

引用本文

陈文涛,高幸,孙超,等.基于 LDA-DEMATEL-ISM 的燃气泄漏事故致因因素研究[J].消防科学与技术,2026,45(5):1-8.

Chen Wentao, Gao Xing, Sun Chao, et al. Research on causal factors of gas leakage accidents based on LDA-DEMATEL-ISM[J]. Fire Science and Technology, 2026, 45(5): 1-8.

基于 LDA-DEMATEL-ISM 的燃气泄漏事故致因因素研究

陈文涛^{1,2}, 高 幸¹, 孙 超², 王文和³, 杨志全¹, 刘超林²

(1. 昆明理工大学 公共安全与应急管理学院, 云南 昆明 650031;

2. 应急管理部信息研究院, 北京 100029;

3. 重庆科技大学 安全科学与工程学院, 重庆 401331)

摘 要:为探究燃气泄漏事故致因因素间的内在作用关系,识别关键致因及根源致因因素,收集 148 份燃气泄漏事故调查报告作为文本数据,运用潜在狄利克雷分布(Latent Dirichlet Allocation, LDA)模型进行主题挖掘,结合文献分析识别归纳 18 项事故致因因素,采用集成决策实验室分析(Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory, DEMATEL)与解释结构模型(Interpretive Structural Modeling, ISM)方法,绘制因素原因-结果图,构建多级递阶层次结构模型,以确定各因素的因果属性及其在系统中的作用地位,明确因素间的层次关系与传导路径。结果表明,燃气泄漏事故致因因素呈现出 5 级递阶结构,其中安全监管不到位与安全教育培训落实不足是根源致因,而违规操作与附属设备设施失效等是事故最直接的表层致因;识别出的 11 条从根源至表层的关键事故致因链,揭示了燃气泄漏事故致因间的多级传导路径,为事故防控提供了明确的方向。

关键词:燃气泄漏事故;致因因素;LDA 模型;DEMATEL-ISM 方法;风险分析

中图分类号:X937;X928.7 文献标志码:A DOI:10.20168/j.1009-0029.2026.05.0001.08

Research on causal factors of gas leakage accidents based on LDA-DEMATEL-ISM

Chen Wentao^{1,2}, Gao Xing¹, Sun Chao², Wang Wenhe³, Yang Zhiquan¹, Liu Chaolin²

(1. School of Public Safety and Emergency Management, Kunming University of Science and Technology, Kunming Yunnan 650031, China; 2. Information Research Institute of the Ministry of Emergency Management, Beijing 100029, China; 3. School of Safety Science and Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China)

Abstract: To explore the intrinsic relationships among the contributing factors of gas leakage accidents and identify the key and root causes, this study collected 148 gas leakage accident investigation reports as textual data. The Latent Dirichlet Allocation (LDA) model was applied for topic mining, and 18 accident causative factors were identified and summarized through literature analysis. An integrated approach combining the Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory (DEMATEL) and Interpretive Structural Modeling (ISM) was adopted to plot cause-and-result diagrams of the factors and construct a multi-level hierarchical structure model. This allowed for determining the causal attributes of each factor and their roles within the system, as well as clarifying the hierarchical relationships and transmission paths among the factors. The results show that the causal factors of gas leakage accidents exhibit a five-level hierarchical structure. Among them, inadequate safety supervision

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2024YFC3017000)

作者简介: 陈文涛, 应急管理部信息研究院信息资源所, 副研究员, 主要从事安全科学与工程学科建设、城市安全风险评估、应急工程技术及数据挖掘分析等研究, 北京市朝阳区芍药居 35 号文学馆路中煤信息大厦 205, 100029。

通信作者: 高幸, 昆明理工大学公共安全与应急管理学院硕士研究生, 18334234940@163.com。

收稿日期: 2025-04-25; 修回日期: 2025-11-11

and insufficient implementation of safety education and training are identified as root causes, while violations of operating procedures and failures of auxiliary equipment and facilities are the most direct surface-level causes. A total of 11 key causal chains from root causes to surface-level factors were identified, revealing the multi-level transmission paths among the causes of gas leakage accidents and providing clear directions for accident prevention and control.

Key words: gas leakage accident; causative factors; LDA model; DEMATEL-ISM method; risk analysis

近年来,随着我国城镇燃气管网建设规模的不断扩大,燃气泄漏事故频发,据《全国燃气事故分析报告》统计,我国2020年—2024年6月燃气安全事故总数约为3 370起,死亡人数超360人,受伤人数达2 400以上^[1]。重大燃气泄漏爆炸事故等对城市公共安全的影响范围极大,严重威胁人民群众的生命财产安全。燃气泄漏事故具有突发、隐蔽、易扩散的特点,探究燃气泄漏事故致因已成为国内外学者的研究热点。各学者研究成果丰硕,如:LI F等^[2]运用基于决策试验和评价试验法的解释结构模型与贝叶斯集成方法(DEMATEL-ISM-BN)对城市埋地燃气管网事故致因因素进行分析,重点探究事故致因因素关联关系;QU Y等^[3]以事故调查报告为分析对象,运用决策树和关联规则探究燃气事故特征和因果关系,挖掘完整的事故因果链;胡涛等^[4]基于SIF(Safety Information Flow, SIF)事故致因模型和DEMATEL方法识别和分析城市燃气爆炸事故致因因素相关关系并确定关键性影响因素;郑彬彬等^[5]基于文本挖掘对城镇燃气事故致因进行关联分析,强调泄漏事故是城镇燃气中最常见的事故类型;孙逸林等^[6]引入复杂网络和PageRank算法并运用AcciMap模型构建“6·13”重大事故整体与个体因素的特征系统,以此得出致因因素链;向鹏成等^[7]以城市地下燃气管道泄漏事故为研究对象,建立物理-事理-人理-环境(WSRH)分析框架识别事故致因,进而利用集成DEMATEL-ISM方法分析事故致因的关联关系和系统的关键失效路径;王文和等^[8]基于调研、典型事故构建人、机、环境、管理、信息的地下管廊火灾事故致因因素指标体系,探究因素间的交互作用关系。

综上,燃气泄漏事故致因研究虽在方法创新上取得了进展,但仍存在事故致因因素指标依赖主观经验,隐性致因因素挖掘分析薄弱的局限。本文基于潜在狄利克雷分布(Latent Dirichlet Allocation, LDA)主题模型和DEMATEL方法,提出“文本挖掘-主题词归纳-识别致因因素”的综合分析框架,采用LDA主题建模分析事故调查报告文本,提取燃气泄漏的致因主题,全面识别、梳理燃气泄漏事故致因因素。

目前,文本挖掘技术已运用于船舶运输^[9]、民航飞行^[10]以及水利施工^[11]等多个领域,高效处理大量文本信息的同时,还能深入挖掘文本中潜在的信息模

式,基于算法分析减少主观因素的影响,能够为本文研究提供更客观的事故致因信息。因此,本文将在LDA主题模型对燃气泄漏事故调查报告文本进行事故致因主题识别、筛出具有代表性因素的基础上,识别燃气泄漏事故致因因素,并运用DEMATEL-ISM方法进行量化分析,获取关键的事事故致因因素和层次结构模型,明晰事故根源致因和因素间的传导路径,为预防燃气泄漏事故提供参考。

1 燃气泄漏事故致因分析流程

基于全国各省市应急管理局(厅)官方网站查找2015—2024年已公布的燃气泄漏事故调查报告,最终筛选出148份燃气泄漏事故调查报告作为挖掘样本。对事故调查报告文本进行预处理,包括编辑自定义词典、增加部分停用词词汇以及同义词合并处理;之后,运用LDA主题模型对文本进行语料分析,提取事故特征词,并获得燃气泄漏事故主题,根据主题分类归纳燃气泄漏事故致因因素;采用DEMATEL方法深入研究各致因因素之间的作用关系,计算出各致因因素的重要度,以达到挖掘事故关键致因因素的目的,并结合ISM方法获得燃气泄漏事故致因因素多级递阶结构模型,确定根源致因。分析过程如图1所示。

2 基于LDA的事故致因因素识别

2.1 文本预处理

文本数据预处理过程包括jieba分词、去停用词以及合并同义词。为将收集的事故调查报告整理为算法可识别的文件,采用jieba分词的精确模式对文本语料进行划分。由于事故调查报告中包含专业术语,因此,先根据停用词词表进行分词,遍历初步分词结果,结合构建的燃气泄漏事故自定义词典进行挖掘分析,以避免连贯的专业词汇被切分。例如:“现场作业人员在施工方案未经审批且未实施有效物探的情况下,违规施工冒险作业”可能会被错误切分为“现场/作业/人员/在/施工/方案/未/经/审批/且/未/实施/有效/物探/的/情况/下/违规/施工/冒险/作业”,导致“作业人员”“施工方案”“冒险作业”这样的关键概念被切分,不能准确地表达原有的意思。因此,在停用词词表基础上增加初始分词结果中不需要的无意义字词,如“不”“未”“下”等,再将“作业人员”“施工

方案”“冒险作业”等诸如此类的专门名称添加至自定义词典中;同时,将“液化气”“液化石油气”等含义相

近的词统称为“液化气”,不断发现和解决分词处理、停用词读取、近义词替换过程中的问题。

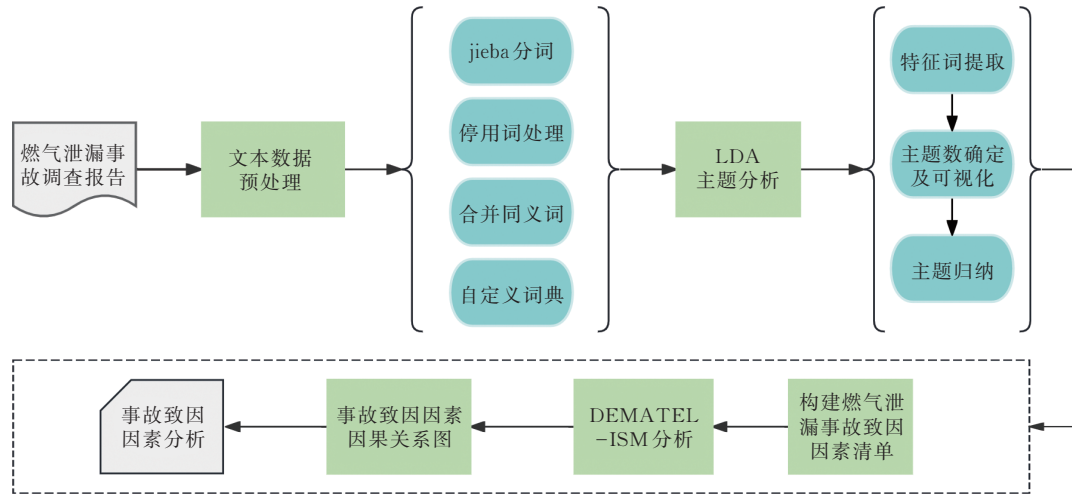


图1 燃气泄漏事故致因分析流程

Fig. 1 Analysis process of gas leakage accidents

2.2 燃气泄漏事故主题特征分析

2.2.1 LDA主题模型

LDA主题模型是一个无监督学习过程,基于BLEI D M等^[12]提出的基于概率的主题模型,利用两个先验分布 α 和 β 来建模,进而识别文本数据中潜在的主题结构,即主题分布和主题词汇。建模过程主要分为两步。一是文档生成过程:先依据先验分布 α 确定文档中各主题比例,随后从这些主题中随机选取一个主题 Z ,再根据先验分布 β ,从与主题 Z 相关的词汇中随机挑选一个词 W ,不断重复,从而生成隐含多个主题的文档。二是模型训练:通过不断迭代模拟上述文档生成过程,将文档表示为潜在主题的随机混合,最终以主题词分布表征文档与主题、主题与词汇间的关系。相较于传统文本分析方法,LDA能通过概率建模自动挖掘文本中隐藏的主题关联,无须人工标注类别,在处理大规模、无标注的文本数据时具备更强的灵活性与实用性。LDA主题建模过程如图2所示。

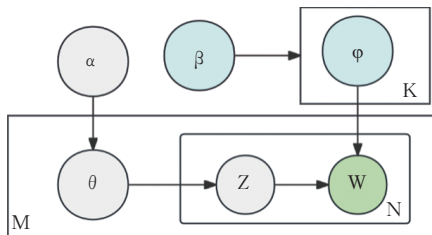


图2 LDA主题建模结构

Fig. 2 Structure of LDA topic modeling

在建立LDA主题模型时,主题数量的设定需要合理可行,主题数量过小会导致主题区分度不够,主题数量过大会导致模型过拟合,各个主题之间存在交叉重叠。为此,引入困惑度来确定合适的主题数。困

惑度是指对于某一个特定的文档术语,某一主题的不确定程度,困惑度越小则表示该模型区分度越高,模型结果越好,主题数目较优。其计算如式(1)所示。

$$p(D) = \exp \left(\frac{\sum_{d=1}^M \ln p(W_d)}{\sum_{d=1}^M N_d} \right) \quad (1)$$

式中: $p(D)$ 为困惑度; M 为文档数; N_d 为 d 篇文档中包含的单词数量; W_d 为第 d 个文档中的词序列; $p(W_d)$ 为LDA模型对文档 d 生成词序列的概率。

2.2.2 事故主题特征词提取与事故致因分类

将预处理后的文本导入LDA主题模型,计算得出困惑度变化曲线,如图3所示。

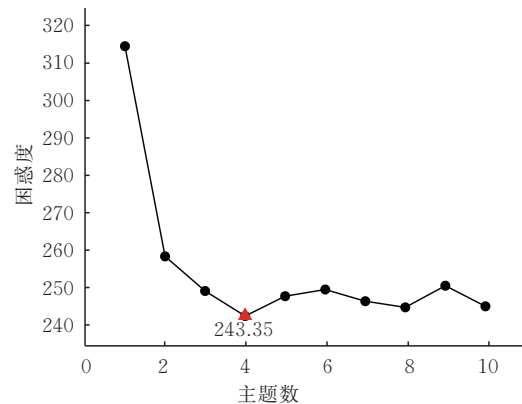


图3 主题困惑度曲线

Fig. 3 Topic perplexity curve

从图3中可以看出,主题数为4时,困惑度达到最小值,再结合模型可视化效果可以观察出此时各个主题分明,没有重叠交叉,如图4所示。因此,确定最佳主题数为4。

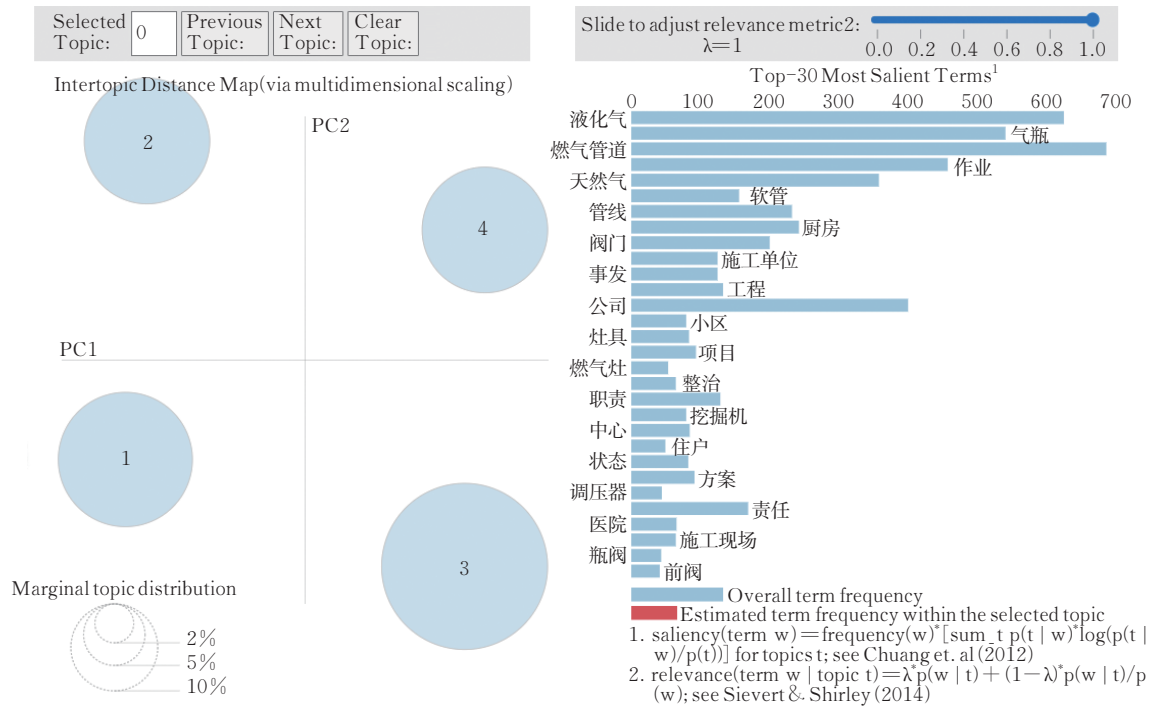


图4 主题数为4时的模型可视化效果

Fig. 4 The model's visualization effect with 4 topics

在Python中输入最优主题数构建LDA模型,提取燃气泄漏事故文本中的潜在致因主题,获取每个主题中权重占比前15位的主题特征词;为了直观地梳理和归纳LDA主题识别结果,将主题特征词按照人-物-环-管4个维度进行文本分类,如图5所示。

以上述主题特征词及其在人-物-环-管维度下的分类为基础,将LDA模型挖掘的潜在主题转化为具象化的致因因素。如将“阀门”“软管”等归纳为设备缺陷,将“处置”“抢修”等归纳为人为致因。这一转化为后续构建系统性的致因因素指标体系奠定了基础。

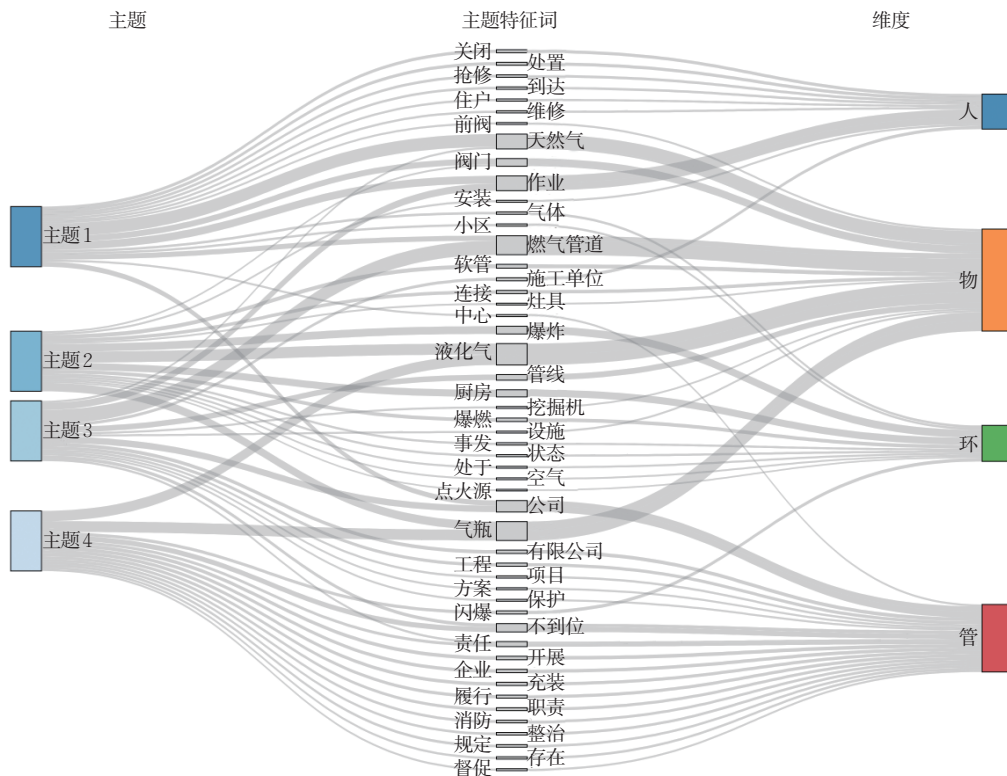


图5 各主题及其特征词分类可视化结果

Fig. 5 Visualization results of classification of various topics and their feature words

2.3 基于LDA构建致因因素指标体系

目前,已有诸多学者从不同的视角对燃气泄漏事故的致因因素进行识别研究,研究成果丰富。HALIM S Z等^[13]基于数据库信息对比梳理美国、加拿大以及欧洲相关燃气协会数据统计中所涉及的致因因素,根据因果关系挖掘潜在致因;DING J S等^[14]、DENG Q等^[15]、付邦稳等^[16]则分别运用不同分析方法从风险因素耦合角度梳理燃气泄漏事故致因因素;TIAN J X等^[17]、吕良海等^[18]、张小良等^[19]以室

内燃气或城市燃气等不同类别对象为研究主体,对燃气泄漏事故致因因素进行识别并开展风险评估研究;王艺钦等^[20]根据事故调查报告梳理划分事故不安全行为,并运用Apriori算法挖掘最易发生的行为因素;孙逸林等^[21]以典型事故为例,运用AcciMap模型系统辨识事故致因,根据系统整体与个体因素属性特征确定事故关键致因。

对基于LDA主题分析归纳的燃气泄漏事故致因因素进行扩展和细化,汇总如表1所示。

表1 基于LDA模型及文献分析的事故致因因素清单

Table 1 LDA-based and literature-analyzed list of accident causation factors

维度	事故致因因素	简要释义
人的因素	违规操作 X_1	第三方施工破坏,违章指挥、违规作业;私改接燃气设施等
	安全意识淡薄 X_2	误操作、侥幸心理冒险作业;长期不关闭瓶阀,用气习惯不良等
	安全知识技能不足 X_3	未组织或未参加安全教育培训或应急演练活动
	应急处置不当 X_4	应急处置错误或缺乏应急能力
物的因素	使用不合格产品 X_5	燃气管道或气瓶本身质量缺陷、焊接缺陷等
	附属设备设施失效 X_6	法兰、瓶阀、密封圈等破损,缺少燃气报警装置等
	设计安装缺陷 X_7	管道布局、埋深及安全保护层不合理,气瓶瓶体、瓶阀等附件设计不符合标准等
	腐蚀老化 X_8	管道超服役、土壤腐蚀;气瓶超出设计使用年限、胶管老化破损等
环境因素	城市社会活动影响 X_9	管网改造、路面交通压力,违规改造相关设备设施等
	自然灾害影响 X_{10}	极端天气、地震、洪涝等灾害的影响
	其他环境因素 X_{11}	土壤扰动/沉降,地下空间受限等;密闭环境通风不良、气瓶储存环境不良等
管理因素	安全监管不到位 X_{12}	相关部门安全监管力度不足,燃气公司或相关单位无资质或资质不符等
	安全投入不足 X_{13}	管理人员配备不足、应急物资不够等
	安全教育培训落实到位 X_{14}	燃气企业或建设单位未严格落实安全教育培训、应急演练活动等
	安全管理制度不健全 X_{15}	管道维修保养、气瓶回收管理、作业规程不完善等
	事故应急管理体系不健全 X_{16}	燃气企业或建设单位应急预案不完善、应急资源保障不足、应急处置流程不规范等
	现场安全监管不到位 X_{17}	缺少作业安全技术交底等安全资料、监理单位监管与反馈不及时,操作工无证上岗等
	多元协同管理不充分 X_{18}	属地相关部门、燃气公司与建设施工单位对接沟通不畅、信息了解不充分等

3 燃气泄漏事故致因因素分析

3.1 DEMATEL-ISM原理

DEMATEL能够充分利用专家经验,结合因果图来描述各因素之间的关系以及因素在系统中的重要程度,有利于控制系统风险时提出针对性的对策^[22]。而ISM能够充分分析复杂系统中要素间的关系,揭示系统层级结构关系,二者结合既可以判断分析关键事故致因因素及其影响程度,也可以明确事故致因因素之间的逻辑关系和层级结构。具体分析步骤如下。

1)构建原始直接影响关系矩阵。因素之间的影响程度通过邀请 n 位专家进行评估,根据因素之间的影响分为无、较弱、一般、较强、很强5个级别,并赋值0、1、2、3、4,获取 n 个专家评分后,计算平均分,由此得到原始直接影响矩阵。

2)直接影响矩阵归一化处理。计算得到归一化直接影响矩阵 $N=(n_{ij})_{m \times n}$ 。分别计算出矩阵 N 的行

和 r_i 、列和 c_j ,找出行和中的最大值 r 和列和中的最大值 c ,计算 $M=\max\{r, c\}$,归一化处理得到直接影响矩阵,如式(2)所示。

$$x_{ij} = \frac{a_{ij}}{M} \quad (2)$$

3)计算综合影响矩阵 T ,如式(3)所示。

$$T = N(1 - N)^{-1} \quad (3)$$

4)计算综合影响矩阵 T 的相关指标,即影响度 C_i 、被影响度 G_j 、中心度 M_i 和原因度 R_i 。其中,影响度是综合影响矩阵各行值的总和,表示每行对应的因素对其他因素的影响;被影响度是矩阵各列值的总和,表示每列对应的因素受其他因素的影响;二者之和为中心度,两者之差为原因度,各指标计算公式如式(4)~式(7)所示。

$$C_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} \quad (4)$$

$$G_j = \sum_{i=1}^n a_{ij} \quad (5)$$

$$M_i = C_i + G_j \quad (6)$$

$$R_i = C_i - G_j \quad (7)$$

5)以中心度、原因度为横纵坐标绘制因果关系图,以便于进一步判断关键事故致因因素。

6)在综合影响矩阵 T 的基础上计算整体影响矩阵 H ,并计算可达矩阵 K ,如式(8)、式(9)所示。

$$H = E + T \quad (8)$$

$$k_{ij} = \begin{cases} 1, & h_{ij} \geq \lambda \\ 0, & h_{ij} < \lambda \end{cases}, i, j = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

其中,阈值 $\lambda \in [0, 1]$,根据对比试验法确定最优值进行计算; k_{ij} 表示因素 X_i 对 X_j 的影响, $k_{ij}=1$ 表示有直接影响, $k_{ij}=0$ 表示没有直接影响。

7)构建各因素的可达集合 $R(X_i)$ 和前因集合 $S(X_i)$,如式(10)、式(11)所示。

$$R(X_i) = \{X_j | X_j \in Z, m_{ij} \neq 0\}, i, j = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

$$S(X_i) = \{X_i | X_i \in Z, m_{ji} \neq 0\}, i, j = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

8)因素验证。对各致因因素进行验证,验证成立,则在可达矩阵中删除相应的行和列,见式(12)。

$$R(X_i) = R(X_i) \cap S(X_i), i = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

重复步骤7)、8),确定各因素层级,直到可达矩阵中的所有因素被删除,构建出多层递阶结构模型。

3.2 DEMATEL 分析

基于LDA模型构建的致因因素指标体系,本研究以调查问卷方式邀请了6位相关方向的科研工作者、燃气领域的专家及工作人员对各致因因素之间的关系进行评分,各专家评分的权重一样。运用DEMATEL方法计算得出综合影响矩阵各指标,根据原因度划分原因因素和结果因素,详见表2。

影响度越大,表明该因素对其他因素的影响程度越大;被影响度值越大,表明该因素越容易受到其他因素的影响。由表2可知,安全监管不到位(X_{12})对其他因素的影响程度最大,附属设备设施失效(X_6)对其他因素的影响程度最小;多元协同管理不充分(X_{18})更容易受到其他致因因素的影响,而其他环境因素(X_{11})很难被其他致因因素所影响。

根据表2中的原因度和中心度,绘制以中心度为横坐标、原因度为纵坐标的燃气泄漏事故致因因素因果关系图,如图6所示。

各因素的中心度越大,说明其在系统中的影响程度越大,与其他因素的关联性越强,在系统中的重要性越突出;原因度反映因素对其他因素的驱动性,当原因度 >0 时,称该因素为原因因素,原因度 <0 时,则称为结果因素,表现为较强的被动性。

表2 DEMATEL 分析结果

Table 2 Analysis results of DEMATEL

因素	C_i	G_j	R_i	M_i	M_i 排序	属性
X_1	0.19	0.53	0.72	-0.34	12	结果因素
X_2	0.78	0.44	1.22	0.34	4	原因因素
X_3	0.88	0.58	1.46	0.30	6	原因因素
X_4	0.18	0.75	0.92	-0.57	16	结果因素
X_5	0.62	0.32	0.94	0.31	5	原因因素
X_6	0.03	0.27	0.30	-0.24	9	结果因素
X_7	0.20	0.55	0.75	-0.34	13	结果因素
X_8	0.12	0.73	0.85	-0.62	17	结果因素
X_9	0.16	0.46	0.62	-0.30	11	结果因素
X_{10}	0.12	0.26	0.38	-0.14	10	结果因素
X_{11}	0.20	0.05	0.25	0.14	7	原因因素
X_{12}	2.14	0.38	2.52	1.76	1	原因因素
X_{13}	1.68	0.75	2.43	0.94	2	原因因素
X_{14}	1.31	0.64	1.95	0.68	3	原因因素
X_{15}	1.01	0.91	1.91	0.10	8	原因因素
X_{16}	0.69	1.23	1.92	-0.54	15	结果因素
X_{17}	0.48	1.55	2.03	-1.06	18	结果因素
X_{18}	1.64	2.04	3.67	-0.40	14	结果因素

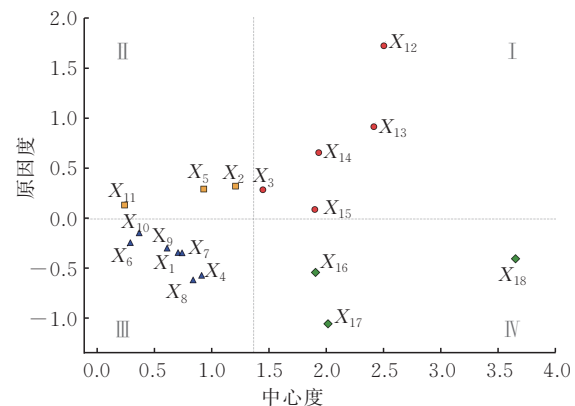


图6 燃气泄漏事故致因因素因果关系图

Fig. 6 Cause-effect diagram of contributing factors for gas leakage accidents

由图6可知,象限I中的因素具有较高的中心度与正原因度,表明其影响范围广且驱动性强,属于系统中的核心原因因素;象限II中的因素中心度高但原因度为负,说明其虽处于关键位置,但更易受其他因素影响,属于关键结果因素;象限III中的因素原因度为正,具有一定的驱动性,但中心度较低,影响范围有限,属于次要原因因素;象限IV中的因素中心度低且原因度为负,表明其在系统中影响较弱、依赖性较强,属于边缘结果因素。因此,在制定燃气泄漏事故风险防控策略时,应优先管控象限I中的核心原因因素,从源头削弱其对其他因素的驱动效应,以实现风险传导路径的系统性阻断。

3.3 ISM 分析

基于 DEMATEL 分析建立 ISM 模型,在构建多级递阶结构模型过程中,阈值 λ 的取值对可达矩阵的稀疏度及最终层级结构的划分具有直接影响。为确定合理阈值,在 λ 的取值范围内采用赋值法进行对比分析^[23],具体结果如图7所示。

当 $\lambda \geq 0.5$ 时,ISM 层级划分结果较为稀疏,难以反映致因因素间的关联性;结合综合影响矩阵的统计分布特征,选定 $\lambda=0.03$ 作为最佳阈值。最终将燃气泄漏事故致因因素分为5个层级,如图8所示。

由图8可知,ISM 结构模型将燃气泄漏事故致因因素划分为5个层次3个类别:表层因素 X_1 、 X_4 、 X_6 、 X_8 、 X_{17} 是事故最直接的表现,受下层因素驱动;中间层因素 X_2 、 X_3 、 X_5 、 X_7 等11项作为间接致因,承接下层影响并作用于上层;根源因素 X_{12} 、 X_{14} 则是事故发生的本质原因,以多种方式直接或间接影响整个系统。

结合 DEMATEL 分析,安全监管不到位(X_{12})中心度最高,对系统影响最为显著,是燃气泄漏事故的关键致因因素。

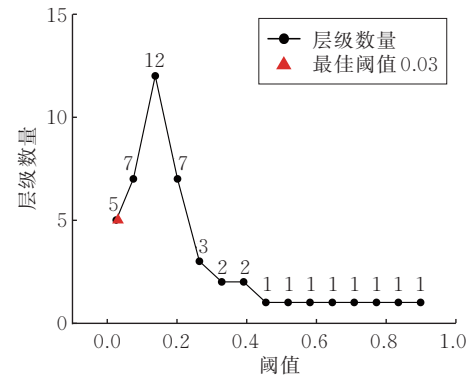


图7 基于不同阈值的ISM层级划分结果

Fig. 7 Results of ISM hierarchical division under different thresholds

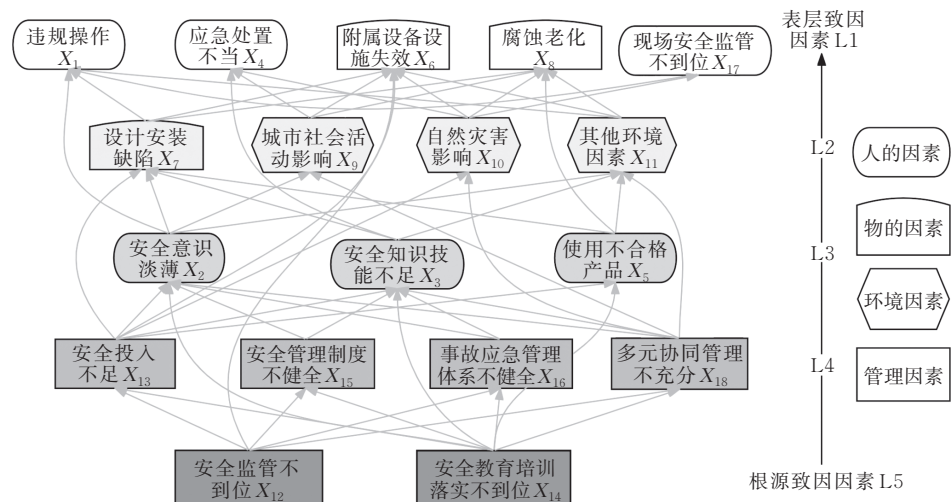


图8 燃气泄漏事故致因因素递阶层次关系

Fig. 8 Hierarchical relationship diagram of the gas leakage accident causal factors

据此,以根源因素为起点,归纳出11条关键事故致因链,具体如表3所示。

表3 基于ISM模型的事故致因链分析

Table 3 Analysis of causal chains of based on ISM model

根源因素	传导路径	解释说明
X_{12}	$X_{12} \rightarrow X_{13} \rightarrow X_7 \rightarrow X_6 \rightarrow \text{事故}$	设备本质安全弱化链
	$X_{12} \rightarrow X_{13} \rightarrow X_8 \rightarrow \text{事故}$	设备老化失修失效链
	$X_{12} \rightarrow X_{15} \rightarrow X_5 \rightarrow X_8 \rightarrow \text{事故}$	产品安全质量失效链
	$X_{12} \rightarrow X_{15} \rightarrow X_{17} \rightarrow X_1 \rightarrow \text{事故}$	施工现场监管失效链
	$X_{12} \rightarrow X_{16} \rightarrow X_3 \rightarrow X_4 \rightarrow \text{事故}$	应急响应失效链
	$X_{12} \rightarrow X_{18} \rightarrow X_9 \rightarrow X_6 \rightarrow \text{事故}$	环境影响及联动失效链
	$X_{12} \rightarrow X_{18} \rightarrow X_3 \rightarrow X_1 \rightarrow \text{事故}$	主体协同管理失效链
X_{14}	$X_{14} \rightarrow X_2 \rightarrow X_1 \rightarrow \text{事故}$	安全意识缺失链
	$X_{14} \rightarrow X_3 \rightarrow X_1 \rightarrow \text{事故}$	安全认知缺失链
	$X_{14} \rightarrow X_3 \rightarrow X_4 \rightarrow \text{事故}$	应急技能缺失链
	$X_{14} \rightarrow X_{17} \rightarrow X_1 \rightarrow \text{事故}$	安全监管能力弱化链

由表3可知,关键事故致因链清晰地揭示了事故形成的多级传导机制,即“根源驱动→传导放大→触发事故”。L5层,安全监管不到位(X_{12})与安全教育培训落实不到位(X_{14})作为根源致因,在管理与认知层面埋下系统性隐患,进而引发安全投入不足(X_{13})、制度体系不健全(X_{15} 、 X_{16})以及协同管理薄弱(X_{18})等深层问题;L4层的因素进一步放大了整体风险,具体表现为制度建设不完善、应急能力缺失与协同联动不充分;风险继续向L3与L2层传导,体现为人员安全意识与技能不足(X_2 、 X_3)、外部环境影响(X_9 、 X_{10})等中间因素,将管理缺陷逐步传递至作业现场;最后,L1层的违规操作(X_1)、设备失效(X_6)等直接致因成为风险传导链的最终爆发点。

因此,燃气泄漏事故是多层级致因协同作用的结果,其防控须从L5层根源入手,通过强化监管体系与

严格落实安全教育,系统性推动L4层安全投入与制度优化完善,并加强对L3~L1层产品质量的控制、人员安全素质的提升以及对外部环境潜在影响的关注,通过多级管控、协同干预,从根本上切断事故致因链。

4 结 论

1)运用LDA主题建模方法对148份事故报告进行文本挖掘分析,基于获取的文本主题-主题词结合文献分析从人-物-环-管4个维度识别归纳了18项燃气泄漏事故致因因素,构建了基于LDA主题模型的燃气泄漏事故致因体系。

2)运用DEMATEL-ISM方法进行量化分析和层次分级,计算出各致因因素的影响度、被影响度、原因度与中心度,并构建了ISM多级递阶结构模型。燃气泄漏事故致因可划分为5个层级3个类别,即根源致因、过渡致因和直接致因。结果表明,安全监管不到位是燃气泄漏事故的关键根源致因因素,以根源致因因素为起点的11条关键事故致因链揭示了从根源致因到直接致因的完整传导路径。

3)将文本挖掘与DEMATEL-ISM方法相结合,为复杂事故致因分析提供了一种合理可行的方法框架。分析结果表明了燃气泄漏事故防控的重点及路径,提示事故预防应从安全监管与安全教育根源入手,逐级阻断风险传导链条。研究为实现从被动应急到主动预防的战略转变提供了理论依据与决策支持。

参考文献:

- [1] 中国城市燃气协会安全管理工作委员会中国燃气安全杂志社. 全国燃气事故分析报告(2023年第四季度暨全年综述)[EB/OL]. [2025-03-16]. <https://mp.weixin.qq.com/s/geFeoHhnzs-AoFDt7xIM01Q>.
- [2] LI F, WANG W H, DUBLJEVIC S, et al. Analysis on accident-causing factors of urban buried gas pipeline network by combining DEMATEL, ISM and BN methods[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2019, 61: 49-57.
- [3] QU Y, WANG X M. Analysis of the characteristics and causes of city gas explosion accidents based on DT-AR algorithm[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2024, 46(4): 9057-9068.
- [4] 胡涛, 林卫东, 李益平, 等. SIF事故致因模型与DEMATEL方法在城市燃气安全管理中的应用[J]. 安全与环境工程, 2023, 30(6): 113-120, 129.
- [5] 郑彬彬, 冯婷婷, 王佳贺, 等. 基于文本挖掘的城镇燃气事故致因及关联分析[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(7): 190-195.
- [6] 孙逸林, 郑小强, 刘险峰, 等. 重大城市燃气管道泄漏爆炸事故定量分析方法研究: 以湖北十堰“6·13”事故为例[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(6): 3312-3320.
- [7] 向鹏成, 张子薇, 李卉, 等. 城市地下燃气管道泄漏事故致因因素系统分析[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(12): 140-147.
- [8] 王文和, 朱正祥, 米红甫, 等. 基于DEMATEL-ISM的城市地下综合管廊火灾事故影响因素研究[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(3): 793-800.
- [9] 邵波, 刘巧, 柯善钢, 等. 融合LDA-BN的船舶碰撞事故致因分析[J]. 安全与环境学报, 2025, 25(1): 157-164.
- [10] 汪磊, 安佳宁, 史少铭. 基于文本挖掘的民航飞行风险评价指标研究[J]. 安全与环境学报, 2025, 25(3): 825-834.
- [11] 陈述, 孙孟文, 陈云, 等. 基于无监督LDA的水电工程施工安全事故致因分析[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(10): 79-85.
- [12] BLEI D M, NG A Y, JORDAN M I. Latent dirichlet allocation [J]. Journal of Machine Learning Research, 2003, 3: 993-1022.
- [13] HALIM S Z, YU M X, ESCOBAR H, et al. Towards a causal model from pipeline incident data analysis[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2020, 143: 348-360.
- [14] DING J S, HAN X F, NI L. Research on multi factor coupling accident triggering mechanism and accident risk control of gas pipeline leakage[J]. Emergency Management Science and Technology, 2024, 4(1): 118-128.
- [15] DENG Q, WANG K, WU J H, et al. An integrated model for evaluating the leakage risk of urban gas pipe: A case study based on Chinese real accident data[J]. Natural Hazards, 2023, 116(1): 319-340.
- [16] 付邦稳, 蒋宏业, 徐涛龙, 等. 基于N-K模型的城市燃气管道失效可能性因素耦合分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(2): 145-149.
- [17] TIAN J X, LV S R. A risk assessment model of gas pipeline leakage based on a fuzzy hybrid analytic hierarchy process[J]. Sustainability, 2024, 16(20): 8797.
- [18] 吕良海, 梁艺苑, 张溪彬, 等. 模糊DBN的室内燃气泄漏动态风险评估方法研究[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(4): 1337-1345.
- [19] 张小良, 梁梵洁, 许素睿. 城市燃气事故不安全行为风险评估[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(12): 125-132.
- [20] 王艺钦, 林卫东, 余龙星, 等. 基于关联规则的燃气事故不安全行为复杂网络研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19(12): 121-126.
- [21] 孙逸林, 郑小强, 刘险峰, 等. 基于AcciMap模型的燃气管道泄漏爆炸事故分析[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(7): 140-146.
- [22] 赵天亮, 王冰山, 台发强, 等. 基于改进DEMATEL-ISM-BN的人因视角下煤矿事故致因研究[J]. 安全与环境工程, 2025, 32(1): 91-99, 117.
- [23] 陈赞, 刘湘慧, 陈玉斌. 基于决策实验室分析法及解释结构模型的交通隧道施工事故致因链构建[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(35): 15222-15229.

(责任编辑:毛 星)