

基于交互式求解法的多目标汽车供应链研究

江志然¹, 李军祥^{1,2*}, 李玉璐¹

¹上海理工大学管理学院, 上海

²上海理工大学智慧应急管理学院, 上海

收稿日期: 2024年3月1日; 录用日期: 2025年4月2日; 发布日期: 2025年4月10日

摘要

在全球气候治理背景下, 针对汽车供应链多目标优化问题展开分析。基于运营成本、低碳排放及供应链韧性三大目标, 构建多目标规划模型, 并设定相关约束条件。通过交互式求解算法确定各目标函数的上下界阈值, 结合区间数据建立目标满意度评价函数, 并引入专家权重系数将多目标转化为单目标优化问题。仿真结果表明, 模型能够有效平衡经济性、环境效益与抗风险能力, 为多目标协同决策提供量化工具。研究成果拓展了供应链管理理论框架, 对汽车产业低碳转型与韧性提升具有实践指导意义。

关键词

多目标, 供应链, 韧性, 低碳

Study on Multi-Objective Automotive Supply Chain Optimization Based on an Interactive Optimization Approach

Zhiran Jiang¹, Junxiang Li^{1,2*}, Yulu Li¹

¹Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

²School of Intelligent Emergency Management, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Mar. 1st, 2024; accepted: Apr. 2nd, 2025; published: Apr. 10th, 2025

Abstract

Under global climate governance, the multi-objective optimization of automotive supply chains is investigated, focusing on operational costs, low-carbon emissions, and supply chain resilience. A multi-objective programming model is constructed with relevant constraints. An interactive solution algorithm determines upper and lower bound thresholds for each objective function. Interval

*通讯作者。

data are integrated to establish satisfaction evaluation functions, while expert-derived weight coefficients transform the multi-objective problem into a single-objective optimization framework. Simulation results demonstrate that the model effectively balances economic efficiency, environmental benefits, and risk resilience, serving as a quantitative decision-making tool for multi-objective coordination. The research expands the theoretical framework of green supply chain management and provides practical guidance for the automotive industry's low-carbon transition and resilience enhancement. The research findings have expanded the theoretical framework of supply chain management and provide practical guidance for the low-carbon transition and resilience enhancement of the automotive industry.

Keywords

Multi-Objective, Supply Chain, Resilience, Low-Carbon

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

为了应对全球气候变暖并推动经济高质量发展,中国在2020年9月第七十五届联合国大会上明确提出了“中国二氧化碳力争在2030年前达到峰值,努力争取在2060年前实现碳中和”的目标[1]。双碳背景下,汽车工业作为全球经济的重要组成部分之一,其对环境的影响日益凸显。汽车制造过程中的能源消耗、废弃物排放和运输等环节都对环境产生负面影响。特别是温室气体的排放问题,因此,实现汽车行业的可持续发展已成为各国政府和企业共同关注的焦点。

汽车供应链管理涉及到众多环节,包括供应商管理、生产计划、库存管理、物流运输等。在这个复杂的供应链网络中,汽车供应链管理需要考虑多个目标,如降低成本、减少碳排放、提高产品质量、提高供应链韧性等[2]。同样,不确定性因素非常多样化,可能来自市场需求波动、原材料供应中断、交通运输延误、自然灾害等方面[3]。这些不确定性因素会对供应链的稳定性和效率造成影响,进而影响到企业的经济效益和可持续发展目标的实现[4]。受近年的疫情影响,我国各产业供应链的稳定性均受到了一定的影响[5],对我国的经济韧性与中国高质量发展产生了一定负面影响[6],汽车供应链也不例外[7]。

本文研究的重点是考虑经济、可持续和韧性目标的三重权衡的汽车供应链。因此,该问题包括多目标规划,该模型根据专家建议给出折中的权重,结合所提出的交互式求解方案对该问题进行探究。

2. 多目标汽车供应链问题描述

该问题的结构是一个汽车供应链,由一组制造设施(i)从一组供应商(s)购买各种原材料,再制造产品并分销到各个销售区域(j)。需要开设收集中心(k)来收集和处理使用过的产品。然后,用过的产品被送到二手市场(l)出售给需要的用户、另一部分运输至回收厂(m),以回收使用后的旧产品。供应链节点索引见表1,决策变量见表2,参数及释义见表3。

Table 1. Index

表1. 索引

s	i	j	k	l	m
供应商	制造商	销售区域	收集中心	二手市场	回收厂

Table 2. Decision variables**表 2. 决策变量**

Q_{si}	Q_{ij}	Q_{jk}	Q_{kl}	Q_{km}
s 至 i 运输量	i 至 j 运输量	j 至 k 运输量	k 至 l 运输量	k 至 m 运输量

Table 3. Parameters and their explanations**表 3. 参数及释义**

参数	释义	参数	释义
d_j	j 的需求	ce_{jk}	j 到 k 的单位运输碳排放
p	单位产品利润	ce_{kl}	k 到 l 的单位运输碳排放
ψ_j	j 收集产品的占比	ce_{km}	k 到 m 的单位运输碳排放
a_j	i 固定成本	π_s	s 单位采购成本
b_k	k 固定成本	β_i	i 单位制造成本
c_{si}	s 到 i 的单位运输成本	χ_k	k 单位处理成本
e_{ij}	i 到 j 的单位运输成本	ε_m	m 单位处理成本
f_{jk}	j 到 k 的单位运输成本	ν_s	s 的产能
g_{kl}	k 到 l 的单位运输成本	φ_i	i 的产能
h_{km}	k 到 m 的单位运输成本	γ_k	k 的容量
ce_i	i 生产产品单位碳排放	η_m	m 的回收能力
ce_k	k 处理产品单位碳排放	p_s	s 供应中断概率
ce_m	m 处理产品单位碳排放	p_i	I 供应中断概率
ce_{si}	s 到 i 的单位运输碳排放	p_k	k 供应中断概率
ce_{ij}	i 到 j 的单位运输碳排放	α	区间置信度水平
t	供应商生产能力水平系数	g	客户需求水平系数

市场往往具有不确定性, 本文所述的产品价格、单位运输成本、采购成本、等一系列参数值往往随着市场需求变化而产生波动[8]。为了刻画更真实的市场情况, 本文参考文献[9]的处理方式, 对所有具有不确定性的参数设定为三个值, 分别是 θ^{pes} 、 θ^{mos} 和 θ^{opt} , 其中 θ^{pes} 表示悲观估计的值, θ^{opt} 表示乐观估计的值, θ^{mos} 表示最可能估计的值, 文中所给定的初始参数值为 θ^{mos} 。 z_1 和 z_2 可设定为随机数来控制参数所波动的范围, 式(3)即该参数的期望值作为最后设定的参数值。

$$\theta^{pes} = (1 - z_1) \theta^{mos} \quad (1)$$

$$\theta^{opt} = (1 + z_2) \theta^{mos} \quad (2)$$

$$E(\theta) = \frac{\theta^{pes} + 2\theta^{mos} + \theta^{opt}}{4} \quad (3)$$

3. 模型与求解

3.1. 经济性目标

为了提升整个供应链的经济性, 供应链企业会考虑降低供应链的经营成本。整个汽车供应链的经济性经营成本主要有六部分构成, 分别是:

1. 制造商(i)的收集中心(k)的固定资产成本(例如场地费用、设施费用等)之和 EC_1 ，市场上式(4)中这两个参数值 a_i 和 b_k 往往会有波动，参照式(3)，采用这两个参数的期望值来计算成本 EC_1 。

$$EC_1 = \sum_i E(a_i) + \sum_k E(b_k) \quad (4)$$

2. 供应商(s)原材料采购的成本以及向制造商(i)运输产品的运输费用之和 EC_2 ，市场上式(5)中这两个参数值 π_s 和 c_{si} 往往会有波动，参照式(3)，采用这两个参数的期望值乘以该环节运输量 Q_{si} 来计算成本 EC_2 。

$$EC_2 = \sum_s \sum_i (E(\pi_s) + E(c_{si})) Q_{si} \quad (5)$$

3. 制造商(i)的制造成本和向销售区域(j)运输产品的运输成本之和 EC_3 ，市场上式(6)这两个参数值 β_i 和 e_{ij} 往往会有波动，参照式(3)，采用这两个参数的期望值乘以该环节运输量 Q_{ij} 来计算成本 EC_3 。

$$EC_3 = \sum_i \sum_j (E(\beta_i) + E(e_{ij})) Q_{ij} \quad (6)$$

4. 收集中心(k)的处理成本和销售区域(j)向收集中心(k)运输产品的运输成本之和 EC_4 ，市场上式(7)中这两个参数值 χ_k 和 f_{jk} 往往会有波动，参照式(3)，采用这两个参数的期望值乘以该环节运输量 Q_{jk} 来计算成本 EC_4 。

$$EC_4 = \sum_j \sum_k (E(\chi_k) + E(f_{jk})) Q_{jk} \quad (7)$$

5. 收集中心(k)向二手市场(l)运输的运输成本之和 EC_5 ，市场上式(8)中的参数值 g_{kl} 往往会有波动，参照式(3)，采用这个参数的期望值乘以该环节运输量 Q_{kl} 来计算成本 EC_5 。

$$EC_5 = \sum_k \sum_l E(g_{kl}) Q_{kl} \quad (8)$$

6. 零件回收商(m)的处理成本和收集中心(k)向零件回收商(m)运输的运输成本之和 EC_6 ，市场上式(9)中两个参数值 h_{km} 和 ε_m 往往会有波动，参照式(3)，采用这两个参数的期望值乘以该环节运输量 Q_{km} 来计算成本 EC_6 。

$$EC_6 = \sum_k \sum_m (E(h_{km}) + E(\varepsilon_m)) Q_{km} \quad (9)$$

总的来说，供应链上的企业在自身产品处理过程中会尽可能降低产生的成本，以达到经济性供应链的目标。

因此，经济性目标函数表达式：

$$f_{cost}(x) = EC_1 + EC_2 + EC_3 + EC_4 + EC_5 + EC_6 \quad (10)$$

3.2. 可持续目标

整个汽车供应链的可持续目标主要体现在减少对环境的影响，考虑减少供应链的碳排放来减少对环境的影响，A 汽车制造公司供应链碳排放有五部分构成，分别是：

1. 供应商(s)向制造商(i)运输产品所产生的碳排放之和 SC_1 ，式(11)中 ce_{si} 表示供应商(s)向制造商(i)运输产品的单位运输碳排放量，乘以该环节运输量 Q_{si} 得出 SC_1 。

$$SC_1 = \sum_s \sum_i ce_{si} Q_{si} \quad (11)$$

2. 制造商(i)制造产品所产生的碳排放和制造商(i)向销售区域(j)运输产品所产生的碳排放之和 SC_2 , 式(12)中 ce_i 表示制造商(i)的单位制造碳排放量, ce_{ij} 表示制造商(i)向销售区域(j)运输产品的单位碳排放量, 乘以该环节运输量 Q_{ij} 得出 SC_2 。

$$SC_2 = \sum_i \sum_j (ce_i + ce_{ij}) Q_{ij} \quad (12)$$

3. 收集中心(k)处理产品所产生的碳排放和销售区域(j)向收集中心(k)运输产品的碳排放之和 SC_3 , 式(13)中 ce_k 表示收集中心(k)的单位处理产品的碳排放量, ce_{jk} 表示销售区域(j)向收集中心(k)运输产品的单位碳排放量, 乘以该环节运输量 Q_{jk} 得出 SC_3 。

$$SC_3 = \sum_j \sum_k (ce_k + ce_{jk}) Q_{jk} \quad (13)$$

4. 收集中心(k)向二手市场(l)运输产品的碳排放之和 SC_4 , 式(14)中 ce_{kl} 表示收集中心(k)向二手市场(l)运输产品的单位运输碳排放量, 乘以该环节运输量 Q_{kl} 得出 SC_4 。

$$SC_4 = \sum_k \sum_l ce_{kl} Q_{kl} \quad (14)$$

5. 零件回收商(m)处理产品所产生的碳排放和收集中心(k)向零件回收商(m)运输产品的碳排放之和 SC_5 , 式(15)中 ce_{km} 表示收集中心(k)向零件回收商(m)运输产品的单位运输碳排放量, ce_m 表示零件回收商(m)处理产品的单位碳排放量, 乘以该环节运输量 Q_{km} 得出 SC_5 。

$$SC_5 = \sum_k \sum_m (ce_{km} + ce_m) Q_{km} \quad (15)$$

总的来说, 原材料供应商, 制造商, 零件回收商的碳排放应尽量降低。供应链上的企业在自身产品处理过程中需要降低碳排放, 供应链上的企业在运输产品也应当降低碳排放, 以达到供应链的可持续性目标。

因此, 可持续目标的函数表达式:

$$f_{sus}(x) = SC_1 + SC_2 + SC_3 + SC_4 + SC_5 \quad (16)$$

3.3. 韧性目标

A 汽车制造公司供应链的韧性主要体现在降低中断风险造成的中断成本, 由此来降低产品的中断供应, 提升供应链韧性, 韧性目标主要有三部分组成:

1. 供应商(s)向制造商(i)运输产品过程中, 中断风险引起的中断成本之和 RC_1 , 式(17)中 p_s 和 p 往往会有波动, 参照式(3), 采用这两个参数的期望值乘以该环节运输量 Q_{si} 来计算中断成本 RC_1 。

$$RC_1 = \sum_s \sum_i E(p_s) Q_{si} E(p) \quad (17)$$

2. 制造商(i)向销售区域(j)运输产品的过程中, 中断风险引起的韧性成本之和 RC_2 , 式(18)中 p_i 和 p 往往会有波动, 参照式(3), 采用这两个参数的期望值乘以该环节运输量 Q_{ij} 来计算中断成本 RC_2 。

$$RC_2 = \sum_i \sum_j E(p_i) Q_{ij} E(p) \quad (18)$$

3. 销售区域(j)向收集中心(k)运输产品的过程中, 中断风险引起的韧性成本之和 RC_3 , 式(19)中 p_k 和 p 往往会有波动, 参照式(3), 采用这两个参数的期望值乘以该环节运输量 Q_{jk} 来计算中断成本 RC_3 。

$$RC_3 = \sum_j \sum_k E(p_k) Q_{jk} E(p) \quad (19)$$

总的来说，供应链上的企业之间的韧性体现主要表现为运输供应过程中的中断成本降低，综合考虑各供应点中断风险来尽量避免中断所带来的损失。

目标三韧性成本的函数表达式：

$$f_{res}(x) = RC_1 + RC_2 + RC_3 \quad (20)$$

3.4. 限制条件

整个汽车供应链的限制条件由以下部分构成，分别是：

所有的供应商向制造商运输的产品数量 Q_{si} 的总和不超过自身的生产能力限制，式(21)中 v_s^{mos} 代表供应商的生产能力的值。

$$\sum_i Q_{si} \leq v_s^{mos}, \quad \forall s \quad (21)$$

所有的制造商向销售区域收集的产品数量 Q_{ij} 的总和不超过自身的库存能力限制，式(22)中 φ_i^{mos} 代表制造商的制造能力的值。

$$\sum_j Q_{ij} \leq \varphi_i^{mos}, \quad \forall i \quad (22)$$

所有的收集中心向销售区域收集的产品数量 Q_{jk} 的总和不超过自身的收集能力限制，式(23)中 γ_k^{mos} 代表收集中心的收集量的值。

$$\sum_j Q_{jk} \leq \gamma_k^{mos}, \quad \forall k \quad (23)$$

所有的零件回收商向收集中心接收的产品数量 Q_{km} 的总和不超过自身处理能力限制，式(24)中 η_m^{mos} 代表零件回收商的回收量的值。

$$\sum_k Q_{km} \leq \eta_m^{mos}, \quad \forall m \quad (24)$$

所有的销售区域向制造商接收的产品数量 Q_{ij} 的总和不超过市场的需求量限制，式(25)中 d_j^{pes} 、 d_j^{mos} 代表销售区域的需求量的悲观值和可能值， d_j^{mos} 、 d_j^{opt} 代表销售区域的需求量的可能值和乐观值， g 代表客户需求系数。 α 表示在悲观和可能值区间置信度水平， $1-\alpha$ 表示在乐观和可能值区间置信度水度水平，不等式的右边表示最后预估的需求量。

$$\sum_i Q_{ij} \leq \alpha g \left(\frac{d_j^{pes} + d_j^{mos}}{2} \right) + (1-\alpha) g \left(\frac{d_j^{mos} + d_j^{opt}}{2} \right), \quad \forall j \quad (25)$$

所有的制造商向供应商接收的产品数量 Q_{si} 的总和不超过自身的生产能力限制，式(26)中 φ_i^{mos} 代表供应商自身生产能力的值。

$$\sum_s Q_{si} \leq \varphi_i^{mos}, \quad \forall i \quad (26)$$

对每个销售区回收量的约束，即销售区运送至收集中心小于等于其回收量 Q_{jk} 的总和。式(27)中 ψ_j^{mos} 表示市场上由收集中心回收的产品占比，不等式的左边括号内的式子边表示最后预估的需求量，详细释义参照式(25)。

$$\psi_j^{mos} \times g\left(\alpha\left(\frac{d_j^{pes} + d_j^{mos}}{2}\right) + g(1-\alpha)\left(\frac{d_j^{mos} + d_j^{opt}}{2}\right)\right) \leq \sum_k Q_{jk}, \quad \forall j \quad (27)$$

式(28)表示制造商从供应商运进量 Q_{si} 和运往销售区的运输量 Q_{ij} 二者总量相等约束。

$$\sum_s Q_{si} = \sum_j Q_{ij}, \quad \forall i \quad (28)$$

式(29)表示对每个销售区域运进量 Q_{ij} 和运出的运输量 Q_{jk} 二者总量相等约束。

$$\sum_i Q_{ij} = \sum_k Q_{jk}, \quad \forall j \quad (29)$$

式(30)表示收集中心往外运输 Q_{jk} 的总量相等与二手市场接收量 Q_{kl} 和零件回收商接收量 Q_{km} 的总量约束。

$$\sum_j Q_{jk} = \sum_l Q_{kl} + \sum_m Q_{km}, \quad \forall k \quad (30)$$

式(31)表示对收集中心运进量 Q_{kl} 和销售市场接收量 Q_{jk} 相等的约束, n 表示销售到客户手中的产品被收集中心回收的占比。

$$\sum_l Q_{kl} = n \times \sum_j Q_{jk}, \quad \forall k \quad (31)$$

式(32)表示决策变量非负约束。

$$Q_{si}, Q_{ij}, Q_{jk}, Q_{kl}, Q_{km} \geq 0, \quad \forall s, i, j, k, l, m \quad (32)$$

3.5. 多个目标化为单目标函数

本研究所采用的方法是交互式求解法, 首先分为三个情景计算经济性, 可持续性和韧性的目标值。

情景 1: 优先考虑经济性目标, 按照限制条件式(21)~(32)运行式(10)的优化函数 $\min f_{cost}(x)$, 解出五个决策变量后, 由于另外两个目标的目标值均受这五个决策变量控制, 可将决策变量代入式(16)和(20)得出情景 1 可持续性和韧性的目标值。

情景 2: 优先考虑可持续性目标进行目标值求解。

情景 3: 优先考虑韧性目标进行目标值求解。

三个情景会有九个目标值, 详见下节仿真部分。最后将它们的上限值 θ^u 和下限值 θ^l 作为三个目标值上界和下界。得出隶属度函数评估三个目标满意度水平, 结合专家建议的权重化为单目标函数 $U(x)$ 。

式(33)中 $u_{oc}(x)$ 表示经济性目标的满意度函数, 经济性目标函数值越小, 满意度水平越高。

$$u_{oc}(x) = \begin{cases} 0, & f_{oc}^u < f_{oc} \\ \frac{f_{oc}^u - f_{oc}}{f_{oc}^u - f_{oc}^l}, & f_{oc}^l < f_{oc} \leq f_{oc}^u \\ 1, & f_{oc} \leq f_{oc}^l \end{cases} \quad (33)$$

式(34)中 $u_{sus}(x)$ 表示可持续性目标的满意度函数, 可持续性目标函数值越小, 满意度水平越高。

$$u_{sus}(x) = \begin{cases} 0, & f_{sus}^u < f_{sus} \\ \frac{f_{sus}^u - f_{sus}}{f_{sus}^u - f_{sus}^l}, & f_{sus}^l < f_{sus} \leq f_{sus}^u \\ 1, & f_{sus} \leq f_{sus}^l \end{cases} \quad (34)$$

式(35)中 $u_{res}(x)$ 表示韧性目标的满意度函数, 韧性目标函数值越小, 满意度水平越高。

$$u_{res}(x) = \begin{cases} 0, & f_{res}^u < f_{res} \\ \frac{f_{res}^u - f_{res}}{f_{res}^u - f_{res}^l}, & f_{res}^l < f_{res} \leq f_{res}^u \\ 1, & f_{res} \leq f_{res}^l \end{cases} \quad (35)$$

结合专家所建议的权重值 w_1 、 w_2 和 w_3 , 式(36)表示三个目标最后的满意度的优化函数, $U(x)$ 受限制于式(21)~(32)

$$\min U(x) = w_1 u_{oc}(x) + w_2 u_{sus}(x) + w_3 u_{res}(x) \quad (36)$$

s.t. (21)~(32)

4. 仿真分析

应用 matlab2022b 软件, 调用 cplex 求解器, 选择 A 汽车制造公司来展示所建议模型的适用性。A 汽车制造公司总部位于上海, 在不同区域(所在地为上海、苏州、无锡)拥有三家制造工厂。出于仿真实验目的, 假设最终产品小型车单车重量为一吨。专家对经济性目标、可持续目标以及韧性目标三者的权重为 0.2、0.4、0.4。 p 代表单位产品利润(元/吨), $p = 9000$ 。供应商、制造区和销售区域的单位运输成本和单位运输碳排放取决于它们所在的地区[10]。通过收集实际市场数据, 并运用统计方法对供应中断风险进行预处理, 拟合出最后供应中断风险参数的概率分布见表 4, 求解模型所需的参数见表 5。

Table 4. Parameter settings determined for a single location

表 4. 单个所在地所确定的参数设置

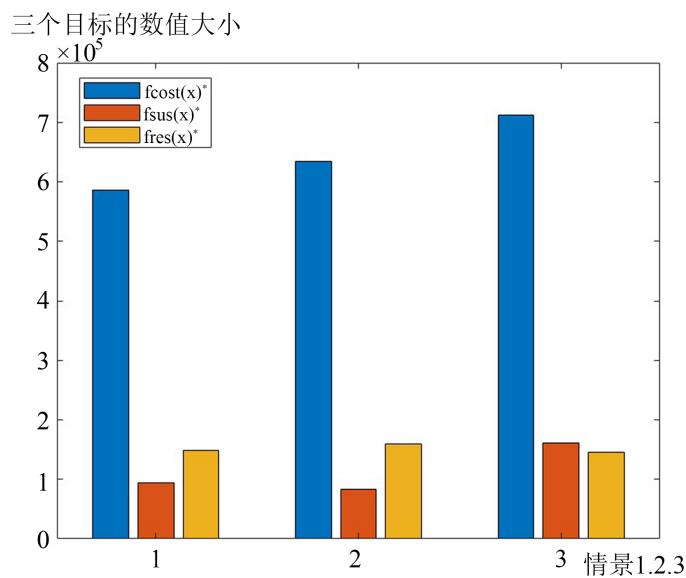
参数\所在地	上海	无锡	杭州	苏州	嘉兴
d_j (辆)	8000	6000	5000	\	\
ψ_j	50%	50%	50%	\	\
a_i (万元)	2000	1400	\	2000	\
b_k (万元)	1000	\	\	800	\
ce_i (KgCO ₂ /吨)	0.7	1.3	\	1.1	\
ce_k (KgCO ₂ /吨)	0.9	\	\	1.1	\
ce_m (KgCO ₂ /吨)	1.6	1.7	\	\	\
π_s (万元\吨)	6	3	5.5	5	3.5
β_i (万元\吨)	1.4	1.1	\	1.3	\
χ_k (元\吨)	300	\	\	200	\
ε_m (元\吨)	800	700	\	\	\
v_s (吨)	5000	2000	2500	3000	1000
φ_i (吨)	8000	4000	\	5000	\
γ_k (吨)	10,000	\	\	5000	\
η_m (吨)	5000	3000	\	\	\
p_s	0.15	0.24	0.21	0.17	0.28
p_i	0.23	0.21	\	0.26	\
p_k	0.18	\	\	0.21	\

Table 5. Parameter settings determined for two locations. The left value is the unit transportation cost (yuan/ton), and the right value is the unit transportation carbon emission (KgCO₂/ton)**表 5.** 两个所在地所确定的参数设置。左值为单位运输成本(元/吨)右值为单位运输碳排放量(KgCO₂/吨)

所在地	上海	苏州	无锡	嘉兴	杭州
上海	60\0.4	400\2	440\2.5	360\1.9	740\4
苏州	400\2	40\0.3	100\0.5	200\1.2	460\3.1
无锡	440\2.5	40\0.5	50\0.3	240\2	500\3.3
杭州	740\4	460\3.1	500\3.3	\	\
武汉	1340\9.1	1060\7.3	\	\	\
成都	2260\18.7	1980\16.9	\	\	\

Table 6. The objective function values after optimization for three different scenarios when the confidence level $\alpha = 0.1$
表 6. 置信度水平 $\alpha = 0.1$ 时三个不同情景优化后的函数目标值

情景	$f_{cost}(x)^*$ (单位/千元)	$f_{sus}(x)^*$ (单位/千克)	$f_{res}(x)^*$ (单位/千元)
情景 1	585,430	94,307	149,380
情景 2	634,680	83,783	159,670
情景 3	711,450	161,620	145,140

**Figure 1.** Comparison of the objective function values after optimization for three different scenarios when $\alpha = 0.1$ **图 1.** $\alpha = 0.1$ 时三个不同情景优化后的目标值对比**Table 7.** The objective function values after optimization for three different scenarios when the confidence level $\alpha = 0.9$
表 7. 置信度水平 $\alpha = 0.9$ 时三个不同情景优化后的函数目标值

情景	$f_{cost}(x)^{**}$ (单位/千元)	$f_{sus}(x)^{**}$ (单位/千克)	$f_{res}(x)^{**}$ (单位/千元)
情景 1	494,110	77,640	130,970
情景 2	542,900	69,911	133,990
情景 3	603,130	137,490	121,300

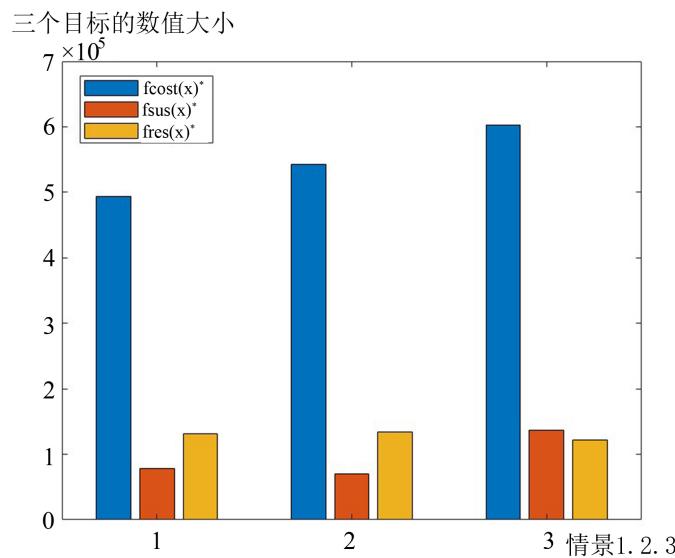


Figure 2. Comparison of the objective function values after optimization for three different scenarios when $\alpha = 0.9$

图 2. $\alpha = 0.9$ 时 3 个不同情景优化后的目标值对比

为了验证模型的普适性和鲁棒性,选取置信度水平 $\alpha = 0.1$ 与置信度水平 $\alpha = 0.9$ 计算各目标值。具体各目标值见表 6 和表 7。见图 1 和图 2 均可以得出,如果想考虑经济角度,只考虑最小化运营成本函数是最优策略。另一方面,从可持续性的角度来看,只考虑最小化碳排放是最优策略,而从韧性的角度来看,只考虑最小化韧性成本是最优策略。由此可得供应链的三个目标,即经济性、可持续性和韧性,在本质上都是相互冲突的。

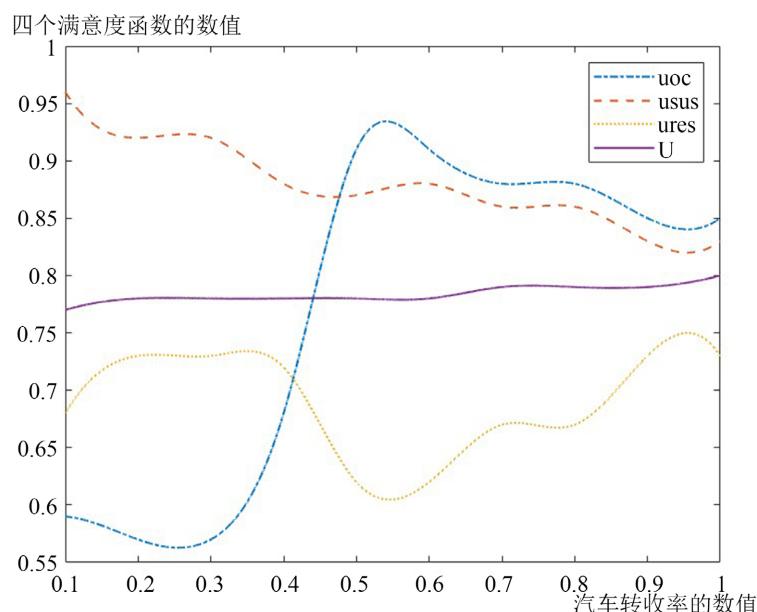


Figure 3. Sensitivity analysis of the resale rate of automobiles

图 3. 汽车再售率灵敏度分析

见图 3 可以得出,三个目标的满意度水平对于汽车再售率 n 的敏感性不同,整体的满意度水平呈略微上升的趋势。经济性目标的满意度水平在汽车在售率约 0.1 至 0.4 时水平较低,而在 0.5 至 1 较高,且

该段呈缓慢下降趋势。这表明在 0.4 至 0.5 汽车再售变化率区间经济性目标的满意度水平对汽车再收率的敏感性程度高。可持续性目标的满意度水平整体呈下降趋势。这表明可持续性目标的满意度水平会随着汽车再售率的上升而下降。整体而言，三个目标满意度水平随着汽车再售率的升高而趋同。

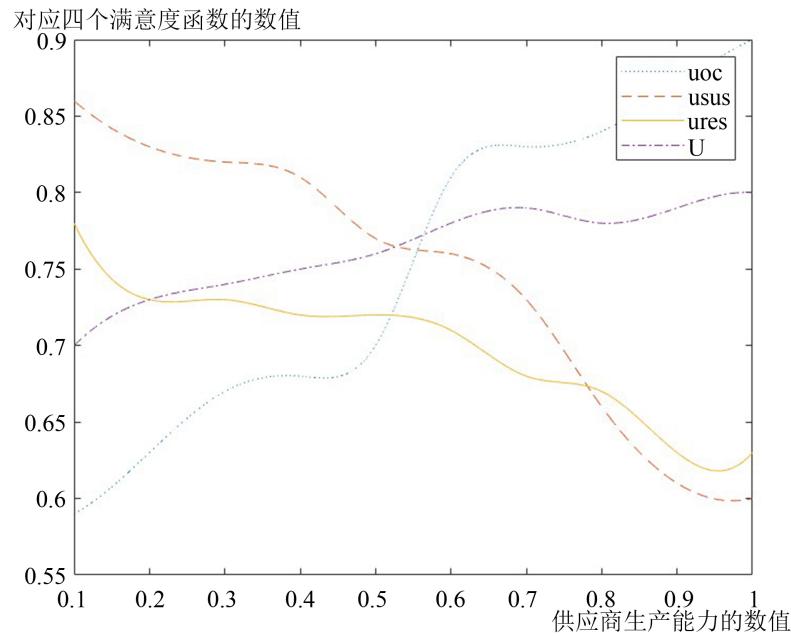


Figure 4. Sensitivity analysis of supplier production capacity level

图 4. 供应商生产能力水平灵敏度分析

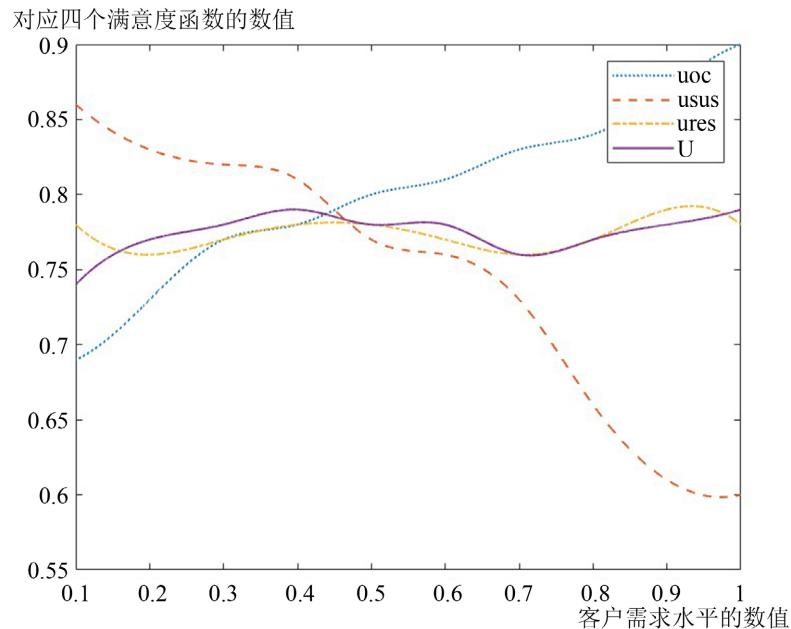


Figure 5. Sensitivity analysis of customer demand level

图 5. 客户需求水平灵敏度分析

由图 4 可以得出，三个目标的满意度水平对于供应商生产能力水平系数 t 的敏感性不同，整体的满意度水平呈略微上升的趋势。经济性目标的满意度水平在供应商生产能力水平系数约 0.1 至 0.3 时水平较低，

而在 0.8 至 1 较高, 且该段呈上升趋势。这表明在供应商生产能力水平系数变化率区间经济性目标的满意度水平对汽车再收率的敏感性程度高。可持续性目标的满意度水平整体呈下降趋势。这表明可持续性目标的满意度水平会随着供应商生产能力水平系数的上升而下降。整体而言, 经济性目标满意度水平随供应商生产能力上升而上升, 可持续性目标满意度和韧性目标满意度水平随供应商生产能力上升而下降。

由图 5 可以得出, 三个目标的满意度水平对于客户需求水平系数 g 的敏感性不同, 整体的满意度水平呈先上升后下降的趋势。运营成本目标的满意度水平在供应商生产能力水平系数约 0.1 至 0.3 时水平较低, 而在 0.7 至 1 较高, 且该段呈上升趋势。这表明在客户需求水平系数变化率区间经济性目标的满意度水平对汽车再收率的敏感性程度高。可持续性目标的满意度水平整体呈下降趋势。这表明可持续性目标的满意度水平会随着客户需求水平系数的上升而下降。韧性目标满意度水平对客户需求水平变化不明显。整体而言, 经济性目标满意度水平随客户需求水平上升而上升, 可持续性目标满意度随客户需求水平上升而下降。

5. 结论

本文以含有三个目标的 A 汽车供应链为研究对象, 运用交互式求解法得出三个目标上限值与下限值, 然后对三个目标确定各自的满意度函数。通过仿真分析, 为避免偶然性, 区间置信度水平为 $\alpha = 0.1$ 和 $\alpha = 0.9$ 时, 三个目标均表现为互相矛盾。采用专家建议三个目标权重的方式将多个目标化为单目标满意度函数, 重要参数汽车转售率, 供应商生产能力系数以及客户需求对三个目标满意度有着显著影响。本文的研究思路与研究方法能够为双碳背景下含有多目标的供应链研究提供参考。

参考文献

- [1] 习近平. 在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2020(28): 5-7.
- [2] 樊雪梅, 卢梦媛. 新冠疫情下汽车企业供应链韧性影响因素及评价[J]. 工业技术经济, 2020, 39(10): 21-28.
- [3] 王永贵, 高佳. 新冠疫情冲击、经济韧性与中国高质量发展[J]. 经济管理, 2020, 42(5): 5-17.
- [4] 赵雪琦, 高岩. 考虑多能供电差异的智能电网实时定价[J]. 上海理工大学学报, 2024, 46(4): 431-439.
- [5] 孙华平, 魏伟. 新冠疫情背景下中国嵌入全球价值链的韧性及断链风险[J]. 经济研究参考, 2020(6): 91-98.
- [6] 吕越, 邓利静. 着力提升产业链供应链韧性与安全水平——以中国汽车产业链为例的测度及分析[J]. 国际贸易问题, 2023(2): 1-19.
- [7] 郭宏, 郭鑫榆. 后疫情时代全球汽车产业链重构趋势及影响[J]. 国际贸易, 2021(8): 37-45.
- [8] Mari, S., Lee, Y. and Memon, M. (2016) Sustainable and Resilient Garment Supply Chain Network Design with Fuzzy Multi-Objectives under Uncertainty. *Sustainability*, **8**, Article 1038. <https://doi.org/10.3390/su8101038>
- [9] Jiménez, M., Arenas, M., Bilbao, A. and Rodriguez, M.V. (2007) Linear Programming with Fuzzy Parameters: An Interactive Method Resolution. *European Journal of Operational Research*, **177**, 1599-1609. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.10.002>
- [10] 李国志, 李宗植. 中国二氧化碳排放的区域差异和影响因素研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(5): 22-27.