

基于Shapley值的犹豫模糊TODIM方法及其在可持续供应商选择中的应用

刘小月¹, 宋嘉思¹, 鞠大伟²

¹对外经济贸易大学信息学院, 北京

²中国邮政集团有限公司邮政研究中心, 邮政科学研究规划院, 北京

收稿日期: 2024年6月12日; 录用日期: 2024年7月2日; 发布日期: 2024年7月15日

摘要

可持续供应商选择是指企业在考虑经济、社会和环境因素的基础上, 选择最合适的供应商。为解决此问题, 本文提出了基于Shapley值的犹豫模糊TODIM方法。首先, 针对指标间存在的相互影响关系, 使用基于模糊测度的Shapley值处理所有指标间的相互作用。其次, 犹豫模糊数既可以有效反映决策者的意见, 又能体现决策者的犹豫不决, 针对犹豫模糊环境下决策者的有限理性问题, 对TODIM方法进行拓展, 提出犹豫模糊TODIM方法, 求得备选方案的排序及择优。最后, 将方法应用于可持续供应商选择问题, 以说明方法的有效性。

关键词

可持续供应商选择, TODIM方法, Shapley值, 有限理性

Shapley Value Based Hesitant Fuzzy TODIM Method and Its Application in Sustainable Supplier Selection

Xiaoyue Liu¹, Jiasi Song¹, Dawei Ju²

¹School of Information Technology & Management, University of International Business and Economics, Beijing

²Postal Scientific Research and Planning Academy, Postal Research Center of China Post Group Co., Ltd., Beijing

Received: Jun. 12th, 2024; accepted: Jul. 2nd, 2024; published: Jul. 15th, 2024

Abstract

Sustainable supplier selection refers to the selection of the most appropriate supplier by a com-

文章引用: 刘小月, 宋嘉思, 鞠大伟. 基于 Shapley 值的犹豫模糊 TODIM 方法及其在可持续供应商选择中的应用[J]. 管理科学与工程, 2024, 13(4): 726-735. DOI: 10.12677/mse.2024.134076

pany considering economic, social and environmental factors. To solve this problem, this paper proposes a hesitant fuzzy TODIM method based on Shapley value. Firstly, for the interactions that exist between indicators, the Shapley value based on fuzzy measures is used to deal with the interactions between all indicators. Secondly, the hesitation fuzzy number can effectively reflect both the decision maker's opinion and the decision maker's indecision, and in order to address the bounded rationality of the decision maker in the hesitation fuzzy environment, the TODIM method is extended and the hesitation fuzzy TODIM method is proposed to find the ranking and optimization of the alternatives. Finally, the method is applied to the sustainable supplier selection problem to illustrate the effectiveness of the method.

Keywords

Sustainable Supplier Selection, TODIM Method, Shapley Value, Bounded Rationality

Copyright © 2024 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

随着全球经济化和工业化的快速发展，自然资源的开发与利用带来了经济增长，同时也对环境和社会造成了不容忽视的影响，这些问题表明可持续发展的三个维度，即经济、环境和社会之间的平衡已经遭到破坏。可持续发展的紧迫性愈发凸显，即在追求经济发展的同时，应保证环境的可持续性和社会的公平性。在这一框架下，可持续供应链管理(Sustainable Supplier Chain Management, SSCM) [1]的概念应运而生，其核心在于评估和选择能够平衡经济利益、社会责任和环境影响的供应商，以构建一个高效且负责的供应链。

可持续供应商选择(Sustainable Supplier Selection, SSS)是指企业在考虑经济、社会和环境因素的基础上，选择最合适的可持续性的供应商，以监控供应商的表现，确保企业保持竞争优势。可持续供应商选择问题在 SSCM 中至关重要。然而，传统的供应商选择方法往往未能充分考虑这些多重且相互关联的评价标准，指标权重只是在给定的专家权重基础上进行计算，没有考虑到指标间的相互影响关系。在实际决策中，由于供应商的评价标准是基于经济、社会、环境等多重评价体系，评价过程变得复杂且具有高度的不确定性，导致标准之间相互关联、相互影响。因此，如何处理好标准之间的关系，从而选择合适的可持续供应商，对企业来说至关重要。

在考虑风险决策的供应商选择问题中，常见的风险决策方法假设决策者是完全理性的，但大量有关人类心理行为的研究表明，通常决策者在行为上并不总是追求效用最大，而是选择让自己满意的方案，即决策者在风险和不确定性下是有限理性的[2]。决策者通常对损失比相应的收益更敏感，即损失厌恶，由于可持续供应商选择问题通常具有风险性和不确定性，因此有必要考虑决策者的心理行为。

基于目前的研究现状，一种能够综合考虑经济、社会和环境因素，同时反映决策者有限理性的行为特征的供应商选择方法，对于实现供应链的可持续性具有重要意义。本文提出一种基于 Shapley 值的犹豫模糊 TODIM 方法，旨在解决可持续供应商选择问题中存在的指标间相互影响关系和决策者有限理性的问题，提高决策过程的客观性和科学性。

2. 文献综述

多属性决策(Multiple Attribute Decision Making, MADM) [3]是指在考虑多个属性的情况下，选择最优

备选方案或进行方案排序的决策问题。针对决策者在面对风险时的心理行为,前景理论[4]被广泛用于描述决策者的决策过程,基于前景理论的决策模型依赖于事先的期望水平,为克服前景理论在应用上的局限性,Gomes 和 Lima [5]于 1991 年提出的 TODIM (Interactive and Multiple Attribute Decision Making)方法是一种基于前景理论的交互式多属性决策方法。TODIM 方法的核心在于其交互式决策过程,它允许决策者在决策过程中考虑不同方案之间的比较,以一个备选方案相对于另一个备选方案的收益度和损失度来确定决策结果,并通过计算感知价值函数[6]来评估每个方案的优劣,是解决考虑决策者在风险和不确定性下的有限理性问题的有效工具。

针对评价标准间的相互作用,一般使用 Choquet 积分[7]来描述决策过程中的相关性和交互性。Choquet 积分为处理这类具有交互性的标准提供了一种数学工具,其研究已被广泛探究并应用于多个领域。而在使用 Choquet 积分解决决策问题时,只考虑了相邻位置的元素的关联性,却忽视了元素不同的顺序位置对决策结果的潜在影响。Shapley 值[8]作为一种解决合作博弈中分配问题的工具,提供了一种评估每个元素在所有可能联盟中单独贡献的方法,为处理在联盟中具有相同概率的元素的相关性问题提供了一种新的视角。因此,本文引入 Shapley 值来解决指标间的相关性[9],计算能反映指标间相互影响关系的指标权重,用于 TODIM 方法中感知价值函数的计算。

在供应商选择的决策过程中,因为事物本身的复杂和不确定性,还有决策者自身的局限性,决策者更倾向于不确定性的信息评价。使用精确数值的传统 TODIM 方法[10]无法充分捕捉决策过程中的模糊性,为了解决这一问题,Bellman 和 Zadeh [11]将模糊集理论引入多属性决策中,使用模糊数来表达决策者不确定性的偏好信息。Atanassov [12]考虑到决策者在评估方案对属性的满足程度时,可能同时给出方案满足和不满足属性的程度评估值,提出了直觉模糊集的概念,它通过隶属度函数和非隶属度函数描述决策者的偏好。进一步地,Torra [13]提出了犹豫模糊集的概念,犹豫模糊集允许使用多个可能的值来表示隶属度,更准确地描述决策者在评估备选方案时的犹豫不决,特别适用于描述现实决策中存在的犹豫情形。相对于模糊数和直觉模糊数而言,犹豫模糊数允许决策者给出多个可能值,增加了决策者赋值的灵活性,为处理决策过程中的不确定性和复杂性提供了一种有效的数学工具。因此,本文使用犹豫模糊数代替精确数值来表达决策专家的偏好信息,以表达他们的犹豫偏好。

基于以上分析,本文将提出基于 Shapley 值的犹豫模糊 TODIM 方法,首先针对指标间存在的相互影响关系,使用基于模糊测度的 Shapley 值处理所有指标间的相互作用。其次给出犹豫模糊数的相关定义,将犹豫模糊数和 TODIM 方法结合,考虑决策者的有限理性,提出犹豫模糊 TODIM 方法对备选方案进行排序。最后,使用可持续供应商选择案例验证本文所提方法的有效性。

3. 相关概念

3.1. λ -模糊测度

定义 1: [14] 设 $P(X)$ 为非空集合 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 的幂集,非空集合 X 上的模糊测度 $\mu: P(X) \rightarrow [0,1]$ 满足以下边际条件和单调性:

- 1) 边际条件: $\mu(\varphi) = 0, \mu(X) = 1$;
- 2) 单调性: $\forall A, B \in P(X)$, 若 $A \subseteq B$, 则 $\mu(A) \leq \mu(B)$ 。

由定义 1 可知,为了确定 n 个属性指标集上的模糊测度,通常需要 $2^n - 2$ 个值,为了减少模糊测度计算的复杂性,可用 λ -模糊测度来代替一般的模糊测度。

定义 2: [14] 对于任意的 $A, B \in P(X)$, $A \cap B = \varnothing$, $\lambda \in (-1, \infty)$ 。如果模糊测度 μ 满足:

$$\mu(A \cup B) = \mu(A) + \mu(B) + \lambda \mu(A) \mu(B)$$

则称 μ 为 λ -模糊测度。由定义 2 可知:

- 1) 若 $\lambda = 0$, 即 $\mu(A \cup B) = \mu(A) + \mu(B)$, 则 λ 为可加性度量, A 和 B 相互独立;
- 2) 若 $\lambda < 0$, 即 $\mu(A \cup B) < \mu(A) + \mu(B)$, 则 λ 为次可加性度量, A 和 B 相互冗余;
- 3) 若 $\lambda > 0$, 即 $\mu(A \cup B) > \mu(A) + \mu(B)$, 则 λ 为超可加性度量, A 和 B 相互互补。

如果集合 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 是有限的, 那么 λ -模糊度量满足:

$$\mu(A) = \begin{cases} \frac{1}{\lambda} \left[\prod_{x_i \in A} (1 + \lambda \mu(x_i)) - 1 \right], \lambda \neq 0 \\ \sum_{x_i \in A} \mu(x_i), \lambda = 0 \end{cases} \quad (1)$$

利用公式(1)可以通过边界条件 $\mu(X) = 1$ 唯一确定参数 λ [15], 即求解下面的方程:

$$\lambda + 1 = \prod_{i=1}^n (1 + \lambda \mu(x_i)) \quad (2)$$

3.2. Shapley 函数

基于 λ -模糊测度的 Shapley 函数[16]作为处理具有相互关联属性事物的工具, 可以综合考虑指标集 S 评估来元素的重要性。Shapely 函数值的计算公式[17]如下:

$$s_j = \sum_{T \subset X \setminus S} \frac{(n-s-t)!t!}{(n-s+1)!} [\mu(S \cup T) - \mu(T)] \quad (3)$$

其中, X 是所有指标的集合, S 是 X 的任意一个子集, $X \setminus S$ 表示 X 与 S 的差集, T 是 $X \setminus S$ 的任意一个子集, n 、 t 和 s 分别是集合 X 、 T 、 S 的基数, μ 是 X 上的模糊测度。Shapley 值不仅能够反映单个指标或者几个指标集之间对全部指标集的贡献值, 还能反映单个指标或者几个指标集之间对全部指标集的整体平均贡献。由于涉及指标排序, 离散 Choquet 积分只能对相邻指标的相互关系进行分析[18], 而 Shapley 值可以分析所有指标间的相互影响关系。因此, 本文采用求得的 Shapley 值作为指标权重。

3.3. 犹豫模糊数

定义 3: [13] 设 T 为一个给定的非空集合, 定义在集合 T 上的犹豫模糊集 H 是从 T 到区间 $[0, 1]$ 上的一个子集的映射函数。犹豫模糊集的数学形式:

$$H = \left\{ \langle t, h_H(t) \rangle \mid t \in T \right\}$$

其中, $h_H(t)$ 是区间 $[0, 1]$ 中几个不同的实数值的集合, 表达的意思是 $t \in T$ 属于犹豫模糊集 H 的几种可能的程度, 它是犹豫模糊集 H 的基本元素。

记 $h = h_H(t) = \{\gamma \mid \gamma \in h_H(t)\} = H \{\gamma^1, \gamma^2, \dots, \gamma^{\#h}\}$ 为一个犹豫模糊数[19], 其中 $\gamma^\lambda \in [0, 1]$, ($\lambda = 1, 2, \dots, \#h$), $\#h$ 表示犹豫模糊数 H 中元素的个数。例如, $H \{0.5, 0.7, 0.8\}$ 表示决策者对某备选方案的某项指标持有三种观点, 其评估值可能为: 0.5, 0.7 或 0.8。

由于在现实决策过程中, 决策者给定的犹豫模糊数偏好信息中的可能的隶属度值通常是无序的, 且不同的犹豫模糊数中元素的个数通常是不同的。处理这样两个犹豫模糊数, 如比较它们的大小或者计算它们之间的距离, 是十分困难的。为了计算方便且不失一般性, 我们将犹豫模糊数内所有的元素按增序[20]进行排列, 即 $h = H \{\gamma^\lambda \mid \lambda = 1, 2, \dots, \#h\}$, 其中 γ^λ 为犹豫模糊数 h 中第 λ 小的元素。

对于任意两个犹豫模糊数 h_1 和 h_2 , 如果它们的元素个数不同[21], 应拓展元素个数相对少的犹豫模糊数, 使得它们具有相同的元素个数。本文考虑决策者的风险厌恶, 也就是说该决策者对结果预期一般

比较悲观, 则重复添加元素个数相对少的犹豫模糊数中最小的元素直到该犹豫模糊数内元素个数和另一个犹豫模糊数的元素个数相同。

定义 4: [19] 对于一个犹豫模糊数 $h = H\{\gamma^1, \gamma^2, \dots, \gamma^{\#h}\}$, 它的得分函数定义为:

$$S(h) = \frac{1}{\#h} (\gamma^1 + \gamma^2 + \dots + \gamma^{\#h}) \quad (4)$$

因此, 对于任意的两个犹豫模糊数 h_1 和 h_2 的基于得分函数的犹豫模糊数排序方法定义为:

- 1) 如果 $S(h_1) < S(h_2)$, $h_1 \prec h_2$;
- 2) 如果 $S(h_1) = S(h_2)$, $h_1 \sim h_2$;
- 3) 如果 $S(h_1) > S(h_2)$, $h_1 \succ h_2$ 。

定义 5: [22] 对于任意两个元素个数相同的有序犹豫模糊数 h_1 和 h_2 , 使用欧几里得距离测度表示犹豫模糊距离测度:

$$d_E(h_1, h_2) = \sqrt{\frac{1}{\#h} \sum_{\lambda=1}^{\#h} (\gamma_1^\lambda - \gamma_2^\lambda)^2} \quad (5)$$

其中, γ_1^λ 和 γ_2^λ 分别是 h_1 和 h_2 中第 λ 小的值, 且 $\#h = \#h_1 = \#h_2$ 。

4. 基于 Shapley 值的犹豫模糊 TODIM 方法

4.1. 问题描述

传统的 TODIM 方法是一种基于前景理论的交互式多属性决策方法, 只能用来处理属性值是精确数的多属性决策问题, 本文考虑了决策者在风险和不确定情况下的有限理性, 针对评价值为犹豫模糊信息的决策问题对 TODIM 方法进行拓展, 提出一种基于 Shapley 值的犹豫模糊 TODIM 方法来求解犹豫模糊多属性决策问题。

对于一个多属性决策问题, 设 $A_i (i=1, 2, \dots, m)$ 为 m 个方案组成的方案集, $C_j (j=1, 2, \dots, n)$ 为 n 个可能存在相互关联的决策属性集, 且这些属性的权重已知。设 $X = [x_{ij}]_{m \times n}$ 为专家的决策矩阵, 其中 $x_{ij} = H\{\gamma_{ij}^1, \gamma_{ij}^2, \dots, \gamma_{ij}^{\#h}\}$ 是决策者以犹豫模糊数的形式给出在属性 j 下对第 i 个方案的评价。基于 Shapley 值的犹豫模糊 TODIM 方法的决策过程如下节所示。

4.2. 方法步骤

步骤 1: 确定备选方案的原始评价矩阵 $Y = [y_{ij}]_{m \times n}$ 。其中 $y_{ij} (i=1, \dots, m; j=1, \dots, n)$ 表示决策者对第 i 个方案相对于第 j 个指标的犹豫模糊评价, 且犹豫模糊数内所有的元素按增序排列。

步骤 2: 确定标准化决策矩阵 $X = [x_{ij}]_{m \times n}$ 。考虑决策者的有限理性, 对元素个数不同的犹豫模糊评价中元素个数相对少的犹豫模糊评价进行拓展, 使得它们具有相同的元素个数。得到标准化决策评价矩阵 $X = [x_{ij}]_{m \times n}$, 其中 $i=1, \dots, m; j=1, \dots, n$ 。

步骤 3: 根据 Shapley 函数计算反映指标间影响关系的指标权重。给定各属性的模糊测度, 根据公式(2)计算 λ 值, 将 λ 带入公式(1)计算指标子集的模糊测度, 再使用公式(3)计算各指标的 Shapley 值, 即各指标的权重值 $w_j = s_j, j=1, \dots, n$ 。

步骤 4: 确定权重值最大的指标为参考指标 $w_r = \max\{w_j | j=1, 2, \dots, n\}$, 然后使用公式(6)计算各指标 $w_j (j=1, 2, \dots, n)$ 相对于参考指标的相对权重值 w_{jr} :

$$w_{jr} = \frac{w_j}{w_r}, j=1, \dots, n \quad (6)$$

步骤 5: 计算各候选方案相对于其他方案的感知价值函数 \mathcal{G}_{iq} , \mathcal{G}_{iq} 表示候选方案 A_i 相对于方案 A_q 的占优度, φ_{iq}^j 为候选方案 A_i 在指标 j 下相对于方案 A_q 的占优度。

$$\mathcal{G}_{iq} = \sum_{j=1}^n \varphi_{iq}^j, i, q = 1, \dots, m \quad (7)$$

其中,

$$\varphi_{iq}^j = \begin{cases} \sqrt{d_{iq}^j w_{jr} / \sum_{j=1}^n w_{jr}}, S(x_{ij}) - S(x_{qj}) > 0 \\ 0, S(x_{ij}) - S(x_{qj}) = 0 \\ -\frac{1}{\theta} \sqrt{d_{iq}^j \sum_{j=1}^n w_{jr} / w_{jr}}, S(x_{ij}) - S(x_{qj}) < 0 \end{cases} \quad (8)$$

参数 θ 为损失的衰减系数, 参数 θ 越小表示决策者的“损失”规避程度高。犹豫模糊距离 d_{iq}^j 为犹豫模糊数 x_{ij} 和 x_{qj} 之间的欧几里得距离测度 $d_E(x_{ij}, x_{qj})$ 。在公式(8)中, 通常存在以下三种情况[21]:

- 1) 若 $S(x_{ij}) - S(x_{qj}) > 0$, 表示备选方案 A_i 相对于 A_q 在指标 C_j 方面的收益;
- 2) 若 $S(x_{ij}) - S(x_{qj}) < 0$, 表示备选方案 A_i 相对于 A_q 在指标 C_j 方面的损失;
- 3) 若 $S(x_{ij}) - S(x_{qj}) = 0$, 则表示既没有收益也没有损失。

步骤 6: 使用公式(9)计算方案 $A_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 的综合感知价值函数值 $\Phi(A_i)$:

$$\Phi(A_i) = \frac{\sum_{q=1}^m \mathcal{G}_{iq} - \min_i \left\{ \sum_{q=1}^m \mathcal{G}_{iq} \right\}}{\max_i \left\{ \sum_{q=1}^m \mathcal{G}_{iq} \right\} - \min_i \left\{ \sum_{q=1}^m \mathcal{G}_{iq} \right\}}, i = 1, \dots, m \quad (9)$$

步骤 7: 根据最终综合感知价值函数 $\Phi(A_i)$ 的大小对方案 $A_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 进行排序。

5. 算例分析

5.1. 可持续供应商选择问题

在可持续供应商选择问题中, 决策专家在各候选供应商在各指标下的满足程度进行评价, 这些评价标准体系可能存在相互影响的关系。现考虑某汽车制造企业面临着由传统燃油汽车到新能源汽车的转型问题, 拟推出新款纯电动汽车, 以满足更多消费者对可持续产品的需求, 而如何促进整个供应链的可持续稳定发展是一个重要问题。从供应商评价标准和选择的实际情况出发, 由于经济、环境和社会三维评价标准体系的复杂性和冲突性[23], 这表明这些评价标准体系是相互关联、相互影响的。

在可持续供应商选择问题中, 专家团队从经济、环境和社会三个方面中选择了 4 个评价指标: 经济成本(C_1)、质量安全(C_2)、服务水平(C_3)和社会责任(C_4), 4 个指标均为效益型指标。对 4 个候选供应商 $A = (A_1, A_2, A_3, A_4)$ 对各指标进行评价, 并给出基于犹豫模糊数的评价矩阵, 初始评价信息如表 1 所示。

Table 1. Hesitation fuzzy initial evaluation matrix

表 1. 犹豫模糊初始评价矩阵

	C_1	C_2	C_3	C_4
A_1	$H \{0.7, 0.8, 0.9\}$	$H \{0.6, 0.8\}$	$H \{0.4, 0.6\}$	$H \{0.4, 0.5, 0.9\}$
A_2	$H \{0.5, 0.6\}$	$H \{0.5, 0.8, 0.9\}$	$H \{0.4, 0.6, 0.7\}$	$H \{0.4, 0.6, 0.7\}$
A_3	$H \{0.3, 0.5, 0.9\}$	$H \{0.6, 0.7, 0.9\}$	$H \{0.3, 0.5, 0.7\}$	$H \{0.6, 0.8\}$
A_4	$H \{0.3, 0.4, 0.7\}$	$H \{0.8, 0.9\}$	$H \{0.2, 0.3, 0.8\}$	$H \{0.4, 0.5\}$

5.2. 基于 Shapley 值的犹豫模糊 TODIM 方法求解

由于初始评价矩阵中的每一列的评价值，即犹豫模糊数，它们内部的元素个数是不相同的，为了正确地计算犹豫模糊数之间的距离，考虑决策者的有限理性，假设决策专家为风险厌恶型决策者，则通过重复添加元素更少评估值中的最小元素，直到该评估值的元素个数与该列的所有评估值的元素个数相同。犹豫模糊标准化评价矩阵如表 2 所示。

Table 2. Hesitation fuzzy standardized evaluation matrix
表 2. 犹豫模糊标准化评价矩阵

	C_1	C_2	C_3	C_4
A_1	$H\{0.7, 0.8, 0.9\}$	$H\{0.6, 0.6, 0.8\}$	$H\{0.4, 0.4, 0.6\}$	$H\{0.4, 0.5, 0.9\}$
A_2	$H\{0.5, 0.5, 0.6\}$	$H\{0.5, 0.8, 0.9\}$	$H\{0.4, 0.6, 0.7\}$	$H\{0.4, 0.6, 0.7\}$
A_3	$H\{0.3, 0.5, 0.9\}$	$H\{0.6, 0.8, 0.9\}$	$H\{0.3, 0.5, 0.7\}$	$H\{0.6, 0.6, 0.8\}$
A_4	$H\{0.3, 0.4, 0.6\}$	$H\{0.8, 0.8, 0.9\}$	$H\{0.2, 0.3, 0.8\}$	$H\{0.4, 0.4, 0.5\}$

候选可持续供应商的各评价指标存在相互影响关系，假定专家给出的各指标的重要程度 $\mu(C_1)=0.8$ ， $\mu(C_2)=0.5$ ， $\mu(C_3)=0.3$ ， $\mu(C_4)=0.2$ ，由公式(2)可得 $\lambda = -0.913$ 。根据公式(1)和 λ 值计算各指标子集的模糊测度如表 3 所示。使用公式(3)计算各指标的 Shapely 值为： $s_1 = 0.382$ ， $s_2 = 0.246$ ， $s_3 = 0.195$ ， $s_4 = 0.177$ ，得到权重最大的参考指标 $w_r = 0.382$ 。计算每一指标相对参考指标的相对权重值 $w_{1r} = 1$ ， $w_{2r} = 0.644$ ， $w_{3r} = 0.510$ ， $w_{4r} = 0.463$ 。

Table 3. Fuzzy measures for attribute subsets
表 3. 各指标子集的模糊测度

模糊测度	值	模糊测度	值
$\mu(C_1)$	0.8	$\mu(C_2, C_4)$	0.609
$\mu(C_2)$	0.5	$\mu(C_3, C_4)$	0.445
$\mu(C_3)$	0.3	$\mu(C_1, C_2, C_3)$	0.978
$\mu(C_4)$	0.2	$\mu(C_1, C_2, C_4)$	0.964
$\mu(C_1, C_2)$	0.935	$\mu(C_1, C_3, C_4)$	0.920
$\mu(C_1, C_3)$	0.881	$\mu(C_2, C_3, C_4)$	0.742
$\mu(C_1, C_4)$	0.854	$\mu(C_1, C_2, C_3, C_4)$	1
$\mu(C_2, C_3)$	0.663		

根据式(8)计算各候选供应商的相对感知价值函数值，损失衰减系数 θ 设为 1。在各指标下每一方案相对于其他方案的优势度如表 4~7 所示。

使用公式(7)计算各候选供应商相对其他方案的感知价值函数值，结果如表 8 所示。根据公式(9)计算综合感知价值函数 $\Phi(A_1) = 0.618$ ， $\Phi(A_2) = 0.424$ ， $\Phi(A_3) = 1$ ， $\Phi(A_4) = 0$ 。

Table 4. Perceived value function value of each alternative relative to other alternatives for attribute C_1
表 4. 在指标 C_1 下每一方案相对于其他方案的感知价值函数值

	A_1	A_2	A_3	A_4
A_1	0	0.322	0.332	0.376
A_2	-0.842	0	-0.738	0.222
A_3	-0.869	0.382	0	0.264
A_4	-0.984	-0.581	-0.691	0

Table 5. Perceived value function value of each alternative relative to other alternatives for attribute C_2
表 5. 在指标 C_2 下每一方案相对于其他方案的感知价值函数值

	A_1	A_2	A_3	A_4
A_1	0	-0.758	-0.724	-0.839
A_2	0.187	0	-0.484	-0.839
A_3	0.178	0.119	0	-0.685
A_4	0.206	0.206	0.169	0

Table 6. Perceived value function value of each alternative relative to other alternatives for attribute C_3
表 6. 在指标 C_3 下每一方案相对于其他方案的感知价值函数值

	A_1	A_2	A_3	A_4
A_1	0	-0.814	-0.544	0.943
A_2	0.157	0	0.126	0.205
A_3	0.106	-0.647	0	0.943
A_4	-0.184	-1.052	-0.184	0

Table 7. Perceived value function value of each alternative relative to other alternatives for attribute C_4
表 7. 在指标 C_4 下每一方案相对于其他方案的感知价值函数值

	A_1	A_2	A_3	A_4
A_1	0	0.151	-0.894	0.205
A_2	-0.854	0	-0.854	0.17
A_3	0.158	0.151	0	0.205
A_4	-1.16	-0.961	-1.16	0

Table 8. Combined perceived value function value of each alternative relative to other alternatives
表 8. 各方案相对于其他方案的综合感知价值函数值

	A_1	A_2	A_3	A_4
A_1	0	-1.099	-1.83	0.685
A_2	-1.352	0	-1.95	-0.242
A_3	-0.427	0.005	0	0.727
A_4	-2.122	-2.388	-1.866	0

最后, 根据最终综合感知价值函数值, 确定供应商的排序顺序为 $A_3 > A_1 > A_2 > A_4$ 。因此, 考虑可持续供应商选择问题中经济、环境和社会三个方面因素的相互影响和决策者在风险和不确定情况下的有限理性, 第三家候选供应商为最优的可持续供应商选择。

6. 结论

可持续供应商选择是指企业在考虑经济、社会和环境因素的基础上, 选择最合适的供应商。本文对传统的 TODIM 方法进行拓展, 提出了一种基于 Shapley 值的犹豫模糊 TODIM 方法, 旨在解决可持续供应商选择问题中存在的指标间相互影响关系和决策者有限理性的问题。通过引入 Shapley 值来处理指标间的相互作用, 并结合犹豫模糊数以反映决策者的犹豫不决, 使其更适用于复杂的决策环境。以下是本文的主要结论:

1) 针对指标间存在的相互影响关系, 本文使用基于模糊测度的 Shapley 值计算反映指标间相互影响关系的指标权重, 不仅考虑了单个指标的贡献, 还综合了指标间的协同效应, 从而更合理地评估了各备选方案。

2) 本文充分考虑了决策者在面对不确定性和风险时的有限理性行为。本文给出了犹豫模糊数的相关定义, 针对犹豫模糊环境下决策者的有限理性问题, 将犹豫模糊数和 TODIM 方法结合, 提出犹豫模糊 TODIM 方法, 对备选方案进行排序及择优。

最后, 通过将基于 Shapley 值的犹豫模糊 TODIM 方法应用于可持续供应商选择的案例, 展示了该方法的有效性和适用性。案例结果表明, 该方法能够为企业提供一种更加科学和系统的决策工具, 帮助企业在经济、社会和环境三个维度之间找到平衡, 选择最合适的可持续的供应商。基于 Shapley 值的犹豫模糊 TODIM 方法给出了可持续供应商选择的方案排序和最佳选择, 说明了该方法在解决不确定环境下考虑指标间相互影响的多属性决策问题的有效性。

基金项目

教育部人文社会科学研究青年项目(19YJC630107)、对外经济贸易大学中央高校基本科研业务费专项资金资助(20YQ04)、对外经济贸易大学优秀青年学者资助项目(20YQ12)。

参考文献

- [1] Xing, Y., Cao, M., Liu, Y., Zhou, M. and Wu, J. (2022) A Choquet Integral Based Interval Type-2 Trapezoidal Fuzzy Multiple Attribute Group Decision Making for Sustainable Supplier Selection. *Computers & Industrial Engineering*, **165**, Article 107935. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.107935>
- [2] Zhang, S., Zhu, J., Liu, X. and Chen, Y. (2016) Regret Theory-Based Group Decision-Making with Multidimensional Preference and Incomplete Weight Information. *Information Fusion*, **31**, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2015.12.001>
- [3] Figueira, J., Greco, S. and Ehrogott, M. (2005) Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys. Springer. <https://doi.org/10.1007/b100605>
- [4] Kahneman, D. and Tversky, A. (1979) Prospect Theory: An Analysis of Decision under Risk. *Econometrica*, **47**, 263-292. <https://doi.org/10.2307/1914185>
- [5] Gomes, L.F.A.M. and Lima, M.M.P.P. (1991) TODIM: Basic and Application to Multicriteria Ranking of Projects with Environmental Impacts. *Foundations of Computing and Decision Sciences*, **16**, 113-127.
- [6] Li, M.-Y. and Cao, P.-P. (2019) Extended TODIM Method for Multi-Attribute Risk Decision Making Problems in Emergency Response. *Computers & Industrial Engineering*, **135**, 1286-1293. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.06.027>
- [7] Choquet, G. (1954) Theory of Capacities. *Annales de l'institut Fourier*, **5**, 131-295. <https://doi.org/10.5802/aif.53>
- [8] Wei, G. and Zhang, N. (2014) A Multiple Criteria Hesitant Fuzzy Decision Making with Shapley Value-Based VIKOR Method. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, **26**, 1065-1075. <https://doi.org/10.3233/ifs-130798>

- [9] Lourenzutti, R., Krohling, R.A. and Reformat, M.Z. (2017) Choquet Based TOPSIS and TODIM for Dynamic and Heterogeneous Decision Making with Criteria Interaction. *Information Sciences*, **408**, 41-69. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2017.04.037>
- [10] 张永政, 叶春明, 耿秀丽, 等. 基于犹豫模糊广义 Choquet 积分的风险型供应商选择方法[J]. 工业工程与管理, 2019, 24(4): 47-54.
- [11] Bellman, R.E. and Zadeh, L.A. (1970) Decision-Making in a Fuzzy Environment. *Management Science*, **17**, B141-B164. <https://doi.org/10.1287/mnsc.17.4.b141>
- [12] Atanassov, K.T. (1986) Intuitionistic Fuzzy Sets. *Fuzzy Sets and Systems*, **20**, 87-96. [https://doi.org/10.1016/s0165-0114\(86\)80034-3](https://doi.org/10.1016/s0165-0114(86)80034-3)
- [13] Torra, V. (2010) Hesitant Fuzzy Sets. *International Journal of Intelligent Systems*, **25**, 529-539. <https://doi.org/10.1002/int.20418>
- [14] Sugeno, M. (1974) Theory of Fuzzy Integrals and Its Applications. Ph.D. Thesis, Tokyo Institute of Technology.
- [15] Joshi, D. and Kumar, S. (2016) Interval-Valued Intuitionistic Hesitant Fuzzy Choquet Integral Based TOPSIS Method for Multi-Criteria Group Decision Making. *European Journal of Operational Research*, **248**, 183-191. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.06.047>
- [16] Tan, C.Q., Jiang, Z.-Z. and Chen, X.H. (2015) An Extended TODIM Method for Hesitant Fuzzy Interactive Multicriteria Decision Making Based on Generalized Choquet Integral. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, **29**, 293-305. <https://doi.org/10.3233/ifs-151595>
- [17] 曲国华, 张汉鹏, 刘增良, 等. 基于直觉模糊 λ -Shapley Choquet 积分算子 TOPSIS 的多属性群决策方法[J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(3): 726-742.
- [18] Zhang, W., Ju, Y., Liu, X. and Giannakis, M. (2017) A Mathematical Programming-Based Method for Heterogeneous Multicriteria Group Decision Analysis with Aspirations and Incomplete Preference Information. *Computers & Industrial Engineering*, **113**, 541-557. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.09.030>
- [19] Xia, M. and Xu, Z. (2011) Hesitant Fuzzy Information Aggregation in Decision Making. *International Journal of Approximate Reasoning*, **52**, 395-407. <https://doi.org/10.1016/j.ijar.2010.09.002>
- [20] Xu, Z. and Xia, M. (2011) Distance and Similarity Measures for Hesitant Fuzzy Sets. *Information Sciences*, **181**, 2128-2138. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2011.01.028>
- [21] 张小路. 基于犹豫模糊信息的多属性决策方法研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 东南大学, 2016.
- [22] Xu, Z. and Xia, M. (2011) On Distance and Correlation Measures of Hesitant Fuzzy Information. *International Journal of Intelligent Systems*, **26**, 410-425. <https://doi.org/10.1002/int.20474>
- [23] 牟能冶, 常建鹏, 陈振颂. 基于 PD-HFLTS 与群决策理论的可持续供应商选择[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(5): 1261-1278.