

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2025.06.021

基于犹豫模糊集和优劣比值的冷链物流服务质量评价

彭定洪^{1,2}, 张惠子^{*1}

(1. 昆明理工大学 管理与经济学院, 云南 昆明 650000; 2. 云南交通职业技术学院, 云南 昆明 650000)

摘要:【目标】为精准科学地评价冷链物流服务质量, 提出一种体现多级参照的犹豫模糊集和优势-劣势比率评价方法。【方法】首先, 为确保评价有效数据的完整, 以犹豫模糊元形式描述差异化用户评价数据。接着, 考虑到冷链物流服务质量评价需兼顾被评对象的整体性及其各属性下的优劣势度, 采用优势-劣势比率将被评对象的性能以优劣比值形式表达, 实现被评对象的最大优势与最小劣势间的平衡。同时, 通过迭代提升被评对象间的整体区分度, 实现计算简便且分辨率高的排序优选。在此基础上, 为解决评价过程中参照点设置的单一性, 借鉴基于理想-平均距离的偏好排序方法 (PROBID) 多级参照思想, 将所有被评对象指标数据设为优劣势度参照点, 实现多级参照, 并发展其求解途径。最后, 以云南省4家冷链物流供应商服务质量评价为实例, 并结合冷链物流服务质量评价特性及需求确定冷链物流服务质量评价的5个指标维度为专业性、可靠性、响应性、便利性和安全性, 以验证该方法的可行性和有效性。【结果】根据评价方法得出的评价结果与实际情况基本一致, 该4家冷链物流供应商的冷链物流服务质量在不同程度上与理想的期望均存在一定的差距。【结论】可通过其评价结果从5个维度出发对自身冷链物流服务质量进行管理、改善及优化, 更加体现出基于本研究方法进行冷链物流服务质量评价的可行性和有效性。

关键词: 物流工程; 服务质量评价方法; 犹豫模糊元; 权势-劣势比率; 基于理想-平均距离的偏好排序方法; 冷链物流

中图分类号: F252.24

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2025) 06-0203-09

Cold chain logistics service quality evaluation based on hesitant fuzzy sets and power-weakness ratio

PENG Dinghong^{1,2}, ZHANG Huizi^{*1}

(1. Faculty of Management and Economics, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650000, China;

2. Yunnan Communications Vocational and Technical College, Kunming, Yunnan 650000, China)

Abstract: [Objective] To evaluate cold chain logistics service quality accurately and scientifically, this study proposed a hesitant fuzzy power-weakness ratio method incorporating multi-level references. [Method] First, to ensure valid evaluation data integrity, the user feedback with diverse preferences was described in the form of hesitant fuzzy sets. Next, the cold chain logistics service quality evaluation should balance the overall performance of evaluated objects and their power-weakness across attributes. The power-weakness

收稿日期: 2023-11-11 修改日期: 2024-10-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (72261020, 71861018); 云南省基础研究计划项目 (202201AT070190); 云南省哲学社会科学规划项目 (YB2019067)

作者简介: 彭定洪 (1982-), 男, 云南曲靖人, 博士, 教授, 研究方向为模糊决策与质量评价. (pengdinghong2006@163.com)

* 通讯作者: 张惠子 (1999-), 女, 湖南衡阳人, 硕士, 研究方向为物流系统评价. (1050266958@qq.com)

引用格式: 彭定洪, 张惠子. 基于犹豫模糊集和优劣比值的冷链物流服务质量评价 [J]. 公路交通科技, 2025, 42 (6): 203-211. PENG Dinghong, ZHANG Huizi. Cold chain logistics service quality evaluation based on hesitant fuzzy sets and power-weakness ratio [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2025, 42 (6): 203-211.

© The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

ratio was employed to express evaluated objects' performance as a ratio of strengths to weaknesses, achieving a balance between maximum advantages and minimum disadvantages. By iteratively enhancing the overall discriminability among evaluated objects, a sorting preference with simple calculation and high resolution was realized. Furthermore, to address the limitation of single reference point during traditional evaluation, the preference ranking on basis of ideal-average distance (PROBID) multi-level reference concept was adopted. All evaluated objects indicator data were set as reference points of power-weakness, thereby realizing multi-level referencing and developing its solution approach. Finally, a case study on four cold chain logistics suppliers in Yunnan Province was conducted. Five evaluation dimensions (i. e., professionalism, reliability, responsiveness, convenience, and safety) were defined based on characteristics and requirements of cold chain logistics service quality, to validate the feasibility and effectiveness of the proposed method. [**Result**] The evaluation results derived from the methodology align closely with actual observations. The service quality of four suppliers exhibits certain gaps with ideal expectation to varying degrees. [**Conclusion**] Based on evaluation results, the suppliers could manage, improve, and optimize their cold chain logistics service quality from five dimensions, further demonstrating the feasibility and effectiveness of proposed method for service quality evaluation on cold chain logistics.

Key words: logistics engineering; service quality evaluation method; hesitant fuzzy set; power-weakness ratio; preference ranking on basis of ideal-average distance; cold chain logistics

0 引言

随着经济快速发展,居民消费水平的提高,人们对生鲜农产品的种类、品质及其时效性等要求日益高涨,冷链物流服务行业已进入快速扩张阶段^[1-2]。然而由于缺乏有效的冷链物流服务质量管理,加之生鲜农产品保质期短,流通过程较普通产品更易腐烂变质,损耗率较高,致使物流成本及风险剧增^[3]。为了尽量减少流通途中损耗,一些物流供应商通过改善冷链物流服务质量以提高市场竞争力和经营效益^[4]。冷链物流服务质量概指物流供应商通过提供一个包含产地预冷、冷冻加工贮藏、冷藏运输配送及销售等众多环节的连续不间断供应链系统,达到服务质量标准,满足用户和其他相关需求的系统能力。作为物流供应商增效提质降本至至关重要的部分,冷链物流服务质量的提高也是冷链物流市场补齐设施短板,建立高效快捷的冷链物流体系,有效提升冷链物流运输效能,落实物流经济高质量发展的关键内容^[5-6]。为有效评估物流供应商所提供冷链物流服务质量,本研究提出一种冷链物流服务质量评价方法,以期获取其质量优劣情况,便于后续服务质量的管理、改善及优化,推进冷链物流高质量发展。

目前,冷链物流服务质量评价的研究主要围绕如何构建评价指标体系、选择评价方法等方面展开。在评价指标体系构建方面,易祯晨^[7]针对生鲜电商物流服务的特点和疫情防护的需求,以兼顾用户期

望与用户感知的 SERVQUAL 模型为基础,将生鲜电商物流服务质量的评价维度划分为专业性、可靠性、响应性、便利性和安全性 5 个方面。张浩^[8]通过对农产品冷链物流系统进行分解分析,选取技术设备风险、人员组织风险、产品加工风险、产品供应风险和外部环境风险等 5 个维度构建指标体系,以此测评农产品冷链物流系统风险大小。由于冷链物流服务质量评价是一个典型的多指标、多层次的综合评价问题,具有明显的不确定性^[9],致使冷链物流服务质量的评价方法研究存在一些困难,研究成果相对有限。在评价方法选择方面,耿秀丽^[10]为处理生鲜冷链物流服务质量评价中的信息高度冲突问题,采用一种基于余弦相似度的证据冲突度量法对证据推理方法进行改进来处理指标评价信息。徐广姝^[11]应用粗糙集方法进行等价类划分、属性值约简和属性重要性确定,从而得到物流服务指标指标权重,并结合问卷调查及用户满意度相关理论对权重进行了检验。山红梅^[9]针对专家对生鲜农产品冷链物流服务水平评价指标信息中存在的模糊性及随机性问题,运用云模型对其进行处理,同时为克服一般层次分析法采用点值描述造成的不确定偏差,利用区间层次分析法(IAHP)构造专家判断矩阵确立权重,运用可能度概念对评价指标的综合权重进行修正。刘明菲^[12]融合,集成决策实验室分析法和解释结构模型构建了生鲜冷链前置仓物流服务质量风险影响因素的多层递阶模型,指出在途生鲜农产品货损成本、配送准时性和生鲜农产品物流运作成本是

其服务质量风险形成的核心因素。

以上研究对冷链物流服务质量评价作了有益探索,由于用户群体作为冷链物流服务的直接受益对象,研究多通过对终端用户的调查获取评价数据。但鉴于用户群体在接受服务的系列环节中,其个体感知和偏好存在差异,致使评价数据不尽相同,如何对评价数据合理集结以真实反映冷链物流服务质量水平是评价的关键。针对该问题,现有研究多采用各种形式的加权平均算法以形成整体意见,易造成评价信息损失。对此,本研究采用由一组不定序的隶属度汇集的犹豫模糊集(Hesitant Fuzzy Set, HFS)作为信息载体,以全面表征不同用户意见且确保原始信息的真实性。其次,冷链物流服务质量评价问题存在大量两两比较的需求^[13]。而现有文献大多采用层次分析法(AHP)进行评价,其检验判断矩阵是否一致非常困难,且计算比较复杂。加之,冷链物流服务质量是各环节之间通过要素的流动和分配以实现达到服务质量标准,满足物流用户和其他相关需求的系统能力,具有系统性特征。因此评价冷链物流服务质量需从整体出发,以有效兼顾被评对象各属性下的优劣势度,尽量消除短板造成的“木桶效应”,寻求被评对象的最大优势与最小劣势之间的最佳平衡。Ramanujacharyulu^[14]提出的优劣势比(Power-Weakness Ratio, PWR)不仅能进行两两比较判断优劣,同时将决策者对被评对象优劣势度的内在权衡性以优劣比值的形式更为直接地表达,寻求被评对象的最大优势与最小劣势之间的最佳平衡;更能通过迭代实现每个指标影响力的传递,将微小的差异累积放大,清晰呈现被评对象之间的整体差异,计算较为简便且分辨率高。诸多学者对其进行扩展并广泛应用于模型比较、有害化合物排名、虚拟筛选和部分排序等领域^[15-16]。此外,在评价过程中决策者通常需将被评对象的属性值与参照点进行比较以进一步获取与其他被评对象的横向比较结果。因此参照点的选取至关重要,直接影响着评价结果。而目前在服务质量评价研究领域,常用的参照依赖评价方法如逼近理想解排序法(TOPSIS)、多准则妥协解排序法(VIKOR)等,在评价过程中以属性极值确定理想解(Positive Ideal Solution, PIS)和负理想解(Negative Ideal Solution, NIS),多从单一角度发出设置参照点,使各属性下理想解的确定缺乏合理性和科学性并增加了秩反转问题出现的可能性^[17-18]。对此,Wang^[19-20]提出了一种新的将整个评价数据划分为不同级理想解作为参照点,以及能够有效避免秩反转问题的基于理想-平均距离的偏好

排序方法(Preference Ranking on Basis of Ideal-average Distance, PROBID),该方法主要通过将所有数据纳入参照范围形成多级理想解参照,而不是极值来确定最优被评对象。相对于其他多准则评价方法,它能够使用设置的更多指标而不失去稳定性并提供合理的一致性,评价信息处理能力更强。

综上,本研究融合PWR和PROBID的评价优势,构造一种体现多级参照的冷链物流服务质量评价的方法。该方法采用HFS表征评价信息,利用PWR将被评对象的优劣势度以优劣比值的形式进行排序,强调均衡协调发展,并通过迭代拉开被评对象之间的整体差异。在此基础上,借鉴PROBID思想构建多级理想解为优劣势度划分点,将所有评价数据纳入参照范围。

1 基础理论

1.1 犹豫模糊集

由于冷链物流服务质量评价涉及环节较多,且用户个体存在感知及偏好差异,致使评价数据存在差异化。为有效表征用户不同意见,本研究采用HFS加以刻画。Torra和Narukawa^[21]提出的犹豫模糊集(HFS),其隶属度是几个可能的值,无需构造隶属度函数,表达简便。HFS不仅可以在评估信息难以达成一致时充分兼容和反映不同意见,减少了为使意见达成一致所花的时间及成本,还可以更广义地以集合形式表示差异化数据,能够有效避免评价信息的丢失与扭曲。

定义1.1 设 $M = \{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_N\}$ 是一个有 N 个隶属函数的集合,那么与 M 相关的犹豫模糊集 $h_M(x)$ 定义如下^[22]:

$$h_M(x) = \bigcup_{\mu \in M} \{\mu(x)\}. \quad (1)$$

定义1.2 设 $h(x)$, $h_1(x)$, $h_2(x)$ 为3个犹豫模糊元(HFE),其基本运算如下^[22]

$$\lambda h(x) = \bigcup_{\gamma \in h(x)} \{1 - (1 - \gamma)^\lambda\}, \quad (2)$$

$$h_1(x) \cup h_2(x) = \{h \in (h_1(x) \cup h_2(x)) \mid h \geq \max(h_1^-, h_2^-)\}, \quad (3)$$

其中 $h_1^- = \min h_1(x)$, $h_2^- = \min h_2(x)$ 。

$$h_1(x) \cap h_2(x) = \{h \in (h_1(x) \cap h_2(x)) \mid h \geq \min(h_1^+, h_2^+)\}, \quad (4)$$

其中 $h_1^+ = \max h_1(x)$, $h_2^+ = \max h_2(x)$ 。

定义1.3 设 $h(x)$ 为定义在 $x \in X$ 上的一个HFE,则称^[23]

$$s(h(x)) = \frac{1}{\#h(x)} \sum_{\gamma \in h(x)} \gamma, \quad (5)$$

为HFE $h(x)$ 得分函数,其中 γ 为HFE的可能隶属

值, $\#h(x)$ 为 $h(x)$ 中可能隶属值的个数。

对于犹豫模糊集 h_1 和 h_2 , 下面给出两者之间大小的对比法则:

如果 $s(h_1) \geq s(h_2)$, 则 $h_1 \geq h_2$ 。 (6)

定义 1.4 设 $HFEh_a = \cup_{\gamma_a \in h_a} \{\gamma_a\}$ 与 $h_b = \cup_{\gamma_b \in h_b} \{\gamma_b\}$, 则 h_a 与 h_b 之间的 Hellinger 距离^[25]为:

$$HD_H(h_a, h_b) = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{\#h_a \gamma_a \in h_a} \sum_{\gamma_a \in h_a} \left(\prod_{\gamma_b \in h_b} (\sqrt{\gamma_a} - \sqrt{\gamma_b})^2 \right)^{\frac{1}{\#h_b}}} + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{\#h_b \gamma_b \in h_b} \sum_{\gamma_b \in h_b} \left(\prod_{\gamma_a \in h_a} (\sqrt{\gamma_a} - \sqrt{\gamma_b})^2 \right)^{\frac{1}{\#h_a}}}。 (7)$$

1.2 PROBID 方法

PROBID 方法将整个评价数据划分为不同级理想解作为参照点, 通过计算被评对象与各级理想解的加权平均距离来确定其优劣势, 从而求得最佳被评对象得分。PROBID 中的主要 3 个步骤, 具体如下^[24]。

步骤 1 通过排序确定第 1 PIS ($A_{(1)}$), 第 2 PIS ($A_{(2)}$), 第 3 PIS ($A_{(3)}$), ... 和第 m PIS ($A_{(m)}$) (即第 1 NIS)。

$$A_{(k)} = \{ (\text{Large}(v_j, k) \mid j \in J), (\text{Small}(v_j, k) \mid j \in J') \} = \{ v_{(k)1}, v_{(k)2}, v_{(k)3}, \dots, v_{(k)j}, v_{(k)n} \}, (8)$$

式中, $k \in \{1, 2, \dots, m\}$, J 为最大化/效益指标集, J' 为最小化/成本指标集, 且都来自 $\{1, 2, 3, 4, \dots, n\}$ 。Large (v_j, k) 为第 j 个加权标准化指标列中的第 k 个最大 HFE (即 v_j); Small (v_j, k) 为第 j 个加权标准化指标列中的第 k 个最小 HFE (即 v_j)。例如, $v_{(1)2}$ 为指标列中的最佳 HFE (即效益指标的最大 HFE 或成本指标的最小 HFE); $v_{(m)n}$ 为第 n 个指标列中的第 m 个最佳 HFE (即最差 HFE)。

步骤 2 计算被评对象 i ($i=1, 2, \dots, m$) 与第 k 理想解的欧氏距离 $S_{i(k)}$ 。

$$S_{i(k)} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_{(k)j})^2}。 (9)$$

步骤 3 计算被评对象与各次序理想解的加权平均距离作为其整体的正负理想距离。

通过计算各对象与序数为中位数及中位数以上的理想解的加权平均距离确定整体正理想距离。

当 m 为奇数时, $M = 0.5(m+1)$; 当 m 为偶数时, $M = 0.5m$ 。

$$S_{i(\text{pos-ideal})} = \sum_{k=1}^M \frac{1}{k} S_{i(k)}。 (10)$$

同样, 计算各对象与序数为中位数及中位数以下的理想解的加权平均距离确定整体负理想距离。

当 m 为奇数时, $M = 0.5(m+1)$; 当 m 为偶数时, $M = 0.5m + 1$ 。

$$S_{i(\text{neg-ideal})} = \sum_{k=M}^m \frac{1}{m-k+1} S_{i(k)}。 (11)$$

2 考虑多级理想解参照的 HF-PWR 方法

2.1 问题描述

一般农产品冷链服务质量评价问题可表示为: 设由 e 个专业用户 $E = \{E_1, E_2, \dots, E_e\}$ 依据 n 个评价指标 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ 对 m 个待评农产品冷链物流方案 $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ 进行服务质量评价。由于一般参与评价用户众多且个体存在感知及偏好差异, 评价数据间存在差异, 为尽可能避免评价信息扭曲、丢失, 运用 HFE 的多隶属值特征刻画同一方案的同一指标下差异化用户评价数据。给出方案 A_i 在指标值 c_j 下评价值 (HFE) 为 h_{ij} , 有 $h_{ij} = h\{\gamma_{ij}^1, \gamma_{ij}^2, \dots, \gamma_{ij}^{\#h_{ij}}\}$, 其中 $\#h_{ij}$ 表示 HFE h_{ij} 中隶属值个数, 且 $i=1, 2, \dots, m$; $j=1, 2, \dots, n$ 。

2.2 评价方法构建

步骤 1 建立初始评价矩阵 H 。

设有待评方案 A_i ($i=1, 2, \dots, m$), 评价指标 C_j ($j=1, 2, \dots, n$), 其中 h_{ij} ($i=1, 2, \dots, m$; $j=1, 2, \dots, n$) 为 HFE。关于被评方案的初始犹豫模糊评价矩阵 H 为:

$$H = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & \dots & C_j & \dots & C_n \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_i \\ \vdots \\ A_m \end{matrix} & \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1j} & \dots & h_{1n} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2j} & \dots & h_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{i1} & h_{i2} & \dots & h_{ij} & \dots & h_{in} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{m1} & h_{m2} & \dots & h_{mj} & \dots & h_{mn} \end{bmatrix} \end{matrix}。 (12)$$

步骤 2 评价矩阵标准化。

对评价矩阵 H 中的各个指标进行标准化处理, h'_{ij} 为第 i 项方案在第 j 个指标下的标准化评价值。对于效益指标, 即指标值越大评价就越好的指标:

$$h'_{ij} = \bigcup_{\gamma_{ij} \in h_{ij}} \{\gamma_{ij}\} = \bigcup_{\gamma_{ij} \in h_{ij}, i=1, 2, \dots, m} \left\{ \frac{\gamma_{ij}}{\max_{1 \leq i \leq m} \sqrt{\sum_{\gamma_{ij} \in h_{ij}} (\gamma_{ij})^2}} \right\}。 (12)$$

对于成本指标, 即指标值越小评价就越好的指标

$$h'_{ij} = \bigcup_{\gamma_{ij} \in h_{ij}} \{\gamma_{ij}\} = \bigcup_{\gamma_{ij} \in h_{ij}, i=1, 2, \dots, m} \left\{ \frac{(1 - \gamma_{ij})}{\max_{1 \leq i \leq m} \sqrt{\sum_{\gamma_{ij} \in h_{ij}} (1 - \gamma_{ij})^2}} \right\}。 (13)$$

步骤3 计算加权评价价值 R_{ij} 。

指标权重 $\omega_j = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$, 由专家直接给出。

$$R_{ij} = \omega_j h_{ij} = \bigcup_{\gamma_{ij} \in h_{ij}} \{1 - (1 - \gamma_{ij})^{\omega_j}\}, \quad (14)$$

其中 $\omega_j > 0$, $\sum_{j=1}^n \omega_j = 1$ 。

步骤4 确定各级理想解。

借鉴 PROBID 中对理想解的划分思想, 不同以往的多属性综合评价方法, 从单一角度发出设置理想解, 本方法将所有评价指标数据划分为不同级理想解, 根据研究中被评方案的数量计算 PIS 的整个范围, 每一个被评方案的各个指标值都要求与不同级的理想解进行比较, 使得各被评方案都得到了充分的比较, 保证了排序结果的稳定性与可靠性。将各评价指标下对 m 个方案的评价值计算其得分函数按照大小进行排序, 将大小排列序号一致的评价值作为一个理想解。在此情况下, 可以最大限度地保留评价信息, 评价信息表达更自由且处理能力更强。

$$\begin{aligned} V^{(k)} &= \{(\text{Small}(R_j, k) | j \in J')\} \\ V_{(k)} &= \{(\text{Large}(R_j, k) | j \in J)\} \end{aligned} \quad (15)$$

式中, k 为排列序号, $k = 1, 2, \dots, m$; J 与效益指标相关; J' 与成本指标相关。

步骤5 建立 Power 矩阵 (P 矩阵) 与 Weakness 矩阵 (W 矩阵)。

(1) 将上述理想解群中的中位数作为划分正负理想解的基准, 中位数及以上为正理想解, 中位数及以下为负理想解, 采用 HF-Hellinger 距离公式^[25] 计算方案 A_i 与各正负理想解的距离 $S_{ij}^{j(k)}$ 。

$$\begin{aligned} S_{ij}^{j(k)} &= DH_H(R_{ij}, R_j^{(k)}) = \\ &= \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{\#R_{ij}^{r_{ij} \in R_{ij}^{(k)}}} \sum_{r_{ij}^{(k)} \in R_j^{(k)}} (\sqrt{r_{ij}} - \sqrt{r_j^{(k)}})^2}^{\frac{1}{\#R_j^{(k)}}} + \\ &= \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{\#R_j^{(k)}} \sum_{r_{ij}^{(k)} \in R_j^{(k)}} (\sqrt{r_{ij}} - \sqrt{r_j^{(k)}})^2}^{\frac{1}{\#R_{ij}^{r_{ij} \in R_{ij}^{(k)}}}} \end{aligned} \quad (16)$$

(2) 计算 Power 值 (P 值) 和 Weakness 值 (W 值)。

①对于 P 值:

当 m 为奇数时, $M = 0.5(m + 1)$; 当 m 为偶数时, $M = 0.5m$ 。

$$P_{ij} = \sum_{k=1}^M \frac{1}{k} P_{ij}^{(k)+}, \quad (17)$$

式中, $P_{ij}^{(k)+} = \sum_{j=1}^n S_{ij}^{j(k)+}$, P_{ij} 为对于被评方案 A_i 在第 j

个评价指标下的 P 值。

②对于 W 值:

当 m 为奇数时, $M = 0.5(m + 1)$; 当 m 为偶数时, $M = 0.5m + 1$ 。

$$W_{ij} = \sum_{k=M}^m \frac{1}{m - k + 1} W_{ij}^{(k)-}, \quad (18)$$

式中, $W_{ij}^{(k)-} = \sum_{j=1}^n S_{ij}^{j(k)-}$, W_{ij} 为对于被评方案 A_i 在第 j 个评价指标下的 W 值。

由此形成 P 矩阵 $(P_{ij})_{m \times n}$, W 矩阵 $(W_{ij})_{m \times n}$ 。

步骤6 进行迭代。在多属性综合评价中, 往往较少考虑被评方案之间的整体差异, 由于指标数较多且评价信息繁杂, 可能会出现各被评方案最终评价价值相差很小甚至相同的情形。本研究通过迭代考察指标值内部差异性对评价结果的影响力, 利用矩阵相乘实现每个指标影响力的传递, 将微小的差异迅速累积放大。

(1) 计算方案 A_i 的一阶迭代 power 能力 $P_i(1)$ 与 weakness 能力 $W_i(1)$ 为:

$$P_i(1) = \sum_{j=1}^n P_{ij}, \quad (19)$$

$$W_i(1) = \sum_{j=1}^n W_{ij}. \quad (20)$$

分别形成一阶迭代 power 能力向量 $P(1) = [P_1(1) P_2(1) \dots P_m(1)]$ 与 power 能力向量 $W(1) = [W_1(1) W_2(1) \dots W_m(1)]$ 。

(2) 通过将一阶迭代 power 与 weakness 能力向量与 P 矩阵及 W 矩阵的每一行相乘获得二阶迭代 power 与 weakness 能力向量。公式如下:

$$P(2) = \left[\sum_{j=1}^n P_{1j} P_1(1) \quad \sum_{j=1}^n P_{2j} P_2(1) \quad \dots \quad \sum_{j=1}^n P_{mj} P_m(1) \right]. \quad (21)$$

以此类推再次迭代, 当值趋于稳定后形成 t 阶迭代 power 能力向量 $P(t) = [P_1(t) P_2(t) \dots P_m(t)]$ 。同样地, 得到 t 阶迭代 weakness 能力向量 $W(t) = [W_1(t) W_2(t) \dots W_m(t)]$ 。

步骤7 计算被评方案的 PWR。将所有被评方案的性能以优劣比值形式表达, 寻求被评方案的最大优势与最小劣势之间的最佳平衡。

$$r_i = \frac{P_i(t)}{W_i(t)}, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (22)$$

得到 $Q = [r_1 r_2 \dots r_i \dots r_m]$, r_i 为第 i 个被评方案的 PWR 值。对 m 个被评方案的 PWR 进行排序。自然, 拥有 t 阶最小 PWR 是最优方案。

3 案例分析

3.1 指标体系与数据来源

云南地处云贵高原,海拔落差大,地理及气候条件优秀,生物资源丰富,其生鲜农产品种类不胜枚举,特色鲜明,深受大众欢迎,远销国内外许多地区。为有效管理和提升其冷链物流服务质量,为用户提供精准化、个性化、高品质的服务体验,促进产业健康可持续发展,省政府派出调研小组筛选了省内 4 家具有典型性与代表性并有条件获取所需的数据资料的某知名冷链物流供应商 $A_i = \{A_1, A_2, A_3, A_4\}$, 对其冷链物流服务质量进行评价。

在冷链物流服务质量需求日益专业化、个性化的背景下,构建以用户为中心、重视用户使用体验与服务需求的服务质量评价指标体系是对冷链物流服务质量进行准确评价的基础。调研小组邀请来自 5 名冷链物流服务质量领域的专家从用户感知视角出发,通过参考文献 [6-8] 等指标构建思路,借鉴已有研究关于农产品冷链物流服务质量评价的合理内容,对 SERVQUAL 模型的有形性、可靠性、响应性、保障性和移情性 5 个维度进行了调整,对其进行了一定的增减、修改和诠释。在 SERVQUAL 模型基础上,以专业性替代有形性从硬件设施、服务基础条件角度对服务质量进行测量,以便利性替代移情性来衡量物流供应商提供的物流服务能否为用户带来最大程度的便利。考虑到用户对物流供应商所提供的产品包装、品质安全以及个人信息安全的重视,剔除移情性维度,增设安全性维度。由此调研小组结合农产品冷链物流服务质量现状最终确定冷链物流服务质量测评的 5 个指标维度为专业性、可靠性、响应性、便利性和安全性,各指标维度下的具体指标如表 1 所示。

在上文构建的指标体系基础上,调研小组连同 5 名专家,从专业性、可靠性、响应性、便利性和安全性 5 个维度,共计 16 项评价指标出发,设计确定了调查问卷。为确保样本数据的代表性和合理性,调研小组选取 200 名高频使用 4 家冷链供应商服务的生鲜食品消费者进行线上问卷调查,这些用户每周均有采购需求且呈现显著需求差异。调研小组共发放问卷 200 份,回收有效问卷 184 份,有效回收率为 92.5%。为了检验正式问卷收集数据的信度,本研究利用 SPSS 22.0 对上述 5 个维度数据进行分析,得出的克隆巴哈系数为 0.93,表明量表有良好的内部一致性,具有较高的可信度。

3.2 评价步骤

步骤 1 根据获取到的用户评价数据确定初始犹

豫模糊评价矩阵,见表 2。

表 1 冷链物流服务质量的指标体系

Table 1 Index system of cold chain logistics service quality

维度	指标编号	具体指标
专业性	S_1	货物送达时外包装的完好程度和整洁
	S_2	物流服务人员的专业化素养
	S_3	有专业的冷链物流设备
	S_4	有专业的包装工艺及加工工艺
可靠性	S_5	能够提供准确实时的物流信息
	S_6	物流途中保证农产品品质的稳定和新鲜度
	S_7	提供完整详细的食品来源信息
响应性	S_8	订单处理及发货速度快
	S_9	对发货时间能及时通知
	S_{10}	售后问题及反馈响应及时
	S_{11}	能够及时联系到平台的物流人员
便利性	S_{12}	支付的灵活性
	S_{13}	线上退货操作方便
	S_{14}	提供便利的收货时间和收货方式
安全性	S_{15}	保证食品及食品包装的安全性
	S_{16}	用户的信息是安全的

表 2 冷链物流服务质量评价矩阵

Table 2 Cold chain logistics service quality evaluation matrix

编号	A_1	A_2	A_3	A_4
C_1	{0.7}	{0.2}	{0.5}	{0.8}
C_2	{0.6, 0.4}	{0.4, 0.3}	{0.7, 0.6, 0.5}	{0.9}
C_3	{0.7}	{0.2}	{0.6}	{0.7, 0.8}
C_4	{0.75}	{0.3}	{0.8, 0.4}	{0.8}
C_5	{0.5, 0.6}	{0.4, 0.5}	{0.6}	{0.7, 0.9}

调研小组邀请 5 位专家经商讨后取得一致意见,最终给出的各指标权重 ω_j , 如表 3 所示。

表 3 指标权重

Table 3 Index weight

编号	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
$\omega_j/\%$	25	15	20	28	12

步骤 2 结合专家给出的指标权重,通过式 (14) 将各指标权重加权到评价矩阵,如表 4 所示。

表 4 加权评价矩阵

Table 4 Weighted evaluation matrix

	A_1	A_2	A_3	A_4
C_1	{0.26}	{0.05}	{0.16}	{0.33}
C_2	{0.13, 0.07}	{0.07, 0.05}	{0.17, 0.13, 0.10}	{0.29}
C_3	{0.21}	{0.04}	{0.17}	{0.21, 0.28}
C_4	{0.32}	{0.10}	{0.36, 0.13}	{0.36}
C_5	{0.08, 0.13}	{0.06, 0.08}	{0.10}	{0.13, 0.24}

步骤 3 划分理想解, 通过式 (15) 对评价价值进行计算排序, 确定理想解, 如表 5 所示。

表 5 理想解

Table 5 Ideal solution

PIS 分级	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
第 1PIS	{0.33}	{0.29}	{0.21, 0.28}	{0.36}	{0.13, 0.24}
第 2PIS	{0.26}	{0.17, 0.13, 0.10}	{0.21}	{0.32}	{0.10}
第 3PIS	{0.16}	{0.13, 0.07}	{0.17}	{0.36, 0.13}	{0.08, 0.13}
第 4PIS	{0.05}	{0.05, 0.07}	{0.04}	{0.10}	{0.06, 0.08}

步骤 4 将第 1、2PIS 作为正理想解, 第 3、4PIS 作为负理想解。构造各个方案与正负理想解的距离矩阵作为 Power 矩阵与 Weakness 矩阵, 并运用式 (16)~(18) 进行计算方案在每个指标下的正负理想解距离, 如表 6 所示。

表 6 未迭代方案与正负理想解的距离

Table 6 Distances between non-iterative scheme and positive-negative ideal solutions

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	P/W 值	PWR 值
$A_1 (d_1^+)$	0.325	1.420	0.625	0.680	0.360	3.435	1.008
$A_1 (d_1^-)$	0.581	0.222	0.447	0.967	0.224	3.408	
$A_2 (d_2^+)$	2.061	1.906	2.239	2.989	1.760	10.955	5.375
$A_2 (d_2^-)$	0.293	0.509	0.352	0.644	0.240	2.038	
$A_3 (d_3^+)$	0.902	1.066	0.835	0.850	1.356	5.009	3.445
$A_3 (d_3^-)$	0.285	0.232	0.244	0.468	0.225	1.454	
$A_4 (d_4^+)$	0.982	0.879	0.891	1.122	1.112	4.806	1.008
$A_4 (d_4^-)$	1.543	1.529	0.519	0.810	0.367	4.768	

表中显示 A_1 与 A_4 的 PWR 值相等, 对此, A_1 与 A_4 难以比较, 因此通过迭代传递指标之间的相互作用判断累积优势, 将微小的差异迅速累积放大再进行判断。

步骤 5 通过式 (19)~(21) 进行一次迭代后的方案与正负理想解的距离及 P 值与 W 值如表 7 所示。

表 7 迭代一次方案与正负理想解的距离

Table 7 Distances between one-iteration scheme and positive-negative ideal solutions

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	P/W 值	PWR 值
$A_1 (d_1^+)$	0.174	0.911	0.317	0.490	0.762	2.654	1.467
$A_1 (d_1^-)$	0.472	0.191	0.375	0.576	0.195	1.809	
$A_2 (d_2^+)$	3.184	2.973	3.445	4.539	2.745	16.886	10.937
$A_2 (d_2^-)$	0.273	0.248	0.315	0.493	0.215	1.544	
$A_3 (d_3^+)$	0.590	0.719	0.550	0.537	1.137	3.533	4.103
$A_3 (d_3^-)$	0.168	0.132	0.187	0.261	0.113	0.861	
$A_4 (d_4^+)$	0.287	0.242	0.236	0.350	0.302	1.417	0.440
$A_4 (d_4^-)$	0.796	0.386	0.580	0.879	0.578	3.219	

进行一次迭代后, 通过式 (22) 计算其 PWR

值, 得到最终的冷链服务质量评价结果。可以发现 A_4 与 A_1 的整体差异通过迭代开始凸显, A_4 累积优势更为突出, 经过排序得: $A_4 > A_1 > A_3 > A_2$ 。

3.3 结果分析

通过表 7 的计算结果可以看出来, 4 家冷链物流供应商的 PWR 值分别为 1.467, 10.937, 4.103, 0.440。 A_1 虽然在可靠性与安全性这两个维度下的评分较低, 但由于这两个维度所占权重偏低, 分别为 12% 和 15%, 而其在权重占比较高, 分别为 25%, 20%, 28% 的专业性、响应性、安全性 3 个维度下评分较高, 因此对评分结果影响较小, 以 PWR 值 1.467 排名第 2。 A_1 与 A_4 在未进行迭代前, A_4 在可靠性维度表现极佳而 A_1 在可靠性维度表现较差, 但由于可靠性维度所占权重最低, 对分值影响较低, 因此两者 PWR 值相同。经过一次迭代后, 各维度的影响力被放大, 累积优势凸显, A_1 与 A_4 最终 PWR 值分别为 1.467, 0.440, A_4 的综合优势更为突出, 排名第 1。但 A_4 在便利性维度稍显逊色, 需加大对其支付的灵活性、线上退货操作的方便性、提供收货时间和收货方式的便利性等方面的关注度。而 A_1 虽处于第 2 的排名, 也需在可靠性与安全性维度作出合理改善。同样 A_3 在可靠性和安全性维度下的评分虽高, 但也因其权重占比小, 以 PWR 值 4.103 排名第 3, 可以先从便利性入手进行改进, 比如加强支付的灵活性、缩减退换货流程以及完善用户意见反馈机制等。 A_2 以 PWR 值 10.937 作为综合得分最低的供应商, 在专业性、可靠性、响应性、便利性和安全性 5 个维度均表现不佳, 尤其安全性维度表现极差, 应尽快加强食品及食品包装以及用户信息的安全性管理。综合以上分析, 仍能得出 A_4 的冷链物流服务质量总体为最优, 更加体现出基于本研究方法进行冷链物流服务质量评价结果的准确性。

3.4 建议

通过对某省 4 个冷链物流供应商进行问卷调查评估, 并对取得的数据进行分析可知, 其冷链物流服务质量与理想的期望均存在一定程度的差距。为了更好地管理和提升冷链物流服务质量, 为用户提供精准化、个性化、高品质的服务体验, 可以从专业性、可靠性、响应性、便利性和安全性这 5 个维度着手对冷链物流服务质量进行改进。在专业性方面, 运输过程中应注意冷链物流服务质量的, 通过完善冷链基础设备与配送设备构建、健全冷链干支线网络建设, 来保证生鲜品质, 降低物流成本, 提高物流效率; 在可靠性方面, 建立实时质量监测系统, 采取实时远程监测和定期实地检查结合的方

式完善对生鲜农产品的监测,在存储、运输及配送途中保证农产品品质的稳定及新鲜度。为用户建立生鲜产品信息追溯系统,让用户能够随时随地了解产品质量安全信息,放心购买;在响应性及便利性方面,供应商应加强支付的灵活性、缩减退换货流程、完善用户意见反馈机制、提高订单处理以及发货速度;在安全性方面,加强农产品预处理和预包装的标准化处理,完善用户信息保护机制。

4 结论

冷链物流服务质量的评价是物流供应商准确认识自身在物流服务中存在的优势和不足,进行调整改善优化更好地服务于用户获得竞争能力的重要一环。本研究提出一种考虑多级参照的冷链物流服务质量评价的HFS-PWR方法。具有以下特点:

(1) 考虑到参与评价用户其个体感知和偏好存在差异,为全面表征用户意见差异并保证原始数据的真实性,采用HFS表达用户评价信息,以有效避免评价信息损失。

(2) 针对评价过程需兼顾被评对象性能的整体性与其各属性下的优劣势度情况,利用PWR方法将决策者对被评对象优劣势度的内在权衡性以优劣比值的形式更为直接地表达,强调均衡协调发展,并通过迭代提升被评对象间的整体区分度,得到呈现整体综合水平优劣排序结果。考虑了各被评对象可能会出现最终评价值相差很小甚至相同的情形,在保证评价信息准确性和有效性的同时简化了计算且分辨率更高。

(3) 相较于以往评价方法多从单一角度发出设置参照点,本研究借鉴PROBID方法的思想,将整个评价数据划分为不同级理想解作为参照点,通过计算被评对象与各级理想解的加权平均距离来确定被评对象的优劣势。能够使用设置的更多指标而不失去稳定性并提供合理的一致性,评价信息处理能力更强,提高了评价方法的科学性与合理性,更加符合实际评价情况。

所提方法已应用于云南省4个冷链物流供应商的物流服务质量评价,通过实例验证了方法的可行性与有效性。

参考文献:

References:

- [1] 李春发,米新新,崔鑫. 基于双曲正切函数改进蚁群算法的冷链物流配送路径优化[J]. 公路交通科技, 2023, 40(12): 236-244, 258.
LI Chunfa, MI Xinxin, CUI Xin. Optimization of unction [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2023, 40(12): 236-244, 258.
- [2] 陈红丽,潘奕搏,丁丽娟. 冷链物流配送网络选址-路径-库存的优化[J]. 公路交通科技, 2024, 41(10): 47-55.
CHEN Hongli, PAN Yibo, DING Lijuan. Location-routing-inventory optimization for cold-chain logistics distribution network [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2024, 41(10): 47-55.
- [3] 万君,刘勋勋. 基于动态贝叶斯网络的冷链物流风险评价[J]. 公路交通科技, 2023, 40(10): 248-256.
WAN Jun, LIU Xunxun. Risk assessment of cold chain logistics based on dynamic bayesian network [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2023, 40(10): 248-256.
- [4] 叶俊,顾波军,付雨芳. 不同贸易模式下生鲜农产品供应链冷链物流服务与定价决策[J]. 中国管理科学, 2023, 31(2): 95-107.
YE Jun, GU Bojun, FU Yufang. Pricing and cold-chain logistics service decisions of fresh agriculture products supply chain under different trade modes [J]. Chinese Journal of Management Science, 2023, 31(2): 95-107.
- [5] 姜岩. 物流服务质量理论研究进展(1989—2020)——基于系统文献回顾法的研究述评[J]. 中国流通经济, 2021, 35(4): 13-25.
JIANG Yan. Research progress of logistics service quality theory (1989—2020) ——The research review based on systematic literature review [J]. Chinese Circulation Economy, 2021, 35(4): 13-25.
- [6] 张宝友,杨玉香,孟丽君. 物流服务质量评价模型与方法研究综述[J]. 中国流通经济, 2021, 35(2): 49-60.
ZHANG Baoyou, YANG Yuxiang, MENG Lijun. A literature review of logistics service quality evaluation models and methods [J]. Chinese Circulation Economy, 2021, 35(2): 49-60.
- [7] 易祎晨,史言信. 疫情常态化下生鲜电商物流服务质量提升研究[J]. 江西财经大学学报, 2022(1): 65-75.
YI Yichen, SHI Yanxin. Research on the logistics service quality improvement of fresh food e-commerce under the normalization of the COVID-19 epidemic [J]. Journal of Jiangxi University of Finance and Economics, 2022(1): 65-75.
- [8] 张浩,邱斌,唐孟娇,等. 基于改进突变级数法的农产品冷链物流风险评估模型[J]. 系统工程学报, 2018, 33(3): 412-421.
ZHANG Hao, QIU Bin, TANG Mengjiao, et al. Risk

- assessment model of agricultural product cold chain logistics based on improved catastrophe progression method [J]. *Journal of Systems Engineering*, 2018, 33 (3): 412-421.
- [9] 山红梅, 杨雪静. 基于云模型-IAHP 的生鲜农产品冷链物流服务水平评估 [J]. *公路交通科技*, 2020, 37 (10): 142-150.
- SHAN Hongmei, YANG Xuejing. Evaluation of cold chain logistics service level of fresh agricultural products based on cloud model-IAHP [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2020, 37 (10): 142-150.
- [10] 耿秀丽, 谷玲玲. 基于改进 ER 的生鲜冷链物流服务质量评估方法 [J]. *计算机应用研究*, 2020, 37 (5): 1460-1464.
- GENG Xiuli, GU Lingling. Evaluation method of fresh cold chain logistics service quality based on improved ER [J]. *Computer Applications Research*, 2020, 37 (5): 1460-1464.
- [11] 徐广妹. 基于粗糙集的电商物流服务质量评价应用研究——以生鲜电商为例 [J]. *中国流通经济*, 2019, 33 (7): 35-44.
- XU Guangshu. Research on the evaluation of fresh E-commerce's logistics service quality based on rough set [J]. *China Circulation Economy*, 2019, 33 (7): 35-44.
- [12] 刘明菲, 陈威. 基于集成 DEMATEL-ISM 的生鲜冷链前置仓物流服务质量风险影响因素研究 [J]. *安全与环境工程*, 2020, 27 (1): 118-125.
- LIU Mingfei, CHEN Wei. Research on risk impacting factors of logistics service quality of fresh cold chain front warehouse based on DEMATEL-ISM method [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2020, 27 (1): 118-125.
- [13] 姜旭, 胡雪芹. 基于组合赋权模型的物流企业绩效评价指标体系构建研究 [J]. *管理评论*, 2020, 32 (8): 304-313.
- JIANG Xu, HU Xueqin. Construction of performance evaluation index system for logistics enterprises based on combination weighting model [J]. *Management Review*, 2020, 32 (8): 304-313.
- [14] RAMANUJACHARYULU C. Analysis of preferential experiments [J]. *Psychometrika*, 1964, 29 (3): 257-261.
- [15] TODESCHINI R, GRISONI F, NEMBRI S. Weighted power-weakness ratio for multicriteria decision making [J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2015, 146: 329-336.
- [16] GRISONI F, CONSONNI V, NEMBRI S, et al. How to weight Hasse matrices and reduce incompatibilities [J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2015, 147: 95-104.
- [17] 范体军, 郑琪, 蔡路. 考虑权力结构及供应商竞争的生鲜供应链决策 [J]. *管理科学学报*, 2022, 25 (1): 23-38.
- FAN Tijun, ZHENG Qi, CAI Lu. Supply chain decisions for fresh products with competitive suppliers under different power structures [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2022, 25 (1): 23-38.
- [19] 刘超, 汤国林, 刘培德. 基于模糊测度与累积前景理论的区间二型模糊多准则决策方法 [J]. *运筹与管理*, 2020, 29 (9): 70-81.
- LIU Chao, TANG Guolin, LIU Peide. Interval type-2 fuzzy multi-criteria decision-making method based on fuzzy measure and cumulative prospect theory [J]. *Operations Research and Management Science*, 2020, 29 (9): 70-81.
- [20] 王浩伦, 张发明, 完颜晓盼, 等. 基于 q 阶 orthopair 模糊集和参考理想的多准则决策方法 [J]. *中国管理科学*, 2023, 31 (10): 245-253.
- WANG Haolun, ZHANG Faming, WAN-YAN Xiaopan, et al. A multi-criteria decision-making method based on q-rung orthopair fuzzy set and reference ideal method [J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2023, 31 (10): 245-253.
- [21] CHEN N, XU Z, XIA M. Interval-valued hesitant preference relations and their applications to group decision making [J]. *Knowledge-based systems*, 2013, 37: 528-540.
- [22] BISWAS S, PAMUCAR D, CHOWDHURY P, et al. A new decision support framework with picture fuzzy information: comparison of video conferencing platforms for higher education in India [J]. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2021, 1 (2021): 2046097. doi: <https://doi.org/10.1155/2021/2046097>
- [23] TORRA V. Hesitant fuzzy sets [J]. *International Journal of Intelligent systems*, 2010, 25 (6): 529-539.
- [24] WANG Z Y, RANGAIAH G P, WANG X N. Preference ranking on the basis of ideal-average distance method for multi-criteria decision-making [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2021, 60 (30): 11216-11230.
- [25] 彭定洪, 张文华. 智慧无废城市评选的序贯式群决策 EDAS 法 [J]. *系统科学与数学*, 2021, 41 (3): 688-704.
- PENG Dinghong, ZHANG Wenhua. Sequential group EDAS decision making method for smart zero waste city selection [J]. *Journal of Systems Science and Mathematics Sciences*, 2021, 41 (3): 688-704.