doi:10.13582/j.cnki.1674-5876.2025.02.005

基于博弈论-后悔理论的危化品槽罐车道路运输风险评估

谭颖[1],周荣义[1,2*],管春香[1],熊文波[1],梁湘雯[1]

(1.湖南科技大学 资源环境与安全工程学院,湖南 湘潭 411201;
2.湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室,湖南 湘潭 411201)

摘 要:针对危化品槽罐车道路运输风险评估方法存在两大缺陷,即指标赋权科学性不足及忽略专家决策时后悔心理影响,进而导致风险评估不准确的问题,提出一种基于博弈论与后悔理论的危化品槽罐车道路运输风险评估方法.该方法首先根据事故致因理论、相关文献及历史事故案例分析构建风险评估指标体系;再通过博弈论融合有序加权平均(Ordered Weighted Aweraging,OWA)算子与熵权法确定各指标综合权重;然后结合后悔理论建立感知效用函数,量化专家规避后悔心理对风险评估的影响,确定风险值与风险等级;最后将该方法应用于某企业危化品槽罐车道路运输风险实例评估,并将该评估结果与模糊综合评价法等 6 种评估方法所得结果进行对比验证.结果表明:博弈论赋权实现了主客观赋权的均衡优化,修正了单一赋权法导致指标权重偏差过大的问题;后悔理论通过心理行为补偿提升了风险评估的准确性;博弈论-后悔理论在风险等级评定方面比模糊综合评价法等 6 种方法更贴近实际情况,可为危化品槽罐车道路运输风险精准防控提供决策支持.

关键词:危化品槽罐车道路运输;后悔理论;博弈论;风险评估

中图分类号:U492.8 **文献标志码**:A **文章编号**:1672-9102(2025)02-0039-09

Risk Assessment of Road Transportation of Hazardous Chemical Tanker Trucks Based on Game Theory and Regret Theory

TAN Ying[1], ZHOU Rongyi[1,2], GUAN Chunxiang[1], XIONG Wenbo[1], LIANG Xiangwen[1]

(1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;
2. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Aiming at the two major defects existing in the risk assessment method of road transportation of hazardous chemical tanker trucks, that is insufficient scientificity of indicator assignment, and neglecting the psychological influence of regret when experts make decisions, which leads to inaccurate risk assessment, a risk assessment method of road transportation of hazardous chemical tanker trucks based on game theory and regret theory is proposed. The method firstly constructs a risk assessment index system based on accident causation theory, relevant literature and historical accident case analysis, then it determines the comprehensive weight of each index by integrating ordered weighted aweraging(OWA) operator and entropy weight method through game theory. It also establishes a perceived utility function combined with regret theory to quantify the influence of experts' regret avoidance psychology on risk assessment, and determines the risk value and risk level. Finally, the method is applied to the road transportation risk assessment of a certain enterprise, and the risk assessment of a certain enterprise's hazardous chemical tanker is determined. The method is applied to an enterprise's hazardous

收稿日期:2025-04-29
基金项目:湖南省教育厅重点资助项目(20A192)
* **通信作者**,E-mail:jackyzry@163.com

chemical tanker risk assessment, and the results are compared and verified with the results of six assessment methods, including the fuzzy comprehensive evaluation method. Results show that game theory empowerment realizes the balanced optimization of subjective and objective empowerment, and corrects the problem that the single empowerment method leads to excessive deviation of index weights, while regret theory improves the accuracy of risk assessment through psychological behavior compensation. The game theory and regret theory are closer to the actual situation than the fuzzy comprehensive evaluation method and other six methods in the evaluation of risk level, and it can provide decision-making support for the precise prevention and control of the risk of hazardous materials tanker truck road transport.

Keywords: road transportation of hazardous chemical tankers; regret theory; game theory; risk assessment

近年来,我国危化品运输市场呈持续扩张态势,危化品运输车辆显著增加.据统计,2020—2024 年全国危化品槽罐车总量从 34.1 万辆增至 48.6 万辆,运输频次激增 66.1%;槽罐车作为危化品道路运输的重要载体,一旦在运输过程中发生事故,其所运载的易燃易爆、有毒有害等特性的危化品极有可能导致重大人员伤亡和财产损失[1].如 2020 年 6 月 13 日,台州温岭沈海高速一辆运输液化石油气的槽罐车爆炸致 20 人死亡、175 人受伤[2];2023 年 8 月 16 日,呼和浩特一辆装载汽油的槽罐车泄漏起火引燃周边车辆造成 2 死 5 伤[3].由此可见,如何预防危化品槽罐车道路运输事故、降低事故严重程度成为亟待解决的问题.风险评估作为预防和控制事故的重要手段,能够有效地识别危化品道路运输事故的影响因素及确定其风险程度,并由此采取相应的安全措施降低风险,为风险管理者提供充分科学合理的依据.因此,开展危化品槽罐车道路运输风险评估研究具有重要意义.

诸多学者对此进行了研究.YANG 等[4]结合模糊层次分析法和模糊综合评价法建立了危化品道路运输风险评价模型,并以成都至德阳路段为例验证了模型的有效性;CHEN 等[5]考虑到沿海地区复杂的气候影响,利用决策实验室分析法、解释结构模型及贝叶斯网络构建了沿海地区危化品道路运输风险评价模型,并将模型应用于跨海大桥危化品道路运输事故案例中;马晓丽等[6]利用有序 Logit 模型和危险货物菱形标签,建立危险货物运输综合风险评价模型,对城市道路的危险货物运输风险进行研究;周荣义等[7]构建了基于集对分析法和区间层次分析法的危险货物道路运输风险评估模型,分析风险因素的不确定性情况及发展趋势;贾进章等[8]将模糊集和改进 DS 证据理论与贝叶斯网络结合,评价了危化品道路运输体系的风险,并分析了体系中的薄弱环节;杨璧帆等[9]采用组合赋权-灰色聚类法,引入事故影响系数,对液态危化品道路运输风险进行评价研究.深入研究发现,模糊综合评价法、集对分析法、灰色聚类法等风险评估方法,虽然在危化品槽罐车道路运输的风险识别与等级划分方面展现出较好的适应性和可操作性,可为多维度风险因素的风险评估提供科学依据.但这些方法将专家视为完全理性的决策主体,默认其不受后悔情绪干扰,忽略了专家因担忧决策失误而主观调整风险评估权重的规避后悔心理的行为倾向,从而影响风险评价结果的准确性及控制措施的针对性,不能为风险防控提供准确的决策依据.此外,上述研究多采用单一或线性组合赋权法确定危化品道路运输风险评价指标的权重,但单一方法存在主客观偏差的问题,组合法则因忽略主客观权重的非线性关系差异而导致综合权重的科学性不足.

鉴于此,笔者基于后悔理论消除专家后悔心理因素对决策结果的影响,引入博弈论解决风险评估过程中主客观赋权不合理问题,构建危化品槽罐车道路运输风险评估模型,最后开展实例应用,将该模型评估结果与模糊综合评价法、集对分析法、灰色聚类法、有序加权平均(Ordered Weighted Aweraging,OWA)算子-后悔理论、熵权法-后悔理论、线性组合赋权法-后悔理论这 6 种方法的结果进行对比分析,验证该方法的可行性与有效性,为危化品槽罐车道路运输风险评估提供新思路.

1 理论基础分析

1.1 后悔理论

后悔理论认为人们在做选择时,不仅会评估选项的实际效用,还会预判决策后可能产生的后悔情绪,并将这种情感预期纳入决策考量[10].后悔的本质是对未选选项的潜在结果与已选结果的主观比较,即当

未选选项的实际结果优于已选选项时,人们会产生强烈的负面情绪.专家在风险评估时会主动比较不同决策方案的可能后果,当预判其他方案可能产生更优结果时,专家会产生后悔心理,因此,倾向于选择可能引发最小后悔值的方案[11].将后悔理论应用于危化品槽罐车道路运输风险评估中,能量化专家在决策中对潜在后悔情绪和损失规避的本能,使得风险评估既反映客观风险水平,又兼顾决策者的主观风险承受能力.因此,相较于其他危化品槽罐车道路运输风险评价方法,后悔理论在本质上具有规避风险的优势,在一定程度上能够提高危化品槽罐车道路运输安全性,降低事故损失.

后悔理论通常通过感知效用函数进行量化表达,该函数由效用函数与后悔-欣喜函数共同构成,如式(1)所示.

$$D(x,y)=h(x)+R(h(x)-h(y)). \tag{1}$$

式中:x,y 分别代表专家可选择的 2 种方案;$D(x,y)$ 为选择方案 x 的感知效用;$h(x)$,$h(y)$ 分别为方案 x,y 的效用值;$R(h(x)-h(y))$ 为后悔-欣喜值,若该值大于 0,表示专家因未选择方案 y 感到欣喜,反之则产生后悔情绪.

当存在 q 个备选方案时,专家选择方案 $x_j(j=1,2,3,\cdots,q)$ 的感知效用函数[12]可扩展为式(2):

$$Dx_j=h(x_j)+R(h(x^*)-h(x_j)). \tag{2}$$

式中:$h(x^*)=\min\{h(x_j)\}$.可知 $h(x^*)-h(x_j)\leqslant 0$,$R(h(x*)-h(x_j))\leqslant 0$,即后悔-欣喜值小于等于 0,反映专家心理的后悔程度最大.通过选取所有方案中最小的值,能有效规避专家后悔后的决策结果,从而提升风险评估的真实性.

1.2　博弈论

博弈论将不同的赋权方法视为具有不同利益需求的参与者,使各类赋权结果转化为可交互的策略集合.相较于单一的主客观赋权方法和线性组合赋权法,博弈论基于动态平衡调节优化权重,使得不同赋权方法达到最佳平衡:一方面使综合权重与各基础权重的整体偏差达到最小,从而减少极端值的影响;另一方面分析指标间的关联性,降低主客观权重之间的相互干扰.将博弈论用于确定危化品槽罐车道路运输风险评估指标的综合权重,可使综合权重既保留专家的经验判断,又反映数据本身的规律特征.

博弈论赋权法的核心思想是通过动态平衡不同赋权方法的结果,寻找使综合权重与各基础权重整体差异最小的最优组合,使最终权重与原始权重集的总体偏差达到最小,具体目标函数可表示为[13]

$$\min \left\| \sum_{k=1}^{g}\alpha_k\boldsymbol{\omega}_k^{\mathrm{T}}-\boldsymbol{\omega}_k \right\|^2. \tag{3}$$

式中:α_k 为权重系数;$\boldsymbol{\omega}_k$ 为基本权重向量集,$k=1,2,3,\cdots,g$;g 为赋权方法的数量,本研究运用了 OWA 算子和熵权法 2 种赋权方法,故 $g=2$.

2　危化品槽罐车道路运输风险评估模型构建

2.1　风险评估模型的构建步骤

本文主要通过以下 3 个步骤实现危化品槽罐车道路运输风险评估:首先,建立包含人员、槽罐车、危化品、运输环境及管理这 5 个维度的风险评估指标体系;其次,运用博弈论整合主客观权重方法,确定指标的综合权重;最后,基于后悔理论构建风险评估模型,计算风险值、确定风险等级并制定防控对策.具体模型构建步骤如图 1 所示.

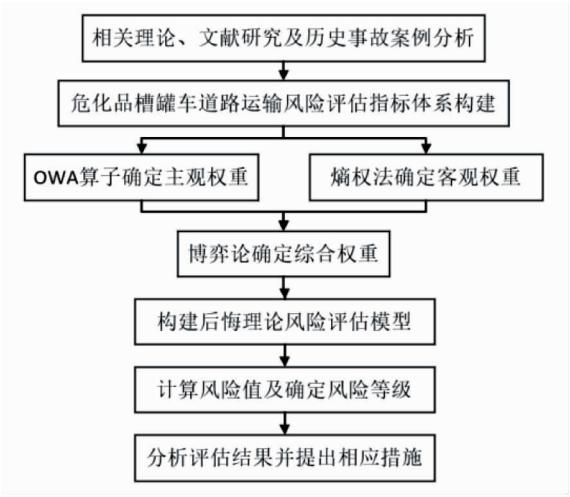

图 1　危化品槽罐车道路运输风险评估模型构建步骤

2.2　风险评估指标体系的建立

基于事故致因理论、相关文献及历史事故案例分析,遵循“人员-槽罐车-危化品-运输环境-管理”的框架构建危化品槽罐车道路运输风险评估指标体系.首先,收集中国安全生产网、安全管理网等网站公布的

2017—2023 年共 729 起危化品槽罐车道路运输事故,依据事故统计提炼出槽罐车故障、人员失误、危化品泄漏、运输环境干扰、管理漏洞这 5 大核心致因,形成一级指标.然后结合文献[4]~文献[9]与文献[14]~文献[16]中基于“人-机-环-管”系统理论的风险评估指标体系构建方法,将一级指标“人员”分解为驾驶技能与经验、违规驾驶、生理与心理状态、培训情况及应急处理能力等 5 个二级指标,“槽罐车”“危化品”“运输环境”“管理”等 4 个一级指标的分解方法亦同.危化品槽罐车道路运输风险评估指标体系如表 1 所示.

表 1 危化品槽罐车道路运输风险评估指标体系

一级指标	二级指标
槽罐车 I	车辆技术状况 I_1、罐体完整性 I_2、安全防护装置有效性 I_3、车辆及罐体维护情况 I_4、车辆使用年限 I_5、车辆应急设备配备情况 I_6
人员 E	驾驶技能与经验 E_1、违规驾驶 E_2、生理与心理状态 E_3、培训情况 E_4、应急处理能力 E_5
危化品 V	危化品理化特性 V_1、泄漏爆炸风险等级 V_2、危化品装载稳定性 V_3、危化品状态监测 V_4、运输量 V_5
运输环境 O	道路条件 O_1、天气与气候因素 O_2、交通流量密度 O_3、沿线人口密度 O_4、敏感区域分布 O_5
管理 L	安全管理制度 L_1、人员资质审核 L_2、安全监测监控系统 L_3、安全投入 L_4、事故责任追溯机制 L_5、应急体系构建情况 L_6

2.3 指标权重的确定

2.3.1 指标主观权重的确定

专家在进行指标赋权时,可能存在主观评分过高或过低的问题,这类异常值若不经过处理,将直接影响权重分配的合理性[17].OWA 算子通过降序排列所有指标数值,将高分和低分调整至权重影响较小的排序位置,再对重新排列后的数据进行加权计算,从而有效削弱异常值对赋权结果的干扰.OWA 算子在保留专家经验判断的同时提升了权重可靠性,其具体计算流程如下[18]:

1)设有 m 个待评价指标,收集专家给出的初始评分数据:$a_1,a_2,a_3,\cdots,a_m$.为每个指标从 1 到 m 分配顺序编号,然后对所有指标的评分数据重新按降序排列,确保高分和低分处于序列两端,得到 $b_1>b_2>b_3>\cdots>b_m$.

2)根据排序后的指标数据,计算指标 i 重新排序后的数值 b_i 的加权向量:

$$\boldsymbol{\eta}_i=\frac{C_m^i}{\sum_{i=1}^{m}C_m^i}=\frac{C_m^i}{2^m},i=1,2,3,\cdots,m. \tag{4}$$

式中:$\boldsymbol{\eta}_i$ 为 b_i 的加权向量;C_m^i 为 m 个指标中第 i 个指标的组合数.

3)求解每个指标的绝对权值 $\overline{\omega}_i$,该数值反映指标在降序排列中的重要性,其公式为

$$\overline{\omega}_i=\sum_{i=1}^{m}\boldsymbol{\eta}_i b_i,\omega_i\in[0,1],i\in[1,m]. \tag{5}$$

式中:b_i 为指标 i 重新排序后的数值.

4)将绝对权值转化为相对权值 ω_i,使各指标权重之和为 1,其公式为

$$\omega_i=\frac{\overline{\omega}_i}{\sum_{i=1}^{m}\overline{\omega}_i}. \tag{6}$$

2.3.2 指标客观权重的确定

熵权法是一种基于信息熵理论的客观赋权方法,其核心思想是通过量化指标数据的离散程度来实现指标权重分配,避免主观判断的干扰[19].该方法认为,指标离散程度越低,信息熵值越趋近于 1,表明该指标包含的信息量越少且区分能力弱,应降低权重;反之,则赋予更高的权重.具体计算步骤如下[20]:

1)构建各指标的原始评分矩阵 $\boldsymbol{P}=(p_{ij})_{m\times n}$,$(i=1,2,3,\cdots,m;j=1,2,3,\cdots,n)$,其中 m 为指标数量,n 为专家人数.再将矩阵 $\boldsymbol{P}$ 进行标准化处理,得到标准化矩阵 $\boldsymbol{P}'=(p_{ij}')_{m\times n}$.

2)计算第 j 个指标在第 i 个方案的占比 z_{ij}:

$$z_{ij}=\frac{p'_{ij}}{\sum_{i=1}^{m}p'_{ij}}. \tag{7}$$

3)计算第 j 个指标的信息熵 e_j:

$$e_j=-k\sum_{i=1}^{m}z_{ij}\ln z_{ij}. \tag{8}$$

式中:$k=1/\ln m$.

4)计算差异系数 d_j,d_j 反映了指标的区分度.

$$d_j=1-e_j. \tag{9}$$

5)计算第 j 个指标的客观权重 ω_j:

$$\omega_j=\frac{d_j}{\sum_{j=1}^{n}d_j}. \tag{10}$$

2.3.3　基于博弈论的指标综合权重确定

博弈论将 OWA 算子确定的指标主观权重 $\boldsymbol{W}_1=(\omega_{11},\omega_{12},\omega_{13},\cdots,\omega_{1n})$ 和熵权法确定的指标客观权重 $\boldsymbol{W}_2=(\omega_{21},\omega_{22},\omega_{23},\cdots,\omega_{2n})$ 看作不同利益诉求的决策参与者,双方博弈达到平衡状态即得到最优综合权重,该方法不仅规避了单一赋权法的主观或客观偏差,更实现了主客观权重的深度融合.其具体实现步骤如下[13]:

1)基于矩阵微分原理,确定式(3)的最优解需满足的约束条件:

$$\sum_{k=1}^{g}\alpha_k\boldsymbol{\omega}_k\boldsymbol{\omega}_k^{\mathrm{T}}=\boldsymbol{\omega}_k\boldsymbol{\omega}_k^{\mathrm{T}}. \tag{11}$$

2)通过对式(11)进行求导运算,得到各参数的解析解,然后对计算结果进行归一化处理,得到标准化权重系数:

$$\alpha_k^{*}=\frac{\alpha_k}{\sum_{k=1}^{g}\alpha_k}. \tag{12}$$

3)将归一化后的权重系数代入综合权重计算式中,最终得出博弈论综合赋权权重:

$$\boldsymbol{\omega}^{*}=\sum_{k=1}^{g}\alpha_k^{*}\boldsymbol{\omega}_k^{\mathrm{T}}. \tag{13}$$

式中:$\boldsymbol{\omega}^{*}$ 为博弈论综合赋权权重;$\alpha_k{}^{*}$ 为 α_k 归一化后的权重系数.

2.4　基于后悔理论的风险评估模型构建

运用后悔理论对危化品槽罐车道路运输风险进行评估的具体步骤如下[12]:

1)构建指标原始评分矩阵 $\boldsymbol{Y}_{m\times n}$.邀请 n 位专家按照各领域较为通用的风险等级划分方法对评估指标体系中的 m 个指标进行评分,文献[9]、文献[11]和文献[12]都采用了类似划分标准.将专家评分记为 y_{ij} $(i=1,2,3,\cdots,m;j=1,2,3,\cdots,n)$,通过专家评分构建指标原始评分矩阵 $\boldsymbol{Y}_{m\times n}$.危化品槽罐车道路运输风险等级划分及其评分如表 2 所示.

表 2　危化品槽罐车道路运输风险等级划分及其评分

风险等级	风险描述	风险评分值
Ⅰ	极低风险	[8,10]
Ⅱ	低度风险	[6,8)
Ⅲ	中度风险	[4,6)
Ⅳ	高度风险	[2,4)
Ⅴ	极高风险	[0,2)

2)确定原始评分矩阵的理想方案 $\boldsymbol{X}$.理想方案 $\boldsymbol{X}=[x_1,x_2,x_3,\cdots,x_n]$,其中 $x_i(i=1,2,3,\cdots,n)$ 为第 i 个

指标的理想参考值,通常取各指标专家评分的最小值,即 $x_i = \min\{y_{ij}\} = \{y_i^*\}$.

3)构建指标原始评分效用值矩阵 $\boldsymbol{H}_{m\times n}$.采用幂函数形式转换原始评分数据,该矩阵元素的计算公式为

$$H_{ij} = (y_{ij})^{\alpha}. \tag{14}$$

式中:幂系数 α 为(0,1).参考文献[11]和文献[12],α 取 0.9.

4)构建后悔-欣喜值矩阵 $\boldsymbol{J}_{m\times n}$.运用指数函数量化专家心理行为影响,后悔-欣喜值矩阵中元素 J_{ij} 的计算公式为

$$J_{ij} = 1 - \mathrm{e}^{-\beta(y_i^* - y_{ij})}. \tag{15}$$

式中:调整系数 β 为(0,1).参考文献[11]和文献[12],β 取 0.013 3.

5)构建指标原始评分的感知效用值矩阵 $\boldsymbol{S}_{m\times n}$,将效用值与后悔-欣喜值叠加计算得到综合感知效用,其公式为

$$S_{ij} = H_{ij} + J_{ij}. \tag{16}$$

6)计算准则层风险评估值 T_c.采用加权求和方法,将各指标感知效用值 S_{ij} 与博弈论赋权权重 ω_{ci} 结合,其公式为

$$T_c = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{m}\omega_{ci}S_{ij}. \tag{17}$$

式中:ω_{ci} 为第 c 个准则层下的第 i 个指标的权重.

7)确定总风险评估值.通过逐层加权求和,得到最终总风险值,其计算公式为

$$T = \sum_{c=1}^{5}\omega_c T_c. \tag{18}$$

式中:ω_c 为第 c 个准则层的权重.

3 实证研究

本文以株洲市某危化品运输企业为例.该企业被某甲级安全评价机构评估为Ⅲ级风险等级,主营液态化学品及压缩气体运输业务,承运二类、三类危化品,有标准化槽罐车 86 辆,车辆装有 GPS/北斗双模定位、防侧翻系统和紧急切断装置,注册驾驶员及押运员共 147 名,全员持证上岗率 100%.邀请 5 位专家依据表 2 对 2.2 节建立的危化品槽罐车道路运输风险指标进行打分,再运用上述模型对危化品槽罐车道路运输风险进行评估.

3.1 指标权重计算

由上述 OWA 算子的式(4)~式(6)和熵权法的式(7)~式(10)分别确定主客观权重;通过博弈论的式(3)建立目标函数,再对式(11)求解得到综合权重系数,并根据式(12)进行归一化处理,最后由式(13)确定各个指标的综合权重.各危化品槽罐车道路运输风险评估指标权重计算结果见表 3.

表 3 危化品槽罐车道路运输风险评估指标权重

准则层	主观权重	客观权重	综合权重	指标层	主观权重	客观权重	综合权重
槽罐车 I	0.257	0.207	0.248	车辆技术状况 I_1	0.182	0.177	0.181
				罐体完整性 I_2	0.175	0.181	0.176
				安全防护装置有效性 I_3	0.180	0.144	0.171
				车辆及罐体维护情况 I_4	0.190	0.191	0.190
				车辆使用年限 I_5	0.124	0.147	0.130
				车辆应急设备配备情况 I_6	0.148	0.161	0.151
人员 E	0.210	0.218	0.212	驾驶技能与经验 E_1	0.244	0.200	0.224
				违规驾驶 E_2	0.136	0.169	0.151
				生理与心理状态 E_3	0.189	0.263	0.223
				培训情况 E_4	0.228	0.188	0.210
				应急处理能力 E_5	0.202	0.180	0.192

续表 3

准则层	主观权重	客观权重	综合权重	指标层	主观权重	客观权重	综合权重
危化品 V	0.144	0.189	0.152	危化品理化特性 V_1	0.163	0.241	0.181
				泄漏爆炸风险等级 V_2	0.119	0.191	0.136
				危化品装载稳定性 V_3	0.251	0.213	0.242
				危化品状态监测 V_4	0.267	0.170	0.245
				运输量 V_5	0.201	0.186	0.198
运输环境 O	0.142	0.175	0.148	道路条件 O_1	0.226	0.227	0.226
				天气与气候因素 O_2	0.279	0.145	0.227
				交通流量密度 O_3	0.205	0.226	0.213
				沿线人口密度 O_4	0.163	0.235	0.191
				敏感区域分布 O_5	0.124	0.166	0.140
管理 L	0.247	0.211	0.240	安全管理制度 L_1	0.186	0.190	0.189
				人员资质审核 L_2	0.170	0.140	0.146
				安全监测监控系统 L_3	0.159	0.178	0.174
				安全投入 L_4	0.140	0.154	0.151
				事故责任追溯机制 L_5	0.176	0.147	0.153
				应急体系构建情况 L_6	0.168	0.192	0.187

对表 3 进行分析,以生理与心理状态 E_3 的权重结果为例,E_3 的主观、客观及综合权重分别为 0.189,0.263,0.223.由此可知,主观权重值因 OWA 算子的专家经验局限而偏小,客观权重值由于熵权法过度依赖数据而偏高,综合权重值通过博弈论折中调和,既保留了专家经验判断,又避免了数据过度干预,使得权重更贴近实际情况.表明博弈论赋权方法不仅综合主客观权重的优势,而且有效避免了单一方法的局限性,修正了单一赋权的偏差,从而提升了指标赋权的科学性和合理性.

3.2　危化品槽罐车道路运输风险值计算

基于研究案例的实际计算需求,由上述后悔理论相关公式计算该企业危化品槽罐车道路运输风险,限于篇幅,以“槽罐车”准则层为例,展示风险值的具体计算步骤.

1)整理专家评分建立原始评分矩阵 $\boldsymbol{Y}_I$:

$$\boldsymbol{Y}_I=\begin{bmatrix}8.3 & 8.5 & 8.0 & 8.6 & 8.2\\ 8.0 & 7.8 & 8.5 & 7.5 & 8.1\\ 8.5 & 8.5 & 8.2 & 7.5 & 8.1\\ 8.7 & 8.8 & 8.5 & 8.9 & 8.6\\ 5.5 & 6.0 & 5.8 & 5.0 & 5.7\\ 6.8 & 6.5 & 7.0 & 6.2 & 6.9\end{bmatrix}. \tag{19}$$

2)确定原始评分矩阵 $\boldsymbol{Y}_I$ 的理想方案 $\boldsymbol{X}_I$:

$$\boldsymbol{X}_I=[8.0\quad 7.5\quad 7.5\quad 8.5\quad 5.0\quad 6.2]^{\mathrm{T}}. \tag{20}$$

3)由式(14)计算原始评分的效用值矩阵 $\boldsymbol{H}_I$:

$$\boldsymbol{H}_I=\begin{bmatrix}6.72 & 6.86 & 6.50 & 6.94 & 6.64\\ 6.50 & 6.35 & 6.86 & 6.13 & 6.57\\ 6.86 & 6.86 & 6.64 & 6.13 & 6.57\\ 7.01 & 7.08 & 6.86 & 7.15 & 6.94\\ 4.64 & 5.02 & 4.87 & 4.26 & 4.79\\ 5.61 & 5.39 & 5.76 & 5.17 & 5.69\end{bmatrix}. \tag{21}$$

4)由式(15)计算后悔-欣喜值矩阵 $\boldsymbol{J}_I$:

$$\boldsymbol{J}_I=\begin{bmatrix}-0.002\,9 & -0.004\,7 & 0.000\,0 & -0.005\,7 & -0.001\,8\\ -0.004\,8 & -0.002\,9 & -0.009\,5 & 0.000\,0 & -0.005\,7\\ -0.009\,5 & -0.009\,5 & -0.006\,7 & 0.000\,0 & -0.005\,7\\ -0.002\,0 & -0.002\,9 & 0.000\,0 & -0.003\,8 & -0.001\,0\\ -0.005\,0 & -0.009\,9 & -0.008\,0 & 0.000\,0 & -0.006\,9\\ -0.005\,7 & -0.002\,9 & -0.007\,7 & 0.000\,0 & -0.006\,8\end{bmatrix}. \tag{22}$$

5)由式(16)计算原始评分的感知效用值矩阵 $\boldsymbol{S}_I$:

$$\boldsymbol{S}_I=\begin{bmatrix}6.71 & 6.86 & 6.50 & 6.93 & 6.64\\ 6.49 & 6.35 & 6.85 & 6.13 & 6.57\\ 6.85 & 6.86 & 6.64 & 6.13 & 6.57\\ 7.01 & 7.08 & 6.86 & 7.15 & 6.93\\ 4.63 & 5.01 & 4.86 & 4.26 & 4.78\\ 5.61 & 5.39 & 5.75 & 5.17 & 5.68\end{bmatrix} \tag{23}$$

6)由式(17)计算得出准则层“槽罐车”风险评估值 T_I 为 6.266.同理,按照上述计算步骤求得准则层“人员”“危化品”“运输环境”和“管理”的风险评估值分别为 5.582,5.235,4.314,6.102.

7)最后由式(18)对准则层“槽罐车”“人员”“危化品”“运输环境”和“管理”的风险评估值进行加权求和得到总风险评估值 T 为 5.636.根据表 2 可知,该企业危化品槽罐车道路运输风险等级为Ⅲ级,与实际评估结果一致.

基于上述评估结果,该企业的危化品槽罐车道路运输风险为中度风险,其中准则层“运输环境”的风险值最低,接近高度风险的阈值;其次是准则层“危化品”,说明二者是两大核心风险源,需要进行重点管控.该企业应强化危化品的安全管理,严格检查槽罐车密封性、紧急切断阀和压力监测系统的有效性,避免泄漏风险.同时,通过安全监测监控系统动态规划路线,避开人口密集区、地质复杂路段及极端天气区域,必要时增设临时防护设施,加强对运输环境风险的控制.

3.3 评估方法对比验证

为进一步验证博弈论-后悔理论用于评估危化品槽罐车道路运输风险的准确性,再利用模糊综合评价法、集对分析法、灰色聚类法、OWA 算子-后悔理论、熵权法-后悔理论、线性组合赋权法-后悔理论这 6 种方法对该实例进行风险评估,结果如表 4 所示.

从表 4 可知,模糊综合评价法、OWA 算子-后悔理论与线性组合赋权法-后悔理论评估的结果为Ⅱ级(低度风险),与实际评估结果Ⅲ级不相符,说明这 3 种方法存在较大误差.博弈论-后悔理论、集对分析法、灰色聚类法及熵权法-后悔理论得出的风险等级为Ⅲ级(中度风险),但集对分析法与熵权法-后悔理论这 2 种方法得到的风险值接近Ⅳ级(高度风险)的阈值,灰色聚类法得到的风险值接近Ⅱ级(低度风险)的阈值,表明这 3 种方法的离中趋势较为明显,在一定程度上不够精确;而博弈论-后悔理论确定的风险值靠近Ⅲ级风险的中段,较为精准,与结果更加吻合.由此可知,博弈论-后悔理论有效解决了危化品槽罐车道路运输风险评估过程中赋权科学性不足的问题,弥补了集对分析法等风险评估方法忽视专家规避后悔心理的缺陷,可以实现动态且准确的危化品槽罐车道路运输风险评估.

表 4 7 种风险评估方法的评估结果

风险评估方法	风险值	风险等级
博弈论-后悔理论	5.636	Ⅲ级
模糊综合评价法	6.485	Ⅱ级
集对分析法	4.362	Ⅲ级
灰色聚类法	5.938	Ⅲ级
OWA 算子-后悔理论	6.897	Ⅱ级
熵权法-后悔理论	4.823	Ⅲ级
线性组合赋权法-后悔理论	6.413	Ⅱ级

4　结论

1)博弈论融合不同赋权方法的优势,平衡了专家经验与数据规律之间的差异性,提升了指标赋权的科学性和合理性;而后悔理论对专家决策时的后悔心理进行考量,量化规避后悔情绪对决策的潜在影响,使风险评估更加符合真实情形.

2)在危化品槽罐车道路运输风险评估中,相较于模糊综合评价法等 6 种评估方法,基于博弈论-后悔理论的风险评估方法得出的风险值和风险等级与实际情况吻合度更高,说明其风险评估结果更加真实、准确,体现了利用博弈论-后悔理论评估危化品槽罐车道路运输风险的合理性与可行性.

参考文献:

[1] 刘勇,李肖,施式亮,等.基于多项 Logistic 的危化品槽罐车火灾类型判别[J].中国安全科学学报,2024,34(1):231-237.

[2] “6·13”温岭槽罐车爆炸事故[EB/OL].(2020-06-13)[2025-03-20]. https://baike.so.com/doc/29779071-31330584.html.

[3] 呼和浩特警方通报:两车相撞液体泄露发生爆燃致 2 死 5 伤[EB/OL].(2023-08-16)[2025-03-20].https://news.cnr.cn/local/dftj/20230816/t20230816_526382615.shtml.

[4] YANG Y L , FAN B F . Risk evaluation of road transportation of dangerous chemicals based on FAHP and fuzzy comprehensive evaluation[J].Chemical Engineering Transactions ,2018,67: 277-282.

[5] CHEN D J, BAI X Y. Quantitative risk analysis of road transportation of hazardous materials in coastal areas[J]. Journal of Infrastructure Intelligence and Resilience, 2024, 3(4): 100124.

[6] 马晓丽,刘禹杰,陆键.城市道路危险货物运输风险评估[J].中国安全科学学报,2018,28(5):179-184.

[7] 周荣义,林金玉,刘勇.危险货物道路运输风险评估的集对模型及应用[J].中国安全科学学报,2019,29(1):173-179.

[8] 贾进章,陈怡诺,柯丁琳.基于模糊集和改进 DS 证据理论的危化品道路运输体系贝叶斯网络风险分析[J].北京化工大学学报(自然科学版),2020,47(1):38-45.

[9] 杨璧帆,周荣义,李丽,等.基于组合赋权-灰色聚类法的液态危化品道路运输风险评价[J].矿业工程研究,2023,38(2):65-72.

[10] 张顺明,叶军.后悔理论述评[J].系统工程,2009,27(2):45-50.

[11] 尹志国,牛发阳,汤辉.基于博弈论和后悔理论的城市洪涝灾害韧性评价:以西安市为例[J].水利水电技术(中英文),2024,55(1):74-87.

[12] 涂圣文,赵振华,邓梦雪,等.基于组合赋权-后悔理论的城市综合管廊运维总体风险评估[J].安全与环境工程,2020,27(6):160-167.

[13] 林志军,李敏,贺珊,等.基于博弈论-贝叶斯网络的煤矿瓦斯爆炸风险评估[J].煤炭学报,2024,49(8):3484-3497.

[14] 周荣义,林金玉,刘勇.危险货物道路运输风险概率模型及应用[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2019,34(1):21-27.

[15] 郑时求,周荣义,杨璧帆,等.危化品槽罐车运输事故关键致因及传递路径研究[J].中国安全科学学报,2023,33(4):172-178.

[16] 鲁义,伍江乐,邵淑珍,等.基于贝叶斯网络的危化品道路运输事故推理模型[J].中国安全科学学报,2022,32(3):174-182.

[17] 王煜,徐泽水.OWA 算子赋权新方法[J].数学的实践与认识,2008,38(3):51-61.

[18] 董兴芝,李平,栾中,等.基于 OWA-差异驱动组合赋权的高速铁路 Wi-Fi 车地通信评价研究[J].铁道运输与经济,2022,44(3):127-133.

[19] 周雪,左忠义,程伟.基于组合赋权云模型的铁路旅客运输安全评价[J].中国安全科学学报,2020,30(增刊 1):158-164.

[20] 盛诞杰,汤瑞,王凯,等.基于熵权-正态云模型的小净距隧道施工风险评估模型[J].安全与环境工程,2024,31(3):89-95.