

碳交易成本穿透效应与低碳供应链网络结构响应研究

——基于管理工程视角的双态阈值测算框架

徐志成

江西理工大学经济管理学院, 江西 赣州

收稿日期: 2026年7月26日; 录用日期: 2026年8月17日; 发布日期: 2026年8月27日

摘要

碳交易机制能否实质性影响低碳供应链网络设计, 关键在于碳价信号能否穿透基础运营成本并转化为设施选址、流量配置和绿色技术投入的管理工程决策动因。针对既有研究缺少可操作量化判别指标的问题, 本文提出碳成本比 θ , 即碳交易净成本与基础运营成本之比, 并以 $\theta^* = 0.1\%$ 作为概念验证情景下的临界判据, 构建“结构锁定态 - 结构响应态”双态阈值测算框架。在此基础上, 建立生产 - 仓储 - 运输一体化的双目标混合整数规划模型, 采用非支配排序遗传算法(NSGA-II)求解, 并以包含5个候选工厂、6个候选分销中心和10个需求市场的轻工业网络算例开展仿真。结果表明, 在60~600元/t CO₂碳价情景下, θ 最高仅为0.014245%, 显著低于 θ^* , 网络拓扑未发生结构性调整, 系统处于结构锁定态; 高排放行业对比估算中, θ 约为1.8%, 系统进入结构响应态。研究表明, 碳交易机制对供应链网络结构的影响并非取决于碳价绝对水平, 而取决于碳成本相对于基础运营成本的相对穿透强度。

关键词

管理工程, 供应链网络设计, 低碳供应链, 碳成本比 θ , 双态阈值

Carbon Trading Cost Penetration and Structural Response of Low-Carbon Supply Chain Networks

—A Dual-State Threshold Measurement Framework from a Management Engineering Perspective

Zhicheng Xu

School of Economics and Management, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou Jiangxi

Received: July 26, 2026; accepted: August 17, 2026; published: August 27, 2026

Abstract

Whether a carbon trading mechanism can substantially affect low-carbon supply chain network design depends on whether the carbon price signal can penetrate baseline operating costs and become a driver of management engineering decisions such as facility location, flow allocation and green technology investment. To address the lack of an operational quantitative criterion in existing studies, this paper proposes the carbon cost ratio θ , defined as the ratio of net carbon trading cost to baseline operating cost, and adopts $\theta^* = 0.1\%$ as a critical benchmark in the proof-of-concept scenario to construct a dual-state threshold measurement framework covering the structure-locked state and the structure-responsive state. A bi-objective mixed-integer programming model integrating production, warehousing and transportation is developed and solved using the non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II). Numerical simulations are conducted on a light-industry network with 5 candidate plants, 6 candidate distribution centers and 10 demand markets. The results show that when the carbon price ranges from 60 to 600 CNY/t CO₂, θ reaches a maximum of only 0.014245%, which is far below θ^* , and the network topology does not change structurally, indicating a structure-locked state. In a comparative high-emission industry scenario, θ is approximately 1.8%, and the system enters the structure-responsive state. The findings indicate that the impact of carbon trading on supply chain network structure depends not on the absolute carbon price but on the relative penetration intensity of carbon cost into baseline operating costs.

Keywords

Management Engineering, Supply Chain Network Design, Low-Carbon Supply Chain, Carbon Cost Ratio θ , Dual-State Threshold

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

全球气候治理体系不断深化,碳排放权交易市场持续扩张,碳约束正从成本端和治理端共同影响制造与分销企业的供应链网络设计。对管理工程领域而言,关键问题并不只是碳价是否上升,而是碳价信号能否进入企业设施选址、产能配置、运输组织和绿色技术投资等决策变量之中。欧盟碳排放交易体系(EU ETS)碳价已从约 5 欧元/t CO₂ 升至 100 欧元/t CO₂ 以上,中国全国碳市场自 2021 年启动后配额价格持续波动[1]。唐葆君等指出,碳交易成本对不同行业的约束强度存在显著差异,高耗能行业碳成本占运营成本的比例可达 1%以上,而轻工制造行业则不足 0.02%,两类行业对碳价信号的响应程度存在明显差别[2]。潘富玲等借助 Power BI 核算绿色供应链环境成本,认为提升环节绿色化水平有助于降低企业环境成本[3]。林强等基于区块链技术构建绿色供应链博弈模型,对比分析了区块链嵌入前后的决策差异[4]。上述研究说明,碳价格信号能否产生网络结构效应,受到排放规模、成本结构和技术水平等因素共同制约。

现有研究仍存在三方面不足。第一,多数模型将设施单位碳排放系数设为统一常数[5],较少考虑设施间绿色技术水平差异,而这种异质性正是形成成本-排放 Pareto 前沿的重要基础。国内低碳物流选址研究也多采用同质化排放假设,未能充分区分不同技术等级设施的排放强度差异,因而难以刻画绿色技术投入与固定建设成本之间的权衡关系[6]。第二,关于碳价不确定性的处理多采用离散情景设定[7],对

碳价动态波动过程的连续刻画仍相对不足。第三,更为关键的是,既有研究尚未形成能够直接衡量碳交易成本相对于基础运营成本量级关系的判别指标,因而难以判断碳交易机制何时能够真正影响网络结构决策[8]。

低碳供应链网络设计研究已广泛引入碳排放约束与多目标优化框架[2][7][9]。Lee 和 Ham 采用 GBM 等随机过程刻画碳价不确定性[1]。国内学者也开展了相关研究,程栋等构建了犹豫模糊语言的层次化 DEMATEL 最小调整共识模型[10],张令荣等建立了政府主导、制造商和零售商跟随的三阶段博弈模型[11],赵娜等利用 NSGA-II-TOPSIS 方法开展绿色低碳公路施工调度优化[12]。在国际研究中,Chaabane 等在排放交易机制下构建可持续供应链设计模型[13],Hua 等从库存管理视角分析了碳交易机制对订货与排放决策的影响[14],Zakeri 等比较了碳定价与排放交易两类政策对供应链计划的影响[15],Brandenburg 采用目标规划方法研究了低碳供应链配置问题[16],Dekker 等系统梳理了运筹优化方法在绿色物流中的应用[17]。Benjaafar 等指出,碳交易的约束力高度依赖排放强度与价格水平之积,但未给出直接服务于网络结构响应判别的操作性量化判据[8]。因此,本文并非从零开始重新讨论碳约束对供应链管理的影响,而是在 Benjaafar 等经典研究的基础上,进一步提供一个可计算、可比较、可用于行业诊断的管理工程量化框架。

基于此,本文提出碳成本比 θ ,用以衡量碳交易净成本相对于基础运营成本的穿透强度,并在给定数值情景下引入临界阈值 θ^* 。当 $\theta < \theta^*$ 时,网络拓扑主要由设施绿色技术差异、固定建设成本和运输成本共同决定,系统表现为结构锁定态;当 $\theta \geq \theta^*$ 时,碳交易成本能够突破基础运营成本的稀释效应,碳价信号开始成为影响网络设计的重要变量,系统进入结构响应态。该框架将“碳交易机制是否有效”由定性判断转化为可计算、可比较的参数化判据,为企业评估碳交易成本对供应链网络设计的影响提供了量化工具。

2. 模型

2.1. 问题描述与假设

本文研究的低碳供应链网络包含生产工厂、区域分销中心(distribution center, DC)和终端需求市场三个层级。其中,工厂和分销中心从候选集合中选择,需求市场构成集合 M 。决策者需要在候选地址中确定设施开设方案,并配置节点间产品流量,以满足各市场需求。供应链运营过程中的碳排放主要来自工厂生产、分销中心仓储以及节点间运输三个环节[18]。其中,生产和仓储环节的碳排放系数因设施而异,并与固定建设成本呈反向关系,即建设成本越高,通常意味着低碳技术投入越多;运输环节的碳排放系数设为统一常数,主要由运输距离决定。在碳交易机制下,企业依据开启设施产能获得免费配额[19];当排放超过配额时按买入价购买配额,当排放低于配额时按卖出价出售剩余配额,买入价与卖出价之间存在交易价差。

模型基于以下假设:候选设施的地理位置、固定建设成本及产能上限已知;各需求市场产品需求确定且必须全部满足,不允许缺货;各候选工厂单位生产碳排放系数 $e_{\{p,j\}}$ 与各候选分销中心单位仓储碳排放系数 $e_{\{w,k\}}$ 已知,且与对应设施建设成本呈反向关系;运输碳排放系数 e' 为已知常数;碳配额按开启设施产能比例分配,分配基准系数已知;碳交易买入价服从几何布朗运动(geometric Brownian motion, GBM)随机过程,卖出价为买入价的 $(1-\text{spread})$ 倍;模型为单周期静态网络设计模型,暂不考虑多周期配额结转和跨期决策。上述设定能够突出碳交易成本穿透效应对网络结构响应的影响机制。

2.2. 符号说明

主要模型符号见表 1。

Table 1. Description of model symbols**表 1.** 模型符号说明

符号	含义
J, K, M	候选工厂、候选分销中心、需求市场的下标集合
$y_{\{jk\}}, z_{\{km\}}$	工厂 j 到分销中心 k 、分销中心 k 到需求市场 m 的产品运输量(件)
$prod_j, inflow_k$	工厂 j 的总产量($=\sum_k y_{\{jk\}}$)、分销中心 k 的总入库量($=\sum_m z_{\{km\}}$) (件)
$u_j \in \{0, 1\}, v_k \in \{0, 1\}$	决策变量：是否建设工厂 j /分销中心 k
f_j, g_k	工厂 j 、分销中心 k 的固定建设成本(万元)
Cap_j, Cap_k	工厂 j 的产能上限、分销中心 k 的容量上限(件)
c, t	单位生产成本(元/件)、单位运输成本(元/(件·km))
$e_{\{p,j\}}, e_{\{w,k\}}, e'$	工厂生产、分销中心仓储和运输环节单位碳排放系数
$d_{\{jk\}}, d_{\{km\}}$	工厂 j 到分销中心 k 、分销中心 k 到市场 m 的运输距离(km)
D_m	需求市场 m 的产品需求量(件)
Q	企业获得的免费碳配额总量(t CO ₂)
$p_buy(s), p_sell(s)$	情景 s 下碳配额买入价和卖出价(元/t CO ₂)
E	供应链系统总碳排放量(t CO ₂)
Z_1, Z_2	总运营成本目标(万元, 含碳交易成本)和总碳排放目标(t CO ₂)

2.3. 目标函数

目标函数 1：最小化供应链总运营成本 Z_1 (万元)。

$$Z_1 = \sum_j f_j u_j + \sum_k g_k v_k + \{c \cdot \sum_m D_m + t \cdot [\sum_j \sum_k y_{\{jk\}} d_{\{jk\}} + \sum_k \sum_m z_{\{km\}} d_{\{km\}}] + C_c(s)\} / 10000. \quad (1)$$

$$C_c(s) = \max(0, E - Q) \cdot p_buy(s) - \max(0, Q - E) \cdot p_sell(s). \quad (2)$$

式中，前两项表示固定建设成本，第三项表示生产成本，第四、五项表示两级运输成本，最后一项表示碳交易成本。当总排放 E 超过配额 Q 时，企业按买入价 $p_buy(s)$ 购买超额配额；当总排放 E 低于配额 Q 时，企业按卖出价 $p_sell(s)$ 出售剩余配额并获得收益，其中 s 为蒙特卡洛仿真产生的碳价情景。买卖价差 ($spread$) 使 $p_sell < p_buy$ ，从而在配额 - 成本关系中形成分段线性结构。若以百分比表示， $\theta = |C_c(s)| / Z_1, base \times 100\%$ ，且 $\theta \geq 0$ ，用于刻画碳交易信号的成本穿透强度。

目标函数 2：最小化供应链总碳排放量 Z_2 (t CO₂)。

$$Z_2 = \{\sum_j e_{\{p,j\}} \cdot prod_j u_j + \sum_k e_{\{w,k\}} \cdot inflow_k v_k + \sum_j \sum_k e'_{\{jk\}} \cdot y_{\{jk\}} \cdot d_{\{jk\}} + \sum_k \sum_m e'_{\{km\}} \cdot z_{\{km\}} \cdot d_{\{km\}}\} / 1000. \quad (3)$$

该表达式将生产、仓储和运输三个环节的碳排放统一纳入核算框架。生产和仓储环节排放系数随设施不同而变化，体现了设施绿色技术异质性。换言之，选择排放系数较低的工厂或分销中心，通常意味着承担更高的固定建设成本，由此形成 Z_1 与 Z_2 之间的 Pareto 权衡[7]。运输排放系数 e' 设为统一常数，并通过运输量与运输距离的乘积度量各路段运输排放。

2.4. 约束条件

(1) 需求满足约束：

$$\sum_k z_{\{km\}} = D_m, \forall m \in M \quad (4)$$

(2) 流量平衡约束：工厂 j 的总产量等于其向各分销中心的配送量之和($prod_j = \sum_k y_{jk}$)，分销中心 k 的总入库量等于其向各需求市场配送量之和($inflow_k = \sum_m z_{km}$)。

(3) 产能约束：

$$prod_j \leq Cap_j \cdot u_j, \forall j \in J; inflow_k \leq Cap_k \cdot v_k, \forall k \in K \quad (5)$$

(4) 碳配额分配约束：

$$Q = \sum_j q^p \cdot Cap_j \cdot u_j + \sum_k q^w \cdot Cap_k \cdot v_k \quad (6)$$

其中， q^p 、 q^w 为单位产能对应的配额分配系数。

(5) 决策变量约束： $y_{jk}, z_{km} \geq 0; u_j, v_k \in \{0, 1\}$ 。

2.5. 求解方法

本文采用两类工具对 θ 机制进行测算与分析。第一，采用 GBM 刻画碳价不确定性，碳价 $p(t)$ 的演化过程表示为：

$$p_buy(t + \Delta t) = p_buy(t) \cdot \exp\left[\left(\mu - \sigma^2/2\right)\Delta t + \sigma\sqrt{\Delta t} \cdot \varepsilon\right]. \quad (7)$$

其中， μ 为期望增长率， σ 为波动率， $\varepsilon \sim N(0, 1)$ 。在仿真过程中，通过蒙特卡洛方法生成多条碳价路径，并以各路径终局价格的平均值作为情景碳价，以标准差反映碳价波动风险。

第二，采用非支配排序遗传算法(NSGA-II)求解双目标混合整数规划问题，获得不同 θ 水平下的 Pareto 最优网络方案[20]。染色体编码长度为 $J + K + K \cdot M + J \cdot K = 101$ 维实数向量，前 $J + K$ 位经 0.5 阈值二值化为设施开闭决策，后续位用于表示流量分配比例；同时设置高于生产成本 5 倍的超容惩罚，以引导种群向可行区域收敛。上述方法均服务于同一研究目标，即识别不同 θ 水平下供应链网络结构的响应状态。本文关注的重点并非算法改进，而是利用多目标优化结果刻画碳交易成本穿透效应。在约束处理方面，流量守恒约束通过归一化编码在解码阶段实现；对于产能超限情形，模型采用修复机制并引入相当于生产成本 5 倍的惩罚项，以保证 Pareto 前沿解满足产能约束要求。

2.6. 实验设置

本文构建包含 5 个候选工厂、6 个候选分销中心和 10 个需求市场的概念验证算例。参数设定参考轻工业典型量级(单位产品排放 6~18 kg CO₂)，用于展示双态阈值框架在不同 θ 水平下的作用机制。各候选设施的建设成本与单位排放系数按绿色等级联合生成：绿色等级越高，建设成本越高、排放强度越低，由此形成技术因素主导网络设计的结构基础。候选工厂参数见表 2，候选分销中心参数见表 3，其他参数见表 4。

Table 2. Parameters of candidate plants
表 2. 候选工厂参数

工厂 j	建设成本 f_j (万元)	产能 Cap_j (件)	单位排放 $e_{\{p,j\}}$ (kg CO ₂ /件)
工厂 1	127.84	288	6.54
工厂 2	134.05	214	6.12
工厂 3	140.34	208	5.81
工厂 4	118.47	262	7.62
工厂 5	117.02	257	7.08

Table 3. Parameters of candidate distribution centers**表 3.** 候选分销中心参数

分销中心 k	建设成本 g_k (万元)	容量 Cap_k (件)	单位排放 $e_{\{w, k\}}$ (kg CO ₂ /件)
DC1	43.74	199	1.695
DC2	48.01	297	1.632
DC3	65.97	208	1.044
DC4	53.74	293	1.168
DC5	58.08	181	1.085
DC6	66.92	292	0.844

Table 4. Settings of other parameters**表 4.** 其他参数设置

参数	设定值	依据
单位生产成本 c	120 元/件	概念性算例，与建设成本数量级匹配
单位运输成本 t	0.8 元/(件·km)	参考 Fahimnia 等(2015) [7]
单位运输排放 e'	0.0240 kg CO ₂ /(件·km)	参考 Lee 和 Ham (2023) [1] 并按比例调整
碳价 GBM 初始值 $p_0/\mu/\sigma$	60 元/t CO ₂ 、5%、15%	参考中国全国碳市场价格量级与历史波动率
买卖价差($spread$)	12%	参考典型碳市场交易摩擦成本
蒙特卡洛情景数 S	200	经稳定性测试确定
碳配额基准 Q_0	按开启设施产能的 90%动态分配	按产能 90%基准分配
高碳价对比情景 p_{high}	600 元/t CO ₂	用于阈值分析
NSGA-II 种群 N /代数 G	120/200	经收敛性分析确定(见附录 A)

2.7. 碳成本比 θ 的定义

在分析 Pareto 前沿之前，本文引入用于度量碳交易成本穿透能力的指标——碳成本比 θ ：

$$\theta = |C_{-c}(s)| / Z_{1,base} \times 100\%. \quad (8)$$

其中， $Z_{1,base}$ 表示不包含碳交易成本的基础运营成本，主要包括固定建设成本、生产成本和运输成本。分子为碳交易净成本的绝对值：当企业需要购买配额时，净碳交易成本表现为支出；当企业出售剩余配额时，表现为收益。采用绝对值处理后， θ 能够从成本量级角度统一刻画碳交易信号的穿透强度，而不受净买入或净卖出方向影响。 θ 值越高，说明碳交易成本相对于基础运营成本的影响越大，网络设计越可能发生结构性响应。本文将 $\theta^* = 0.1\%$ 作为概念验证算例中的临界判据，该数值并非跨行业普适常数，而是用于呈现“成本信号足以进入管理工程决策变量”的量级门槛，后续研究可依据真实行业数据进一步校准。系统状态划分见表 5。

Table 5. System-state classification of the dual-state threshold model**表 5.** 双态阈值模型的系统状态划分

系统状态	θ 条件	网络设计行为
结构锁定态	$\theta < \theta^* (\theta^* = 0.1\%)$	Pareto 前沿主要由设施绿色技术差异、固定建设成本和运输成本决定；碳价变动不改变最优网络拓扑
结构响应态	$\theta \geq \theta^* (\theta^* = 0.1\%)$	碳价成为网络设计的重要变量；配额变动可能触发设施选址重排和流量配置调整

3. 结果与讨论

3.1. Pareto 前沿与 θ 验证

NSGA-II 算法求解后得到包含 18 个非支配解的 Pareto 前沿。前沿解的成本最低为 681.77 万元、最高为 759.74 万元；排放最低为 8.09 t CO₂、最高为 8.37 t CO₂；成本跨度为 77.97 万元，排放跨度为 0.28 t CO₂。结果表明，Pareto 前沿主要由设施绿色技术水平差异驱动。低成本端解对应 681.77 万元成本和 8.37 t CO₂ 排放，其设施组合更偏向固定成本较低但排放系数较高的节点；低排放端解对应 759.74 万元成本和 8.09 t CO₂ 排放，其设施组合更偏向固定成本较高但单位排放较低的节点。

在同一 Pareto 前沿基础上，对三种碳交易情景进行 θ 后处理，结果见表 6。各情景 θ 值均低于临界阈值 $\theta^* = 0.1\%$ ，最高仅为 0.014245% (压力测试情景)，表明系统处于结构锁定态。

Table 6. θ values under different carbon-price scenarios

表 6. 不同碳价情景下的 θ 值

情景	碳价(元/t CO ₂)	代表解	$Z_1, base$ (万元)	Z_2 (t CO ₂)	θ 范围	θ (%)
A: 固定碳价	60.00/52.80	低成本端	681.77	8.37	0.000963%~0.001424%	0.000966
A: 固定碳价	60.00/52.80	低排放端	759.74	8.09	0.000963%~0.001424%	0.001056
B: GBM 碳价	63.80/56.15	低成本端	681.77	8.37	0.001024%~0.001515%	0.001027
B: GBM 碳价	63.80/56.15	低排放端	759.74	8.09	0.001024%~0.001515%	0.001122
C: 压力测试	600.00/528.00	低成本端	681.77	8.37	0.009626%~0.014245%	0.009658
C: 压力测试	600.00/528.00	低排放端	759.74	8.09	0.009626%~0.014245%	0.010555

注： $Z_1, base$ 为基础运营成本； $\theta = |\text{碳交易净成本}|/Z_1, base \times 100\%$ ；碳价栏“/”前后分别表示买入价与卖出价。

由表 6 可知，三种情景采用的 Pareto 解集保持一致，碳价变化未改变解的支配关系和前沿形态。碳交易仅对前沿解的成本目标产生微小平移，未触发设施选址或流量分配的结构重组。其原因在于，当 θ 处于较低水平时，碳价信号被较大的固定成本和基础运营成本稀释，网络拓扑主要由设施技术差异和固定成本结构决定；只有当 θ 跨越 $\theta^* = 0.1\%$ 后，碳交易成本才可能突破成本壁垒并成为网络设计的重要影响因素。Pareto 前沿结果见图 1。

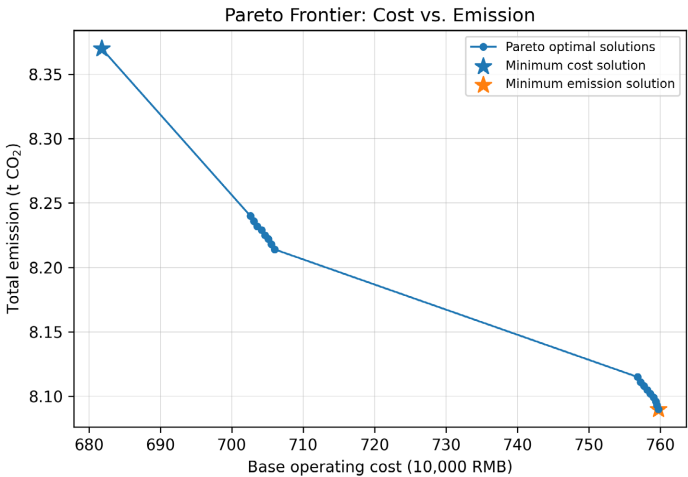


Figure 1. Pareto optimal frontier of the multi-objective low-carbon supply chain network
图 1. 多目标低碳供应链网络 Pareto 最优前沿

3.2. 机制解释

θ 的主要作用在于将“碳交易机制是否有效”转化为可计算的定量判据。本算例中,基础运营成本为 681~760 万元,而总排放量约为 8.1~8.4 t CO₂,导致碳交易成本在总成本中的占比较低, θ 最高仅为 0.014245%,明显低于临界阈值 $\theta^* = 0.1\%$ 。这反映了轻工业类供应链网络中较为典型的成本-排放结构:固定设施投资和基础运营成本规模较大,而单位产品排放强度相对较低,碳交易成本容易被基础成本稀释,因而难以单独成为驱动网络重构的有效激励。

相比之下,以年产 10 万吨的钢铁企业为例,若每吨钢排放约 2 t CO₂,则年排放量约为 20 万吨。在国内碳价约 90 元/t CO₂ 的情景下,碳交易成本约为 1800 万元/年;若企业年基础运营成本为 10 亿元,则 $\theta \approx 1.8\%$,已超过 $\theta^* = 0.1\%$ 的临界阈值,系统进入结构响应态。在此状态下,碳价信号具有对网络拓扑产生实质约束的可能性。由此可见,轻工业与钢铁行业虽然成本结构和排放强度差异较大,但均可纳入本文提出的 θ 双态框架进行解释。

3.3. 局限性与未来研究方向

本文研究仍存在一定局限。首先,模型为单周期静态模型,暂未考虑碳配额跨期结转、多期产能调整和企业投资时机选择。若引入多周期动态决策框架,企业可能基于预期碳价、技术学习曲线和投资不可逆性形成路径依赖,从而使网络结构响应不再表现为一次性跳跃,而可能呈现“观望-试点-扩张”的阶段调整过程。这一扩展有助于解释现实中企业面对碳价波动时的延迟投资行为。

其次,运输环节排放系数在本文中采用统一设定,尚未区分公路、铁路、水路等多种运输方式。未来可将运输方式选择作为决策变量,构建“设施选址-运输方式-路径分配”联合优化模型,使网络设计问题更贴近实际供应链管理场景。不同运输方式在成本、速度、碳排放、可靠性和换装成本方面存在差异,其加入可能显著改变 Pareto 前沿形态和 θ 阈值附近的结构响应行为。

再次,GBM 模型可刻画碳价随机波动,但难以充分反映均值回复、政策冲击和跳跃波动等特征。后续研究可进一步引入均值回复过程、跳跃扩散过程或情景鲁棒优化方法,并结合真实行业数据、多运输方式和多周期决策模型,对 θ^* 的取值进行进一步校准。上述拓展不会改变 θ 机制的基本解释逻辑,但有助于提升阈值测算结果的行业适配性与政策可操作性。

4. 结论

本研究提出碳成本比 θ 及临界阈值 $\theta^* = 0.1\%$,并将供应链网络对碳交易机制的响应划分为结构锁定态和结构响应态。轻工业算例结果显示,Pareto 前沿主要由设施绿色技术差异推动,成本跨度为 77.97 万元,排放跨度为 0.28 t CO₂;当碳价位于 60~600 元/t CO₂ 区间时, θ 最高仅为 0.014245%,明显低于临界阈值,网络拓扑未发生结构性改变。高排放行业对比情景中, θ 约为 1.8%,超过临界阈值,系统进入结构响应态。研究表明,碳交易机制对供应链网络设计的影响并非由碳价绝对水平单独决定,而取决于碳交易成本对基础运营成本的相对穿透强度。

致 谢

作者谨向在论文选题、模型构建和写作修改过程中给予指导与帮助的老师、同学表示感谢。

参考文献

- [1] Lee, G.G. and Ham, S.W. (2023) Prediction of Carbon Price in EU-ETS Using a Geometric Brownian Motion Model and Its Application to Analyze the Economic Competitiveness of Carbon Capture and Storage. *Energies*, **16**, Article 6333. <https://doi.org/10.3390/en16176333>

- [2] 唐葆君, 吉婧婧. 全国碳市场扩容策略的经济和排放影响研究[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2022, 24(4): 129-139.
- [3] 潘富玲, 符丽美. 基于 Power BI 的绿色供应链环境成本管理研究[J]. 财会通讯, 2025(2): 169-176.
- [4] 林强, 刘名武, 王晓斐. 嵌入区块链信息传递功能的绿色供应链决策[J]. 计算机集成制造系统, 2024, 30(1): 355-368.
- [5] Rezaee, A., Dehghanian, F., Fahimnia, B. and Beamon, B. (2017) Green Supply Chain Network Design with Stochastic Demand and Carbon Price. *Annals of Operations Research*, **250**, 463-485. <https://doi.org/10.1007/s10479-015-1936-z>
- [6] 林殿盛, 张智勇, 王佳欣, 等. 需求不确定下的低碳物流配送中心选址[J]. 控制与决策, 2020, 35(2): 492-500.
- [7] Fahimnia, B., Sarkis, J. and Eshragh, A. (2015) A Tradeoff Model for Green Supply Chain Planning: A Leanness-versus-Greenness Analysis. *Omega*, **54**, 173-190. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.01.014>
- [8] Benjaafar, S., Li, Y. and Daskin, M. (2013) Carbon Footprint and the Management of Supply Chains: Insights from Simple Models. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, **10**, 99-116. <https://doi.org/10.1109/tase.2012.2203304>
- [9] Kotegawa, M., Kinoshita, Y. and Yamada, T. (2024) Global Supply Chain Network Design under Cap-and-Trade System and Analysis of Carbon Price and Emission Allowance. *Green and Low-Carbon Economy*, **3**, 159-170. <https://doi.org/10.47852/bonviewglce42022351>
- [10] 程栋, 杜颖, 程发新. 低碳供应链协调关键影响因素识别[J]. 统计与决策, 2025, 41(4): 161-166.
- [11] 张令荣, 彭博, 程春琪. 基于区块链技术的低碳供应链政府补贴政策策略研究[J]. 中国管理科学, 2023, 31(10): 49-60.
- [12] 赵娜, 张佳, 邵景干, 等. 基于 NSGA-II-TOPSIS 算法的低碳公路施工调度方案多目标优化研究[J]. 公路, 2025, 70(9): 199-206.
- [13] Chaabane, A., Ramudhin, A. and Paquet, M. (2012) Design of Sustainable Supply Chains under the Emission Trading Scheme. *International Journal of Production Economics*, **135**, 37-49. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.10.025>
- [14] Hua, G., Cheng, T.C.E. and Wang, S. (2011) Managing Carbon Footprints in Inventory Management. *International Journal of Production Economics*, **132**, 178-185. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2011.03.024>
- [15] Zakeri, A., Dehghanian, F., Fahimnia, B. and Sarkis, J. (2015) Carbon Pricing versus Emissions Trading: A Supply Chain Planning Perspective. *International Journal of Production Economics*, **164**, 197-205. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.11.012>
- [16] Brandenburg, M. (2015) Low Carbon Supply Chain Configuration for a New Product—A Goal Programming Approach. *International Journal of Production Research*, **53**, 6588-6610. <https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1005761>
- [17] Dekker, R., Bloemhof, J. and Mallidis, I. (2012) Operations Research for Green Logistics—An Overview of Aspects, Issues, Contributions and Challenges. *European Journal of Operational Research*, **219**, 671-679. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.11.010>
- [18] 王伟哲. 考虑碳排放的“仓到仓”冷链运输路径优化研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- [19] 钱志峰. 基于再制造过程创新的闭环供应链投资及运作策略研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2022.
- [20] Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. and Meyarivan, T. (2002) A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, **6**, 182-197. <https://doi.org/10.1109/4235.996017>

附录

附录 A. 惩罚系数灵敏度分析

将超容惩罚系数分别设为 2 倍、5 倍、10 倍生产成本, 三种设置下 Pareto 前沿形态及代表解在 Z_1/Z_2 上的差异均小于 0.1%, 表明本文采用 5 倍生产成本作为惩罚系数具有一定稳健性。