

社会网络环境下融合概率语言和 QUALIFLEX 的绿色包装评价方法

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2022.06.001

周欢^{1,2} 张培颖^{1,2}
刘嘉^{1,2}

1. 湖南工业大学
商学院

湖南 株洲 412007

2. 湖南工业大学

湖南省包装经济研究基地

湖南 株洲 412007

摘要: 为科学合理地评价绿色包装方案, 提出一种社会网络环境下, 融合概率语言和 QUALIFLEX 的绿色包装评价方法。先确定绿色包装评价指标体系并利用概率语言术语集 (PLTS) 表达决策专家的评价信息; 然后分别利用决策专家间信任关系网络和决策专家-准则偏好关系矩阵, 计算决策专家与准则的权重; 最后结合 QUALIFLEX 方法确定备选绿色包装方案的优序关系。通过与其他方法进行对比, 验证了所提出方法的有效性和合理性。

关键词: 社会网络分析; 概率语言术语集; QUALIFLEX; 绿色包装评价; 优序关系

中图分类号: C934

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2022)06-0001-12

引文格式: 周欢, 张培颖, 刘嘉. 社会网络环境下融合概率语言和 QUALIFLEX 的绿色包装评价方法 [J]. 包装学报, 2022, 14(6): 1-12.

0 引言

随着我国生态文明建设及“双碳”战略的持续推进, 人们在购买商品时更加注重其包装是否符合环保要求。然而, 包装过度、包装材料难以降解、包装废弃物处理不当等问题仍然存在^[1-2], 这造成了极大的资源浪费和环境污染, 阻碍了可持续发展的进程, 也有悖于“双碳”理念。因此, 如何合理地选择绿色包装方案, 成为企业亟待解决的问题。

绿色包装方案评价是绿色包装方案选择的重要环节, 本质上属于多准则决策问题^[3]。其包括决策专家、备选方案、准则和评价信息 4 个基本要素, 一般涉及以下几个步骤: 1) 构建评价指标体系。包装评价指标

包括资源、环保、经济、社会、功能等多个维度的指标。2) 评价备选方案。在各准则下每个决策专家对方案的评价标准不一, 且其偏好也难以采用精确数值表示, 因此概率语言术语集 (probabilistic linguistic term set, PLTS) 成为决策专家评价方案信息时采用的主要形式^[4]。例如在对包装外观进行评价时, 决策专家认为其“好”的概率为 70%, “很好”的概率 30%, 此时 PLTS 能很好地表达评价语言信息和相应的概率信息。3) 计算决策专家权重和准则权重。权重的大小会对决策的最终结果产生影响, 合理的权重确定方法尤为重要。4) 确定方案优序关系。对于准则数量多于方案数量的多准则决策问题, QUALIFLEX 是一种非常有效且简便的决策方法^[5], 其通过对各备选方案进行

收稿日期: 2022-07-20

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目 (2021JJ30225); 湖南省教育厅科学研究基金资助优秀青年项目 (21B0553); 湖南工业大学包装经济与管理专项研究基金资助项目 (2021BZJG02); 湖南工业大学研究生科研创新基金资助项目 (CX2236)

作者简介: 周欢 (1982-), 女, 湖南益阳人, 湖南工业大学副教授, 博士, 主要从事决策理论与应用、绿色包装研究, E-mail: 27887182@qq.com

优劣关系排序找到最优方案。

随着决策环境的复杂化以及决策群体的大规模化, 基于社会网络分析 (social network analysis, SNA) 的群决策方法成为解决决策问题的一种有效方法。在社会网络环境下, 决策专家的观点往往会受到其他决策专家观点的影响, 决策专家之间的信任关系及网络结构特征会在一定程度上改变原来的决策结果^[6]。因此, 考虑决策专家之间的信任关系以及决策专家的个人偏好关系, 能使决策过程更符合现实情况, 获得更具合理性和有效性的决策结果。

因此, 本文拟在社会网络环境下, 提出一种融合概率语言和 QUALIFLEX 的多准则群决策方法 (SNA-PLTS-QUALIFLEX 方法), 以解决绿色包装方案评价问题。首先, 从资源、环境、经济、功能和社会 5 个维度确定绿色包装方案评价指标体系; 其次, 通过 PLTS 表达决策专家对各方案各准则的评价信息; 再引入决策专家间信任关系网络表示决策专家之间的信任关系, 以此确定决策专家权重, 同时引入决策专家 - 准则偏好关系矩阵表达决策专家对准则的偏好关系, 结合可能度公式计算准则权重; 最后, 利用 QUALIFLEX 方法确定备选绿色包装方案的优劣关系。

1 方法基础

1.1 概率语言术语集

Pang Q. 等^[7]提出 PLTS 的概念, 将多个语言术语及各个语言术语的重要程度均考虑在内, 且允许决策专家在评估过程中提供不完整的概率分布信息。PLTS 的相关定义及运算规则如下:

定义 1^[8-9] $S = \{s_1, s_2, \dots, s_\tau\}$ 是一个语言术语集, 其中 τ 为奇数。S 需满足以下 4 个条件。

- 1) 有序性: $s_i > s_j$, 其中 $i > j$;
- 2) 负离子: $\text{Neg}(s_i) = s_j$, 其中 $j = \tau - i$;
- 3) 最大算子: $\max(s_i, s_j) = s_i$, 其中 $i \geq j$;
- 4) 最小算子: $\min(s_i, s_j) = s_j$, 其中 $i \geq j$ 。

定义 2^[10] $S = \{s_1, s_2, \dots, s_\tau\}$ 表示粒度为 τ 的一个语言术语集。L(p) 表示 PLTS, 其定义为

$$L(p) = \left\{ L^{(k)}(p^{(k)}) \mid L^{(k)} \in S, p^{(k)} \in [0, 1], k = 1, 2, \dots, \#L(p), \sum_{k=1}^{\#L(p)} p^{(k)} \leq 1 \right\}。$$

其中: $L^{(k)}(p^{(k)})$ 表示决策专家用语言术语 $L^{(k)}$ 进行评

价的概率为 $p^{(k)}$; $\#L(p)$ 表示 $L(p)$ 中所有不同元素的个数。当 $\sum_{k=1}^{\#L(p)} p^{(k)} < 1$ 时, 概率语言信息不完整, 需对其进行规范化处理。

定义 3^[7] 设

$$L(p) = \left\{ L(p^{(k)}) \mid L \in S, p^{(k)} \in [0, 1], k = 1, 2, \dots, \#L(p), \sum_{k=1}^{\#L(p)} p^{(k)} \leq 1 \right\}$$

为一个 PLTS, 规范化后的 PLTS 表示为

$$\tilde{L}(p) = \left\{ L(\tilde{p}^{(k)}) \mid L \in S, \tilde{p}^{(k)} \in [0, 1], k = 1, 2, \dots, \#\tilde{L}(p), \sum_{k=1}^{\#\tilde{L}(p)} \tilde{p}^{(k)} = 1 \right\},$$

其中 $\tilde{p}^{(k)} = \frac{p^{(k)}}{\sum_{k=1}^{\#L(p)} p^{(k)}}$ 。

定义 4^[11] 设 $L_1(p)$ 和 $L_2(p)$ 是两个 PLTS, 且满足 $L(p) = \{L(p^{(k)}) \mid L \in S, p^{(k)} \in [0, 1], k = 1, 2, \dots, \#L(p)\}$, r_1^i 和 r_2^j 分别为 $L_1(p)$ 和 $L_2(p)$ 的下标, 则 L_1 优于 L_2 的可能度为 $p(L_1 \succ L_2) = \sum_{i=1}^{\#L_1} \sum_{j=1}^{\#L_2} T(r_1^i, r_2^j)$, 其中

$$T(r_1^i, r_2^j) = \begin{cases} 1, & r_1^i > r_2^j; \\ 0, & r_1^i < r_2^j; \\ \frac{1}{2} p_j p_k, & r_1^i = r_2^j. \end{cases}$$

定义 5^[11] 设 $L_1(p)$ 和 $L_2(p)$ 是两个 PLTS, 且满足 $L \in S$, 则 $L_1(p)$ 和 $L_2(p)$ 满足以下运算规则:

1) $L(p)$ 的补集定义为

$$\bar{L}(p) = \left\{ L^{(k)}(1 - p^{(k)}) \mid L^{(k)} \in S, p^{(k)} \in [0, 1], k = 1, 2, \dots, \#L(p), \sum_{k=1}^{\#L(p)} p^{(k)} \leq 1 \right\}。$$

2) $L(p)$ 的上下界定义为

$$\overline{L}(p) = L^{(\bar{k})}(p^{(\bar{k})}), L^{(\bar{k})} \leq L^{(k)};$$

$$\underline{L}(p) = L^{(k)}(p^{(k)}), L^{(k)} \leq L^{(\bar{k})}。$$

1.2 社会网络分析

社会网络分析是基于图论对网络结构进行识别和描述, 从而分析网络节点间关系, 进而研究网络结

构对各节点影响的一种社会学研究方法^[12]。图论及网络结构的相关基础知识如下:

社会网络图^[13]由 $G=(V, E)$ 表示, 其中 V 为网络节点的集合, E 为节点之间连边的集合。在无向图中, $(v_i, v_j) \in E$ 表示节点 v_i 与 v_j 之间存在关系; 在有向图中, $(\overrightarrow{v_i, v_j}) \in E$ 表示节点 v_i 指向 v_j , 具体如图 1 所示。

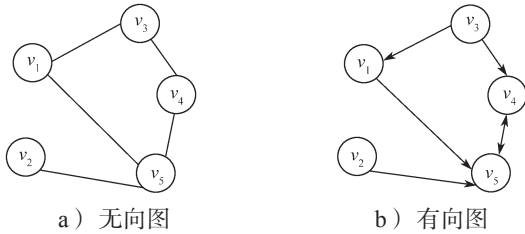


图 1 社会网络图

Fig. 1 Social network diagram

网络拓扑结构^[14]常用于直观地描述网络中节点之间的连接关系。常见的网络拓扑结构有星型拓扑结构和网状拓扑结构。其中, 星型拓扑结构中的网络中心节点与其他节点均有连接关系(如图 2a 所示), 网状拓扑结构基于一定的规则对网络中的节点进行网状连接(如图 2b 所示)。

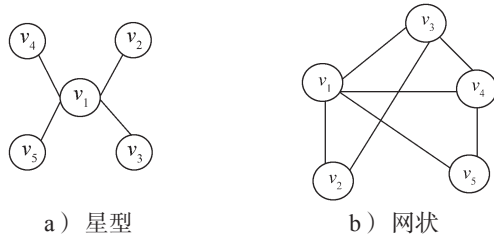


图 2 网络拓扑结构

Fig. 2 Network topology

点度中心度^[15]常用于描述网络拓扑结构特征, 其大小能够反映网络中节点与中心地位的靠近程度, 常分为入度中心度和出度中心度。

在无向图中, $I_i = N-1$, 在有向图中, $I_i = \frac{\sum_{j \in N} x_{ij}}{N-1}$, 其中 I_i 为 i 的点度中心度, N 为网络中节点的个数, x_{ij} 为节点 i 与 j 的连接情况。若 I_i 代表入度中心度, 则 $\sum_{j \in N} x_{ij}$ 表示指向节点 i 的连边数; 若 I_i 代表出度中心度, 则 $\sum_{j \in N} x_{ij}$ 表示节点 i 指向其他节点的连边数。

1.3 QUALIFLEX 方法

QUALIFLEX 方法^[16-18]是一种非常有效的基于优序关系的多准则决策方法, 能够有效地对决策问题中的基数与序数信息进行处理, 且适用于准则数量大

于方案数量的情况^[15]。

假设有 m 个决策专家 $D=\{d_h|h=1, 2, \dots, m\}$, p 个备选方案 $X=\{x_i|i=1, 2, \dots, p\}$, n 个评估准则 $C=\{c_j|j=1, 2, \dots, n\}$, 使用 QUALIFLEX 方法对备选方案进行排序的具体步骤如下:

步骤 1 各决策专家 $D=\{d_h|h=1, 2, \dots, m\}$ 对各个备选方案 $X=\{x_i|i=1, 2, \dots, p\}$ 的评估指标 $C=\{c_j|j=1, 2, \dots, n\}$ 给出评价值 $p_{ij}^{d_h}(p)$, 获得评价矩阵

$$P^{d_h} = [p_{ij}^{d_h}(p)]_{p \times n};$$

步骤 2 针对不同决策专家给出的评价信息 $P^{d_h} = [p_{ij}^{d_h}(p)]_{p \times n}$, 利用聚合算子获得综合群体评价矩阵 P^{d_H} ;

步骤 3 列出 p 个备选方案存在的 $p!$ 种可能的排序方案 $O_i=(\dots, x_i, \dots, x_k, \dots)$;

步骤 4 计算准则权重 $W=\{w_j|j=1, 2, \dots, n\}$ 和决策专家权重 $W_e=\{w_{eh}|h=1, 2, \dots, m\}$;

步骤 5 计算准则 c_j 下, 第 l 种测试方案中方案对 x_i 和 x_k 的一致性/不一致性指标 $I'_l(x_i, x_k)$;

步骤 6 计算准则 c_j 下, 第 l 种测试方案的加权一致性/不一致性指标 I'_l ;

步骤 7 计算第 l 种测试方案的综合一致性/不一致性指标 I^l ;

步骤 8 获得方案的最佳排序, 最大的 I^l 值对应的测试方案为最佳测试方案, 该测试方案下的备选方案排序为最优排序。

2 方法原理

2.1 问题描述

设决策专家集合为 $D=\{d_h|h=1, 2, \dots, m\}$, 决策专家权重集合为 $W_e=\{w_{eh}|h=1, 2, \dots, m\}$, 备选方案集合为 $X=\{x_i|i=1, 2, \dots, p\}$, 准则集合为 $C=\{c_j|j=1, 2, \dots, n\}$, 准则权重为 $W=\{w_j|j=1, 2, \dots, n\}$, 且 $\sum_{h=1}^m w_{eh}=1$, $\sum_{j=1}^n w_j=1$ 。决策专家个人评价决策矩阵为

$$P^{d_h} = [p_{ij}^{d_h}(p)]_{p \times n}, \text{ 其中}$$

$$p_{ij}^{d_h}(p) = \left\{ p_{ij}^{d_h^{(k)}}(p^{(k)}) \mid p_{ij}^{d_h^{(k)}} \in S, p^{(k)} \in [0, 1], \right.$$

$$\left. k=1, 2, \dots, \#p_{ij}^{d_h}(p), \sum_{k=1}^{\#p_{ij}^{d_h}(p)} p^{(k)} \leq 1 \right\},$$

$p_{ij}^{d_h}(p)$ 表示决策专家对方案 x_i 在准则 c_j 下的评估值,

以 PLTS 表示为

$$L(p) = \left\{ L^{(k)}(p^{(k)}) \mid L^{(k)} \in S, p^{(k)} \in [0,1], \right. \\ \left. k = 1, 2, \dots, \#L(p), \sum_{k=1}^{\#L(p)} p^{(k)} \leq 1 \right\}。$$

决策专家对准则的偏好矩阵为 $A = [a_{hj}(p)]_{m \times n}$,

$$a_{hj}(p) = \left\{ a_{hj}^{(k)}(p^{(k)}) \mid a_{hj}^{(k)} \in S, p^{(k)} \in [0,1], \right. \\ \left. k = 1, 2, \dots, \#a_{hj}^{(k)}, \sum_{k=1}^{\#a_{hj}^{(k)}} p^{(k)} \leq 1 \right\},$$

$a_{hj}(p)$ 表示决策专家 d_h 对准则 c_j 的偏好值, 以 PLTS 表示。

2.2 方法框架

本文提出的 SNA-PLTS-QUALIFLEX 绿色包装评价方法分为 4 个分析阶段, 如图 3 所示。

第一阶段为评价指标体系确定阶段。通过查阅相关文献及资料, 从资源、环境、经济、功能、社会 5 个维度构建绿色包装评价指标体系。第二阶段为群体综合评价矩阵生成阶段。通过分析决策专家信任关系网络确定决策专家权重, 结合各决策专家给出的初始评价矩阵, 运用概率语言加权平均 (probabilistic linguistic weighted averaging, PLWA) 聚合算子生成群体综合评价矩阵。第三阶段为综合一致性/不一致性指标计算阶段。首先通过分析决策专家-准则偏好关系确定准则权重, 然后基于群体综合评价矩阵获得

各测试方案对的可能度矩阵, 从而计算各测试方案的加权一致性/不一致性指标值, 最后结合准则权重和加权一致性/不一致性指标值计算各测试方案的综合一致性/不一致性指标值。第四阶段为方案选择阶段。基于综合一致性/不一致性指标值对各测试方案进行排序, 确定最优方案。

2.3 评价指标确定

基于可持续发展理念, 绿色包装既要满足保护、运输、便利等功能要求, 也要符合低危害、低消耗及高环保要求^[19]。引入绿色包装评价指标体系, 对合理地设计和选择产品包装方案尤为重要, 其不仅对判断一个产品的包装方案能否满足绿色要求起作用, 还有利于组织管理者做出科学的企业战略决策, 并指明产品绿色包装未来发展方向^[19-20]。在构建绿色包装评价指标体系时, 应结合包装产品的全生命周期即原料选择、制造、使用到废弃全过程, 从资源、环保、经济和功能等方面综合分析包装产品是否符合绿色要求。此外, 包装产品是为人所用的, 而人与社会相互依存相互影响, 在评价包装产品时, 应充分将人和社会的因素考虑在内。因此, 本文将绿色包装评价维度扩展到人与社会层面, 构建一个三层绿色包装方案评价指标体系。首先将绿色包装设置为目标层(第一层), 其次将资源、环境、经济、功能、社会 5 个指标设置为评价指标体系中的一级指标层(第二层),

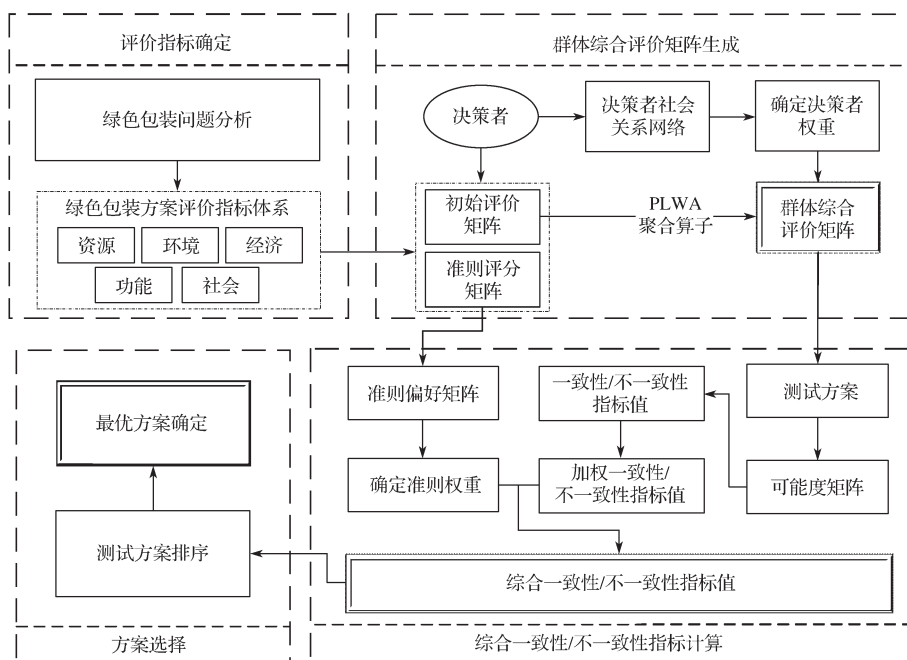


图 3 SNA-PLTS-QUALIFLEX 绿色包装评价方法框架

Fig. 3 SNA-PLTS-QUALIFLEX green packaging evaluation method framework

最后将一级指标下 10 个影响程度较大的因素设置为 指标体系中的二级指标层（第三层），如图 4 所示。

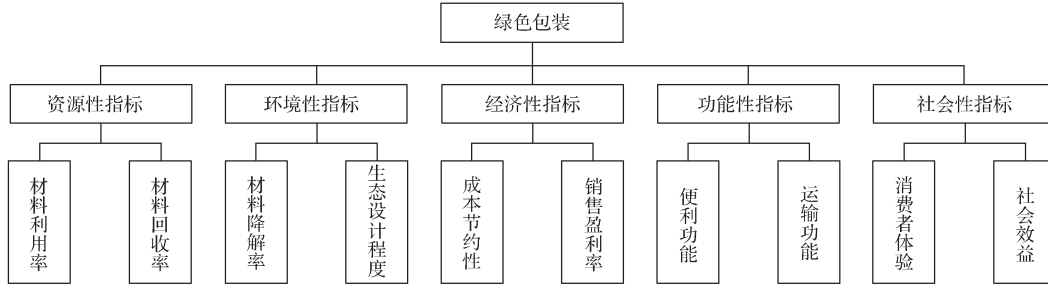


图 4 绿色包装方案评价指标体系

Fig. 4 Evaluation index system of green packaging scheme

2.4 群体综合评价矩阵生成

2.4.1 专家权重确定

基于社会网络的网络拓扑结构衡量各决策专家的影响力，确定各决策专家的权重，计算公式为

$$w_{eh} = \frac{I_h}{\sum_{h=1}^m I_h}, \quad (1)$$

其中 I_h 为决策专家 d_h 的受信程度，在决策专家信任关系网络中用入度中心度进行计算。

2.4.2 信息集结

聚合算子能够有效地将各个决策专家的评价信息集结为一个综合群体决策专家评价信息矩阵。本文基于 PLWA 聚合算子，对各个决策专家的评价信息进行聚合。PLWA 聚合算子定义^[7]为

$$\begin{aligned} & \text{PLWA}(L_1(p), L_2(p), \dots, L_m(p)) = \\ & w_{e1}L_1(p) \oplus w_{e2}L_2(p) \oplus \dots \oplus w_{em}L_m(p) = \\ & \bigcup_{l_1^{(k)} \in L_1(p)} \{w_{e1}P_1L_1^{(k)}\} \oplus \bigcup_{l_2^{(k)} \in L_2(p)} \{w_{e2}P_2L_2^{(k)}\} \oplus \dots \oplus \\ & \bigcup_{l_m^{(k)} \in L_m(p)} \{w_{em}P_mL_m^{(k)}\}, \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $L_h(p)$ 对应的一个权重向量为 $w_e = (w_{e1}, w_{e2}, \dots, w_{em})^T$ ，且满足 $\sum_{h=1}^m w_{eh} = 1$ 。

2.5 综合一致性 / 不一致性指标计算

2.5.1 准则权重确定

1) 偏好矩阵转换

准则偏好函数用 F 表示，决策专家对准则的偏好评价语言集记为 S ，则

$$F = \{f_{hj} \mid f \in [a, b], h=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n, 0 \leq a, b \leq \#S\}; \quad (3)$$

$$S = \{s_f(1)\}. \quad (4)$$

式中： f_{hj} 为决策专家 h 对准则 j 的评分；

$\#S$ 为用于描述准则的语言术语集中的术语个数。

例如，决策专家对准则 j 的评分为 5 时，将其转化为 PLTS 形式为 $s_5(1)$ 。

2) 权重计算

受文献 [11] 和 [21] 的启发，本文提出一种基于可能度公式的准则权重计算方法。

$$P_{jk}^h = p(c_j^h \succ c_k^h) = \begin{cases} 1, r_j > r_k, \\ 0, r_j < r_k, \\ \frac{1}{2} p_j p_k, r_j = r_k; \end{cases} \quad (5)$$

$$p_j = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^m P_{jk}^h, j=1, 2, \dots, n, k \neq j; \quad (6)$$

$$w_j = \frac{p_j}{\sum_{j=1}^n p_j}. \quad (7)$$

式中： p_{jk}^h 为对于决策专家 d_h ，准则 c_j 比 c_k 重要的可能度；

p_j 为 c_j 优于其他准则的可能度；

w_j 为准则 c_j 的权重；

r_i 为 $L_i(p)$ 的下标。

2.5.2 指标值确定

1) 测试方案排列

存在方案集 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_p\}$ ，有 $p!$ 种测试排序方案， O_l 代表第 l 种测试方案：

$$O_l = \{\dots, x_{i_s}, \dots, x_{k_s}, \dots\}. \quad (8)$$

2) 基于距离的可能度计算

基于文献 [22] 提出的可能度公式，对方案对之间的占优关系进行比较，

$$P(x_1 \succ x_2) = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \left(1 - \sum_{i \in r^{(L_1(p))}, j \in r^{(L_2(p))}} N(r_1^i, r_2^j) \right) + \sum_{i \in r^{(L_1(p))}, j \in r^{(L_2(p))}} \frac{1}{2} N(r_1^i, r_2^j), \quad (9)$$

$$\text{式中: } R_1 = \begin{cases} 0, A_1 = \emptyset, \\ \frac{1}{\#L_1(p)L_2(p)} \sum_{A_1} (r_1^i - r_2^j) p_1^i p_2^j, A_1 \neq \emptyset; \end{cases}$$

$$R_2 = \begin{cases} 0, A_2 = \emptyset, \\ \frac{1}{\#L_1(p)L_2(p)} \sum_{A_2} (r_2^j - r_1^i) p_1^i p_2^j, A_2 \neq \emptyset; \end{cases}$$

$$N(r_1^i, r_2^j) = \begin{cases} 0, r_1^i = r_2^j, \\ p_1^i p_2^j, r_1^i \neq r_2^j; \end{cases}$$

$L_i(p)$ 为方案 x_i 的评价信息;

r_i^k 为方案 x_i 评价信息中的第 k 个概率语言术语的下标;

A_1 为下标之差大于 0 的集合;

A_2 为下标之差小于 0 的集合。

3) 加权一致性 / 不一致性指标值计算

准则 c_j 下, 第 l 种测试方案中方案对 x_i 和 x_k 的一致性 / 不一致性指标 $I_j^l(x_i, x_k)$ 为

$$I_j^l(x_i, x_k) = P(x_i \succ x_k) - 0.5。 \quad (10)$$

准则 c_j 下, 第 l 种测试方案的加权一致性 / 不一致性指标 I_j^l 为

$$I_j^l = \sum_{x_i, x_k \in X} I_j^l(x_i, x_k)。 \quad (11)$$

4) 综合一致性 / 不一致性指标值计算

综合一致性 / 不一致性指标 I^l 的计算公式为

$$I^l = \sum_{j=1}^n w_j^l I_j^l。 \quad (12)$$

2.6 最优方案选择

基于综合一致性 / 不一致性指标值 I^l 对最终测试方案进行排序, I^l 值越大, 对应的测试方案越优, 基于该测试方案对备选方案的排序, 确定最优备选方案 x_{opt} :

$$I(O_i^*) = \max(I^l), \quad (13)$$

$$x_{\text{opt}} = O_i^*[1], \quad (14)$$

式中 $O_i^*[1]$ 为 O_i^* 中的第一个备选方案。

2.7 方法步骤

本文提出的 SNA-PLTS-QUALIFLEX 绿色包装评价方法共 9 个步骤, 其中步骤 1 为第一阶段, 步骤 2~3 为第二阶段, 步骤 4~8 为第三阶段, 步骤 9 为第四阶段, 具体步骤如下:

步骤 1 查阅文献资料, 确定绿色包装方案评价指标体系;

步骤 2 基于决策专家间合作次数, 构建决策专家间信任关系网络, 并在该网络基础上通过公式 (1) 计算决策专家权重;

步骤 3 基于各个决策专家对各方案的初始评价矩阵 P^{d_h} , 利用公式 (2) 生成群体综合评价矩阵 P^{d_H} ;

步骤 4 利用公式 (3) ~ (4) 将决策专家对准则评分信息转换为准则偏好矩阵;

步骤 5 基于决策专家 - 准则偏好矩阵, 通过公式 (5) ~ (7) 计算各个准则的权重;

步骤 6 对群体综合评价矩阵 P^{d_H} , 根据公式 (8) 列出所有测试方案 O_i ;

步骤 7 对所有测试方案, 根据公式 (9) 计算准则 c_j 下各方案对的可能度矩阵 P ;

步骤 8 利用公式 (10) ~ (12) 计算各测试方案的综合一致性 / 不一致性指标值 I^l ;

步骤 9 基于综合一致性 / 不一致性指标值 I^l , 利用公式 (13) ~ (14) 对最终测试方案进行排序, 确定最优方案 x_{opt} 。

3 算例分析

3.1 问题背景

对于绿色包装评价问题, 主要涉及到产品包装的资源 (C_1)、环境 (C_2)、经济 (C_3)、功能 (C_4)、社会 (C_5) 5 个一级指标, 以及 10 个二级指标, 具体包括材料利用率 (c_1)、材料回收率 (c_2)、材料降解率 (c_3)、生态设计程度 (c_4)、成本节约性 (c_5)、销售利润率 (c_6)、便利功能 (c_7)、运输功能 (c_8)、消费者体验 (c_9), 社会效益 (c_{10})。设由绿色包装相关领域的 8 位决策专家组成的决策群体 $D = \{d_1, d_2, \dots, d_8\}$, 基于 10 个二级指标对 x_1, x_2, x_3 3 种绿色包装方案进行评估与优选。决策专家间的合作次数如表 1 所示。

表 1 专家合作次数

Table 1 Number of cooperation between experts

	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8
d_1		1	1	1	1	1	1	1
d_2	1		1	1	1	1	0	1
d_3	1	1		1	1	1	1	1
d_4	1	1	1		1	1	1	1
d_5	1	1	1	1		1	1	1
d_6	1	1	1	1	1		1	1
d_7	1	0	1	1	1	1		1
d_8	1	1	1	1	1	1	1	

假设决策专家对方案 x_i 在准则 c_j 下的评价信息由 PLTS 表示, 描述各准则的语言术语集为

$$S = \{s_1 = \text{极差}, s_2 = \text{非常差}, s_3 = \text{差}, s_4 = \text{一般}, s_5 = \text{好}, s_6 = \text{非常好}, s_7 = \text{极好}\}.$$

当决策专家 d_h 使用 PLTS 对准则 c_j 下方案 x_i 进行评

价时, 往往通过多个语言术语及各语言术语对应的概率进行表示, 如专家用 $L(p) = \{s_4(0.6), s_5(0.4)\}$ 表示其对某个方案某个准则下的评估值为“一般”的概率为 0.6, “好”的概率为 0.4。限于篇幅, 仅给出专家 d_1 对各方案各准则下的评价信息, 如表 2 所示。

表 2 专家 d_1 的评价矩阵
Table 2 Evaluation matrix of expert d_1

	x_1	x_2	x_3
c_1	$\{s_1(0.4667), s_2(0.3000), s_3(0.1500), s_6(0.0833)\}$	$\{s_1(0.1935), s_3(0.8065)\}$	$\{s_1(0.1428), s_3(0.6154), s_4(0.2418)\}$
c_2	$\{s_2(0.3533), s_4(0.3667), s_6(0.0933), s_7(0.1867)\}$	$\{s_2(0.9878), s_3(0.0122)\}$	$\{s_1(0.0544), s_3(0.6122), s_6(0.0884), s_7(0.2450)\}$
c_3	$\{s_4(0.1756), s_5(0.3024), s_6(0.2488), s_7(0.2732)\}$	$\{s_1(0.2180), s_2(0.1634), s_6(0.3774), s_7(0.2412)\}$	$\{s_2(0.2222), s_4(0.4938), s_5(0.0247), s_7(0.2593)\}$
c_4	$\{s_1(0.4130), s_2(0.5725), s_6(0.0145)\}$	$\{s_2(0.7671), s_4(0.2329)\}$	$\{s_2(0.4733), s_3(0.4934), s_7(0.0333)\}$
c_5	$\{s_3(0.2461), s_4(0.0462), s_5(0.5615), s_6(0.1462)\}$	$\{s_1(0.4238), s_3(0.1143), s_7(0.4619)\}$	$\{s_4(0.5055), s_5(0.1429), s_7(0.3516)\}$
c_6	$\{s_1(0.2635), s_3(0.1081), s_4(0.1554), s_5(0.4730)\}$	$\{s_3(0.5537), s_7(0.4463)\}$	$\{s_1(0.4766), s_3(0.5234)\}$
c_7	$\{s_3(0.1497), s_5(0.5782), s_6(0.2721)\}$	$\{s_6(0.6167), s_7(0.3833)\}$	$\{s_1(0.1379), s_2(0.0575), s_4(0.0345), s_6(0.7701)\}$
c_8	$\{s_5(1.0000)\}$	$\{s_2(0.5833), s_3(0.0486), s_6(0.3681)\}$	$\{s_2(0.1641), s_3(0.4308), s_4(0.2974), s_6(0.1077)\}$
c_9	$\{s_1(0.4107), s_3(0.0476), s_6(0.5417)\}$	$\{s_2(0.0826), s_4(0.4771), s_5(0.0275), s_6(0.4128)\}$	$\{s_2(0.2901), s_3(0.4809), s_4(0.2061), s_5(0.0229)\}$
c_{10}	$\{s_3(0.7980), s_5(0.2020)\}$	$\{s_3(0.7632), s_7(0.2368)\}$	$\{s_1(0.2466), s_2(0.4305), s_3(0.3229)\}$

决策专家对不同准则具有不同的主观偏好, 其对准则 c_j 的评分结果, 如表 3 所示。

表 3 准则得分矩阵
Table 3 Criterion score matrix

	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8	c_9	c_{10}
d_1	3	5	5	2	2	5	2	6	7	4
d_2	5	1	5	7	2	7	4	2	7	3
d_3	4	2	6	3	5	1	7	2	1	4
d_4	6	4	5	7	3	6	6	5	1	5
d_5	1	7	5	2	3	3	2	6	3	1
d_6	1	5	7	1	4	4	6	4	7	7
d_7	3	4	1	4	6	6	6	3	3	3
d_8	2	6	7	1	3	5	6	1	3	6

3.2 决策过程

3.2.1 群体综合评价矩阵生成

基于表 1 信息, 将决策专家间合作关系转换为决策专家间信任关系网络, 如图 5 所示。

基于决策专家间信任关系网络图, 根据公式 (1) 计算得到决策专家权重为

$$W_e = \{0.1296, 0.1112, 0.1296, 0.1296, 0.1296, 0.1296, 0.1112, 0.1296\}.$$

各决策专家基于 10 个评价准则评估 3 个备选方案, 采用 PLTS 给出个人评价矩阵 P^{d_h} , 使用公式 (2) 将个人评价矩阵聚合成一个群体综合评价矩阵 P^{d_H} , 如表 4 所示。

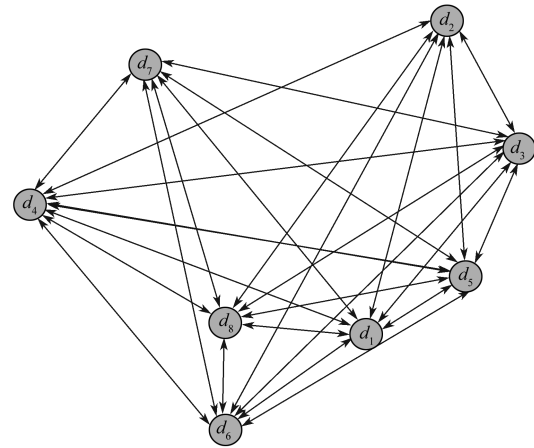


图 5 决策专家间信任关系网络

Fig. 5 Trust relationship network among decision-making experts

3.2.2 综合一致性 / 不一致性指标计算

利用公式 (3) ~ (4), 将决策专家对准则的评分信息转换为准则偏好矩阵, 如表 5 所示, 矩阵中的偏好信息用 PLTS 表示。

根据 8 个决策专家构成的决策群体对 10 个评价准则进行评分, 通过公式 (5) ~ (7) 确定各个准则权重为

$$W_e = \{0.0762, 0.1025, 0.1288, 0.0875, 0.0850, 0.1162, 0.1213, 0.0850, 0.1012, 0.0963\}.$$

绿色包装方案的 6 种可能测试方案 $O_l (l=1, 2, \dots, 6)$: (1,2,3)、(1,3,2)、(2,1,3)、(2,3,1)、(3,1,2)、(3,2,1),

根据公式(9)得到可能度矩阵 P 。受篇幅限制,仅给出 c_1 和 c_{10} 下的可能度矩阵,如表6~7所示。

根据公式(10)~(11),获得准则 c_j 下,测试方案 O_i 下的加权一致性/不一致性指标 I_j^i ,如表8所示。

根据公式(12)计算得到各测试方案的综合一致性/不一致性指标 I^i : $I^1=1.5087$, $I^2=1.4957$, $I^3=1.5180$, $I^4=1.5043$, $I^5=1.4820$, $I^6=1.4913$ 。

基于综合一致性/不一致性指标 I^i ,对最终测试方案进行排序,排序结果为

$$O_3 \succ O_1 \succ O_4 \succ O_2 \succ O_6 \succ O_5,$$

即 $x_2 \succ x_1 \succ x_3$ 。基于方案排序,确定最优方案为:

$$x_{opt} = x_2 \circ$$

3.3 对比分析

目前,将 QUALIFLEX 和概率语言相结合的研究较少。文献[23]在概率语言环境下,结合前景理论(PT)对 QUALIFLEX 方法进行拓展,文献[22]将犹豫模糊语言术语集换为 PLTS,提出了一种新的可能度公式及概率语言 QUALIFLEX 方法。本文利用 PLTS 表示决策专家群体对各方案的评价信息和决策专家对各评估准则的偏好关系信息,采用 QUALIFLEX 方法对绿色包装方案进行评估。为证明本文方法的合理性和有效性,将本文方法与文献[22]、[23]的方法进行对比,结果如表9~11所示。

表4 群体综合评价矩阵 $P^{d_{ij}}$

Table 4 Group comprehensive evaluation matrix $P^{d_{ij}}$

	x_1	x_2	x_3
c_1	$\{s_1(0.2824), s_2(0.1342), s_3(0.1528), s_4(0.1296), s_5(0.0695), s_6(0.1019), s_7(0.1296)\}$	$\{s_1(0.1296), s_2(0.2716), s_3(0.1636), s_4(0.1080), s_5(0.0648), s_6(0.1204), s_7(0.1420)\}$	$\{s_1(0.1636), s_2(0.1559), s_3(0.1188), s_4(0.2114), s_5(0.0756), s_6(0.1512), s_7(0.1235)\}$
c_2	$\{s_1(0.1080), s_2(0.2469), s_3(0.0695), s_4(0.1389), s_5(0.1019), s_6(0.1296), s_7(0.2052)\}$	$\{s_1(0.1358), s_2(0.1852), s_3(0.1034), s_4(0.0988), s_5(0.2052), s_6(0.1744), s_7(0.0972)\}$	$\{s_1(0.1852), s_2(0.0324), s_3(0.1312), s_4(0.1790), s_5(0.2068), s_6(0.1574), s_7(0.1080)\}$
c_3	$\{s_1(0.0988), s_2(0.0972), s_3(0.1404), s_4(0.0324), s_5(0.2315), s_6(0.2747), s_7(0.1250)\}$	$\{s_1(0.2654), s_2(0.1250), s_3(0.1404), s_4(0.0695), s_5(0.2423), s_6(0.1250), s_7(0.0324)\}$	$\{s_1(0.2562), s_2(0.1312), s_4(0.2006), s_5(0.1358), s_6(0.1790), s_7(0.0972)\}$
c_4	$\{s_1(0.1559), s_2(0.1775), s_3(0.1065), s_4(0.1296), s_5(0.1019), s_6(0.2160), s_7(0.1126)\}$	$\{s_1(0.1512), s_2(0.1204), s_3(0.0648), s_4(0.2716), s_5(0.0648), s_6(0.2192), s_7(0.1080)\}$	$\{s_1(0.0648), s_2(0.1682), s_3(0.1188), s_4(0.0972), s_5(0.1405), s_6(0.2377), s_7(0.1728)\}$
c_5	$\{s_1(0.0325), s_2(0.0695), s_3(0.1944), s_4(0.2052), s_5(0.2376), s_6(0.1682), s_7(0.0926)\}$	$\{s_1(0.1466), s_2(0.1358), s_3(0.0756), s_4(0.2608), s_5(0.1790), s_6(0.0278), s_7(0.1744)\}$	$\{s_1(0.0988), s_2(0.1559), s_3(0.1451), s_4(0.2438), s_5(0.1188), s_6(0.1620), s_7(0.0756)\}$
c_6	$\{s_1(0.3148), s_3(0.1358), s_4(0.1898), s_5(0.1914), s_6(0.1034), s_7(0.0648)\}$	$\{s_1(0.0926), s_2(0.1404), s_3(0.2052), s_4(0.1250), s_5(0.2315), s_6(0.0648), s_7(0.1405)\}$	$\{s_1(0.2068), s_2(0.1404), s_3(0.1250), s_4(0.0710), s_5(0.2176), s_6(0.0602), s_7(0.1790)\}$
c_7	$\{s_1(0.0972), s_2(0.3302), s_3(0.1559), s_4(0.1019), s_5(0.0432), s_6(0.0756), s_7(0.1960)\}$	$\{s_1(0.1080), s_2(0.1636), s_3(0.0926), s_4(0.0710), s_5(0.2808), s_6(0.1914), s_7(0.0926)\}$	$\{s_1(0.2701), s_2(0.3117), s_3(0.0694), s_4(0.1019), s_5(0.0741), s_6(0.0972), s_7(0.0756)\}$
c_8	$\{s_1(0.1235), s_2(0.0756), s_3(0.1342), s_4(0.1852), s_5(0.2392), s_6(0.1775), s_7(0.0648)\}$	$\{s_1(0.1852), s_2(0.2423), s_3(0.1404), s_5(0.1528), s_6(0.1127), s_7(0.1666)\}$	$\{s_1(0.0602), s_2(0.1342), s_3(0.1250), s_4(0.1682), s_5(0.2099), s_6(0.1358), s_7(0.1667)\}$
c_9	$\{s_1(0.1682), s_2(0.1852), s_3(0.2006), s_4(0.1574), s_5(0.0648), s_6(0.1312), s_7(0.0926)\}$	$\{s_1(0.2377), s_2(0.1296), s_3(0.0432), s_4(0.1451), s_5(0.1728), s_6(0.1682), s_7(0.1034)\}$	$\{s_1(0.1188), s_2(0.1512), s_3(0.0972), s_4(0.0756), s_5(0.1899), s_6(0.1127), s_7(0.2546)\}$
c_{10}	$\{s_1(0.0556), s_2(0.1142), s_3(0.3688), s_4(0.2006), s_5(0.1250), s_6(0.0324), s_7(0.1034)\}$	$\{s_2(0.1296), s_3(0.2701), s_4(0.1250), s_5(0.1559), s_6(0.1682), s_7(0.1512)\}$	$\{s_1(0.3642), s_2(0.0988), s_3(0.1080), s_4(0.0756), s_5(0.1250), s_6(0.0710), s_7(0.1574)\}$

表5 专家-准则偏好矩阵

Table 5 Experts-criteria preference matrix

	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8	c_9	c_{10}
d_1	$\{s_3(1)\}$	$\{s_5(1)\}$	$\{s_2(1)\}$	$\{s_2(1)\}$	$\{s_2(1)\}$	$\{s_5(1)\}$	$\{s_2(1)\}$	$\{s_6(1)\}$	$\{s_7(1)\}$	$\{s_4(1)\}$
d_2	$\{s_5(1)\}$	$\{s_1(1)\}$	$\{s_5(1)\}$	$\{s_7(1)\}$	$\{s_2(1)\}$	$\{s_7(1)\}$	$\{s_4(1)\}$	$\{s_2(1)\}$	$\{s_7(1)\}$	$\{s_3(1)\}$
d_3	$\{s_4(1)\}$	$\{s_2(1)\}$	$\{s_6(1)\}$	$\{s_3(1)\}$	$\{s_5(1)\}$	$\{s_1(1)\}$	$\{s_7(1)\}$	$\{s_2(1)\}$	$\{s_1(1)\}$	$\{s_4(1)\}$
d_4	$\{s_6(1)\}$	$\{s_4(1)\}$	$\{s_5(1)\}$	$\{s_7(1)\}$	$\{s_3(1)\}$	$\{s_6(1)\}$	$\{s_6(1)\}$	$\{s_5(1)\}$	$\{s_1(1)\}$	$\{s_5(1)\}$
d_5	$\{s_1(1)\}$	$\{s_7(1)\}$	$\{s_5(1)\}$	$\{s_2(1)\}$	$\{s_3(1)\}$	$\{s_5(1)\}$	$\{s_2(1)\}$	$\{s_6(1)\}$	$\{s_3(1)\}$	$\{s_1(1)\}$
d_6	$\{s_1(1)\}$	$\{s_5(1)\}$	$\{s_7(1)\}$	$\{s_1(1)\}$	$\{s_4(1)\}$	$\{s_4(1)\}$	$\{s_6(1)\}$	$\{s_4(1)\}$	$\{s_7(1)\}$	$\{s_7(1)\}$
d_7	$\{s_3(1)\}$	$\{s_4(1)\}$	$\{s_1(1)\}$	$\{s_4(1)\}$	$\{s_6(1)\}$	$\{s_6(1)\}$	$\{s_6(1)\}$	$\{s_3(1)\}$	$\{s_3(1)\}$	$\{s_3(1)\}$
d_8	$\{s_2(1)\}$	$\{s_6(1)\}$	$\{s_7(1)\}$	$\{s_1(1)\}$	$\{s_3(1)\}$	$\{s_5(1)\}$	$\{s_6(1)\}$	$\{s_1(1)\}$	$\{s_3(1)\}$	$\{s_6(1)\}$

表 6 准则 c_1 下可能度矩阵Table 6 Possibility matrix of criteria c_1

$P(x_i > x_j)$	x_1	x_2	x_3
x_1	0.5000	0.4600	0.4200
x_2	0.5400	0.5000	0.4600
x_3	0.5800	0.5400	0.5000

表 7 准则 c_{10} 下可能度矩阵Table 7 Possibility matrix of criteria c_{10}

$P(x_i > x_j)$	x_1	x_2	x_3
x_1	0.5000	0.4800	0.4000
x_2	0.5200	0.5000	0.4200
x_3	0.6000	0.5800	0.5000

3.3.1 专家权重对比

文献 [22] 通过计算均值进行赋权, 文献 [23] 未考虑决策专家的权重信息, 本文方法基于决策专家之

表 9 专家权重对比结果

Table 9 Comparison results of expert weights

方法	专 家							
	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8
文献 [22]	0.1250	0.1250	0.1250	0.1250	0.1250	0.1250	0.1250	0.1250
文献 [23]	未考虑	未考虑	未考虑	未考虑	未考虑	未考虑	未考虑	未考虑
本文	0.1296	0.1112	0.1296	0.1296	0.1296	0.1296	0.1112	0.1296

从表 9 可以看出, 文献 [22] 认为所有决策专家的影响程度是相同的, 文献 [23] 假设所有决策专家在给出评价信息时就已经达成了一致, 这两种方法均未考虑在不同决策问题中, 不同决策专家的影响力往往具有差异, 这些差异会对决策结果产生影响。相较而言, 本文方法对决策专家权重的分配更具有区分度, 在绿色包装领域中影响力更大的决策专家在决策时可以发挥更大的作用。因此, 本文方法能最大程度地发挥决策专家的专业能力, 较以往方法更具客观性和可靠性。

3.3.2 准则权重对比

文献 [22] 和 [23] 分别利用线性规划和基于可能度公式的赋权方法确定准则权重, 本文方法基于决策专家对准则的偏好关系, 利用可能度公式进行赋权。3 种方法计算得到的准则权重对比如表 10 所示。

由表 10 可知, 在确定准则权重时, 文献 [22] 中各准则分配的权重极不均衡, 对 c_7 赋予极高权重 1, 而认为其他准则的重要性程度极低, 权重为 0。文献 [23] 中各准则分配的权重极其均衡, 认为所有准则对绿色包装方案决策结果的影响程度相同。相对来说,

表 8 加权一致性 / 不一致性指标 I_j^I Table 8 weighted consistency / inconsistency index I_j^I

准则	测 试 方 案					
	O_1	O_2	O_3	O_4	O_5	O_6
c_1	1.3427	1.4139	1.4306	1.5861	1.5694	1.6573
c_2	1.4970	1.5470	1.4512	1.4530	1.5488	1.5030
c_3	1.7766	1.9045	1.3752	1.0955	1.6248	1.2234
c_4	1.2982	1.4568	1.3445	1.5432	1.6555	1.7018
c_5	1.7169	1.6952	1.5273	1.3048	1.4727	1.2831
c_6	1.3734	1.3105	1.5695	1.6895	1.4305	1.6266
c_7	1.7375	1.3135	1.9309	1.6865	1.0691	1.2625
c_8	1.3960	1.6519	1.2334	1.3481	1.7666	1.6040
c_9	1.1824	1.3979	1.2842	1.6021	1.7158	1.8176
c_{10}	1.6199	1.2366	1.9138	1.7634	1.0862	1.3801

间的信任关系进行赋权, 3 种方法计算得到的决策专家权重如表 9 所示。

本文方法对各准则权重的分配更符合现实情况, 更具可区分性和可信度。

表 10 准则权重对比结果

Table 10 Comparison results of criteria weights

一级指标	二级指标	方 法		
		文献 [22]	文献 [23]	本文
C_1	c_1	0.0000	0.1000	0.0762
	c_2	0.0000	0.1000	0.1025
C_2	c_3	0.0000	0.1000	0.1288
	c_4	0.0000	0.1000	0.0875
C_3	c_5	0.0000	0.1000	0.0850
	c_6	0.0000	0.1000	0.1162
C_4	c_7	1.0000	0.1000	0.1213
	c_8	0.0000	0.1000	0.0850
C_5	c_9	0.0000	0.1000	0.1012
	c_{10}	0.0000	0.1000	0.0963

3.3.3 综合对比

基于本文提出方法中所涉及的社会网络、评价内容、专家权重确定、准则权重确定、方案比较方法 5 个方面, 与文献 [22] 和 [23] 中方法进行对比, 以说明本文所用方法的特点和优势, 综合对比内容如表 11 所示。

表 11 综合对比结果

Table 11 Comprehensive comparison results

方法	社会网络	评价内容	专家权重确定	准则权重确定	比较方法
文献 [22]	未考虑	资源规划系统选择	均值	线性权重法	基于距离的可能度公式
文献 [23]	未考虑	初创企业选择	无	基于可能度公式的赋权	基于距离公式
本文	社会信任关系网络	绿色包装方案评价	基于信任关系的赋权	基于偏好关系和可能度公式的赋权	基于距离的可能度公式

由表 11 可知, 文献 [22] 将 QUALIFLEX 方法和线性规划方法应用于资源规划系统的选择问题, 文献 [23] 将 QUALIFLEX 方法应用于初创企业的选择问题。其中, 文献 [22] 认为每个决策专家都是同等重要的, 并通过求均值的方法赋予每个决策专家同样的权重; 文献 [23] 未考虑决策专家权重问题。然而, 在实际中, 决策专家之间的信任关系将会对决策结果造成重大影响, 故通过社会网络分析计算各个决策专家的受信任程度, 以评估其实际影响力和重要性, 进而确定各个决策专家的权重, 是更加合理的赋权方法。此外, 文献 [22] 和 [23] 在确定准则权重时, 忽略了决策专家对各准则具有不同的偏好, 其偏好关系会对决策结果产生直接的影响。因此, 结合决策专家对准则的偏好关系与决策专家对各方案各准则的评价信息, 得到的准则权重更加符合实际。

4 结语

本文在传统绿色包装评价方法的基础上, 充分考虑了决策专家间的信任关系和专家对准则的偏好关系, 采用基于信任关系的决策专家赋权方法以及结合偏好关系和基于距离的可能度公式的准则赋权方法, 提出了一种 SNA-QUALIFLEX-PLTS 多准则决策方法, 并将其应用于绿色包装方案评价问题。通过与现有研究的对比, 本文所提出的方法能够获得更加贴合实际情况、满足决策需求的决策结果, 从而实现更加科学合理的决策。本文方法具有如下优点:

1) 将绿色包装评价维度进行扩展, 构建了一个更加科学合理且符合现实的三层绿色包装方案评价指标体系;

2) 采用 PLTS 对不同方案不同准则下的评价价值进行描述, 可以较好地体现决策专家在评价时的模糊性特点;

3) 通过社会网络分析方法计算专家和准则权重, 既减少了计算量, 又能体现出决策专家之间的信任关系与决策专家对准则的偏好关系, 得到的结果更加全面合理;

4) 使用 QUALIFLEX 方法, 一方面能较好地处理准则数量大于方案数量的决策问题, 另一方面可以降低决策过程的复杂程度, 较好地平衡隐性信息利用与决策效率之间的一致性。

在未来的研究中, 从以下两个方面进行优化:

1) 通过获取真实数据以及不同类型的数据, 构建决策专家间的信任关系网络及决策专家对准则的偏好关系矩阵;

2) 进一步将决策专家之间的相似关系引入网络构建。

参考文献:

- [1] 张云杰. 包装设计中的低碳理念实现: 评《绿色低碳理念下的创新包装设计与应用》[J]. 环境工程, 2019, 37(8): 201.
ZHANG Yunjie. Realization of Low-Carbon Concept in Packaging Design: Comment on Innovative Packaging Design and Application Under Green Low-Carbon Concept[J]. Environmental Engineering, 2019, 37(8): 201.
- [2] 孙伟. 浅谈绿色物流包装[J]. 产业创新研究, 2022(8): 69-71.
SUN Wei. Discussion on Green Logistics Packaging[J]. Industrial Innovation, 2022(8): 69-71.
- [3] 李娜, 李小东. 基于层次分析和信息熵的塑料包装产品绿色度评价方法[J]. 塑料科技, 2019, 47(10): 51-55.
LI Na, LI Xiaodong. Evaluation Method of Green Degree of Plastic Packaging Products Based on AHP and Information Entropy[J]. Plastics Science and Technology, 2019, 47(10): 51-55.
- [4] HUANG J, LIU H C, DUAN C Y, et al. An Improved Reliability Model for FMEA Using Probabilistic Linguistic Term Sets and TODIM Method[J]. Annals of Operations Research, 2022, 312(1): 235-258.
- [5] CHEN T Y, CHANG C H, RACHEL LU J F. The Extended QUALIFLEX Method for Multiple Criteria Decision Analysis Based on Interval Type-2 Fuzzy

- Sets and Applications to Medical Decision Making[J]. *European Journal of Operational Research*, 2013, 226(3): 615-625.
- [6] 姚升保, 古森. 移情关系影响下的群体共识决策模型研究[J]. *中国管理科学*, 2021, 29(11): 203-214.
YAO Shengbao, GU Miao. A Consensus Model for Group Decision Making Under the Influence of Empathy[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2021, 29(11): 203-214.
- [7] PANG Q, WANG H, XU Z S. Probabilistic Linguistic Term Sets in Multi-Attribute Group Decision Making[J]. *Information Sciences*, 2016, 369: 128-143.
- [8] 彭新东, 杨勇, 宋娟萍, 等. 基于组合权重的犹豫模糊语言决策方法[J]. *计算机工程*, 2015, 41(9): 190-193, 198.
PENG Xindong, YANG Yong, SONG Juanping, et al. Hesitant Fuzzy Linguistic Decision Method Based on Combination Weight[J]. *Computer Engineering*, 2015, 41(9): 190-193, 198.
- [9] LAN J B, SUN Q, CHEN Q M, et al. Group Decision Making Based on Induced Uncertain Linguistic OWA Operators[J]. *Decision Support Systems*, 2013, 55(1): 296-303.
- [10] ZHOU X Y, JI F P, WANG L Q, et al. Particle Swarm Optimization for Trust Relationship Based Social Network Group Decision Making Under a Probabilistic Linguistic Environment[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2020, 200: 105999.
- [11] CHEN Z S, CHIN K S, LI Y L, et al. Proportional Hesitant Fuzzy Linguistic Term Set for Multiple Criteria Group Decision Making[J]. *Information Sciences*, 2016, 357: 61-87.
- [12] 罗晓君. 社会网络分析研究综述[J]. *营销界*, 2019(51): 100-101.
LUO Xiaojun. A Summary of Social Analysis Research[J]. *Marketing Circles*, 2019(51): 100-101.
- [13] 鲁英杰, 张应龙. 基于社会网络的结构多样性研究综述[J/OL]. *数据分析与知识发现*, 2022. (2022-06-13). [2022-07-01]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1478.G2.20220611.1622.002.html>.
LU Yingjie, ZHANG Yinglong. Research Summary of Structural Diversity on Social Network[J/OL]. *Data Analysis and Knowledge Discovery*, 2022. (2022-06-13). [2022-07-01]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1478.G2.20220611.1622.002.html>.
- [14] 张海涛, 孙思阳, 任亮. 虚拟学术社区用户知识交流行为机理及网络拓扑结构研究[J]. *情报科学*, 2018, 36(10): 137-142, 163.
ZHANG Haitao, SUN Siyang, REN Liang. Network Topology and Mechanism of User Knowledge Exchange in Virtual Academic Community[J]. *Information Science*, 2018, 36(10): 137-142, 163.
- [15] 张明斗, 席胜杰. 东北地区城市产业空间联系网络特征研究[J]. *地域研究与开发*, 2022, 41(3): 18-24.
ZHANG Mingdou, XI Shengjie. Characteristics of Urban Industrial Spatial Linkage Network in Northeast China[J]. *Areal Research and Development*, 2022, 41(3): 18-24.
- [16] PAELINCK J H P. Qualitative Multiple Criteria Analysis, Environmental Protection and Multiregional Development[J]. *Papers of the Regional Science Association*, 1976, 36(1): 59-74.
- [17] PAELINCK J. Qualitative Multicriteria Analysis: An Application to Airport Location[J]. *Environment and Planning A*, 1977, 9: 883-895.
- [18] PAELINCK J H P. Qualiflex: A Flexible Multiple-Criteria Method[J]. *Economics Letters*, 1978, 1(3): 193-197.
- [19] 周其文, 尚晶晶. 我国绿色物流包装评价指标体系的构建[J]. *无锡商业职业技术学院学报*, 2020, 20(3): 13-19.
ZHOU Qiwen SHANG Jingjing. Construction of Green Logistics Packaging Evaluation Index System in China[J]. *Journal of Wuxi Vocational Institute of Commerce*, 2020, 20(3): 13-19.
- [20] 薛磊, 窦德强. 基于模糊综合评价法的绿色包装评价体系研究[J]. *中国包装工业*, 2015(22): 189-190.
XUE Lei, DOU Deqiang. Research on Evaluation System of Green Packaging Based on Fuzzy Comprehensive Evaluation Method[J]. *China Packaging Industry*, 2015(22): 189-190.
- [21] 张妮, 赵晓冬, 杨洋. 基于中智犹豫模糊语言优先 QUALIFLEX 方法的绿色供应商选择[J]. *数学的实践与认识*, 2021, 51(3): 50-61.
ZHANG Ni, ZHAO Xiaodong, YANG Yang. Green Supplier Selection Based on Neutrosophic Hesitant Fuzzy Linguistic Prioritized QUALIFLEX Method[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2021, 51(3): 50-61.
- [22] FENG X Q, LIU Q, WEI C P. Probabilistic Linguistic QUALIFLEX Approach with Possibility Degree Comparison[J]. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2018, 36(1): 719-730.

[23] TIAN X L, XU Z S, WANG X X, et al. Decision Models to Find a Promising Start-Up Firm with Qualiflex Under Probabilistic Linguistic Circumstance[J]. International Journal of Information Technology &

Decision Making, 2019, 18(4): 24.

(责任编辑: 邓光辉)

A Green Packaging Evaluation Method Combining Probabilistic Linguistic and QUALIFLEX in Social Network Environment

ZHOU Huan^{1,2}, ZHANG Peiying^{1,2}, LIU Jia^{1,2}

(1. College of Business, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. Hunan Province Packaging Economy Research Base, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: In order to evaluate the green packaging scheme scientifically and reasonably, a green packaging evaluation method integrating probabilistic linguistic and QUALIFLEX in the social network environment is proposed. Firstly, the evaluation index system of green packaging is determined and the evaluation information of decision-making experts is expressed by using probabilistic linguistic term sets (PLTS). Then the weights of decision-making experts and criteria are calculated by using the trust relationship network among decision-making experts and decision-making expert-criterion preference matrix respectively, and finally, the outranking relationship of alternative green packaging schemes is determined by QUALIFLEX method. The effectiveness and rationality of the proposed method are verified by comparing with other methods.

Keywords: social network analysis; probabilistic linguistic term set; QUALIFLEX; green packaging evaluation; outranking relationship