

贫数据条件下城市配气站事故风险预测与诊断方法研究文献综述

罗婷婷

重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

收稿日期: 2025年10月24日; 录用日期: 2025年11月21日; 发布日期: 2025年11月27日

摘要

城市配气站作为天然气输配系统的关键节点, 其安全运行对保障城市能源供应和公共安全至关重要。然而, 由于其历史失效数据稀缺、运行工况复杂、致因因素耦合关联, 传统的基于大量统计数据的安全风险评估方法在此“贫数据”条件下面临巨大挑战。本文系统梳理了国内外关于天然气设施(特别是配气站)风险预测与诊断的研究现状。首先, 分析了配气站传统风险评价方法及其在贫数据条件下的局限性; 其次, 重点综述了基于贝叶斯网络、模糊理论、灰色系统理论等处理不确定性信息的方法在风险定量分析与诊断中的研究进展; 再次, 探讨了动态风险预测、情景构建与推演、安全屏障效用建模以及复杂网络风险传播在风险建模中的应用; 复次, 专门讨论了安全仪表系统(SIS)在贫数据下的安全完整性等级(SIL)评估这一特殊而重要的课题; 最后, 在综合述评的基础上, 指出了现有研究的不足, 并展望了贫数据条件下城市配气站事故风险预测与诊断的未来研究方向, 特别强调了构建集成动态数据驱动与物理机理的智能预测诊断框架的必要性。

关键词

城市配气站, 贫数据, 风险预测, 故障诊断, 贝叶斯网络

Research Literature Review on Accident Risk Prediction and Diagnosis Methods for Urban Gas Distribution Stations under Data-Sparse Conditions

Tingting Luo

School of Petroleum and Natural Gas Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: October 24, 2025; accepted: November 21, 2025; published: November 27, 2025

文章引用: 罗婷婷. 贫数据条件下城市配气站事故风险预测与诊断方法研究文献综述[J]. 矿山工程, 2025, 13(6): 1542-1549.
DOI: 10.12677/me.2025.136169

Abstract

Urban gas distribution stations, as critical nodes in the natural gas transmission and distribution system, are crucial for ensuring urban energy supply and public safety. However, their safety risk assessment faces significant challenges under “data-sparse” conditions due to scarce historical failure data, complex operating conditions, and coupled causative factors. Traditional safety risk assessment methods relying on extensive statistical data are thus difficult to apply effectively. This paper systematically reviews the domestic and international research status on risk prediction and diagnosis for natural gas facilities, particularly distribution stations. Firstly, it analyzes traditional risk assessment methods for distribution stations and their limitations under data-sparse conditions. Secondly, it focuses on reviewing the research progress of methods handling uncertain information—such as Bayesian networks, fuzzy theory, and grey system theory—in quantitative risk analysis and diagnosis. Thirdly, it explores the application of dynamic risk prediction, scenario construction and deduction, safety barrier effectiveness modeling, and complex network risk propagation in risk modeling. Furthermore, it specifically discusses the special and important topic of Safety Integrity Level (SIL) assessment for Safety Instrumented Systems (SIS) under data scarcity. Finally, based on a comprehensive review, the paper points out the shortcomings of existing research and prospects future research directions for accident risk prediction and diagnosis of urban distribution stations under data-sparse conditions, particularly emphasizing the necessity of constructing an intelligent prediction and diagnosis framework integrating dynamic data-driven approaches and physical mechanisms.

Keywords

Urban Gas Distribution Station, Data-Sparse Condition, Risk Prediction, Fault Diagnosis, Bayesian Network

Copyright © 2025 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

城市能源结构的清洁化转型推动天然气消费量持续增长，配气站作为管网系统中的“心脏”，承担着调压、计量、净化与分配的核心功能(江凯彬等, 2019 [1])。其工艺区内设备密集、介质具有易燃易爆特性，一旦发生泄漏，极易引发火灾、爆炸等灾难性事故，对人民生命财产和公共安全构成严重威胁(罗能, 2014 [2]; 石红艳和袁天强, 2018 [3])。因此，对配气站进行精准的事故风险预测与诊断，是实现其本质安全与智能化管理的迫切需求。

然而，配气站事故风险预测与诊断面临一个核心难题——“贫数据”问题。这一挑战主要体现在两个方面：其一，安全仪表系统(SIS)等安全设备具有高可靠性，导致其历史失效数据稀少(李成美, 2017 [4]; 张华兵, 2013 [5])；同时，涉及关键设备故障的完整事故案例更是凤毛麟角。这种数据匮乏使得依赖大样本统计的传统概率风险评估(如简单的故障树分析)结果不确定性高，可靠性存疑(李冬辉, 2023 [6]; 徐祥沔, 2021 [7])。其二，配气站风险由设备老化、腐蚀、人为误操作、第三方破坏及自然灾害(如地震、雷电)等多因素交织影响，致因链复杂，静态风险评估难以捕捉其动态演化规律(蒲宇婷, 2023 [8]; 章博, 2010 [9]; 孟博杰等, 2021 [10]; 张淑霞等, 2015 [11])。因此，发展适用于贫数据条件、能够有效处理不

确定性并表征风险动态演变的预测与诊断方法,已成为该领域的研究前沿和难点。本文旨在通过对国内外相关文献的系统回顾,梳理该领域的研究脉络,为后续研究提供清晰的理论基础与方法论借鉴。

2. 贫数据问题的定义

贫数据条件是指在风险评估中,由于系统高可靠性、事故罕见性、监测不全面等原因,导致可用于建模和分析的历史失效数据、实时状态数据或完整事故案例严重不足的情境。在城市配气站场景中,贫数据问题主要表现为两类:一是安全设备(如 SIS)因高可靠性导致的失效数据稀缺;二是多因素耦合作用下的复杂致因链缺乏完整记录,难以支撑传统统计模型的构建。

3. 配气站传统风险评价方法及其在贫数据下的局限

早期及部分当前研究侧重于通过定性或半定量方法识别和评价配气站的风险。这些方法在风险初步筛查和管理体系建设中发挥了重要作用,但在应对贫数据挑战时显露出固有局限。

3.1. 定性分析与指标体系构建

许多研究从管理实践出发,通过系统辨识风险源来构建评价指标体系。例如,罗胜(2024) [12]从管道本体、人员作业和环境影响三个维度分析了天然气管道的主要风险,强调了制度建设与执行的重要性。章惠龙等(2024) [13]和尹行(2024) [14]则聚焦于施工阶段,详细探讨了安全管理薄弱、人员素质不一、过程管控不足等带来的突出风险,并从事前预防的角度提出了对策。张明(2024) [15]进一步针对长输管道运行,提出了涵盖管道材质缺陷、加工工艺、腐蚀破坏、人员操作及外界因素等的风险因素体系,并提出了构建完整性管理模式等综合策略。吴鸿(2018) [16]则从 HSE 精细化管理的角度,强调了危害识别与风险控制在场站日常管理中的应用。这些研究为风险因素的全面识别提供了基础,但其评价多依赖于专家经验,主观性强,在贫数据条件下难以实现精准的量化预测和动态诊断。

定性分析与指标体系构建评述

贝叶斯网络及其拓展模型在处理不确定性、小样本问题和双向推理方面具有显著优势,但其性能高度依赖于网络结构的准确性与先验概率的合理性。在结构构建中若依赖强独立性假设或简化因果关系,可能导致模型偏离实际;先验概率若仅依赖专家经验而未经过充分验证,则会引入主观偏差。此外,BN 在动态风险更新中虽具潜力,但对实时数据质量和计算效率提出较高要求,在复杂系统中实时应用仍面临挑战。

3.2. 基于场景模拟与数值分析的风险评估

为克服纯粹定性分析的不足,部分研究转向基于物理模型的数值模拟,以期获得更客观的风险量化结果。肖飞等(2024) [17]提出基于 K-means 场景聚类的场站泄漏风险区域划分方法,通过批量 CFD 模拟降低了单一场景的局限性,为场站维护管理和应急疏散提供了更普适性的依据。Jichuan Kang 等(2025) [18]也采用了拉丁超立方采样和 CFD 模拟来构建海上 LNG 泄漏的预测框架,其思路对于处理配气站泄漏场景的多样性具有借鉴意义。蒲宇婷(2023) [8]的博士论文工作则更为系统,她利用 OLGA 软件模拟了在级联安全屏障作用下的动态泄漏过程,并运用 PHAST 软件对热毁伤后果进行了动态评估,清晰地揭示了泄漏参数与后果之间的物理关联。章博(2010) [9]则较早地运用 CFD 技术对高含硫天然气集输管道的泄漏扩散后果进行了定量预测,并探讨了复杂山区地形的影响。

这类方法的优势在于能够揭示事故后果的物理规律,但其计算成本高昂,且严重依赖于精确的输入参数(如泄漏孔径、压力、风速等),而这些参数在贫数据条件下往往具有高度的不确定性,限制了其在快速预测与诊断中的实时应用。王洪丽等(2006) [19]对 LNG 接收站最大风险半径的预测,以及褚家成等

(2007) [20]对石油化工码头灾害事故应急系统的研究,均体现了后果模拟在风险评价中的价值,但也同样面临上述挑战。

基于场景模拟与数值分析的风险评估评述

模糊数学与灰色系统理论适用于信息不全、定性描述为主的场景,能有效处理语言不确定性与小样本趋势分析。然而,模糊综合评价中的隶属函数设定、灰色关联中的分辨系数选择均带有一定主观性,影响结果的客观可比性。这两种方法更适用于风险初步筛查与因素排序,在需要高精度概率输出或复杂因果推理的场景中显得力有未逮。

3.3. 风险矩阵与复杂网络的应用

风险矩阵法因其直观易用而被广泛采用。孟博杰等(2021) [10]采用改进的风险矩阵法对配气站地震事件序列进行了分析,评估了系统失效概率与后果,有效减小了尖锐边界的影响。此外,复杂网络理论被引入以刻画风险在管网系统中的传播特性。戴剑勇等(2024) [21]基于复杂网络理论构建了天然气管道网络的拓扑结构,利用熵权-TOPSIS 法对节点重要性排序,并研究了风险在蓄意破坏和随机破坏策略下的传播路径,为从系统层面理解风险的级联效应和拓扑优化提供了新视角。

然而,风险矩阵法在等级划分上仍难以完全避免主观性,而复杂网络分析更侧重于系统宏观拓扑特性,对具体配气站设备单元在贫数据下的失效概率动态预测支持有限。孙东升和丁红梅(2011) [22]对天然气管道风险辨识与治理的探讨,以及石红艳和袁天强(2018) [3]对输气站场风险管理的探究,均属于定性或半定量范畴,难以满足精准预测的需求。

风险矩阵与复杂网络的应用评述

复杂网络模型擅长刻画系统级风险的传播路径与节点重要性,为理解配气站在管网中的级联效应提供了宏观视角。但其对节点间关系的刻画往往较为抽象,难以反映具体设备单元的失效机理与动态行为。模型中节点失效率等参数在贫数据条件下同样面临赋值难题,且该方法对局部细节的简化可能限制其在单元级精准诊断中的应用。

4. 贫数据条件下的风险预测与诊断核心方法进展

为应对贫数据的挑战,研究者们引入了多种能够处理不确定性、小样本问题和信息不完全的数学工具与模型,推动了该领域向定量化、智能化发展。

4.1. 贝叶斯网络及其拓展模型

贝叶斯网络(BN)因其强大的概率表达能力、双向推理能力(由果溯因的诊断和由因推果的预测)以及对不完整数据的包容性,在贫数据风险分析中展现出巨大潜力。张华兵(2013) [5]在基于失效库的管道定量风险评价中已隐含了贝叶斯思想,即利用先验失效频率进行修正。

多态模糊贝叶斯网络是处理贫数据下概率不确定性的有效途径。瞿英等(2023) [23]的研究是这一方向的典范。他们针对城市燃气管道,通过对大量事故调查报告的分析,建立了故障树模型并转化为贝叶斯网络结构。尤为关键的是,他们引入模糊集理论来处理专家判断的模糊性和语言不确定性,计算根节点的先验概率,成功实现了事故风险的定量预测与关键致因要素的反向诊断,为贫数据条件下 BN 的先验概率赋值提供了可靠的解决方案。

徐祥沣(2021) [7]在其博士论文中明确指出了静态风险评估的局限性,并基于贝叶斯分析,研究了 SIS 系统控制泄漏的响应概率动态变化规律,量化了泄漏导致不同风险场景的动态概率。这标志着研究从静态风险评价向动态风险预测的演进,通过融入实时或阶段性数据,BN 可以更新其概率分布,从而实现风

险的动态感知与前瞻性预警。王天瑜(2017) [24]在天然气管道风险分析中也应用了贝叶斯理论来确定管道的基础失效概率,体现了其在基础数据修正中的应用。

4.2. 模糊数学与灰色系统理论

当数据不仅“贫乏”而且部分信息“未知”时,模糊数学和灰色系统理论成为处理此类不确定性的有力工具。

姚安林和宋祎昕(2012) [25]利用模糊综合评价法,通过划分配气站风险区块、构造评判矩阵和利用层次分析法确定权重系数,对城市配气站场的事故模式进行了预测研究。该方法较好地处理了定性评价中的模糊性,适用于缺乏精确概率数据的初步风险排序和模式识别。

蒲宏兴(2015) [26]应用灰色关联度分析方法对某城市配气站的六个风险区块进行了分析,用于辨识主要风险区域。灰色理论适用于“小样本、贫信息”的不确定系统,在数据量极少的情况下仍能进行趋势分析和因素关联度判断。黄敏等(2023) [27]在比较两种组合赋权法进行安全风险评估时,也间接涉及了对指标权重不确定性的处理。

4.3. 复杂网络在风险传播中的应用

除了用于系统拓扑分析,复杂网络模型也被用于模拟风险的传播动力学。戴剑勇等(2024) [21]构建的天然气管道网络风险传播模型,定义了节点失效率和脆弱度,能够模拟在不同破坏策略下风险如何通过网络节点进行传播,并找出最优(即最危险)的传播路径。这种方法为理解配气站作为网络中的一个节点,其失效如何引发连锁反应提供了宏观视角,是对微观设备失效预测的重要补充。Jae-Sun Ko 等(2006) [28]利用泊松分布函数对城市燃气火灾爆炸事故进行预测,也体现了利用统计规律进行宏观风险趋势判断的思路。

5. 面向安全仪表系统的贫数据 SIL 评估技术

安全仪表系统(SIS)是配气站最后一道主动安全屏障,其可靠性直接关系到事故能否被有效遏制。由于其高可靠性导致的“贫数据”特性,其安全完整性等级(SIL)评估形成了专门且深入的研究分支。

李冬辉(2023) [6]针对油气站场,基于风险图法、有限差分法和 Monte Carlo 模拟,建立了贫数据条件下的 SIL 等级评估方法。该研究通过仿真得到了要求时平均失效概率(PFD)的分布,证明了改进风险图法在数据缺乏条件下的准确性和实用性。

李成美(2017) [4]与徐祥沅(2021) [7]的研究则更为系统和深入。李成美(2017) [4]的博士论文专门针对贫数据条件,系统分析了 SIS 评估中的不确定性来源,提出了结合模糊数学和概率模型的 SIL 确定与验证方法,并建立了考虑共因失效的异型设备冗余结构计算模型。徐祥沅(2021) [7]则在此基础上,面向海洋石油生产平台,开发了基于贫数据 Markov 模型的 SIL 验证方法,并对 SIS 系统的敏感性进行了研究,最终开发了集成化的 SIL 评估软件,大大提升了工程应用的效率和准确性。这些研究为配气站中关键安全防护设备在数据缺失下的可靠性定量评价提供了直接、前沿的技术支持。

6. 风险预测诊断中的情景演化、屏障效用与动态评估

先进的预测与诊断模型不再孤立地看待设备失效,而是将其置于整个事故情景演化的框架中,并考虑安全屏障的干预作用,从而实现从静态到动态的跨越。

蒲宇婷(2023) [8]的研究系统地展示了这一思路。她引入 Bow-tie 分析技术,构建了高压配气站泄漏事故的结构化模型,向前演绎泄漏演化过程,向后归纳可能引发的火灾、爆炸等后果,清晰呈现了事故发展的全过程路径。这为构建贝叶斯网络或动态事件树的结构(即变量间的依赖关系)提供了坚实的逻辑基础。

同一研究[8]还深刻阐明了站内各级安全屏障(如紧急切断阀、泄漏检测系统等)对事故发展路径的阻断作用和对后果危害的减缓作用。在基于 BN 或动态 BN 的模型中,安全屏障可以作为网络中的节点,其状态(正常/失效)会直接改变事故序列发生的条件概率,从而实现更符合实际的风险预测。孟博杰等(2021) [10]在地震事件序列分析中也隐含地考虑了系统响应、结构强度等“屏障”对最终后果的影响。

Jichuan Kang 等(2025) [18]提出的预测性风险评估框架,旨在通过深度学习时空序列模型快速预测泄漏扩散模式,代表了利用先进数据科学技术实现快速动态评估的新方向。这与徐祥沣(2021) [7]所倡导的动态概率评估理念不谋而合,标志着该领域正从“事后分析”和“定期评估”向“事前预测”和“实时感知”转变。

7. 研究趋势与展望

未来的研究将更倾向于深度融合多源异构信息。这包括将物理模型、数据驱动模型与知识模型相结合。如 Jichuan Kang 等(2025) [18]提出的深度学习与 CFD 结合的思路,可以迁移至配气站,用少量高保真模拟数据训练快速代理模型(Surrogate Model),以解决 CFD 计算耗时的问题,实现风险秒级预测。

随着传感技术和数字孪生技术的发展,基于动态贝叶斯网络、粒子滤波等方法的实时风险更新与预测将成为可能。模型能够根据设备运行状态、环境条件的实时变化,动态调整风险水平,实现从定期评估向持续监测、早期预警的转变。

在贫数据条件下,对不确定性的量化与管理是保证结果可信度的核心。未来研究需要更系统地将模糊集、证据理论、区间概率等与 BN 等模型深度结合,不仅给出风险的点估计,更提供风险概率的置信区间或可能性分布,为基于风险的设计(RBD)和决策提供更丰富、更稳健的信息。

风险预测与诊断的最终目的是指导运维行动。研究重点将从“风险是多少”进一步延伸到“该怎么办”以及“何时办”。通过 BN 的诊断推理、重要性测度分析和风险动态曲线,识别系统薄弱环节和关键致因,并据此生成针对性的、基于风险的预防性维护策略与维修周期,形成“感知-预测-诊断-决策-优化”的闭环智能运维管理,这正是实现配气站安全与经济运行统一的关键。张学尧(2007) [29]、张栋(2004) [30]关于事故后果模拟的风险评价,以及叶振光(2013) [31]关于风险与可靠性的论述,其最终归宿也在于指导安全设计与应急决策。蔺嘉昊等(2023) [32]对水合物生成风险的模拟,以及潘登(2011) [33]对施工井事故的地质风险预测,其方法论亦对配气站特定风险预测具有参考价值。

8. 结论

面对城市配气站安全风险评估中普遍存在的贫数据挑战,国内外学者已从多个维度展开了积极探索。从早期的定性分析、指标体系构建和基于场景模拟的后果分析,再发展到运用贝叶斯网络(特别是多态模糊贝叶斯网络,瞿英等, 2023 [23])、灰色理论、模糊数学等先进工具处理不确定性,并逐步融入情景演化推演、安全屏障效用分析和复杂网络风险传播模型,该领域的研究正朝着更加量化、动态、系统和精细化的方向发展。针对 SIL 评估的特殊难题,也形成了较为成熟的贫数据解决方案。

然而,当前研究仍存在一些不足:其一,多数先进模型仍处于学术研究或原型开发阶段,与工程实践、尤其是与现有站场数字化系统的深度融合与易用性不足;其二,动态风险模型的实时更新能力与准确性,在面对配气站复杂多变的内外部环境时,仍有待在实际工况下进行长期验证与优化;其三,从风险预测结果到具体维护决策的自动化、智能化转换链路尚未完全打通,决策支持的及时性和有效性需进一步提升。

因此,未来的研究应致力于构建一个集成物理机理、实时数据与专家知识的智能预测诊断框架。该框架能够在小样本、多源不确定性的条件下,实现配气站事故风险的精准动态预测、快速根因诊断,并

最终输出科学有效的、基于风险的预防性维护决策，为提升城市燃气系统的本质安全水平和运维效率提供强有力的理论和技术支撑。

参考文献

- [1] 江凯彬, 彭晓辉, 米晓. 输配气站的设备管理[J]. 石化技术, 2019, 26(1): 115.
- [2] 罗能. 水平井卡钻事故预测与处理方法研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2014.
- [3] 石红艳, 袁天强. 天然气输配气站场的风险管理探究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2018, 38(11): 64-65.
- [4] 李成美. 贫数据条件下安全完整性等级评估技术研究及应用[D]: [硕士学位论文]. 东营: 中国石油大学(华东), 2017.
- [5] 张华兵. 基于失效库的在役天然气长输管道定量风险评价技术研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2013.
- [6] 李冬辉. 贫数据条件下油气站场安全仪表系统 SIL 等级评估[J]. 油气田地面工程, 2023, 42(1): 62-67.
- [7] 徐祥洋. 海洋石油生产平台 SIS 系统泄漏控制能力评估[D]: [硕士学位论文]. 东营: 中国石油大学(华东), 2021.
- [8] 蒲宇婷. 某高压配气站泄漏事故情景演化推理及后果动态评估研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆科技学院, 2023.
- [9] 章博. 高含硫天然气集输管道腐蚀与泄漏定量风险研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国石油大学, 2010.
- [10] 孟博杰, 伍颖, 陈良若. 基于改进风险矩阵法的配气站地震事件序列分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(3): 110-116.
- [11] 张淑霞, 吴安坤, 丁旻. 贵阳某工业园配气站雷电灾害风险评估[J]. 山东工业技术, 2015(1): 129-130+147.
- [12] 罗胜. 天然气管道风险分析及管理建议[J]. 化工管理, 2024(15): 110-112+152.
- [13] 章惠龙, 张其海, 李军平. 天然气集输管道安全施工风险分析与对策研究[J]. 石油化工安全环保技术, 2024, 40(2): 12-14+32+5.
- [14] 尹行. 石油天然气管道安全风险及保护措施探讨[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(4): 28-30.
- [15] 张明. 天然气长输管道运行安全风险及预防措施[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(4): 87-89+92.
- [16] 吴鸿. 浅谈输配气站场的 HSE 精细化管理[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2018, 38(3): 109-110.
- [17] 肖飞, 杨露, 王斌, 赵学清, 谢宗宝. 基于场景聚类的天然气场站泄漏风险区域研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2024, 46(1): 147-155.
- [18] Kang, J., Lv, K., Sun, Y. and Li, M. (2025) Predictive Risk Assessment Framework for Leakage Accident of Offshore LNG Transfer System. *Expert Systems with Applications*, **271**, Article 126580. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.126580>
- [19] 王洪丽, 刘晓宇, 海热提·涂尔逊. LNG 接收站泄漏事故最大风险预测[J]. 环境科学研究, 2006(2): 108-111.
- [20] 褚家成, 徐连胜, 蒋平昌, 俞维纫, 胡燕飞. 港口石油化工码头及其库区灾害事故应急系统研究[J]. 中国安全科学学报, 2007(1): 148-155.
- [21] 戴剑勇, 甘美艳, 张美荣, 毛佳志, 刘朝. 基于复杂网络的天然气管道网络风险传播研究[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2024, 21(3): 69-76.
- [22] 孙东升, 丁红梅. 天然气管道风险辨识与治理[J]. 安全、健康和环境, 2011, 11(9): 49-51.
- [23] 瞿英, 王旭茗, 王玉恒, 张静怡. 基于多态模糊贝叶斯网络的城市燃气管道事故风险预测与诊断研究[J]. 河北科技大学学报, 2023, 44(4): 411-420.
- [24] 王天瑜. 天然气管道风险分析与安全距离计算方法研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国矿业大学, 2017.
- [25] 姚安林, 宋祚昕. 基于模糊综合评价的城市配气站场事故模式预测研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2012, 8(11): 118-123.
- [26] 蒲宏兴. 城市配气站场风险区块灰色关联度分析[J]. 内蒙古石油化工, 2015, 41(14): 48-50.
- [27] 黄敏, 周德红, 樊旭岩, 陈锦辉, 李晓柯, 李嘉琦. 基于两种组合赋权法的天然气长输管道安全风险评估比较[J]. 工业安全与环保, 2023, 49(2): 42-47.
- [28] Ko, J.-S., Kim, H. and Lee, S.-K. (2006) Study on Predictable Program of Fire Explosion Accident Using Poisson

Distribution Function & Societal Risk Criteria in City Gas. *Fire Science and Engineering*, **20**, 6-14.

- [29] 张学尧. 石油化工危险物质事故风险预测[J]. 石油化工安全环保技术, 2007(6): 21-23+70.
- [30] 张栋. 大型石油罐区泄漏火灾事故环境风险评价应用研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 首都经济贸易大学, 2004.
- [31] 叶振光. 天然气管道风险与可靠性分析(英文) [C]// 中国石油天然气管道局, 中国石油管道公司, 廊坊市人民政府, 国际管道和海洋承包商协会, 廊坊国际管道会展有限公司. 2013 中国国际管道大会论文集 II. 2013: 3.
- [32] 蔺嘉昊, 孟海龙, 郭永强, 田伟, 蒋成银, 白博宇. 气井节流生产过程中天然气水合物生成风险模拟研究[J]. 非常规油气, 2023, 10(2): 88-93+106.
- [33] 潘登. 施工井事故的地质因素分析与风险预测[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2011.