

中文引用格式:王杰,张明广,程晋强,等. 化工园区重大危险源安全风险防控体系研究进展[J]. 中国安全科学学报, 2026, 36(1): 146–156.

英文引用格式:WANG Jie, ZHANG Mingguang, CHENG Jinqiang, et al. Research progress on safety risk prevention and control system for major hazard installations in chemical parks[J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(1): 146–156.

化工园区重大危险源安全风险防控体系研究进展*

王杰^{1,2}, 张明广^{**1,2}教授, 程晋强^{1,2}, 蒋军成^{1,2}, 王爽^{1,2,3}, 江嘉仪^{1,2}

(1 南京工业大学 安全科学与工程学院, 江苏 南京 210009;

2 江苏省危险化学品本质安全与控制技术重点实验室, 江苏 南京 210009;

3 南京市特种设备安全监督检验研究院, 江苏 南京 210009)

中图分类号:X937

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.01.0810

资助项目:国家重点研发计划项目(2024YFC3016201);江苏省重点研发计划项目(BE2023809);江苏省化工本质安全研究院揭榜挂帅项目(202440496);江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX25_1813)。

【摘要】 为应对化工园区重大危险源的高风险特性与事故后果级联的扩散效应,构建其安全风险防控体系并进行优化;系统综述园区重大危险源安全风险分析方法和多米诺事故链演化方法的优缺点;总结园区内安全屏障的定义、分类以及效能评估指标和评估模型;提出园区安全屏障新分类模式,即物理设施、自动技术、操作程序和组织管理;确定园区安全屏障关键评估指标,即有效性、可靠性,并阐述未来研究方向。结果表明:该体系揭示了园区重大危险源安全风险分析、多米诺事故链演化与安全屏障间动态闭环管控的内在机制,较好解决了传统方法的静态局限;新分类模式和关键评估指标为园区安全屏障效能量化提供了新范式。

【关键词】 化工园区; 重大危险源; 安全风险分析; 防控体系; 多米诺事故链; 安全屏障

Research progress on safety risk prevention and control system for major hazard installations in chemical parks

WANG Jie^{1,2}, ZHANG Mingguang^{1,2}, CHENG Jinqiang^{1,2}, JIANG Juncheng^{1,2},
WANG Shuang^{1,2,3}, JIANG Jiayi^{1,2}

(1 College of Safety Science and Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing Jiangsu 210009, China;

2 Jiangsu Key Laboratory of Hazardous Chemicals Safety and Control, Nanjing Jiangsu 210009, China;

3 Nanjing Special Equipment Safety Supervision Inspection and Research Institute,
Nanjing Jiangsu 210009, China)

Abstract: To address the high-risk characteristics and cascading propagation effects of accident consequences of major hazard installations in chemical parks, the framework of the safety risk prevention and control system was constructed and optimized. The advantages and disadvantages of safety risk analysis methods for major hazard installations and the evolution analysis methods of domino accident chains were systematically reviewed. The definition, classification, and efficacy evaluation indicators and models of

* 文章编号:1003-3033(2026)01-0146-11; 收稿日期:2025-08-21; 修稿日期:2025-11-03

** 通信作者:张明广(1981—),男,江苏南京人,博士,教授,主要从事化工过程本质安全理论及技术、事故调查与分析技术、工业装置定量风险评价等方面的研究。E-mail: mingguang_zhang@njtech.edu.cn。

safety barriers in chemical parks were summarized. A new classification pattern for safety barriers in chemical parks was proposed, encompassing physical facilities, automated technologies, operational procedures, and organizational management. Key assessment indicators for safety barriers in chemical parks were identified, namely effectiveness and reliability, and future research directions were outlined. The results show that the proposed system reveals the intrinsic mechanism of dynamic closed-loop control among safety risk analysis, domino accident chain evolution, and safety barriers for major hazard installations in chemical parks, thereby effectively overcoming the static limitations of traditional approaches. The new classification pattern and key assessment indicators provide a novel paradigm for quantifying the effectiveness of safety barriers in chemical parks.

Keywords: chemical parks; major hazard installations; safety risk analysis; prevention and control system; domino accident chain; safety barriers

0 引言

化工园区因其处理物料危险特性(毒害、易燃易爆)及工艺苛刻条件(高温压、强放热),安全风险突出,在操作失控或外部干扰下,极易发生泄漏、火灾、爆炸等事故,并引发多米诺效应,演化为重特大事故链^[1-2]。如2019年江苏响水“3·21”事故,硝化废料自燃引发爆炸,导致储罐区及周边企业发生连环爆炸与火灾,最终造成794人伤亡、直接经济损失超19亿元,园区关停及产业链中断^[3]。此事故揭示了化工园区重大危险源,尤其是储罐区等高风险单元在事故链中作为主要源头的核心地位^[4]。因此,构建能够动态防控潜在风险、阻断事故级联传播的安全风险防控体系,已成为保障园区安全可持续发展亟待解决的问题。

对此,国内外学者开展了广泛研究,文献[4-7]基于200余起事故案例分析发现,园区重大危险源事故多集中于危险化学品的储存与生产环节,其中,储罐区事故占比约为70%。在安全风险分析方面,现有研究发展了基于概率与后果的风险定量评估方法,为识别高风险区域奠定了基础^[8];在多米诺事故演化方面,已在事故场景概率、传播机理与后果评估方法等取得进展^[9];在安全屏障方面,初步探讨了各类物理与非物理屏障的功能与效能评估^[10]。

然而,当前研究仍存在明显不足,多数研究侧重于静态风险评估或孤立的多米诺效应分析方法,缺乏对风险参数在事故链中动态传递机制的量化描述;安全屏障效能评估多停留于定性层面,缺乏可耦合于动态风险模型的量化方法;现有防控措施研究呈“碎片化”,未能将风险分析、事故演化与屏障效能置于统一、具有反馈机制的框架内集成优化。这些局限制约了防控体系的前瞻性与实效,因此,笔者

拟构建化工园区重大危险源安全风险防控体系,系统综述其安全风险分析方法、多米诺事故链演化方法和安全屏障3个模块的研究进展,并展望未来研究方向,以期优化园区重大危险源安全防控举措提供一定的参考。

1 构建化工园区安全风险防控体系

构建化工园区重大危险源安全风险管控体系,如图1所示。该体系由安全风险分析、多米诺事故链演化及安全屏障应用三者构成,形成识别—传播—防控的递进式架构。

三者关系构成参数输入—路径推演—效能反馈的闭环机制。具体而言,预警监测平台提供的动静态数据,经安全风险分析量化储罐的固有脆弱性与灾害物理参数,作为多米诺事故链的初始概率与触发阈值。事故链预测基于多灾害耦合传播路径,动态推演级联失效的时空规律,并暴露系统性漏洞以反向更新事故场景。安全屏障^[1]则通过实时干预传播路径,反向修正风险模型参数与事故链权重。

2 安全风险分析方法

梳理化工园区储罐定量安全风险分析的常用方法及其关键特征,见表1。当前危害辨识与风险评估环节采用的主流方法包括危险与可操作性分析^[11]、故障模式与影响分析^[12]、保护层分析^[13]、工作安全分析^[14]、故障树^[15]、事件树^[4]、贝叶斯网络^[16]、蒙特卡罗模拟^[17]、Petri网^[18]、蝴蝶结图^[19]及矩阵法^[20]等。近年来,研究方法逐步具备动态性与模糊性^[21]等特征,推动分析过程由静态向动态演进。

随着事故场景趋于耦合与复杂,组合型安全风险分析方法(如危险与可操作性分析+故障树结

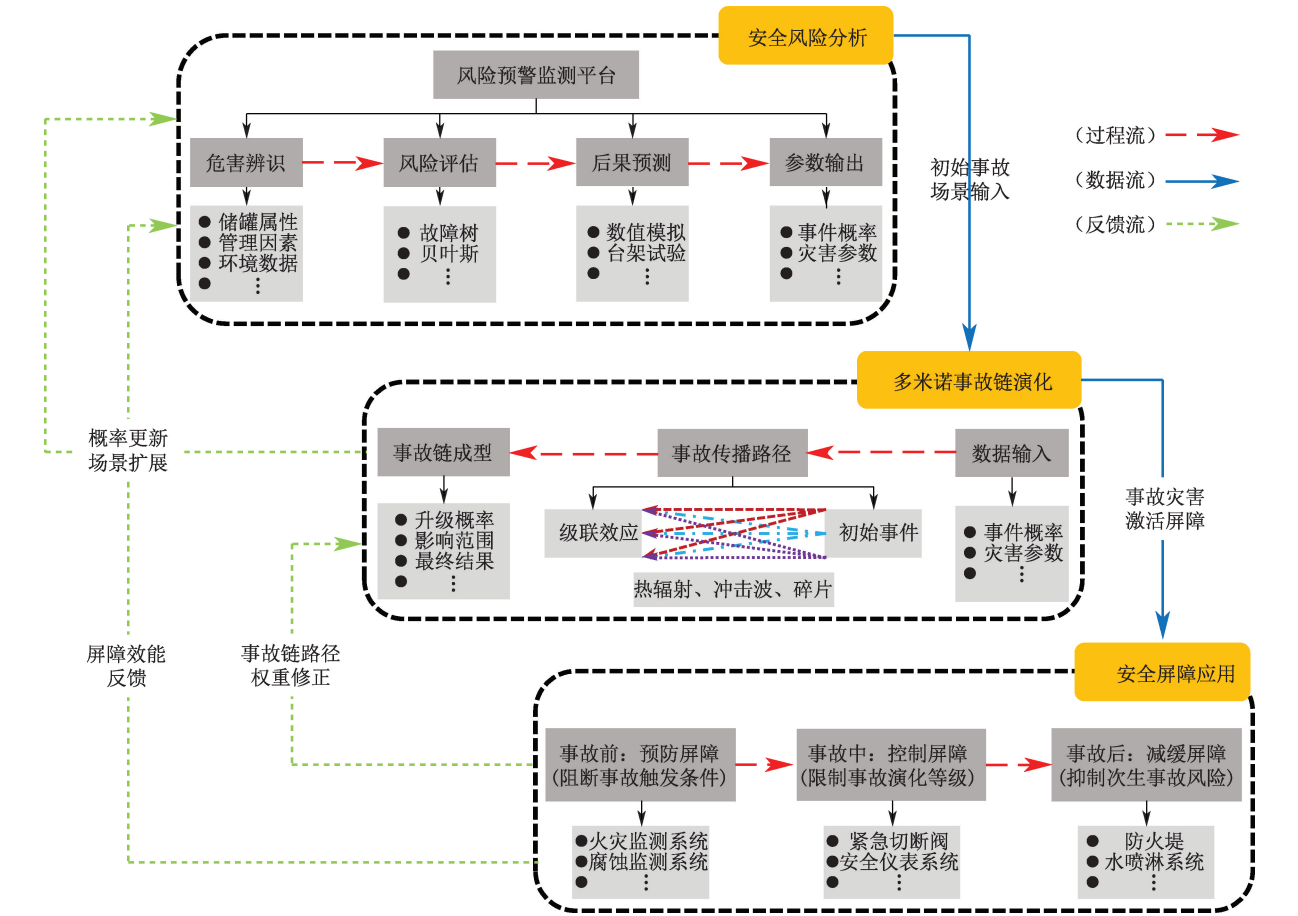


图 1 化工园区重大危险源的安全防控体系

Fig. 1 Framework of safety prevention and control system for major hazard installations in chemical parks
合^[11]、贝叶斯+蒙特卡罗融合^[17])以及基于机器学习的方法^[22]逐渐应用于实践,但其通用性与实用性仍有待验证。结合宁夏宁东能源化工基地“10·24”
储罐爆燃事故案例^[23],分析上述方法在企业实际应用中的局限性,并探讨其对园区层面风险防控效果的影响(表1)。

表 1 化工园区储罐安全风险分析方法

分析方法	特征	局限性对园区风险防控的影响
危险与可操作性分析 ^[11] (危害辨识)	系统全面地识别潜在风险、可实现事前预防 动态适应性不足、定性依赖经验	特殊作业动态风险预见不足使预警 资源配置失准
安全检查表分析 ^[24] (危害辨识)	灵活性强、适用性广、助于发现一些非典型的风险 静态清单与动态现场脱节、易致风险疏漏	企业安全状态评估失真使园区监管 资源配置失准
故障模式与影响分析 ^[12] (危害辨识)	分析全面、易于量化排序、可用于事前预防性分析 工作量大、用于硬件故障分析、系统级联性缺乏	复杂事故链预见性不足使园区应急 准备薄弱与阻断失效
保护层分析 ^[13] (危害辨识)	结构清晰、识别关键保护层、聚焦 SIL 定级 理想假设存在偏差、且高度依赖初始事件与数据	高估园区实际安全裕度使应急预案 与真实风险失配
工作安全分析 ^[14] (危害辨识)	直观聚焦操作、可提升安全意识并支撑规程制定 分析视野受限、存在系统性风险疏漏与人为偏差	交叉作业与承包商风险管控薄弱使 园区预警干预能力不足
故障树 ^[15] (风险评估)	兼容数据缺失与模糊、随机及认知不确定性分析 静态逻辑与动态耦合失配、准则模糊	低估人因管理等系统性风险使园区 监管难触及结构性隐患
事件树 ^[4] (风险评估)	事故逻辑清晰、兼具动态风险定量捕捉能力 数据依赖性及路径固化与不确定性失配问题	初期事故路径覆盖不足使园区准备 缺失而响应滞后
贝叶斯网络 ^[16] (风险评估)	数据需求兼容随机、时序及不确定性 计算复杂、存储需求激增、先验主观性与数据匮乏	监测系统存在系统性偏差使园区数 据稀缺风险响应滞后

续表 1

分析方法	特征	局限性对园区风险防控的影响
蒙特卡罗 ^[17] (风险评估)	不确定性分析可视化、关键因素辨识优化 对数据及极端事件高敏感性、且计算成本高昂	人为因素致风险分析失真使园区风险识别能力不足
Petri 网 ^[18] (风险评估)	动态建模能力突出、兼具扩展性与不确定性分析 计算复杂度高且对数据敏感	难以支撑园区宏观实时风险态势研判与多要素动态关联分析
蝴蝶结图 ^[19] (风险评估)	风险沟通直观、数据驱动不确定性量化能力增强 主观性强与屏障理想化共因失效制约评估可靠性	高估企业风险防控水平使园区应急资源过载与事故升级
风险矩阵 ^[20] (风险评估)	系统性增强、不确定性量化能力提升 权重主观性强、且存在计算瓶颈与冗余不足	风险优先级失准导致资源错配使园区忽视高影响低概率事件
基于仿真模拟、智能化 算法等,或者上述方法 组合形式等 ^[11, 17, 25, 32]	场景适配精准度提高、智能驱动风险维度拓展 标准缺失、通用性不足制约结果可比性	多为特定事故情景使园区层面使用范围受限

3 多米诺事故链演化方法

化工园区多米诺效应是事故链形成的物理基础,而事故链是效应传播的显性表达。统计多米诺事故链的研究方法,见表 2。发现重大危险源中储罐(尤以液化气球罐为甚)引发的事故链占比最大^[6-7]。效应传递的主要能量形式为热辐射、冲击波及碎片^[26];典型演化情景包括火灾→火灾、火灾→爆炸、爆炸→爆炸与爆炸→火灾。事故链长度

主要受安全屏障体系的有效性与可靠性控制。现有方法多基于事故统计数据,采用事件树、故障树^[7]、贝叶斯网络、动态图、蝴蝶结图^[19]或蒙特卡罗模拟^[17]等进行路径预测与概率计算。近年来,动态性、模糊性及机器学习^[28]等概念的引入,有效提升了在时序性与不确定性问题的处理能力;而组合方法(如结构响应与 Probit 模型结合^[27])亦通过优势互补,实现对特定场景下事故链演化的更准确预测。

表 2 化工园区储罐事故链演化分析方法

Table 2 Analysis methods for accident chain evolution for storage tanks in chemical parks		
分析方法	特征	缺陷
典型事故案例分析 ^[26]	火灾、冲击波与碎片等能量形式驱动事故升级,其链长取决于效应管理的时效与效能	历史数据的非完备性与路径依赖性
事故统计+事件树 ^[4, 6]	储罐区多米诺事故高发(35%以上),可量化其多情景演化路径与概率	静态逻辑结构与简化的独立性假设
事故统计+故障树 ^[7]	储罐区 70%事故引发多米诺效应,43%导致蒸气云爆炸,可识别主导事故链路径	
事故统计+贝叶斯网络 ^[4, 16]	解决不确定性问题,可量化火灾、爆炸等多米诺事故链的演化路径与概率	高度依赖于条件概率表先验知识的准确性
动态图模拟方法 ^[28]	可量化时空耦合效应下的事故链传播机制	难以精确量化评估风险水平
蝴蝶结图 ^[19]	实现多米诺效应定量分析与可视化	难以量化评估多屏障在耦合事故下系统性失效的概率
蒙特卡罗 ^[17]	研究储罐多米诺事故链动态演化路径和发生概率	准确性受限于输入参数的概率分布
地理信息系统 ^[29]	自动识别可能升级效应目标,直接计算可能的多米诺骨牌情景和对应的风险指标	无法独立推演事故链动态演化过程,必须与其他动态模型耦合
事故统计+概率模型 ^[30]	预测可能发生的多米诺事故链及影响	数据匮乏与模型简化的“瓶颈”
结构响应+Probit 模型 ^[22, 31]	提高储罐火灾升级 Probit 模型的准确性	缺乏成熟、通用的多灾种耦合模型与简化的工程判据
数值模拟方法 ^[32]	全面地模拟储罐池火后果,并且准确地评估协同效应下多米诺效应和事故链演化路径规律	计算成本高昂,无法直接用于需要成千上万次模拟的概率风险评估
机器学习 ^[22]	评估储罐火灾多米诺效应,预测其屈服强度与动态故障	严重依赖数据集的数量与质量,易导致模型过拟合或外推预测不可靠

构建适用性对比矩阵,如图 2 所示。从动态时序处理能力与定量计算精度 2 个维度,对标表 2 方法进行定位,可为快速筛查、精准量化及动态推演等场景的方法遴选提供可视化依据。

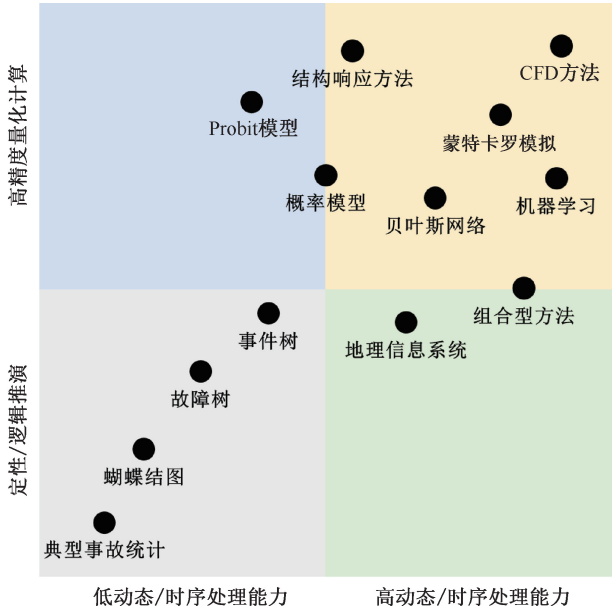


图 2 多米诺事故链研究方法适用性对比矩阵
Fig. 2 Comparison matrix of applicability of methods for domino accident chain research

4 安全屏障

4.1 安全屏障定义、分类

采纳 SKLET[33]对安全屏障的定义,即旨在预防、控制或减轻意外事件的物理或非物理手段。化工园区中的安全屏障被具体化为防控多米诺事故的技术或管理措施^[34],其常见分类见表 3。现有文献[35–38]中的定义多基于此进行延伸,以适应特定场景下对安全屏障关键功能的阐释需求。

表 3 化工园区安全屏障分类模式

Table 3 Classification patterns of safety barriers in chemical parks		
来源	具体分类名称	分类依据
SKLET ^[33] LIU Yiliu ^[34] YUAN Shuaiqi 等 ^[36] WANG Haishun 等 ^[37] 曾涛等 ^[10] WANG Jie 等 ^[38]	被动、主动屏障	存在形态 作用机制 防护范围 失效逻辑
	物理、技术、操作屏障	
	物理、非物理屏障	
	静态、动态、时间屏障	
	常规、应急屏障	
	软连接、硬连接屏障	
	技术、非技术屏障	
	预防、缓解、控制型屏障	
	永久型、暂时型屏障	
	物理、标识、行为屏障	

尽管基于功能与响应的安全屏障分类框架被广泛采纳,但其静态视角、对组织管理因素的涵盖不足,以及与现代过程安全管理体系的融合欠缺等局限,限制了在化工园区深层次事故致因分析中的应用。为此,构建一个系统性的四维分类模式,将安全屏障划分为物理设施、自动技术、操作程序与组织管理 4 大类别,见表 4。其中,物理设施类屏障提供实体防护;自动技术类屏障实现实时监控与调控;操作程序类屏障规范作业行为;组织管理类屏障则从体系层面确保应急效能与持续改进。该模式与表 3 中的本质差异与理论优势在于:

1) 从技术核心到人-技-组织的系统性整合。揭示了安全防御的层次结构:组织管理类是根基,它孕育和维系了有效的操作程序,并确保了自动技术与物理设施的可靠性。

2) 揭示屏障间“赋能”而非并列的内在逻辑。组织管理屏障确立制度基础,操作程序屏障规范行为与流程,二者共同保障自动技术屏障的有效运行,并最终通过物理设施屏障实现实体防护。该逻辑深刻解释了技术屏障齐备却因管理漏洞导致事故的根本原因。

3) 与现代过程安全管理要素实现对接。该模式不仅作为理论分析工具,更可为园区管理者从单纯增设硬件转向,同时夯实组织管理这一“软基建”,实现风险防控能力的整体跃升。

表 4 化工园区安全屏障新分类模式

Table 4 New classification patterns of safety barriers in chemical parks	
屏障类别	举例
物理设施	防火涂层、防爆涂层、防爆墙等
自动技术	自动水喷淋系统、安全仪表系统、自动报警系统、过程控制系统等
操作程序	标准操作程序、员工培训认证、应急响应计划、风险评估管理等
组织管理	安全管理体系、安全委员会小组、政策规章制度、安全文化建设等

4.2 安全屏障效能评估指标

化工园区安全屏障效能评估指标^[10]见表 5。其中,有效性与可靠性被广泛采纳为核心指标,多数其他指标可视为二者的拓展。在构建安全屏障效能评估指标体系时,可将有效性与可靠性作为一级指标,其它相关指标作为其二级指标,形成层次化结构。此外,经济影响等独立指标亦需纳入考量。

表 5 化工园区安全屏障效能评估指标

Table 5 Assessment indicators for efficacy of safety barriers in chemical parks

评估指标	取值	定义
置信水平	[0-1]	主要功能正常运行时的可用性
响应时间/s	—	主要功能发挥的时间
经济影响/元	—	所需成本及获得的效益
有效性	[0-1]	成功激活后阻止升级的概率
可用性	[0-1]	量化后的按需失效概率
适应性	[0-1]	在不失去其主要功能的情况下承受极端干预能力
可恢复性	[0-1]	在中断之后自行恢复的能力
弹性、韧性	[0-1]	吸收(抵抗)、适应和恢复能力

表 6 4 类安全屏障效能评估模型

Table 6 Four types of efficacy assessment models for safety barriers

安全屏障类型	效能评估模型
物理设施	特征:在消防单元,关联安全屏障完整性等级与事故概率,评估其充分性并量化屏障失效风险 ^[47] 输入(出):安全屏障故障概率等作为输入,设施发生火灾概率作为输出,作为评价安全屏障是否满足防控需求的依据
	特征:在储罐区,基于 ABAQUS 软件建立安全屏障下储罐失效时间判据模型,偏差降低 11.74% ^[5] 输入(出):防火涂层和水喷淋系统下储罐失效过程参数等作为输入,储罐失效时间作为输出,为控制多米诺效应的传播提供判据
自动技术	特征:在浮式装卸油区,基于马尔可夫和 Petri 网构建安全屏障效能评估模型,用于安全屏障动态效能分析和气体泄漏事故升级概率计算 ^[48] 输入(出):安全屏障动静态参数等作为输入,平均故障概率(可用性)和事故升级概率(有效性)作为输出,相比下数量级相同且数值略高
	特征:在化工生产过程,基于模糊贝叶斯网络与保护层分析评估安全仪表系统效能,并实现故障概率动态更新,划分安全完整性等级,相比下偏差降低了 14.6% ^[44] 输入(出):安全仪表系统故障概率等作为输入、频率和风险等级作为输出,完成安全完整性分级
操作程序	特征:在储罐区,利用火灾升级概率和人为失误概率构建多米诺-人为干预模型,动态贝叶斯网络分析初始事故场景和安全屏障下事故场景,发现人为干预会降低储罐安全性 ^[49] 输入(出):人为失误概率和安全屏障性能可靠性概率量值等作为输入,储罐火灾发生(升级)概率为输出,发现考虑人为可靠性时,防护设施延迟启动,加剧储罐火灾风险
	特征:在化工园区应急救援环节,结合改进层次分析与熵权法,构建人因可靠性定量模型,评估应急行为失误概率与严重程度 ^[43] 输入(出):人为错误概率等作为输入,化工园区综合应急能力量值为输出,有效识别关键应急行为,提升园区应急救援能力
	特征:在化工厂,基于技术操作和组织因素的频率和弹性,评估安全屏障效能,以降低事故概率 ^[50] 输入(出):安全屏障的置信水平、技术、运营和组织因素量值等作为输入,安全屏障效能值作为输出,评估工艺区域的安全风险
	特征:在加油站,基于人因可靠性分析、模糊综合评价、可靠性等级、专家评分法建立多维结构下安全屏障半定量评估框架,确定屏障评估指标,并对评估结果归一化处理 ^[51] 输入(出):人因可靠性概率、技术、组织管理、应急效能系数等作为输入,整体安全屏障效能评价结果作为输出,相比下考虑更全面

4.3 安全屏障效能评估模型

4 类安全屏障效能评估模型见表 6,从表 6 中可以看出,当前研究多集中于物理设施与自动技术类屏障^[39],操作程序类屏障评估则主要基于人的可用性分析方法^[35,40]。相比之下,组织管理类屏障评估研究较匮乏,其重要性长期被忽视^[41-42]。物理与自动技术类屏障常被共同评估^[43-44],且现有评估模型正逐步向跨类别屏障体系拓展。

安全屏障效能评估研究借鉴了安全风险分析与多米诺事故链演化中的方法(如故障树、贝叶斯网络与蝴蝶结图等),其评估结果可反馈至动态风险分析中,用于修正风险参数并预测在屏障作用条件下的事故发生概率^[43,45-46]。

续表 6

安全屏障类型	效能评估模型
物理设施 自动技术 操作程序	特征:在石化企业,明确安全屏障效能评估指标,基于事件树考虑不同安全屏障的效能概率,在多米诺效应风险评估中更详细地预测次生事故发生概率 ^[45] 输入(出):安全屏障的可用性、有效性量值等作为输入,火灾事故升级概率作为输出,可对多米诺事故情景进行更全面的评估,确定未缓解、缓解情景,抑制多米诺事故链的概率和频率
	特征:在化工生产过程,基于动态仿真技术,量化独立保护层中人因失误概率,将动态仿真与人为可靠性分析结合,实现对人因失误全面分析 ^[52] 输入(出):事故情景、人因失误概率量值等作为输入,人为可靠性概率作为输出,在保护层评估过程考虑人为干预因素的影响
物理技术 自动技术 组织管理	特征:在石化企业,利用蝴蝶结图识别关键安全屏障,并评估其效能(响应时间、置信度等),判断安全屏障数量和可靠性是否满足风险控制需求 ^[2] 输入(出):安全屏障可靠性量化值、安全管理权重等作为输入,安全风险评估结果作为输出,侧重于安全管理评估,为工厂检查提供了更加明确的参考
	特征:在石油开采平台,通过贝叶斯网络实现对潜在事故情景精确建模,进而评估安全屏障效能,通过处理偏差和弹性反应策略,定期迭代动态风险评估效果 ^[46] 输入(出):安全屏障失效概率等作为输入,安全措施整体性能评估结果作为输出,实现了动态风险评估和管理
物理技术 自动技术 操作程序 组织管理	特征:在石化企业,贝叶斯网络节点代表物理技术类和自动技术类安全屏障健康状态,通过人因可靠性分析评估操作程序和组织管理类安全屏障 ^[41] 输入(出):安全屏障正常/异常/时间序列数据、权重系数等作为输入,事故后果概率作为输出,继而进行风险量化评估

5 研究展望

文中所构建的化工园区重大危险源安全防控体系主要针对储存区(如储罐、球罐),未来应逐步拓展至生产装置、管道系统等关键环节。结合我国化工园区多元化发展趋势,从以下 5 个方面推进体系深化,并形成了以识别-阻断-迭代为核心的全周期安全风险防控新框架,如图 3 所示。该框架以预警监测为“神经中枢”,实现风险动态分析、事故链可控演化与屏障精准评估,系统性地应对重大危险源防控中的模糊性与不确定性问题。其中,动态安全风险模块中重大危险源风险预警识别模型已在南京江北新材料科技园区投入试点应用。该模型通过耦合危险源级别、工艺参数、传感器报警等多维数据,实现风险值的动态计算,可有效提升风险识别的准确性^[53]。下一步拟逐步集成其余模块研究成果,并开展系统性验证优化。

5.1 预警监测平台升级

现有化工园区预警监测平台受限于静态感知、割裂分析、被动响应的传统架构,难以应对动态演化、复杂耦合与智能防控的新要求。构建的新框架中,平台与关键环节的协同机制如下:①与安全风险

分析。通过实时数据输入增强风险动态识别能力,前置触发再评估流程。②与多米诺事故链演化。实现初始事故快速捕捉,并基于传播阈值动态预测与阻断事故路径。③与安全屏障应用。依托规则库实现屏障智能激活与效能持续优化。未来研究应聚焦于融合 AI 与边缘计算,以推进本地化风险评估,构建监测-分析-屏障一体化信息物理系统,并发展概率-模糊混合模型以量化监测噪声与模型不确定性。

5.2 安全屏障下动态风险定量分析

针对当前静态风险分析忽略安全屏障与事故链动态交互的不足,未来研究需构建一个融合事故链-安全屏障复杂网络的动态分析模型。该模型应能识别关键事故节点与路径,并综合屏障效能(有效性、可靠性)与风险熵变、平均次生概率等指标,实现在屏障作用下的精准风险分析。

5.3 多米诺事故链复杂网络化路径推演

目前,多米诺事故链研究多囿于单一情景路径推演,难以应对实际园区中多灾种耦合、多链交织的网络化趋势。未来研究应考虑基于案例与试验验证的多灾种耦合机制;构建动静态数据融合的事故链数据库;采用贝叶斯网络等概率模型量

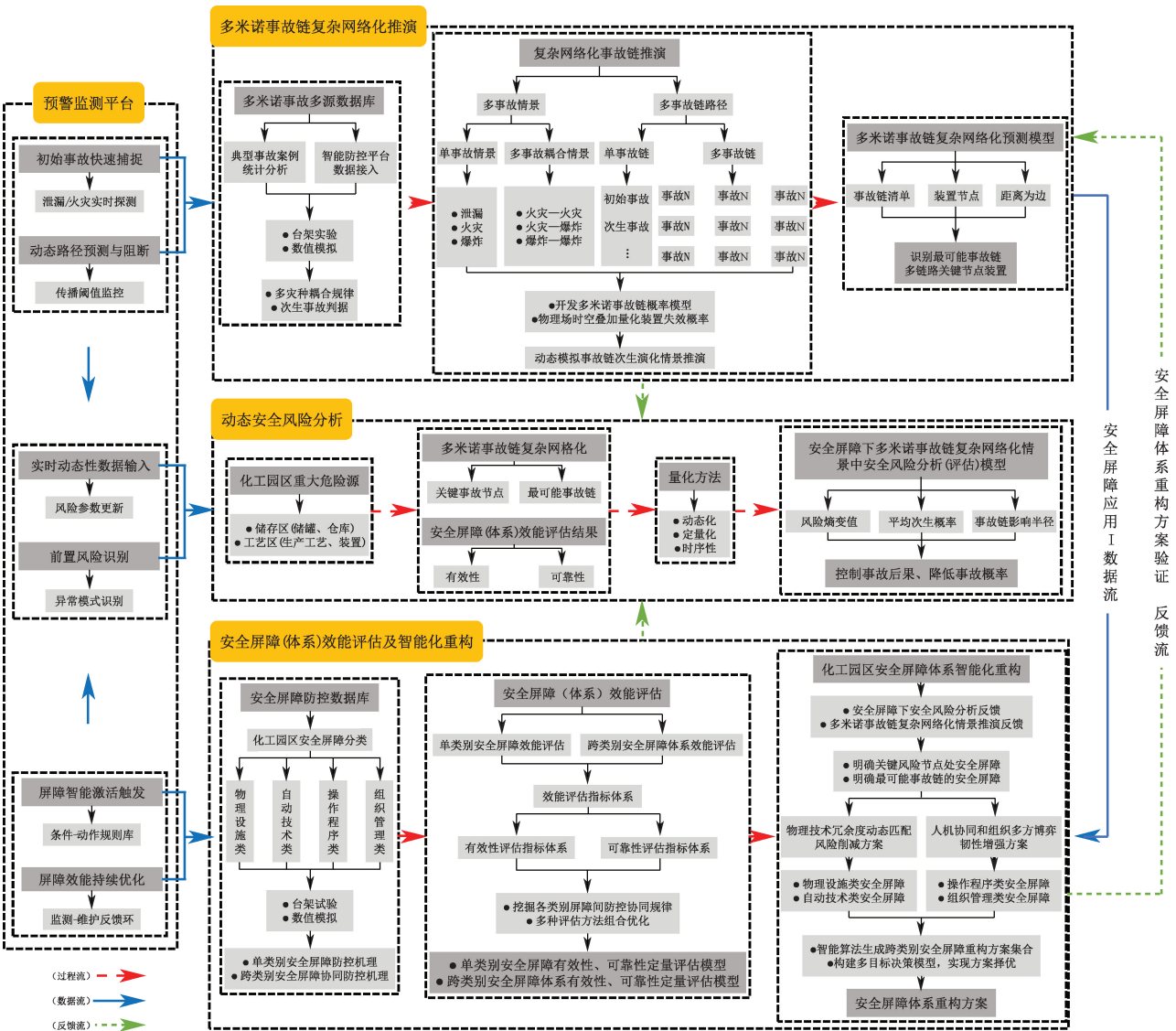


图 3 化工园区重大危险源全周期安全风险防控体系新框架

Fig. 3 New framework of full-cycle safety risk prevention and control system for major hazard installations in chemical parks

化物理场叠加下的动态失效概率;进而建立园区事故链复杂网络模型,识别关键节点与链路以指导风险防控。

5.4 安全屏障(体系)效能量化评估

当前化工园区安全屏障效能评估研究多集中于物理技术类屏障,对操作程序与组织管理类屏障的量化模型研究尚显不足。未来研究应基于新分类模式,系统揭示多类别屏障协同机理,构建防控数据库与多层级量化评估体系;进而通过多方法融合与经验-数据双驱动,建立跨类别屏障体系的有效性与可靠性定量评估模型,并开展实例验证。

5.5 安全屏障体系智能化重构

现有化工园区安全屏障研究多局限于静态、孤

立的单屏障增设,缺乏系统性动态重构机制。未来应融合人工智能,基于事故链与网络分析识别关键风险节点;建立物理/自动屏障的冗余配置与风险动态匹配机制;制定管理/程序类屏障的人机协同韧性策略;运用图神经网络等技术生成重构方案,并构建融合多目标(绩效、成本、合规性)的智能决策模型进行优选;最终通过事故情景仿真验证其对事故链的阻断效能。

6 结 论

1) 构建化工园区重大危险源安全风险防控体系,该体系可揭示安全风险分析、多米诺事故链演化和安全屏障之间紧密的互补与反馈机制,可较好解

决传统方法的静态局限;安全风险分析为事故链演化提供初始场景概率与触发阈值;事故链预测模型据此更新事故概率并扩展场景;安全屏障则通过实时干预传播路径,反向修正风险参数与事故链权重,形成闭环风险管控。

2) 提出化工园区安全屏障新分类模式,即物理

设施、自动技术、操作程序与组织管理。确定园区安全屏障关键评估指标,即有效性、可靠性。

3) 提出未来研究方向,包括预警监测平台升级、安全屏障下动态风险量化、多米诺事故链复杂网络化路径推演、安全屏障效能评估与智能重构,并据此构建新框架。

参 考 文 献

[1] ZENG Tao, WEI LiuJun, DUO Yingquan, et al. Resilience-based design of barrier system to mitigate fire-driven escalation in process plants[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2025, 199: DOI: 10.1016/J. PSEP. 2025. 107319.

[2] GAO Xiaoming, CHEN Guohua, XIONG Caiyi, et al. A theoretical framework for chemical storage tank pool fire domino effect prevention based on inherent safety concepts[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2025, 196: DOI: 10.1016/J. PSEP. 2025. 106924.

[3] 国务院事故调查组. 江苏响水天嘉宜化工有限公司“3·21”特别重大爆炸事故调查报告[EB/OL]. [2025-08-30]. <https://www.mem.gov.cn/gk/sgcc/tbzdsgdcbg/2019tbzdsgcc/201911/W020240229376281346471.pdf>.

[4] CUI Xingmin, ZHANG Mingguang, PAN Wenjie. Dynamic probability analysis on accident chain of atmospheric tank farm based on bayesian network[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2022, 158:146-158.

[5] ZHANG Mingguang, ZHENG Feng, CHEN Fuzhen, et al. Propagation probability of domino effect based on analysis of accident chain in storage tank area[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2019, 62:DOI:10.1016/j.jlp. 2019. 103962.

[6] XIAO Shenbin, WEI Lijun, ZENG Tao, et al. Buckling failure prediction of storage tanks in fire scenarios: a machine learning approach[J]. Engineering Failure Analysis, 2025, 182:DOI:10.1016/J. ENGFAILANAL. 2025. 110157.

[7] SARVESTANI K, AHMADI O, ALENJAREGHI M J. LPG storage tank accidents: initiating events, causes, scenarios, and consequences[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2021, 21(4):1305-1314.

[8] JIANG Hongrui, DING Long, JI Jie, et al. A novel integrated multi-source heterogeneous uncertainty fusion framework for reducing the complexity of uncertainty characterization in domino effect risk assessment[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2026, 99:DOI:10.1016/J. JLP. 2025. 105804.

[9] LI Yuanyuan, ZHENG Ziran. A literature review on hazardous chemical domino accidents: a clustering and social network analysis approach [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2026, 99: DOI: 10.1016/J. JLP. 2025. 105823.

[10] 曾涛,魏利军,陈国华,等. 化工园区安全屏障研究综述与展望:概念、评估与管理[J/OL]. 化工进展:1-14. [2025-08-30]. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2024-1303>.

ZENG Tao, WEI Lijun, CHEN Guohua, et al. Review and prospect of safety barrier research in chemical industrial parks: concept, assessment and management[J/OL]. Chemical Industry and Engineering Progress:1-14. [2025-08-30]. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2024-1303>.

[11] ALMOUSA A A, HOSEYNI S M, CORDINER J. Incorporating resilience into HAZOP to enhance process safety in industrial facilities [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2025, 96: DOI: 10.1016/J. JLP. 2025. 105630.

[12] YU Yang, YANG Yuheng, YU Jianxing, et al. An improved FMEA approach based on interval-valued spherical fuzzy sets and CODAS method for LNG tank safety analysis[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2025, 97:DOI:10.1016/J. JLP. 2025. 105679.

[13] GALEEV A. Establishing risk tolerance criteria for incident scenarios in LOPA[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2025, 99:DOI:10.1016/J. JLP. 2025. 105799.

[14] ALBRECHTSEN E, SOLBERG I, SVENSLI E. The application and benefits of job safety analysis[J]. Safety Science, 2019, 113:425-437.

[15] HALLOUL Y, CHIBAN S, AWAD A. Adapted fuzzy fault tree analysis for oil storage tank fire[J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2019, 41(8):948-958.

[16] 岳文静,杜丽敬,陈先锋,等. 基于 DBN 的气体泄漏事故情景推演与节点分析[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(增 1):165-170.

YUE Wenjing, DU Lijing, CHEN Xianfeng, et al. Scenario deduction and node analysis of gas leakage accidents based on DBN[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(S1):165-170.

[17] SU Mingqing, WEI Lijun, ZHOU Shennan, et al. Study on dynamic probability and quantitative risk calculation method

- of domino accident in pool fire in chemical storage tank area[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(24):DOI:10.3390/IJERPH192416483.
- [18] GUO Liping, WANG Zhirong. Analysis of uncertainty propagation path of fire-induced domino effect based on an approach of layered fuzzy petri nets[J]. *Chemical Engineering Science*, 2023, 268:DOI:10.1016/J.CES.2022.118410.
- [19] GHOLAMIZADEH K, ZAREI E, YAZDI M, et al. A hybrid model for dynamic analysis of domino effects in chemical process industries[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2024, 241:DOI:10.1016/J.RESS.2023.109654.
- [20] ZHOU Jianfeng, RENIERS G. Probabilistic petri-net addition enabling decision making depending on situational change: the case of emergency response to fuel tank farm fire[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2020, 200:DOI:10.1016/j.res.2020.106880.
- [21] GUO Xiaoxue, JI Jie, KHAN F, et al. Fuzzy bayesian network based on an improved similarity aggregation method for risk assessment of storage tank accident[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, 149:817–830.
- [22] JIANG Min, YANG Yu, BIAN Jiexiang, et al. Explosion induced domino effect assessment in the process industries: a machine learning approach to improve probit models[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2025, 98:DOI:10.1016/J.JLP.2025.105714.
- [23] 宁夏回族自治区应急管理厅. 宁东能源化工基地宁夏畅亿清洁能源有限责任公司“10·24”事故调查报告[EB/OL]. [2025-08-30]. http://nxyjgl.nx.gov.cn/yjfc/sgdcclzyrqymd/202403/t20240330_4500938.html.
- [24] ZHAO Xu, ZHAO Yunhao, LI Jing, et al. PS-RTA method for safety responsibility management: an approach to promote competency of employees to fulfill safety responsibility[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2025, 98:DOI:10.1016/J.JLP.2025.105713.
- [25] XU Yuanyuan, RENIERS G, YANG Ming, et al. Uncertainties and their treatment in the quantitative risk assessment of domino effects: classification and review[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2023, 172:971–985.
- [26] HU Hong, LAN Meng, QIN Rongshui, et al. Dynamic probabilistic risk assessment considering the domino effect in chemical parks based on Monte Carlo simulation[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2025, 193:856–873.
- [27] AMIN M T, SCARPONI G E, COZZANI V, et al. Improved pool fire-initiated domino effect assessment in atmospheric tank farms using structural response[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2024, 242:DOI:10.1016/J.RESS.2023.109751.
- [28] LAN Meng, GARDONI P, WENG Wenguo, et al. Modeling the evolution of industrial accidents triggered by natural disasters using dynamic graphs: a case study of typhoon-induced domino accidents in storage tank areas[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2024, 241:DOI:10.1016/J.RESS.2023.109656.
- [29] COZZANI V, ANTONIONI G, SPADONI G. Quantitative assessment of domino scenarios by a GIS-based software tool[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2006, 19(5):463–477.
- [30] MUKHIM E D, ABBASI T, TAUSEEF S M, et al. Domino effect in chemical process industries triggered by overpressure: formulation of equipment-specific probits[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2017, 106:263–273.
- [31] ZHOU Lixing, CHEN Guohua, GAO Xiaoming. An event-driven modeling methodology of situation awareness: towards emergency response process in fire-induced domino scenario[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2025, 96:DOI:10.1016/J.JLP.2025.105618.
- [32] 石军花, 朱梅, 李进, 等. 化工园区储罐火灾热辐射模型仿真研究[J]. *中国安全科学学报*, 2022, 32(增1):79–83.
- SHI Junhua, ZHU Mei, LI Jin, et al. Simulation study on thermal radiation model of storage tank fire in chemical industry[J]. *China Safety Science Journal*, 2022, 32(S1):79–83.
- [33] SKLET S. Safety barriers: definition, classification, and performance[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2006, 19(5):494–506.
- [34] LIU Yiliu. Safety barriers: research advances and new thoughts on theory, engineering and management[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2020, 67:DOI:10.1016/j.jlp.2020.104260.
- [35] 王冬冬, 杨昂滨, 王智浩, 等. 化工园区危险化学品事故应急行为因可靠性分析[J]. *中国安全科学学报*, 2025, 35(2):21–27.
- WANG Dongdong, YANG Angbin, WANG Zhihao, et al. Human reliability analysis of emergency behaviors for hazardous chemical accidents in chemical industry parks[J]. *China Safety Science Journal*, 2025, 35(2):21–27.
- [36] YUAN Shuaiqi, YANG Ming, RENIERS G, et al. Safety barriers in the chemical process industries: a state-of-the-art review on their classification, assessment, and management[J]. *Safety Science*, 2022, 148:DOI:10.1016/J.SSCI.2021.105647.
- [37] WANG Haishun, WEI Lijun, WANG Kai, et al. Current status, challenges, and future pathways of chemical industrial park safety in China[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2024, 87:DOI:10.1016/J.JLP.2023.105233.
- [38] WANG Jie, ZHANG Mingguang, WANG Zirui, et al. An effectiveness assessment model of protection chain for major hazard installations in chemical industrial parks[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2026, 99:DOI:10.1016/J.JLP.2025.105815.

- [39] WANG Qianlin, CHEN Shicheng, SHI Jiancheng, et al. Assessment of safety barrier performance in complex chemical processes: bridging conventional semi-quantitative risk assessment techniques with systems-theoretic optimisation[J]. Chemical Engineering Science, 2025, 316; DOI:10.1016/J.CES.2025.121927.
- [40] AKYUZ E, CEBI S. Analysis of human errors in emergency steering gear operation at tanker ship under decomposed fuzzy analytical hierarchy process and SLIM approach[J]. Ocean Engineering, 2025, 340; DOI:10.1016/j.oceaneng.2025.122408.
- [41] DIMAIO F, SCAPINELLO O, ZIO E, et al. Accounting for safety barriers degradation in the risk assessment of oil and gas systems by multistate bayesian networks[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2021, 216; DOI:10.1016/J.RESS.2021.107943.
- [42] 贺治超, 兰猛, 贺非凡, 等. 基于概率性仿真的危化品多米诺事故风险动态评估软件系统设计与应用[J]. 中国安全生产科学技术, 2025, 21(4):5-11.
HE Zhichao, LAN Meng, HE Feifan, et al. Design and application of software for dynamic risk assessment on domino accidents of hazardous chemicals based on probabilistic simulation[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2025, 21(4):5-11.
- [43] WANG Dongdong, YANG Guoliang, HAN Jixiang, et al. Quantitative assessment of human error of emergency behavior for hazardous chemical spills in chemical parks[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2024, 189:930-949.
- [44] WANG Zheng, WANG Jinjiang, GUAN Pengting, et al. SIL assessment of in-service safety instrumented systems in the chemical industry based on FBN-LOPA[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2025, 195; DOI:10.1016/J.PSEP.2024.12.121.
- [45] CHEN Honghao, CHEN Guohua, XIONG Caiyi, et al. An inherent safety assessment tool for storage tank farm layout planning based on dynamic propagation modeling simulation of fire domino effects[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2025, 256; DOI:10.1016/J.RESS.2024.110797.
- [46] BUBBICO R, LEE S, MOSCATI D, et al. Dynamic assessment of safety barriers preventing escalation in offshore oil & gas[J]. Safety Science, 2020, 121:319-330.
- [47] 徐安琦, 钱一潇, 钱瑜. 化工企业多米诺事故安全屏障优化布置[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(2):175-180.
XU Anqi, QIAN Yixiao, QIAN Yu. Study on optimal layout of barriers against domino effects in chemical enterprise[J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(2):175-180.
- [48] YU Jianxing, ZENG Qingze, YU Yang, et al. Safety barrier performance assessment based on multi-phase markov model and EPN: application to FPSO gas leakage[J]. Ocean Engineering, 2025, 323; DOI:10.1016/J.OCEANENG.2025.120597.
- [49] LI Xin, GE Fanliang, LIN Weidong, et al. A risk assessment method to quantify the effect of human reliability on storage tank safety combining optimized CREAM and dynamic Bayesian network[J]. Safety Science, 2025, 185; DOI:10.1016/J.SSCI.2025.106796.
- [50] HOSSEINNIA D B, PALTRINIERI N, BUBBICO R. Safety barrier management: risk-based approach for the oil and gas sector[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2021, 9(7); DOI:10.3390/JMSE9070722.
- [51] KANG Jian, WANG Lidan, JIN Hao, et al. Performance evaluation of safety barriers based on multidimensional deconstruction[J]. Process Safety Progress, 2023, 42(1):174-185.
- [52] ZHU Changlong, QI Meng, JIANG Juncheng. Quantifying human error probability in independent protection layers for a batch reactor system using dynamic simulations[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2020, 133:243-258.
- [53] 张明广, 许晓康, 程晋强, 等. 一种危险化学品重大危险源风险预警方法及装置: 中国, CN120412231B[P]. 2025-09-02.



作者简介: 王杰 (1999—),男,甘肃陇南人,博士研究生,主要研究方向为油气储运装置失效分析、安全屏障效能评估。E-mail: 202462101012@njut.edu.cn。