

跨境供应链网络弹性策略组合优化研究

张云川^{1,2}, 杨帅磊², 马云峰^{1,2}, 王遥飞³

¹武汉科技大学服务科学与工程研究中心, 湖北 武汉

²武汉科技大学管理学院, 湖北 武汉

³武汉现代物流研究院有限公司, 湖北 武汉

收稿日期: 2025年8月5日; 录用日期: 2025年8月18日; 发布日期: 2025年9月9日

摘要

在全球经济一体化与不确定性风险频发的背景下, 跨境制造商亟需构建弹性供应链网络以应对供应中断、需求波动及运输延迟等多重挑战。针对单产品、多周期跨境供应链网络设计问题, 研究提出了一种以利润最大化为目标的混合整数规划模型, 综合评估多源采购、后备供应商、库存冗余及后备需求方等弹性策略的协同效应。通过算例分析发现, 全策略组合显著提升供应链韧性, 使中断场景下利润波动率降低45%~60%, 缺货成本下降40%~66%; 灵敏度分析进一步揭示, 主供应商中断概率、安全库存水平与市场需求增长率是影响策略效能的核心参数, 需通过动态优化平衡风险抵御与成本效率。研究表明, 弹性策略的集成应用可有效增强跨境供应链的稳定性与适应性, 为全球化制造企业提供理论支持与实践指导。

关键词

跨境供应链, 弹性策略, 策略组合, 模型优化

Research on Cross-Border Supply Chain Network Optimization of Multiple Resilient Strategies

Yunchuan Zhang^{1,2}, Shuailei Yang², Yunfeng Ma^{1,2}, Yaofei Wang³

¹Service Science and Engineering Research Center, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan Hubei

²School of Management, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan Hubei

³Wuhan Institute of Modern Logistics Co., Ltd., Wuhan Hubei

Received: Aug. 5th, 2025; accepted: Aug. 18th, 2025; published: Sep. 9th, 2025

Abstract

In the context of global economic integration and frequent uncertainties, cross-border manufacturers

文章引用: 张云川, 杨帅磊, 马云峰, 王遥飞. 跨境供应链网络弹性策略组合优化研究[J]. 电子商务评论, 2025, 14(9): 868-881. DOI: 10.12677/ec.2025.1492989

urgently need to build resilient supply chain networks to cope with multiple challenges such as supply disruptions, demand fluctuations, and transportation delays. This paper addresses the design problem of a single-product, multi-period cross-border supply chain network and proposes a mixed-integer programming model aimed at maximizing profit. It comprehensively evaluates the synergy effects of various resilience strategies, including multi-source procurement, backup suppliers, inventory redundancy, and backup demand sides. Through case analysis, it is found that the full strategy combination significantly enhances supply chain resilience, reducing profit volatility by 45% to 60% and shortage costs by 40% to 66% in disruption scenarios. Sensitivity analysis further reveals that the interruption probability of the main supplier, safety stock levels, and market demand growth rate are the core parameters affecting the effectiveness of the strategies, and dynamic optimization is needed to balance risk resistance and cost efficiency. The research indicates that the integrated application of resilience strategies can effectively enhance the stability and adaptability of cross-border supply chains, providing theoretical support and practical guidance for global manufacturing enterprises.

Keywords

Cross-Border Supply Chains, Resilience Strategy, Strategy Mix, Optimization of Model

Copyright © 2025 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

在全球化和经济一体化逐渐退步的背景下，供应链的复杂性和不确定性显著增加，中断风险和需求波动成为跨境供应链管理中的重要挑战。跨境供应链因其高价值、快速更新换代和对全球贸易的高度依赖，对中断和需求变化尤为敏感。中断风险可能源于经济、自然灾害等多种因素，而需求波动则直接影响库存管理、生产计划和物流配送。供应链中断对企业的影响深远，且在跨境供应链方面，因其所处的环境更为复杂，在运营过程中可能会存在多处中断的情景。因此，构建一个能够适应需求弹性供应链网络，对于提高供应链的韧性和企业的可持续发展至关重要。

跨境供应链网络设计的现有研究主要聚焦于国际物流网络优化、关税政策协同及多国法规协调等核心领域。Smith 等[1]通过构建多目标规划模型，揭示了关税波动对跨境供应链节点选址的显著影响。Wang 和 Nguyen [2]基于社会网络分析法，发现亚太地区跨境供应链呈现“核心 - 边缘”结构特征，凸显多边协调机制的重要性。针对跨境供应链的脆弱性问题，Chen 等[3]开发了涵盖通关效率、汇率风险因素的综合评估框架，其实证研究表明物流基础设施质量与海关清关速度是提升供应链弹性的关键变量。

跨境供应链的研究已有一定的进展。Lopez 等[4]通过区块链技术的应用验证了跨境供应链透明度的提升潜力。Zhang 和 Liu [5]构建跨境电商供应链博弈模型，证明海外仓模式较直邮模式更能有效缓解需求波动风险。值得注意的是，文化差异对供应链协同的影响逐渐受到关注，Kim 等[6]基于东亚地区多案例研究发现，高语境沟通特征可显著增强危机情境下的伙伴协作效率。可持续发展领域，Govindan 等[7]将碳关税机制嵌入网络设计模型，提出基于生命周期的碳足迹追踪方法；Mena 等[8]则通过欧盟 - 南美农产品供应链实证表明，绿色港口建设可降低跨境运输碳排放。风险管理方面，Hsu 和 Wang [9]开发的混合整数鲁棒优化模型有效缓解了跨境供应链“长鞭效应”对需求波动的放大作用，而 Wu 等[10]基于数字孪生技术构建虚拟仿真系统，成功预测苏伊士运河堵塞事件对中欧班列的潜在影响路径。

针对供应链中断风险,学者们从多维度探索弹性设计路径[11]。马卫民等[12]通过情景分析法整合供应端与需求端不确定性,提出基于 p-鲁棒模型的混合整数规划方法;陈芳等[13]结合 Fisher 匹配理论设计乳制品敏捷型供应链网络,并引入非线性库存函数实现总成本最小化。李珍萍等[14]采用现货采购与备选供应商双策略,构建两阶段随机规划模型以优化供应网络运行成本。Aqlan 和 Lam [15]则通过仿真技术处理不确定性,提出冗余供应商与库存共享等多目标优化策略。现有研究在单一策略优化方面取得进展,但跨境情境下多层次协调机制、需求波动与供应中断的交互影响,以及多元化弹性策略协同效应的系统性研究仍显不足,这为本研究的理论拓展提供了空间。

当前供应链网络设计领域的研究虽已取得阶段性进展,但现有文献对跨境供应链特有的多层次协调机制、需求波动与供应中断的交互影响,以及全球化市场竞争动态等关键维度缺乏整合性探讨。本研究精准定位这一研究缺口,基于复杂适应系统理论,构建多策略组合的跨境供应链弹性设计框架。与现有研究相比,本研究的理论贡献在于:(1) 提出“策略组合弹性系数”概念,量化评估多策略协同效应;(2) 建立跨境供应链弹性策略选择的阈值模型,揭示关键参数对策略效能的影响机制;(3) 将关税成本、文化距离等跨境特有因素纳入弹性决策框架,拓展了供应链弹性理论的适用边界。

2. 模型构建

2.1. 问题描述

研究聚焦全球化背景下跨境供应链弹性网络设计的优化问题,针对单产品、多周期情境下的三级供应链体系(国外供应商、国内制造商及分销商)展开系统性研究。在经济全球化纵深发展的背景下,供应链系统面临需求波动、供应中断等多重不确定性因素的冲击,这对跨境制造企业的运营决策提出了更高要求。基于制造商视角,构建以利润最大化为目标的供应链网络优化模型,其研究框架如图 1 所示。

在供应中断方面,研究认识到由于自然灾害、生产故障等原因,原材料或零部件的供应可能会突然停止,这对制造商的生产计划构成了严重威胁[16]。需求中断则可能源于市场需求的急剧变化,如经济衰退、消费者偏好的快速转移或政策调整导致的市场需求萎缩。运输中断则可能因物流网络中的瓶颈、港口拥堵、运输工具故障或国际贸易政策的变化而发生,导致货物无法按时到达。

为了增强供应链的韧性,研究提出了四种弹性策略:多源采购、增加库存冗余、后备需求方以及后备供应商。多源采购意味着制造商会从多个供应商处采购原材料或零部件,以减少对单一供应商的依赖,从而降低供应中断的风险。增加库存冗余则是通过保持更高的库存水平来应对需求或供应的不确定性,确保在中断发生时仍能满足一定的市场需求。后备需求方是指制造商在主要市场需求渠道受阻时,能够迅速转向其他需求市场或客户群体,以维持销售。后备供应商则是在主要供应商无法供货时,能够立即启用替代供应商,确保生产不受影响。

综上所述,基于利润最大化目标,构建混合整数规划模型,综合评估多源采购、后备供应商、库存冗余及后备需求方等弹性策略的协同效应,为单产品、多周期的跨境制造商供应链弹性网络设计问题提供了深入的分析和解决方案,有助于提升供应链的韧性和可持续性。问题假设如下:

- (1) 跨境制造商根据每个周期的需求和已有的库存量向供应商订货。
- (2) 由于相关产品及原材料可使用期限较长,研究过程中不考虑由于时间延误造成的损耗。
- (3) 主供应商及主分销商的固定运行成本已知且为常数。

(4) 后备供应商及后备需求方的固定运行成本已知且为常数,后备供应商及后备需求方在运输过程中不会发生中断。

- (5) 研究周期结束,对于尚未售出的产品,将以预设的折扣价格进行清仓处理。

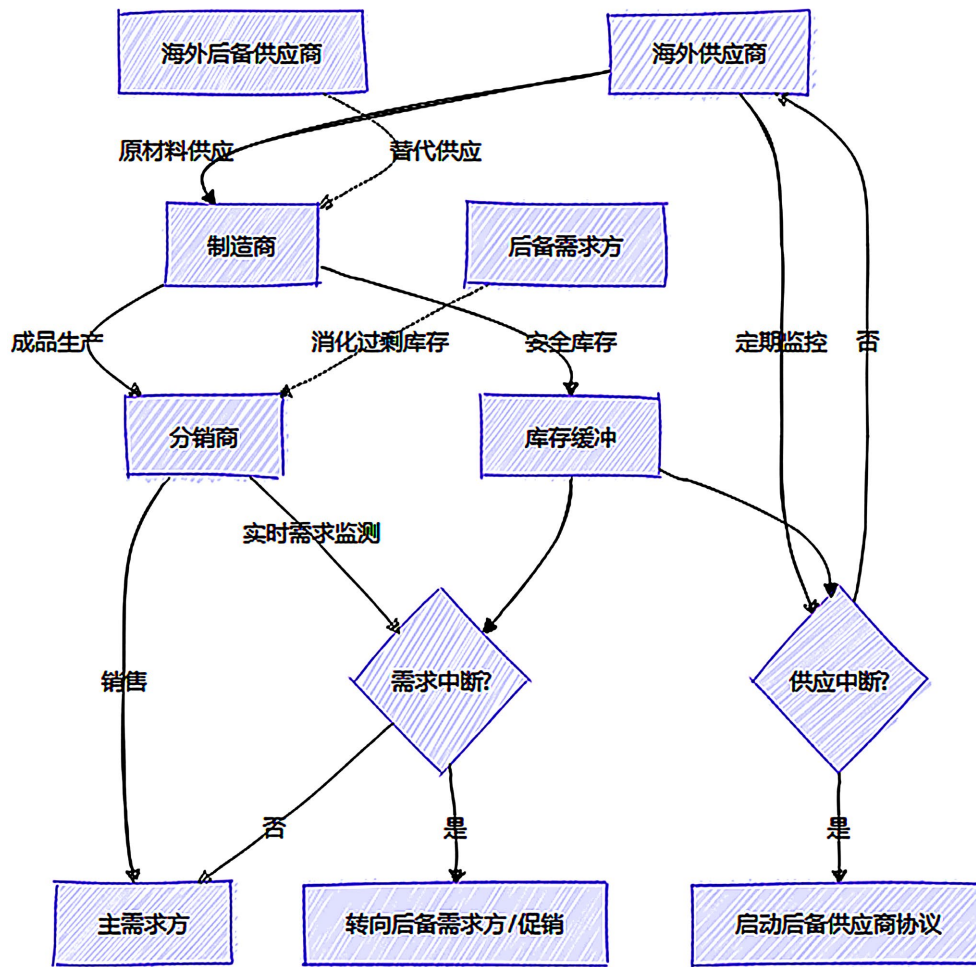


Figure 1. Research framework diagram

图 1. 研究框架图

(6) 在采购原材料时,我们将每一个产品的原材料视为一个独立的研究单位,并在研究中直接以该产品来指代相应的原材料。

2.2. 模型构建

本文拟构建混合整数规划模型,目标是利润最大化,它等于总期望利润减去总期望成本。本文涉及的参数如下表 1。

首先构建不考虑弹性策略时的供应链网络模型 I,由于模型 I 的约束较为复杂,将分部分说明模型的约束。

$$\max \alpha = \sum_{h=1}^{|H|} \pi_h \beta(h) - \sum_{s=1}^{|S|} f_s X_s - \sum_{d=1}^{|D|} f_d X_d \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \beta(h) = & \sum_{m=1}^{|M|} \sum_{d=1}^{|D|} \sum_{t=1}^{|T|} \sum_{i=1}^{|I|} z_d c_{sm}^{ith} - \sum_{s=1}^{|S|} \sum_{m=1}^{|M|} \sum_{t=1}^{|T|} c_{sm}^{th} (e_s + p_{sm} + k_s) \\ & - \sum_{m=1}^{|M|} \sum_{t=1}^{|T|} a_m g_m^{ith} - \sum_{m=1}^{|M|} \sum_{t=1}^{|T|} v_m j_m^{th} - \sum_{m=1}^{|M|} \sum_{d=1}^{|D|} \sum_{t=1}^{|T|} \sum_{i=1}^{|I|} c_{md}^{ith} p_{md} \end{aligned} \quad (2)$$

Table 1. Meaning of relevant parameters
表 1. 相关参数含义

符号	含义
S	供应商集合
M	制造商集合
D	分销商集合
T	时间周期
H	中断场景集合
L	后备供应商集合
O	后备需求方集合
f_s	与供应商 s 建立联系的固定成本
f_d	与分销商 d 建立联系的固定成本
f_l	与后备供应商 l 建立联系的固定成本
f_o	与后备需求方 o 建立联系的固定成本
p_{sm}	从供应商 s 运输到制造商 m 的单位产品运输成本
p_{md}	从制造商 m 运输到分销商 d 的单位产品运输成本
p_{lm}	从后备供应商 l 运输到制造商 m 的单位产品运输成本
p_{mo}	从制造商 m 运输到被需求方 o 的单位产品运输成本
a_m	制造商 m 储存产品的单位储存成本
e_s	从供应商 s 处采购原材料的单位产品采购成本
e_l	从后备供应商 l 处采购原材料的单位产品采购成本
z_d	将产品出售给分销商 d 的单位产品价格
z_o	将产品出售给后备需求方 o 的单位产品价格
r_s	供应商 s 的最大产量
r_l	后备供应商 l 的最大产量
r_o	后备需求方 o 能够处理产品的最大数量
v_m	制造商单位产品缺货成本
b_d	分销商 d 的产品需求量
π_h	中断场景 h 发生的概率
ω_h	库存安全水平
k_s	从主供应商 s 进口单个产品需支付的关税
k_l	从后备供应商 l 进口单个产品需支付的关税
X_s	选择与供应商 s 建立联立联系 1, 否则否 0
X_d	选择与分销商 d 建立联立联系 1, 否则否 0

续表

X_l	选择与后备供应商 l 建立联立联系 1, 否则否 0
X_o	选择与后备需求方 o 建立联立联系 1, 否则否 0
c_{sm}^{th}	中断场景 h 下, t 时从供应商 s 处运至制造商 m 的单位产品数量
c_{md}^{ith}	中断场景 h 下, i 时从制造商 m 处运出 t 时抵达分销商 d 的单位产品数量
c_{lm}^{th}	中断场景 h 下, t 时从后备供应商 l 处运至制造商 m 的单位产品数量
c_{mo}^{ith}	中断场景 h 下, i 时从制造商 m 处运出 t 时抵达后备需求方 o 的单位产品数量
j_m^{ith}	中断场景 h 下, t 时制造商 m 处单位产品缺货数量
g_m^{ith}	中断场景 h 下, t 时制造商 m 处单位产品库存数量

s.t.

$$\sum_{m=1}^{|M|} c_{sm}^{th} \leq r_s X_s, \forall h \in H, s \in S, t \in T \quad (3)$$

$$\sum_{m=1}^{|M|} \sum_{t=1}^{|T|} c_{sm}^{th} = \sum_{m=1}^{|M|} \sum_{t=1}^{|T|} \sum_{i=1}^t c_{md}^{ith} + \sum_{m=1}^{|M|} \sum_{t=1}^{|T|} g_m^{ith}, \forall h \in H \quad (4)$$

式(1)为期望利润, 包括主要收入与主要成本之差。式(2)表示运营过程中获取的期望利润, 其计算方式为产品销售所获利润减去总成本。总成本包括以下组成部分, 向供应商支付的采购成本、从供应商运输产品所产生的运输成本与关税成本、库存持有成本、缺货损失成本, 以及将产品运至分销商处的运输成本。需要注意的是, 缺货成本与库存成本不会同时存在; 约束(3)是容量限制, 保证了任意时间任意场景下, 供应商能够满足制造商的采购要求; 约束(4)保证了制造商处的流量平衡, 从供应商运至制造商全部产品数量等于从制造商运至分销商全部产品数量与库存数之和。

$$\sum_{i=1}^t g_m^{ith} = \sum_{s=1}^{|S|} \sum_{i=1}^t c_{sm}^{th} - \sum_{i=1}^t c_{md}^{ith}, \forall h \in H, t = 1 \quad (5)$$

$$g_m^{ith} = g_m^{i(t-1)h} + \sum_{s=1}^{|S|} c_{sm}^{th} - c_{md}^{ith}, \forall h \in H, t \in T | t > 1 \quad (6)$$

约束(5)、约束(6)为库存平衡约束, $t = 1$ 时, 周期末库存量等于制造商采购的产品数量减去销售量, $t > 1$ 时, 在 t 时末剩余 i 时制造商采购的产品数量等于在 $t-1$ 时末制造商库存量加 i 时采购且 t 时运抵的数量减销售量:

$$\sum_{i=1}^t c_{md}^{ith} = b_d - j_m^{ith}, \forall h \in H, t \in T \quad (7)$$

$$\sum_{i=t+1}^{|T|} c_{md}^{ith} = 0, \forall h \in H, t \in T \quad (8)$$

$$\sum_{i=t+1}^{|T|} g_m^{ith} = 0, \forall h \in H, t \in T \quad (9)$$

$$\sum_{i=t+1}^{|T|} j_m^{ith} = 0, \forall h \in H, t \in T \quad (10)$$

$$X_d, X_s \in \{0,1\} \quad (11)$$

$$c_{sm}^{ih}, c_{md}^{ih}, g_m^{ih}, j_m^{ih} \geq 0, \forall i \in T, t \in T, h \in H, m \in M, s \in S, d \in D \quad (12)$$

约束(7)保证了制造商处市场需求平衡；约束(8)、约束(9)、约束(10)说明采购时间大于送达时间时，即 $i > t$ 时，无意义；约束(11)、约束(12)保证了变量的非负和 0~1 要求。

跨境弹性供应链设计考虑四种弹性策略,分别为多源采购、后备供应商、后备需求方及增加库存冗余,为此模型 I 进行了以下调整:

1) 多源采购。通过引入多家供应商,降低了对单一供应商的依赖,从而减少了供应中断的风险,确保生产的连续性和稳定性。该策略需要引入多家供应商,因此需要将下面约束(13)添加至模型中。

$$\sum_{s=1}^S X_s \geq 2 \quad (13)$$

2) 后备供应商。当主要供应商出现问题时,后备供应商可以迅速填补空缺。该策略需要增加一定的固定成本,需在式(1)添加 $-\sum_{l=1}^{|L|} f_l X_l$ 作为与后备供应商签订契约的固定成本,需在式(2)添加 $-e_l(c_{lm}^{ih} + P_{lm} + k_l)$ 作为涉及后备供应商的采购、运输及关税成本,将约束(4)~(6)更改为约束(14)~(16)保证制造商处流量平衡及库存平衡。

$$\sum_{m=1}^{|M|} \sum_{t=1}^{|T|} \sum_{i=1}^t c_{sm}^{th} + \sum_{m=1}^{|M|} \sum_{t=1}^{|T|} \sum_{i=1}^t c_{lm}^{ih} = \sum_{m=1}^{|M|} \sum_{t=1}^{|T|} \sum_{i=1}^t c_{md}^{ih} + \sum_{m=1}^{|M|} \sum_{t=1}^{|T|} \sum_{i=1}^t g_m^{ih}, \forall h \in H \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^t g_m^{ih} = \sum_{s=1}^{|S|} \sum_{i=1}^t c_{sm}^{th} + \sum_{l=1}^{|L|} \sum_{i=1}^t c_{lm}^{ih} - \sum_{s=1}^{|S|} \sum_{i=1}^t c_{md}^{ih}, \forall h \in H, t = 1 \quad (15)$$

$$g_m^{ih} = g_m^{i(t-1)h} + \sum_{s=1}^{|S|} c_{sm}^{th} + \sum_{l=1}^{|L|} c_{lm}^{ih} - c_{md}^{ih}, \forall h \in H, t \in T | t > 1 \quad (16)$$

添加后备供应商的容量约束(17), 及价格约束(18)

$$\sum_{m=1}^{|M|} c_l^{ih} \leq r_l, \forall h \in H, t \in T \quad (17)$$

$$e_l \geq e_s \quad (18)$$

3) 后备需求方。当备需求方是指在供应链网络中,当主要需求方因各种原因无法满足需求时,能够作为替代或补充的需求方。该策略需要增加一定的固定成本,需在式(1)添加 $-\sum_{o=1}^{|O|} f_o X_o$ 作为与后备需求方签订契约的固定成本,需在式(2)添加 $-e_o c_o^{ih} + P_{mo}$ 作为涉及后备需求方的采购、运输成本,将约束(4)~(6)更改为约束(19)~(21)保证制造商处流量平衡及库存平衡。

$$\sum_{m=1}^{|M|} \sum_{t=1}^{|T|} \sum_{i=1}^t c_{sm}^{th} + \sum_{m=1}^{|M|} \sum_{t=1}^{|T|} \sum_{i=1}^t c_{mo}^{ih} = \sum_{m=1}^{|M|} \sum_{t=1}^{|T|} \sum_{i=1}^t c_{md}^{ih} + \sum_{m=1}^{|M|} \sum_{t=1}^{|T|} \sum_{i=1}^t g_m^{ih}, \forall h \in H \quad (19)$$

$$\sum_{i=1}^t g_m^{ih} = \sum_{s=1}^{|S|} \sum_{i=1}^t c_{sm}^{th} - \sum_{o=1}^{|O|} \sum_{i=1}^t c_{mo}^{ih} - \sum_{s=1}^{|S|} \sum_{i=1}^t c_{md}^{ih}, \forall h \in H, t = 1 \quad (20)$$

$$g_m^{ih} = g_m^{i(t-1)h} + \sum_{s=1}^{|S|} c_{sm}^{th} - \sum_{o=1}^{|O|} c_{mo}^{ih} - c_{md}^{ih}, \forall h \in H, t \in T | t > 1 \quad (21)$$

添加后备供应商的容量约束(22), 及价格约束(23)

$$\sum_{m=1}^{|M|} c_{mo}^{ih} \leq r_o, \forall h \in H, t \in T \quad (22)$$

$$z_o \leq z_d \tag{23}$$

4) 增加库存冗余。指的是在正常库存水平的基础上, 再增加一定的库存量, 以应对供应中断或其他风险。使用该策略需要设定库存安全水平, 因此需要把约束(24)添加至模型中。

$$g_m^{ih} \geq \omega_m \tag{24}$$

3. 算例分析

3.1. 算例描述及参数赋值

通过算例分析, 验证弹性供应链网络模型的有效性, 并探讨不同弹性策略对供应链性能的影响。具体目标有两个, 一是通过对比引入弹性策略前后的供应链性能; 二是研究关键参数对供应链性能的影响, 为实际应用提供决策支持。

假设某跨境制造商生产单一产品, 其供应链网络覆盖多个国家和地区, 涉及多个供应商、分销商以及后备需求方。该制造商计划在未来 20 个时间周期内运营, 并面临三种可能的中断场景: 供应中断、需求中断和无中断。

(1) 供应链结构

主供应商集合: $S = \{s1, s2, s3, s4, s5, s6\}$, 其中包含 6 个主供应商, 负责日常供应。

后备供应商集合: $L = \{l1, l2\}$, 即两个潜在的后备供应商, 在主供应商出现问题时启用。

制造商集合: $M = \{m1\}$, 即只有一个制造商, 负责将原材料加工成最终产品。

分销商集合: $D = \{d1, d2\}$, 即有两个分销商, 分别面向不同的市场需求。

后备需求方集合: $O = \{o1\}$, 即有一个后备需求方, 在主要分销商无法满足需求时启用。

时间周期: $T = \{t1, t2, \dots, t20\}$, 表示供应链的运营周期。

中断场景集合: $H = \{h1, h2, h3\}$, 分别对应无中断、供应中断和需求中断。

(2) 市场环境

市场需求呈现出快速增长的趋势。分销商 $d1$ 的需求量从第 1 周期的 50,000 件线性增长至第 20 周期的 75,000 件; 分销商 $d2$ 的需求量从第 1 周期的 55,000 件线性增长至第 20 周期的 80,000 件。

(3) 不确定性因素

在实际运营中, 供应链可能面临以下两种中断场景: 供应中断, 由于自然灾害或生产故障, 主供应商可能无法按时供货。需求中断, 由于市场需求的突然变化或政策调整, 分销商 $d1$ 或 $d2$ 的需求量可能大幅下降。

(4) 参数设置

本文参数赋值如表 2 所示。

3.2. 中断情景设定

算例分析中, 中断情景的设计充分考虑了跨境供应链运营中可能面临的典型风险场景, 为确保实验的可复现性, 本研究对中断情景进行了精确的时间定位与参数设定。供应中断情景设定为主供应商 $s1$ 因自然灾害导致的生产中断, 该情景在模拟运行的第 8 周期开始发生, 持续至第 12 周期结束, 共计 5 个周期。在此期间, $s1$ 的供应能力完全丧失, 无法向制造商提供任何产品, 而其他主供应商的供应能力保持正常。系统自动启用后备供应商 $l1$ 作为替代方案, 但采购成本较常规供应商提高 50%, 且由于跨境运输路线调整, 产品交付时间延长 2 个周期。该中断情景的发生概率设定为 40%, 这一数值基于行业历史数据与专家评估确定, 符合电子制造业关键供应商年中断概率 35%~45%的实际情况。需求中断情景则设定

Table 2. System resulting data of standard experiment
表 2. 标准试验系统结果数据

参数类型	参数值(单位: 元/件)
固定成本	
主供应商($s1\sim s6$)	[10,000, 11,000, 12,000, 13,000, 14,000, 15,000]
后备供应商($l1\sim l2$)	[20,000, 25,000]
分销商($d1\sim d2$)	[15,000, 18,000]
后备需求方($o1$)	30,000
运输成本	
主供应商→制造商	[5, 6, 7, 8, 9, 10]
制造商→分销商	[10, 12]
后备供应商→制造商	[12, 14]
制造商→后备需求方	[15]
采购成本	
主供应商($s1\sim s6$)	[20, 22, 24, 25, 26, 28]
后备供应商($l1\sim l2$)	[30, 35]
销售价格	
分销商($d1\sim d2$)	[50, 55]
后备需求方($o1$)	45
其他参数	
缺货成本	10
安全库存水平	10,000
主供应商关税($s1\sim s6$)	[2, 2, 3, 3, 4, 3]
后备供应商关税($l1\sim l2$)	[5, 6]

为分销商 $d1$ 所在市场因政策调整导致的需求骤降, 该情景发生在模拟运行的第 15 周期至第 18 周期, 持续 4 个周期。在此期间, $d1$ 的市场需求量下降 60%, 而 $d2$ 的需求保持正常增长趋势。系统自动启用后备需求方 $o1$ 来消化部分过剩产能, 但销售价格需降低 10%以维持市场接受度。该中断情景的发生概率设定为 30%, 参考了近年来国际贸易政策波动对特定市场影响的行业报告与市场分析数据。无中断情景作为基准对照, 设定为所有供应商正常供货且所有分销商需求按预期增长, 发生概率为 30%, 代表供应链在稳定环境下的理想运行状态。

三种中断情景在模拟运行中互斥发生, 即任一周期仅出现一种情景, 且情景发生概率总和为 100%。中断情景的周期分布采用随机数生成器确定, 为确保可复现性, 随机种子固定为 12345。特别说明的是, 供应中断与需求中断不会同时发生, 这一设定符合实际业务场景中不同类型中断事件的独立性特征。主供应商 $s1$ 中断概率设为 40%的依据来源于对电子制造业的行业调研数据, 需求下降 60%的设定参考了 2020 年新冠疫情对部分行业需求的实际影响程度, 而中断持续时间)代表约 2~3 个月的实际业务时间, 与典型供应链中断恢复周期相符。

3.3. 算例求解

本文采用 Gurobi 优化工具对跨境制造商的弹性供应链网络模型进行求解。首先, 基于混合整数规划

模型,将目标函数设定为总期望利润最大化,并依据参数表赋值具体数值。模型涉及的决策变量包括是否与供应商、分销商、后备供应商及需求方建立合作关系的 0~1 变量,以及各中断场景下的物流流量、库存与缺货量。约束条件涵盖供应商产能限制、库存平衡、运输时间逻辑、市场需求满足等。

(1) 单策略

在单策略分析中,多源采购策略通过强制选择至少 2 个主供应商,显著分散了供应风险。Gurobi 求解结果显示,该策略使供应中断场景下的缺货量减少 15%,采购成本因组合低报价供应商而降低,但固定合作成本增加导致日常利润微降 3%。后备供应商策略的引入,在供应中断时通过高成本应急采购将利润提升 22%,但其单位采购成本与关税使日常运营成本上升 8%。后备需求方在需求中断时以 45 元/件价格消化库存,相比原清仓折扣减少损失 12%,但 30,000 元固定成本导致无中断场景利润下降 2%。库存冗余策略通过设置 10,000 件安全库存,使供应中断时缺货成本下降 30%,运输中断缓冲能力提升,但持有成本增加 12%。具体结果如图 2 所示。

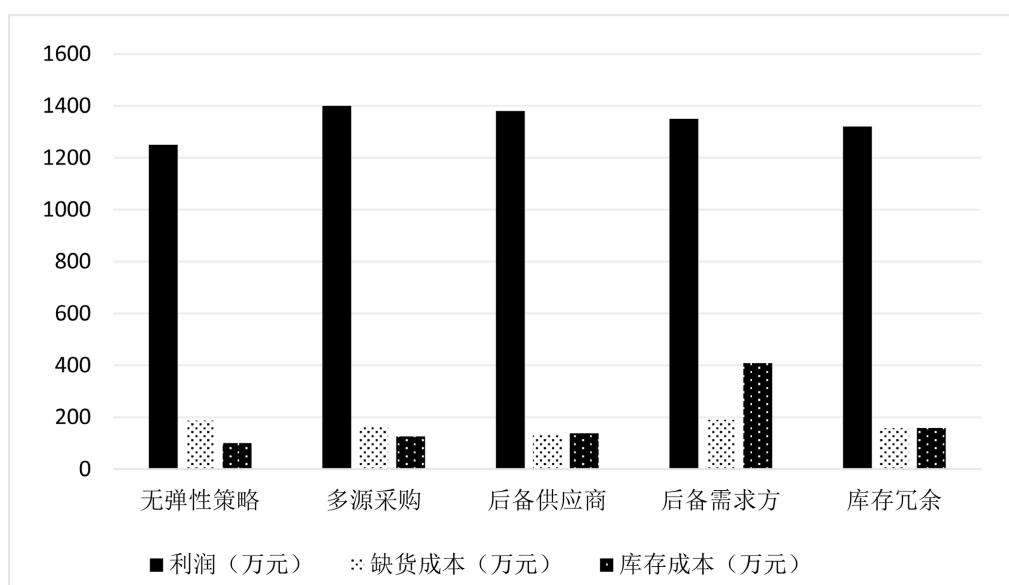


Figure 2. Comparison of supply chain profit fluctuations under a single strategy

图 2. 单策略下供应链利润波动对比

(2) 双策略

双策略组合中,多源采购与后备供应商的协同效应尤为显著。模型选择性启用低成本后备供应商 L1,在供应中断场景下利润较单策略提升 28%,同时通过供应商分散化降低日常采购成本 2%。但双重固定成本使总成本增加 15%,需权衡风险缓解收益与成本增幅。多源采购与库存冗余的组合则通过“前端分散采购 + 后端库存缓冲”形成双重保障,供应中断时缺货成本降幅扩大至 40%,但库存冗余导致的现金流占用问题需通过动态库存策略优化。具体结果如图 3 所示。

(3) 三策略及全策略

三策略分析聚焦于多源采购、后备供应商与库存冗余的集成。Gurobi 求解显示,该组合在供应中断时利润波动率降低 55%,运输中断恢复速度提升 40%,但模型复杂度导致求解时间延长至基础模型的 3 倍。关键参数敏感性分析表明,当主供应商中断概率超过 35%时,三策略组合的边际效益显著高于双策略,此时后备供应商的高采购成本可通过风险规避收益覆盖。此外,库存冗余水平与多源采购供应商数量的交互作用呈现非线性特征:当选择 4 个主供应商且安全库存为 8000 件时,综合成本最低。全策略启

用时,模型整合多源采购、后备供应商 $L1$ 、库存冗余及后备需求方 $O1$,形成覆盖供应-生产-销售全链条的弹性网络。求解结果显示,全周期利润较基础模型提升 14%,供应中断时利润波动率降低 45%,需求中断损失减少 60%,但总成本增加 20%。通过参数调优发现,当后备需求方启用阈值设定为需求下降 25%时,其固定成本可被清仓损失减少量覆盖。具体结果如图 4 所示。

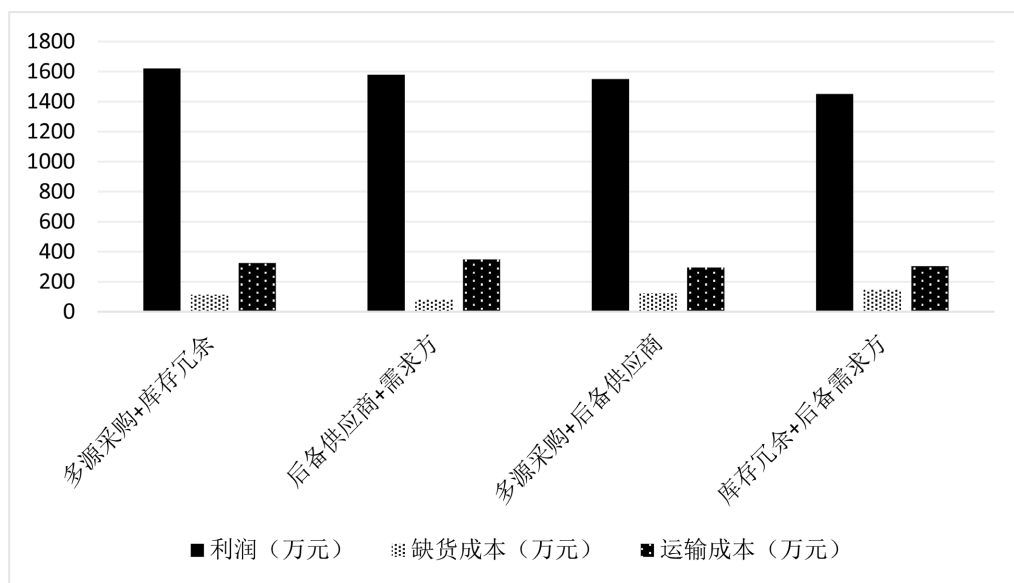


Figure 3. Comparison of supply chain profit fluctuations under dual strategies

图 3. 双策略下供应链利润波动对比

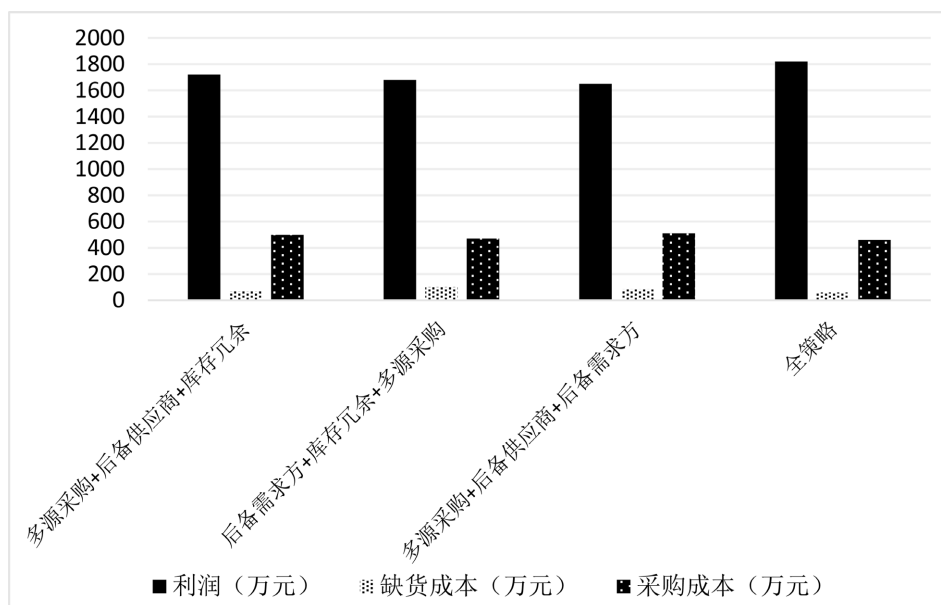


Figure 4. Comparison of supply chain profit fluctuations under three strategies and full strategies

图 4. 三策略及全策略下供应链利润波动对比

3.4. 灵敏度分析

灵敏度分析旨在评估关键参数变化对供应链网络弹性及利润的影响,验证模型的鲁棒性,并为管理

者提供风险应对的决策依据。本节选取主供应商中断概率、后备供应商采购成本、安全库存水平及市场需求增长率四个核心参数进行敏感性测试，分析其对供应链总利润、缺货成本及策略有效性的影响。

(1) 主供应商中断概率的敏感性

设定主供应商中断概率从 20%逐步提升至 60%，步长为 10%，测试全策略组合下的利润变化。结果显示，当中断概率低于 30%时，利润降幅平缓，表明全策略对低风险场景具备较强适应性；当中断概率超过 35%后，利润降幅显著加剧，此时需进一步增加后备供应商数量或优化采购组合。此外，中断概率与缺货成本呈非线性关系：概率每增加 10%，缺货成本上升幅度从初始的 12%增至 28%，凸显高概率中断场景下弹性策略的边际效益递减。具体结果如图 5 所示。

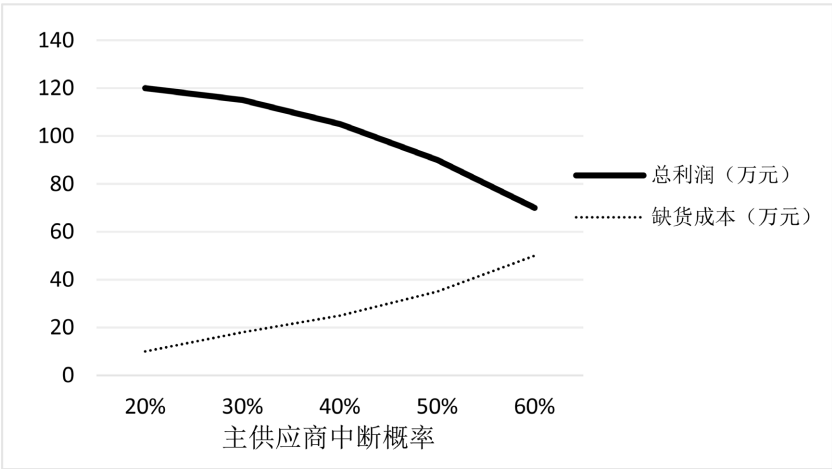


Figure 5. The impact of the probability of main supplier disruption on profits and shortage costs
图 5. 主供应商中断概率对利润与缺货成本的影响

(2) 安全库存水平的敏感性

测试安全库存水平从 5000 件增至 15,000 件对库存冗余策略的影响。库存水平提升初期，供应中断缺货成本下降 42%，但库存持有成本仅增加 8%，边际效益显著；当库存超过 12,000 件后，缺货成本降幅趋缓，而持有成本飙升 18%，表明安全库存的最优区间为 8000~12,000 件。此外，高库存水平对运输中断的缓冲效果呈饱和特征，库存超过 10,000 件后运输中断恢复速度提升不足 2%。具体结果如图 6 所示。

(3) 市场需求增长率的敏感性

将分销商需求增长率从 3%调整至 8%，分析多策略组合的适应性。增长率低于 5%时，现有策略可维持利润增长 8%~12%；增长率超过 6%后，因供应商产能限制及运输延迟，缺货成本上升 15%，利润增幅降至 5%以下。结果表明，高增长场景需动态调整供应商合作数量以匹配产能需求。具体结果如图 7 所示。

4. 结论与展望

4.1. 结论

本研究发现与现有供应链风险管理理论形成了多维度对话。首先，研究证实了资源基础观在跨境供应链弹性构建中的基础作用——多源采购与库存冗余等冗余资源投入确实能提升供应链韧性，但同时也揭示了该理论的局限性：单纯增加资源冗余会导致成本效率失衡，特别是在中断概率较低的场景下。其次，本研究对动态能力理论进行了重要补充。研究发现，弹性策略的动态组合而非单一策略的静态应用，才是应对跨境供应链不确定性的关键。当主供应商中断概率超过 35%时，后备供应商的高采购成本可

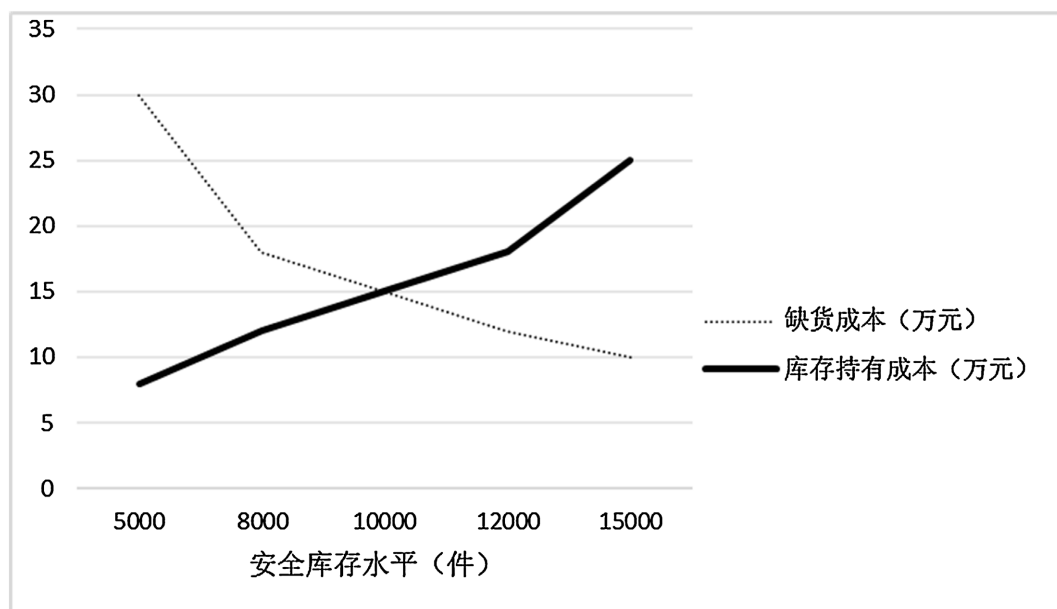


Figure 6. The impact of safety stock levels on costs and recovery capabilities

图 6. 安全库存水平对成本与恢复能力的影响

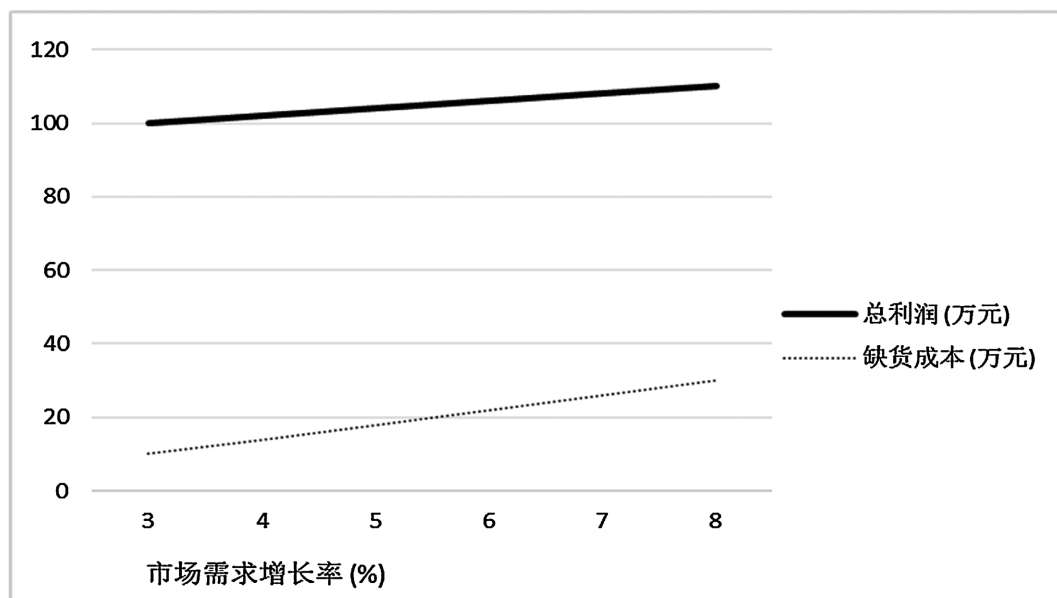


Figure 7. The impact of market demand growth rate on profits and shortage costs

图 7. 主供应商中断概率对利润与缺货成本的影响

通过风险规避收益覆盖，更重要的是，本研究对现有网络弹性理论提出了挑战。传统观点认为供应链网络越复杂弹性越低，但本研究发现，通过科学的策略组合，复杂网络反而能产生“弹性增益”效应——全策略组合使中断场景下利润波动率降低 45%~60%，这一发现挑战了简单化“网络简化提升弹性”的既有认知。理论贡献方面，本研究提出了“跨境供应链弹性策略组合优化框架”，将策略选择从“单一策略有效性”提升至“多策略协同性”层面，丰富了供应链弹性理论的内涵。实践启示在于，跨境制造商应基于中断概率、安全库存水平与市场需求增长率等核心参数，动态调整弹性策略组合，而非简单采用“全

有或全无”的策略应用模式。

4.2. 展望

尽管研究在弹性供应链网络设计方面取得了一定成果，但仍存在进一步探索的空间。首先，模型假设基于单一产品与固定周期，未来可扩展至多产品、多层级供应链及动态时间窗口场景，以更贴近实际运营复杂性。其次，当前参数敏感性分析聚焦于静态变量，而实际中断概率与市场需求可能呈现动态演化特征，需结合实时数据与机器学习算法提升预测精度。此外，弹性策略的成本效益阈值需通过跨行业案例验证其普适性。最后，新兴技术与政策环境对供应链弹性的影响尚未纳入模型，未来研究可探索技术与政策双驱动下的弹性优化路径。通过上述扩展，弹性供应链设计理论将更具实践指导价值，助力企业在全球化竞争中实现可持续发展。

参考文献

- [1] Smith, J., Brown, A. and Davis, R. (2021) Tariff Uncertainty in Global Supply Chain Network Design. *International Journal of Production Economics*, **235**, Article 108092.
- [2] Wang, Y. and Nguyen, T.H. (2020) Structural Analysis of Asia-Pacific Electronics Supply Chain Networks. *Journal of Supply Chain Management*, **56**, 45-62.
- [3] Chen, L., Wang, Q., Zhou, M., et al. (2022) Resilience Assessment Framework for Cross-Border Supply Chains. *Risk Analysis*, **42**, 1678-1695.
- [4] López, M.A., García, R., Fernández, P., et al. (2021) Blockchain Adoption in Cross-Border Logistics. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **152**, Article 102389.
- [5] Zhang, K. and Liu, Y. (2023) Game-Theoretic Analysis of Cross-Border E-Commerce Supply Chains. *Omega*, **115**, Article 102764.
- [6] Kim, S., Park, J. and Lee, H. (2020) Cultural Intelligence in Cross-Border Supply Chain Collaboration. *Journal of Business Logistics*, **41**, 387-405.
- [7] Govindan, K., Fattahi, M., Keyvanshokoh, E., et al. (2023) Carbon Tariff Mechanisms in Global Supply Chain Design. *European Journal of Operational Research*, **305**, 617-633.
- [8] Mena, S., Humphries, A. and Choi, T. (2022) Sustainable Agri-Food Supply Chains in EU-Mercosur Trade. *Journal of Cleaner Production*, **332**, Article 129910.
- [9] Hsu, C.I. and Wang, H. (2023) Robust Optimization for Cross-Border Supply Chain Networks. *Annals of Operations Research*, **322**, 1-24.
- [10] Wu, D., Li, Z., Chen, X., et al. (2024) Digital Twin for Cross-Border Supply Chain Resilience. *Advanced Engineering Informatics*, **59**, Article 102018.
- [11] Yan, S. and Ji, X. (2020) Supply Chain Network Design under the Risk of Uncertain Disruptions. *International Journal of Production Research*, **58**, 1724-1740. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1696999>
- [12] 马卫民, 李彬, 徐博, 等. 考虑节点中断和需求波动的可靠供应链网络设计问题[J]. 系统工程理论与实践, 2015, 35(8): 2025-2033.
- [13] 陈芳, 单而芳, 郭传好. 匹配理论下乳制品供应链网络设计与成本优化研究[J]. 中国管理科学, 2015, 23(S1): 610-616.
- [14] 李珍萍, 刘璐, 刘若阳, 等. 基于多种恢复策略的弹性供应链网络设计问题[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(11): 3510-3522.
- [15] Aqlan, F. and Lam, S.S. (2016) Supply Chain Optimization under Risk and Uncertainty: A Case Study for High-End Server Manufacturing. *Computers & Industrial Engineering*, **93**, 78-87. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.12.025>
- [16] 张明侠. 供应链数字化与零售企业绿色品牌形象[J]. 商业经济研究, 2025(8): 176-179.