

基于模糊随机层次分析法的供应商 可持续评估模型改进

毛人杰¹, 尤建新¹, 段春艳^{1,2}, 石涌江³, 尤筱玥^{1,3}

(1. 同济大学 经济与管理学院, 上海 200092; 2. 华盛顿大学 放射肿瘤系, 西雅图 98195; 3. 剑桥大学 制造研究院, 剑桥 CB3 0FS)

摘要: 利用第三方供应商可持续性评估平台, 跨国企业能够更有效监督全球范围内的供应商在可持续发展中做出的努力与改进. 在使用第三方平台评估供应商可持续性表现时, 发现用于评价和处理指标权重和供应商指标得分的方法缺乏精确度. 为此, 提出采用随机层次分析法和三角模糊数理论对评估模型进行优化. 为检验改进模型的有效性, 采用企业实际案例, 对比分析原始模型与改进模型的评估结果, 发现改进模型能够将供应商可持续性表现有效差异化, 得到区分度较明显的评价排序.

关键词: 供应商评估; 可持续; 随机层次分析法; 三角模糊数

中图分类号: F27

文献标志码: A

An Improved Sustainable Supplier Evaluation Model Based on Stochastic Analytical Hierarchy Process Method and Fuzzy Set Theory

MAO Renjie¹, YOU Jianxin¹, DUAN Chunyan^{1,2}, SHI Yongjiang³, YOU Xiaoyue^{1,3}

(1. College of Economics and Management, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Radiation Oncology, University of Washington, Seattle 98195, USA; 3. Institute for Manufacturing, University of Cambridge, Cambridge CB3 0FS, UK)

Abstract: Based on a third-party platform for evaluating supplier sustainability, transnational companies can effectively monitor how much efforts and improvements their global suppliers have made in sustainability. However, methods on the basis of the platform for evaluating and calculating the weights of indexes and values suffered from a lack of accuracy. A stochastic analytical hierarchy process (SAHP) method and the triangular fuzzy number were adopted to optimize the evaluation model. Besides, a practical case about the sustainability assessment of suppliers was analyzed by the

original method and the improved method separately. The comparative results show that the proposed model successfully differentiates the sustainable performance of suppliers and obtains a distinct rank.

Key words: supplier evaluation; sustainability; stochastic analytical hierarchy process(SAHP); triangular fuzzy number

由于自然资源的有限性以及对企业社会责任的多种关切, 企业的可持续发展压力日益加剧. 政府、客户、盈利组织和非营利组织都要求企业在可持续发展方面做出努力, 制造可持续性更高的产品^[1]. 1994 年, Webb^[2]研究了产品对环境的影响, 建议通过建立环境准则来选择合适的原材料, 同时注重再生利用, 并提出了绿色采购的概念. 随后, 学术界对绿色供应链的研究愈发活跃, 并于 1996 年由国际标准化组织推出 ISO14000 等一系列指标. 而在企业实践方面, 低碳经济、可持续发展理念也随着科技发展而逐渐融入到企业文化中, 谋求产品质量保证的同时提高绿色环保能力, 从而体现企业的社会责任.

产品的可持续性不仅包含了所取原材料和工艺流程的可持续, 而且向前向后延展至整个产品生命周期的可持续, 其中涉及的除了企业自身的可持续性改善之外, 还要求供应商的协同合作. 因此, 有必要对企业的供应商在可持续发展中做出的努力进行有效监督和完善. 为此, C 公司与同行业部分其他企业合作, 建立了针对供应商可持续性评估的第三方平台, 即 ECO 系统, 要求同意参与评估的所有供应商根据流程提供相关证明材料和数据, 并根据评估结果进行定向改进, 从而促使供应商与企业向可持续发展共同迈进.

收稿日期: 2017-11-20

基金项目: 国家自然科学基金(71402090, 71671125, 71701153); “博士后国际交流计划”派出项目(20160087)

第一作者: 毛人杰(1976—), 男, 博士生, 主要研究方向为管理理论与工业工程. E-mail: maorjb@gmail.com

通讯作者: 尤筱玥(1991—), 女, 博士生, 主要研究方向为战略管理与财务管理. E-mail: yxyrachel@sina.com



扫码
查看
作者
独家
介绍

然而,考虑到 ECO 系统在业界的使用便捷性,初期的评价指标只有 4 项,并且其运算方式全部采用加权平均法,严重影响了评估结果的准确度和参考价值.因此,C 公司提出对系统的评价流程进行改进,例如丰富或细化评价指标、改善运算模型.目前,针对可持续供应商选择的研究已有若干,包括模型研究^[3-4]、评价指标/准则筛选^[5]、不同压力对可持续供应商发展的影响等^[6],这些成果将对 ECO 系统的完善途径提供有力的理论支持.

本文从 C 公司的角度,对 ECO 系统的供应商可持续性表现评估进行改进.首先,从 ECO 系统中统计总结系统流程的缺陷及其后果,包括指标内容宽泛、计算方式不准确以及供应商排序结果重复.随后,在参考若干决策模型的基础上提出采用三角模糊数来描述专家评估内容,结合层次分析法来确定评价指标的相对权重,并最终确定若干供应商的可持续性表现优劣排序.与单纯的加权平均算法相比较,改进模型的计算方式能够明显提高评估结果的准确度和可靠度,有效避免排序重复情况.

1 ECO 评价系统的不足与改进

1.1 ECO 评价系统

为了提高监督工作的有效性与公平性,C 公司借助 ECO 系统完成供应商可持续性评估工作. ECO 系统是独立于企业与供应商之外的、针对供应商可持续性评估的第三方平台.其优势体现于:① 公平性,能够采用统一的标准对不同企业的供应商可持续性做出客观评价;② 多功能性,兼具评价模块与改进模块功能,能够有效监督供应商在可持续发展中做出的努力与改进;③ 可共享性,平台中的供应商在加入之前需授权其评估结果的信息共享,因此,平台注册成员可以对比自己与全球范围内的供应商在可持续发展中的表现.

目前,ECO 系统的评估准则由专家团队根据若干环保公约、人权宣言、以及参考文献研究制定.评估指标共有 4 条,包括环境(environment, ENV)、劳工和人权(labor practices, LAB)、商业道德(fair business practices, FBP)和可持续采购(sustainable procurement, SUP).在参评过程中,供应商需根据问卷提交相应的证明材料或报告,随后 ECO 的专家团队将以此作为依据进行完成度评价,并综合得到指标的分数,最后用加权平均的方式得到供应商可持续性评估综合得分.

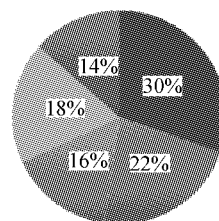
1.2 不足与改进

虽然 ECO 系统已被广泛使用于企业可持续性评估中,但在实践时,还存在以下不足之处:

(1)评价指标权重时未考虑指标间的相互影响关系;

(2)评价供应商不同指标得分时难以给出精确数值.在实际评估过程中,由于供应商可持续发展意识不足,时常出现缺乏支持文件或随意上传文件的情况.如图 1 所示,在随机抽取的 300 份供应商可持续性发展能力评估报告中,有 30%的供应商上传的支持文件小于 5 份,其中上传 0 份文件的占到 14.33%;

(3)评估指标较少且简单采用加权平均方法计算供应商综合得分,再经四舍五入之后经常出现同分现象,造成无法判别供应商优劣.



■ [0,5) ■ [0,10) ■ [10,20) ■ [20,40) ■ [40,130)

图 1 供应商提供的支持文件数量统计

Fig. 1 Supporting documents provided by suppliers statistics

供应商选择是一个多准则决策问题(multi-criteria decision-making, MCDM)^[7].研究表明,模糊集理论(fuzzy set theory)能够有效解决 MCDM 评价信息的模糊性和不完整性问题. Zhao 等^[8]将直觉模糊集与组合权重应用于改进 VIKOR 模型(VIseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje),由此提高了供应商选择过程的精确性和客观性.尤筱玥和尤建新^[9]则通过区间二元语义与 VIKOR 模型相结合,规避了排序结果重复问题,同时避免了数据采集和处理过程中的信息缺失情况.高建伟等^[10]利用区间直觉模糊集来表达和处理模糊不确定信息,并提出一种基于前景理论的随机直觉模糊决策方法.付畅俭和皮冬洋^[11]基于犹豫模糊软集,提出了一种考虑个体偏好和可信度的多准则群决策方法. Gou 等^[12]将 Atanassov 直觉模糊集(Atanassov's intuitionistic fuzzy set, A-IFS)、毕达哥斯拉模糊集(Pythagorean fuzzy set, PFS)和犹豫模糊集(hesitant fuzzy set, HFS)3 种模糊数集结合,用于处理多种非精确数值的计算.

Jalao 等^[13]在处理 MCDM 问题时,将随机变量与层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)结合,提出随机层次分析法(stochastic analytical hierarchy process, SAHP)用于计算指标的权重. Cobuloglu 和 Büyüktaktın^[14]在其基础上将精确值、区间值和三角数三者相结合来解决评价信息的不确定性.

为解决评价指标少、权重不合理、计算方式缺乏精确度等问题,本文在基于 C 公司供应商可持续性评估实际工作基础上,通过参考大量供应商可持续性评估资料,将原有的 4 个评估指标进行拓展,给出供应商在细分指标下的得分.同时,采用 SAHP 计算 4 个指标和细化指标的权重.该模型主要有两方面优点:① 将评价指标进行分层处理,在计算权重时充分考虑指标与指标之间的相互影响;② 在评价指标间的相对重要性时,决策者可以根据个人喜好选择合适的方法,如精确值、三角模糊数(triangular fuzzy number)^[15]等,来表示评价值,给予决策者充分的灵活性.针对 ECO 系统计算方式的改进中,将采用三角模糊数来表示供应商在每个细化指标下的得分,并根据规则运算给出供应商可持续表现排序.

2 供应商可持续性评估模型

2.1 问题描述

假设 C 公司决定在 m 个供应商 $A_i (i=1, 2, \dots, m)$ 中选出一个可持续发展能力最好的供应商,增加与该供应商的业务合作量作为激励措施.根据选定的评价指标,由 l 个来自不同部门的专家 $E_k (k=1, 2, \dots, l)$ 组成的评价小组,对备选供应商的可持续表现进行客观数据收集和主观经验判断.根据专家的职位、知识及经验赋予各专家权重,用 $\lambda_k (k=1, 2, \dots, l)$ 表示.供应商可持续性评估流程如图 2 所示.

2.2 计算评价指标权重

在参考 C 公司原有的 4 个评价指标的基础上,结合若干关于供应商可持续性评价指标的研究成果^[11, 15-19],选取适用的指标,包括污染控制能力、环境管理体系、企业绿色形象、环境竞争能力;童工使用、工作时间、公平待遇、工资福利;公平竞争、商业诚信、保密与知识产权;明确关键要求、供应商培训、监管力度.评价指标的描述详见表 1.

基于 AHP 模型的具体评价指标权重计算步骤如下:

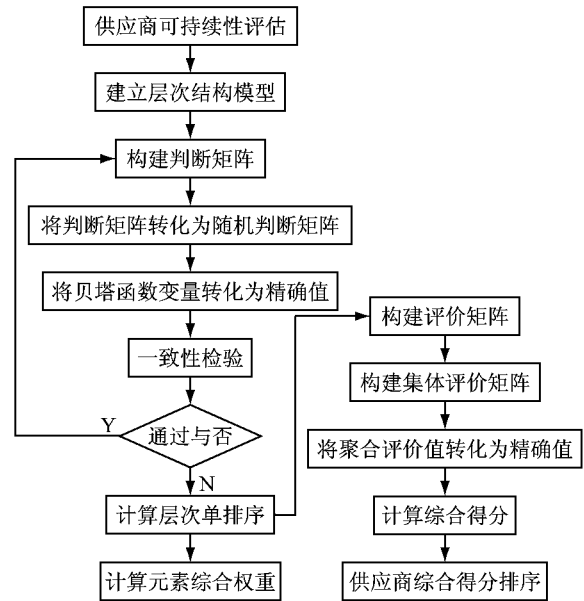


图 2 供应商可持续性评估流程

Fig. 2 Process for evaluating sustainability of suppliers

(1) 建立层次结构模型.

应用 AHP 方法解决评价指标权重问题时,首先需要将评价问题条理化、层次化,构造出一个含有最高层(目标层)、中间层(包括准则层和指标层)、最底层(方案层)的层次结构模型.令准则层元素用 (B_1, B_2, \dots, B_p) 表示,指标层元素用 (C_1, C_2, \dots, C_q) 表示.

(2) 构建判断矩阵.

采用 Saaty^[20]提出的 1~9 比例标度法,见表 2,对准则以及同准则下指标进行两两重要性比较,构造出判断矩阵.假设每个评价矩阵共有 t 个元素, $F_i (i=1, 2, \dots, t)$ 参与两两比较,则判断矩阵 R 如下:

$$R = (r_{ij})_{t \times t} = \begin{matrix} & F_1 & F_2 & \cdots & F_t \\ \begin{matrix} F_1 \\ F_2 \\ \cdots \\ F_t \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & r_{12} & \cdots & r_{1t} \\ 1/r_{12} & 1 & \cdots & r_{2t} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 1/r_{1t} & 1/r_{2t} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (1)$$

式中: r_{ij} 表示元素 F_i 相对元素 F_j 的相对重要性评价值.

在给定两个元素的相对重要性评价值时,专家可以选择精确值、区间值或三角模糊数.如:当专家认为 F_i 与 F_j 相比,前者“一定”比后者明显重要,则 $r_{ij}=5$;当专家认为 F_i 与 F_j 相比,前者可能和后者同等重要也可能比后者稍微重要,则 $r_{ij}=[1, 3]$;当专家认为 F_i 与 F_j 相比,前者至少和后者同等重要,至多比后者明显重要或最有可能比后者稍微重要,则 $r_{ij}=[1, 3, 5]$.

表 1 供应商可持续性评价指标描述与来源

Tab. 1 Description and source of indexes for evaluating supplier sustainable performance

评价指标	描述	来源
C ₁ 污染控制能力	制造过程中原料、控制能源和水资源的消耗;减少污染物、废水、固体废物和有害物质的排放量。	
C ₂ 环境管理体系	环境认证,如 ISO 14000;环境政策、环境目标规划、检查和控制环境活动。	
C ₃ 企业绿色形象	供应商在焦点公司心中的环境责任状况,与环境问题相关的供应商的舆论等。	付畅俭和皮冬洋 ^[11] 、Jalao 等 ^[13]
C ₄ 环境竞争能力	在产品制造时,使用环保材料,绿色制造工艺;能够改变、适应生产过程和产出产品,减少对自然资源的影响;使用更清洁的制造工艺和技术。	
C ₅ 童工使用	供应商应当按照相关劳工标准和国际契约,在其业务运营活动中避免使用任何类型的童工。	
C ₆ 工作时间	员工的工作时间不应当超过当地国家法律规定的上限。	
C ₇ 公平待遇	供应商不允许不公平地终止任何一份员工合同。	
C ₈ 工资福利	付给员工的报酬应当符合当地国家法律的要求,并能够保证适当的生活水准。	若干人权宣言、全球契约
C ₉ 公平竞争	供应商开展业务时,应做到公平竞争,并遵守所有适用的反垄断法。	
C ₁₀ 商业诚信	供应商不应实施或容忍任何形式的腐败、勒索或贪污行为。	
C ₁₁ 保密与知识产权	供应商应保护与正确使用所有员工和业务伙伴的信息。	
C ₁₂ 明确关键要求	供应商应明确对下游合作伙伴(供应商的供应商)可持续采购关键要求。	
C ₁₃ 供应商培训	供应商应给予下游合作伙伴(供应商的供应商)关于可持续性理念、实践等方面以适当指导	改自 ECO 系统
C ₁₄ 监管力度	供应商应对下游合作伙伴(供应商的供应商)定时进行可持续性评价,与其一道改进不足领域	

表 2 1~9 比例标度及描述

Tab. 2 1~9 proportional scale description

比例标度	描述
1	两个元素相比,同样重要
3	两个元素相比,前者比后者稍重要
5	两个元素相比,前者比后者明显重要
7	两个元素相比,前者比后者强烈重要
9	两个元素相比,前者比后者极端重要
2,4,6,8	表示上述相邻判断的中间值
倒数	若元素 B _i 与元素 B _j 的重要比为 b _{ij} ,则元素 B _j 与元素 B _i 的重要比为 1/b _{ij}

(3) 将判断矩阵 **R** 转化为随机判断矩阵 $R' = (r'_{ij})$

根据 Jalao 等^[13],假设评价值 r_{ij} 服从概率密度函数为 $f_{ij}(r_{ij} | \theta_{ij})$ 的分布,若 r_{ij} 为精确值,则 $r_{ij} \sim f_{ij} = r_{ij}$;若为三角模糊数,则 r_{ij} 服从三角分布,即 $r_{ij} \sim f_{ij}(r_{ij}^{LL}, r_{ij}^{ML}, r_{ij}^{UL}) = T_{ij}(r_{ij}^{LL}, r_{ij}^{ML}, r_{ij}^{UL})$;若 r_{ij} 为区间值,则 r_{ij} 服从均匀分布,即 $r_{ij} \sim f_{ij}(r_{ij}^{LL}, r_{ij}^{ML}, r_{ij}^{UL}) = U_{ij}(r_{ij}^{LL}, r_{ij}^{ML}, r_{ij}^{UL})$. 随后采用贝塔函数(beta function)来统一拟合服从这 3 种分布的评价值. 令 r_{ij} 服从贝塔分布 $B(r_{ij} | \alpha_{ij}, \beta_{ij}, r_{ij}^{LL}, r_{ij}^{UL})$, 其中 $(\alpha_{ij}, \beta_{ij})$ 为形状参数, $(r_{ij}^{LL}, r_{ij}^{UL})$ 为位置参数,且 $r_{ij}^{LL} < r_{ij} < r_{ij}^{UL}$, $\alpha_{ij}, \beta_{ij} \geq 1$,根据矩估计法可以得到参数估计值.

$$E(r_{ij}) = r_{ij}^{LL} + \frac{\alpha_{ij}}{\alpha_{ij} + \beta_{ij}} (r_{ij}^{UL} - r_{ij}^{LL}) \quad (2)$$

$$\text{Var}(r_{ij}) = \frac{\alpha_{ij}\beta_{ij}}{(\alpha_{ij} + \beta_{ij})^2(\alpha_{ij} + \beta_{ij} + 1)} (r_{ij}^{UL} - r_{ij}^{LL})^2 \quad (3)$$

式中: $E(r_{ij})$ 为评价值 r_{ij} 的期望; $\text{Var}(r_{ij})$ 为评价值 r_{ij} 的方差. 令式(2)和式(3)计算结果分别等于

样本的均值与方差,即 $E(r_{ij}) = \bar{r}_{ij}$, $\text{Var}(r_{ij}) = S_{ij}^2$, 可以得到形状参数估计值如下:

$$\alpha_{ij} = \left(\frac{\bar{r}_{ij} - r_{ij}^{LL}}{r_{ij}^{UL} - r_{ij}^{LL}} \right) \left[\frac{\left(\frac{\bar{r}_{ij} - r_{ij}^{LL}}{r_{ij}^{UL} - r_{ij}^{LL}} \right) \left(1 - \left(\frac{\bar{r}_{ij} - r_{ij}^{LL}}{r_{ij}^{UL} - r_{ij}^{LL}} \right) \right)}{\frac{(S_{ij})^2}{(r_{ij}^{UL} - r_{ij}^{LL})^2}} - 1 \right] \quad (4)$$

$$\beta_{ij} = \left(1 - \frac{\bar{r}_{ij} - r_{ij}^{LL}}{r_{ij}^{UL} - r_{ij}^{LL}} \right) \left[\frac{\left(\frac{\bar{r}_{ij} - r_{ij}^{LL}}{r_{ij}^{UL} - r_{ij}^{LL}} \right) \left(1 - \left(\frac{\bar{r}_{ij} - r_{ij}^{LL}}{r_{ij}^{UL} - r_{ij}^{LL}} \right) \right)}{\frac{(S_{ij})^2}{(r_{ij}^{UL} - r_{ij}^{LL})^2}} - 1 \right] \quad (5)$$

综上所述,应用矩估计法将评价值 r_{ij} 转化为服从贝塔分布的随机变量 r'_{ij} ,规则如下:

- (1) 当 r_{ij} 为精确值时, $r'_{ij} = r_{ij}$, r'_{ij} 为精确值;
- (2) 当 $r_{ij} \sim U_{ij}(r_{ij}^{LL}, r_{ij}^{UL})$ 时, $r'_{ij} \sim B(\alpha_{ij} = 1, \beta_{ij} = 1, a_{ij}^{LL}, a_{ij}^{UL})$;
- (3) 当 $r_{ij} \sim T_{ij}(r_{ij}^{LL}, r_{ij}^{ML}, r_{ij}^{UL})$ 时, $r'_{ij} \sim B(\alpha_{ij}, \beta_{ij}, a_{ij}^{LL}, a_{ij}^{UL})$, 其中 α_{ij}, β_{ij} 由式(4)、式(5)计算得到,计算时 $\bar{r}_{ij} = (r_{ij}^{LL} + r_{ij}^{ML} + r_{ij}^{UL})/3$, $(S_{ij})^2 = ((r_{ij}^{LL})^2 + (r_{ij}^{ML})^2 + (r_{ij}^{UL})^2 - r_{ij}^{LL}r_{ij}^{ML} - r_{ij}^{LL}r_{ij}^{UL} - r_{ij}^{ML}r_{ij}^{UL})/18$.

(4) 将服从贝塔分布的随机变量 r'_{ij} 转化为精确值 b_{ij} .

根据 Kerman^[21],通过封闭式近似得到的贝塔分布中值 $m(\alpha_{ij}, \beta_{ij})$ 如下:

$$m(\alpha_{ij}, \beta_{ij}) \approx \frac{\alpha_{ij} - 1/3}{\alpha_{ij} + \beta_{ij} - 2/3} \quad (6)$$

式中:当 $\alpha_{ij} \leq \beta_{ij}$ 时, $m(\alpha_{ij}, \beta_{ij})$ 满足 $\frac{\alpha_{ij}-1}{\alpha_{ij}+\beta_{ij}-2} \leq$

$$m(\alpha_{ij}, \beta_{ij}) \leq \frac{\alpha_{ij}}{\alpha_{ij}+\beta_{ij}}$$

利用上述贝塔分布的中值 $m(\alpha_{ij}, \beta_{ij})$ 以及 Jensen^[22] 中的贝塔分布公式, 可将 r'_{ij} 转化为精确值 b_{ij} ^[14] 如下:

$$b_{ij} = r_{ij}^{LL} + m(\alpha_{ij}, \beta_{ij})(r_{ij}^{UL} - r_{ij}^{LL}) \quad (7)$$

(5)一致性检验.

通过计算一致性比率 C_R 来检验判断矩阵是否具有^[23]一致性. 通常认为, 当 $C_R < 0.1$ 时, 判断矩阵具有满意的一致性, 否则需要回到(2), 调整判断矩阵赋值.

(6)算术平均法计算层次单排序.

根据判断矩阵, 可以计算相对于上一层元素本层与之有联系的所有元素的权重排序如下:

$$w_i = \frac{1}{t} \sum_{j=1}^t \frac{b_{ij}}{\sum_{k=1}^t b_{kj}}, \quad i = 1, 2, \dots, t \quad (8)$$

(7)计算元素综合权重.

准则层及指标层中各元素的综合权重可以计算如下:

$$w'_i = \sum_{k=1}^l \lambda_k w_i \quad (9)$$

准则层和指标层所有元素的权重分别为 w_{B_j} ($j=1, 2, \dots, p$) 和 w_{C_j} ($j=1, 2, \dots, q$).

2.3 供应商可持续性表现得分排序

根据层次结构指标层的所有指标 (C_1, C_2, \dots, C_q), 专家需要评估所有供应商在每个指标下的表现得分.

(1)构建评价矩阵

根据专家组成员的评价意见, 构建问题的评价矩阵 G_k .

$$G_k = (\tilde{x}_{ij}^k)_{m \times q} = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & \dots & C_q \\ A_1 & \tilde{x}_{11}^k & \tilde{x}_{12}^k & \dots & \tilde{x}_{1q}^k \\ A_2 & \tilde{x}_{21}^k & \tilde{x}_{22}^k & \dots & \tilde{x}_{2q}^k \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_m & \tilde{x}_{m1}^k & \tilde{x}_{m2}^k & \dots & \tilde{x}_{mq}^k \end{matrix} \quad (10)$$

式中: $\tilde{x}_{ij}^k = (x_{ij}^{LL}, x_{ij}^{ML}, x_{ij}^{UL})$ 为三角模糊数, 表示专家 E_k 针对备选供应商 A_i 在评价指标 C_j 下给出的表现评价. 评价时, 使用的评价等级及对应的三角模糊数如表 3 所示^[19].

(2)构建集体评价矩阵

利用模糊加权平均(fuzzy weighted averaging, FWA)算子聚合 l 位专家给出的评价, 即将 l 个评

表 3 评价等级及对应三角模糊数

Tab. 3 Evaluation scale and triangular fuzzy numbers

序号	评价等级	三角模糊数
1	很差	(0, 0, 0.1)
2	差	(0, 0.1, 0.3)
3	中差	(0.1, 0.3, 0.5)
4	中	(0.3, 0.5, 0.7)
5	中好	(0.5, 0.7, 0.9)
6	好	(0.7, 0.9, 0.1)
7	很好	(0.9, 0.1, 0.1)

价矩阵 G_k 聚合成一个集体评价矩阵 $G = (\tilde{x}_{ij})_{m \times q}$.

$$G = \sum_{k=1}^l \lambda_k \tilde{x}_{ij}^k = \left(\sum_{k=1}^l \lambda_k x_{ij}^{LL}, \sum_{k=1}^l \lambda_k x_{ij}^{ML}, \sum_{k=1}^l \lambda_k x_{ij}^{UL} \right) \quad (11)$$

(3)将聚合评价转化为精确值

利用三角函数去模糊化公式^[24] 将加权评价 $\tilde{x}_{ij} = (x_{ij}^{LL}, x_{ij}^{ML}, x_{ij}^{UL})$ 转化为精确值 z_{ij} 如下:

$$z_{ij} = \frac{x_{ij}^{LL} + 2x_{ij}^{ML} + x_{ij}^{UL}}{4} \quad (12)$$

(4)计算综合得分

根据综合权重以及供应商在各指标下的得分来计算供应商可持续表现综合得分 z'_i 如下:

$$z_i = \sum_{j=1}^q w_{C_j} z_{ij} \quad (13)$$

$$z'_i = \sum_{j=1}^p w_{B_j} z_i \quad (14)$$

式中: z'_i 数值越大表示供应商 A_i 的可持续发展能力越好. 最终根据 z'_i 进行降序排列, 得到所有备选供应商的可持续发展能力排序.

3 案例分析

3.1 模型应用

C 公司现有 A_1, A_2 和 A_3 三个供应商提供同类型产品. 根据供应商在 ECO 系统上问卷的回答情况及其提供的相关证明材料, 需要对三个供应商的可持续表现进行评价. 评价小组由三位专家组成, 分别来自 C 公司采购部、ECO 专职审计人员和 C 公司可持续发展部, 其权重分别为 $\lambda_1 = 0.3, \lambda_2 = 0.4$ 和 $\lambda_3 = 0.3$.

3.1.1 计算评价指标权重

由于计算过程涉及数据较多, 此处仅列出 ENV 准则下 4 个指标综合权重的计算过程作为 SAHP 方法的算例.

(1)建立层次结构模型, 如图 3 所示.

(2)构造 ENV 准则下 4 个指标间的重要性判断

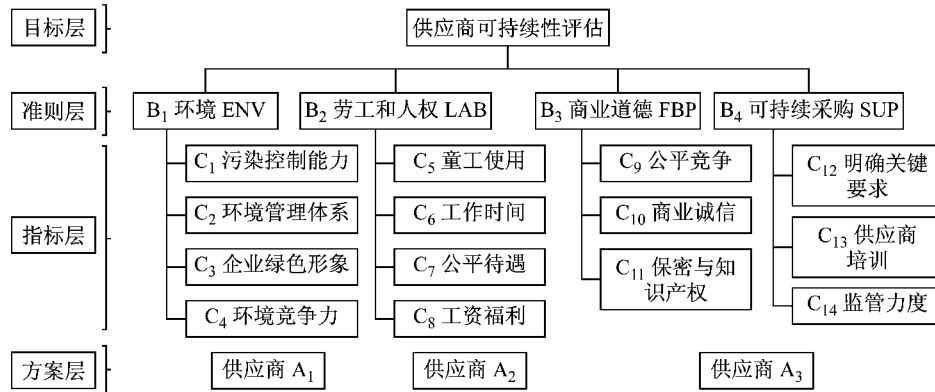


图 3 供应商可持续发展能力评价指标体系

Fig. 3 Evaluating system of sustainable supplier performance

矩阵 R_{B_1-C} , 如表 4 所示。

(3) 根据式(2)~式(5)将 R_{B_1-C} 比较判断矩阵中的相对重要性评价价值转化为服从贝塔分布的随机变

量, 如表 4 所示。

(4) 根据式(6)和式(7)将用贝塔函数变量表示的相对重要性评价价值转为精确值, 如表 4 所示。

表 4 R_{B_1-C} 比较判断矩阵及其转化

Tab. 4 Comparison of matrix R_{B_1-C} and its transformation

矩阵		C ₁	C ₂	C ₃	C ₄
R_{B_1-C} 比较判断矩阵	C ₁	1	(1/3, 1/2)	(2, 3)	1
	C ₂	(2, 3)	1	(3, 4, 5)	(2, 3)
	C ₃	(1/3, 1/2)	(1/5, 1/4, 1/3)	1	(1/3, 1/2)
	C ₄	1	(1/3, 1/2)	(2, 3)	1
R'_{B_1-C} 随机判断矩阵	C ₁	1	(1, 1, 1/3, 1/2)	(1, 1, 2, 3)	1
	C ₂	B(1, 1, 2, 3)	1	(5/2, 5/2, 3, 5)	(1, 1, 2, 3)
	C ₃	(1, 1, 1/3, 1/2)	(277/125, 131/50, 1/5, 1/3)	1	(1, 1, 1/3, 1/2)
	C ₄	1	(1, 1, 1/3, 1/2)	(1, 1, 2, 3)	1
B_{B_1-C} 精确值判断矩阵	C ₁	1	5/12	5/2	1
	C ₂	5/2	1	4	5/2
	C ₃	5/12	13/50	1	5/12
	C ₄	1	5/12	5/2	1

(5) 计算 B_{B_1-C} 精确值判断矩阵的一致性比率 C_R 值为 $C_R = 0.0278 < 0.1$, 表示该判断矩阵通过一致性检验。

(6) 根据式(8)和式(9)计算 B_1 准则下各指标综合权重, 如表 5 所示。

表 5 B_1 准则下指标综合权重

Tab. 5 Comprehensive weight of indexes under B_1 criterion

	E ₁	E ₂	E ₃	综合权重
C ₁	0.214	0.379	0.267	0.296
C ₂	0.474	0.369	0.461	0.428
C ₃	0.098	0.083	0.096	0.091
C ₄	0.214	0.169	0.175	0.185

以此类推, 得到 B_2 、 B_3 和 B_4 准则及其包含指标的综合权重, 如表 6 所示。

由表 6 可知, 劳工与人权(B_2)以及环境(B_1)准则的权重最高, 分别为 40.9% 和 34.9%, 且两者之和远大于 50%。可见, 在供应商可持续性评价问题

表 6 供应商可持续性评估指标综合权重

Tab. 6 Comprehensive weight of indexes for sustainable supplier evaluation

准则	权重	指标	权重
B_1	0.349	污染控制能力(C ₁)	0.296
		环境管理体系(C ₂)	0.428
		企业绿色形象(C ₃)	0.091
		环境竞争力(C ₄)	0.185
B_2	0.409	童工使用(C ₅)	0.451
		工作时间(C ₆)	0.129
		公平待遇(C ₇)	0.319
		工资福利(C ₈)	0.100
B_3	0.125	公平竞争(C ₉)	0.343
		商业诚信(C ₁₀)	0.457
		保密与知识产权(C ₁₁)	0.201
B_4	0.118	明确关键要求(C ₁₂)	0.468
		供应商培训(C ₁₃)	0.317
		监管力度(C ₁₄)	0.215

中, 劳工与人权和环境问题上的表现在供应商可持续发展中扮演非常重要的角色。而可持续采购 B_4 所占比重最小, 表示供应商对其下游合作伙伴(供应商

的供应商)的可持续发展监管能力对企业来说并不是重点,关键仍在于供应商自身的可持续性表现.同时,根据细分指标的权重结果,环境管理体系的建设是环境准则下的重点;劳工与人权中对童工使用的监督和避免最为重要,综合两者所属准则的权重,可以认为环境管理体系和童工使用是所有 14 项评价指标中最应当着重监督的对象.

3.1.2 供应商综合得分排序

(1)根据式(11)可以得到供应商可持续表现的集体评价矩阵,如表 7 所示.

表 7 供应商可持续表现聚合评价矩阵

Tab. 7 Group matrix of sustainable supplier performance

评价 准则	评价 指标	供应商		
		A ₁	A ₂	A ₃
B ₁	C ₁	(0.15,0.32,0.52)	(0.44,0.64,0.84)	(0.44,0.64,0.84)
	C ₂	(0.04,0.18,0.38)	(0.58,0.78,0.94)	(0.3,0.5,0.7)
	C ₃	(0.3,0.5,0.7)	(0.56,0.76,0.93)	(0.42,0.62,0.82)
	C ₄	(0.38,0.58,0.78)	(0.3,0.5,0.7)	(0.36,0.56,0.76)
B ₂	C ₅	(0.76,0.93,1)	(0.76,0.93,1)	(0.76,0.93,1)
	C ₆	(0.24,0.44,0.64)	(0.64,0.84,0.97)	(0.56,0.76,0.93)
	C ₇	(0.76,0.93,1)	(0.7,0.9,1)	(0.84,0.97,1)
	C ₈	(0.84,0.97,1)	(0.84,0.97,1)	(0.76,0.93,1)
B ₃	C ₉	(0.78,0.94,1)	(0.44,0.64,0.84)	(0.58,0.78,0.94)
	C ₁₀	(0.82,0.96,1)	(0.76,0.93,1)	(0.7,0.87,0.97)
	C ₁₁	(0.64,0.84,0.97)	(0.62,0.82,0.96)	(0.76,0.93,1)
B ₄	C ₁₂	(0.38,0.58,0.78)	(0.64,0.84,0.97)	(0.58,0.78,0.94)
	C ₁₃	(0.5,0.7,0.9)	(0.64,0.84,0.97)	(0.44,0.64,0.84)
	C ₁₄	(0.16,0.36,0.56)	(0.5,0.7,0.9)	(0.42,0.62,0.82)

(2)根据式(12)去模糊化,并根据式(13)和式(14)计算得到备选供应商在各评价指标下的得分以及其综合分数,如表 8 所示.

根据表 8 可知,3 个供应商在可持续表现上的排序为:A₂>A₃>A₁,表示供应商 A₂ 在可持续发展表现中最为突出.而供应商 A₁ 则由于在 B₁ 和 B₂ 两个重要准则上的得分较低,导致其在综合得分上明显低于其余两家供应商.

表 8 供应商可持续表现综合得分

Tab. 8 Overall rating of sustainable supplier performance

供应商	评价指标				综合 得分
	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	
A ₁	0.333	0.836	0.906	0.571	0.639
A ₂	0.680	0.888	0.795	0.796	0.794
A ₃	0.563	0.897	0.836	0.697	0.750

4 方法比较

ECO 系统的原始评价模型主要采用加权平均计算方式,首先根据问卷的完成度评价供应商在各准则方面的表现,随后将 4 项得分加权平均计算得出供应商的可持续性综合分数.表 9 为 ECO 评价小组 3 位专家以百分制给出的供应商可持续表现原始得分;同时给出准则权重,以 1—5 分递增来表示权重由低到高,并通过加权平均得到准则的综合权重,见表 10;最后再次利用加权平均方法计算供应商可持续表现综合得分,见表 11.在系统设计之初,ECO 团队为提高数据的可视化效果,采取分数梯度的方式,对于指标得分,无论是原始数据还是计算结果,均在小数点四舍五入后归整为个位数为 0 或 5 的数字,如 86 分记作 85 分,87.5 分记作 90 分,以此类推.

表 9 供应商可持续表现原始评分

Tab. 9 Original rating of sustainable supplier performance

专家	供应商	不同准则下评分			
		B ₁	B ₂	B ₃	B ₄
E ₁	A ₁	35	85	90	60
	A ₂	70	85	80	75
	A ₃	60	85	85	70
E ₂	A ₁	40	80	90	55
	A ₂	70	85	80	80
	A ₃	55	90	85	70
E ₃	A ₁	40	80	90	60
	A ₂	70	85	80	80
	A ₃	55	90	80	70

表 10 初始准则权重评分

Tab. 10 Original weight of criteria

专家 (权重)	不同准则下的评分			
	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄
E ₁ (0.3)	4	4	2	1
E ₂ (0.4)	4	4	3	1
E ₃ (0.3)	3	4	2	3
综合权重	0.317	0.342	0.205	0.136

表 11 供应商可持续表现原始得分
Tab. 11 Original overall rating of sustainable supplier performance

供应商	准则				综合得分
	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	
A ₁	40	80	90	60	70
A ₂	70	85	80	80	80
A ₃	60	90	80	70	80

将表 6 与表 10 计算结果进行比较,发现采用 SAHP 方法得到的 B₁ 和 B₂ 准则权重(分别为 0.349 和 0.409)明显高于 B₃ 和 B₄ 的权重(分别为 0.125 和 0.118),这主要由于 SAHP 充分考虑了指标之间的相互影响关系;而采用 ECO 原始评价模型时,B₃ 的权重(0.205)与 B₁ 和 B₂ 的权重(分别为 0.317 和 0.342)较为接近。其次,与简单的加权平均方法相比,SAHP 能够为决策者提供合适的随机变量来表示评价值,免于受到精确数值的限制。最后,由于采用 SAHP 方法计算的过程中将 4 个准则进行了细分,通过评价细化的若干指标以提高评价过程的精确性,从而能够更有效地将供应商的综合得分进行差异化,帮助判别其在可持续方面的表现。

此外,通过比较表 8 与表 11 的供应商综合得分,认为加权平均以及四舍五入的计算方式虽然便捷,但导致了大量有效信息的丢失,使原本能够差异化的供应商评价结果趋同,由此不仅容易产生同分问题而且还会导致排序结果错乱。采用三角模糊数进行计算,能够有效避免此类问题出现,并且得到区分度明显的供应商可持续性表现排序结果。因此,为保证分数梯度并避免同分现象,将模糊集理论与 SAHP 相结合的改进模型更能够提高 ECO 系统的有效性,帮助企业寻找到真正具有可持续发展能力的供应商。

5 结论

从供应商可持续性评估实例出发,先后采用 SAHP 和三角模糊数对评估模型的权重计算方法和供应商指标得分排序方法进行优化。针对指标单一缺乏多样性的问题,通过参考供应商可持续性评估相关文献,对原有评价指标进行拓展,并利用细化后的评价指标对供应商进行评价,得到更为精确的评价值。相较于简单的加权平均方式,SAHP 能够为决策者提供合适的随机变量来表示评价值,免于受到精确数值的限制。同时,采用三角模糊数能够有效避免有效信息的丢失,有效解决同分问题,得到明确排序结果,提高了 ECO 系统的精确性和可靠性,从而帮助

企业寻找到真正具有可持续发展能力的供应商。后续研究可以将 SAHP 方法拓宽到其他供应商评价体系中以验证该模型的普适性,同时也可以与其他随机多指标方法相结合,例如后悔值理论、前景理论等,进一步提高供应商可持续性评估流程的精确性。

参考文献:

- [1] KANNAN D. Role of multiple stakeholders and the critical success factor theory for the sustainable supplier selection process [J]. *International Journal of Production Economics*, 2017, 195: 391.
- [2] WEBB L L. Green purchasing; forging a new link in the supply chain [J]. *RESOUR*, 1994, 1(6): 14.
- [3] FALLAHPUR A, OLUGU E U, MUSA S N, *et al.* A decision support model for sustainable supplier selection in sustainable supply chain management [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2017, 105: 391.
- [4] SHABANPOUR H, YOUSEFI S, SAEN R F. Future planning for benchmarking and ranking sustainable suppliers using goal programming and robust double frontiers DEA [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2017, 50: 129.
- [5] LUTHRA S, GOVINDAN K, KANNAN D, *et al.* An integrated framework for sustainable supplier selection and evaluation in supply chains [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 140: 1686.
- [6] SANCHA C, LONGONI A, GIMÉNEZ C. Sustainable supplier development practices: drivers and enablers in a global context [J]. *Journal of Purchasing and Supply Management*, 2015, 21(2): 95.
- [7] CHEN W, ZOU Y. An integrated method for supplier selection from the perspective of risk aversion [J]. *Applied Soft Computing*, 2017, 54: 449.
- [8] ZHAO J S, YOU X Y, LIU H C, *et al.* An extended VIKOR method using intuitionistic fuzzy sets and combination weights for supplier selection [J]. *Symmetry*, 2017, 9(9): 169.
- [9] 尤筱玥, 尤建新. 基于区间二元语义 VIKOR 的外包供应商选择模型 [J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(9): 1407.
- YOU Xiaoyue, YOU Jianxin. Outsourcing supplier selection by interval 2-tuple linguistic VIKOR method [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2017, 45(9): 1407.
- [10] 高建伟, 刘慧晖, 谷云东. 基于前景理论的区间直觉模糊多指标决策方法 [J]. *系统工程理论与实践*, 2014, 34(12): 3175.
- GAO Jianwei, LIU Huihui, GU Yundong. Interval-valued intuitionistic fuzzy multi-criteria decision-making method based on prospect theory [J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2014, 34(12): 3175.
- [11] 付畅俭, 皮冬洋. 基于个体偏好和可信度的犹豫模糊软集多指标决策方法 [J]. *统计与决策*, 2017(8): 37.
- FU Changjian, PI Dongyang. Hesitant fuzzy soft sets multicriteria decision-making method based on preference and

- credibility levels [J]. *Statistics and Decision*, 2017(8): 37.
- [12] GOU X, XU Z, LIAO H. Alternative queuing method for multiple criteria decision making with hybrid fuzzy and ranking information [J]. *Information Sciences*, 2016, 357: 144.
- [13] JALAO E R, WU T, SHUNK D. A stochastic AHP decision making methodology for imprecise preferences [J]. *Information Sciences*, 2014, 270: 192.
- [14] COBULOGLU H I, BÜYÜKTAHTAKIN İ E. A stochastic multi-criteria decision analysis for sustainable biomass crop selection [J]. *Expert Systems with Applications*, 2015, 42 (15-16): 6065.
- [15] 苏世彬, 黄瑞华. 基于三角模糊数的属性层次模型[J]. *系统工程理论与实践*, 2006, 26(12): 115.
SU Shibin, HUANG Ruihua. Attribute hierarchical mode based on triangular fuzzy number [J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2006, 26(12): 115.
- [16] 袁宇, 关涛, 闫相斌, 等. 基于混合 VIKOR 方法的供应商选择决策模型[J]. *控制与决策*, 2014, 29(3): 551.
YUAN Yu, GUAN Tao, YAN Xiangbin, *et al.* Based on hybrid VIKOR method decision making model for supplier selection [J]. *Control and Decision*, 2014, 29(3): 551.
- [17] AKMAN G. Evaluating suppliers to include green supplier development programs via fuzzy c-means and VIKOR methods [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2015, 86: 69.
- [18] TSENG M L, CHIU A S F. Evaluating firm's green supply chain management in linguistic preferences [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 40: 22.
- [19] QIN J, LIU X, PEDRYCZ W. An extended TODIM multi-criteria group decision making method for green supplier selection in interval type-2 fuzzy environment [J]. *European Journal of Operational Research*, 2017, 258(2): 626.
- [20] SAATY T L. A scaling method for priorities in hierarchical structures [J]. *Journal of Mathematical Psychology*, 1977, 15 (3): 234.
- [21] KERMAN J. A closed-form approximation for the median of the beta distribution[J/OL]. [2017-05-06] <https://arxiv.org/pdf/1111.0433v1.pdf>.
- [22] JENSEN P A. Continuous Distributions[J/OL]. [2017-05-08] https://www.me.utexas.edu/~jensen/ORMM/computation/unit/rvadd/continuous_dist/beta.html.
- [23] 雷星晖, 尤筱玥. 基于层次分析法支持决策的外包服务供应商绩效评价[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(11): 1770.
LEI Xinghui, YOU Xiaoyue. Evaluation of outsourcing service providers' performance on analytic hierarchy process to support decision-making [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2014, 42(11): 1770.
- [24] 王欣荣, 樊治平. 一种模糊有序加权(FOWA)算子及其应用[J]. *模糊系统与数学*, 2003, 17(4): 67.
WANG Xinrong, FAN Zhiping. A fuzzy ordered weighted average (FOWA) operator and its application [J]. *Fuzzy Systems and Mathematics*, 2003, 17(4): 67.