

中文引用格式:王亮,赖佳燕,张自欣,等. 基于文本挖掘和改进 DEMATEL 法的化工事故关键因素识别[J]. 中国安全科学学报, 2024,34(3):20-28.

英文引用格式:WANG Liang, LAI Jiayan, ZHANG Zixin, et al. Identification of critical factors in chemical accidents based on text mining and improved DEMATEL method[J]. China Safety Science Journal, 2024,34(3):20-28.

# 基于文本挖掘和改进 DEMATEL 法的化工事故 关键因素识别\*

王亮<sup>1</sup>副教授, 赖佳燕<sup>1</sup>, 张自欣<sup>\*\*2</sup>教授, 王应明<sup>1,2</sup>教授

(1 福州大学 经济与管理学院, 福建 福州 350116; 2 阳光学院 经济管理学院, 福建 福州 350015)

中图分类号: X928

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.03.0230

基金项目: 国家社会科学基金资助(21CTJ004)。

**【摘要】** 为从历史化工事故中吸取经验教训以指导化工安全生产管理实践, 提出基于文本挖掘和改进决策实验室分析法(DEMATEL)的化工事故关键因素识别方法。首先, 利用文本挖掘技术充分挖掘 1 627 份化工事故调查报告的文本信息, 结合相关文献及法律法规提取 14 项化工事故影响因素; 然后, 使用基于  $\alpha$  水平集的模糊 DEMATEL 法计算化工事故影响因素表现水平, 识别出关键因素; 最后, 分析关键因素与其他因素之间的相互关联性并揭示化工事故产生机制。结果表明: 8 项化工事故因素被识别为关键因素, 分别是极端天气、规章制度、技术规程、隐患排查、风险管控、教育培训、监督管理、经营管理; 同时, 8 项关键因素对设施设备、物料反应、职业素养、岗位职责、应急管理、安全投入等影响因素产生直接影响, 最终导致化工事故发生。

**【关键词】** 文本挖掘; 决策实验室分析法(DEMATEL); 化工事故; 关键因素识别;  
 $\alpha$  水平集

## Identification of critical factors in chemical accidents based on text mining and improved DEMATEL method

WANG Liang<sup>1</sup>, LAI Jiayan<sup>1</sup>, ZHANG Zixin<sup>2</sup>, WANG Yingming<sup>1,2</sup>

(1 School of Economics & Management, Fuzhou University, Fuzhou Fujian 350116, China;

2 School of Economics Management, Yango University, Fuzhou Fujian 350015, China)

**Abstract:** To draw lessons from historical chemical accidents and guide the practice of chemical safety production management, a method for identifying critical factors in chemical accidents based on text mining and improved DEMATEL method was proposed. Firstly, text mining technology was used to fully mine the text information of 1 627 chemical accident investigation reports, based on which 14 chemical accident influencing factors were extracted according to related literature, laws and regulations. Then, the fuzzy DEMATEL method based on alpha-level sets was used to calculate the performance levels of the factors affecting chemical accidents. Finally, the correlations between critical factors and other factors were

\* 文章编号: 1003-3033(2024)03-0020-09; 收稿日期: 2023-09-22; 修稿日期: 2023-12-25

\*\* 通信作者: 张自欣(1988—), 女, 河南南乐人, 博士, 教授, 主要从事应急决策、突发事件预警等方面的研究。E-mail: zhangzixin768@163.com。

analyzed and the mechanism of chemical accidents was revealed. The results show that 8 chemical accident influencing factors are identified as the critical factors, i. e., extreme weather, regulations, technical procedures, hidden danger investigation, risk control, education and training, supervision and management, and operation management. These 8 critical factors have direct impact on the influence factors such as facilities and equipment, material reactions, occupational quality, job responsibilities, emergency management, and safety investment, which eventually lead to chemical accidents.

**Keywords:** text mining; decision-making trial and evaluation laboratory (DEMATEL); chemical accident; critical factors identification; alpha-level sets

## 0 引言

化工产业是我国的支柱产业,对国民经济的发展具有重要支撑作用。然而,在化工生产过程中,由于其生产原料具有易燃易爆等特点,加之其生产工艺复杂,一旦管控疏忽,极易发生化工安全生产事故,严重影响人民群众的生命和财产安全及社会发展。“十三五”期间,我国共发生 929 起化工安全生产事故(不含港澳台),造成 1 176 人死亡和数以亿计的经济损失<sup>[1]</sup>。因此,剖析历史化工生产安全事故,挖掘造成事故发生的影响因素,对于改善化工行业安全生产现状具有重要意义。

早期关于化工事故致因分析的研究多从化工事故总体特征、事故类型、事故发生环节等方面展开分析<sup>[4]</sup>;近年来,有学者将文本挖掘技术应用在化工事故致因研究领域,充分挖掘化工事故调查报告文本中蕴含的信息,计算高效省时。如 JING Sifeng 等<sup>[5]</sup>基于 Word2Vec 模型和长短期记忆模型(Long Short-Term Memory, LSTM)的文本挖掘方法,从我国化工事故案例中提取了事故前兆。牛毅等<sup>[6]</sup>以某化工企业 2010—2016 年积累的小型事故文本数据为样本,利用隐含狄利克雷分布(Latent Dirichlet Allocation, LDA)主题模型,抽取出 5 类化工事故致因主题,并根据主题关键词细化具体致因。李鑫等<sup>[7]</sup>根据事故报告挖掘并归纳出 53 个危化品事故致因因素,采用 Apriori 算法获取危化品事故中人为因素的关联规则。然而,在实际应用中复杂系统关键因素的识别往往需要借助相关领域专家的知识与经验判断,上述研究仅通过文本挖掘技术识别事故系统关键因素,而未能将专家的知识经验考虑在内,其研究结果缺乏一定的专业支撑。目前,已有学者将模糊理论引入决策实验室分析法(Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory, DEMATEL)<sup>[8]</sup>以研究不确定性环境下的复杂问题,然而现有的模糊 DEMATEL 方法通过去模糊化的方式直接将模糊信

息转化为精确数,易造成专家判断信息的丢失。

鉴于此,笔者拟兼顾文本数据的挖掘精度与效率及不确定环境下专家知识和经验,提出基于文本挖掘和改进 DEMATEL 法的化工事故关键因素识别方法。利用文本挖掘技术从化工事故调查文本信息中提取事故影响因素,基于  $\alpha$  水平集的模糊 DEMATEL 法分析化工安全事故影响因素间的相互关联性并识别出关键因素,以期改善化工行业安全生产现状及制定化工事故防范措施提供理论支撑和方法指导,同时为其他安全生产相关领域的研究提供参考和借鉴。

## 1 TextRank 算法及改进 DEMATEL 法

### 1.1 基于 TextRank 算法的关键词提取

设无向图  $G=(V, E)$ , 其中,  $V$  为节点集,  $E$  为边集, 2 节点间存在边, 且仅当它们对应的词汇在给定长度的窗口中共现, 则节点  $V_i$  的权值  $W(V_i)$  的计算过程如下<sup>[9]</sup>:

$$W(V_i) = (1 - d) + d \cdot \sum_{V_j \in \text{In}(V_i)} \frac{\omega_{ji}}{\sum_{V_k \in \text{Out}(V_j)} \omega_{jk}} W(V_j) \quad (1)$$

式中:  $d$  为阻尼系数, 取  $[0, 1]$ , 表示从图中某一节点指向其他任意节点的概率, 常取  $d = 0.85$ <sup>[10]</sup>;  $\text{In}(V_i)$  为指向节点  $V_i$  的所有节点的集合;  $\text{Out}(V_j)$  为节点  $V_j$  指向的所有节点的集合;  $\omega_{ji}$ 、 $\omega_{jk}$  为节点  $V_j$  到节点  $V_i$ 、 $V_k$  的边的权重, 即转移概率;  $W(V_j)$  为节点  $V_j$  的权值。

### 1.2 基于 $\alpha$ 水平集的模糊 DEMATEL 法

为在复杂系统关键因素的识别过程中尽可能多地保留决策信息, 本文采用基于  $\alpha$  水平集的模糊 DEMATEL 法<sup>[11]</sup>, 其步骤如下:

1) 确定系统中的影响因素, 记为  $F = \{F_1, F_2, \dots, F_n\}$ 。由专家采用模糊评价语言评估各项影响

因素间关系强弱,构建模糊语言直接影响矩阵  $\mathbf{G} = (g_{ij}^f)_{n \times n}$ , 其中,  $g_{ij}^f$  为因素  $F_i$  对因素  $F_j$  的直接影响程度语言集信息,  $g_{ij}^f \in \{VH, H, L, VL, No\}$ 。

表1 模糊信息转化

Tab.1 Fuzzy information transformation

模糊信息	三角模糊数
很高(VH)	(0.75, 1.0, 1.0)
高(H)	(0.5, 0.75, 1.0)
低(L)	(0.25, 0.5, 0.75)
很低(VL)	(0, 0.25, 0.5)
无(No)	(0.0, 0.0, 0.25)

2) 根据表1,将得到的模糊语言直接影响矩阵转换为由三角模糊数表示的模糊直接影响矩阵。利用  $\alpha$  水平将模糊直接影响矩阵中的三角模糊数转换为区间数  $\hat{g}_{ij} = [(\hat{g}_{ij})_{\alpha}^L, (\hat{g}_{ij})_{\alpha}^H]$ 。

3) 构建上界直接影响矩阵  $\hat{\mathbf{G}}_{\alpha}^H = [(\hat{g}_{ij})_{\alpha}^H]_{n \times n}$ 、下界直接影响矩阵  $\hat{\mathbf{G}}_{\alpha}^L = [(\hat{g}_{ij})_{\alpha}^L]_{n \times n}$  及随机直接影响矩阵  $\hat{\mathbf{G}}_{\alpha}^M = [(\hat{g}_{ij})_{\alpha}^M]_{n \times n}$ 。其中,  $(\hat{g}_{ij})_{\alpha}^H$ 、 $(\hat{g}_{ij})_{\alpha}^L$  分别为  $\alpha$  水平下所得到的区间数  $\hat{g}_{ij}$  的上、下界值。令  $\xi$  为  $[(\hat{g}_{ij})_{\alpha}^L, (\hat{g}_{ij})_{\alpha}^H]$  区间内服从于均匀分布的随机变量,  $\hat{\mathbf{G}}_{\alpha}^M$  计算式为:

$$\hat{\mathbf{G}}_{\alpha}^M = [(\hat{g}_{ij})_{\alpha}^M]_{n \times n} = \left[ \int_{(\hat{g}_{ij})_{\alpha}^L}^{(\hat{g}_{ij})_{\alpha}^H} \xi f(\xi) d\xi \right]_{n \times n} \quad (2)$$

4) 规范化处理上界、下界及随机直接影响矩阵  $\hat{\mathbf{G}}_{\alpha}^H$ 、 $\hat{\mathbf{G}}_{\alpha}^L$  及  $\hat{\mathbf{G}}_{\alpha}^M$ , 得到上界、下界及随机规范化直接影响矩阵  $\bar{\mathbf{G}}_{\alpha}^H$ 、 $\bar{\mathbf{G}}_{\alpha}^L$  及  $\bar{\mathbf{G}}_{\alpha}^M$ , 其中,  $\bar{\mathbf{G}}_{\alpha}^H$  计算式为:

$$\bar{\mathbf{G}}_{\alpha}^H = [(\bar{g}_{ij})_{\alpha}^H]_{n \times n} = \left[ (\hat{g}_{ij})_{\alpha}^H / \max_{1 \leq j \leq n} \sum_{j=1}^n (\hat{g}_{ij})_{\alpha}^H \right]_{n \times n} \quad (3)$$

同理可计算得到  $\bar{\mathbf{G}}_{\alpha}^L$  及  $\bar{\mathbf{G}}_{\alpha}^M$ 。

5) 建立上界、下界及随机综合影响矩阵  $\mathbf{T}_{\alpha}^H$ 、 $\mathbf{T}_{\alpha}^L$  及  $\mathbf{T}_{\alpha}^M$ , 其中,  $\mathbf{T}_{\alpha}^H$  计算式为:

$$\mathbf{T}_{\alpha}^H = [(t_{ij})_{\alpha}^H]_{n \times n} = \bar{\mathbf{G}}_{\alpha}^H (\mathbf{I} - \bar{\mathbf{G}}_{\alpha}^H)^{-1} \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{I}$  为单位矩阵;  $t_{ij}$  为因素  $F_i$  对因素  $F_j$  的综合影响程度。

同理可计算得到  $\mathbf{T}_{\alpha}^L$  及  $\mathbf{T}_{\alpha}^M$ 。

其中  $\mathbf{I}$  为单位矩阵,  $t_{ij}$  为因素  $F_i$  对因素  $F_j$  的综合影响程度。

6) 令  $\alpha_k (0 \leq \alpha_1 \leq \dots \leq \alpha_k \leq 1)$  为不同的  $\alpha$  水平, 分别计算平均影响度  $\bar{D}_i^H$ 、 $\bar{D}_i^L$ 、 $\bar{D}_i^M$ , 其中,  $\bar{D}_i^H$  计算式为:

$$\bar{D}_i^H = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^n (t_{ij})_{\alpha_k}^H \quad (5)$$

同理可计算得到  $\bar{D}_i^L$  及  $\bar{D}_i^M$ 。

分别计算平均被影响度  $\bar{R}_j^H$ 、 $\bar{R}_j^L$ 、 $\bar{R}_j^M$ , 其中,  $\bar{R}_j^H$  计算式为:

$$\bar{R}_j^H = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^n (t_{ij})_{\alpha_k}^H \quad (6)$$

同理可计算得到  $\bar{R}_j^L$  及  $\bar{R}_j^M$ 。

分别计算平均中心度  $\bar{R}_i^H + \bar{D}_i^H$ 、 $\bar{R}_i^L + \bar{D}_i^L$ 、 $\bar{R}_i^M + \bar{D}_i^M$  和平均原因度  $\bar{D}_i^H - \bar{R}_i^H$ 、 $\bar{D}_i^L - \bar{R}_i^L$ 、 $\bar{D}_i^M - \bar{R}_i^M$ , 根据平均中心度及平均原因度绘制化工事故影响因素原因—结果图。

## 2 关键因素识别方法

将化工事故影响因素分析过程分为化工事故影响因素提取和化工事故关键因素识别2个阶段, 即: 运用文本挖掘技术挖掘化工事故调查报告文本的有效信息, 提取化工安全生产事故影响因素; 在此基础上, 采用基于  $\alpha$  水平集的模糊 DEMATEL 法识别化工事故的关键因素, 具体方法如下:

1) 第1阶段, 基于文本挖掘的事故因素提取。

步骤1: 数据收集及处理。收集事故调查报告文本并进行文本清洗, 建立分词词库、停用词库及同义词词库, 对文本进行 Jieba 分词及词性标注。

步骤2: 文本信息挖掘。利用 TextRank 算法提取关键词, 完善关键词表述, 获取事故初始因素。

步骤3: 事故影响因素提取。结合相关文献、法律法规补充事故初始因素, 将初始因素合并归纳得到化工事故影响因素。

2) 第2阶段, 基于  $\alpha$  水平集的模糊 DEMATEL 法的事故关键因素识别。

步骤1: 构建模糊语言直接影响矩阵。收集专家对第1阶段所提取的化工事故影响因素的模糊语言评价信息, 得到相应的模糊语言直接影响矩阵。

步骤2: 构建模糊直接影响矩阵。根据表1将模糊语言直接影响矩阵转换为相应的模糊直接影响矩阵, 利用  $\alpha$  水平将模糊直接影响矩阵中的三角模糊数转换为区间数。

步骤3: 构建上、下界及随机直接影响矩阵。根据不同的  $\alpha$  水平以及式(2), 将模糊直接影响矩阵转换为相应的上、下界及随机直接影响矩阵。

步骤4: 根据式(3), 计算上、下界规范化直接影响矩阵及随机规范化直接影响矩阵。

步骤 5:根据式(4),计算上、下界综合影响矩阵及随机综合影响矩阵。

步骤 6:根据式(5)一式(6),计算平均影响度及平均被影响度,获得平均中心度及平均原因度,最

终绘制原因-结果图。

基于文本挖掘及改进 DEMATEL 法的化工事故关键因素识别框架如图 1 所示。

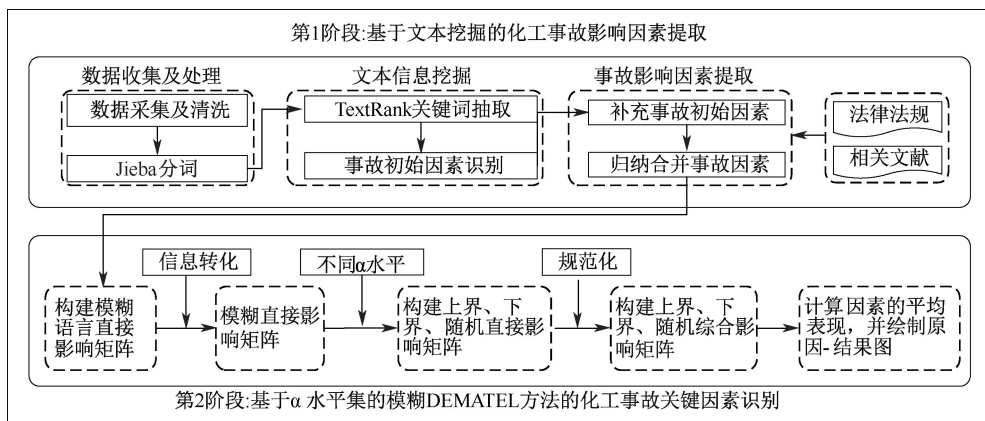


图 1 基于文本挖掘及改进 DEMATEL 方法的化工事故关键因素识别框架

Fig. 1 A framework for identifying key factors in chemical accidents based on text mining and improved DEMATEL method

### 3 关键因素识别案例分析

通过实际化工事故关键影响因素识别文中所提方法的有效性和可行性,具体如下:

第 1 阶段:基于文本挖掘的化工事故影响因素提取。

步骤 1:数据收集与处理。

1) 数据收集及清洗。从垂直门户网站安全管理网中以爆炸、化工关键词系统检索化工安全生产事故调查报告,采用网络爬虫方法采集 2000—2022 年期间我国(不含港澳台)发生的 1 627 起化工安全生产事故调查报告文本。为提高文本挖掘效率,去除无价值、重复的文本数据,采用正则表达式去除字母、数字及特殊字符,进行文本清洗。

2) Jieba 分词。利用计算机 Python 语言编程预处理事故调查报告文本,建立分词词库、停用词词库以及同义词词库。载入搜狗细胞词库中安全生产、化工、应急救援等领域的专业词典,构建化工事故因素词库;通过去停用词剔除噪声词以提升挖掘精度,将信息文本中如责任单位、火势、爆炸等无化工事故因素识别作用的高频词剔除;考虑到不同事故调查报告文本在表述风格上的差异,针对表述信息相同的同义词、缩写词进行归并处理以提升挖掘精度,部分归并处理见表 2。对分词结果进行词性标注和词性过滤,保留指定词性单词作为候选关键词。数据收集及处理部分结果见表 3,通过清洗和分词处理事故

调查报告的原始文本,获得化工事故调查的候选关键词,为第 2 阶段的事故文本信息挖掘奠定基础。

表 2 同义词、缩写词归并(部分)

Tab. 2 Combination of synonyms and acronyms (partial)

同义词、缩写词	归并后的词语
安全培训、安全生产培训、教育培训、安全教育、安全生产教育、安全生产教育和培训	安全生产教育培训
安全意识、安全生产意识、安全生产责任意识、安全管理意识	安全意识
非法违法生产、非法生产、非法违法生产行为、违规组织生产	非法生产
⋮	⋮

步骤 2:事故文本信息挖掘。

1) 基于 TextRank 算法的文本关键词提取。从候选关键词中提取文本关键词,基于 TextRank 算法的文本关键词提取主要步骤如下:①构建无向有权图  $G=(V, E)$ ,其中,  $V$  为节点集,由候选关键词组成,  $E$  为边集,采用词汇共现关系构造任 2 点之间的边。②词语重要性计算,根据式(1)迭代计算词语的重要性直至收敛,算法结束。③将词语按照重要性逆序排列并输出 Top-150 个词,作为化工事故调查报告文本的关键词。

2) 初始因素识别。结合关键词在调查报告中的具体表述,将表述不完整的关键词扩充为关键短语。例如:将安全生产教育培训,完善为安全生产教育培训不到位;将安全意识与淡薄合并为安全意识

表 3 数据收集与处理结果展示(部分)

Tab.3 Presentation of results of data collection and processing (partial)

事故调查报告	事故调查报告原文表述	文本清洗及分词	候选关键词
山东天宝化工股份有限公司“10·21”较大爆炸事故案例	①安全生产责任制落实不到位。安全生产责任体系不完善、安全管理规章制度不健全、安全管理人员配备未达到民爆行业相关规定要求。②安全管理不到位。安全检查工作不扎实,未能及时发现并纠正企业职工存在的违章作业问题。日常视频安全监控不到位,对危险工序未能及时通过视频监控发现并制止。③安全培训不到位。安全培训缺乏针对性、实效性,危险工序从业人员安全防范意识和应急处置能力不足	安全生产责任制/落实/不到位/安全生产责任体系/不完善/安全管理规章制度/不健全/安全管理人员/配备/未达到/民爆/行业/相关/规定要求/安全管理/不到位/安全检查工作/不扎实/未及时发现/发现/并/纠正/企业职工/存在/违章作业/问题/日常视频/安全监控/不到位/对/危险工序/未/及时/通过/视频监控/发现/并/制止/安全培训/不到位/安全培训/缺乏/针对性/实效性/危险工序/从业人员/安全防范意识/和/应急处置能力/不足	安全生产责任制、不落实、安全生产责任体系、不完善、规章制度、不健全、安全管理人员、安全检查工作、未及时、违章冒险作业、安全监控、不到位、安全生产教育培训、安全意识、应急处置能力、不足

淡薄,共识别出 50 项化工安全生产事故调查报告关键短语,作为造成化工行业安全生产事故的初始因素,见表 4。

表 4 基于 TextRank 的化工事故初始因素挖掘

Tab.4 TextRank-based initial factors mining for chemical accidents

关键词	事故初始因素及编号	关键词	事故初始因素及编号
可燃气体、泄漏	可燃气体泄漏 A <sub>1</sub>	违反、操作规程	违反操作规程 A <sub>26</sub>
设备、损坏	设备损坏 A <sub>2</sub>	危险性	危险性认识不足 A <sub>27</sub>
培训	未经岗前培训 A <sub>3</sub>	安全生产教育培训	安全生产教育培训不到位 A <sub>28</sub>
设备、腐蚀	设备腐蚀严重 A <sub>4</sub>	防范措施	未采取有效防范措施 A <sub>29</sub>
焊缝	焊缝开裂 A <sub>5</sub>	编制、应急预案	未编制应急预案 A <sub>30</sub>
安全管理人员	未配备安全管理人员 A <sub>6</sub>	高温天气	高温天气 A <sub>31</sub>
危险源辨识	危险源辨识不足 A <sub>7</sub>	隐患排查治理	隐患排查治理不彻底 A <sub>32</sub>
审批	审批把关不严 A <sub>8</sub>	爆炸性、混合气体	形成爆炸性混合气体 A <sub>33</sub>
疏散	未及时疏散 A <sub>9</sub>	设备、故障	设备带故障运行 A <sub>34</sub>
无证	无证上岗 A <sub>10</sub>	打非、治违	“打非治违”工作不到位 A <sub>35</sub>
冒险作业	强令冒险作业 A <sub>11</sub>	生产工艺、不合理	生产工艺不合理 A <sub>36</sub>
盲目	盲目操作 A <sub>12</sub>	改变、生产工艺	擅自改变生产工艺 A <sub>37</sub>
违章冒险作业	违章冒险作业 A <sub>13</sub>	操作规程	操作规程不完善 A <sub>38</sub>
行政处罚	行政处罚不落实 A <sub>14</sub>	监管、不力	相关部门监管不力 A <sub>39</sub>
非法生产	非法生产 A <sub>15</sub>	应急处置	应急处置能力缺失 A <sub>40</sub>
未及时、处置	未及时处置 A <sub>16</sub>	安全意识、淡薄	安全意识淡薄 A <sub>41</sub>
违章指挥	违章指挥 A <sub>17</sub>	未依法取得	未依法取得相关许可 A <sub>42</sub>
执法	执法不严 A <sub>18</sub>	风险分析	未进行风险分析 A <sub>43</sub>
监护	监护不到位 A <sub>19</sub>	巡查	日常巡查不到位 A <sub>44</sub>
设备、缺陷	设备存在缺陷 A <sub>20</sub>	应急处置	应急处置不当 A <sub>45</sub>
检修	检修工作不到位 A <sub>21</sub>	安全生产责任制	安全生产责任制不落实 A <sub>46</sub>
检维修、能力	检维修能力缺乏 A <sub>22</sub>	安全知识	安全知识缺失 A <sub>47</sub>
应急预案、不完善	应急预案制定不完善 A <sub>23</sub>	储存、危化品	非法储存危化品 A <sub>48</sub>
规章制度	规章制度不健全 A <sub>24</sub>	逃避、监管	蓄意逃避监管 A <sub>49</sub>
擅自、离开	擅自离开岗位 A <sub>25</sub>	监测预警	未安设监测预警系统 A <sub>50</sub>

步骤 3:事故影响因素提取。

1) 初始因素补充。为尽可能识别出具有代表性的化工事故影响因素,梳理相关文献及政策法规<sup>[12]</sup>,提取安全操作技能缺失、疲劳作业、使用淘汰

设备、违反劳动纪律等 20 项影响因素,补充得到 70 项事故初始因素。

2) 影响因素归并。为降低因素冗杂程度、提高计算效率,从事故初始因素的语义相似度及实施主

体角度概括归并事故初始因素。如将语义相似的设备损坏、焊缝开裂、设备腐蚀严重、设备存在缺陷等归并为设施设备因素;根据实施主体的不同将未经

岗前培训和安全教育培训不到位分别归并到岗位职责和教育培训,最终将 70 项事故初始因素概括归并后得到 14 项化工事故影响因素,见表 5。

表 5 化工安全生产事故影响因素

Tab. 5 Influencing factors of chemical safety production accidents

影响因素	事故初始因素	影响因素	事故初始因素
极端天气 $F_1$	高温天气 $A_{31}$	隐患排查 $F_8$	隐患排查治理不彻底 $A_{32}$
	雷电暴雨 $B_1$		日常巡查不到位 $A_{44}$
	台风 $C_1$		排查和整改不到位 $B_4$
设施设备 $F_2$	低温天气 $C_2$	风险管控 $F_9$	危险源辨识不足 $A_7$
	设备损坏 $A_2$		未进行风险分析 $A_{43}$
	设备腐蚀严重 $A_4$		风险研判不到位 $C_6$
	焊缝开裂 $A_5$		管控措施针对性不强 $C_7$
	设备存在缺陷 $A_{20}$	应急管理 $F_{10}$	未及时疏散 $A_9$
	设备带故障运行 $A_{34}$		未及时处置 $A_{16}$
	使用淘汰设备 $C_3$		应急预案制定不完善 $A_{23}$
物料反应 $F_3$	可燃气体泄漏 $A_1$		未采取有效防范措施 $A_{29}$
	形成爆炸性混合气体 $A_{33}$		未编制应急预案 $A_{30}$
职业素养 $F_4$	未经专门培训 $A_3$		应急处置不当 $A_{45}$
	检维修能力缺乏 $A_{22}$	未配备应急救援器材 $C_8$	
	危险性认识不足 $A_{27}$	未定期进行应急救援演练 $C_9$	
	应急处置能力缺失 $A_{40}$	教育培训 $F_{11}$	未配备安全管理人员 $A_6$
	安全意识淡薄 $A_{41}$		安全生产教育培训不到位 $A_{28}$
	安全知识缺失 $A_{47}$	安全投入 $F_{12}$	未安设监测预警系统 $A_{30}$
	安全操作技能缺失 $B_2$		未做好安全技术交底 $B_5$
岗位职责 $F_5$	无证上岗 $A_{10}$		安全装置缺失或失效 $B_6$
	强令冒险作业 $A_{11}$		未提供劳动防护用品 $B_7$
	盲目操作 $A_{12}$		安全生产管理机构缺失 $C_{10}$
	违章冒险作业 $A_{13}$		安全生产资金投入不足 $C_{11}$
	违章指挥 $A_{17}$	监督管理 $F_{13}$	审批把关不严 $A_8$
	监护不到位 $A_{19}$		行政处罚不落实 $A_{14}$
	检修工作不到位 $A_{21}$		执法不严 $A_{18}$
	擅自离开岗位 $A_{25}$		“打非治违”工作不到位 $A_{35}$
	违反操作规程 $A_{26}$		相关部门监管不力 $A_{39}$
	擅自变更生产工艺 $A_{37}$		法律法规不健全 $B_8$
	规章制度 $F_6$	疲劳作业 $B_3$	举报奖励制度不健全 $C_{12}$
违反劳动纪律 $C_4$		经营管理 $F_{14}$	非法生产 $A_{15}$
规章制度不健全 $A_{24}$			未依法取得相关许可 $A_{42}$
规章制度不落实 $C_5$	安全生产责任制不落实 $A_{46}$		
技术规程 $F_7$	生产工艺不合理 $A_{36}$		非法存储危险化学品 $A_{48}$
	操作规程不完善 $A_{38}$	蓄意逃避监管 $A_{49}$	

注:表中 A、B 和 C 分别表示来自文本挖掘、相关文献和政策法规得到的事故初始因素。

第 2 阶段:基于  $\alpha$  水平集的模糊 DEMATEL 法的化工事故关键因素识别。

步骤 1:构建模糊语言直接影响矩阵。据第 1 阶段所确定的化工事故影响因素,记为  $F = \{F_1, F_2, \dots, F_{14}\}$ 。以问卷调查的形式邀请具备丰富的理论知识和实践经验的 5 名相关专家,采用模糊语言对 14 项化工事故影响因素间的直接影响关系打分,集

结不同专家对于影响因素间影响关系的模糊判断信息,构建相应的模糊语言直接影响矩阵,见表 6。

步骤 2:构建模糊直接影响矩阵。根据表 1,将表 6 中的模糊语言直接影响矩阵转换为对应的模糊直接影响矩阵。在此基础上,利用  $\alpha$  水平将模糊直接影响矩阵中的三角模糊数转换为不同  $\alpha$  水平下的区间数,即以  $\alpha = 0.1$  为例,见表 7。



表 9 不同  $\alpha$  水平下的关键因素

Tab.9 Critical factors at different  $\alpha$  levels

$\alpha$	$T_{\alpha}^L$	$T_{\alpha}^M$	$T_{\alpha}^H$
0	$F_1, F_6, F_7, F_8, F_9, F_{11}, F_{13}, F_{14}$	$F_1, F_6, F_7, F_8, F_{11}, F_{13}, F_{14}$	$F_1, F_6, F_7, F_8, F_{11}, F_{13}, F_{14}$
0.1	$F_1, F_6, F_7, F_8, F_9, F_{11}, F_{13}, F_{14}$	$F_1, F_6, F_7, F_8, F_{11}, F_{13}, F_{14}$	$F_1, F_6, F_7, F_8, F_{11}, F_{13}, F_{14}$
0.2	$F_1, F_6, F_7, F_8, F_9, F_{11}, F_{13}, F_{14}$	$F_1, F_6, F_7, F_8, F_{11}, F_{13}, F_{14}$	$F_1, F_6, F_7, F_8, F_{11}, F_{13}, F_{14}$
0.3	$F_1, F_6, F_7, F_8, F_9, F_{11}, F_{13}, F_{14}$	$F_1, F_6, F_7, F_8, F_{11}, F_{13}, F_{14}$	$F_1, F_6, F_7, F_8, F_{11}, F_{13}, F_{14}$
0.4	$F_1, F_6, F_7, F_8, F_9, F_{11}, F_{13}, F_{14}$	$F_1, F_6, F_7, F_8, F_{11}, F_{13}, F_{14}$	$F_1, F_6, F_7, F_8, F_{11}, F_{13}, F_{14}$
0.5	$F_1, F_6, F_7, F_8, F_9, F_{11}, F_{13}, F_{14}$	$F_1, F_6, F_7, F_8, F_9, F_{11}, F_{13}, F_{14}$	$F_1, F_6, F_7, F_8, F_{11}, F_{13}, F_{14}$
0.6	$F_1, F_6, F_7, F_8, F_9, F_{11}, F_{13}, F_{14}$	$F_1, F_6, F_7, F_8, F_9, F_{11}, F_{13}, F_{14}$	$F_1, F_6, F_7, F_8, F_{11}, F_{13}, F_{14}$
0.7	$F_1, F_6, F_7, F_8, F_9, F_{11}, F_{13}, F_{14}$	$F_1, F_6, F_7, F_8, F_9, F_{11}, F_{13}, F_{14}$	$F_1, F_6, F_7, F_8, F_{11}, F_{13}, F_{14}$
0.8	$F_1, F_6, F_7, F_8, F_9, F_{11}, F_{13}, F_{14}$	$F_1, F_6, F_7, F_8, F_9, F_{11}, F_{13}, F_{14}$	$F_1, F_6, F_7, F_8, F_9, F_{11}, F_{13}, F_{14}$
0.9	$F_1, F_6, F_7, F_8, F_9, F_{11}, F_{13}, F_{14}$	$F_1, F_6, F_7, F_8, F_9, F_{11}, F_{13}, F_{14}$	$F_1, F_6, F_7, F_8, F_9, F_{11}, F_{13}, F_{14}$
1	$F_1, F_6, F_7, F_8, F_9, F_{11}, F_{13}, F_{14}$	$F_1, F_6, F_7, F_8, F_9, F_{11}, F_{13}, F_{14}$	$F_1, F_6, F_7, F_8, F_9, F_{11}, F_{13}, F_{14}$
平均	$F_1, F_6, F_7, F_8, F_9, F_{11}, F_{13}, F_{14}$	$F_1, F_6, F_7, F_8, F_9, F_{11}, F_{13}, F_{14}$	$F_1, F_6, F_7, F_8, F_9, F_{11}, F_{13}, F_{14}$

根据各项因素的平均中心度和平均原因度绘制原因-结果图,通过下界、随机以及上界 3 种视角共同反映影响因素在化工事故系统的关键影响程度,如图 2 所示。图中 L、M、H 分别代指 14 项影响因素在下界视角、随机视角以及上界视角下通过 11 个  $\alpha$  水平集结得到的平均中心度和平均原因度。8 项化工事故因素被识别为关键因素,具体包括:极端天气  $F_1$ 、规章制度  $F_6$ 、技术规程  $F_7$ 、隐患排查  $F_8$ 、风险管控  $F_9$ 、教育培训  $F_{11}$ 、监督管理  $F_{13}$ 、经营管理  $F_{14}$ 。上述因素在化工事故系统中的平均原因度大于 0,对于系统内其他因素具有重要影响作用,在化工事故的预防控制中应重点关注。设施设备  $F_2$ 、物料反应  $F_3$ 、职业素养  $F_4$ 、岗位职责  $F_5$ 、应急管理  $F_{10}$ 、安全投入  $F_{12}$  的平均原因度小于 0,在化工事故系统中属于结果因素,在系统中容易被原因因素所影响,与事故的发生具有直接关联。

粒度更细、信息描述更加全面、所得结果更加丰富,能够从不同视角反应出影响因素的波动和变化,可为管理人员提供多视角下关键影响因素的判断结果,为更具针对性的决策制定提供支撑,同时验证了  $\alpha$  水平集在处理模糊信息的有效性、合理性和优越性。

关注关键因素与系统内其他因素之间的关联关系,重视化工安全生产过程安全,在化工事故的预防控制中发挥着重要作用。下面将逐一对各项关键因素及其他因素之间的关联关系展开分析:①  $F_1$  在化工事故系统中属于不可控因素,对  $F_2$ 、 $F_3$  具有直接影响,极易诱发化工事故。如在夏季高温、雷电、暴雨等极端天气下容易影响设施设备的平稳运行,同时对危险化学品的储存和工艺控制产生影响引发物料反应,造成危险化学品泄漏、挥发等问题,进而导致各类化工事故的发生。②  $F_6$ 、 $F_7$  是为确保化工安全生产平稳运行所制定的标准规范和技术文件,对安全生产从业人员的提升  $F_4$  和明确  $F_5$  具有重要作用,同时也是指导  $F_8$  和  $F_9$  工作的基础。若缺乏健全的制度规章体系和行之有效的落实机制,安全生产从业人员难以自觉遵守和履行规章制度及操作规程,同时难以规范、约束和指导隐患排查工作和风险管控工作的开展,难以预防化工事故的发生。③ 科学合理、规范有序地开展  $F_8$  和  $F_9$  工作是持续改善安全生产的重要举措。若在开展过程中存在漏洞和盲区,将无法有效消除  $F_2$  在日常运行中存在的安全隐患,导致  $F_{12}$ 、 $F_{10}$  准备不到位,无法有效保障化工企业安全生产。④  $F_{11}$  是提升化工企业安全管理水平的重要举措,若未引起足够重视将难以提升  $F_4$ ,导致缺乏良好的安全文化氛围,很大程度上制约了化工企业安全生产的有效开展,同时导致  $F_{10}$  准备

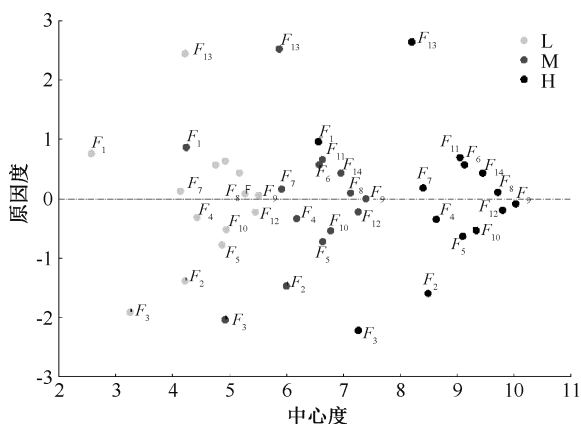


图 2 原因-结果

Fig.2 Cause-result diagram

由表 9 和图 2 可知:  $F_9$  的原因度在 3 个不同视角下出现波动,相较于已有的模糊 DEMATEL 法,文中所采用的方法从多个视角剖析问题,信息处理颗

不足,无法迅速反应和处理紧急事态,最终导致事故范围和影响的扩大。⑤充分发挥出  $F_{13}$  作用,能够有效约束  $F_{14}$  的开展,同时可对  $F_8$  和  $F_9$  工作产生正向影响,反之则导致安全生产主体责任难以得到有效落实,最终造成安全事故发生率居高不下。⑥在  $F_{14}$  开展过程中,部分化工企业存在长期忽视法律法规、蓄意逃避监管等方式获取短期利益等问题,造成安全生产基础薄弱,严重影响  $F_6$  和  $F_7$  以及  $F_{12}$  的落实,最终酿成严重祸端。

在化工生产活动中,化工领域的相关专业人员可依据识别出的关键因素,针对化工生产的薄弱环节制定相应的防范措施,保障安全生产工作平稳运行,有效预防和减少化工生产安全事故的发生。

## 4 结 论

1) 利用文本挖掘技术挖掘出 14 项化工事故影响因素,分别为极端天气、设施设备、物料反应、职业素养、岗位职责、规章制度、技术规程、隐患排查、风险管控、应急管理、教育培训、安全投入、监督管理、经营管理。

2) 在 14 项化工事故影响因素中,采用基于  $\alpha$  水平集的模糊 DEMATEL 法识别出 8 项关键因素,分别为极端天气、规章制度、技术规程、隐患排查、风险管控、教育培训、监督管理、经营管理。化工企业可参照识别出的关键因素制定相应的安全管理措施,加强安全生产,降低事故发生率。

## 参 考 文 献

- [1] 张圣柱,王旭,魏利军,等. 2016—2020 年全国化工和危险化学品事故分析研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(10): 119-126.  
ZHANG Shengzhu, WANG Xu, WEI Lijun, et al. Analysis and research on chemical and hazardous chemicals accidents in China during 2016-2020[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2021, 17(10): 119-126.
- [2] 王伟,刘志云,崔福庆,等. 1981—2020 年我国较大及以上危化品事故统计分析与对策研究[J]. 应用化工, 2021, 50(8): 2 187-2 193.  
WANG Wei, LIU Zhiyun, CUI Fuqing, et al. Statistical analysis and countermeasures of large and above chemical accidents in China during 1981-2020[J]. Applied Chemical Industry, 2021, 50(8): 2 187-2 193.
- [3] 李娜,陈建宏. 2013—2019 年我国危险化学品统计分析[J]. 应用化工, 2020, 49(5): 1 261-1 265.  
LI Na, CHEN Jianhong. Statistical analysis of dangerous chemicals in China from 2013 to 2019[J]. Applied Chemical Industry, 2020, 49(5): 1 261-1 265.
- [4] WANG Bing, LI Dinglin, WU Chao. Characteristics of hazardous chemical accidents during hot season in China from 1989 to 2019: a statistical investigation [J]. Safety Science, 2020, 129: DOI: 10. 1016/j. ssci. 2020. 104788.
- [5] JING Sifeng, LIU Xiwei, GONG Xiaoyan, et al. Correlation analysis and text classification of chemical accident cases based on word embedding[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2022, 158: 698-710.
- [6] 牛毅,樊运晓,高远. 基于数据挖掘的化工生产事故致因主题抽取[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(10): 165-170.  
NIU Yi, FAN Yunxiao, GAO Yuan. Topic extraction on causes of chemical production accidents based on data mining[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15(10): 165-170.
- [7] 李鑫,阳富强. 危化品事故人为因素关联规则挖掘与分析[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(11): 134-139.  
LI Xin, YANG Fuqiang. Human factor association rules mining and analysis for hazardous chemical accidents[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(11): 134-139.
- [8] 吴林海,张秋琴,山丽杰,等. 影响企业食品添加剂使用行为关键因素的识别研究:基于模糊集理论的 DEMATEL 方法[J]. 系统工程, 2012, 30(7): 48-54.  
WU Linhai, ZHANG Qiuqin, SHAN Lijie, et al. Study on identifying critical factors of using behavior of food additives in enterprises: a fuzzy DEMATEL method[J]. Systems Engineering, 2012, 30(7): 48-54.
- [9] MIHALCEA R, TARAU P. TextRank: bringing order into text [C]. Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing, 2004: 404-411.
- [10] BRIN S, PAGE L. The anatomy of a large-scale hypertextual Web search engine [J]. Computer Networks and ISDN Systems, 1998, 30(1): 107-117.
- [11] ZHANG Zixin, WANG Liang, WANG Yingming, et al. A novel alpha-level sets based fuzzy DEMATEL method considering experts' hesitant information [J]. Expert Systems with Applications, 2023, 213: DOI: 10. 1016/j. eswa. 2022. 118925.
- [12] 十三届全国人民代表大会常务委员会第二十九次会议. 中华人民共和国安全生产法(修正)[L]. 2021-06-10.
- [13] WANG Yingming. Centroid defuzzification and the maximizing set and minimizing set ranking based on alpha level sets[J]. Computers & Industrial Engineering, 2009, 57(1): 228-236.

作者简介: 王亮 (1987—),男,陕西周至人,博士,副教授,主要从事决策理论与方法研究。E-mail: wangliangg322@hotmail.com。

