

基于 ANP-GRA 废旧灭火器逆向物流回收模式选择

乔张斌, 杨玉中, 肖展鹏

(河南理工大学 能源科学与工程学院, 河南 焦作 454003)

摘要:针对灭火器逆向物流特点,构建废旧灭火器逆向物流回收模式评价指标体系,建立 ANP-GRA 评价模型,在确定权重方面,采用网络分析法与熵值法相结合,考虑了指标间的相关性与模糊性;在评价方法方面,将评价对象与理想对象序列差值归一化引入灰色关联法中,以均衡度与相对贴近度相结合的形式同时反映 3 种回收模式数据曲线的贴合与波动变化,评价结果更加全面。通过实例应用分析,得出 TPT 模式更为适合其逆向物流的发展。

关键词:废旧灭火器;逆向物流;ANP-GRA 模型;模式选择

中图分类号:X789 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2021)08-0115-08

在全球气候恶化、国家出台相关政策以及民众环保意识不断提高的背景下,资源的可回收利用成为诸多学者研究的焦点。众多企业试图通过逆向物流供应链实现经济效益与企业形象双赢。灭火器作为一种常见又易被人忽视的便携式应急物资,内置化学品,存放于公共场所及预防火灾发生的地方。每年中国报废不同型号的灭火器不计其数,其中废旧灭火器中含铁质、铝、橡胶树脂、有效化学药剂等诸多可回收再利用物质,而其所面临回收规范性差、回收渠道少、循环利用效率低、拆解处理污染大等问题也逐渐引起政府以及企业的重视。因此,亟须完善废旧灭火器现有的逆向物流回收管理体系,提高回收率,规范回收渠道。其中,回收模式的选择是首要考虑问题。

废旧灭火器的回收处理过程实际上是一个逆向物流过程。“逆向物流”即一种废旧产品从顾客手中回收所发生的一系列过程,目的是对其进行拆解、再制造以及循环利用。产品回收模式成为整个产品生命周期甚至整个逆向物流供应网络能否有效实施的首要条件^[1]。Zhang 等^[2]将逆向物流回收模式分为 3 种:制造商自营回收(manufacture take-back, MTB)、经销商负责回收(retailer take-back, RTB)、第三方负责回收(third party take-back,

TPT)。废旧物品逆向物流回收模式主要集中于电子产品废弃物、废旧衣物、快递包装、报废汽车以及近年来电动汽车行业所带动的废旧动力电池。很多专家学者是从定性和定量两方面开展可回收物品研究工作。丁雪枫等^[3]和朱凌云等^[4]分别从定量和定性的角度出发研究了废旧汽车动力电池回收模式的选择。丁雪枫等^[3]针对多属性汽车动力电池决策问题,通过实例得出生产商联盟回收动力电池最为合适。朱凌云等^[4]以电动汽车的报废动力电池为研究对象,结合上汽集团,建立以自营为基础的复合型逆向物流回收网络。倪明等^[5]从定性的角度通过比较 SDN 模式与传统回收模式,得出 SDN 模式借助第三方网络平台优化废旧手机回收资源,提高了回收效率。李正军等^[6]从定量的角度比较分析了包装废弃物 3 种回收模式的特点,构建客观、全面的评价指标体系,结合京东具体实例选择合适的包装废弃物回收模式。刘光富等^[7]基于博弈论方法讨论社会危险物的最佳回收模式,从定量的角度对危险物回收提出建议。然而存在一定安全隐患的废旧灭火器回收模式的研究却极为匮乏。

由于废旧灭火器逆向物流存在分布地点分散及回收量不确定等问题,对于生产厂家和销售商以及第三方物流都面临着回收效率与经济效益低下

收稿日期:2021-04-02

基金项目:国家自然科学基金(51674102);NSFC-河南联合基金重点项目(U1904210);国家自然科学基金(51874121)。

作者简介:乔张斌(1994—),男,河南三门峡人,河南理工大学能源科学与工程学院,硕士研究生,研究方向为物流与供应链;通信作者杨玉中(1972—),男,河北藁城人,河南理工大学能源科学与工程学院,副院长,教授,研究方向为物流与供应链管理;肖展鹏(1996—),男,河南驻马店人,河南理工大学能源科学与工程学院,硕士研究生,研究方向为物流与供应链。

的问题,对环保和公众而言存在潜在的污染

浪费以及安全隐患风险。这些问题决定废旧灭火器逆向物流回收模式的评价指标的复杂性、相关性、不确定性。评价指标之间的关系常常具有相关性,故本文采用网络层次分析法(analytic network process, ANP)处理指标间的交互作用并获得主客观权重^[8]。为实现评价指标权重的科学性与合理性,不仅仅要考虑依靠专家经验评判获取的主观权重,还要收集评价指标的客观信息熵,反映该指标提供的信息量。因此本文采用熵权法确定指标的客观权重,与网络层次分析主观权重进行组合,进而全面反映指标权重的重要性。在评价模型方面,对于废旧灭火器的研究数据少,信息相对贫乏且评价数据的灰度大,由中国学者邓聚龙创立的灰色系统理论,专门是针对此类问题的一种解决方法。灰色关联分析是对系统内包含相互关联、相互影响的因素之间关联程度进行比较^[9]。事实上,传统的加权灰色关联度考虑了各个因素的重要性,其结果不可避免地由少数几个关联系数大的指标决定关联度倾向。因此本文基于熵增定理^[10],用熵值衡量评价对象与理想对象接近的均衡度,可以有效避免这种倾向,实现对评价指标信息的充分利用与挖掘,为废旧灭火器逆向物流回收模式的选择提供合理、可行的方法。

1 废旧灭火器逆向物流回收模式评价指标体系

目前,中国企业废旧灭火器回收模式主要有企业制造商自营回收、经销商负责回收、第三方物流负责回收。本文选择合理的方法选择适合的回收模式。

为使废旧灭火器逆向物流回收模式更具有科学性、可操作性、实用性,合理的评价指标是其模式选择的基本保证。Yender^[11]最早开始从环境、立法、技术以及经济因素 4 个方面考虑影响电池回收。朱凌云等^[4]从经济、技术、管理、社会 4 个方面构建废旧动力电池的评价指标体系。郝皓等^[12]从经济效益、生态环境效益、社会效益 3 个维度构建报废汽车蓄电池逆向物流可行性的评价指标体系。Tian 等^[13]从环境、社会、技术 3 个维度构建中国汽车逆向物流回收模式的评价指标体系。Xi 等^[14]从成本、环境、企业服务能力以及基本素质 4 个方面构建了汽车逆向物流供应商的评价指标体系。本文基于已有的研究成果,结合废旧灭火器逆向物流的特点,系统构建废旧灭火器逆向物流回收模式的评价指标体系,包含经济、社会、技术以及环境 4 个维度,

共 15 个二级指标,见表 1。

2 废旧灭火器逆向物流回收模式选择模型

2.1 确定组合权重

2.1.1 ANP 确定主客观权重

2.1.1.1 绘制网络结构

ANP 根据决策属性将其分为控制层和网络层。控制层由决策问题组成,网络层由诸多因素组成进而影响控制层,因素之间相互影响,受到控制层的支配。ANP 相比较于 AHP 的优势在于除了分析同一元素组两两元素之间的关系,又考虑不同元素组中各个元素的影响关系^[15]。典型的网络层次分析图其控制层的影响准则是相互独立的,如图 1 所示。

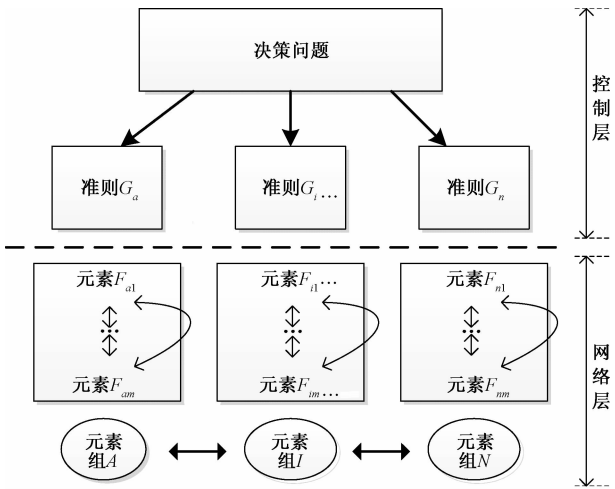


图 1 经典 ANP 结构图

2.1.1.2 构建加权超矩阵

设在控制层下有准则 $G_a, \dots, G_n$, 网络层下有元素组 $A, \dots, N$, 元素组中有元素 $F_{i1}, \dots, F_{im}$ 。根据网络结构图,元素组中元素既可以受到同一组内元素影响,又与不同组元素存在一定关系。如:在某一元素组 I 中,其元素 F_{ii} 受到另一元素组 A 的影响,即控制层准则 $G_s(s = a, \dots, n)$ 为准则,以元素组 I 中元素 F_{ii} 为次准则,对元素组 A 采用数值 1~9 打分法构建判断矩阵,最终求其归一化后的矩阵 $W_A^i = (W_{A1}^i, W_{A2}^i, \dots, W_{An}^i)$ 。需特别声明的是,若元素组 A 中某元素 F_{ai} 对元素 F_{ii} 无影响时,将其权重直接记为 0 即可。元素组 I 中其他元素亦受到元素组 A 的影响即采用同样的方法计算其权重,若无关系直接记为 0 向量。最后将归一化的权重向量按顺序排列起来,即元素组 I 中其他元素亦受到元素组 A 的影响即采用同样的方法计算其权重,若无关系直接记为 0 向量。最后将归一化的权重向量按顺序排列起来,即

表 1 废旧灭火器逆向物流回收模式评价指标体系

目标层	准则层	指标层(类型)	解释
废旧灭火器 逆向物流 回收模式 评价指标	经济因素 G_a	投资运营建设成本 F_{a1} (成本型)	废旧灭火器的回收流程中回收站点、处理中心、加工中心所涉及的专业设施设备,以及负责相关工艺技术人员等;从回收资源再利用的整个过程中包装、运输、储存等一系列活动所产生的费用
		产品回收能力 F_{a2} (效益型)	受企业自身规模、策略、环保等因素的影响,结合民众关于消防器材报废知识的了解,以及政府法律法规的驱使下,每种模式回收废旧灭火器的数量
		盈利水平 F_{a3} (效益型)	回收过程中资源回收带来的经济效益与投资运营建设成本产生的差额
		厂商规模 F_{a4} (效益型)	企业注册资金额以及目前发展状况,支持废旧产品回收的可行性,以及经营、政策等外界因素所引发的财务风险
	社会因素 G_b	法规政策 F_{b1} (成本型)	健全的法规政策可以促进废旧资源的可回收利用,也可提高投资者的热情,主要包括产业政策、税收政策、土地政策以及环保政策等
		公众意识 F_{b2} (效益型)	公民环保意识以及消防设备知识的储备不同,导致回收数量差异以及回收模式的选择
		逆向供应链合作能力 F_{b3} (效益型)	报废产品的整条逆向物流供应链不是单一成员的运作,更多的是全员的参与合作,有效的合作决定其能否有效运行
		企业竞争能力 F_{b4} (成本型)	保持并提高客户的满意度和忠诚度是企业竞争的因素,逆向物流服务是影响供应链绩效的重要手段
	技术因素 G_c	核心能力 F_{c1} (效益型)	不同回收模式对于回收环节中各个活动所体现出的优势
		逆向物流基础设施 F_{c2} (效益型)	建立逆向物流回收网络,不单单依靠企业自身力量,还要考虑当地的交通、网络信息基础设施的建设等因素
		逆向物流专业化程度 F_{c3} (效益型)	整条逆向物流供应链运行的强弱,包含专业人员、信息技术、基础设施、合作能力等
		信息化水平 F_{c4} (效益型)	互联网技术的逐步成熟,整条逆向物流供应链对于信息技术的应用娴熟往往可以提高回收效率
	环境因素 G_d	填充物无害化处理率 F_{d1} (效益型)	废旧产品中过期的化学试剂或失效,经过环保设备有效处理后达标排放,且能提高资源的回收
		运输碳排放 F_{d2} (成本型)	产品在回收过程中,从回收站点到最终处理的总路程,量化每公里的碳排放,进而计算出总碳排放
		有效资源的回收率 F_{d3} (效益型)	废旧产品在回收之后能够转化为可再利用资源,即回收利用率越高,企业的效益越好

$$W_a^i = (W_{a1}^{i1}, W_{a1}^{i2}, \dots, W_{a1}^{im}) = \begin{bmatrix} W_{a1}^{i1} & W_{a2}^{i1} & \dots & W_{an}^{i1} \\ W_{a1}^{i2} & W_{a2}^{i2} & \dots & W_{an}^{i2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ W_{a1}^{im} & W_{a2}^{im} & \dots & W_{an}^{im} \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

W_a^i 表示 A 组元素对 I 组的间接优势度排序,若 A 组元素对 I 组元素无影响则记为 0。因此获得未权重化超矩阵 W 。

$$W = \begin{bmatrix} W_a^1 & W_a^2 & \dots & W_a^m \\ W_b^1 & W_b^2 & \dots & W_b^m \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ W_n^1 & W_n^2 & \dots & W_n^m \end{bmatrix} \quad (2)$$

矩阵 W_a^i 是列向量经过归一化处理矩阵,但矩

阵 W 并非 是归一化的,因此需对其进行加权处理。在决策问题下,以 G_a 为准则,其余准则为次准则,分析各准则对 A 组元素所在控制层的准则的重要性并构造判断矩阵,其他元素依次构建,得到加权矩阵 M 。

$$M = \begin{bmatrix} m_{aa} & m_{ba} & \dots & m_{na} \\ m_{ab} & m_{bb} & \dots & m_{nb} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ m_{an} & m_{bn} & \dots & m_{nn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

利用加权矩阵 M 对未权重化的矩阵 W 进行加权处理得到加权超矩阵 $\bar{W}$, $\bar{W} = M \cdot W$,此时 $\bar{W}$ 为归一化后的矩阵。

2.1.1.3 极限处理

在网络结构中,各个元素之间存在相互关联,若 $W^\infty = \lim_{k \rightarrow \infty} \bar{W}^k$ 收敛且唯一,则 $\bar{W}$ 达到稳定状态,则 W^∞ 的第 i 行是各个元素的最终权重。

2.1.2 熵权法确定客观权重

2.1.2.1 构建初始评价矩阵

设有 m 个评价对象, n 个评价指标,矩阵 X 由评价对象的评价指标值组成, x_{ij} 表示第 i 个评价对象的 j 个评价指标值,由于不同评价指标量化单位与取值范围的不同,故先将其标准化,标准化的方法很多,其中无量纲规范化评价矩阵为

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1n} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y_{n1} & y_{n2} & \cdots & y_{nm} \end{bmatrix} \quad (4)$$

当指标为效益型指标时,规范化公式为

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_i X_{ij}}{\max_i X_{ij} - \min_i X_{ij}}, j = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

当指标为成本型指标时,规范化公式为

$$y_{ij} = \frac{\max_i X_{ij} - x_{ij}}{\max_i X_{ij} - \min_i X_{ij}}, j = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

2.1.2.2 确定指标的熵值

第 j 个评价指标的熵值 e_j 的计算式为

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m y_{ij} \cdot \ln y_{ij}, 0 \ln 0 \equiv 0 \quad (7)$$

式中, $k = 1/\ln m$, m 表示评价对象的个数,当系数 $k = 1$ 时表示评价指标的信息熵。其意义为:在综合评价中指标值的变化趋势刚好与熵值相反,即信息熵值越小,该指标提供的信息量越大,所占权重也越大^[16]。

2.1.2.3 计算指标的熵权

指标的熵权 a_j 计算式为

$$G_j = 1 - e_j, 1 \leq j \leq n \quad (8)$$

$$a_j = G_j / \sum_{i=1}^n G_i, j = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

2.1.3 组合主客观权重

假设主观权重向量为 $a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1n}$, 客观权重向量为 $a_{21}, a_{22}, \dots, a_{2n}$, 则组合权重的计算方法为

$$\theta = \prod_{i=1}^2 a_{ij} / \sum_{i=1}^2 \prod_{j=1}^n a_{ij} \quad (10)$$

乘法组合赋权法利用“倍增效应”,有效使得权重大的指标权重组合后更大,很好地将众多指标权重均匀的情况区分开来,故本文采用乘法组合赋权法。

2.2 灰色关联分析建立评价模型

假设 $A = (a_i | i = 1, 2, \dots, m)$ 是 m 个评价对象的集合, $B = (b_j | j = 1, 2, \dots, n)$ 为 n 个评价指标的集合,不同评价对象对应不同指标值的矩阵 $V = (V_{ij} | i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n)$ 。

2.2.1 确定理想对象 obj^*

obj^* 是集合 A 构成的理想对象, $\text{obj}^* = (V_j^* | V_j^* = \max_i V_{ij} \text{ or } \min_i V_{ij})$ 。

2.2.2 评价对象与理想对象指标值的预处理

对数据预处理有线性变换、初值化与均值化 3 种。线性变换是指原始数据中某一指标的数据值除以该指标中的理想对象 obj^* , 得到一个相比较于最优值的百分比新向量,其计算方法为

$$V' = (V'_{ij} | V'_{ij} = V_{ij} / \text{obj}^*) \quad (11)$$

2.2.3 计算加权灰色关联度

灰色关联度是理想序列与比较序列接近程度的测度。其中,灰色关联系数为

$$L_i(k) = \frac{\min_i \min_k |v_k^* - v_k^i| + \rho \max_i \max_k |v_k^* - v_k^i|}{|v_k^* - v_k^i| + \rho \max_i \max_k |v_k^* - v_k^i|} \quad (12)$$

式中: ρ 为分辨系数,取值范围在 $[0, 1]$, 通常取值为 0.5; v_k^* 为理想序列中第 k 个值; v_k^i 表示第 i 个比较序列中第 k 个值; $\min_i \min_k |v_k^* - v_k^i|$ 表示两级的最小差; $\max_i \max_k |v_k^* - v_k^i|$ 表示两级的最大差。

灰色关联度为

$$r_{oi} = \sum_{k=1}^n a_k L_i(k) \quad (13)$$

式中, a_k 为各个指标对应的权重系数。

2.2.4 归一化评价对象差值

归一化后的序列为

$$C'_i = c'_{ij} | c'_{ij} / \sum_{k=1}^n c_{ik}, j = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

2.2.5 计算序列 C'_i 的熵及均衡度

$$H(C'_i) = - \sum_{j=1}^n c'_{ij} \ln c'_{ij}, H_m = \ln n, B_i = H(C'_i) / H_m \quad (15)$$

虽然加权灰色关联度考虑各个指标的重要性差异,但存在极少数关联系数决定关联度倾向的问题,为避免这种情况出现,引入均衡度。均衡度可测量各个评价指标与理想序列接近的均衡程度,为此可以有效避免单纯只计算贴近度的问题。

2.2.6 计算均衡接近度并进行评价

$$W_2 = B_i \times r \quad (16)$$

2.2.7 多层次灰色关联评价

$W = A \times W_2 \tag{17}$

针对评价对象各指标间关系分为不同层次,采用层次分析法计算出废旧灭火器逆向物流回收模式中经济因素、社会因素、技术因素以及环境因素各层所占的比重关系,以各个评价指标权重矩阵以及关联度得出接近度的结果矩阵作为各个因素的评价矩阵,综合评价得出最终 3 种模式均衡接近度,选出最优方案。

3 实例研究

以某省某市消防器材制造公司为案例进行研究,该公司于 1998 年成立,注册资金为 600 万元主要生产各类消防器材、消防药剂、防火材料以及各类消防系统装置,集生产、维修、工程于一体。企业近年来快速发展,生产成本上涨,追求企业效益是当务之急。目前,国家正在逐步完善资源的可回收利用法律法规,鼓励企业提高对资源的利用率,提高企业绿色度。居民生活水平提高,对产品的附加值要求也越来越高,除满足产品质量以外,还考虑产品的售后、环保、企业的社会责任等。因此,该企业预完善产品的生命周期,选择适合本企业的废旧灭火器回收模式。

3.1 确定主观权重

3.1.1 绘制网络结构图

经过实地调研后,由灭火器生产制造商、零售商以及第三方回收,每个领域各两名专家组成跨职能评价小组,展开头脑风暴,在评价指标体系的基础上,确定指标间的相互影响关系,构建网络结构图,如图 2 所示。

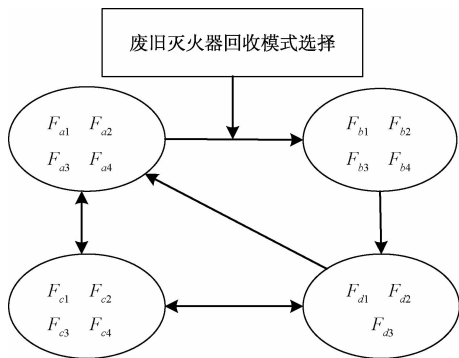


图 2 废旧灭火器逆向物流回收模式网络结构图

3.1.2 构建未权重化超矩阵

由于废旧灭火器逆向物流回收模式网络结构图指标间存在复杂的相互影响关系,未权重化超矩阵的构建亦很复杂。本文原始判断矩阵的构建是

来自职能小组的打分。由于篇幅有限,以 A 组中某元素为例,以 F_{a1} 为次准则、经济因素组 A 中其他元素为相对优势度为例构造判断矩阵(表 2)。由表 2 可得

$W_a^{a1} = (0.258\ 3, 0.637\ 0, 0.104\ 7)^T$ 。

同理可根据指标的相互影响关系构建出其他判断矩阵,列向量经归一化后按照顺序排列。即可得到未权重化的超矩阵。

表 2 G_a 及 F_{a1} 影响下 A 组元素的判断矩阵

次准则 F_{a1}	F_{a2}	F_{a3}	F_{a4}	归一化	$\lambda_{\max} = 3.038\ 5$ CR=0.037 0 通过一致性检验
F_{a2}	1	1/3	3	0.258 3	
F_{a3}	3	1	5	0.637 0	
F_{a4}	1/3	1/5	1	0.104 7	

3.1.3 构建加权超矩阵

通过元素组间优势度影响关系获得加权矩阵,对未权重化超矩阵进行加权处理,可以有效体现出不同因素组间元素间的优势度关系。根据式(3)可得加权矩阵,经加权处理后可得到加权超矩阵,见表 3。

$M = \begin{bmatrix} 0.471\ 0 & 0.439\ 3 & 0.295\ 2 & 0.363\ 2 \\ 0.243\ 9 & 0.310\ 6 & 0.418\ 9 & 0.319\ 8 \\ 0.167\ 2 & 0.103\ 6 & 0.157\ 6 & 0.178\ 8 \\ 0.118\ 0 & 0.146\ 4 & 0.128\ 4 & 0.138\ 2 \end{bmatrix}$ 。

3.1.4 权重化极限处理

经计算,当权重化矩阵的幂次运算达到稳定时,即可得到极限矩阵。任取一列即为该专家所给打分经过 ANP 计算所求得的指标权重。为保证结果的客观性,对跨职能专家小组的结果求取均值作为主观权重向量,即(0.129 6, 0.162 5, 0.168 6, 0.048 1, 0.079 5, 0.075 3, 0.050 1, 0.032 6, 0.036 8, 0.036 9, 0.038 4, 0.053 1, 0.028 2, 0.034 5, 0.025 9)。

3.2 确定客观权重

基于本文构建的废旧灭火器逆向物评价指标体系的具体要求,对该消防器材生产商、与它辐射范围内的零售商以及具备相应回收能力的第三方回收公司进行调查。调查主要内容是企业的基本状况,包括厂商规模、财务状况、业务能力、发展规划、与合作商的关系以及相关的法律法规政策等。在采纳相关领域数位专家与生产商管理人员意见的基础上,对 3 种模式的各个指标进行打分,并按照指标类型进行规范化处理,其结果见表 4。

表 3 加权超矩阵

元素	a1	a2	a3	a4	b1	b2	b3	b4	c1	c2	c3	c4	d1	d2	d3
a1	0.000 0	0.153 3	0.173 4	0.139 9	0.156 1	0.037 8	0.067 7	0.000 0	0.000 0	0.145 7	0.139 2	0.035 9	0.133 9	0.079 8	0.122 4
a2	0.121 7	0.000 0	0.259 0	0.077 0	0.193 7	0.234 4	0.206 3	0.000 0	0.000 0	0.068 0	0.077 7	0.142 0	0.042 6	0.178 0	0.035 3
a3	0.300 0	0.282 9	0.000 0	0.254 2	0.039 9	0.136 2	0.128 9	0.000 0	0.000 0	0.052 8	0.048 2	0.076 0	0.135 9	0.059 8	0.059 5
a4	0.049 3	0.034 8	0.038 7	0.000 0	0.049 6	0.030 9	0.036 4	0.000 0	0.000 0	0.028 8	0.030 2	0.041 3	0.050 8	0.045 6	0.145 9
b1	0.136 4	0.092 8	0.031 8	0.000 0	0.000 0	0.180 6	0.170 8	0.065 2	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
b2	0.032 8	0.112 1	0.084 9	0.000 0	0.201 4	0.000 0	0.074 6	0.074 6	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
b3	0.047 9	0.026 1	0.104 6	0.000 0	0.037 9	0.034 0	0.000 0	0.170 8	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
b4	0.026 8	0.012 8	0.022 6	0.000 0	0.071 3	0.096 0	0.065 2	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
c1	0.030 0	0.018 7	0.043 9	0.019 1	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.017 3	0.019 2	0.086 7	0.015 3	0.025 2	0.102 3
c2	0.039 6	0.053 9	0.023 6	0.041 6	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.039 4	0.000 0	0.050 4	0.033 1	0.060 3	0.059 0	0.019 5
c3	0.039 6	0.058 5	0.023 6	0.041 6	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.039 4	0.048 7	0.000 0	0.037 9	0.060 3	0.069 4	0.019 5
c4	0.058 0	0.036 1	0.076 1	0.064 9	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.078 8	0.091 6	0.088 0	0.000 0	0.042 9	0.025 2	0.037 4
d1	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.079 0	0.030 7	0.025 5	0.030 7	0.074 7	0.027 0	0.023 6	0.021 0	0.000 0	0.092 1	0.110 6
d2	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.023 9	0.080 5	0.092 8	0.080 5	0.014 1	0.070 6	0.075 0	0.038 1	0.034 6	0.000 0	0.027 6
d3	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.043 5	0.035 2	0.028 1	0.035 2	0.039 7	0.030 8	0.029 8	0.069 3	0.103 7	0.046 1	0.000 0

表 4 3 种模式指标打分数据

评价指标	MTB	RTB	TPT
投资运营建设成本(万元)	0.382 0	0.327 0	0.291 0
废旧产品的回收能力(%)	0.260 0	0.320 0	0.420 0
盈利水平(%)	0.404 0	0.250 0	0.346 0
厂商规模(百分制)	0.217 0	0.457 0	0.326 0
法规政策(百分制)	0.352 0	0.389 0	0.259 0
公众意识(百分制)	0.457 0	0.348 0	0.196 0
逆向供应链合作能力(%)	0.158 0	0.289 0	0.553 0
企业竞争能力(%)	0.100 0	0.700 0	0.200 0
核心能力(%)	0.368 0	0.368 0	0.263 0
逆向物流基础设施(百分制)	0.196 0	0.348 0	0.457 0
逆向专业化程度(%)	0.217 0	0.326 0	0.457 0
信息化水平(百分制)	0.162 0	0.270 0	0.568 0
填充物无害化处理率(%)	0.389 0	0.333 0	0.278 0
碳排放量(%)	0.305 0	0.339 0	0.356 0
有效资源的回收率(%)	0.356 0	0.356 0	0.288 0

根据式(4)~式(6)对专家初始判断矩阵标准化,再由式(7)~式(9)计算出各个指标的熵权为(0.168 2, 0.046 6, 0.011 5, 0.077 1, 0.033 1, 0.033 1, 0.168 2, 0.077 1, 0.877, 0.011 5, 0.011 5, 0.168 2, 0.009 1, 0.087 7, 0.009 1)。

经乘法组合原则,由式(10)计算出组合赋权为(0.119 6, 0.169 8, 0.148 6, 0.046 9, 0.092 3, 0.075 7, 0.054 8, 0.027 2, 0.030 4, 0.033 5, 0.037 3, 0.063 2, 0.026 5, 0.052 8, 0.021 4)。

3.3 灰色关联评价模型

为更好地挖掘评价指标的数据信息,根据各个指标类型以及打分情况,成本型指标越小越好,效益型指标越大越好,确定理想对象为(0.100 0,

0.600 0, 0.600 0, 0.600 0, 0.100 0, 0.600 0, 0.600 0, 0.000 0, 0.600 0, 0.600 0, 0.600 0, 0.600 0, 0.600 0, 0.100 0, 0.600 0)。

其中以经济因素为例计算:

1)根据表 4 各个专家的打分情况,构造判断矩阵:

$$\begin{bmatrix} 0.200 0 & 0.600 0 & 0.600 0 & 0.600 0 \\ 0.291 0 & 0.260 0 & 0.404 0 & 0.217 0 \\ 0.327 0 & 0.320 0 & 0.250 0 & 0.457 0 \\ 0.382 0 & 0.420 0 & 0.346 0 & 0.326 0 \end{bmatrix}。$$

2)由式(5)、式(6)、式(11)对判断矩阵规范化处理:

$$\begin{bmatrix} 1.000 0 & 1.000 0 & 1.000 0 & 1.000 0 \\ 1.460 0 & 0.430 0 & 0.670 0 & 0.360 0 \\ 1.640 0 & 0.530 0 & 0.420 0 & 0.720 0 \\ 1.910 0 & 0.720 0 & 0.580 0 & 0.540 0 \end{bmatrix}。$$

3)计算评价对象与理想对象的差值:

$$\begin{bmatrix} 0.460 0 & 0.570 0 & 0.330 0 & 0.640 0 \\ 0.640 0 & 0.470 0 & 0.580 0 & 0.280 0 \\ 0.910 0 & 0.280 0 & 0.420 0 & 0.460 0 \end{bmatrix}。$$

4)由式(12)、式(13)计算加权关联度:

$$L = \begin{bmatrix} 0.803 3 & 0.717 1 & 0.936 3 & 0.671 2 \\ 0.671 2 & 0.794 6 & 0.710 1 & 1.000 0 \\ 0.538 5 & 1.000 0 & 0.840 0 & 0.803 3 \end{bmatrix};$$

$$R = (0.605 9, 0.708 3, 0.818 2)。$$

5)由式(14)对差值序列归一化,结果为

$$C' = \begin{bmatrix} 0.230 0 & 0.285 0 & 0.165 0 & 0.320 0 \\ 0.325 0 & 0.239 0 & 0.294 0 & 0.142 0 \\ 0.440 0 & 0.135 0 & 0.203 0 & 0.222 0 \end{bmatrix}。$$

6)由式(16)分别计算各评价对象的均衡度:

$$B_1 = H(C')/H_m = 0.931\ 4, B_2 = 0.964\ 5, B_3 = 0.910\ 1。$$
重复步骤 1)~6)可计算出其余因素评价对象与理想对象的均衡接近度,见表 5。

表 5 评价对象与理想对象的均衡接近度

因素	w_1	w_2	w_3
经济因素	0.564 3	0.683 2	0.744 6
社会因素	0.599 8	0.563 4	0.820 0
技术因素	0.422 97	0.510 4	0.580 5
环境因素	0.661 4	0.554 2	0.440 3

利用层次分析法,计算出顶层权重为(0.459 9, 0.219 9,0.200 9,0.119 4)。

7)由式(17)进行综合结果计算,得

$$W=(0.547\ 9,0.606\ 8,0.692\ 0)。$$

3.4 结果分析

利用 MATLAB2014a 绘制出 3 种模式各个指标与理想对象的离散序列图,如图 3 所示。

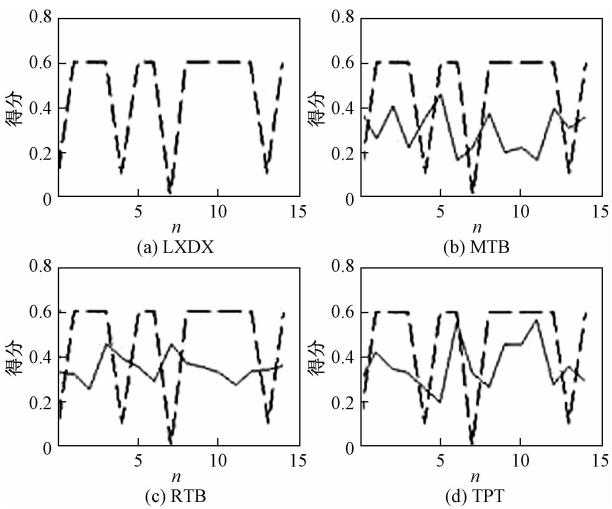


图 3 离散序列接近程度示意图

由式(15)计算出 3 种回收模式评价指标与理想对象指标序列的信息熵,见表 6。

由加权灰色关联分析计算出 3 种模式的计算结果为:MTB=0.605 9,RTB=0.708 3,TPT=0.818 2。TPT 的结果在三者中最大,RTB 次之。将序列均衡度考虑到加权灰色关联分析中得出 3 种模式的权重结果为:MTB=0.547 9,RTB=0.606 8,TPT=0.692 0,得到相同的结果。根据图 3 可以清晰看出 TPT 模式与理想对象的拟合程度更好。综合上述结论,TPT 模式更适合该企业的废旧灭火器回收。从一级指标来看,经济因素占比为 0.459 9,社会因素占比为 0.219 9,几乎占据决定因素的 80%,相比

较于其他两个一级指标在选择回收模式中为重点考虑对象。在二级指标中,指标权重占比前 5 的分别是盈利水平 F_{a3} 、废旧产品的回收能力 F_{a2} 、投资运营成本 F_{a1} 、法规政策 F_{b1} 、公众意识 F_{b2} ,其具体原因从以下方面进行分析。

表 6 计算各指标信息熵

评价指标	LXDX	MTB	RTB	TPT
投资运营建设成本	0.155 0	0.242 8	0.230 9	0.164 2
废旧产品的回收能力	0.364 0	0.168 2	0.188 2	0.174 6
盈利水平	0.364 0	0.131 5	0.192 0	0.151 3
厂商规模	0.364 0	0.202 1	0.118 6	0.160 6
法规政策	0.259 9	0.235 6	0.193 6	0.137 7
公众意识	0.259 9	0.112 1	0.113 1	0.230 8
逆向供应链合作能力	0.215 8	0.231 7	0.130 7	0.052 3
企业竞争能力	0.000 0	0.052 9	0.232 0	0.222 1
核心能力	0.346 6	0.128 2	0.156 2	0.263 6
逆向物流基础设施	0.346 6	0.185 2	0.165 1	0.158 9
逆向专业化程度	0.346 6	0.178 8	0.174 1	0.158 9
信息化水平	0.346 6	0.194 5	0.195 5	0.054 3
填充物无害化处理率	0.356 9	0.311 2	0.295 1	0.311 0
碳排放量	0.197 3	0.041 9	0.144 7	0.041 9
有效资源的回收率	0.356 9	0.164 2	0.129 3	0.164 0

利润是企业生存的根本,回收模式业务是在利润角度下展开的。利润源自投入与产出的差值,直接表明某项业务的正确与否。就任何一种回收模式而言,盈利水平是企业考虑的第一要素。废旧产品的回收能力与投资运营成本间接决定着企业盈利,因此经济因素中的指标所占权重大。2005 年日本通过制定《环保型社会基本法》,约 95%的购买者可以实现废旧灭火器的回收再利用,并且收集费用不因地域不同产生差异,建立用户征收体制;韩国委托专门企业建立废旧灭火器的回收、运输、保管、分解系统;欧美在 20 世纪已经颁布关于废旧灭火器回收管理条例。国家政策以及相关的法律法规是企业开展此项业务与民众积极参与其中的又一关键因素。

根据信息熵结果,在 RTB 回收模式主导下,盈利水平是最好的,而 TPT 模式次之,主要是由于零售商分布各地,且消费者易于购买和回收灭火器;就投资运营建设成本而言,TPT 回收模式与理想对象最为接近,是最优的。若该企业将回收业务外包给第三方,可节省大量成本资金,降低企业的资金风险,短时期内可获得效益;产品的回收能力,TPT 回收是处于中等水平,亚于 RTB 回收模式。综合上述结果,该企业更适合第三方负责回收,主要有以下优势:①发挥各自核心业务。该企业的核心业务以生产制造为主,

第三方主要负责回收为主,在发挥各自优势的同时可节约企业的投资成本,并可获得一定的回收效益。
②较强的供应链能力。从基础设施、专业化水平可以看出,第三方回收是比较适合的模式。

4 结语

结合废旧灭火器逆向物流的特点,建立了回收模式评价指标体系,构建了基于组合权重和改进的灰色关联的评价选择模型。参考现有的逆向物流回收模式的文献,考虑经济、社会、管理因素之外,在环境因素中增加灭火器填充物无害化处理率,使得评价指标能够全面反映废旧灭火器逆向物流过程中的影响因素,提高了指标体系的科学性;主客观组合赋权法既分散了主观赋权法专家依靠直觉打分的缺点,又克服客观赋权收集数据局限于样本,采用乘法组合权重,“倍增效应”能更好区分指标均匀的情况,提高了分配权重的科学性;改进的灰色关联模型通过计算评价对象与理想对象的均衡接近度,横向与纵向结合比较评价结果,考虑评价对象与理想对象的整体接近程度,克服了最终结果评价,使得评价模型更加合理。

在此之前,有学者预测第三方逆向物流运作模式将会成为一种趋势,通过 ANP-GRA 对废旧灭火器逆向物流回收模式进行选择,其结果亦说明第三方逆向物流作用模式的有效性。通过结合实例验证,评价模型具有一定的实用性与可行的评价模型,今后在完善废物回收相关法律规定有一定的参考意义,将对资源的可回收利用具有推动作用。

参考文献

- [1] 夏绪辉,王蕾. 逆向供应链及其服务[M]. 北京:机械工业出版社,2018:5—8.
- [2] ZHANG L, WANG Z X, PAN X H, et al. Optimization model for remanufacturing logistics network with fuzzy parameters [C]//International Conference on Measuring Technology & Mechatronics Automation. IEEE, 2010: 849—852.
- [3] 丁雪枫,马瑜. 动力电池回收模式选择的多属性决策问题[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(9): 1312—1318.
- [4] 朱凌云,陈铭. 废旧动力电池逆向物流模式及回收网络研究[J]. 中国机械工程, 2019, 30(15): 1828—1836.
- [5] 倪明,钱思源,杨善林. 废旧手机回收模式研究[J]. 北京交通大学学报(社会科学版), 2018, 17(4): 105—112.
- [6] 李正军,张震. 供给侧结构性改革视角下企业包装废弃物回收模式选择评价研究[J]. 生态经济, 2019, 35(3): 68—72.
- [7] 刘光富,刘文侠,鲁圣鹏,等. 考虑政府引导的社会源危险废物回收处理模式研究[J]. 科技管理研究, 2016, 36(8): 229—232.
- [8] 贾进章,陈怡诺. 基于网络层次分析—灰色聚类法的高层建筑火灾风险分析[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(4): 1228—1235.
- [9] 张晓娜. 我国服务业与城镇化的灰色关联度实证考察[J]. 统计与决策, 2020(19): 97—101.
- [10] 柯文进,王军. 基于熵权 TOPSIS 模型的城市高等教育资源承载力评价[J]. 统计与决策, 2020(18): 50—53.
- [11] YENDER G. L. Battery recycling technology and collection processes[J]. In Proceedings of the 1998 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment. IEEE, 1998: 30—35.
- [12] 郝皓,张骞,王治国. 报废汽车蓄电池逆向物流可行性评价——基于改进的模糊神经网络[J]. 中国流通经济, 2018, 32(6): 15—24.
- [13] TIAN G D, LIU X, ZHANG M H, et al. Selection of take-back pattern of vehicle reverse logistics in China via Grey-DEMATEL and Fuzzy-VIKOR combined method [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 220: 1088—1100.
- [14] XI F, JIANG W. Study on scrap automobile manufacturers reverse logistics partners base on evaluation engineering [J]. Systems Engineering Procedia, 2012(5): 213—221.
- [15] 王莲芬. 网络分析法(ANP)的理论与算法[J]. 系统工程理论与实践, 2001(3): 44—50.
- [16] 杨玉中,吴立云. 煤矿运输安全性评价的基于熵权的 TOPSIS 方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(11): 228—231.

The Reverse Logistics Model Selection of Waste Fire Extinguishers Based on ANP-GRA

QIAO Zhang-bin, YANG Yu-zhong, XIAO Zhan-peng

(School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo Henan 454003, China)

Abstract: In view of the characteristics of reverse logistics of fire extinguishers, the evaluation index system of waste fire extinguishers reverse logistics recovery mode was constructed, and the ANP-GRA evaluation model was established. In determining the weight, the correlation and fuzziness among the indexes were considered by combining network analysis method and entropy method. In terms of the evaluation method, the normalized sequence difference between the evaluation object and the ideal object was introduced into the grey correlation method to reflect the fitting and fluctuation changes of the data curves of the three recovery modes simultaneously in the form of the combination of the equilibrium degree and the relative closeness degree, and the evaluation results were more comprehensive. Through the example application analysis, it is concluded that TPT mode is more suitable for the development of reverse logistics.

Key words: waste fire extinguisher; reverse logistics; ANP-GRA model; mode selection