

基于灰色聚类的Y化工企业安全生产风险管理研究

王孝熙

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2026年2月19日; 录用日期: 2026年3月12日; 发布日期: 2026年3月18日

摘要

在全球产业格局深度调整与国内化工行业向高质量发展转型的背景下, 把安全生产作为保障产业持续稳定运行的核心底线, 其系统性风险管控已成为行业发展的关键议题。橡胶硫化促进剂作为橡胶工业不可或缺的核心助剂, 其生产该产品的化工企业的安全风险具有隐蔽性、累积性与连锁性等典型特征, 传统安全管理模式已难以适配其精细化管控需求, 需构建科学、高效的全流程风险管理体系。本文以特定橡胶硫化促进剂生产企业为研究对象, 构建了“风险识别-风险评估”的全流程风险管理框架。采用文献搜集法与专家访谈法, 从人的因素、物的因素、环境因素、管理因素、技术因素五大维度, 系统识别出18项关键安全生产风险指标, 形成全面覆盖企业生产运营各环节的风险清单。在风险评估阶段, 创新融合ANP法与CRITIC法确定指标综合权重——ANP法充分吸纳专家经验以体现主观判断, CRITIC法基于数据特性规避人为误差以保证客观公正; 再通过灰色聚类法将风险划分为较低、低、中、重大、巨大五个等级, 明确各风险的优先级排序。本文构建的风险评价体系与管控策略, 不仅能帮助Y化工企业提升抗风险能力, 也为同类橡胶硫化促进剂生产企业的安全生产风险管理提供了可借鉴的实践模板, 丰富了精细化工企业安全风险研究的理论与应用成果。

关键词

化工企业, 安全生产, 灰色聚类, ANP法, CRITIC法

Research on Safety Production Risk Management of Y Chemical Enterprise Based on Grey Clustering

Xiaoxi Wang

School of Management, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: February 19, 2026; accepted: March 12, 2026; published: March 18, 2026

Abstract

Against the backdrop of profound adjustments in the global industrial landscape and the transformation of the domestic chemical industry toward high-quality development, safety in production serves as the core bottom line for ensuring the sustained and stable operation of the industry, and its systematic risk control has become a key issue for industrial development. As an indispensable core additive in the rubber industry, rubber vulcanization accelerators are produced by chemical enterprises whose safety risks are characterized by concealment, accumulation, and cascading effects. Traditional safety management models can hardly meet the refined control requirements, necessitating the construction of a scientific and efficient full-process risk management system. This paper takes a specific rubber vulcanization accelerator manufacturing enterprise as the research object and constructs a full-process risk management framework of “risk identification-risk assessment”. Using the methods of literature collection and expert interviews, 18 key safety production risk indicators are systematically identified from five dimensions: human factors, material factors, environmental factors, management factors, and technical factors, forming a risk list that comprehensively covers all links of the enterprise’s production and operation. In the risk assessment stage, the ANP method and the CRITIC method are innovatively integrated to determine the comprehensive weights of indicators—the ANP method fully absorbs expert experience to reflect subjective judgments, while the CRITIC method avoids human errors based on data characteristics to ensure objectivity and fairness; then, the grey clustering method is adopted to classify risks into five levels: lower, low, medium, major, and catastrophic, clarifying the priority ranking of each risk. The risk evaluation system and control strategy constructed in this paper can not only help Y Chemical Enterprise enhance its risk resistance capacity but also provide a practical template for safety production risk management of similar rubber vulcanization accelerator manufacturing enterprises, enriching the theoretical and applied achievements of safety risk research in fine chemical enterprises.

Keywords

Chemical Enterprise, Safe Production, Grey Clustering, Analytic Network Process (ANP), CRITIC Method

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

当前国内外针对化工企业安全风险的研究已取得一定成果，但聚焦橡胶硫化促进剂这类精细化工产品生产企业的专项研究相对匮乏，现有评价方法或存在量化程度不足、操作复杂等局限。基于此，本文以 Y 化工企业为研究对象，构建“风险识别 - 风险评估”全流程风险管理框架，整合 ANP 法、CRITIC 法及灰色聚类法等多种技术方法，系统识别关键风险指标、科学评估风险等级，其研究成果不仅能为 Y 化工企业提升抗风险能力提供实践支撑，也可为同类企业安全生产风险管理提供可借鉴的风险等级，丰富精细化工企业安全风险研究的理论与应用成果。

2. 化工企业安全生产风险的特点

安全生产风险主要是指企业在生产经营的一系列活动中，因为操作人员的操作不当、设备的故障、管理

体系中的缺陷、室内作业环境与自然环境变化等一系列不确定的相关因素，导致其发生了安全生产事故的频率以及产生事故的严重程度的组合。其是一个关乎个体生命安全的重要问题，它对企业的生产效率与经济效益至关重要，受到了学术界的重要关注[1]。化工企业在其安全生产的过程中风险与其他行业的风险相比具有隐蔽性、累积性、突发性、连锁性的四大核心特征，需要经过系统的识别与动态管控来减少其风险。

(1) 隐蔽性。风险源较多地存在于相对封闭的系统内或者设备里面，比较难于用眼睛直接观测，需要去依赖于专业的设备去观测，比较容易产生风险潜伏与突发暴露的隐患。

(2) 积累性。风险随着时间的变化而逐步产生累积，比如：其设备会随着时间的增加而加剧腐蚀的程度、危险的化学品泄漏量会随泄露时间的延长而增加，当其超过阈值时，会刹那间转变为事故。

(3) 突发性。其是指风险因素引发的安全事故往往呈现“无明显前兆、短时间内剧烈爆发”的特征，其本质是化工生产系统中“风险能量积累至临界状态后的快速释放”。化工生产涉及高温、高压、易燃易爆及有毒有害介质，系统内部的风险因素(如设备微泄漏、介质局部富集、反应温度波动)通常处于动态变化中，且多数情况下处于“亚临界”的潜伏状态——由于化工系统的复杂性与耦合性，这些潜伏的风险因素难以通过常规巡检完全捕捉，其演化过程缺乏直观的、可提前预警的显性征兆。

(4) 连锁性。是指由于化工企业生产过程中的某一个初始安全隐患或者某一局部事故，通过物料或者设备系统的关联传导导致的一连串次生事故发生，形成“事故链”的特性。

(5) 危害性。风险后果具有人员伤亡、财产损失、环境破坏的三重危害[2]。比如有毒物质的泄漏就会造成人员可能由于未及时防护导致窒息风险；导致企业可能直接全线发生停产与高额的人员赔偿和高额的环境修复费用；会使土壤的微生物结构造成破坏。

3. Y 化工企业安全生产风险识别

针对化工企业安全事故的成因进行全面而有效的分析后，其成因都可以用生产管理中常用的 4M1E 的五大因素所产生的风险(其分别为人员因素风险、材料因素风险、环境因素风险、设备因素风险、技术因素风险)并且结合 GB/T13861-2022 中生产过程危险和有害因素分类(其将生产过程危险和有害因素分为四种，分别为人的因素、物的因素、环境因素、管理因素)进行有效归纳与总结，最终将化工企业安全生产风险因素划分为五类因素(分别为人的因素、物的因素、环境因素、管理因素、技术因素)。

通过对表 1 所有因素进行归纳总结，合并一些重复的词(比如：将操作失误与违法操作合并为操作

Table 1. Statistics table of factors partially identified from the literature

表 1. 部分基于文献识别的因素统计表

序号	作者或案例	安全生产风险因素
1	郭中华[3]	组织管理不完善、安全知识不足、操作技能培训不足、极端天气、生产材料管理知识缺乏、企业监管漏洞、政府监管漏洞、仓库通风不良、设备失效、工艺变更、未进行安全检查
2	周欢[4]	设备质量低、材料质量低、工作人员违法操作、专业防护措施不到位、专业工具不到位、缺乏健全的管理制度、成本制约、资金制约
3	李鸿婷[5]	安全意识淡薄、培训缺失、操作失误、设备老化、维护不当、安全防护不足、设计缺陷、作业环境识别不足、环境条件恶劣、安全管理体系缺失、监督执行不足、操作规程不健全、安全规程不健全
4	张康[6]	化学材料储存不当、设备陈旧及老化、主管部门监督不严、管理人员管理意识淡薄、设备保养不及时、检验机构不健全
5	史庆利[7]	缺失安全观念、安全生产检查形式主义、检查人员水平不同、操作失误、违规指挥
6	陈全[8]	恶劣天气、生产场地环境不良、安全意识淡薄、监督检查不到位、缺少防护用具、生产资质不达标、未按规定检修、法规不严密、缺乏经验

不当); 去除一些原因比较重复的词(比如: 没有安全生产意识和安全意识淡薄中删去没有安全意识)等一系列操作。最终的结果如下所示。

人的因素: 人的因素主要是用来指一线的职工们的安全生产行为, 其由操作不当、安全意识淡薄、人员资质存在不足、没有合规佩戴安全防护用品、缺乏安全的知识与技能组成。其操作不当主要是指由于作业人员因为未能按照相关标准等原因, 对于设备、物料等进行了错误操作。

物的因素: 其主要是围绕企业在其生产过程中所需用到的设备及其物资来展开。其由设备维护与检修不到位、物质有害因素、设备故障、设备不符合标准要求组成。物质有害因素是指企业生产过程中可能对人体或者环境或者设备造成破坏的物质及其相关特性。

环境因素: 主要指作业的环境, 其由室内作业环境差以及自然环境差组成。室内作业环境差主要是指化工企业的厂房或者车间等室内作业区域, 由于环境参数不达标等原因造成的直接或者间接诱发安全生产事故的状态(其中较为常见的是密闭空间)。而自然环境差主要是指外部环境条件恶劣, 直接影响人员作业安全或设备运行等(如: 高温、暴雨等极端天气)。

管理因素: 安全培训不充分、监管不到位、责任主体落实不到位、规章制度不完善、安全投入不足、应急预案及相关演练不到位、组织结构不良。

技术因素: 主要指操作规程不完善、生产工艺中风险辨识不足、没有充分技术交底。

最终通过使用专家访谈法对一线人员资质存在不足、设备不符合标准要求、组织结构存在不足、管理人员资质存在不足因素进行了剔除, 给出的具有代表性的专家意见如下所示:

Y 化工企业的某一线管理人员指出: 剔除其中一线人员资质存在不足的企业专家理由为对于场外运输危险化学品的专业人员委托拥有三证的专业企业进行委托运输, 并且危险化学品的运输人员、押运人员均取得上岗资格证书; 其他特种作业人员均取得相应资格证书。

GY 设计院有限公司工艺专业的某负责人指出: 剔除其中设备不符合标准(R24)要求的企业专家理由为在役化工装置都通过正规设计; 未使用淘汰落后的相关安全技术的设备; 特种设备办理使用登记证书并检验合格。

Y 化工企业某一线管理人员指出: 剔除管理人员资质存在不足的理由为专职安全管理人员符合学历与专业要求; 涉及“两重点一重大”装置的生产、设备、工艺的专业管理人员具有相应专业及学历要求; 企业按要求配备注册安全工程师; 企业的主要负责人和安全生产管理人员依法考核合格; 装卸 Y 企业的危险化学品的相关管理人员取得资格证书。

Y 化工企业某副总经理指出: 剔除组织结构存在不足风险的专家理由为根据中华人民共和国安全生产法的相关规定 Y 化工企业已建立安全生产管理机构以及建立合理的结构对各个部分进行有效管理, 并且根据自治区安全总监制度的规定(危险化学品的高危企业以及从业人员 300 人及其以上的企业应设立安全总监)已设安全总监。

4. Y 化工安全生产风险评估

4.1. ANP 模型构建

(1) 构建网络结构

为了确认影响 Y 化工企业安全生产风险的五个一级指标组成的元素集与 18 个二级指标元素之间的关联性, 本文采用对 13 位相关背景的专家发放问卷, 每个专家对各个影响关系的值填 1 或 0, 其中 1 代表行的风险因素对列的风险因素具有影响关系, 而 0 则表示行的风险因素对列的风险因素不具有影响关系。当每个行的风险因素对应列的风险因素的 13 位专家的累积总和大于或等于 7 时, 则判断行的风险因素影响列的风险因素并将其在表中记为 1, 经过统计得到各个风险因素之间的影响关系, 完整模型图如图 1 所示。

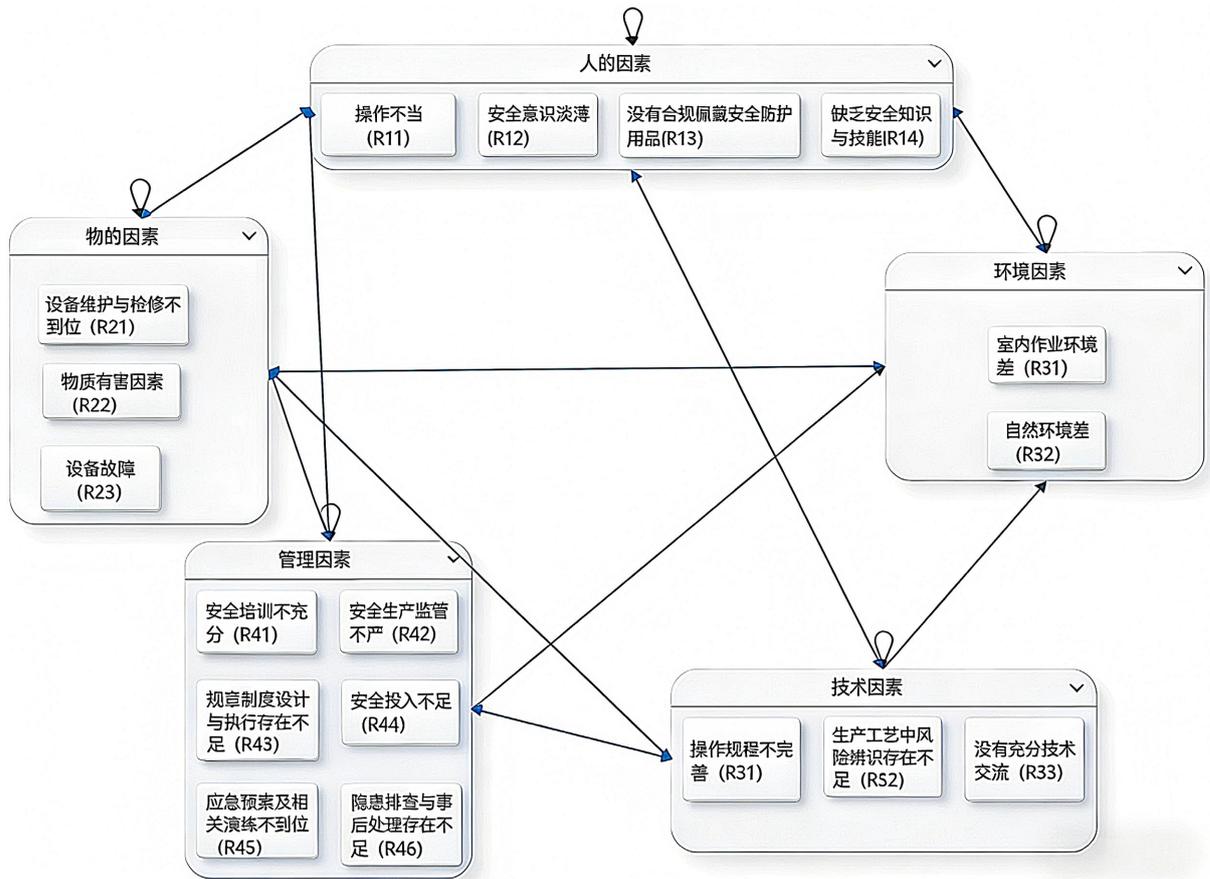


Figure 1. Network structure model

图 1. 网络结构模型

(2) 构建判断矩阵并计算局部权重

建立好各个因素的相互影响关系后需要构建下列判断矩阵:

$$A = (a_{ij})_{n \times n} \tag{1}$$

其中 a_{ij} 表示元素 i 相对 j 的影响程度，其影响程度如表 2 所示。

Table 2. Indicator comparison scale

表 2. 指标比较尺度

定义	标度
i 因素与 j 因素相比，前者极端重要	9
i 因素与 j 因素相比，前者强烈重要	7
i 因素与 j 因素相比，前者明显重要	5
i 因素与 j 因素相比，前者稍重要	3
i 因素与 j 因素相比，同等重要	1
i 因素与 j 因素相比，介于判断尺度中间	2, 4, 6, 8
前者与后者的重要性比值互为倒数	倒数

解特征方程：

$$Aw = \lambda_{\max} w \tag{2}$$

其中 λ_{\max} 为最大特征根， w 为归一化后局部权重向量。

由于风险重要性程度依赖专家的主观经验，因此完成矩阵还需要对于其整体进行一致性检验。其使用一致性指标 $CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$ 和一致性比率 RI 做一致性检验，其中 RI 取值如见表 3 所示。如果 $CR < 0.1$ ，则需调整判断矩阵。

Table 3. Random consistency index

表 3. 随机一致性指标

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.46

(3) 构造未加权超矩阵

设网络层有 N 个元素组，超矩阵 W 为分块矩阵：

$$W = \begin{pmatrix} W_{11} & W_{12} & \cdots & W_{1N} \\ W_{21} & W_{22} & \cdots & W_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ W_{N1} & W_{N2} & \cdots & W_{NN} \end{pmatrix} \tag{3}$$

w_{ij} 表示第 j 组元素对第 i 组元素的影响权重矩阵

若 j 组对 i 组无影响，则 $w_{ij} = 0$ 。

(4) 构造加权超矩阵

以控制层准则为标准，对元素组两两比较，得到组间权重矩阵 $A = (a_{ij})$ 。

加权超矩阵 \bar{W} 为：

$$\bar{W}_{ij} = a_{ij} \cdot W_{ij} \tag{4}$$

(5) 计算极限超矩阵

对加权超矩阵进行幂迭代，直到收敛：

$$W^\infty = \lim_{k \rightarrow \infty} \bar{W}^k \tag{5}$$

收敛后，每列相同，该列即为全局稳定权重向量。

通过对极限超矩阵进行分析后，得出矩阵中缺乏安全知识与技能对于其他风险因素的影响最大，其值可达 0.195。因此为保障 Y 化工企业的安全生产，可以构建三级培训、专项培训、持续教育的全方位培训体系。新员工必须经过厂、车间、班组三级安全培训，厂级培训重点讲解安全生产法律法规、企业安全管理制度和危险化学品基础知识；车间级培训聚焦本车间生产工艺、风险点及防控措施；班组级培训侧重岗位操作规程、应急处置方法和劳动防护用品使用，考核合格后方可上岗。

4.2. Critic 模型构建

(1) 首先通过 CRITIC 二级指标的 13 位专家打分将 m 个评价对象和 n 个评价指标，构建组成如下的原始数据矩阵：

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

(2) 对其数据进行标准化的处理, 消除其数据量纲影响, 统一标准衡量数据。

对于其正向指标处理时其公式:

$$x_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(X_j)}{\max(X_j) - \min(X_j)} \quad (7)$$

对于其逆向指标处理时其公式:

$$x_{ij} = \frac{\max(X_j) - x_{ij}}{\max(X_j) - \min(X_j)} \quad (8)$$

由于本文采用的 CRITIC 法的问卷分值越高代表其指标发生失控时, 引发的事故概率相对较高, 因此采用正向指标处理时其公式。

(3) 进行波动性计算

$$S_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}{n-1}} \quad (9)$$

其中, S_j 是第 j 个指标的标准差, X_{ij} 是样本数据, \bar{X}_j 为每个指标(列)数据的均值。

(4) 冲突性计算

计算冲突性时要用到指标的相关性矩阵, 计算公式:

$$r = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X_i - \bar{X})^2 \sum (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (10)$$

则, 冲突性计算公式:

$$R_j = \sum_{i=1}^p (1 - r_{ij}) \quad (11)$$

其中, r_{ij} 表示第 i 个指标与第 j 个指标的相关系数。

(5) 信息量计算

$$C_j = S_j \sum_{i=1}^p (1 - r_{ij}) = S_j \times R_j \quad (12)$$

其中: C_j 表示第 j 个评价指标在整个评价指标体系中的重要程度, C_j 数值越大就应该给其分配更多的权重。

(6) 计算 CRITIC 客观权重

通过公式式可以求出第 j 个指标的客观权重 D_i :

$$D_i = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^n C_j} \quad (13)$$

Y 化工企业风险指标的离散程度呈现显著的差异化特征, 其标准差范围 4.003 到 7.228, 既体现了高

风险指标的强区分能力，也反映了基础风险指标的共识性，为 CRITIC 法提供了充足的客观数据支撑。

4.3. 综合权重计算

本文由于化工企业安全生产风险的因素较多、线性加权法的运算相对简单、实操性相对较强等多个原因，因此决定选用线性加权法来确定该综合评价指标的最终权重。假设综合权重为 W_i ，ANP 计算的权重为 W_A ，CRITIC 法计算的权重为 W_C 。ANP 权重的加权系数为 α ，熵权法权重的加权系数为 β 。其计算过程如下所示。其中 ANP 法与 CRITIC 法都是基于专家对于这些指标进行打分，并且通过有效性分析后结果符合要求。

CRITIC 法仅基于数据特性，无法考虑风险因素间的复杂关联，如“设备故障”与“维护检修不到位”的因果关系，而 ANP 法的网络结构恰好弥补这一缺陷，组合后实现检验与数据的双重校验。而单纯 ANP 方法的权重完全依赖专家经验，易受专家行业背景、认知偏好影响。例如，ANP 法中“缺乏安全知识与技能”权重高达 19.54%，而组合方法通过 CRITIC 法发现该指标的实际数据离散度低于预期，更符合 Y 企业实际风险分布。

组合权重 W_i 的表达式为：

$$W_i = \alpha W_A + \beta W_C \quad (14)$$

为满足组合权重 W_i 与 ANP 法的主观权重以及组合权重 W_i 与 CRITIC 法的客观权重 W_C 偏差的平方和最小，建立目标函数如下：

$$\min W = \sum_{i=1}^m \left[(W_i - W_A)^2 + (W_i - W_C)^2 \right] \quad (15)$$

经过计算得到 $\alpha = 0.5236$ ，为了方便进行二级权重的计算，将 α 取 0.52， β 取 0.48。其综合权重如表 4 所示。

Table 4. Comprehensive weight table

表 4. 综合权重表

一级指标	权重	二级指标	权重
人的因素	0.3964	操作不当(R11)	0.0799
		安全意识淡薄(R12)	0.0887
		没有合规佩戴安全防护用品(R13)	0.1078
		缺乏安全知识与技能(R14)	0.1300
物的因素	0.1475	设备维护与检修不到位(R21)	0.0534
		物质有害因素(R22)	0.0431
		设备故障(R23)	0.0540
环境因素	0.1056	室内作业环境差(R31)	0.0609
		自然环境差(R32)	0.0447
		安全培训不充分(R41)	0.0310
		安全生产监管不严(R42)	0.0271
管理因素	0.1960	规章制度设计与执行存在不足(R43)	0.0286
		安全投入不足(R44)	0.0406

续表

		应急预案及相关演练不到位(R45)	0.0221
		隐患排查与事后处理存在不足(R46)	0.0517
技术因素	0.1375	操作规程不完善(R51)	0.0579
		生产工艺中风险辨识存在不足(R52)	0.0498
		没有充分技术交底(R53)	0.0338

4.4. 灰色聚类模型构建

由于风险的评价等级划分具有多种不同的形式,因此搜索与化工企业安全生产有关的相关的参考文献并与 DL 设计院有限公司的相关专家进行沟通后,决定选用具有代表性和权威性,而且比较符合化工企业实际生产的《化工企业安全风险分级管控实施指南(试用版)》中作业条件危险性分析法的分类标准,其将风险等级划分为五级(分别为较低风险、低风险、中风险、重大风险、巨大风险)。其具体的划分标准如表 5 所示(其中各个的风险含义与相应措施也都是取自该文件)。

Table 5. Risk level scale and related definition table

表 5. 风险等级标度与相关释义表

风险等级	风险评分值区间	含义及措施
较低风险(A 级)	[0~0.2]	其稍有危险, 需要注意
低风险(B 级)	(0.2~0.4]	一般风险, 可以接受, 但是需要进行必要关注
中风险(C 级)	(0.4~0.6]	中度危险, 需要控制和整改
重大风险(D 级)	(0.6~0.8]	高度危险, 必须制定措施进行有效控制
巨大风险(E 级)	(0.8~1]	极其危险, 必须立即整改, 不能进行生产作业

经汇总统计,专家对安全生产风险的打分结果主要集中在 0.1~0.4 区间。为验证该结果合理性,咨询多名具备化工企业安全管理经验的专家后形成一致意见:当前国家对化工企业安全生产风险管控力度持续加大,相关法规明确要求重大风险与巨大风险必须严格管控、不得失控。在此背景下,多数化工企业为落实国家管控要求,已通过技术、管理等多种措施将高等级风险降至低风险或较低风险水平。Y 化工企业属于“两重点一重大”企业,面临更为严格的风险管控要求。按照规定,企业若保留中风险及以上风险不降档,须经严格审批方可开工。Y 化工企业在投产前已将全部中风险转化为低风险与较低风险,满足国家安全生产相关规定,风险分数分布合理。

将 13 位专家对各个风险的打分数据转化为样本矩阵,其中 5 位为企业内部人员,3 位为 ZX 管理咨询有限公司的人员,4 位为 DL 设计院有限公司的人员,1 位为 S 大学教授。在本评价模型中,如果有 p 位专家对风险因素的指标 R_{ij} ,进行打分评价,那么第 m 位专家对 R_i 的风险评价值为 X_{ijm} 表示第 n 个风险因素指标,则该样本矩阵 D 的构成如下所示:

$$D = \begin{bmatrix} x_{111} & x_{112} & \cdots & x_{11p} \\ x_{211} & x_{212} & \cdots & x_{21p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mp} \end{bmatrix} \quad (16)$$

确定灰类可能度函数。根据上表的风险分级指标,将风险指标分为多个灰子类,即 $k=1, 2, 3, 4$,

5, 5 个分类小区间分别为[0~0.2]、[0.2~0.4]、[0.4~0.6]、[0.6~0.8]、[0.8~1]，根据上列区间的均值，最终可以取得灰类的阈值为： $T = (0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9)$ 。

根据上列内容构建以下可能度函数。

第 1 灰类： $k = 1$ ，风险等级表示较低风险，灰数为 $\otimes [0, 0.1, 0.2]$ ，对应的可能度函数的公式为：

$$f_{ij}^1(x_{ijm}) = \begin{cases} 0 & x_{ijm} \in [0, 0.1] \\ \frac{0.1 - x_{ijm}}{0.1 - 0.2} & x_{ijm} \in [0.1, 0.2] \\ 0 & x_{ijm} \notin [0, 0.2] \end{cases} \quad (17)$$

第 2 灰类： $k = 2$ ，风险等级表示低风险，灰数为 $\otimes [0, 0.3, 0.6]$ ，对应的可能度函数的公式为：

$$f_{ij}^2(x_{ijm}) = \begin{cases} \frac{x_{ijm}}{0.3} & x_{ijm} \in [0, 0.3] \\ \frac{0.6 - x_{ijm}}{0.6 - 0.3} & x_{ijm} \in [0.3, 0.6] \\ 0 & x_{ijm} \notin [0, 0.6] \end{cases} \quad (18)$$

第 3 灰类： $k = 3$ ，风险等级表示中风险，灰数为 $\otimes [0, 0.5, 1]$ ，对应的可能度函数的公式为：

$$f_{ij}^3(x_{ijm}) = \begin{cases} \frac{x_{ijm}}{0.5} & x_{ijm} \in [0, 0.5] \\ \frac{1 - x_{ijm}}{1 - 0.5} & x_{ijm} \in [0.5, 1] \\ 0 & x_{ijm} \notin [0, 1] \end{cases} \quad (19)$$

第 4 灰类： $k = 4$ ，风险等级表示重大风险，灰数为 $\otimes [0, 0.7, 1.4]$ ，对应的可能度函数的公式为：

$$f_{ij}^4(x_{ijm}) = \begin{cases} \frac{x_{ijm}}{0.7} & x_{ijm} \in [0, 0.7] \\ \frac{1.4 - x_{ijm}}{1.4 - 0.7} & x_{ijm} \in [0.7, 1.4] \\ 0 & x_{ijm} \notin [0, 1.4] \end{cases} \quad (20)$$

第 5 灰类： $k = 5$ ，风险等级表示巨大风险，灰数为 $\otimes [0, 0.9, \infty]$ ，对应的可能度函数的公式为：

$$f_{ij}^5(x_{ijm}) = \begin{cases} \frac{x_{ijm}}{0.9} & x_{ijm} \in [0, 0.9] \\ 1 & x_{ijm} \in [0.9, \infty] \\ 0 & x_{ijm} \notin [0, \infty] \end{cases} \quad (21)$$

根据以上的样本矩阵和可能度函数，将整理的专家打分值代入公式，计算某个风险因素 x_{ij} 属于第 k 灰类的可能度函数值 $f_{ij}^k(x_{ijm})$ ，即可算出第 k 灰类的灰色评估系数 y_{ij} ，公式为：

$$y_{ij}^k = \sum_{m=1}^{13} f_{ij}^k(x_{ijm}) \quad (22)$$

第 k 灰类总灰色的评估系数如公式：

$$Y_{ij} = \sum_{k=1}^5 y_{ij}^k \quad (23)$$

通过上述计算后, 其中 m 位专家对于第 k 灰类的归一化评价权值如下列公式所示:

$$R_{ij}^k = \frac{y_{ij}^k}{Y_{ij}} \quad (24)$$

Table 6. Comprehensive risk assessment results of Chemical Enterprise Y

表 6. Y 化工企业风险综合评价结果

结果	较低风险(A 级)	低风险(B 级)	中风险(C 级)	重大风险(D 级)	巨大风险(E 级)
隶属度	0.318	0.278	0.175	0.128	0.101

通过表 6 我们可知 Y 化工企业安全生产项目的风险状况: 根据最大隶属度原则, 选择其中最大的百分数所对应的风险等级, 决定将 Y 化工企业安全生产风险的整体评估结果定为较低风险等级。由此可知, 该企业在安全生产方面比较优秀。但是鉴于下文一级指标的评价结果中有些风险仍然是低风险, 因此仍需注意。

Table 7. Evaluation results of the first-level indicators for risks of Chemical Enterprise Y

表 7. Y 化工企业风险一级指标评价结果

结果	较低风险(A 级)	低风险(B 级)	中风险(C 级)	重大风险(D 级)	巨大风险(E 级)
人的因素	0.350	0.268	0.166	0.119	0.097
物的因素	0.240	0.300	0.204	0.148	0.108
环境因素	0.234	0.302	0.205	0.145	0.114
管理因素	0.345	0.269	0.172	0.122	0.092
技术因素	0.285	0.290	0.186	0.134	0.105

由表 7 可知, 根据隶属度关系: 人的因素是较低风险(最大值为 0.35, 对应为较低风险); 物的因素是低风险(最大值为 0.3, 对应的是低风险); 环境因素是低风险(最大值为 0.302, 对应低风险); 管理因素风险是较低风险(最大值为 34.5%, 对应的是较低风险); 技术因素是低风险(最大值为 0.29, 对应的是低风险)。

对于每个一级指标所对应的风险的优先级可以考虑先使用其簇内的权重排序来对各个种类的不同二级风险指标进行优先级排序。其中人的因素风险中缺乏安全知识与技能的比重最大(高达 13%), 需要优先考虑缺乏安全知识与技能。物的因素风险中设备故障比重最大(高达 5.4%), 需要优先考虑设备故障。环境因素风险中室内作业环境差的比重最大(高达 6.1%), 需要优先考虑室内作业环境差的风险。管理因素的风险中隐患排查与事后处理存在不足的比重最大(高达 5.17%), 需要优先考虑隐患排查与事后处理存在不足的风险。技术因素风险中操作规程不完善的比重最大(高达 5.79%), 需要优先考虑操作规程不完善的风险。

为保障该灰色聚类模型的稳健性, 对其进行敏感性分析。在多数参数波动场景下保持稳定, 仅在高敏感参数大幅波动, 如在 $\pm 30\%$ 权重调整、 $\pm 15\%$ 专家打分调整时出现局部偏差, 但未发生风险等级跨档。

5. 结论

应用灰色聚类可以较好地解决化工企业的安全生产风险评估的问题, 有效地帮助 Y 化工企业识别风

险、控制风险，并根据灰色聚类法来对不同种类的风险采取适当的应对措施，持续改进化工企业安全生产的管理方式。

参考文献

- [1] 付净, 聂方超, 刘虹, 等. 化工企业安全管理体系评估指标集的构建及实证分析[J]. 安全与环境工程, 2020, 27(1): 126-132.
- [2] 毕仕昌, 黄培伦, 胡郁葱. Ohsms 体系在高速公路行车安全管理中的应用[J]. 中山大学学报论丛, 2006(4): 173-178.
- [3] 郭中华, 姜卉, 巩畅. 化工爆炸事故风险因素识别与网络演化机理研究[J]. 工业工程与管理, 2022, 27(3): 139-147.
- [4] 周欢. 化工安全生产中存在的问题与应对策略研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43(11): 27-29.
- [5] 李鸿婷, 薛迎春, 谷同瑞, 等. 基于 4m1e 的印染企业安全生产风险防控研究[J]. 上海染料, 2025, 53(2): 39-43.
- [6] 张康. 化工企业安全风险识别与评价探讨[J]. 化工设计通讯, 2022, 48(12): 163-165.
- [7] 史庆利. 化工行业安全生产影响因素分析[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2018, 38(5): 29-30.
- [8] 陈全, 李馨玉. 基于复杂网络的化工事故致因分析[J]. 现代化工, 2020, 40(S1): 12-15.