

基于博弈论组合赋权改进物元可拓模型的新能源汽车制造企业供应链绩效评价研究

王禹皓^{1,2}, 范海雁^{1,2*}, 王旭豪^{1,2}

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: 2025年7月1日; 录用日期: 2025年7月31日; 发布日期: 2025年8月11日

摘 要

在全球气候变化与绿色发展的背景下, 新能源汽车制造企业的供应链绩效评价对于提升运营效率、优化资源配置, 实现可持续发展具有重要意义。针对现状供应链绩效评价研究在指标选取、理论框架和权重分配等方面的不足, 本研究结合博弈论组合赋权与改进物元可拓模型, 构建了一种新型的新能源汽车制造企业供应链绩效评价体系。首先, 基于ESG理论及行业特点, 从财务、顾客、运营、绿色环保和发展成长五个维度构建了包含15项指标的综合评价体系。其次, 采用变异系数法和熵权法分别计算各指标权重, 并运用博弈论进行组合优化, 以平衡不同赋权方法的差异, 提高权重分配的合理性。再次, 将组合权重引入物元可拓模型, 通过关联函数量化指标与绩效等级的匹配程度, 实现绩效的动态评价。最后, 以国内某知名新能源车企2018~2023年的数据为案例进行实证分析, 结果表明: 新能源汽车销售量、市场占有率和净资产收益率是影响供应链绩效的关键因素; 绿色环保维度表现较弱, 需重点关注; 企业绩效随时间推移显著提升, 验证了模型的有效性。

关键词

新能源汽车, 供应链绩效评价, 博弈论组合赋权, 物元可拓模型, ESG (环境、社会、公司治理)理论

Research on Supply Chain Performance Evaluation of New Energy Vehicle Manufacturing Enterprises Improved Matter-Element Extension Model Based on Game Theory Combined Weighting

*通讯作者。

文章引用: 王禹皓, 范海雁, 王旭豪. 基于博弈论组合赋权改进物元可拓模型的新能源汽车制造企业供应链绩效评价研究[J]. 运筹与模糊学, 2025, 15(4): 319-333. DOI: 10.12677/orf.2025.154217

Yuhao Wang^{1,2}, Haiyan Fan^{1,2*}, Xuhao Wang^{1,2}

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

²Smart Urban Mobility Institute, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Jul. 1st, 2025; accepted: Jul. 31st, 2025; published: Aug. 11th, 2025

Abstract

Under the backdrop of global climate change and green development, the supply chain performance evaluation of new energy vehicle manufacturing enterprises is of great significance for enhancing operational efficiency, optimizing resource allocation, and achieving sustainable development. In response to the deficiencies in the current research on supply chain performance evaluation in terms of indicator selection, theoretical framework, and weight allocation, this study combines game theory-based combined weighting and an improved matter-element extension model to construct a novel supply chain performance evaluation system for new energy vehicle manufacturing enterprises. Firstly, based on ESG theory and industry characteristics, a comprehensive evaluation system consisting of 15 indicators is established from five dimensions: finance, customers, operations, green environmental protection, and development and growth. Secondly, the coefficient of variation method and entropy weight method are used to calculate the weights of each indicator, and game theory is applied for combined optimization to balance the differences among different weighting methods and improve the rationality of weight allocation. Thirdly, the combined weights are introduced into the matter-element extension model, and the matching degree between indicators and performance levels is quantified through the correlation function to achieve dynamic performance evaluation. Finally, an empirical analysis is conducted using the data of a well-known domestic new energy vehicle manufacturer from 2018 to 2023. The results show that new energy vehicle sales volume, market share, and return on net assets are the key factors influencing supply chain performance; the performance in the green environmental protection dimension is relatively weak and requires focused attention; and the enterprise performance has significantly improved over time, verifying the effectiveness of the model.

Keywords

New Energy Vehicles, Supply Chain Performance Evaluation, Game Theory Combined Weighting, Matter-Element Extension Model, ESG (Environmental, Social, and Corporate Governance) Theory

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

全球气候变化已成为人类面临的重大挑战，减少碳排放、实现绿色发展已成为全球共识。对供应链绩效的科学评价不仅可以帮助提升运营效率，还可以优化库存管理，促进供应链协同，进而实现企业长期可持续发展。特别是在绿色、环保的战略下，聚焦新能源汽车企业供应链绩效评价体系的系统构建和实证分析，可以有效指导新能源汽车制造企业供应链管理的实践。

对于新能源汽车企业供应链的研究主要涉及竞争加剧、行业特性和创新路径三个方面。

国内外研究普遍认为，新能源汽车供应链竞争已进入高度激烈阶段。驱动因素首先源于市场主体的

多元化扩张：赵巧之等(2024)指出，传统车企的电动化转型与造车新势力的产能扩张，共同构成了基础性的双重竞争压力[1]。周天成等(2025)的实证研究进一步揭示，科技企业的跨界入局不仅增加了竞争者数量，更推动竞争格局从单一产品较量升级为全产业链生态竞争，其研究表明供应链协同能力已成为新能源汽车企业的关键竞争优势，尤其在应对原材料价格波动和芯片短缺等风险时表现突出[2]。

区别于传统燃油车，新能源汽车供应链展现出鲜明的行业特性。技术层面，林超(2024)强调，“三电系统”（电池、电机、电控）的高度集成大幅提升了供应链技术复杂度，要求供应商具备更强的协同研发能力[3]。政策层面，孙海鹏等(2020)通过对比分析国内外碳政策指出，企业必须建立全生命周期碳管理体系，其研究证实绿色供应链绩效已成为我国政策考核的核心指标[4]。

为应对竞争与挑战，学者们深入探索了创新实践路径。纵向整合方面，王革等(2024)通过案例分析发现，头部企业通过布局上游锂资源显著提升了供应链安全性[5]。合作模式创新上，张慧等(2025)对电池企业与整车厂的合资模式研究表明，深度战略合作能有效降低核心部件供应风险[6]。数字化管理领域，王超(2025)提出的基于区块链的碳足迹追踪系统，结合 B 企业等企业实践，验证了数字化工具对提升供应链透明度的作用[7]。展望未来，史文利(2008)强调，构建经济 - 环境 - 技术多维评价体系是优化新能源汽车供应链发展的关键方向[8]。

在供应链绩效评价研究方面，国内学者主要聚焦社会责任、环境和经济三个维度。

社会责任导向的高绩效是企业供应链管理的最终目标。社会责任导向的高绩效作为汽车制造企业供应链管理的核心目标，这不仅关乎企业声誉，更影响长期可持续发展。林志炳等(2021)实证研究表明，企业履行社会责任能显著提升供应链绩效，增强利益相关者信任[9]。环境维度，张韵文(2024)指出，绿色供应链管理能实现减排目标与社会效益的双赢，其提出的“绿色就业 - 低碳技术”协同模型被广泛引用[10]。经济维度，孔佳玲(2024)通过案例比较分析证实，优秀的环境社会绩效最终会转化为成本优势和财务回报[11]。这些研究共同支持了“三重底线”理论，即企业需平衡经济、环境和社会效益。

环境导向的绩效评价指标是为了构建更可持续更绿色低碳的价值链。关于这一点，Ma Lei 等(2022)提出了三层次模型：(1) 边界分析，从企业内部到供应链再到外部利益相关者；(2) 价值范围，从成本降低到客户价值提升再到共享价值；(3) 治理方式，从忽视供应链关系到渠道话语权，再到合作模式。在绿色价值链的构建过程中，供应链透明度直接影响到价值链的实际表现。近年来，关于可持续价值链或绿色价值链的研究逐步增加[12]。例如，Yang 等(2018)指出，产品服务系统(PSS)作为一种可持续商业模式，能通过整合产品与服务减少资源消耗，提升绩效。在供应链管理中，企业需协同上下游，通过环境目标设定、管理计划共享及联合行动优化整体绩效，实现减排与价值创造。其中，与上游合作可优化生产流程，与下游合作可改进产品设计。政府也鼓励供应链企业协同运营，共同推动节能减排目标[13]。

经济导向的绩效评价指标意味着供应链上下游合作与整合带来的潜在经济效益。例如，Ubaidullah 等(2018)指出，供应链上的企业通过信息共享与协作可以提升整个供应链的价值，增强市场竞争力[14]。Fakhar (2020)在研究废旧衣物逆向回收网络时表明，逆向物流渠道的整合不仅能够促进废弃物的高效再利用，还能创造更高的环境、经济和信息价值[15]。Nureen (2023)研究发现，供应商、客户与内部的整合有助于推动绿色产品和绿色生产流程的创新。显然，供应链上下游的合作能带来多方共赢，并不断巩固这种协同关系，形成长期合作伙伴关系[16]。Pulansari (2020)通过分析五家大型工业企业的数据，强调了选择合适的上下游合作伙伴在联合创新、创造双边价值方面的重要作用[17]，在对高耗能、重污染企业的研究中，郑季良和周旋(2017)以钢铁企业为例，提出了供应链管理的协同效应评价模型，旨在指导企业开展内外部废物的协同回收与利用[18]。

综上所述，现有研究在一些方面取得丰硕的成果，但仍存在一些问题亟需解决，特别是在新能源汽车制造企业的供应链绩效评价中，尚未充分结合博弈论组合赋权与改进物元可拓模型的方法优势，具体

表现为绿色供应链绩效评价中的环境友好和低碳的体现、较为系统的绿色供应链绩效评价理论框架以及结合了博弈论思想的优化指标权重分配优化后的评价指标体系。

(1) 关于指标选取层面,许多学者倾向于从单一维度(如财务、环境或社会等)进行评价。尽管选用了定量和定性相结合的指标,但评价结果仍显得片面,因为在指标选择时,学者们通常更注重财务绩效方面的利益指标,而环境友好和低碳等方面同样应当在绿色供应链绩效评价中得到充分体现。

(2) 关于供应链绩效评价理论框架层面,虽然全球学者和各地政府对绿色供应链绩效评价给予了高度关注,并取得了一些研究成果,但截至目前,学者们对供应链及其绩效评价等核心概念仍未达成一致,研究方向较为分散,且缺乏系统性的理论框架。

(3) 关于评价指标体系层面,现有的研究缺乏动态协同优化。虽然国内外学者构建了多种供应链绩效评价体系,但新能源汽车制造业的供应链涉及多主体(如电池供应商、整车厂、充电设施运营商等)的复杂博弈关系,传统静态赋权方法难以反映各方利益权衡。现有研究较少结合博弈论思想优化指标权重分配,导致评价结果难以契合行业实际竞争与合作并存的生态特点。

现有供应链绩效评价研究多停留在理论层面,缺乏结合行业特征的实证模型验证,本研究将针对新能源汽车制造企业的特点,选取科学合理的评价指标,构建评价体系;进一步,运用博弈论将层次分析法、熵值法两种赋权方法得到的权重,进行有效的博弈组合,并将组合后的权重分配应用于物元可拓模型对新能源汽车制造企业进行绩效评价。

2. 评价指标体系

2.1. 新能源汽车制造企业供应链绩效

新能源汽车供应链绩效是技术、环境、经济多维度的综合体现。当前中国凭借规模化优势、技术创新和绿色化布局,已形成全球领先的供应链体系,但需持续优化成本结构、增强国际竞争力,并应对地缘政治与资源约束的挑战。同时,新能源汽车企业通过智能化升级、生态协同和全球化拓展,其供应链有望成为支撑中国制造业高质量发展的核心引擎。

2.2. 绩效评价指标体系

科学合理的指标体系是新能源汽车制造企业供应链绩效评价的基础。本节将 ESG 理论与新能源汽车行业特点及供应链管理核心环节结合在一起构建评价指标体系。

在构建评价指标体系时,选取财务维度是因为财务绩效是企业可持续发展的基础,本研究选取以下五个维度构建评价体系:财务维度基于 Jin Baohui (2021) [19],为 ESG 实践提供资源保障;顾客维度参考 Shashank (2018) [20],反映用户需求对竞争力的影响;运营维度依据 Sachin K (2016) [21],关注供应链稳定所需的效率与质量控制;绿色环保维度结合 Adel (2021) [22],突出新能源汽车生命周期环境影响特性;未来成长与发展维度源于 Malviya (2019) [23],强调长期价值依赖的技术创新与市场拓展能力。

这五个维度的综合考量,既体现了 ESG 理论的核心内涵,又契合了新能源汽车行业的特殊性,能够全面评估企业的可持续发展水平。因此本节创新性地构建涵盖财务、顾客、运营、绿色环保和未来成长与发展五大维度的综合指标体系。如图 1 所示。

3. 基于博弈论组合赋权 - 物元可拓的评估模型

由于构建的新能源汽车制造企业供应链绩效物元评价模型中包含的指标维度较为广泛,采用单一方法难以完全反映评价指标的真实权重。为保证绩效评价的可靠性,本研究采用博弈论组合赋权法对变异系数法确定的权重 ω^* 和熵权法确定的权重 ω^{**} 进行组合得到组合权重 ω ,以此提高指标权重的准确性。具体而言,变异系数法通过指标数据的离散程度反映指标的鉴别力,但对指标间的相关性考虑不足;而

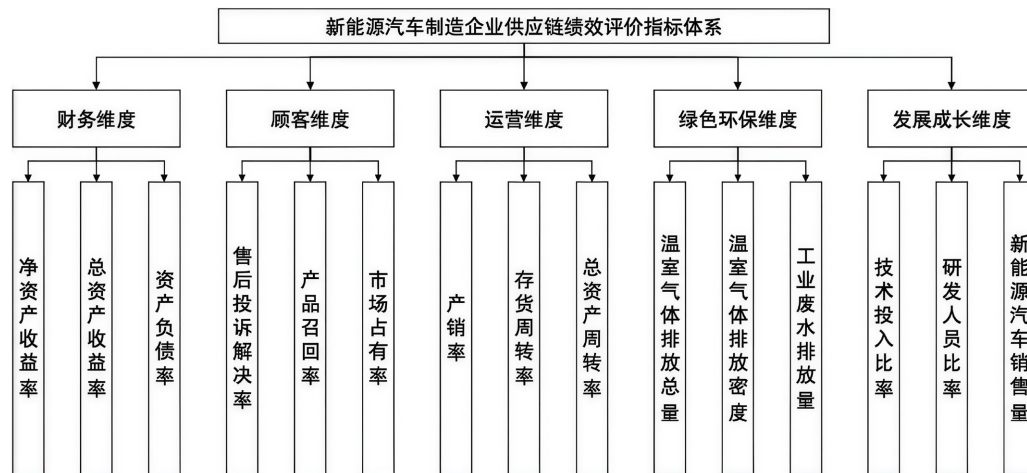


Figure 1. Performance evaluation index system of supply chain in NEV manufacturing enterprises

图 1. 新能源汽车制造企业供应链绩效评价指标体系

熵权法能够有效度量指标数据的无序程度和信息量，但对数据分布的敏感性较高。二者在赋权角度上具有互补性：变异系数法侧重指标数据的波动性，熵权法则关注信息量的不确定性。通过博弈论组合二者的权重结果 ω^* 和 ω^{**} ，可以得到更全面、均衡的组合权重 ω ，从而提高指标权重的准确性。

相较于其他客观赋权方法如主成分分析法、CRITIC 法等，变异系数法和熵权法在权重计算逻辑上具有显著互补性：变异系数法通过指标数据的离散程度(标准差/均值)反映指标的鉴别力，适用于凸显波动性较大的关键指标，但对指标间的相关性考虑不足；熵权法基于信息熵理论，通过度量数据无序程度计算权重，对信息量丰富的指标更敏感，但对极端数据分布如均匀分布的区分度较弱。二者的互补性体现在：变异系数法从数据波动性角度赋权，熵权法从信息不确定性角度赋权。而其他客观方法，如主成分分析法依赖线性降维，CRITIC 法需结合相关性，可能引入冗余计算或削弱指标独立性。因此，本研究选择变异系数法与熵权法结合，通过博弈论优化二者权重冲突，最终得到均衡可靠的组合权重 ω 。

然后，采用物元可拓模型对各评价指标进行量化，计算各指标与绩效等级之间的关联函数值。最后，计算各指标与绩效等级之间的综合关联度，并按照最大关联度原则判定各评价指标的绩效等级，技术路线如图 2 所示：

3.1. 基于博弈论的组合赋权方法

3.1.1. 变异系数法确定客观权重

变异系数法是一种通过指标数据离散程度确定权重的方法，适用于多指标综合评价体系。其核心思想是：变异系数越大，说明指标数据差距越显著，所包含的信息量越大，应赋予更高的权重，具体步骤如下。

(1) 准备原始矩阵

为不同对象在不同指标下的评分数据， $m \times n$ 的矩阵， n 为对象个数， m 为指标个数。设待评价对象有 m 个，待评价对象的评价指标有 n 个，建立基于样本数据的评价矩阵 $X = (x_{ij})_{m \times n}$ 。

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

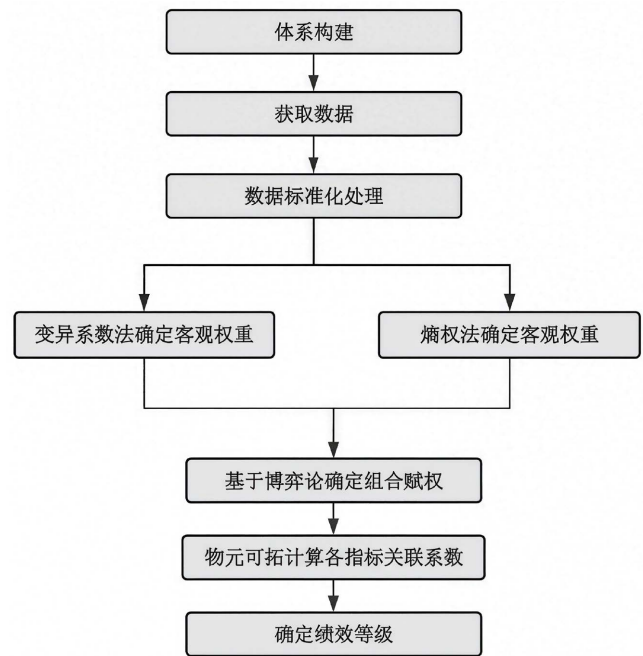


Figure 2. Evaluation technical roadmap of supply chain performance in NEV manufacturing

图 2. 新能源汽车制造企业供应链绩效评价技术路线图

x_{ij} 为多年绩效评价体系中第 i 个待评价对象的第 j 个指标的评价值。对于定量指标而言, x_{ij} 的取值为其真实的监测值; 对于定性指标而言, x_{ij} 的取值根据下表 1 所示的其单个指标所处的评价等级进行打分。

Table 1. Quantified parameters for qualitative indicator evaluation

表 1. 定性指标量化评价参数

评价等级	I	II	III	IV
分值	10	8	4	2

(2) 数据标准化

为了消除不同量纲和量纲单位的不可公度性, 通过上式对判断矩阵 X 进行标准化处理, 得到矩阵 $Z = (z_{ij})_{m \times n}$ 。

$$z_{ij} = \begin{cases} \frac{x_{ij} - x_j^{\min}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}}, & \text{正向指标} \\ \frac{x_j^{\max} - x_{ij}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}}, & \text{负向指标} \end{cases} \quad (2)$$

(3) 计算指标的均值和标准差

均值

$$\bar{z}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_{ij} \quad (3)$$

标准差

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_{ij} - \bar{z}_j)^2} \quad (4)$$

(4) 计算指标的变异系数

$$CV_j = \frac{\sigma_j}{\bar{z}_j} \quad (5)$$

(5) 计算各指标的权重

$$w_j = \frac{CV_j}{\sum_{j=1}^m CV_j} \quad (6)$$

3.1.2. 熵权法确定客观权重

熵权法是根据待评价对象的指标值构成的判断 矩阵来确定指标权重的一种客观评价方法, 具体步骤如下。

(1) 准备原始矩阵 X 。为不同对象在不同指标下的评分数据, $n \times m$ 的矩阵, n 为对象个数, m 为指标个数。

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (7)$$

(2) 原始矩阵正向化和标准化, 得到标准化矩阵 Z 。

$$z_{ij} = \begin{cases} \frac{x_{ij} - x_j^{\min}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}}, & \text{正向指标} \\ \frac{x_j^{\max} - x_{ij}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}}, & \text{负向指标} \end{cases} \quad (8)$$

(3) 计算各项指标熵值 E_j , 当 $P_{ij} = 0$ 时, $P_{ij} \ln P_{ij} = 0$ (此处未进行非负平移)

$$E_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n P_{ij} \ln P_{ij}, \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (9)$$

(4) 计算各项指标的差异系数 G_j

$$G_j = 1 - E_j \quad (10)$$

(5) 计算各项指标的权重 w_j

$$w_j = G_j / \sum_{j=1}^m G_j \quad (11)$$

3.1.3. 博弈论确定组合权重

本文运用博弈论组合赋权法将变异系数法和熵权法分别确定的客观权重进行协调比较, 以二者最大化利益为目标, 对权重中的信息全面考虑并集成优化的过程, 以获得新能源汽车制造企业供应链绩效评价体系中各指标的合理权重。具体步骤如下:

(1) 利用 L 种方法计算评价体系中的 n 个评价指标的权重, 则构造的基本权重向量集为

$$w_l = (w_{l1}, w_{l2}, \dots, w_{ln}), \quad l = 1, 2, \dots, L \quad (12)$$

(2) L 个权重向量的线性组合可表示为:

$$\mathbf{w} = \sum_{l=1}^L \alpha_l \mathbf{w}_l^T \quad (\alpha_l > 0) \quad (13)$$

式中, $\mathbf{w}$ 为组合权重向量, α_l 为线性组合系数。

(3) 以 E 和各个 E_j 之间的离差最小化为目标, 采用多目标博弈论模型对其进行优化, 寻找线性系数 α_1 、 α_2 的纳什均衡点, 使客观权重 $\mathbf{w}_1$ 和客观权重 $\mathbf{w}_2$ 与组合权重 $\mathbf{w}$ 的离差最小求解 L 个向量的线性组合系数 $\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_L]$, 约束条件为:

$$\min \left\| \sum_{l=1}^L \alpha_l \mathbf{w}_l^T - \mathbf{w}_p^T \right\|_2, \quad p=1, 2, \dots, L \quad (14)$$

(4) 根据矩阵的微分性质, 对式(14)求一阶导数, 可将其转化为等价线形方程组:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{w}_1 \mathbf{w}_1^T & \mathbf{w}_1 \mathbf{w}_2^T & \cdots & \mathbf{w}_1 \mathbf{w}_L^T \\ \mathbf{w}_2 \mathbf{w}_1^T & \mathbf{w}_2 \mathbf{w}_2^T & \cdots & \mathbf{w}_2 \mathbf{w}_L^T \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{w}_L \mathbf{w}_1^T & \mathbf{w}_L \mathbf{w}_2^T & \cdots & \mathbf{w}_L \mathbf{w}_L^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{w}_1 \mathbf{w}_1^T \\ \mathbf{w}_2 \mathbf{w}_2^T \\ \vdots \\ \mathbf{w}_L \mathbf{w}_L^T \end{bmatrix} \quad (15)$$

(5) 计算组合权重。

$$\mathbf{w}^* = \sum_{l=1}^L \alpha_l^* \mathbf{w}_l^T, \quad l=1, 2, \dots, L \quad (16)$$

3.2. 新能源汽车制造企业供应链绩效物元可拓评价模型

(1) 构造待评物元

将多年的各指标实测数据和按照上表获得的定性指标评价数据用物元 R_0 表示, 即为待评物元。

$$R_0 = \begin{bmatrix} P_0 & C_1 & v_{01} \\ & C_2 & v_{02} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & v_{0n} \end{bmatrix} \quad (17)$$

该公式中, P_0 为物元; C_n 为绩效评价体系中的第 n 个评价指标; v_{0n} 为 P_0 关于评价指标 C_n 的量值, 即绩效中各评价指标的实际数据。

(2) 确定经典域 R_j

多年绩效的稳定性指标的经典域是各指标特征与其在不同稳定性等级标准下的量值构成的物元矩阵 R_j 。

$$R_j = \begin{bmatrix} N_j & C_1 & v_{j1} \\ & C_2 & v_{j2} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & v_{jn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_j & C_1 & \langle a_{j1}, b_{j1} \rangle \\ & C_2 & \langle a_{j2}, b_{j2} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & \langle a_{jn}, b_{jn} \rangle \end{bmatrix} \quad (18)$$

该公式中, N_j 为所划分的稳定性等级 ($j=1, 2, 3, 4$); C_n 为稳定性等级 N_j 的第 n 个评价指标; $v_{jn} = \langle a_{jn}, b_{jn} \rangle$ 为稳定性等级 N_j 关于 C_n 的取值范围。

(3) 确定节域 R_p 。

在经典域 R_j 的基础上, 根据各评价指标 C_i 在整个评价体系中的取值范围建立节域 R_p 。

$$R_p = \begin{bmatrix} N_p & C_1 & v_{p1} \\ & C_2 & v_{p2} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & v_{pn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_p & C_1 & \langle a_{p1}, b_{p1} \rangle \\ & C_2 & \langle a_{p2}, b_{p2} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & \langle a_{pn}, b_{pn} \rangle \end{bmatrix} \quad (19)$$

该公式中, N_p 为稳定性等级的全体; $v_{pn} = \langle a_{pn}, b \rangle$ 为 N_p 条件下关于 C_n 的取值范围。

(4) 根据熵的定义, 确定各评价指标的熵值, 并对各评价指标进行无量纲化处理。

(5) 计算等级评价指标的关联函数值。

计算稳定性等级评价指标的关联函数值, 第 i 个评价指标关于绩效等级 j 的关联函数为:

$$r_{ji}(v_{0i}) = \begin{cases} \frac{\rho(v_{0i}, v_{ji})}{\rho(v_{0i}, v_{pi}) - \rho(v_{0i}, v_{ji})} & (v_j \notin v_{ji}) \\ \frac{-\rho(v_{0i}, v_{ji})}{|v_{ji}|} & (v_j \in v_{ji}) \end{cases} \quad (20)$$

式中 ρ 为实测值到经典域和节域的范围。其中:

$$\rho(v_{0i}, v_{ji}) = \left| v_{0i} - \frac{1}{2}(a_{ji} + b_{ji}) \right| - \frac{1}{2}(b_{ji} - a_{ji}) \quad (21)$$

$$\rho(v_{0i}, v_{pi}) = \left| v_{0i} - \frac{1}{2}(a_{pi} + b_{pi}) \right| - \frac{1}{2}(b_{pi} - a_{pi}) \quad (22)$$

(6) 之后, 确定待评价对象属于各等级的综合关联度, 计算公式为:

$$K_j(P_0) = \sum_{i=1}^n w_i r_{ji}(v_{0i}) \quad (23)$$

式中 $K_j(P)$ 是在考虑指标重要性程度情况下, 待评事物各指标关于各类别的关联度的组合值。 w_i 为基于博弈论理论求得的第 i 项评价指标的权重。

4. 实例分析

以某新能源车企 B 企业 2018 年~2023 年的数据为实例分析基础, 对其绩效进行分析计算, 验证本研究提出的新能源汽车制造企业绩效评价模型的有效性。各项指标数据主要来源于以下权威渠道, 以确保数据的准确性和可靠性: 财务数据取自 B 企业的年度财务报告、深圳证券交易所官网及企业官方披露文件。顾客维度与运营维度数据参考中国汽车工业协会的行业统计报告, 并结合 B 企业官方销量公告进行交叉验证。成长发展指标基于国家知识产权局的专利公开数据, 以及企业年报中的研发支出明细。绿色环保维度数据援引行业研究机构的专项分析报告, 并对比企业社会责任报告中的披露信息。各项指标的数据如表 2 所示。

Table 2. Indicator dataset of enterprise B

表 2. B 企业各指标数据

维度	指标	2018	2019	2020	2021	2022	2023
财务维度 C_1	净资产收益率 $C_{11}/\%$	4.9	2.9	7.4	3.7	16.1	24.4
	总资产收益率 $C_{12}/\%$	1.9	1.1	3.0	1.6	4.5	5.4
	资产负债率 $C_{13}/\%$	68.8	68	67.9	64.8	75.4	77.9

续表

顾客维度 C_2	售后投诉解决率 $C_{21}/\%$	94.8	95	94	94.5	94.9	96.2
	产品召回率 $C_{22}/\%$	1.9	0.1	0.1	3.1	3.4	0.1
	市场占有率 $C_{23}/\%$	1.86	1.79	1.69	2.84	6.94	10.05
运营维度 C_3	产销率 $C_{31}/\%$	97.4	98.1	99.3	98.7	99.6	99.5
	存货周转率 $C_{32}/\text{次}$	4.1	3.3	3.6	4.2	4.9	5.3
	总资产周转率 $C_{33}/\text{次}$	0.7	0.7	0.8	0.9	1.1	1.0
绿色环保维度 C_4	温室气体排放总量 $C_{41}/\text{万吨}$	286.49	400.37	414.52	521.91	806.21	1234.15
	温室气体排放密度 $C_{42}/\text{吨/万元营收}$	0.22	0.31	0.26	0.24	0.19	0.20
	工业废水排放量 $C_{43}/\text{万吨}$	493.37	457.37	400.36	395.56	583.89	1108.75
发展成长维度 C_5	技术投入比率 $C_{51}/\%$	3.8	4.4	4.8	4.9	4.4	6.6
	研发人员比率 $C_{52}/\%$	10.8	9.6	15.9	14.0	12.2	15.0
	新能源汽车销售量 $C_{53}/\text{万辆}$	24.78	22.95	18.97	59.37	186.35	302.44

表 2 所示的 15 个新能源汽车制造企业供应链绩效评价指数数据均来自于 B 企业年报和社会责任报告。其中, C_{13} 、 C_{22} 、 C_{41} 、 C_{42} 、 C_{43} 均为负向指标, 其余指标均为正向指标。

4.1. 指标权重的确定

(1) 变异系数法确定客观权重

按照变异系数法的基本原理对表 2 的数据进行计算分析, 将原始矩阵(1)中的数据依靠(2)、(3)、(4)公式进行标准化处理并得到均值 z_j 和标准差 σ_j , 运用(5)公式获得变异系数, 进而运用(6)公式得到客观权重 w 。计算结果如表 3 所示。

(2) 熵权法确定客观权重

根据表 2 中的 B 企业数据判断矩阵 X ; 根据公式(8)对判断矩阵 X 进行标准化, 得到标准化判断矩阵; 根据式(9)~(11)对标准化判断矩阵 Y 进行分析计算客观权重。计算结果如表 3 所示。

(3) 基于博弈论的组合赋权

按照式(15)计算得到变异系数法权重和熵权法权重构建的向量集的线性组合系数 α_1 和 α_1 分别为 0.405 和 0.595, 故可计算出各指标的组合赋权权重。计算结果如表 3 所示。

Table 3. Weight calculation results of evaluation indicators

表 3. 各评价指标权重计算结果

指标	最终权重	指标	变异系数法权重(0.405)	熵权法权重(0.595)	博弈论组合赋权权重
C_1	0.222	C_{11}	0.094	0.104	0.101
		C_{12}	0.072	0.071	0.072
		C_{13}	0.053	0.046	0.049
C_2	0.240	C_{21}	0.062	0.052	0.056
		C_{22}	0.062	0.061	0.061
		C_{23}	0.107	0.134	0.123

续表

C_3	0.183	C_{31}	0.049	0.041	0.044
		C_{32}	0.062	0.056	0.058
		C_{33}	0.075	0.085	0.081
C_4	0.113	C_{41}	0.043	0.035	0.038
		C_{42}	0.046	0.038	0.041
		C_{43}	0.039	0.031	0.034
C_5	0.242	C_{51}	0.072	0.062	0.066
		C_{52}	0.057	0.05	0.053
		C_{53}	0.107	0.134	0.123

而由图3可知,除 C_{23} 、 C_{53} 的权重变化较大外,其余指标的权重变化趋势基本一致。通过15个指标的权重比较来看, C_{23} 、 C_{53} 、 C_{11} 的权重占比居于前三位,这说明新能源汽车的销售量、净资产收益率、市场占有率对新能源汽车企业的供应链绩效影响较大。而 C_{41} 、 C_{42} 、 C_{43} 的权重占比较小,这三个指标均来自于绿色环保维度,可见绿色环保维度对新能源汽车制造企业的供应链绩效评价的影响对比其他四个维度对供应链绩效评价的影响要弱一些。以上结果说明基于博弈论的组合赋权对权重进行了优化集成,权重结果直观地表明了15项指标对供应链绩效评价的影响程度,为之后的构建物元可拓模型进行绩效评价提供前提。

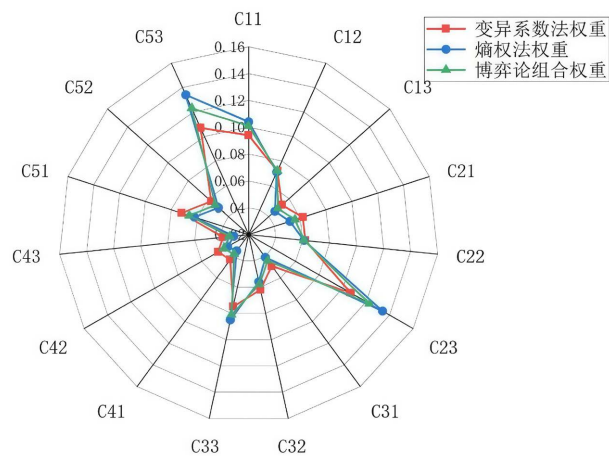


Figure 3. Weight allocation of performance metrics in NEV supply chains

图3. 新能源汽车制造企业供应链绩效评价体系的指标权重

4.2. 新能源汽车制造供应链绩效物元可拓评价

- (1) 根据表2中各年份的实际数据确定其待评物元并进行标准化处理, 确定待评物元 R_0 。
- (2) 依据行业法规标准要求、行业特性以及专家访谈结果, 本文将新能源汽车制造企业供应链绩效 N 分为优、良、中、差四个等级, 根据式(18)、(19)即可确定供应链绩效评价经典域 R_j 、节域 R_p 。
- (3) 以2023年为例, 根据公式(20)计算供应链绩效维度及评价指标关于绩效等级的关联函数值, 并根据最大关联度原则得到相应的评价等级。结果如表4所示。

Table 4. Membership grade values of performance evaluation indicators

表 4. 供应链绩效评价指标关于绩效等级的关联函数值

维度	财务维度			顾客维度			运营维度			绿色环保维度			发展成长维度		
等级/级	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{21}	C_{22}	C_{23}	C_{31}	C_{32}	C_{33}	C_{41}	C_{42}	C_{43}	C_{51}	C_{52}	C_{53}
优	0.0857	0.3000	-0.8950	-0.1739	-0.5000	0.3500	0.5000	0.2857	-0.333	-0.9354	-0.500	-0.8859	0.2667	0.5000	0.1756
良	-0.9143	-0.7000	-0.8600	0.4000	-0.9000	-0.3500	-0.5000	-0.7143	0.4000	-0.9307	-0.4998	-0.8783	-0.7333	-0.5000	-0.8244
中	-0.9538	-0.8000	-0.7900	-0.2400	-0.9500	-0.7214	-0.8333	-0.8462	-0.4286	-0.9177	-0.6667	-0.8479	-0.8182	-0.7500	-0.9122
差	-0.9684	-0.8500	-0.5800	-0.4571	-0.9750	-0.7833	-0.9000	-0.8824	-0.5556	-0.8683	-0.7500	-0.7719	-0.8571	-0.8333	-0.9350
指标评价等级	优	优	差	良	优	优	优	优	良	差	良	差	优	优	优
维度评价等级		优			优			优			良			优	

(4) 同理, 计算得到区间 2018 年~2022 年各评价指标关于绩效等级的关联函数, 并确定所隶属的评价等级, 结果如表 5 所示。

Table 5. Indicator performance classification of EV enterprises (2018~2023)
表 5. 2018 年~2023 年新能源汽车制造企业各项指标评价等级

维度	指标	2018	2019	2020	2021	2022	2023
财务维度	C ₁₁	差	差	差	差	良	优
	C ₁₂	差	差	良	差	优	优
	C ₁₃	良	良	良	优	差	差
顾客维度	C ₂₁	中	良	中	中	中	良
	C ₂₂	中	优	优	差	差	优
	C ₂₃	差	差	中	差	良	优
运营维度	C ₃₁	良	良	优	良	优	优
	C ₃₂	中	差	差	良	优	优
	C ₃₃	差	差	中	良	良	良
绿色环保维度	C ₄₁	优	良	良	良	中	差
	C ₄₂	良	差	中	良	优	良
	C ₄₃	优	优	优	差	良	差
发展成长维度	C ₅₁	差	中	中	良	差	优
	C ₅₂	中	差	优	优	良	优
	C ₅₃	差	差	差	中	良	优

根据表 5 所示, 财务维度中, C₁₁、C₁₂ 在经历一段较差时期后得到了显著提升, 但同样 C₁₃ 出现了逆向波动, 从早期的“良”和 2021 年的“优”急剧下滑至 2022、2023 年的“差”, 这是一个需要警惕的负面信号。

顾客维度方面, C₂₃ 出现了剧烈波动, 而该指标在所有指标中权重最高, 该指标的波动很容易引起整个供应链绩效的波动, 企业多加注意这一方面。

运营维度方面, C₃₁ 表现最稳定, 从“良”起步, 2020 年后持续保持“优”。这是企业运营优势的核心体现。

绿色环保维度是所有维度中表现最差的维度, 尤其是 C₄₃ 从 2018 年的“优”一路下降到 2023 年的“差”, 呈现出了显著的负面趋势, 凸显环保压力。

发展成长维度, C₅₃ 从早期连续三年的“差”逐步提升, 最终在 2023 年达到“优”。显示企业在长期发展能力上取得突破。

(5) 将 2018 年~2023 年各评价指标关于绩效等级的关联函数值根据表 3 中的权重和公式(21)的计算方式计算各年份的综合关联度及绩效等级, 结果如表 6 所示。

根据最大关联度识别原则, 由表 6 可见, 2018 年~2020 年的绩效评估等级相对于 2021 年~2023 年要差一些。在 2018 年~2020 年三年间, B 企业的债务负担加剧, 国内外竞争对手增加, 新能源汽车补贴大幅退坡等原因都是导致三年间绩效不好的重要原因。在 2021 年~2023 年的区间里, 评估等级随着时间的推移而有所增长, 也从侧面说明 B 企业在一段瓶颈期之后有所突破, 供应链绩效稳中向好。

Table 6. Comprehensive correlation degrees and performance grades by year
表 6. 各年份的综合关联度和绩效等级

年份	关联度/级				评估等级/级
	优	良	中	差	
2018	-0.6598	-0.5055	-0.3214	-0.0574	差
2019	-0.6968	-0.5848	-0.4613	-0.0197	差
2020	-0.5505	-0.5071	-0.3475	-0.2675	差
2021	-0.5623	-0.3504	-0.2503	-0.2524	中
2022	-0.251	-0.0785	-0.3861	-0.5479	良
2023	-0.0197	-0.5535	-0.7702	-0.8104	优

5. 结论

本研究将博弈论组合赋权和物元可拓模型相结合，构建了一种新型的新能源汽车制造企业供应链绩效评价模型，并对 B 企业 2018 年~2023 年供应链绩效进行了评估。

(1) 通过分析新能源汽车制造企业供应链绩效的评价指标，归纳总结影响其绩效的主要因素，构建了以财务维度、顾客维度、运营维度、绿色环保维度、发展成长维度为准则层，包含 15 个评价指标的新能源汽车制造企业供应链绩效评价指标体系，其中新能源汽车销售量、市场占有率、净资产收益率、总资产收益率、总资产周转率是影响新能源汽车制造企业供应链绩效最主要的因素。

(2) 物元可拓模型中指标权重的合理性直接影响评估结果的准确性，本研究基于博弈论对变异系数法和熵权法确定的两个客观权重进行了组合，避免了单一客观赋权方法在赋权过程中带来的偏差，并且本研究取消了主观赋权的赋权方法，以免主观性给赋权结果带来的随意性误差。这使得新能源汽车制造企业绩效评估中的指标权重更加科学合理。

(3) 通过新能源汽车制造企业实例分析，将基于博弈论求解的组合权重应用于物元可拓模型，对新能源汽车制造企业供应链绩效进行综合评估，评估结果与指标数据吻合度较高，验证了博弈论组合赋权 - 物元可拓模型用于新能源汽车制造企业供应链绩效评价的合理性，其结果可为新能源汽车制造企业绩效的提升提供宝贵建议。

基金项目

教育部人文社会科学研究项目(22YJAZH131)；上海理工大学一流本科课程建设项目(YLKC202424373)；上海理工大学一流本科课程建设项目(YLKC202424381)。

参考文献

[1] 赵巧之, 陈昊. 中国新能源汽车产业技术创新的竞合关系研究——基于 Lotka-Volterra 种群竞争模型分析[J]. 技术经济, 2024, 43(12): 47-59.

[2] 周天成, 程建宁. 我国新能源汽车产业链供应链韧性和安全研究[J]. 供应链管理, 2025, 6(3): 35-45.

[3] 林超. 我国新能源汽车产业发展成绩、面临风险挑战以及对策建议[J]. 中国经贸导刊, 2024(3): 38-40.

[4] 孙海鹏, 彭雨. 汽车行业绿色供应链环境绩效评价的探讨[J]. 中国环保产业, 2020(9): 20-24.

[5] 王革, 郭思妙. 产业链创新视角下战略性新兴产业技术转移网络演化研究——以锂离子电池产业为例[J]. 中国科技论坛, 2024(11): 81-90.

[6] 张慧, 解佳琪. 新供应链集中度、双元创新战略与新能源汽车产业链企业财务绩效——基于模糊集定性比较分析[J]. 科技管理学报, 2025, 27(1): 92-101.

-
- [7] 王超. 数字孪生赋能智能网联汽车供应链: 复杂性解析与韧性构建[J]. 物流技术, 2025, 44(4): 13-24.
 - [8] 史文利. 供应链绩效的多维评价研究[D]: [博士学位论文]. 天津: 天津大学, 2008.
 - [9] 林志炳, 鲍蕾. 企企业社会责任对供应链减排决策及政府补贴效率的影响研究[J]. 中国管理科学, 2021, 29(11): 111-121.
 - [10] 张韵文. 中国新能源汽车产业绿色供应链管理研究[J]. 中国航务周刊, 2024(48): 71-73.
 - [11] 孔佳玲. 基于 ESG 评估的企业环境责任与财务绩效研究[J]. 国际商务财会, 2024(22): 79-82.
 - [12] Ma, L. and Song, M. (2022) Approaches to Carbon Emission Reductions and Technology in China's Chemical Industry to Achieve Carbon Neutralization. *Energies*, **15**, Article 5401. <https://doi.org/10.3390/en15155401>
 - [13] Yang, C.S. (2018) An Analysis of Institutional Pressures, Green Supply Chain Management, and Green Performance in the Container Shipping Context. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, **61**, 246-260. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.07.005>
 - [14] Mumtaz, U., Ali, Y., Petrillo, A. and De Felice, F. (2018) Identifying the Critical Factors of Green Supply Chain Management: Environmental Benefits in Pakistan. *Science of the Total Environment*, **640**, 144-152. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.231>
 - [15] Shahzad, F., Du, J., Khan, I., Shahbaz, M., Murad, M. and Khan, M.A.S. (2020) Untangling the Influence of Organizational Compatibility on Green Supply Chain Management Efforts to Boost Organizational Performance through Information Technology Capabilities. *Journal of Cleaner Production*, **266**, Article 122029. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122029>
 - [16] Nureen, N., Xin, Y., Irfan, M. and Fahad, S. (2023) Going Green: How Do Green Supply Chain Management and Green Training Influence Firm Performance? Evidence from a Developing Country. *Environmental Science and Pollution Research*, **30**, 57448-57459. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26609-x>
 - [17] Pulansari, F. and Putri, A. (2020) Green Supply Chain Operation Reference (green SCOR) Performance Evaluation (Case Study: Steel Company). *Journal of Physics: Conference Series*, **1569**, Article 032006. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1569/3/032006>
 - [18] 郑季良, 周旋. 钢铁企业供应链协同效应评价模型研究[J]. 科研管理, 2017, 38(S1): 563-568.
 - [19] Jin, B.H. (2021) Research on Performance Evaluation of Green Supply Chain of Automobile Enterprises under the Background of Carbon Peak and Carbon Neutralization. *Energy Reports*, **7**, 594-604. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.10.002>
 - [20] Thanki, S. and Thakkar, J. (2018) A Quantitative Framework for Lean and Green Assessment of Supply Chain Performance. *International Journal of Productivity and Performance Management*, **67**, 366-400. <https://doi.org/10.1108/ijppm-09-2016-0215>
 - [21] Patil, S.K. and Kant, R. (2016) Evaluating the Impact of Knowledge Management Adoption on Supply Chain Performance by BSC-FANP Approach: An Empirical Case Study. *Tékhne*, **14**, 52-74. <https://doi.org/10.1016/j.tekhne.2016.07.004>
 - [22] Adel, H.M. (2021) Mapping and Assessing Green Entrepreneurial Performance: Evidence from a Vertically Integrated Organic Beverages Supply Chain. *Journal of Entrepreneurship and Innovation in Emerging Economies*, **7**, 78-98. <https://doi.org/10.1177/2393957520983722>
 - [23] Malviya, R.K. and Kant, R. (2019) Developing Integrated Framework to Measure Performance of Green Supply Chain Management. *Benchmarking: An International Journal*, **27**, 634-665. <https://doi.org/10.1108/bij-01-2019-0016>