

中文引用格式:王海军,张玥. 基于贝叶斯的受限空间作业情景构建与风险分析[J]. 中国安全科学学报,2026,36(5):38-47.

英文引用格式:Wang Haijun, Zhang Yue. Scenario construction and risk analysis of confined space operations based on Bayesian networks[J]. China Safety Science Journal,2026,36(5):38-47.

基于贝叶斯的受限空间作业情景构建与风险分析*

王海军 研究员, 张玥** 助理研究员

(中国煤炭科工集团有限公司 煤炭科学研究总院, 北京 100013)

中图分类号:X913.4

文献标志码:A

DOI:10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.05.0797

基金项目:国家自然科学基金资助(72204105)。

【摘要】 为精准辨识受限空间作业风险,有效防控事故,构建基于关键要素的事故演化情景模型,开展定量风险分析。首先系统梳理受限空间物理特征、时空信息、环境条件、安全管理和应急决策等要素,采用网络本体语言(OWL)规范化描述关键要素并表达情景,以结构化、标准化方式表征事故演化过程;然后收集整理国内近50起相关事故资料,结合现行标准规范、专家知识,对作业全过程相关的气体检测、通风措施、防护装备、潜在事故后果等进行状态描述和关联性分析,获得贝叶斯网络(BN)结构和概率参数,并据此实证分析受限空间作业人员中毒事故。研究表明:受限空间作业安全关键要素梳理有助于结构化管理事故知识,构建的BN模型可以定量评估事故风险,并进行情景推演;结合实证分析,多人连续未佩戴防护装备进行盲目施救是导致受限空间事故后果扩大的主要原因,应在应急预案中明确救援程序、职责、防护要求等内容。

【关键词】 贝叶斯网络(BN); 受限空间; 作业情景; 风险分析; 情景构建; 情景推演

Scenario construction and risk analysis of confined space operations based on Bayesian networks

Wang Haijun, Zhang Yue

(Chinese Institute of Coal Science, China Coal Technology & Engineering Group,
Beijing 100013, China)

Abstract: In order to accurately identify risks and effectively prevent accidents in confined space operations, a scenario-based accident evolution model grounded in key elements was developed to conduct quantitative risk analysis. This study addressed confined space operations by systematically organizing their key elements, which encompass physical characteristics, spatiotemporal context, environmental conditions, safety management, and emergency decision-making. The Web Ontology Language (OWL) was employed to standardize the description of these elements and represent the scenarios, thereby enabling a structured and standardized characterization of accident evolution. Drawing upon data from nearly 50 domestic confined space accident cases, as well as current standards and expert knowledge, the study performed state-based description and correlation analysis on critical aspects, including gas detection, ventilation, personal protective equipment, and accident consequences throughout the operational process. A BN structure and probability parameters were established accordingly. An empirical

* 文章编号:1003-3033(2026)05-0038-10; 收稿日期:2025-12-20; 修稿日期:2026-03-10

** 通信作者:张玥(1994—),女,内蒙古鄂尔多斯人,博士,助理研究员,主要从事公共安全、风险评估、应急管理、城市安全韧性、矿山灾害风险防控等理论与技术的研究。E-mail:zyue18@tsinghua.org.cn。

analysis of a confined space poisoning accident was conducted to validate the model. The results show that the systematic identification of critical safety factors contributes to the structured management of accident knowledge. Furthermore, the BN model constructed on this basis enables quantitative risk assessment and scenario deduction. The empirical findings demonstrate that risk-ignorant rescue attempts constitute the primary factor exacerbating outcomes in confined space accidents, particularly when multiple non-professional responders enter without personal protective equipment. Therefore, emergency plans should clearly define rescue procedures, responsibilities, and protection requirements.

Keywords: Bayesian network(BN); confined space; operations scenario; risk analysis; scenario construction; scenario deduction

0 引言

受限空间是指封闭或者部分封闭,未被设计为固定工作场所,人员可以进入作业,易造成有毒有害、易燃易爆物质积聚或者氧含量不足的空间,且广泛存在于工贸、化工、建筑、交通运输、农林牧渔、市政基础设施等行业领域。其作业安全事故通常发生在工业生产或设施运维过程中,并同时有多种事故类型。2023年12月,应急管理部在新修订的《工贸企业有限空间作业安全规定》发布会上,公开了近10年来工贸企业受限空间作业事故统计结果:从事故类型看,人员中毒和窒息事故起数和死亡人数占事故总量的96.8%和96.9%;从危险因素看,主要是硫化氢、一氧化碳、氮气、二氧化碳等有毒有害气体;从伤亡扩大原因看,未落实安全防护措施、盲目施救的相关事故起数和死亡人数占事故总量的87.4%和86.8%。因此,系统分析受限空间事故的原因、过程和后果,梳理作业安全要素,对提升受限空间安全和应急管理水平,减少人员伤亡和经济损失具有现实意义。

国内外各界对受限空间的定义尚未严格统一,但均指出具有自然通风不良的特征^[1],在此类环境中,有毒有害气体是导致事故的关键致灾因子^[2-3]。基于事故统计与归纳分析,受限空间内存在的有毒有害气体多无色无味,隐蔽性强且危险性高,加之作业前缺少相应的检测手段^[4],作业过程中人员未采取有效防护措施,极易导致中毒窒息事故^[5],而盲目施救是导致事故后果扩大的主要因素^[6]。针对受限空间燃爆事故,现有研究主要采用数值模拟方法,研究管廊、船舱等封闭或半封闭空间内可燃气泄漏扩散特性^[7]与燃爆演化特征^[8],分析空间结构、点火源位置^[9]、混合气体体积分数^[10]等因素对事故后果的影响。部分学者进一步将机器学习等数据驱动方法与计算流体动力学模拟相结合,处理复杂三

维场景下的可燃气扩散与燃爆模拟,预测爆炸超压等关键后果指标^[11],并探讨相应的风险防控措施^[12]。在安全管理层面,针对因职责不清、落实不到位而引发的事故,有研究明晰了受限空间作业主要负责人、监护、检测、作业及应急救援等人员的安全职责交互关系^[13]。人员的麻痹、侥幸、逆反、从众、捷径、厌倦、冒险逞能和无所谓等不安全心理,以及作业前未检测通风、作业中未佩戴防护用品、野蛮操作等不安全行为,被识别为事故的关键诱因^[14]。综合案例分析和专家经验,受限空间事故的直接原因可归结为人员不安全行为以及检测、通风装置失效^[15],间接原因为安全管理不到位,根本原因在于作业环境的复杂性^[16]。归纳对比国内外标准规范^[17-18]、事故案例及相关综述,当前研究以事故案例的定性分析为主^[19],虽已明确事故在人为层面的主要致因^[20],但在受限空间范围判定、危险源辨识、事故致因机制分析、演化防控、风险分析等系统性研究方面,仍有待进一步深入。

受限空间事故具有高度的不确定性和情景特异性,现有研究对事故情景要素缺乏结构化表达与量化推理。本文将对受限空间中毒窒息和燃爆2类典型事故情景涉及的概念体系、时空和因果关系进行规范化描述和知识表达,构建受限空间事故情景本体,同时构建贝叶斯网络(Bayesian Network, BN)模型,量化风险概率和后果,开展作业安全风险分析。

1 受限空间作业情景要素表达

多维化、结构化、语义化和量化的受限空间事故情景表达,是系统梳理事故致因机制与作业安全关键要素、进而有针对性地开展风险分析与防控工作的基础。基于灾害学与事故致因理论,从孕灾环境、致灾因子、承灾载体、管控措施、时空信息等维度表达受限空间事故情景,通过梳理与拆分事故要素,有序组织关键情景,构建规范化情景模型。

1.1 孕灾环境的表达

孕灾环境是指可能对受限空间作业安全产生不良影响的环境条件,其表达主要围绕空间物理结构和功能特征展开。物理结构包括空间类型、位置、尺寸、通风状况、出入口数量及周边环境等要素;功能特征包括物质储存、输送、反应等用途。由于不同类型受限空间的作业内容与形式各异,潜在危险有害因素也存在差异。结构化描述孕灾环境,有助于系统辨识不同类型受限空间的潜在危险有害因素,进一步预测事故类型及发生概率。以市政基础设施中的污水井为例,主要功能为城市排水,内部常积聚腐败物质,易产生硫化氢,可能导致作业人员中毒;而化工领域中的储罐,主要功能为存储油气等易燃易爆物质,动火作业极易引发油气爆炸。

1.2 致灾因子的表达

致灾因子是指可能导致受限空间作业安全事故的各类隐患,其表达主要围绕作业全过程中的人、物、环境及管理等因素展开。致灾因子的特征属性是构建作业情景的基础信息,需要重点关注初始事故发生后,在应急处置不当等不利条件下进一步诱发其他次生事故、导致后果扩大的情景。结构化描述致灾因子,有助于全面辨识作业全过程风险,清晰构建事故链条与演化网络,系统分析事故的直接原因和根本原因。以硫化氢中毒事故为例,当受限空间内产生并积聚的硫化氢体积分数高于0.01%时,可能导致作业人员中毒并迅速丧失逃生能力,当其体积分数介于4.3%~45%,且氧气充足时,遇明火或高温条件可能发生自燃,并进一步诱发爆炸。

1.3 管控措施的表达

管控措施是指为消除或降低受限空间作业安全事故概率、减轻事故后果所采取的措施,其表达主要围绕管理、组织、技术3个层面。其中,管理手段包括制度体系构建、职责分工、监督考核等;组织手段包括安全管理队伍建设、培训与演练等;技术手段包括气体检测与报警、通风置换、个体防护装备、应急救援装备、智能化监控等。结构化描述管控措施,有助于全面整合各类措施手段,实现系统化与标准化管理,明确在事故发生前、中、后各关键节点应采取的有效措施,提升受限空间作业安全管控的科学性和可执行性。以作业安全管理责任制为例,可依据人员类型与岗位职责,划分为管理人员、安全监管人员、作业人员3个层级。

1.4 承灾载体的表达

承灾载体是指受限空间作业安全事故直接或间接作用的对象,包括人员、设施设备及相关功能系统,是安全与风险管理的核心关注对象。结构化描述承灾载体,有助于全面预判事故影响范围、明确风险防控重点、指导资源配置与预案编制、评估管控措施有效性。结构化描述需从人员、设施设备、系统工程、环境等维度分类,并细化各维度的暴露程度、脆弱性、关键性等属性。以2018年5月深圳市罗湖区发生的污水池中毒事故为例,事故造成4名人员伤亡,其中1名为路过事发区域的非作业人员。由此可见,承灾载体不仅限于作业人员、监管人员等与作业直接相关的人员,还可能包括路人等其他公众群体。特别是在市政基础设施相关的受限空间作业事故中,由于作业区域周边人员密集,出现无组织盲目施救的风险较大。

1.5 时空要素的表达

时空信息是指受限空间作业安全事故在时间和空间维度上的综合数据,是还原事故情景、开展情景推演的重要基础。其中,时间维度主要涉及事故发生的时间节点与持续时间,例如:早晚时段、季节特征、作业阶段等;空间维度主要考虑事故发生的位置特征,如危险有害因素积聚或扩散范围、人员分布位置、周边设施与环境等。结构化描述时空信息,有助于为事故调查提供清晰的情景还原,为作业安全管理、风险分析与应急决策提供有效支撑,确保事故被及时响应并有效防控其发展扩大。

2 受限空间作业情景构建

基于受限空间作业安全情景要素梳理,运用本体为各要素的数据信息提供标准化的语义模式,以促进多源要素的融合与共享,从而为作业安全事故风险分析构建标准化知识模型。本体包括概念、概念间的关系等基本建模元语,采用OWL对受限空间作业全过程情景进行规范化描述。

2.1 情景概念

基于作业安全关键要素的表达框架,进一步构建包含孕灾环境、致灾因子、管控措施、承灾载体等4类情景概念的受限空间事故情景模型。结合受限空间类型划分及部分事故发生在受限空间周边的特点,将孕灾环境划分为封闭或半封闭设备、地上受限空间、地下受限空间及周边范围等4类。致灾因子从人、物、环、管4个维度辨识,其中,人的因素侧重

作业人员不安全行为;物的因素参照现行受限空间作业安全标准中危险气体的相关规定^[16]。由于这类事故多发生在温度、湿度较高的季节,环境因素主

要关注受限空间环境氧含量、温度及湿度条件。受限空间作业情景要素集详见表 1。

根据情景要素集,定义 7 类受限空间作业安全

表 1 受限空间作业情景要素集

Table 1 Scenario element set of confined space operations

情景要素	具体分类	说明
孕灾环境	封闭或半封闭设备	船舱、储罐、反应釜、冷藏箱、压力容器、锅炉等
	地上受限空间	储藏室、酒糟池、发酵池、垃圾站、温室、粮仓等
	地下受限空间	地下管道、地下工程、暗沟、隧道、涵洞、废井、地窖、污水池(井)、沼气池、化粪池、下水道等
	受限空间周边范围	受限空间外部受事故影响范围
致灾因子	人的因素	违章进入受限空间;作业前未检测通风;作业时未佩戴个体防护装备
	物的因素	可燃气;粉尘和气溶胶;其他有害物质
	环境因素	氧含量;温度;湿度
	管理因素	受限空间作业责任未落实;事故应急预案及响应缺陷
管控措施	作业安全管理;应急决策	作业安全责任落实;通风;疏散;急救;消防
承灾载体	人员伤亡;经济损失;环境破坏;影响范围	人员窒息中毒;火灾;爆炸

事故相关的重要概念:受限空间中窒息、燃爆事件;受限空间事故情景;受限空间事故孕灾环境、致灾因子、承灾载体、管控措施。

2.2 情景关系

本体关系用于表征情景概念自身的属性或者概念之间的交互作用。结合受限空间典型事故特点,归纳出部分-整体、继承、实例、属性、影响等 5 类基本关系。

情景概念之间的关系主要包括 2 类:事件、情

景、情景要素之间的关系;以及不同情景要素之间的关系。综合相关概念与关系构建本体结构,如图 1 所示。受限空间中窒息、燃爆事件通常包含多个演化情景,因此,事件与情景之间存在部分-整体关系;按照事故发生发展的时序特征,情景可划分为初始情景、中间情景和结束情景 3 个阶段,各阶段与情景之间存在继承关系;此外,具体案例与概念之间存在实例关系,如“2024 年山东寿光受限空间作业人员中毒事件”为事件的一个具体实例。

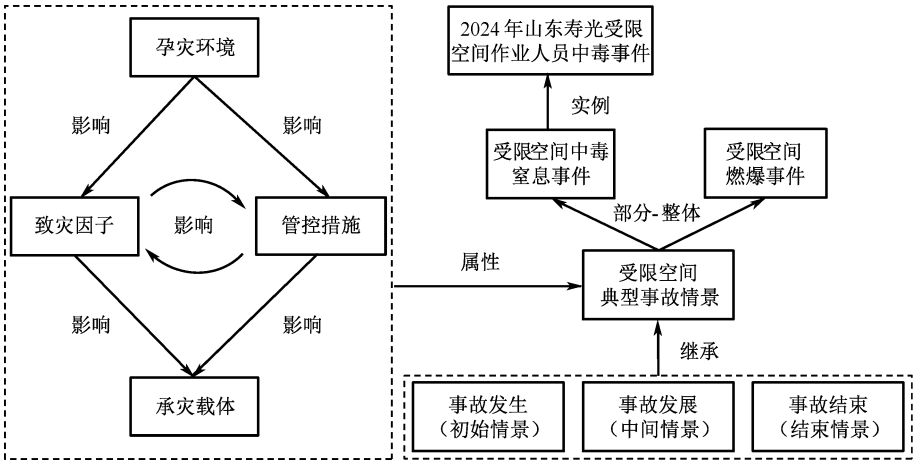


图 1 受限空间事故情景本体结构

Fig. 1 Ontology model of confined space accidents

2.3 基于 Protégé 的情景本体构建

采用 Protégé 软件构建了受限空间事故情景本体,按照领域建模—类层次构建—属性定义—关系

建模的技术路径建立本体框架。根据事故致因理论和受限空间作业安全规范,明确本体构建目标,为事故知识的系统积累、语义推理与风险分析提供支撑。

根据作业要素梳理结果,构建核心类层次结构,包含前述7类情景概念。在此基础上,为各类概念添加实例,作为本体结构中的实体,并为各类实体定义对象属性和数据属性,以及设置逻辑规则和约束条件,以增强本体的表达能力和推理支持能力。

完成所有情景概念、关系、属性的构建后,自动生成 OWL 格式文件,包含对情景概念、关系和属性的规范化描述。以承灾载体为例进行查询,可以获得相关的情景概念及其关联关系,如图 2 所示。在此基础上,可进一步补充实例数据,设置更加明确的逻辑约束和推理规则,以增强情景本体的表达能力和推理能力。同时,通过对本体进行验证,可提升结构完备性与语义一致性。该本体模型为受限空间事故情景构建、情景推演、风险分析、事故检索等提供了统一的语义框架和推理基础。

3 基于 BN 的受限空间作业风险分析

3.1 BN 构建

基于构建的受限空间事故情景本体,确定 BN 变量,结合专家知识和事故数据进行网络学习,获得网络结构和参数。按照事故的发生、发展和结束情景,将 BN 变量划分为 3 层:输入变量、状态变量和输出变量。其中,输入变量包含事故发生时的孕灾环境条件、直接致灾因子、事故初始状态 3 个方面;状态变量包含受限空间作业环境气体含量,以及采取的应急处置措施 2 个方面,特别指出盲目施救是导致事故后果扩大的关键因素,列为单独的节点;输出变量包含 4 类典型事故类型。基于情景本体模型,得到 BN 结构如图 3 所示。

BN 节点根据不同要素类型,包含离散属性和

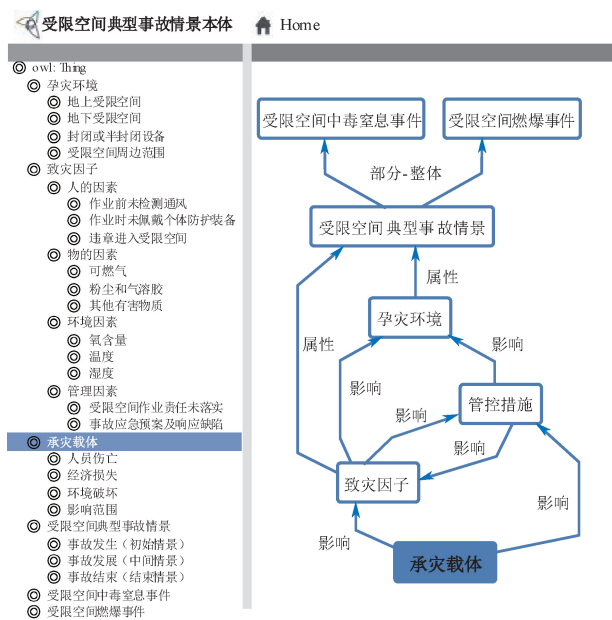


图2 受限空间事故情景本体关系

Fig. 2 Relationship diagram of the scenario ontology

连续属性 2 类,各节点状态值见表 2。表中,混合有害气体、可燃气体的限值依据《工作场所所有害因素职业接触限值第 1 部分:化学有害因素》(GBZ2.1—2019)的规定;氧气、可燃气体、有害气体的节点状态阈值设定参照《危险化学品企业特殊作业安全规范》(GB 30871—2022)中的受限空间作业气体检测内容和环境要求,以及北京市地方标准《受限空间作业安全技术规范》(DB11/T 852—2019)中根据危险有害程度划分的受限空间作业环境分级标准。

确定网络结构后,需要计算网络中根节点的经验概率,以及中间节点的条件概率。主要运用参数学习方法,通过样本数据学习确定各节点的概率值。

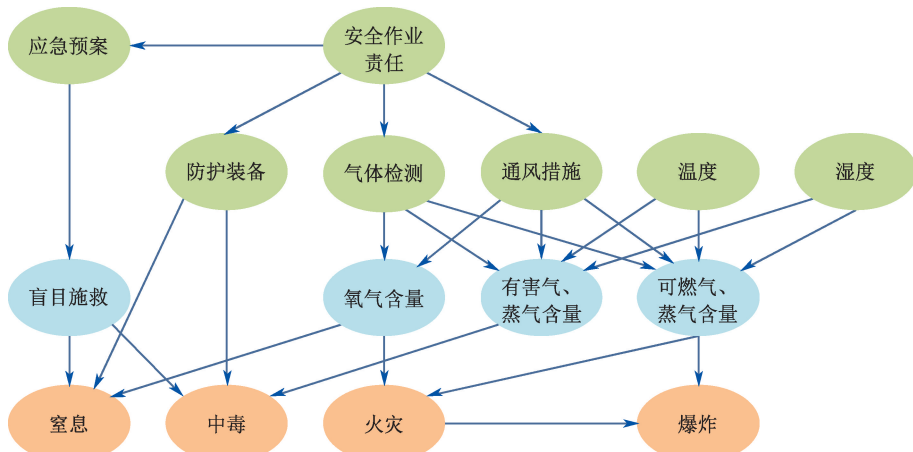


图 3 受限空间事故 BN 结构

Fig. 3 BN structure of confined space accidents

表 2 BN 节点变量及状态值
Table 2 Variables and state values of the Bayesian network model

节点类型	节点名称	节点状态			
		State1	State2	State3	State4
输入变量	安全作业责任	责任明确且措施到位	责任明确但措施不到位	责任模糊且措施不足	责任缺失且违法违规操作
	应急预案	完备且演练充分	完备但无演练	不完备但有演练	不完备且无演练
	气体检测	检测全面且连续有效	检测气体类型不全或频次不足	检测设备异常或使用错误	未进行检测
	通风措施	连续性强制通风	间歇性通风或自然通风	通风措施或装置存在缺陷	无通风措施
	防护装备	装备齐全且佩戴规范	装备齐全但佩戴不规范	装备不齐全	无有效装备
	温度/℃	18~26	26~35	>35	≤18
	湿度/%	30~60	60~85	>85	≤30
状态变量	氧气体积分数/%	≤16	16~19.5	19.5~23.5	>23.5
	有害气、蒸气体积分数/%	≤30 MAC	30~100 MAC	>100 MAC	—
	可燃气、蒸气体积分数/%	≤5 LEL	5~10 LEL	>10 LEL	—
	盲目施救	严格按照应急预案组织施救	施救程序不规范或装备不足	未佩戴防护装备盲目施救	多人未佩戴防护装备盲目施救
输出变量	窒息	无人员缺氧	人员轻度缺氧可自行撤离	人员中度缺氧需他人协助撤离	人员重度缺氧出现昏迷或死亡
	中毒	无人员中毒	人员轻度中毒可自行恢复	人员中度中毒需医疗救治	人员重度中毒出现昏迷或死亡
	火灾	未发生火灾	小范围起火可自行扑灭	火势蔓延需专业消防介入	火势较大导致人员伤亡
	爆炸	未发生爆炸	存在爆炸性混合物但未引爆	小规模爆炸未导致人员伤亡	大规模爆炸导致人员伤亡、结构损毁等连锁反应

注:最高容许体积分数(Maximum Allowable Concentration,MAC);爆炸下限(Lower Explosive Limit,LEL)。

收集并整理了 2014—2024 年国内 50 起受限空间事故案例报告和相关资料,事故统计情况见表 3。

表 3 事故案例情况统计
Table 3 Accident case statistics

地区	行业	受限空间类型	事故起数
北京	建筑;市政	电缆井;污水池	28
浙江	工贸	污水池;腌制池	3
河南	工贸;危化	污水池;好氧池;储罐	3
湖南	工贸	污水池;纸浆池;腌制池	3
河北	工贸	污水池;浮渣池	2
辽宁	工贸	腌制池	2
广东	工贸;市政	污水池	2
山西	工贸;危化	污水井;冷却池	2
四川	工贸;市政	腌制池;污水池	2
上海	工贸;建筑	储罐;地下工程	2
山东	工贸	回水循环池	1

由于部分事故案例记录不够详尽,无法获得全

面准确的样本数据,得到的数据集为不完备数据集,选择期望最大(Expectation Maximization,EM)算法进行参数学习。EM 算法可迭代求解最优参数,每一步迭代由一个期望步(E 步)和一个最大化步(M 步)组成。

E 步:根据参数初始值或者上一次迭代得到的结果值计算似然函数,为提高数值稳定性和计算效率,调整为计算对数似然函数,按下式计算:

$$l(\theta,X)=\ln L(\theta\mid X)=\ln P(X\mid \theta)\tag{1}$$

式中: $l(\theta,X)$ 为对数似然函数; $L(\theta\mid X)$ 为似然函数; $P(X\mid \theta)$ 为给定模型参数下观测数据的概率; θ 为样本模型参数; X 为观测数据。

并基于当前参数估计,计算隐变量的期望,按下式计算:

$$Q(\theta,\theta^{(t)})=E_{Z\mid X,\theta^{(t)}}(\ln P(X,Z\mid \theta))\tag{2}$$

式中: $Q(\theta,\theta^{(t)})$ 为隐变量的期望值; $\theta^{(t)}$ 为第 t 次

迭代的模型参数估计值; Z 为隐变量。

M 步: 最大化 E 步得到的期望似然函数, 更新模型参数:

$$\theta^{(t+1)} = \operatorname{argmax}_{\theta} Q(\theta, \theta^{(t)}) \quad (3)$$

运用 GeNIe 软件构建 BN 结构, 完成 50 起受限空间事故数据资料的编码处理。将编码后的样本数据文件导入 GeNIe 软件, 通过参数学习获取网络结构参数, 选用 EM 算法估计各节点概率, 得到完整的受限空间作业安全风险评估 BN 模型, 模型中根节点的先验概率见表 4。

表 4 根节点先验概率

Table 4 Priori probability of each root node

根节点	State1	State2	State3	State4
安全作业责任	0.010	0.010	0.157	0.823
温度	0.071	0.898	0.031	—
湿度	0.754	0.246	—	—

3.2 基于 BN 的情景推演

结合受限空间事故情景本体和 BN, 运用贝叶斯推理方法开展作业前安全评估和风险分析。贝叶斯推理依据已知或可观测的节点状态值, 推算未知节点各状态值的发生概率。已知父节点状态值推算子节点状态概率, 即前向推理, 亦称“预测”, 可用于作业前风险预测; 已知子节点状态值推算父节点状态概率, 即后向推理, 亦称“诊断”, 有助于针对特定事

故诱因进行重点分析。主要应用的 BN 推理问题包括: 后验概率问题, 兼具“预测”和“诊断”推理分析; 最大可能解释问题, 在给定观测节点状态值的条件下, 推断最可能导致该观测结果的其他节点状态组合。以发生人员窒息事故为例: 受限空间作业环境氧气含量, 以及人员是否佩戴有效的个体防护装备是此类事故的直接影响因素; 盲目施救会直接增加人员窒息概率和人数; 在作业过程中是否全程进行气体检测并采取充分的通风换气措施直接影响作业环境氧气含量; 安全作业责任的落实是事故发生与否的基础影响因素, 内容包含了气体检测、通风措施等安全技术规范是否落实, 以及应急预案、应急措施等应急管理要求是否到位。

4 受限空间事故案例分析

4.1 事故概况

2024 年 10 月 12 日, 潍坊金石生物科技有限公司发生受限空间作业人员中毒事故, 导致 7 人死亡、4 人受伤。该公司主要从事玉米蛋白粉饲料加工销售。事故发生在存放原料玉米浆的浆池, 池长 54 m, 宽 17 m, 深 3 m, 于 2024 年 6 月临时挖建, 池体未经硬化和防水处理, 表面铺设塑料薄膜防止玉米浆渗漏。基于初步调查, 梳理事故情景信息, 见表 5。

表 5 事故情景信息梳理

Table 5 Accident scenario information

情景	时间	孕灾环境	致灾因子	承灾载体	管控措施
初始情景	13:00 左右	地上受限空间(原料浆池)	人的因素: 作业前未检测通风、作业时未佩戴个体防护装备 物的因素: 有害气体含量高(硫化氢) 环境因素: 氧含量低(玉米浆可能混入地下水, 并长期处于厌氧环境)	3 人在池底进行抽浆作业, 2 人在池边协助	受限空间安全作业责任未落实
中间情景	13:30 左右			池底作业的 3 人中毒晕倒, 池边协助的 1 人入池救援, 1 人外出呼救	未采取有效防护措施, 盲目施救
	13:44 左右			公司人员共 7 人到达现场, 3 人入池救援	未采取有效防护措施, 盲目施救
结束情景	14:17 左右			寿光市消防救援大队和公司人员协作救出池内 7 人, 11 人送医救治, 7 人经抢救无效死亡	—

4.2 事故情景分析

该事故属于抽浆作业过程中以硫化氢为主要有害气体的急性气体中毒事故。基于事故过程分析和情景构建, 在 BN 结构中设置证据信息, 并开展情景推理, 其中防护装备、气体检测、通风措施、盲目施救节点状态设置为 State4, 温度、湿度、氧气含量节点

状态设置为 State2。获得的节点后验概率如图 4 所示。

在不改变防护装备、气体检测、通风措施、温度、湿度、氧气含量等节点状态设置的条件下, 对盲目施救节点进行敏感性分析:

1) 在不掌握应急救援实际情况的条件下, 即未

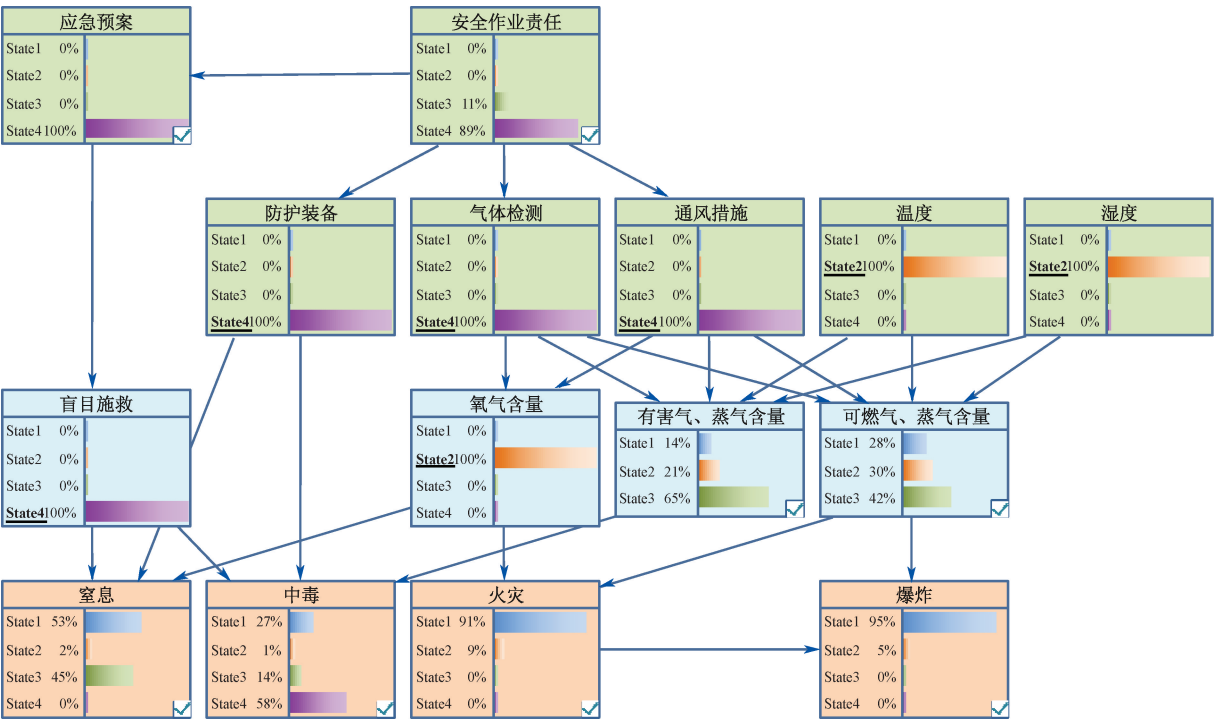


图 4 受限空间事故推理

Fig. 4 Reasoning of confined space accident scenarios

更新证据信息的条件下,盲目施救节点的概率分布采用基于样本数据进行参数学习获得的初始概率,该节点各状态的概率值为:State1=18.7%,State2=4.8%,State3=0%,State4=76.5%,即出现多人未佩戴防护装备盲目施救(State4)的概率是76.5%,此时输出变量节点,即目标节点的概率分布情况见表6。此时,事故后果需要重点考虑造成人员重度中毒出现昏迷或死亡,概率是47.8%。

表 6 证据信息更新前目标节点概率分布

Table 6 Prior probability of the target node before evidence update

输出变量节点	State1	State2	State3	State4
窒息	0.528	0.110	0.362	—
中毒	0.385	0.022	0.115	0.478
火灾	0.911	0.089	—	—
爆炸	0.953	0.047	—	—

2) 在明确应急救援过程中出现了多人未佩戴防护装备盲目施救的情况时,更新盲目施救节点的证据信息,即将该节点各状态的取值设置为:State1=State2=State3=0,State4=100%,此时输出变量节点的概率分布情况见表7。此时,事故造成人员重度中毒出现昏迷或死亡的概率提高至57.8%。

此外,针对该事故情景,在不改变前述其他节点状态设置的条件下,分别对防护装备、气体检测和通

表 7 证据信息更新后目标节点概率分布

Table 7 Prior probability of the target node after evidence update

输出变量节点	State1	State2	State3	State4
窒息	0.535	0.017	0.448	—
中毒	0.274	0.006	0.142	0.578
火灾	0.911	0.089	—	—
爆炸	0.953	0.047	—	—

风措施等3个节点进行敏感性分析,分析事故造成人员中毒的概率变化如表8所示。根据分析结果,通风措施是事故是否会造成人员重度中毒出现昏迷或死亡的关键影响因素。

表 8 节点敏感性分析

Table 8 Sensitivity analysis

敏感性分析节点	State1	State2	State3	State4
事故情景	0.274	0.006	0.142	0.578
防护装备	0.269	0.018	0.133	0.579
气体检测	0.239	0.005	0.163	0.593
通风措施	0.351	0.007	0.192	0.449

为了验证模型的适用性,将中毒作为目标节点,将盲目施救作为输入节点,计算得到目标节点4个状态对应的诊断值,数值由高至低分别为:State1:0.255;State4:0.182;State2:0.115;State3:0.074,数值越高代表输入节点对目标节点该状态的判别能力越强,即事故处置过程中是否存在盲目施

救对事故是否造成人员中毒,以及造成人员重度中毒出现昏迷或死亡的后果概率影响最为显著,而对造成人员轻度或中度中毒的概率影响较小,这一结论与历史事故统计与分析结论相一致,辅助说明模型具有适用性。

基于情景推演结论,得出受限空间事故最常见的后果是造成人员中毒,且人员可自行或者经医治后恢复的轻度或中度中毒情况概率较小,一旦出现人员中毒,多为后果较严重的重度中毒,且多人未佩戴防护装备盲目施救的可能性显著高于单个人员未佩戴防护装备独立施救的情况,这种常见的多人盲目施救行为很可能导致事故后果扩大,造成多人昏迷或死亡。

综上所述,浆池中存放的玉米浆在混入杂质且长期处于厌氧条件的情况下发酵产生硫化氢等有害气体,硫化氢密度比空气大,极易在池内聚集,此外残留的玉米浆具备产生硫化氢的物质基础和环境条件,即便进行了作业前通风,也可能在作业过程中随着玉米浆的扰动而瞬间释放大量的硫化氢,3名作业人员在未进行作业前气体检测和持续通风的情况下,未佩戴有效个体防护装备贸然进入池内,出现中毒晕倒。事故发生后,该公司其他4名人员未采取有效防护措施陆续开展盲目施救,最终导致7人死亡。根据事故分析结论,相关企业应对存在硫化氢等有害气体中毒风险的受限空间进行风险辨识,落

实受限空间作业审批,严格执行“先通风、再检测、后作业”要求,并在作业现场设置监护人员。针对浆池等受限空间中有毒气体的产生具有很强隐匿性和不确定性的特点,应全程进行通风和气体实时检测,使安全风险防控与受限空间作业全过程协调联动,切实保障作业安全。

5 结 论

1) 受限空间作业风险的精准防控需依托统一的语义框架,从孕灾环境、致灾因子、承灾载体、管控措施及时空信息等维度,解构并量化表达事故关键情景要素,为事故情景构建、动态推演、风险分析及案例检索等应用提供推理基础。

2) 基于历史事故统计和情景分析,受限空间作业中发生频次最高的事故类型为人员中毒。进一步结合受限空间作业安全风险分析BN模型进行节点敏感性分析,发现通风措施与盲目施救行为是影响人员中毒风险的关键敏感性因素,且这类事故多为重度中毒,伤亡风险高。

3) 根据受限空间事故风险分析,盲目施救是导致事故后果扩大的重要原因,通常会出现未接受过受限空间作业安全培训的多人,在未按程序、未佩戴防护装备的情况下连续盲目施救,导致多人伤亡,且施救人员可能为非作业直接相关人员。

参 考 文 献

- [1] Burlet-vienney D, Chinniah Y, Bahloul A, et al. Occupational safety during interventions in confined spaces[J]. Safety Science, 2015, 79: 19-28.
- [2] 汪圣华, 贾波, 陈文杰, 等. 有限空间作业动态风险评估模型研究与应用[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(8): 87-92.
Wang Shenghua, Jia Bo, Chen Wenjie, et al. Research on model for assessment of dynamic risk in confined space working and its application[J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(8): 87-92.
- [3] Botti L, Duraccio V, Gnoni M G, et al. An integrated holistic approach to health and safety in confined spaces[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2018, 55: 25-35.
- [4] 王燕妮, 李静, 张振超. 基于 FTA 和 ISM 的有限空间中毒窒息事故致因分析[J]. 安全, 2024, 45(1): 14-21.
Wang Yanni, Li Jing, Zhang Zhenchao. Contributing analysis of poisoning and asphyxiation accidents in limited space based on FTA and ISM[J]. Safety & Security, 2024, 45(1): 14-21.
- [5] 王飞龙. 市政工程有限空间作业安全风险管理研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2023.
Wang Feilong. Research on safety risk management of limited space operation in municipal engineering[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2023.
- [6] Montes A, Mollaahmetoglu E. A resilient approach of safety assessment for confined space operations ON FPSO units[J]. Ocean Engineering, 2022; DOI:10.1016/j.oceaneng.2022.111141.
- [7] 王雪梅. 地下有限空间内天然气扩散特性及防控定位研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
Wang Xuemei. Research on natural gas diffusion characteristics and prevention and positioning in limited underground

- space[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [8] 金友平. 受限空间内燃气泄漏时空演化与泄爆防控研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2023.
Jin Youping. Study on spatio-temporal evolution of gas Leakage and prevention and control of blowout in confined space[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2023.
- [9] 胡赛涛, 王旭, 张圣柱, 等. 典型有限空间内混氢天然气泄漏燃爆演化规律研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19(增刊2): 56–63.
Hu Saitao, Wang Xu, Zhang Shengzhu, et al. Study on evolution laws of leakage, combustion and explosion of hydrogen-blended natural gas natural gas in typical confined space[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2023, 19(S2): 56–63.
- [10] Zhou Ning, Wang Teng, Li Xue, et al. Experimental study on hydrogen-air premixed gas explosion in confined space[J]. Energy Sources Part A Recovery Utilization and Environmental Effects, 2020, 46(1): 1–12.
- [11] Bengherbia T, Syed F A, Chew J, et al. Application of machine learning methods for process safety assessments[J]. Process Safety Progress, 2024; DOI: 10.1002/prs.12562.
- [12] Lyu Pengfei, Li Tiannan, Zhang Yu, et al. Influence of the opening pressure of explosion-venting surface on methane deflagration characteristics in municipal sewage confined spaces[J]. Process Safety Progress, 2023, 42(4): 729–736.
- [13] 王涵宇, 谭钦文. 基于 FRAM 的有限空间作业安全职责半定量分析[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(5): 88–95.
Wang Hanyu, Tan Qinwen. Semi-quantitative analysis of safety duties in confined space operations based on FRAM[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(5): 88–95.
- [14] 曹璐璐, 刘艳. 有限空间作业人员不安全心理及行为量表研究[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(11): 37–42.
Cao Lulu, Liu Yan. Research on unsafe mentality and behavior scales of workers in confined space[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(11): 37–42.
- [15] 宋思雨, 徐克, 张贝, 等. 基于 ISM 的有限空间作业中毒事故风险分析[J]. 安全与环境工程, 2019, 26(2): 140–144.
Song Siyu, Xu Ke, Zhang Bei, et al. Risk analysis of poisoning accidents in finite space operations based on ISM[J]. Safety and Environmental Engineering, 2019, 26(2): 140–144.
- [16] 周德红, 陈慧芳, 许渊, 等. 有限空间作业的风险分析与控制[J]. 武汉工程大学学报, 2018, 40(5): 555–558.
Zhou Dehong, Chen Huifang, Xu Yuan, et al. Risk analysis and control measures in confined space operations[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2018, 40(5): 555–558.
- [17] 李梦佳, 许开立. 基于标准规范的有限空间作业安全相关概念研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19(10): 36–42.
Li Mengjia, Xu Kaili. Research on related concepts of confined space operation safety based on standards and specifications[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2023, 19(10): 36–42.
- [18] 杨春丽, 刘艳, 秦妍. 国内外有限空间作业安全相关概念对比研究[J]. 安全, 2021, 42(8): 45–51.
Yang Chunli, Liu Yan, Qin Yan. Comparison of concepts related to confined spaces safety at home and abroad[J]. Safety & Security, 2021, 42(8): 45–51.
- [19] Wang Bingyu, Zhao Jinsong. Automatic frequency estimation of contributory factors for confined space accidents[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2022, 157: 193–207.
- [20] Xia Jingjing, Liu Yi, Zhao Dongfeng, et al. Human factors analysis of China's confined space operation accidents from 2008 to 2018[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2021; DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104480.



作者简介: 王海军 (1975—), 男, 山东安丘人, 博士, 研究员, 主要从事安全管理、煤矿数字化、自动化、信息化、矿山机械智能化、煤矿机器人等理论、技术与装备的研究与开发。
E-mail: wanghaijun@mail.ccri.ccteg.cn。