时考虑了4种碳政策，分析了不同政策组合的适用性与有效性。此外，谯熙康等[20]从组态视角出发，运用PEST框架进一步揭示了政策环境与经济、社会、技术因素的协同匹配对低碳物流效率提升的驱动路径。

在不确定性研究方面，学者们已认识到需求和时间等因素波动对决策的干扰。针对需求不确定性，Fazayeli等[21]采用模糊数学模型处理模糊需求；张旭等[22]和苏航等[23]分别采用随机模拟和三角模糊数来刻画需求的波动性。针对时间不确定性，Liu等[24]采用box不确定集来描述运输时间的不确定性；周金龙等[25]和辜勇等[26]则分别使用梯形模糊数和正态分布来刻画运输和中转时间的随机性。此外，考虑多重不确定性因素的混合不确定性研究逐渐成为热点。张敏等[27]采用梯形模糊数同时表示需求和时间窗的不确定性。徐国权等[28]使用三角模糊数处理时间不确定性，并结合鲁棒优化情景法处理货运量波动。张旭等[29]则构建了混合鲁棒随机优化模型，以应对需求和碳交易价格的双重不确定性。

综上，尽管已有研究在低碳优化与不确定性分析方面分别取得进展，但多数研究或仅聚焦于低碳确定性模型，或仅分析不确定性场景而忽略碳因素，未能将二者有效结合，针对碳约束与不确定性耦合关系的研究仍较为匮乏。基于此，提出一个综合性分析框架。该框架因同时涵盖多重不确定性因素与多目标优化需求，其数学建模本质上属于NP难问题，导致传统精确算法难以在合理时间内实现有效求解。因此，研究贡献体现在2个层面：在模

型层面，将4种主流碳政策与3种关键运营不确定性因素(运输时间、中转时间、市场需求)进行系统性整合，通过建立二者间的关联分析逻辑，明晰政策与风险交互作用下的路径选择方式，进一步丰富现有低碳运输路径优化的相关研究；在算法层面，针对上述复杂模型设计改进模糊自适应非支配排序遗传算法(FANSGA-Ⅱ)，通过动态调整关键参数以提升求解效率与解集质量，为同类NP难问题的高效求解提供新的技术路径。本研究旨在通过“模型-算法”的协同创新，为政策制定者和企业管理者提供更贴近现实场景的决策支持。

## 1　问题描述与模型构建

### 1.1　问题描述

在多式联运过程中，由于市场供需不平衡以及天气和交通状况等因素的影响，常导致运输时效与需求呈现出显著的随机性与不确定特征。鉴于多式联运是实现交通领域低碳转型的核心手段，本研究聚焦于多重不确定性环境下的低碳路径优化问题。具体而言，所定义的“多重不确定性”特指以下3个核心运营要素：①由市场供需波动引发的“需求不确定性”；②由交通拥堵、天气变化等因素导致的“运输时间不确定性”；③在不同运输方式衔接过程中产生的“中转时间不确定性”。在明确上述不确定性要素的基础上，以公路、铁路、水路构成的多式联运网络为研究背景，分别构建碳强制、碳税、碳交易及碳补偿政策下的不同模型，旨在寻求一条能够协同最小化运输时间、运输成本及碳排放成本的最优路径，从而达成经济效益与环境效益的综合平衡。多式联运网络示意图如图1所示。

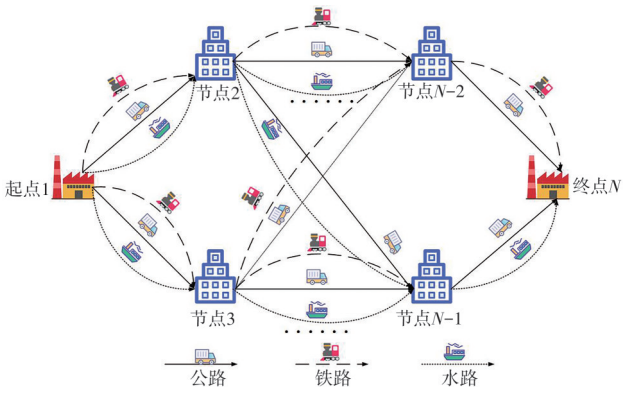



**图1　多式联运网络示意图**

Fig.1　Multimodal transport network diagram

### 1.2　模型假设

为便于构建多式联运路径优化模型，提出以下5条假设。

（1）运输的基本货物单元在运输过程中不可进行拆分。

（2）2个中转节点之间最多选择一种运输方式。

（3）每个中转节点最多只能进行一次方式转换。

（4）每个运输路段和中转节点都要考虑运力限制。

（5）不考虑天气条件、设备故障或货物损坏等外部因素。

### 1.3　符号说明

模型参数及变量说明如表1所示。

**表1　模型参数及变量说明**

Tab.1　Model parameters and variables

| 类别 | 符号 | 说明 |
|---|---|---|
| 集合 | $N$ | 运输网络节点集合，$\forall i, j \in N$，其中$i$，$j$属于运输网络的节点索引 |
| | $M$ | 运输方式集合，$m$，$n \in M$，其中$m$，$n$属于运输方式的索引 |
| 参数 | $O$ | 运输起点 |
| | $D$ | 运输终点 |
| | $c_{i,j}^{m}$ | 运输方式$m$由节点$i$到节点$j$的单位运输成本 |
| | $c_{i}^{m,n}$ | 在节点$i$处运输方式$m$转化为$n$的中转成本 |
| | $d_{i,j}^{m}$ | 运输方式$m$由节点$i$到节点$j$的运输距离 |
| | $\tilde{q}$ | 模糊需求 |
| | $Q_{i,j}^{m}$ | 从节点$i$至节点$j$采取运输方式$m$的最大运输能力 |
| | $Q_{i}^{m,n}$ | 在节点$i$处运输方式由$m$转换为$n$的最大中转能力 |
| | $v_{i,j}^{m}$ | 运输方式$m$由节点$i$到节点$j$的运输速度 |
| | $\tilde{t}_{i,j}^{m}$ | 运输方式$m$由节点$i$到节点$j$的模糊运输时间 |
| | $\tilde{t}_{i}^{m,n}$ | 在节点$i$处运输方式$m$转换为$n$的模糊中转时间 |
| | $e_{i,j}^{m}$ | 运输方式$m$由节点$i$到节点$j$的单位碳排放量 |
| | $e_{i}^{m,n}$ | 在节点$i$处运输方式$m$转换为$n$的单位碳排放量 |
| | $E$ | 运输过程产生的碳排放总量 |
| | $\gamma$ | 碳税政策下的碳税率 |
| | $c_t$ | 碳交易政策下的单位交易价格 |
| | $c_o$ | 碳补偿政策下的单位补偿价格 |
| | $U_m$ | 碳强制政策下的碳排放上限 |
| | $U_t$ | 碳交易政策下的碳排放配额 |
| | $U_o$ | 碳补偿政策下的碳排放配额 |
| 决策变量 | $x_{i,j}^{m}$ | 若节点$i$到节点$j$采用运输方式$m$，$x_{i,j}^{m}=1$，否则$x_{i,j}^{m}=0$ |
| | $y_{i}^{m,n}$ | 若在节点$i$处，由运输方式$m$转换为$n$，$y_{i}^{m,n}=1$，否则$y_{i}^{m,n}=0$ |

### 1.4　模型构建

#### 1.4.1　不确定需求分析

在多式联运系统中，货物需求量会受到上下游市场波动、季节性因素、客户订单变动等影响。然

而，相较于运输时间，货物需求量的波动幅度相对集中且波动剧烈性稍弱，因此，采用基于模糊集理论的三角模糊函数$\tilde{q}=(q_1,\ q_2,\ q_3)$来对需求量进行刻画，其中$q_1$，$q_2$，$q_3$分别为三角模糊需求量的最悲观值、最可能值和最乐观值。三角形模糊数隶属度函数如图2所示，其中隶属度函数$u_{\tilde{q}}(q)$如式(1)所示。

$$\mu_{\tilde{q}}(q)=\begin{cases}\dfrac{q-q_1}{q_2-q_1} & q_1\leqslant q<q_2\\ 1 & q=q_2\\ \dfrac{q_3-q}{q_3-q_2} & q_2<q\leqslant q_3\\ 0 & \text{其他}\end{cases}\tag{1}$$

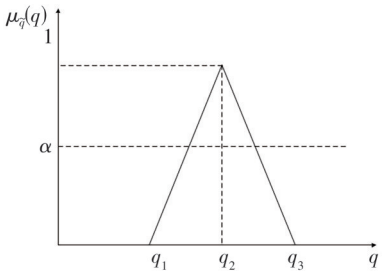



**图2　三角形模糊数隶属度函数**

Fig.2　Triangular fuzzy number membership function

同样地，为了处理模糊需求所带来的不确定性，采用模糊可信度函数将模糊需求进行清晰化处理。其中，需求的模糊可信度函数如式(2)所示。

$$\mathrm{C}_r(q\geqslant\tilde{q})=\begin{cases}0 & q\leqslant q_1\\ \dfrac{q-q_1}{2(q_2-q_1)} & q_1<q\leqslant q_2\\ \dfrac{q_3-q}{2(q_3-q_2)} & q_2<q<q_3\\ 1 & q\geqslant q_3\end{cases}\tag{2}$$

为了将上述包含模糊变量的机会约束转化为其确定性等价形式，基于Liu与Iwamura等[30]提出的可信度测度理论，根据该理论，对于给定的需求置信水平$\alpha_1$，机会约束$\mathrm{C}_r(q\geqslant\tilde{q})\geqslant\alpha_1$在区间$q_1\leqslant q\leqslant q_2$内可以等价转化为以下确定性约束$\tilde{q}=(1-\alpha_1)q_1+\alpha_1q_2$，其中$\alpha_1\in(0,\ 1)$。

### 1.4.2　不确定时间分析

在多式联运过程中，往往由于天气变化、交通拥堵等问题影响运输的效率，进而导致运输时间与中转时间的不确定性，而目前在处理不确定性问题往往使用三角模糊函数与梯形模糊函数，但由于时间的波动性更大，梯形模糊函数可以更好地模拟其状态。因此，将不确定性时间使用梯形模糊数隶属度函数表示为$\tilde{t}=(t_1,\ t_2,\ t_3,\ t_4)$，梯形模糊数隶属度函数如图3所示，其中$t_1$，$t_4$分别为最乐观和最悲观的时间，而区间$[t_2,\ t_3]$则表示最有可能的时间范围。通过借鉴历史数据以及经验，可以获得运输时间与中转时间的波动范围。

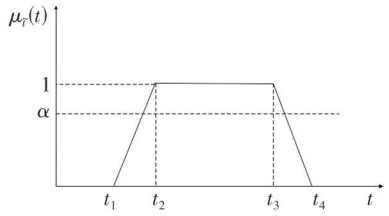



**图3　梯形模糊数隶属度函数**

Fig.3　Trapezoidal fuzzy number membership function

则模糊时间的隶属函数$u_{\tilde{t}}(t)$如式(3)所示。

$$\mu_{\tilde{t}}(t)=\begin{cases}0 & t\notin[t_1,\ t_4]\\ \dfrac{t-t_1}{t_2-t_1} & t\in[t_1,\ t_2]\\ 1 & t\in[t_2,\ t_3]\\ \dfrac{t_4-t}{t_4-t_3} & t\in[t_3,\ t_4]\end{cases}\tag{3}$$

为了处理模糊时间，采用模糊可信度函数将模糊时间清晰化，则时间的模糊可信度函数如式(4)所示。

$$C_r(t\geqslant\tilde{t})=\begin{cases}1 & t\geqslant t_4\\ \dfrac{t-2t_3+t_4}{2(t_4-t_3)} & t_3\leqslant t\leqslant t_4\\ \dfrac{1}{2} & t_2\leqslant t\leqslant t_3\\ \dfrac{t-t_1}{2(t_2-t_1)} & t_1\leqslant t\leqslant t_2\\ 0 & t\leqslant t_1\end{cases}\tag{4}$$

根据式(4)以及$C_r(t\geqslant\tilde{t})\geqslant\alpha$可知，对于给定的时间置信水平$\alpha_2$，当$\alpha_2\in[0,\ 0.5]$时，$t\geqslant(1-2\alpha_2)t_1+2\alpha_2t_2$。而当$\alpha_2\in[0.5,\ 1]$时，$t\geqslant2(1-\alpha_2)t_3+(2\alpha_2-1)t_4$，则模型中目标函数与约束条件的不确定变量$\tilde{t}$可以不同的置信度下转换为式(5)。

$$\tilde{t}=\begin{cases}(1-2\alpha_2)t_1+2\alpha_2t_2 & \alpha_2\in[0,\ 0.5]\\ 2(1-\alpha_2)t_3+(2\alpha_2-1)t_4 & \alpha_2\in[0.5,\ 1]\end{cases}\tag{5}$$

### 1.4.3　基础模型构建

构建多式联运路径优化基础模型，旨在实现最小化总运输成本与总运输时间2个核心目标，是后续构建碳政策下模型的基础。基础模型的目标函数与约束条件如下。

$$\min Z_1 = \sum_{i\in N}\sum_{j\in N}\sum_{m\in M}\tilde{q}\,c^m_{i,j}d^m_{i,j}x^m_{i,j} + \sum_{i\in N}\sum_{m\in M}\sum_{n\in M}\tilde{q}\,c^{m,n}_i y^{m,n}_i \tag{6}$$

$$\min Z_2 = \sum_{i\in N}\sum_{j\in N}\sum_{m\in M}\tilde{t}^m_{i,j}x^m_{i,j} + \sum_{i\in N}\sum_{m\in M}\sum_{n\in M}\tilde{t}^{m,n}_i y^{m,n}_i \tag{7}$$

$$\sum_{i\in N}\sum_{k\in M}x^k_{ij} - \sum_{h\in N}\sum_{k\in M}x^k_{jh} = \begin{cases}1 & j = D\\ 0 & \forall j\in M\backslash\{O,\ D\}\\ -1 & j = O\end{cases} \tag{8}$$

$$\sum_{m=1}^{M}x^m_{i,j} \leqslant 1 \qquad \forall i,\ j\in N \tag{9}$$

$$\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{M}y^{m,n}_i \leqslant 1 \qquad \forall i\in M\backslash\{O,\ D\} \tag{10}$$

$$\sum_{g\in N}x^m_{g,i} + \sum_{j\in N}x^n_{i,j} \geqslant 2y^{m,n}_i \qquad \forall i\in M\backslash\{O,\ D\},\ m,\ n\in M \tag{11}$$

$$\tilde{q}x^m_{i,j} \leqslant Q^m_{i,j} \tag{12}$$

$$\tilde{q}y^{m,n}_i \leqslant Q^{m,n}_i \tag{13}$$

$$t_j = t_i + \sum_{i\in N}\sum_{m=1}^{M}t^m_{i,j}x^m_{i,j} + \sum_{i\in N}\sum_{m=1}^{M}t^{m,n}_i y^{m,n}_i \qquad \forall i\in V/O \tag{14}$$

$$x^m_{i,j} = \{0,\ 1\} \qquad \forall i\in M\backslash\{D\},\ \forall j\in M\backslash\{O,\ D\},\ \forall m\in M \tag{15}$$

$$y^{m,n}_i = \{0,\ 1\} \qquad \forall i\in N,\ \forall m,\ n\in M \tag{16}$$

式(6)表示目标函数的总成本最小，包括运输成本与中转成本。式(7)表示目标函数的总时间最小，包括运输时间与中转时间。约束(8)表示节点流量平衡。约束(9)表示任意2个节点之间最多只有一种运输方式。约束(10)表示任意节点$i$只能中转一次。约束(11)表示运输节点的连续性。约束(12)表示2个节点之间的运量不超过节点的最大运输能力。约束(13)表示每个节点的运量不超过该节点的最大容量。约束(14)表示相邻节点时间的连续性。约束(15)和(16)表示0-1决策变量。

### 1.4.4　碳政策下模型构建

基于上述基础模型，进一步考虑碳强制、碳税、碳交易及碳补偿4种主流碳政策，并构建不同碳政策下多式联运路径优化模型，分别标记为模型M-Cap、模型M-Tax、模型M-Trade和模型M-Offset。由于在考虑碳相关政策时，碳排放量作为约束条件或目标函数的重要组成部分，因此，采用式(17)计算碳排放量，以便在后续模型中根据不同碳政策进行约束或成本化处理，具体描述如下。

$$E = \sum_{i\in N}\sum_{j\in N}\sum_{m\in M}\tilde{q}\,e^m_{i,j}d^m_{i,j}x^m_{i,j} + \sum_{i\in N}\sum_{m\in M}\sum_{n\in M}\tilde{q}\,e^{m,n}_i y^{m,n}_i \tag{17}$$

式(17)表示运输与中转过程中的碳排放总量。

（1）模型M-Cap—碳强制政策下的模型。强制性碳排放政策是指在多式联运过程中，企业的碳排放总量需受到政府设定的碳排放上限约束。因此，其在模型中的表现就是在基础模型上加一个约束条件即碳排放总量小于其碳排放配额的上限，具体模型如下。

$$E \leqslant U_m \tag{18}$$

在引入上述碳排放约束的基础上，同时保持目标函数(6)—(7)与约束(8)—(16)不变。其中约束(18)表示碳排放总量必须小于等于政府规定的碳排放上限。

（2）模型M-Tax—碳税政策下的模型。碳税政策是指政府对运输过程中产生的碳排放量按单位征收碳税，企业需要为其碳排放支付相应费用，从而激励企业减少碳排放。在模型中，碳税的体现是在基础模型的成本目标函数中增加一项碳税成本，具体表现为碳排放量与碳税税率的乘积，同时保留目标函数$Z_2$与基础模型中的其他约束条件，具体模型如下。

$$\min Z = Z_1 + \gamma E \tag{19}$$

在引入上述目标函数的基础上，同时保持目标函数(7)与约束(8)—(16)不变。其中目标函数(19)表示碳税政策下的最小总成本，其中，$Z_1$为运输成本，$\gamma E$为碳税成本，$\gamma$为碳税税率，$E$为实际运输碳排放量。

（3）模型M-Trade—碳交易政策下的模型。碳交易政策是指企业持有一定数量的碳排放配额，可以根据实际运输需要对外买卖，在保证运输成功的前提下最大限度地降低成本。在模型中，碳交易体现为引入碳配额交易成本项，以及相关约束条件，同时保留目标函数$Z_2$与基础模型中的其他约束条件，具体模型如下。

$$\min Z = Z_1 + c_t Q_t \tag{20}$$

$$Q_t + U_t = E \tag{21}$$

$$Q_t \in \mathbb{R} \tag{22}$$

在引入上述目标函数与约束的基础上，同时保持目标函数(7)与约束(8)—(16)不变。其中目标函数(20)为碳交易政策下的最小总成本，$Z_1$为运输成本，$c_tQ_t$为碳配额交易成本，$c_t$为碳配额交易单价，$Q_t$为碳配额交易量。约束(21)表示实际运输碳排放量由碳配额与碳交易量组成。约束(22)表示购买的碳交易量为实数。

（4）模型M-Offset—碳补偿政策下的模型。碳补偿政策是指企业通过投资碳补偿项目以抵消运输过程中产生的碳排放，实现碳中和。在模型中，碳补偿体现为引入碳补偿成本项，以及相关约束条件，同时保留目标函数$Z_2$与基础模型中的其他约束条件，具体模型如下。

$$\min Z = Z_1 + c_oQ_o \tag{23}$$

$$Q_o = \begin{cases} E - U_o & U_o \leqslant E \\ 0 & U_o > E \end{cases} \tag{24}$$

在引入上述目标函数与约束的基础上，同时保持目标函数(7)与约束(8)—(16)不变。其中目标函数(23)为碳补偿政策下的最小总成本，$c_oQ_o$为碳补偿成本，$c_o$为碳补偿单价，$Q_o$为碳补偿量。约束(24)为碳补偿量$Q_o$的取值规则：当企业运输过程中产生的碳排放量$E$大于等于配额$U_o$时，需通过投资碳补偿项目补偿碳排放超额部分$E-U_o$；当碳排放量$E$小于配额时，无需额外补偿，碳补偿量为0。

#### 1.4.5　碳政策下模型的清晰化处理

为处理上述碳政策模型中存在的时间与需求不确定性问题，借鉴Liu与Iwamura等学者提出的机会约束理论框架，利用机会约束机制将模糊约束转化为在特定置信水平下可接受的确定性等价约束，则模糊机会约束模型如式(25)所示。

$$\min\left[\bar{f}_1,\ \bar{f}_2,\ \cdots,\ \bar{f}_k\right]$$
$$\text{s.t.}\begin{cases} Pos\left\{f_i(\boldsymbol{x},\ \boldsymbol{\xi}) \leqslant \bar{f}_i\right\} \geqslant \alpha & i = 1,\ 2,\ \cdots,\ k \\ Pos\left\{g_j(\boldsymbol{x},\ \boldsymbol{\xi}) \leqslant 0\right\} \geqslant \beta & j = 1,\ 2,\ \cdots,\ p \end{cases} \tag{25}$$

式中：$\boldsymbol{x}$为决策向量；$\boldsymbol{\xi}$为模糊向量；$Pos\{\cdot\}$为模糊事件成立的可能性；$f_i(\boldsymbol{x},\ \boldsymbol{\xi})$为目标函数；$g_i(\boldsymbol{x},\ \boldsymbol{\xi})$为该模糊规划的所有模糊约束条件；$\alpha$，$\beta$分别为目标函数和约束条件的置信水平。

根据式(25)以及式(5)，以碳税政策下的模型为例，在给定置信度$\alpha$与$\beta$下，碳税模型最终清晰化如式(26)所示。

$$\min\left[\bar{f}_1,\ \bar{f}_2\right]$$
$$\text{s.t.}\begin{cases} \bar{f}_1 \geqslant \sum\limits_{i\in N}\sum\limits_{j\in N}\sum\limits_{m\in M}\left[(1-\alpha_1)q_1+\alpha_1q_2\right]c_{i,\ j}^{m}d_{i,\ j}^{m}x_{i,\ j}^{m} + \\ \quad \sum\limits_{i\in N}\sum\limits_{m\in M}\sum\limits_{n\in M}\left[(1-\alpha_1)q_1+\alpha_1q_2\right]c_{i}^{m,\ n}y_{i}^{m,\ n} + \\ \quad \gamma\left\{\begin{array}{l}\sum\limits_{i\in N}\sum\limits_{j\in N}\sum\limits_{m\in M}\left[(1-\alpha_1)q_1+\alpha_1q_2\right]e_{i,\ j}^{m}d_{i,\ j}^{m}x_{i,\ j}^{m} + \\ \quad \sum\limits_{i\in N}\sum\limits_{m\in M}\sum\limits_{n\in M}\left[(1-\alpha_1)q_1+\alpha_1q_2\right]e_{i}^{m,\ n}y_{i}^{m,\ n}\end{array}\right\} \\ \bar{f}_2 \geqslant \begin{cases} \sum\limits_{i\in N}\sum\limits_{j\in N}\sum\limits_{m\in M}\left[(1-2\alpha_2)t_{i,\ j}^{m1}+2\alpha_2t_{i,\ j}^{m2}\right]x_{i,\ j}^{m} + \\ \quad \sum\limits_{i\in N}\sum\limits_{m\in M}\sum\limits_{n\in M}\left[(1-2\alpha_2)t_{i1}^{m,\ n}+2\alpha_2t_{i2}^{m,\ n}\right]y_{i}^{m,\ n} \\ \quad \alpha_2 \in (0,\ 0.5) \\ \sum\limits_{i\in N}\sum\limits_{j\in N}\sum\limits_{m\in M}\left[2(1-\alpha_2)t_{i,\ j}^{m3}+(2\alpha_2-1)t_{i,\ j}^{m4}\right]x_{i,\ j}^{m} + \\ \quad \sum\limits_{i\in N}\sum\limits_{m\in M}\sum\limits_{n\in M}\left[2(1-\alpha_2)t_{i3}^{m,\ n}+(2\alpha_2-1)t_{i4}^{m,\ n}\right] \\ \quad y_{i}^{m,\ n}\ \alpha_2 \in (0.5,\ 1) \end{cases} \\ Q_{i,\ j}^{m} \geqslant \left[(1-\beta_1)q_1+\beta_1q_2\right]x_{i,\ j}^{m} \\ Q_{i}^{m,\ n} \geqslant \left[(1-\beta_2)q_1+\beta_2q_2\right]y_{i}^{m,\ n} \\ \alpha_1,\ \alpha_2,\ \beta_1,\ \beta_2 \in [0,\ 1] \end{cases} \tag{26}$$

同时约束(8)—(11)与(15)—(17)保持不变。类似地，其他碳政策模型可以基于上述方法进行清晰化处理。

## 2　算法设计

不同碳政策下考虑多重不确定性的多式联运路径优化问题本质上是一个多目标优化问题，具有典型的NP难特性[31]。因而采用改进的非支配排序遗传算法(NSGA-Ⅱ)进行求解。该算法主体采用经典的NSGA-Ⅱ框架，通过快速非支配排序与拥挤度锦标赛选择机制来引导种群向Pareto最优前沿收敛。然而，传统NSGA-Ⅱ采用固定的交叉和变异概率，易导致算法过早收敛。为弥补这一不足，研究的核心改进在于：通过引入模糊逻辑控制器，根据种群的拥挤程度和当前的进化代数，对交叉与变异概率进行动态自适应调整。该机制旨在实现算法全局探索能力与局部收敛速度的动态平衡，从而构成了模糊自适应非支配排序遗传算法(FANSGA-Ⅱ)，

FANSGA-Ⅱ算法流程图如图4所示。

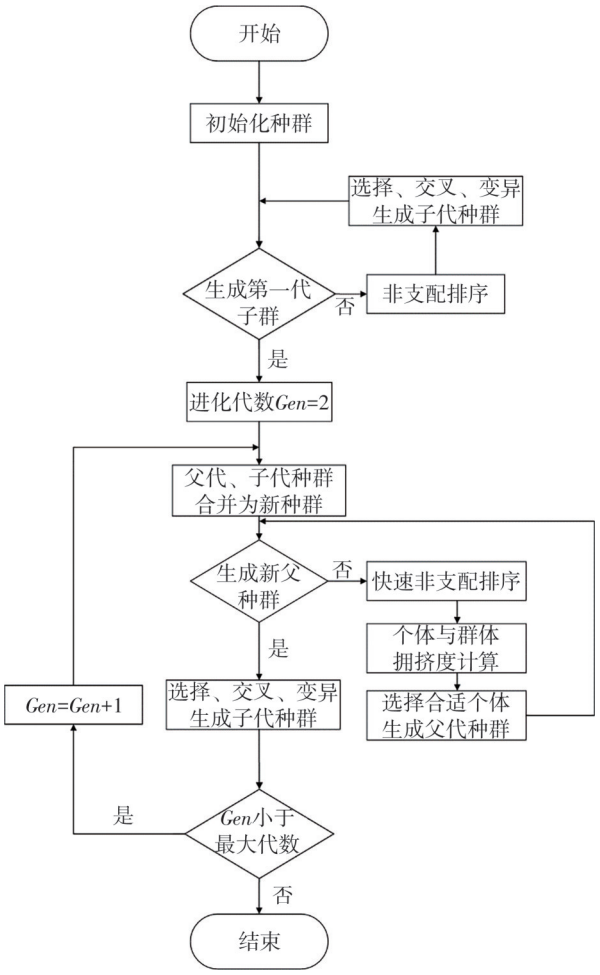



**图4　FANSGA-Ⅱ算法流程图**

Fig.4　Flowchart of FANSGA-Ⅱ algorithm

## 2.1　染色体编码与种群初始化

考虑到多式联运路径问题需同时确定节点序列和运输方式，本研究设计了一种两段式编码方案来表示染色体。每个染色体由2部分构成：第1部分为长度为$N$的路径节点序列，其首位和末位分别固定为起点和终点，中间则为其他途经节点；第2部分是长度为$N$-1的运输方式序列，其中数字1，2，3分别代表公路、铁路和水路运输。因此，每个染色体的总长度为2$N$-1。染色体编码如图5所示，清晰展示了当$n$=15时的一个编码实例。在种群初始化阶段，为确保解的多样性，采用随机生成策略。首先，根据给定的起点和终点确定第1段编码的首末位，并随机填充其余节点。随后，为第2段编码随机指派路径各区间所对应的运输方式。重复此过程$N$次，即可生成一个包含$N$个不同个体的、具有多样性且完全可行的初始化种群。

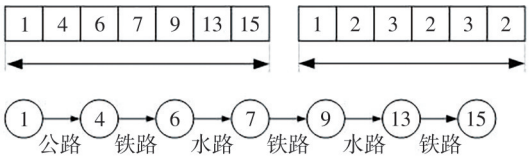



**图5　染色体编码**

Fig.5　Chromosome coding

## 2.2　快速非支配排序

首先，对种群中的每个个体进行解码，以获得其路径和运输方式组合，并计算各个目标函数上的适应度。然后，通过个体间的两两比较进行非支配排序：将不被任何其他个体支配的解识别为第1层Pareto前沿。在移除已分级的个体后，对剩余种群重复此筛选过程，依次确定后续的Pareto前沿，直至所有个体完成分级。

## 2.3　遗传操作

（1）选择操作。该算法采用一种拥挤锦标赛选择策略，其计算公式如式(27)所示。

$$d_i = \sum_{j=1}^{m} \frac{f_j^{(i+1)} - f_j^{(i-1)}}{f_j^{\max} - f_j^{\min}} \tag{27}$$

式中：$d_i$为个体$i$在所有目标函数上的拥挤度距离之和；$m$为目标函数的总数量；$f_j^{\max}$与$f_j^{\min}$分别为当前层级第$j$个目标函数的最大值与最小值；$f_j^{(i+1)}$与$f_j^{(i-1)}$为个体$i$的在目标分量$j$上的前后相邻值。

（2）自适应交叉与变异概率。标准NSGA-Ⅱ算法的一个主要局限在于其交叉与变异概率是静态预设的，这种设置时常导致算法收敛性不足，易陷入局部最优而无法获得全局最优解集。因此，设计了一个模糊逻辑控制器，模糊控制器的逻辑图如图6所示，该控制器以种群拥挤度和进化代数为输入，通过模糊推理机制动态地调整交叉与变异概率，从而在算法的全局探索能力与局部收敛速度之间取得动态平衡。种群的平均拥挤度如式(28)所示。

$$F_c = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} d_i \tag{28}$$

式中：$F_c$为当前代的群体平均拥挤度；$N$为种群中的个体总数。

同时，种群拥挤度如式(29)所示。

$$F_c' = \frac{F_c - F_{\min}}{F_{\max} - F_{\min}} \tag{29}$$

式中：$F_{\min}$为截至到第$t$代出现过的最小值；$F_{\max}$为

截至到第$t$代出现过的最大值。

进化迭代比例如式(30)所示。

$$r_t = \frac{t}{T} \tag{30}$$

式中：$r_t$为第$t$代的进化迭代比例；$t$为当前代数；$T$为种群总迭代数。

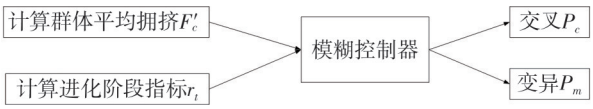



**图6　模糊控制器的逻辑图**

Fig.6　Logic diagram of fuzzy controller

为便于表述模糊规则，参照文献[32]，定义群体拥挤度、迭代比例交叉概率和变异概率的模糊取值均为大、中和小3种，定义当归一化后的群体拥挤度相同时，为了方便计算，假设$F_c'$，$r_t$，$P_c$和$P_m$的隶属度函数均为三角形，隶属函数公式如式(31)所示。

$$f(x)=\begin{cases}0 & x \leqslant a \\ \dfrac{x-a}{b-a} & a < x \leqslant b \\ 1 & x = b \\ \dfrac{c-x}{c-b} & b < x \leqslant c \\ 0 & x > c\end{cases} \tag{31}$$

式中：参数$a$为隶属度零点即隶属度从0开始上升的临界点；$b$为核心点即隶属度达到最大值1的点；参数$c$为隶属度终点即隶属度下降至0的临界点。

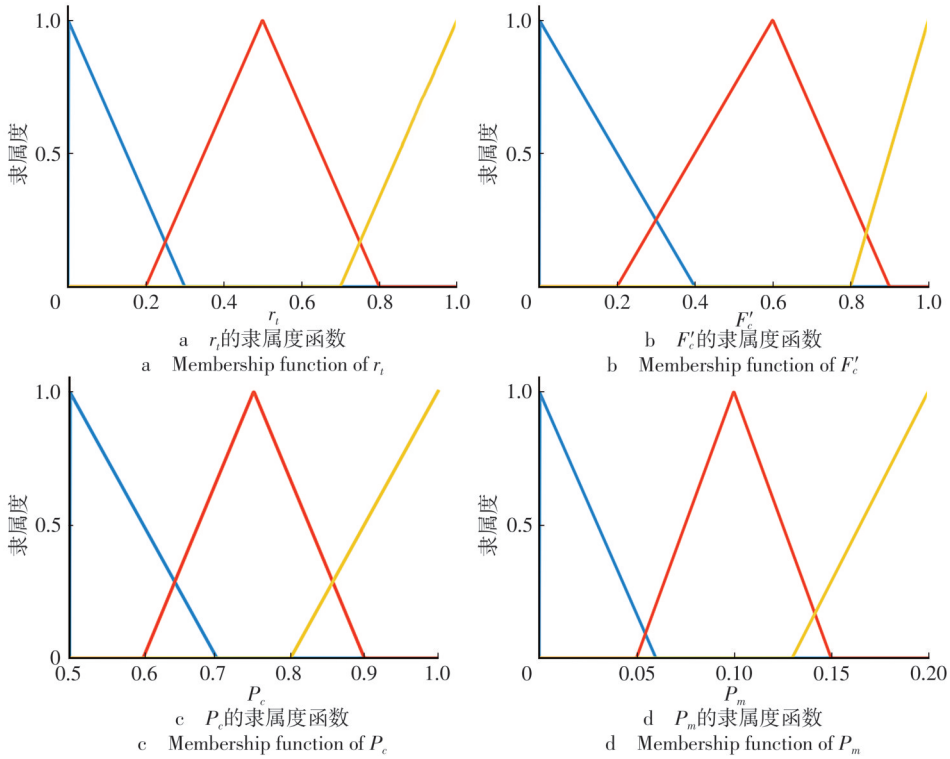
因此，群体拥挤度、迭代比例、交叉概率和变异概率的隶属度函数如图7所示。模糊规则如表2所示。

（3）交叉操作。为了尽可能避免在交叉与变异操作中产生路径不同的染色体，根据编码规则，采取混合交叉，在第1段运输路径上随机选择除起点、终点外的交叉点，交换2条父代染色体之间的片段，在第2段运输模式上采取单点交叉，染色体交叉如图8所示。

（4）变异操作。为维持种群多样性并避免陷入局部最优，设计了分段单点变异策略。该策略针对两段式编码的特性，分别对路径节点序列与运输方式序列独立进行变异操作，染色体变异如图9所示。

## 2.4　终止条件

终止准则是用于判断是否停止运行的条件，通过设定最大迭代次数，当进化代数达到最大迭代次数时算法结束，此时输出适应度值最低的解；否则，继续重复上述过程。




a　$r_t$的隶属度函数

a　Membership function of $r_t$

b　$F_c'$的隶属度函数

b　Membership function of $F_c'$

c　$P_c$的隶属度函数

c　Membership function of $P_c$

d　$P_m$的隶属度函数

d　Membership function of $P_m$

**图7　隶属度函数**

Fig.7　Membership functions

表2　模糊规则
Tab.2　Fuzzy rules

| ID | $r_t$ | $F_c'$ | $P_c$ | $P_m$ | 逻辑解释 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Low | Low | High | High | 初期低多样性：增加全局探索 |
| 2 | Low | Medium | Medium | Medium | 初期中等多样性：平衡探索 |
| 3 | Low | High | Low | High | 初期高多样性：保护解结构 |
| 4 | Medium | Low | High | High | 中期多样性下降：加强扰动 |
| 5 | Medium | Medium | Medium | Medium | 中期稳定状态：维持参数 |
| 6 | Medium | High | High | Low | 中期多样性好：强化收敛 |
| 7 | High | Low | Low | High | 后期多样性枯竭：突变避免早熟 |
| 8 | High | Medium | Medium | High | 后期中等多样性：渐进收敛 |
| 9 | High | High | High | Low | 后期多样性佳：加速Pareto前沿精炼 |

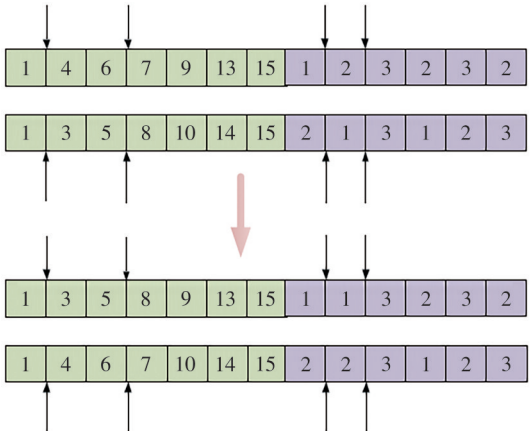



图8　染色体交叉
Fig.8　Chromosome crossover

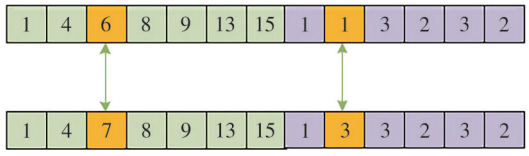



图9　染色体变异
Fig.9　Chromosome mutation

## 3　案例分析

### 3.1　基础数据

为验证所提模型与算法的有效性，以一个真实的国内多式联运网络为依托，进行案例验证。具体以某货代公司将一批货物从长春(起点1)运输至广州(终点20)为例，20个节点的多式联运网络图如图10所示，案例中的其他关键参数(如单位运输成本、碳排放系数、碳政策价格等)均参考相关文献[19, 23, 33]及行业公开数据设定。相关参数设置如下：货物质量由三角模糊数 $\tilde{q}$ = (120 t，180 t，240 t)表示；公路、铁路、水路的单位运输成本设定为0.3元/(t·km)、0.2元/(t·km)、0.1元/(t·km)[25]，对应的单位碳排放系数则为0.057 71 kg/(t·km)、0.008 20 kg/(t·km)、0.009 11 kg/(t·km)[33]。在不同碳政策情景下，碳限额设为20 t，碳交易与补偿政策下的配额为10 t，碳税税率定为10，而碳交易与补偿的价格均为7.8元/kg[19]。模型中的置信水平 $\alpha$ 与 $\beta$ 均设为0.8[23]。算法参数方面，种群规模设为100，最大迭代次数为200，基准NSGA-Ⅱ的交叉与变异概率分别为0.9和0.1。所有实验均在Windows 10环境下，通过编程软件实现，硬件配置为Intel Core i5-10700 CPU与16 GB内存。本案例旨在通过真实物流场景，为企业在路径规划中平衡经济与环境目标提供量化决策支持。

同时，各弧段间的运输距离、最大运输能力和

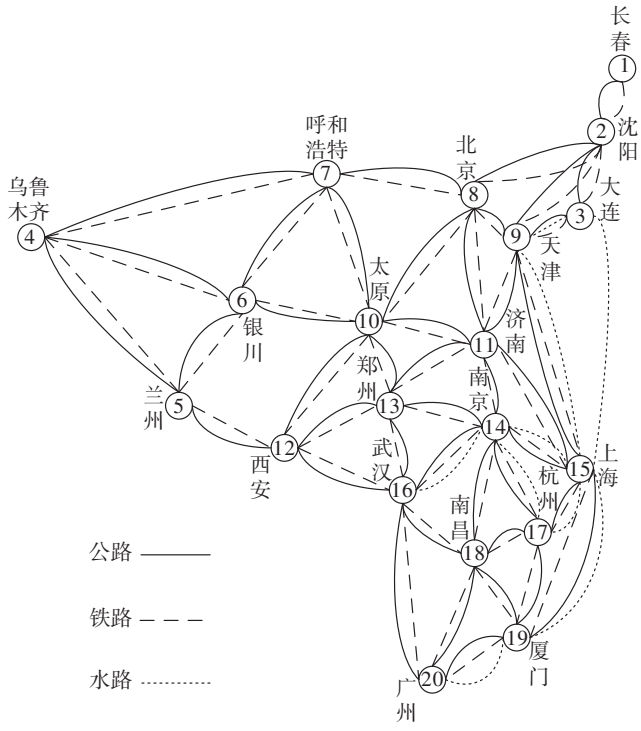



图10　20个节点的多式联运网络图
Fig.10　A multimodal transport network diagram with twenty nodes

模糊运输时间如表3所示，其中任意联通节点之间不同运输方式的运输时间以模糊形式体现[23, 25]；各中转模式的模糊中转时间、碳排放量以及单位成本如表4所示[33]；节点处的最大中转能力如表5所示[23]。上述数据均通过高德、铁路95306、SeaRates等平台收集获取。

## 3.2　可行性分析

为充分验证所构建的考虑多重不确定性的多目

**表3　各弧段间的运输距离、最大运输能力和模糊运输时间**

Tab.3　Transport distance, maximum transport capacity, and fuzzy transport time between arcs

| 弧段 | 公路运输 | | | 铁路运输 | | | 水路运输 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 距离/km | 能力/t | 时间/h | 距离/km | 能力/t | 时间/h | 距离/km | 能力/t | 时间/h |
| (1，2) | 310 | 200 | (3，4，4，5) | 305 | 200 | (4，5，5，6) | — | — | — |
| (2，3) | 380 | 190 | (4，5，5，6) | 397 | 200 | (5，6，7，8) | — | — | — |
| (2，8) | 694 | 180 | (7，8，9，10) | 741 | 220 | (9，11，13，15) | — | — | — |
| (2，9) | 680 | 200 | (7，8，9，10) | 707 | 220 | (9，11，13，15) | — | — | — |
| (3，9) | 824 | 180 | (8，10，11，12) | 929 | 180 | (12，14，17，19) | 393 | 300 | (9，11，15，17) |
| (3，15) | — | — | — | — | — | — | 1 016 | 300 | (24，29，39，44) |
| (4，5) | 1 906 | 180 | (19，23，25，29) | 1 892 | 180 | (24，29，34，39) | — | — | — |
| (4，6) | 2 036 | 220 | (20，24，27，31) | 2 008 | 220 | (25，31，36，42) | — | — | — |
| (4，7) | 2 338 | 180 | (23，28，31，35) | 3 036 | 200 | (38，47，55，63) | — | — | — |
| (5，6) | 427 | 200 | (4，5，6，6) | 468 | 200 | (6，7，8，10) | — | — | — |
| (5，12) | 656 | 140 | (7，8，9，10) | 676 | 160 | (8，10，12，14) | — | — | — |
| (6，7) | 680 | 240 | (7，8，9，10) | 676 | 240 | (8，10，12，14) | — | — | — |
| (6，10) | 702 | 140 | (7，8，9，11) | 1 316 | 140 | (16，20，24，27) | — | — | — |
| (7，8) | 483 | 140 | (5，6，6，7) | 667 | 140 | (8，10，12，14) | — | — | — |
| (7，10) | 452 | 160 | (5，5，6，7) | 640 | 160 | (8，10，12，13) | — | — | — |
| (8，9) | 137 | 200 | (1，2，2，2) | 137 | 160 | (2，2，2，3) | — | — | — |
| (8，10) | 489 | 180 | (5，6，6，7) | 514 | 200 | (6，8，9，11) | — | — | — |
| (8，11) | 405 | 200 | (4，5，5，6) | 497 | 220 | (6，8，9，10) | — | — | — |
| (9，11) | 345 | 180 | (3，4，5，5) | 360 | 240 | (5，6，6，8) | — | — | — |
| (9，15) | 1 091 | 220 | (11，13，14，16) | 1 326 | 240 | (17，20，24，28) | 1 309 | 300 | (31，37，50，57) |
| (10，11) | 521 | 160 | (5，6，7，8) | 532 | 160 | (7，8，10，11) | — | — | — |
| (10，12) | 601 | 240 | (6，7，8，9) | 651 | 140 | (8，10，12，14) | — | — | — |
| (10，13) | 436 | 240 | (4，5，6，7) | 577 | 180 | (7，9，10，12) | — | — | — |
| (11，13) | 446 | 180 | (4，5，6，7) | 666 | 180 | (8，10，12，14) | — | — | — |
| (11，14) | 618 | 200 | (6，7，8，9) | 663 | 220 | (8，10，12，14) | — | — | — |
| (11，15) | 821 | 200 | (8，10，11，12) | 966 | 220 | (12，15，17，20) | — | — | — |
| (12，13) | 483 | 220 | (5，6，6，7) | 511 | 240 | (6，8，9，11) | — | — | — |
| (12，16) | 740 | 160 | (7，9，10，11) | 1 047 | 180 | (13，16，19，22) | — | — | — |
| (13，14) | 660 | 180 | (7，8，9，10) | 695 | 200 | (9，11，13，15) | — | — | — |
| (13，16) | 509 | 180 | (5，6，7，8) | 590 | 200 | (7，9，11，12) | — | — | — |
| (14，15) | 297 | 220 | (3，4，4，4) | 303 | 240 | (4，5，5，6) | 345 | 300 | (8，10，13，15) |
| (14，16) | 533 | 160 | (5，6，7，8) | 516 | 180 | (6，8，9，11) | 686 | 300 | (16，19，26，30) |
| (14，17) | 280 | 180 | (3，3，4，4) | 429 | 180 | (5，7，8，9) | 355 | 300 | (8，10，14，15) |
| (14，18) | 588 | 180 | (6，7，8，9) | 635 | 200 | (8，10，11，13) | — | — | — |
| (15，17) | 174 | 140 | (2，2，2，3) | 201 | 180 | (3，3，4，4) | 402 | 300 | (9，11，15，17) |
| (15，19) | 1 000 | 170 | (10，12，13，15) | 1 089 | 220 | (14，17，20，23) | 1 071 | 300 | (25，30，41，46) |
| (16，18) | 346 | 180 | (3，4，5，5) | 355 | 200 | (4，5，6，7) | — | — | — |
| (16，20) | 998 | 180 | (10，12，13，15) | 1 068 | 200 | (13，16，19，22) | — | — | — |
| (17，18) | 531 | 140 | (5，6，7，8) | 525 | 180 | (7，8，9，11) | — | — | — |
| (17，19) | 872 | 170 | (9，10，11，13) | 900 | 200 | (11，14，16，19) | — | — | — |
| (18，19) | 636 | 180 | (6，8，8，10) | 719 | 160 | (9，11，13，15) | — | — | — |
| (18，20) | 777 | 180 | (8，9，10，12) | 1 022 | 180 | (13，16，18，21) | — | — | — |
| (19，20) | 636 | 170 | (6，8，8，10) | 638 | 200 | (8，10，11，13) | 679 | 300 | (16，19，26，29) |

**表4　各中转模式的模糊中转时间、碳排放量以及单位成本**

Tab.4　Parameters of transshipment modes: fuzzy time, carbon emissions, and unit cost

| 参数 | 公路—铁路 | 公路—水路 | 水路—铁路 |
|---|---|---|---|
| 模糊中转时间/h | (1.2，1.6，2，2.4) | (1.2，1.6，2，2.4) | (2.4，3.2，4，4.8) |
| 单位中转碳排放量/(kg/t) | 0.128 | 0.117 | 0.113 |
| 单位中转碳排放成本/(元/t) | 3.09 | 5.23 | 26.62 |

**表5　节点处的最大中转能力**　t

Tab.5　Maximum transshipment capacity at nodes

| 节点 | 公路—铁路 | 公路—水路 | 铁路—水路 | 节点 | 公路—铁路 | 公路—水路 | 铁路—水路 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | — | — | — | 11 | 220 | 280 | 260 |
| 2 | 220 | 240 | 220 | 12 | 200 | 300 | 260 |
| 3 | 300 | 260 | 200 | 13 | 260 | 220 | 300 |
| 4 | 260 | 220 | 300 | 14 | 260 | 220 | 280 |
| 5 | 300 | 260 | 200 | 15 | 300 | 260 | 220 |
| 6 | 220 | 280 | 260 | 16 | 280 | 220 | 200 |
| 7 | 280 | 240 | 220 | 17 | 240 | 220 | 200 |
| 8 | 240 | 200 | 280 | 18 | 220 | 200 | 300 |
| 9 | 200 | 300 | 240 | 19 | 240 | 300 | 260 |
| 10 | 200 | 300 | 240 | 20 | — | — | — |

标优化模型以及所提出的改进模糊自适应非支配排序遗传算法(FANSGA-Ⅱ)的有效性和优越性，设计了对比实验进行求解与分析。实验选取经典的NSGA-Ⅱ作为基准算法，对比FANSGA-Ⅱ，在统一的实验环境下，分别对前文构建的4种碳政策模型进行求解，不同碳政策下算法对比的帕累托前沿解如图11所示，并对结果进行深度分析。为确保对比实验的公平性和科学性，2种算法采用统一的参数配置。

由图11可知，FANSGA-Ⅱ算法所得解在前沿上的分布更均匀、更广泛，覆盖了更广阔的目标空间区域。这表明，通过引入模糊控制器动态调整交叉与变异概率，能够有效平衡算法在多目标优化过程中的探索与利用。综上，实验结果充分证实，所提出的FANSGA-Ⅱ算法在求解该复杂模型时，其综合寻优能力和解集质量均显著优于传统的NSGA-Ⅱ算法，验证了所提模型与改进算法的有效性。

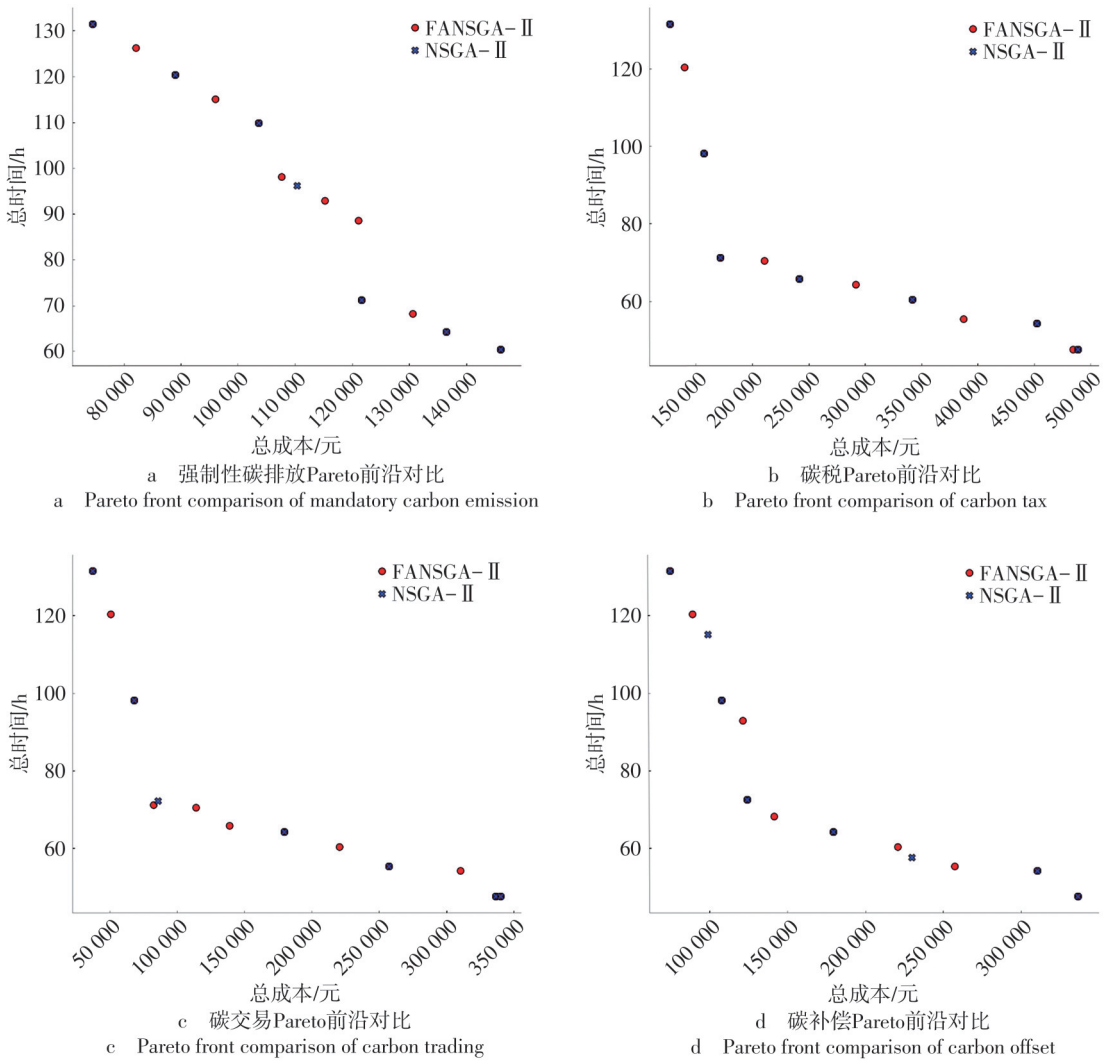
### 3.3　不同碳政策下的结果分析

基于FANSGA-Ⅱ算法的求解结果，就强制性碳排放、碳税、碳交易、碳补偿政策对多式联运路径决策的影响及其减排效果进行深入分析。对比4种模型，不同碳政策下Pareto解集特征值如表6所示。

从表6可以看出，在强制性碳排放政策下，其平均成本130 645.60元在4种政策中是最低的，而其平均时间75.53 h则是最高的。这清晰地表明，当存在固定碳排放上限时，企业会优先选择最经济的运输路径，即便这意味着需要花费更长的运输时间。与碳税政策下“在成本与效率间权衡以追求减排”不同，其减排效应明确，且对企业运营模式的冲击相对温和。

同时，碳税政策下的平均成本高达422 953.46元，远超其他3种政策，体现了其高昂的合规成本。然而，这种高成本压力也带来了最显著的时间效益，其平均运输时间为55.25 h，是4种政策中最低的。这表明，为了规避惩罚性的碳税，企业被迫彻底改变运输策略，倾向于选择碳排放系数极低但可能基础运费和中转成本更高的运输方式组合，从而在客观上实现了运输效率的提升。因此，碳税是一种效果直接、引导性强的减排工具，但其对企业造成的经济负担也最为沉重。

此外，碳交易政策的平均成本286 091.86元和平均时间56.25 h均处于次优水平，表现出良好的综合性能。它允许企业根据自身的减排成本与市场碳价进行权衡，通过购买或出售碳配额来灵活地履行减排义务。这种机制使得减排成本在全社会范围内以更经济的方式分配，既能达到接近碳税政策的时间效率，又能将企业的经济负担控制在相对合理的范围内。碳补偿政策的平均成本255 804.00元与




a　强制性碳排放Pareto前沿对比
a　Pareto front comparison of mandatory carbon emission

b　碳税Pareto前沿对比
b　Pareto front comparison of carbon tax

c　碳交易Pareto前沿对比
c　Pareto front comparison of carbon trading

d　碳补偿Pareto前沿对比
d　Pareto front comparison of carbon offset

**图11　不同碳政策下算法对比的帕累托前沿解**

Fig.11　Pareto front solutions of algorithm comparison under different carbon policies

**表6　不同碳政策下Pareto解集特征值**

Tab.6　Characteristic values of Pareto solution sets under different carbon policies

| 碳政策 | 成本/元 | | | 运输时间/h | | | 运行时间/s |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 最优解 | 最劣解 | 平均值 | 最优解 | 最劣解 | 平均值 | |
| 碳强制 | 74 528.16 | 145 990.32 | 130 645.60 | 60.44 | 131.48 | 75.53 | 19.49 |
| 碳税 | 126 721.83 | 488 916.59 | 422 953.46 | 47.60 | 131.48 | 55.25 | 19.67 |
| 碳交易 | 37 239.22 | 340 144.92 | 286 091.86 | 47.60 | 131.48 | 56.25 | 19.62 |
| 碳补偿 | 74 528.16 | 336 364.23 | 255 804.00 | 47.60 | 131.48 | 64.00 | 19.58 |

碳交易政策相近，但平均时间64.00 h明显更长。这表明碳补偿作为一种抵消机制，其对企业在运输规划阶段从源头进行路径优化的激励作用相对较弱。企业可能倾向于优先考虑成本，仅在碳排放超额时才将购买补偿量作为一种补救措施，因此在运输效率上的表现不及碳交易和碳税政策。

为揭示企业在不同碳政策下的路径选择，本实验从各类政策的Pareto解集中选取若干具有代表性的决策方案展开分析，不同碳政策下典型决策方案如表7所示。通过对比表7中各方案的具体路线、总成本、运输时间及最终碳排放量，可以直观地揭示企业在不同政策激励下，为实现最低成本、最快送达或综合最优等不同目标所必需作出的策略权衡，从而为企业提供更具操作性的决策参考。

**表7　不同碳政策下典型决策方案**

Tab.7　Typical decision-making schemes under different carbon policies

| 碳政策 | 解 | 路线 | 成本/元 | 运输时间/h | 碳排放量/kg |
|---|---|---|---|---|---|
| 碳强制 | 1 | 1-r-2-r-3-w-15-w-19-w-20 | 74 528.16 | 131.48 | 5 219.37 |
| | 2 | 1-h-2-h-9-h-11-h-13-r-16-r-20 | 145 990.32 | 60.44 | 19 572.86 |
| | 3 | 1-r-2-r-3-w-15-r-19-r-20 | 107 627.52 | 98.16 | 4 939.13 |
| | 4 | 1-r-2-r-9-r-11-r-14-r-16-r-20 | 121 598.40 | 71.20 | 4 985.53 |
| 碳税 | 1 | 1-r-2-r-3-w-15-w-19-w-20 | 126 721.83 | 131.48 | 5 219.37 |
| | 2 | 1-h-2-h-9-h-11-h-13-h-16-h-20 | 484 496.01 | 47.60 | 31 878.08 |
| | 3 | 1-r-2-r-3-w-15-r-19-r-20 | 157 018.78 | 98.16 | 4 939.13 |
| | 4 | 1-r-2-r-9-r-11-r-14-r-16-r-20 | 171 453.74 | 71.20 | 4 985.53 |
| 碳交易 | 1 | 1-r-2-r-3-w-15-w-19-w-20 | 37 239.22 | 131.48 | 5 219.37 |
| | 2 | 1-h-2-h-9-h-11-h-13-h-16-h-20 | 336 364.23 | 47.60 | 31 878.08 |
| | 3 | 1-r-2-r-3-w-15-r-19-r-20 | 68 152.70 | 98.16 | 4 939.13 |
| | 4 | 1-r-2-r-9-r-11-r-14-r-16-r-20 | 82 485.57 | 71.20 | 4 985.53 |
| 碳补偿 | 1 | 1-r-2-r-3-w-15-w-19-w-20 | 74 528.16 | 131.48 | 5 219.37 |
| | 2 | 1-h-2-h-9-h-11-h-13-h-16-h-20 | 336 364.23 | 47.60 | 31 878.08 |
| | 3 | 1-r-2-r-3-w-15-r-19-r-20 | 107 627.52 | 98.16 | 4 939.13 |
| | 4 | 1-r-2-r-9-r-11-r-13-r-16-r-20 | 124 185.60 | 72.60 | 5 091.61 |

注：h代表公路，r代表铁路，w代表水路。

从表7可以看出，对于以成本为目标战略的企业而言，无论在哪种碳政策下，以“铁路+水路”为主的低碳联运路径始终是其最优选择。该路径不仅能在碳强制政策下实现最低的直接成本74 528.16元，在碳税政策下有效规避高额罚款，更能在碳交易政策下通过出售节余配额，将总成本优化到37 239.22元，这验证了在市场化激励下，企业的环境管理能够从被动的成本控制转变为主动的价值创造。而对于以时间为目标战略的企业而言，在碳强制政策下，企业为满足排放上限，选择以“公路+铁路”的运输方案。其余3种碳政策都选择公路的运输方案，碳税政策的强惩罚性使总成本飙升至不可持续的484 496.01元。相比之下，碳交易政策在平衡经济与环境目标上更优。

综上，不存在绝对最优的单一政策，企业必须根据外部政策环境动态调整运营策略，在碳强制政策下，企业的核心目标是在满足碳排放上限内实现成本最小化。这意味着管理者需要接受更长的运输周期，并优化库存管理以对冲时效性损失。在碳税政策下，高昂的税收迫使企业将“低碳”作为运营的核心指标。管理者应优先选择铁路和水路，尽管这通常意味着更长运输时间，但其显著的低碳特性能够帮助企业规避高昂的碳税罚款，从而在总成本上获得巨大优势。这可以作为一种高端、快速、绿色的服务推向市场，形成差异化竞争优势。在碳交易政策下，该政策为企业提供了最大的灵活性。管理者不仅要考虑如何减排，更要思考如何通过减排“创造”利润。通过技术升级或路径优化节省的碳配额可以出售获利，这要求企业具备更精细的成本核算与市场预测能力，将碳管理部门从成本中心转变为利润中心。在碳补偿政策下，这是一种事后补救措施，为企业提供了履约的灵活性，但其对源头减排的激励作用弱于碳交易。管理者可将其作为应对突发性高排放任务的风险对冲工具。

### 3.4　灵敏度分析

为探究模糊需求与时间对联运方案的影响，对置信水平进行灵敏度分析。置信水平$\alpha_1$的灵敏度分析如图12所示，置信水平$\alpha_2$的灵敏度分析如图13所示，置信水平$\beta_1$与$\beta_2$对Pareto前沿平均成本的灵敏度分析如图14所示，置信水平$\beta_1$与$\beta_2$对Pareto前沿平均时间的灵敏度分析如图15所示。采用控制变量法，分别探究需求置信度$\alpha_1$、时间置信度$\alpha_2$，$\beta_1$以及$\beta_2$在[0，1]区间内变化时对模型求解结果的影响。

（1）需求置信度的影响分析。由图12可知，

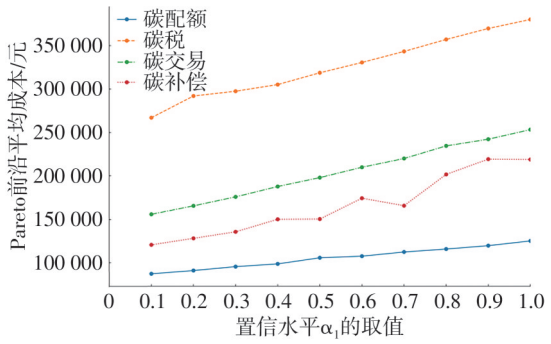



**图12　置信水平$\alpha_1$的灵敏度分析**

Fig.12　Sensitivity analysis of confidence level $\alpha_1$

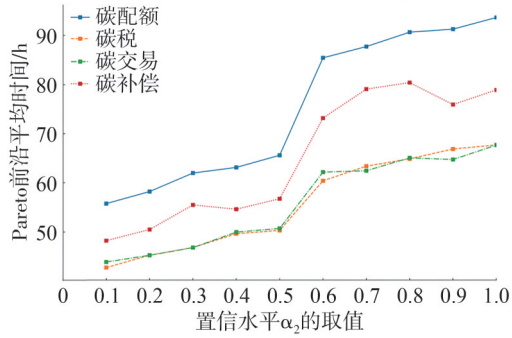



**图13　置信水平$\alpha_2$的灵敏度分析**

Fig.13　Sensitivity analysis of confidence level $\alpha_2$

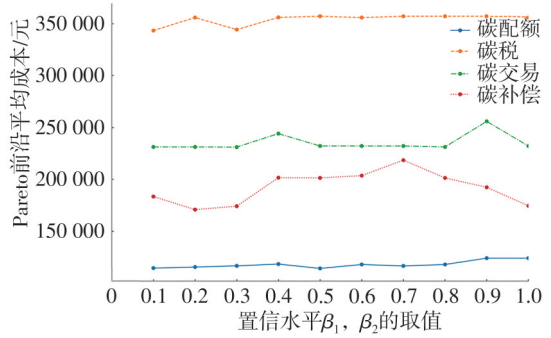



**图14　置信水平$\beta_1$与$\beta_2$对Pareto前沿平均成本的灵敏度分析**

Fig.14　Sensitivity analysis of Pareto front average cost to confidence levels $\beta_1$ and $\beta_2$

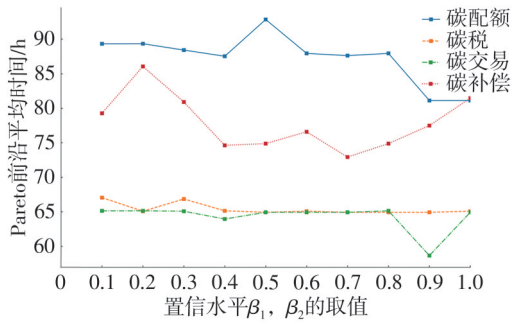



**图15　置信水平$\beta_1$与$\beta_2$对Pareto前沿平均时间的灵敏度分析**

Fig.15　Sensitivity analysis of Pareto front average time to confidence levels $\beta_1$ and $\beta_2$

各类碳政策下的平均总成本均随需求置信度$\alpha_1$的增加而上升。其原因在于，置信度$\alpha_1$是决策者对市场需求不确定性风险规避程度的量化体现。较高的$\alpha_1$值代表决策者采取更保守的态度，为应对潜在的大批量货物而预留更多运力，从而导致运输与碳排放成本的增加。各政策中，碳税模型因其成本与排放量直接相乘的机制，对$\alpha_1$变化最为敏感，成本增长最为显著。例如，当$\alpha_1$从0.5提升至0.8时，碳税政策下的平均成本增加了约12%。这意味着，一个风险规避型的管理者必须准备更充足的预算，以换取供应链的稳定性。

（2）时间置信度的影响分析。由图13可知，各类碳政策下的平均运输时间总体随时间置信度$\alpha_2$的增加而呈上升趋势。时间置信度$\alpha_2$反映了决策者对运输延误风险的容忍度。一个较高的$\alpha_2$值意味着决策者对延误持悲观态度，在路径规划时会选择理论上更耗时但波动性更小的路径，以确保运输时间的可靠性。例如增加准时性更高的铁路运输占比，而减少易受拥堵影响的公路运输。这种为可靠性而牺牲平均速度的策略权衡，揭示了置信水平对具体路径选择的深刻影响，比单纯分析时间变化更能为企业的实际运营提供决策参考。其中，碳配额模型因其严格的碳约束导致可行路径选择有限，故对时间置信度的变化反应最为剧烈。例如，对于高价值或时效性要求极高的货物，应采用高$\alpha_2$值进行规划，牺牲部分平均成本以换取交付时间的保障；而对于普通货物，则可适当降低$\alpha_2$值，追求更高的运输效率和更低的成本。

（3）约束置信度的影响分析。由图14与图15可知，约束置信度$\beta_1$与$\beta_2$的变化导致成本与时间的剧烈、非线性波动。其根本原因在于，该参数通过调整约束的严格程度直接重塑了可行解空间。当约束收紧至特定临界点，许多高效路径会因不满足条件而被剔除，引发解集突变，从而导致成本与时间的大幅跃升。这揭示了决策者对运力风险的容忍度会对最终方案的成本与效率产生高度敏感且难以线性预测的深刻影响。因此，在实际应用中，企业必须基于历史数据对各节点、各路段的运力可靠性进行精确评估，以设定合理的置信水平，避免因过度保守或过度乐观导致决策失误。

## 4　结论

针对“双碳”目标下多式联运路径优化中的运输时间、中转时间与需求不确定性问题，本研究构建了一个多目标低碳优化模型。该模型利用梯形与三角模糊数刻画运输时间、中转时间与市场需求的多重不确定性，并基于模糊机会约束规划理论处理，为求解此NP难问题，设计了改进的模糊自适应非支配排序遗传算法(FANSGA-Ⅱ)，通过引入模糊控制器动态调整遗传算子。通过实际案例证实，FANSGA-Ⅱ在解的多样性与质量上均显著优于经典的NSGA-Ⅱ算法，验证了所提模型与算法的有效性。

本研究揭示了4种主流碳政策对企业多式联运路径决策的差异化影响，并识别出碳交易政策在平衡经济与环境目标上的独特优势。强制性碳排放政策是引导企业在满足碳排放上限的前提下，优先选择运营成本最低的路径，但这通常以牺牲运输时间为代价，是一种成本驱动下的被动合规策略。碳税政策是一种强力的引导工具。其高昂的惩罚性成本能最有效地迫使企业转向铁路、水路等低碳运输方式，从而在所有政策中实现最高的运输效率和最显著的减排效果，但同时也给企业带来了最沉重的经济负担。碳交易政策在经济成本、运输效率与环境效益之间展现出最佳的平衡性。它通过市场化的激励机制，将“减碳”行为转化为可交易的资产，不仅引导企业主动优化路径，更能将节约的碳排放额度变现为经济收益，为行业可持续发展提供了最具潜力的解决方案。碳补偿政策更多地扮演了一种灵活的、事后补救式的履约角色。其引导企业从源头进行路径和技术优化的主动性相对较弱，对运输效率的提升效果有限。

此外，灵敏度分析进一步揭示了模型对不确定性参数的置信水平具有高度敏感性。结果表明，决策者对需求不确定性的风险规避程度与运输总成本呈正相关；同样，对时间不确定性的规避则会导致运输效率的降低。尤其值得注意的是，约束置信水平的微小变动会引发成本与时间的剧烈、非线性波动，这深刻揭示了决策者的风险偏好是影响最终路径方案经济性和时效性的关键驱动因素，也凸显了本研究构建的模型在量化不确定性风险、为现实决策提供支持方面的实际应用价值。

本研究的局限性在于将碳价、税率等参数设定为静态值。未来研究可拓展至动态参数下的路径优化、更复杂的运输网络如考虑客户满意度、应急场景等，并探索混合智能算法以进一步提升求解效率。

**参考文献：**

[1] 国务院办公厅．国务院办公厅关于印发推进多式联运发展优化调整运输结构工作方案(2021—2025年)的通知[A]．北京：国务院办公厅，2021.

[2] International Energy Agency. $CO_2$ Emissions in 2023[EB/OL]. (2024-03-01)[2025-06-20]. https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2023.

[3] 中共中央 国务院．中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见[A]．北京：中共中央 国务院，2021.

[4] BAUER J，BEKTAŞ T，CRAINIC T G. Minimizing Greenhouse Gas Emissions in Intermodal Freight Transport：An Application to Rail Service Design[J]. Journal of the Operational Research Society，2010，61(3)：530-542.

[5] JANIC M. Modelling the Full Costs of an Intermodal and Road Freight Transport Network[J]. Transportation Research Part D：Transport and Environment，2007，12(1)：33-44.

[6] 刘　杰，彭其渊，殷　勇．低碳背景下的多式联运路径规划[J]．交通运输系统工程与信息，2018，18(6)：243-249.
LIU Jie，PENG Qiyuan，YIN Yong. Multimodal Transportation Route Planning under Low Carbon Emissions Background[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology，2018，18(6)：243-249.

[7] 邓红星，宋雅婧．考虑碳排放的多式联运多目标路径规划[J]．重庆理工大学学报(自然科学)，2022，36(11)：219-225.
DENG Hongxing，SONG Yajing. Multi-Objective Route Planning for Multimodal Transportation Considering Carbon Emissions[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)，2022，36(11)：219-225.

[8] 孟建军，石　坤，刘亚彤，等．基于客户满意度的低碳冷链多式联运路径优化[J]．包装工程，2024，45(13)：268-275.
MENG Jianjun，SHI Kun，LIU Yatong，et al. Multimodal Transport Path Optimization of Low-Carbon Cold Chain Based on Customer Satisfaction[J]. Packaging Engineering，2024，

45(13)：268-275.

[9] 常祎妹，孔文涓，李　博，等. 考虑高铁快运参与的生鲜品多式联运路径选择[J]. 辽宁大学学报(自然科学版)，2025，52(2)：170-185.
CHANG Yimei，KONG Wenjuan，LI Bo，et al. Path Selection for Fresh Products Multimodal Transportation with the Participation of High Speed Rail Express[J]. Journal of Liaoning University (Natural Science Edition)，2025，52(2)：170-185.

[10] WANG X N，CUI Z Y，LIU M Z，et al. Research on the Choice of Multimodal Transportation Emission Reduction Schemes Based on Different Carbon Tax Models[J]. Journal of Physics：Conference Series，2021，1972(1)：012111.

[11] 闫全伟. 低碳视角下冷藏集装箱多式联运路径优化及算法研究[D]. 郑州：河南农业大学，2023.

[12] 康　禄. 低碳背景下公铁联运路径优化研究[J]. 铁道货运，2024，42(5)：39-45.
KANG Lu. Route Optimization of Road-Rail Intermodal Transportation under Low Carbon Background[J]. Railway Freight Transport，2024，42(5)：39-45.

[13] CHEN X H，HU X H，LIU H B. Low-Carbon Route Optimization Model for Multimodal Freight Transport Considering Value and Time Attributes[J]. Socio-Economic Planning Sciences，2024，96：102108.

[14] 段力伟，高慧艳. 碳交易机制下考虑需求不确定的多式联运路径优化[J]. 铁道运输与经济，2025，47(1)：40-52.
DUAN Liwei，GAO Huiyan. Route Optimization of Multimodal Transport Considering Demand Uncertainty under Carbon Trading Mechanism[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(1)：40-52.

[15] 程兴群，金　淳，姚庆国，等. 碳交易政策下多式联运路径选择问题的鲁棒优化研究[J]. 中国管理科学，2021，29(6)：82-90.
CHENG Xingqun，JIN Chun，YAO Qingguo，et al. Research on Robust Optimization for Route Selection Problem in Multimodal Transportation under the Cap and Trade Policy[J]. Chinese Journal of Management Science，2021，29(6)：82-90.

[16] LI M Y，SUN X N. Path Optimization of Low-Carbon Container Multimodal Transport under Uncertain Conditions[J]. Sustainability，2022，14(21)：14098.

[17] 吴　鹏，李　泽，季海涛. 考虑排放控制区的绿色多式联运路径和速度优化[J]. 交通运输系统工程与信息，2023，23(3)：20-29.
WU Peng，LI Ze，JI Haitao. Route and Speed Optimization for Green Intermodal Transportation Considering Emission Control Area[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology，2023，23(3)：20-29.

[18] 张　旭，柳佳瑶，袁旭梅，等. 不同碳减排政策下考虑规模经济的多式联运路径选择研究[J]. 工业工程与管理，2022，27(4)：22-31.
ZHANG Xu，LIU Jiayao，YUAN Xumei，et al. Selection of Multimodal Transportation Route Considering Scale Economy under Different Carbon Emission Policies[J]. Industrial Engineering and Management，2022，27(4)：22-31.

[19] ZHANG H Z，HUANG Q，MA L，et al. Sparrow Search Algorithm with Adaptive $t$ Distribution for Multi-Objective Low-Carbon Multimodal Transportation Planning Problem with Fuzzy Demand and Fuzzy Time[J]. Expert Systems with Applications，2024，238：122042.

[20] 谯熙康，陈　斌，黄福友. 组态视角下我国低碳物流效率分析及提升路径研究[J]. 铁路物流，2025，43(5)：61-72.

[21] FAZAYELI S，EYDI A，KAMALABADI I N. Location-Routing Problem in Multimodal Transportation Network with Time Windows and Fuzzy Demands：Presenting a Two-Part Genetic Algorithm[J]. Computers & Industrial Engineering，2018，119：233-246.

[22] 张　旭，张海燕，袁旭梅，等. 需求不确定下基于不同碳税机制的双目标多式联运路径优化[J]. 公路交通科技，2025，21(2)：41-51.
ZHANG Xu，ZHANG Haiyan，YUAN Xumei，et al. Dual-Objective Multimodal Transport Route Optimization Based on Different Carbon Tax Mechanisms under Uncertain Demand[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development，2025，21(2)：41-51.

[23] 苏　航，李海军. 不确定需求下冷藏集装箱低碳多式联运路径优化[J]. 铁道运输与经济，2025，47(1)：61-69.
SU Hang，LI Haijun. Route Optimization on Low-Carbon Multimodal Transport of Refrigerated Containers under Uncertain Demand[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(1)：61-69.

[24] LIU S，PENG Y，SONG Q K，et al. The Robust Shortest Path Problem for Multimodal Transportation Considering Timetable with Interval Data[J]. Systems Science & Control Engineering，2018，6(2)：68-78.

[25] 周金龙，张英贵，肖　杨，等. 不确定时间下多式联运多

目标路径优化模型与算法[J]. 交通运输系统工程与信息，2024，24(6)：193-205.
ZHOU Jinlong，ZHANG Yinggui，XIAO Yang，et al. Multi-Objective Routing Optimization Model and Algorithm for Multimodal Transportation with Uncertain Time[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology，2024，24(6)：193-205.

[26] 辜　勇，文　洁. 运输时间不确定下冷藏集装箱多式联运路径优化研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版)，2025，49(3)：469-475.
GU Yong，WEN Jie. Research on Multimodal Transport Route Optimization of Refrigerated Containers under Uncertain Transportation Time[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)，2025，49(3)：469-475.

[27] 张　敏，韩晓龙. 多目标模糊机会约束规划的低碳多式联运路径优化[J]. 计算机应用，2023，43(2)：636-644.
ZHANG Min，HAN Xiaolong. Low-Carbon Multimodal Transportation Path Optimization Based on Multi-Objective Fuzzy Chance-Constrained Programming[J]. Journal of Computer Applications，2023，43(2)：636-644.

[28] 徐国权，郑　瑞，袁韶秋，等. 混合不确定条件下低碳多式联运路径模糊鲁棒优化[J]. 北京交通大学学报，2025，49(1)：55-70.
XU Guoquan，ZHENG Rui，YUAN Shaoqiu，et al. Fuzzy Robust Optimization of Low-Carbon Multimodal Transport Paths under Mixed Uncertainty[J]. Journal of Beijing Jiaotong University，2025，49(1)：55-70.

[29] 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.
ZHANG Xu，YUAN Xumei，JIANG Yadi. Optimization of Multimodal Transportation under Uncertain Demand and Stochastic Carbon Trading Price[J]. Systems Engineering—Theory & Practice，2021，41(10)：2609-2620.

[30] IWAMURA K，LIU B D. A Genetic Algorithm for Chance Constrained Programming[J]. Journal of Information and Optimization Sciences，1996，17(2)：409-422.

[31] AYAR B，YAMAN H. An Intermodal Multicommodity Routing Problem with Scheduled Services[J]. Computational Optimization and Applications，2012，53(1)：131-153.

[32] YANG L J，ZHANG C，WU X. Multi-Objective Path Optimization of Highway-Railway Multimodal Transport Considering Carbon Emissions[J]. Applied Sciences，2023，13(8)：4731.

[33] ZHOU J L，ZHANG Y G，WANG J，et al. Data-Driven Assisted Multi-Objective Routing Optimization for Multimodal Transportation under Fuzzy Demand[J]. Swarm and Evolutionary Computation，2025，96：101997.

(责任编辑　魏　然)