

doi:10.13582/j.cnki.1674-5876.2023.02.010

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

杨璧帆¹, 周荣义^{1,2*}, 李丽¹, 郑时求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:为解决液态危化品道路运输系统的“贫信息”和“模糊性”问题并确定事故防控重点,提出一种组合赋权-灰色聚类风险评价方法,并引入事故影响系数。该方法首先依据液态危化品风险特性和道路运输特点构建评价指标体系,利用层次分析法和熵权法组合确定指标权重。其次采用灰色聚类法处理评价系统信息模糊、不完整问题,通过构造白化权函数对各指标进行聚类分析,确定风险等级。然后计算风险指标的事故影响系数并排序,得到事故防控重点。最后,利用该方法对某企业的甲醇运输风险进行评价。结果表明:该企业的运输风险较小,但“违规驾驶”“液态危化品特性”和“驾驶员安全意识”这3项风险指标对事故的影响程度较大,应对其进行重点防控,这一结果与企业的实际情况相吻合,说明本方法的正确性和可行性,所提方法可为液态危化品道路运输风险评价提供一种新思路。

关键词: 液态危化品道路运输; 灰色聚类法; 组合赋权法; 风险评价

中图分类号: X951 文献标志码: A 文章编号: 1672-9102(2023)02-0065-08

Risk Assessment of Road Transportation of Liquid Hazardous Chemicals Based on Combination Weighting and Grey Clustering Method

YANG Bifan¹, ZHOU Rongyi^{1,2}, LI Li¹, ZHENG Shiqiu¹

(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: In order to solve the problem of poor information and ambiguity in the road transportation system of hazardous liquid chemicals and determine the focus of accident prevention and control, a combined weighting-gray clustering risk evaluation method is proposed, and the accident influence coefficient is introduced. The method firstly constructs an evaluation index system based on the risk characteristics of liquid hazardous chemicals and road transportation characteristics, and uses the combination of AHP and entropy weight method to determine the index weight. Then the gray clustering method is used to deal with the fuzzy and incomplete information of the evaluation system, and the risk level is determined by clustering analysis of each index by constructing a whitening weight function. Then, the accident impact coefficient of risk indicators is calculated and sorted, and the key points of accident prevention and control are obtained. Finally, this method is used to evaluate the methanol transportation risk of an enterprise. The results show that the transportation risk of this enterprise is small, but the three risks of violation of driving, characteristics of liquid hazardous chemicals and driver's safety awareness have a greater impact on the accident, and it should be focused on prevention and

收稿日期: 2022-10-05

基金项目: 湖南省教育厅资助重点科研项目(20A192); 湖南省交通运输厅科技进步与创新计划资助项目(201943)

* 通信作者, E-mail: jackyzry@163.com

control. This result is consistent with the actual situation of the enterprise, which verifies the correctness and feasibility of this method, and provides a new idea for the risk assessment of road transportation of liquid hazardous chemicals.

Keywords: road transportation of liquid hazardous chemicals; grey clustering method; combined weighting method; risk evaluation

危险化学品(简称危化品)作为制成品或添加剂在化工企业中被广泛使用,随着化工的发展和扩大,其需求量和运输总量呈递增趋势.据统计,我国95%以上的危化品面临异地运输问题^[1],其中超80%采用道路运输且运输品形态主要为液态.又因液态危化品本身具有易燃、易爆、敏感度高特性,极易造成燃烧、泄漏、中毒等事故,且灾害后果严重.据2013年—2018年罐车道路运输危化品事故类别(固、液、气)统计显示,液态危化品事故比例高达87.6%^[2].如2014年7月19日,湖南邵阳境内沪昆高速公路发生液态乙醇燃爆事故,造成54人死亡、6人受伤^[3];2017年5月23日,河北张石高速发生一起致13人死亡、3人重伤的液态氯酸钠运输车辆爆炸事故^[4].因此,如何有效预防和控制液态危险品道路运输事故成为亟须解决的一项重要课题.

风险评价被认为是预防和控制事故的重要手段,通过评价,可以获得系统的危险类型和危害程度,识别系统中的薄弱环节和关键事故影响因子,并采取针对性措施,实现有效应对.为此,诸多学者在此方面展开了一系列探索.如魏航等^[5]提出“基元路段”概念,建立风险度量模型;楚云傲等^[6]对散装液态危化品道路运输事故进行分析,并基于模糊综合评价法建立散装液态危化品道路运输评价模型;周沈楠等^[7]利用PHAST软件对危化品道路运输进行定量风险评价;张建莉^[8]采用灰色聚类法对液态危险化学品企业安全管理进行危险度评价研究;梁启超^[9]采用风险度量模型将风险量化为危化品事故泄漏率与事故后果对液态危化品道路运输进行风险评价.这些成果对预防和控制液态危险品道路运输事故起到重要作用,但忽略了液态危化品道路运输系统具有“贫信息”和“模糊性”特征,容易出现评价数据不准确现象,从而导致评价结果缺乏精确性和客观性.且现有研究在评价过程中没有对风险指标进行深入分析,无法为液态危化品道路运输提出针对性措施,以致评价结果指导性不强.

鉴于此,本文利用灰色聚类法具有同时处理模糊信息和贫信息不确定性系统的优势,以及事故影响系数可以直观反映风险指标实际重要程度的特征,将二者有机结合,通过使用组合赋权-灰色聚类法解决液态危化品道路运输系统“贫信息”和“模糊性”问题,然后依据事故影响系数的大小确定防控重点,使得评价结果更准确、更具有针对性,增强评估对事故预防的实际指导意义.最后通过实证研究,验证该方法的可行性.

1 液态危化品道路运输风险评价指标体系

轨迹交叉事故致因理论表示:事故的发生是多种关联事物相继发生的结果,即人的不安全行为和物的不安全状态在同一时间、同一空间相遇导致事故发生^[10].液态危化品道路运输涉及的风险因素较多,事故后果严重、影响范围较大,从“人的不安全行为”和“物的不安全状态”两个层面入手,将液态危化品道路运输事故归因于人员风险、液态危化品风险、车辆设备风险、环境风险和管理风险相互作用的结果.为准确、系统地评估液态危化品道路运输风险,在对事故致因统计分析的基础上,依据《中华人民共和国道路运输条例》《危险化学品安全管理条例》等相关法律法规,建立液态危化品道路运输风险评价指标体系,如图1所示.

2 液态危化品道路运输风险评价过程

利用组合赋权法-灰色聚类法进行液态危化品道路运输风险评价,步骤如下:首先构建液态危化品道路运输评价指标体系;然后采用主、客观结合的组合赋权法确定指标权重,灰色聚类法确定风险等级;最后,通过计算事故影响系数对各风险指标的危险度排序.具体步骤如图2所示.

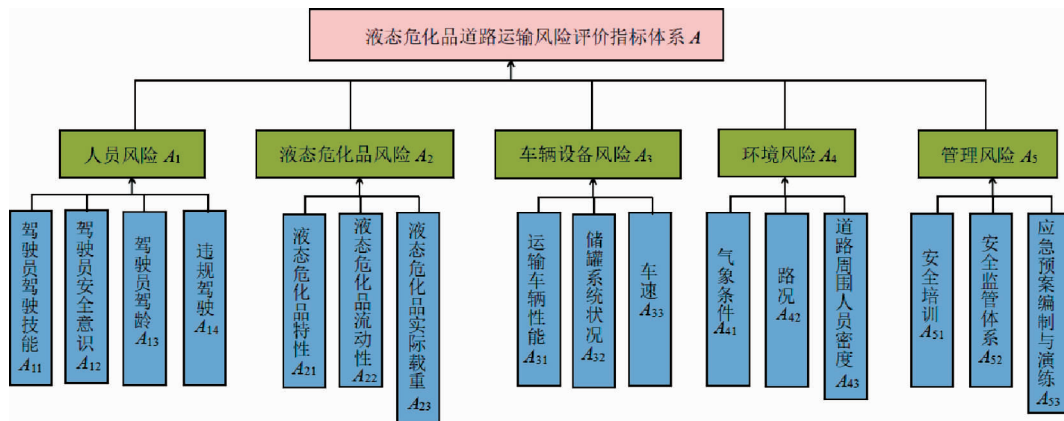


图 1 液态危化品道路运输风险评价指标体系

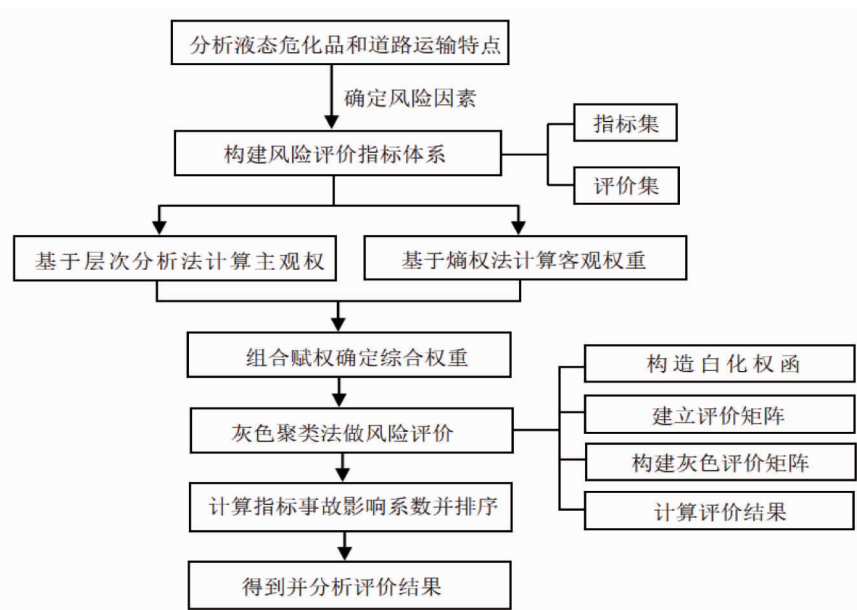


图 2 液态危化品道路风险评价步骤

2.1 计算指标权重

组合赋权法是一种将层次分析法和熵权法相结合的主、客观权重计算方法,该方法克服了熵权法由于忽略指标本身的重要程度造成指标权数偏差较大的不足,削弱了专家主观意志带来的不良影响,二者互补不足,提高了指标权重的客观性和可信度^[11].

2.1.1 熵权法计算客观权重

熵权法是根据信息熵的大小来确定指标权重的方法,熵值越小,权重越大,且该方法具有精确度高、客观性较强的特点^[12].采用熵权法计算指标权重的步骤包括^[13]:(1)对各指标评分值进行预处理;(2)计算评价指标熵值;(3)通过熵值计算指标客观权重.

2.1.2 层次分析法计算主观权重

层次分析法是建立在系统理论基础,对有多个方案、多个指标的系统进行层次化分析和结构化决策的方法^[14].该方法是对各层两指标之间的重要度进行比较,构造评价矩阵,最后得出反映各指标相对重要性的指标权重^[15].采用层次分析法计算指标权重的步骤包括^[16]:(1)建立层次分析结构;(2)构造判断矩阵;(3)一致性检验,当 $CR < 0.1$ 时,判断矩阵满足一致性检验要求;(4)计算指标主观权重.

2.1.3 组合赋权法计算权重

假设 μ_i 是第 i 个准则层评价指标的权重, ω_i 和 ν_i 分别表示层次分析法和熵权法确定的准则层指标权重,则 μ_i 可用 ω_i 和 ν_i 线性表示为

$$\mu_i = \frac{\sqrt{\omega_i \nu_i}}{\sum_{i=1}^m \sqrt{\omega_i \nu_i}} \quad (1)$$

式中: i 为准则层指标个数, $i = 1, 2, \dots, m$.

2.2 液态危化品道路运输灰色聚类评价

灰色聚类法是由邓聚龙教授依据灰色系统理论提出的一种方法,它将风险信息不完整、表述不清楚的因素根据灰色关联矩阵或灰数的白化权函数进行定义分类.该方法可对同属性指标进行分类,简化复杂系统,也可利用现有信息对指标进行聚类评价,且对评价指标已知信息的要求较低,适用于小样本、数据模糊性较高的不确定性系统^[17].而液态危化品道路运输系统风险信息具有典型的“模糊性”和“贫信息”的特点,与灰色聚类法适用背景十分契合.因此,利用灰色聚类法评估液态危化品道路运输系统风险,具有很好的科学性和可行性.

2.2.1 确定评价等级

评价等级是对安全程度的科学划分,等级划分有多种形式,结合液态危化品道路运输风险特征,同时借鉴预先危险性分析中风险等级划分以及参考文献^[18],将液态危化品道路运输风险等级划分为5个等级.具体划分如表1所示.

表1 液态危化品道路运输风险等级划分

风险等级	风险评分值	风险含义
风险极小	[8,10]	风险极小,一般不会发生事故
风险较小	[6,8)	风险较小,可能发生后果轻微事故
一般	[4,6)	临界状态,可能发生事故,暂时不会造成损失
风险较大	[2,4)	风险较大,发生较大后果事故,需采取防范性措施
风险极大	[0,2)	风险极大,发生重大后果事故,需立即采取措施加以消除

2.2.2 构造灰色白化权函数

灰色白化权函数反映被评价对象隶属于某个灰类的程度.根据王化中等^[19]提出的改进的中心点三角白化权函数灰评估方法,结合上述风险等级的划分,取阈值中心点向量为 $V = (9, 7, 5, 3, 1)$,各灰类由1, 2, 3, 4, 5表示,建立液态危化品道路运输风险评价的灰色白化权函数如表2所示.

表2 灰色白化权函数分类

灰类 e	阈值	白化权函数 $f_e(d_{ijk})$
$e = 1$	[0, 9, ∞]	$f_1(d_{ijk}) = \begin{cases} \frac{d_{ijk}}{9}, d_{ijk} \in [0, 9]; \\ 1, d_{ijk} \in [9, \infty]; \\ 0, d_{ijk} \notin [0, \infty]. \end{cases}$
$e = 2$	[0, 7, 14]	$f_2(d_{ijk}) = \begin{cases} \frac{d_{ijk}}{7}, d_{ijk} \in [0, 7]; \\ 2 - \frac{d_{ijk}}{7}, d_{ijk} \in [7, 14]; \\ 0, d_{ijk} \notin [0, 14]. \end{cases}$
$e = 3$	[0, 5, 10]	$f_3(d_{ijk}) = \begin{cases} \frac{d_{ijk}}{5}, d_{ijk} \in [0, 5]; \\ 2 - \frac{d_{ijk}}{5}, d_{ijk} \in [5, 10]; \\ 0, d_{ijk} \notin [0, 10]. \end{cases}$
$e = 4$	[0, 3, 6]	$f_4(d_{ijk}) = \begin{cases} \frac{d_{ijk}}{3}, d_{ijk} \in [0, 3]; \\ 2 - \frac{d_{ijk}}{3}, d_{ijk} \in [3, 6]; \\ 0, d_{ijk} \notin [0, 6]. \end{cases}$
$e = 5$	[0, 1, 2]	$f_5(d_{ijk}) = \begin{cases} 1, d_{ijk} \in [0, 1]; \\ 2 - d_{ijk}, d_{ijk} \in [1, 2]; \\ 0, d_{ijk} \notin [0, 2]. \end{cases}$

式中: d_{ijk} 为专家 k 在指标 i 下对二级指标 j 的打分, $k = 1, 2, \dots, r$; $f_e(d_{ijk})$ 为在不同灰类中二级指标的白化权函数值; e 为灰类, $e = 1, 2, 3, 4, 5$.

2.2.3 建立评价矩阵

样本矩阵是由危化品道路运输企业管理人员、交通运输部门监管人员、科研院所和高校教授等专业人员(共 r 位)对指标打分所形成的数据矩阵.通过德尔菲法汇总各位专家对指标的评分,并经多次信息收集与数据反馈,建立样本矩阵 D_i .

2.2.4 构建灰色聚类权矩阵

根据灰色白化权函数,求出各二级指标 A_{ij} 在灰类 e 中的灰色评价系数 n_{ije} , 其计算公式为

$$n_{ije} = \sum_{k=1}^r f_e(d_{ijk}). \quad (2)$$

由上述各二级指标在 5 个灰类中的评价系数求得总聚类系数 n_{ij} , 其计算公式为

$$n_{ij} = \sum_{e=1}^5 n_{ije}. \quad (3)$$

根据灰色评价系数和总聚类系数计算出灰色权值 r_{ije} , 并构建灰色聚类系数矩阵 R_i .

$$r_{ije} = \frac{n_{ije}}{n_{ij}}; \quad (4)$$

$$R_i = \begin{bmatrix} r_{i11} & r_{i12} & r_{i13} & r_{i14} & r_{i15} \\ r_{i21} & r_{i22} & r_{i23} & r_{i24} & r_{i25} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{ij1} & r_{ij2} & r_{ij3} & r_{ij4} & r_{ij5} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

2.2.5 确定风险等级

将灰色系数矩阵 R_i 与对应二级指标权重相乘,得到二级指标评价矩阵 Z_i , 并按照同样方法得到一级评价指标矩阵 Z .根据 $M = Z\mu_i$, 得到灰色聚类评价矩阵 M , 由式 $P = MV^T$, 计算液态危化品道路运输风险得分,从而确定风险等级.

2.2.6 确定事故防控重点

为确定事故预防的主要风险,引入事故影响系数,通过其可反映各风险指标对事故的影响程度,进而得到事故防控重点^[20].其计算方法如式(6)所示.

$$\beta_{ij} = \mu_i \mu_{ij} (10 - d). \quad (6)$$

式中: β_{ij} 为风险指标影响系数; μ_i 为一级指标权重; μ_{ij} 为二级指标权重; d 为指标平均得分.

3 实例应用

以重庆市某危化品运输公司为例,该公司主要运输产品为甲醇、液氯、油类等化工品,将该公司道路运输液态甲醇业务作为评价对象.综合考虑运输企业的基本概况、运输路径以及甲醇特性等信息,利用本文方法进行风险分析和评价.

3.1 确定评价指标权重

按照上述层次分析法和熵权法的计算步骤确定主、客观权重,然后通过式(1)计算得到评价指标组合权重,如表 3 所示.

表 3 组合赋权法指标权重

一级指标 A_i	权重 μ_i	二级指标 A_{ij}	权重 μ_{ij}
A_1	0.396	$(A_{11}, A_{12}, A_{13}, A_{14})$	$(0.191, 0.263, 0.079, 0.468)$
A_2	0.275	(A_{21}, A_{22}, A_{23})	$(0.604, 0.153, 0.270)$
A_3	0.147	(A_{31}, A_{32}, A_{33})	$(0.407, 0.355, 0.235)$
A_4	0.098	(A_{41}, A_{42}, A_{43})	$(0.376, 0.364, 0.260)$
A_5	0.085	(A_{51}, A_{52}, A_{53})	$(0.627, 0.141, 0.233)$

3.2 灰色聚类评价

3.2.1 计算甲醇运输风险得分

按照上述液态危化品道路运输风险评价过程对该企业的甲醇运输进行风险评价,确定风险等级.以“液态危化品”准则层为例,根据专家评分构建样本矩阵 D_2 .

$$D_2 = \begin{bmatrix} 2.5 & 5.0 & 6.5 \\ 3.0 & 5.5 & 6.0 \\ 2.0 & 6.5 & 5.0 \\ 2.0 & 6.0 & 5.5 \\ 2.5 & 6.0 & 7.0 \end{bmatrix}.$$

依据式(2)~式(4)计算得到灰色权值,构建“液态危化品”准则层权矩阵 R_2 .

$$R_2 = \begin{bmatrix} 0.146 & 0.187 & 0.231 & 0.437 & 0 \\ 0.267 & 0.343 & 0.348 & 0.041 & 0 \\ 0.275 & 0.355 & 0.330 & 0.041 & 0 \end{bmatrix}.$$

同理,求得“人员”“车辆设备”“环境”“管理”准则层的权矩阵 R_1, R_3, R_4, R_5 , 并根据 $Z_i = \mu_{ij}R_i$, 得到二级指标评价矩阵 Z_i , 经合成后得到一级评价指标矩阵 Z .

$$Z = \sum_{i=1}^5 R_i \mu_i = \begin{bmatrix} 0.211 & 0.270 & 0.296 & 0.223 & 0 \\ 0.203 & 0.260 & 0.282 & 0.281 & 0 \\ 0.310 & 0.387 & 0.289 & 0.009 & 0 \\ 0.324 & 0.391 & 0.298 & 0.004 & 0 \\ 0.277 & 0.348 & 0.336 & 0.041 & 0 \end{bmatrix}.$$

计算出灰色聚类评价矩阵 M .

$$M = Z\mu_i = [0.240 \quad 0.303 \quad 0.294 \quad 0.171 \quad 0].$$

由式 $P = MV^T$, 得到本次液态甲醇道路运输的风险得分 P .

$$P = MV^T = [0.240 \quad 0.303 \quad 0.294 \quad 0.171 \quad 0] [9 \quad 7 \quad 5 \quad 3 \quad 1]^T = 6.265.$$

3.2.2 计算风险指标事故影响系数

依据式(6),可计算各指标的事故影响系数,以“液态危化品特性 A_{21} ”为例,求得

$$\beta_{21} = 0.275 \times 0.604 \times (10 - 2.4) = 1.262.$$

同理,得到所有指标对应事故影响系数如表4所示.

表4 指标事故影响系数

指标 A_{ij}	事故影响系数 β_{ij}	指标 A_{ij}	事故影响系数 β_{ij}
A_{11}	0.273	A_{32}	0.146
A_{12}	0.510	A_{33}	0.131
A_{13}	0.094	A_{41}	0.132
A_{14}	1.373	A_{42}	0.110
A_{21}	1.262	A_{43}	0.099
A_{22}	0.176	A_{51}	0.228
A_{23}	0.297	A_{52}	0.035
A_{31}	0.221	A_{53}	0.080

依照上述事故影响系数计算结果,对其进行排序,结果如图3所示.

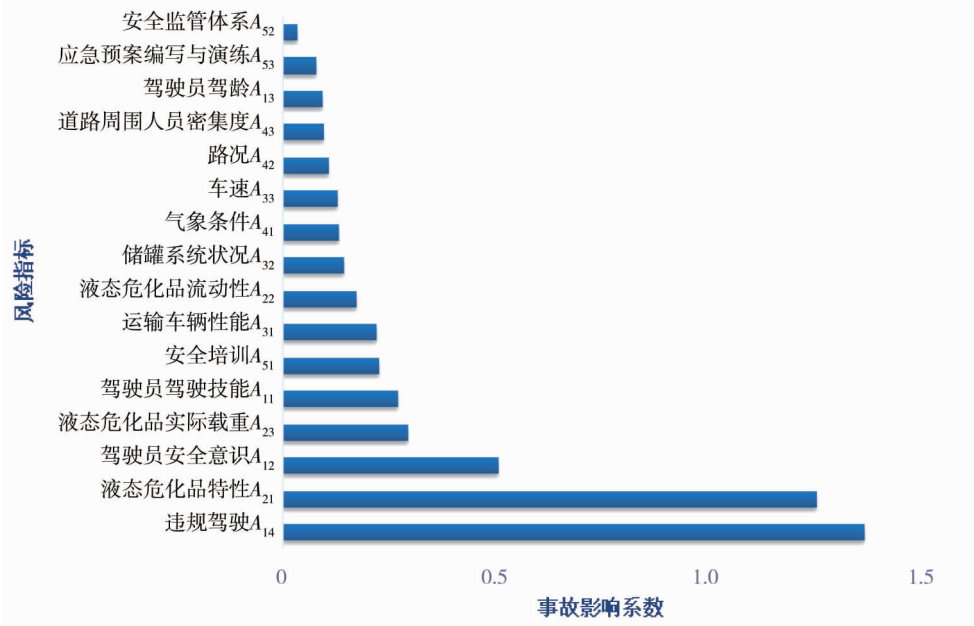


图3 事故影响系数排序

3.3 结果分析

评价结果表明,该公司液态甲醇的运输风险评价得分为6.265,据表3可知该企业液态甲醇运输属于“风险较小”等级,说明该公司各项风险指标的安全防控工作总体做得较好,发生事故的概率较低.但据图3事故影响系数排序可以看出,排在前三位的“违规驾驶”“液态危化品特性”和“驾驶员安全意识”的事故影响系数远超其他因素好几倍,说明这3项对甲醇运输事故的发生起着重要的支配作用.因此,该公司应把这3个风险指标作为液态甲醇道路运输事故防控的重中之重,加强对司机、押运人员的安全培训,通过车辆监控和探测仪器实现对运输人员的监管和运输品状态的监测,及时发现并消除人的不安全行为和物的不安全状态带来的负面影响,最大限度确保运输过程的安全性.

4 结论

1)在液态危化品道路运输风险评价中,应将系统的“贫信息”和“模糊性”问题充分考虑在内,这样才能符合运输系统风险的显著性特征,保证风险评价方向不偏移、结果不失真.

2)灰色聚类法是一种能解决液态危化品道路运输系统“贫信息”和“模糊性”问题的有效方法,其评价结果与实际情况高度吻合,将组合赋权-灰色聚类法的风险评价方法应用于液态危化品道路运输系统是科学、合理和可行的.

3)将事故影响系数引入液态危化品道路运输风险评价,可以得到风险指标对事故影响程度的排序,从而为事故预防和控制提供针对性措施,保证风险评价更全面和更具有实际指导意义,便于为风险管理者提供科学和可靠的决策依据.

参考文献:

- [1] 贺政纲,房杰,张超.时变条件下基于事故综合特征的危险品运输人口风险评估模型研究[J].安全与环境工程,2017,24(4):168-172.
- [2] 曹建,施式亮,鲁义,等.2013—2018年罐车公路运输危化品事故分析[J].中国安全科学学报,2020,30(2):119-126.
- [3] 林金玉,周荣义,刘解语,等.危化品道路运输事故应急救援中心选址模型研究[J].安全,2020,41(5):20-25.
- [4] 王凌睿,周荣义,李丽,等.基于多事故模式的有毒易燃气体道路运输泄漏事故应急疏散范围研究[J].工业安全与环保,

2022,48(1):10-14.

- [5] 魏航,李军,王浩.有害物品运输的总风险分析[J].中国安全科学学报,2005(12):97-101.
- [6] 楚云傲,李荷华.基于模糊综合评价法的散装液态化学品道路运输风险研究[J].物流技术,2017,36(8):83-86.
- [7] 周沈楠,王美琴,张佳璐,等.PHAST在危化品道路运输定量风险评价中的应用研究[J].广州化工,2015,43(11):248-250.
- [8] 张建莉.公路运输液态化学品风险辨识及危险度评价研究[D].西安:长安大学,2006.
- [9] 梁启超.液态危险化学品道路运输选线研究[D].北京:北京交通大学,2010.
- [10] 赵江平,刘小龙,东淑,等.STAMP模型在危化品道路运输事故分析中的应用研究[J].中国安全生产科学技术,2020,16(5):160-165.
- [11] 范丽娜,欧中洪,陈忠杰,等.基于组合赋权与模糊灰色聚类的科技服务质量评估模型[J].中国基础科学,2020,22(6):26-33.
- [12] CHENG Q Y. Structure entropy weight method to confirm the weight of evaluating index[J]. Systems Engineering-Theory & Practice,2010,30(7):1225-1228.
- [13] 刘锴,赵宁宁,于浩波.基于熵权法和灰色聚类模型的航空公司安全保障能力评估[J].科技风,2021(23):154-155.
- [14] JAMES G, Dolan. Shared decision-making-transferring research into practice: The Analytic Hierarchy Process (AHP)[J]. Patient Education and Counseling,2008,73(3):418-425.
- [15] VAIDYA O S, KUMAR S. Analytic hierarchy process: An overview of applications[J]. European Journal of Operational Research,2006,169(1):1-29.
- [16] 任峰涛,胡卓华,康晓光,等.基于层次分析的化工机械运行安全评价[J].粘接,2022,49(4):93-97.
- [17] 王丽园,白家安,张存保,等.基于灰色聚类法的MaaS出行服务水平评价研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2022,46(1):33-37.
- [18] 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.
- [19] 王化中,强凤娇,贺宝成.基于改进的中心点三角白化权函数灰评估新方法[J].统计与决策,2014(8):69-72.
- [20] 李桂炎.基于灰色聚类分析的乡村建设工程施工安全改进优先序研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021.