

中文引用格式:李季硕,许开立,姚锡文,等. 工贸企业有限空间作业事故风险分级研究[J]. 中国安全科学学报,2025,35(6):98-104.

英文引用格式:LI Jishuo, XU Kaili, YAO Xiwen, et al. Research on risk classification of confined space operation in industrial and trade enterprises [J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(6): 98-104.

工贸企业有限空间作业事故风险分级研究^{*}

李季硕 讲师, 许开立^{**} 教授, 姚锡文 副教授, 李梦佳

(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

中图分类号: X928.02

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.06.0541

基金项目: 辽宁省自然科学基金联合基金资助(2023-BSBA-106); 中央高校基本科研业务专项资金(N2401021)。

【摘要】 为提升工贸企业有限空间作业事故风险识别与管控水平, 建立有限空间作业事故社会可接受风险标准, 开展基于 $F-N$ 曲线的风险分级研究。首先, 基于2014—2021年工贸企业有限空间作业较大及以上事故数据, 从伤亡人数、事故数量、企业数量等维度进行统计分析, 掌握事故特征; 然后, 结合事故频率与伤亡后果, 基于最低合理可行(ALARP)准则制定社会可接受风险标准, 绘制 $F-N$ 曲线图; 最后, 依据不可容忍、可接受和可忽略3个风险区域, 建立风险分级管理模式, 并分别从企业和个人角度提出管控措施。结果表明: 死亡在3~10人的可接受风险事故频率数量级在 10^{-6} ~ 10^{-4} 之间; 以斜率为-4.033的 $F-N$ 曲线为基础划分的3个不同风险等级区域, 有助于明确风险等级边界, 突出分级管理重点。

【关键词】 有限空间作业; $F-N$ 曲线; 最低合理可行(ALARP)准则; 工贸企业; 风险分级管理

Research on risk classification of confined space operation in industrial and trade enterprises

LI Jishuo, XU Kaili, YAO Xiwen, LI Mengjia

(School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang Liaoning 110819, China)

Abstract: To enhance the identification and control of accident risks in confined space operations in industrial and commercial enterprises, a socially acceptable risk standard for such operation accidents was established, and a risk grading study based on $F-N$ curve was conducted. First, historical data on significant and higher-level accidents in confined space operations from 2014 to 2021 were analyzed statistically in terms of fatalities, accident frequency, and the number of enterprises involved, in order to identify accident patterns. Then, considering accident frequency and fatality consequences, a socially acceptable risk standard was developed based on ALARP criteria, and $F-N$ curve was plotted. Finally, a risk grading management model was established based on three risk zones-intolerable, acceptable, and negligible. The control measures were proposed from both enterprise and individual perspectives. The results show that for accidents with 3 to 10 fatalities, the frequency falls within the magnitude of 10^{-6} – 10^{-4} . The $F-N$ curve with a slope of -4.033 is used to divide three distinct risk levels, helping to clarify

^{*} 文章编号: 1003-3033(2025)06-0098-07; 收稿日期: 2025-02-14; 修稿日期: 2025-04-17

^{**} 通信作者: 许开立(1965—), 男, 山东郓城人, 博士, 教授, 主要从事系统安全理论与技术方面的研究。E-mail: xukaili@mail.neu.edu.cn。

the boundaries of risk levels and highlight management priorities.

Keywords: confined space operation; *F-N* curve; as low as reasonably practicable (ALARP) criteria; industrial and trade enterprises; risk classification and control

0 引 言

近年来,随着现代化和工业化进程的快速推进,有限空间作业逐渐演变为高频高危作业场景之一。据统计,2013—2022 年,我国(不含港澳台地区)工贸行业共发生有限空间作业较大事故 95 起,累计造成 357 人死亡^[1],作业人员在有限空间作业过程中易发生事故,且事故后果较为严重。因此,构建有限空间作业安全管控措施体系对预防此类伤亡事故的发生具有重要意义。

在有限空间作业风险管控的研究中,风险源辨识、风险特点、事故类型、事故原因及防范措施是国内外学者关注的重点。MANWARING 等^[2]应用流行病学方法开展有限空间作业安全管控措施研究,且针对有限空间作业事故提出风险干预策略;王梦蓉^[3]统计分析 1992—2002 年的氮气窒息事故,将事故原因分为未检测氧气不足、氮气与空气错用、营救措施不当等,并从监测、救援、通风、培训等方面提出具体防护措施;黄郑华等^[4]利用层次分析法,分析了有限空间作业过程、环境、管理等方面的危险因素,发现有毒有害气体、机械危害、作业流程错误、误操作、个人防护不足等在有限空间作业过程中危险性较大;杨宏刚等^[5]基于有限空间作业的 2 类危险源识别理论,从事故因果关系的角度出发,构建了由审查项和保障项组成的有限空间作业前危险源逐项检查表;李红果^[6]统计分析 2010—2016 年全国工贸行业发生的 100 起较大及以上有限空间作业事故的归因,发现未采取正确的救援方式是伤亡扩大的主要原因之一;徐向川^[7]通过分析有限空间设备维修作业的危险性,指出环境狭小、通风不良是有限空间设备维修作业易发生严重事故的主要原因;胡敏等^[8]从管理制度、危险源辨识、教育培训和安全投入 4 个方面,构建了有限空间作业过程中的 4 项风险管控体系,包括开展危险源辨识、完善管理制度、落实作业安全投入、深化专项培训。WANG Bingyu 等^[9]构建了 BERT 的双向长短期记忆网络结合条件随机场与卷积神经网络机器学习模型,发现该模型能够从有限空间作业事故报告中自动提取事故致因因素,并对事故致因进行定性及定量分析。综上所述,现有研究缺乏对有限空间作业整体风险的量化

评估,尤其是如何制定并明确社会可接受的风险标准,且多为定性分析,缺乏基于历史数据的定量研究。此外,从安全和可持续性的角度出发,建立科学的风险可接受标准不仅是风险管控中的重要环节,还是验证风险管控水平是否可接受的依据^[10]。

鉴于此,文中基于工贸企业有限空间作业事故数据,引入 *F-N* 曲线和最低合理可行(As Low As Reasonably Practicable, ALARP)准则初步量化分析可接受风险标准,构建匹配不同风险等级的风险管控模式,以期为工贸企业有限空间作业安全管理提供科学依据与实践指导。

1 社会可接受风险标准制定方法

1.1 *F-N* 曲线

F-N 曲线方法常用于确定风险可接受准则,通过二维坐标分析死亡概率和死亡人数的函数关系,进而使不同规模的事故概率分布更为直观^[11-13]。然而,实际中事故发生的概率难以精准获取,因此分析时常以单位时间内的事故频率作为替代^[14]。由于 *F(N)* 和 *N* 的可变区间较大,通常采用双对数坐标系表示 *F-N* 曲线:

$$F(N) = \sum f(N)$$

(1)

式中:*F(N)* 为造成 *N* 人或 *N* 人以上死亡的事故累积频率;*f(N)* 为年死亡人数为 *N* 人的事故发生频率。

事故风险的可接受水平可由 *F-N* 曲线分析判断:

$$F(N) \times N^\alpha = k$$

(2)

式中: α 为风险厌恶指数, $\alpha > 0$; *k* 为待定常数。将等式两边同时取对数,式(2)可变为:

$$\lg F(N) = -\alpha \lg N + \lg k$$

(3)

由式(3)可知:当 *F-N* 曲线为一条直线时, α 增加表明斜率增加,使得社会风险可接受标准变得更为严格。

1.2 ALARP 准则

ALARP 准则源自英国,该准则要求企业在风险可接受范围内采取合理的控制措施,以确保事故发生的概率和后果降到最小^[15-16]。然而,尽管 ALARP 准则在西方国家得到广泛应用,但其在国内

有限空间作业中的适用性需结合实际进行适当调整。

ALARP 准则依赖于对风险的定量分析,但我国许多工贸企业的风险管理体系不完善,安全培训覆盖率低且安全文化尚未成熟,尤其在历史事故数据收集不足、风险评估及经济可行性分析等方面存在差距。因此,笔者整合 2014—2021 年工贸企业有限空间作业的事故数据,通过 $F-N$ 曲线和 ALARP 准则进行量化评估,以弥补数据不足的问题。尽管 ALARP 准则强调将风险降至“合理可行的最低水平”,但在实际应用中,企业需在安全性与经济可行性之间寻找平衡点。考虑到企业安全投入和员工培训水平存在差异,文中通过划分 $F-N$ 曲线中的 3 个风险区(不可容忍风险区、可接受风险区和可忽略风险区),建立 3 级风险分级管理模式,从而确保风险管控既符合科学性要求,又适配国内企业安全管理资源配置现状。

2 工贸企业有限空间作业事故统计分析

2014—2021 年,我国工贸企业有限空间作业领域共发生 109 起较大及较大以上事故,累计造成近

400 人死亡。根据统计,涉及有限空间的工贸企业数量为 62.1 万家,详细数据如图 1 所示。将每年事故起数按照死亡人数为 3、4、 $\cdots$ 、10 分类后,并通过死亡 N 人的事故起数与当年涉及有限空间的工贸企业数量的比值计算事故累积频率 $F(N)$,结果见表 1。

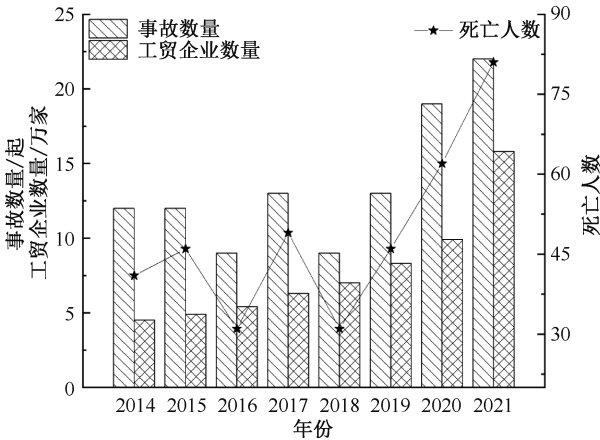


图 1 2014—2021 年工贸行业有限空间作业事故相关统计数据

Fig. 1 Statistics of confined space operation accidents in industry and trade from 2014 to 2021

表 1 2014—2021 年工贸行业有限空间作业较大及较大以上事故死亡累积频率

Table 1 Cumulative frequency of major accident deaths in confined space operations in industry and trade industries from 2014 to 2021

累积频率 $F(N)$	年份							
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
$F(3)$	2.630×10^{-4}	2.449×10^{-4}	1.670×10^{-4}	2.044×10^{-4}	1.279×10^{-4}	1.555×10^{-4}	1.915×10^{-4}	1.386×10^{-4}
$F(4)$	8.766×10^{-5}	1.225×10^{-4}	3.711×10^{-5}	6.290×10^{-5}	1.421×10^{-5}	1.196×10^{-5}	2.016×10^{-5}	5.039×10^{-5}
$F(5)$	2.191×10^{-5}	6.123×10^{-5}	3.711×10^{-5}	3.145×10^{-5}	1.421×10^{-5}	1.196×10^{-5}	2.016×10^{-5}	2.519×10^{-5}
$F(6)$	0	2.041×10^{-5}	0	3.145×10^{-5}	1.421×10^{-5}	1.196×10^{-5}	1.008×10^{-5}	6.300×10^{-6}
$F(7)$	0	0	0	1.572×10^{-5}	1.421×10^{-5}	1.196×10^{-5}	0	6.300×10^{-6}
$F(8)$	0	0	0	1.572×10^{-5}	0	1.196×10^{-5}	0	6.300×10^{-6}
$F(9)$	0	0	0	0	0	1.196×10^{-5}	0	0
$F(10)$	0	0	0	0	0	1.196×10^{-5}	0	0

由式(3)可知: $\lg N$ 与 $\lg F(N)$ 满足一元线性关系,即 $F-N$ 曲线在双对数坐标系中呈现为直线。因此,根据图 1 统计数据及表 1 中数值,系统聚类分析计算所得的 $\lg N$ 和 $\lg F(N)$,去除不正常年份的数据,使数据的协调性增加,防止某年数据干扰分析结果,从而导致结果准确度下降^[17]。经过对 8 组数据进行聚类分析后,第 1 群集包括 2014、2015、2017 和 2019 年,第 2 群集包括 2016、2018 和 2020 年。而 2021 年是单独群集,距离其他数据较远且最后与其他年份合并,故剔除 2021 年数据。其他 7 组统计数

据整体上基本表现出一定的规律性,能够作为回归分析的样本数据进行分析研究。

利用 SPSS 软件线性回归分析上述筛选出的 7 组统计数据,结果见表 2。其中, R^2 作为衡量回归方程拟合优度的关键指标之一,其值越大接近 1 说明拟合程度越好。由表 2 可知: R^2 和调整后的 R^2 分别为 0.992 和 0.990,表明线性拟合效果较好。此外, t -Sig. 和 F -Sig. 值均为 0 表明了 t 检验和 F 检验的显著性较强,即 $\lg F(N)$ 与 $\lg N$ 之间存在显著的线性关系。

表 2 线性回归分析结果
Table 2 Results of linear regression analysis

未标准化系数 B		t	t -Sig.	B 的 95.0% 置信区间		模型汇总				
				下限	上限	R^2	调整后 R^2	标准估算的误差 S_e	F	F -Sig.
常量	-1.797	-14.943	0.000	-2.091	-1.503	0.992	0.990	0.110	720.327	0.000
$\lg N$	-4.033	-26.839	0.000	-4.400	-3.665					

由表 2 可知: α 为 -4.033, 常量 $\lg k$ 为 -1.797, 因此平均风险标准线为:

$$\lg F(N) = -4.033 \lg N - 1.797 \tag{4}$$

依据统计学理论, 当样本容量较大时, $\lg F(N)$ 有 95% 的概率落入区间 $(\lg F(N) - t_{\beta/2}(\infty) S_e, \lg F(N) + t_{\beta/2}(\infty) S_e)^{[18]}$ 。由表 2 可知: $S_e = 0.110$, 根据 95% 置信区间查得 $t_{0.025}(\infty) = 1.960$, 代入上述预测区间, 得到社会可接受风险标准的上下界限为:

可容忍风险线:

$$\lg F(N) = -4.033 \lg N - 1.581 \tag{5}$$

可忽略风险线:

$$\lg F(N) = -4.033 \lg N - 2.013 \tag{6}$$

工贸企业有限空间作业事故社会可接受风险 F - N 曲线, 如图 2 所示, 图中共标注了可容忍和可忽略 2 条风险线, 将整个区域划分为 3 个风险区, 分别为不可容忍风险区、ALARP 区(可接受风险区)和可忽略风险区。图 2 可以反映出我国有限空间作业事故的平均社会风险情况, 图中的风险线能够反映事故发生频率和事故后果的关系。分析 2014—2021 年工贸企业有限空间作业较大及较大以上事故的累积死亡频率可知, 除死亡人数在 8 人及以上的样本外, 其余样本的累积死亡频率几乎全部位于 ALARP 区域内(即风险可接受区域内), 表明所制定的风险区域划分标准较为合理, 符合目前有限空间作业事故频发但事故后果仍可接受的实际情况。

综上, 工贸企业有限空间作业较大及较大以上事故的社会可接受风险标准较为严格, 符合当今社会的发展水平。然而, 值得注意的是, 一个合理可行的风险可接受标准是随社会及经济的发展而动态变化的, 其在一定时间范围内可维持相对的稳定性。基于历史数据制定风险可接受标准是一个不断优化过程, 有助于逐渐提高有限空间作业的总体安全水平^[19-20]。因此, 基于 F - N 曲线和 ALARP 准则确定的工贸企业有限空间作业较大及较大以上事故的社会可接受风险标准能够作为未来数年工贸企业有限空间作业的风险管控目标。

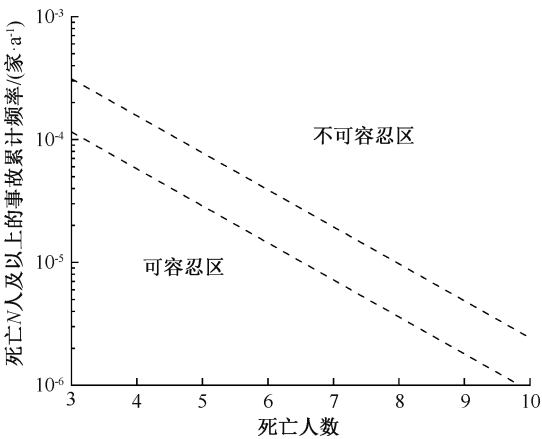


图 2 工贸企业有限空间作业事故社会可接受风险 F - N 曲线

Fig. 2 F - N curve diagram of socially acceptable risks of accidents in confined space operation of industrial and trade enterprises

3 有限空间作业风险分级管理模式

由图 2 可知: 结合事故发生频率及事故后果, 工贸企业有限空间作业事故风险可以分为 3 个等级。对于位于不可容忍区的有限空间作业必须禁止, 并采取相关措施降低作业风险; 对于位于可接受风险区的有限空间作业仍需采取一系列管理和安全措施, 确保风险处于可控范围内; 对于位于风险可忽略区的有限空间作业需保持现有的管理手段及安全防护措施。

根据风险分级预警与分级预控的科学匹配原则, 针对 3 个不同的风险区分别采取 3 级风险管理模式, 见表 3。

4 有限空间作业风险管控措施

为有效降低有限空间作业风险水平, 从企业及个人层面提出有限空间作业风险管控措施。

4.1 企业层面有限空间作业风险管控措施

1) 对于可忽略风险。①制度落实: 建立“作业申请—风险辨识—审批确认—过程监控—总结评估”有限空间作业全流程制度体系, 确保作业活动

表 3 有限空间作业风险分级管理措施

Table 3 Risk-based hierarchical management measures for confined space operations

风险区	管控措施
不可容忍风险区 一级风险管控	风险辨识与评估:作业前进行全面的风险识别与评估,包括环境、设备、操作流程等潜在危害
	安全防护装备检查:确保作业人员配备符合标准的个人防护装备,并对防护装备进行全面检查
	作业人员培训与考核:进行严格的安全培训和考核,确保作业人员掌握必要的安全知识和操作技能
	全过程监管:实行全程监管,实时监控作业过程,发现异常情况立即停止作业并进行处理
	紧急应对机制:制定详细的应急预案,配备应急救援设施和人员,确保突发事件能够迅速响应并减少损失
可接受风险区 二级风险管控	风险辨识与安全教育:作业前进行风险因素辨识,并对作业人员进行必要的安全教育和培训
	常规监管与检查:作业中进行常规监管与检查,确保设备、环境、操作人员处于安全状态
	成本效益分析与风险控制:根据成本效益分析,判断是否需要采取额外的风险控制措施(如增加通风设备或安全人员等)
	灵活调整管控策略:根据作业过程中发现的风险隐患,及时调整管控措施,进一步降低风险
可忽略风险区 三级风险管控	一般监管手段:采用一般的安全监管措施,定期巡视作业现场,确保作业按规定流程进行
	随机检查与作业状态监控:进行随机检查,关注作业人员的安全操作,并确保其处于良好的身体与心理状态
	保持风险稳定性:确保作业过程中的风险始终处于可接受范围,及时发现并处理任何异常情况,防止风险升高
	持续改进与反馈机制:收集作业中的问题与隐患,定期总结经验,不断优化安全管理措施,提高安全水平

在制度控制之下实现规范化、标准化。②专项安全培训:针对不同岗位定期开展有限空间专项安全培训,确保员工掌握有限空间作业的基本要求和操作规范。其中,培训内容应实施差异化培训策略,根据员工岗位的特点进行调整,确保培训的针对性。③环境设备检查:编制环境设备点检表,定期检查作业环境和设备,确保安全设施和设备的正常运行。重点针对通风系统、照明设施、气体检测仪和紧急救援设备等关键装置,确保其功能完好、可靠可用。特别应加强对通风有效性和气体检测准确性的核查,防止有害气体聚集或检测失效。

2) 对于可接受风险。①定期风险评估:企业应定期全面评估系统有限空间事故风险,识别潜在的危险源,并制定针对性的控制措施。如:针对作业环境的特殊性,采取适当的通风和气体检测等措施,确保作业环境处于安全状态。②安全文化建设:推动班组岗位人员安全自主管理,开展“隐患随手拍”“安全建议月评”等活动,强化员工主动识别风险、报告隐患的意识,营造浓厚的安全文化环境,构建全员参与的安全管理模式。

3) 对于不可容忍风险。①禁止进入制度:对于高风险作业区域,企业应制定规范化准入制度,并在必要时对高危区域实施物理隔离与技术屏障双重措

施,避免无关人员进入高危区域。②专业能力考试:进入高风险区域人员须经专项培训考试、模拟实操考核和应急演练三重考核,包括风险识别、应急救援和气体泄漏处理等关键环节,确保作业人员具备处理突发风险的能力。

4.2 个人层面有限空间作业风险管控措施

1) 增强安全意识和身体素质。①安全意识:作业人员应具备风险预判能力,时刻警惕潜在风险,严格遵守安全操作规程,执行标准化作业程序,确保自身安全。②身体素质:作业人员应保持良好的身体状况,避免因身体不适或疲劳导致操作失误或判断力下降。特别是在长时间作业或连续性工况下,应定时休息,避免疲劳作业。

2) 提高作业班组协作与沟通。①有效沟通:作业人员应与班组成员保持畅通的沟通渠道,特别是在进入、作业、撤离等关键环节,确保信息及时传递,避免因信息滞后所引发的潜在操作风险。②协作与配合:班组成员间应明确分工,加强协作,确保作业过程中遇到问题时能迅速响应并采取有效措施。

3) 遵守规章制度,避免违规操作。①严格执行规章制度:作业人员必须遵守企业有限空间作业的各项安全管理制度,杜绝私自进入、违规操作

等高风险行为,特别是在进入高危作业区域前必须完成相应审批与防护措施。②风险自查与主动报告:作业过程中若发现异常情况或安全隐患,作业人员应第一时间向管理人员报告,并在条件允许情况下采取临时性防护或控制措施,避免风险扩大化。

5 结 论

1) 工贸企业有限空间作业较大及较大以上事故的社会风险可接受标准 $F-N$ 曲线的斜率为 -4.033 ,死亡 $3 \sim 10$ 人的可接受事故发生频率数量级为 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 。2014—2021 年工贸企业有限空间作业较大及较大以上事故累积死亡频率(除死亡人

数 $N \geq 8$ 的情况以外)均处于可接受风险区域内。

2) 以 $F-N$ 曲线为基础,构建了工贸企业有限空间作业事故的社会可接受风险标准,并将有限空间作业事故风险水平划分为可忽略、可接受、不可容忍 3 类风险区域。在此基础上,提出与不同风险区域相匹配的分级管理模式,并分别从企业层面和个人层面制定了差异化的风险管控措施。

3) 本文主要依赖过去数据,未充分考虑未来技术、管理模式及法规变化对风险的影响。未来可结合实时监测与大数据分析,提高风险评估的动态性与准确性,并拓展研究范围,构建更具普适性的风险分级标准,探索精细化、智能化的管控策略,以提升作业安全管理水平。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国应急管理部. 应急管理部启动工贸重点企业有限空间作业专家指导服务[EB/OL]. (2023-05-24). https://www.mem.gov.cn/xw/ztzl/2023zt/zqpc2023/dybs_5536/202305/t20230524_451678.shtml.
- [2] MANWARING J C, CONROY C. Occupational confined space-related fatalities: Surveillance and prevention[J]. Journal of Safety Research, 1990, 21(4): 157-164.
- [3] 王梦蓉. 美国 1992—2002 年间氮气窒息事故分析及预防措施[J]. 安全、健康和环境, 2004(9): 4-5.
WANG Mengrong. Analysis and preventive measures of nitrogen suffocation accidents in the United States from 1992 to 2002 [J]. Safety, Health and Environment, 2004(9): 4-5.
- [4] 黄郑华, 李建华, 边成, 等. 有限空间作业危险因素分析与安全措施[J]. 中国公共安全: 学术版, 2009(4): 61-65.
HUANG Zhenghua, LI Jianhua, BIAN Cheng, et al. Analysis of risk factors and safe measures in limited space operations[J]. China Public Security: Academy Edition, 2009(4): 61-65.
- [5] 杨宏刚, 赵江平, 张璇. 有限空间作业危害辨识及事故控制[J]. 建筑安全, 2013, 28(2): 63-67.
- [6] 李红果. 工贸企业有限空间作业常见隐患[J]. 劳动保护, 2017(12): 74-75.
- [7] 徐向川. 有限空间设备维修作业危险源辨识与风险管控[J]. 设备管理与维修, 2018(22): 33-35.
- [8] 胡敏, 王红汉, 李辉, 等. 工贸企业有限空间作业安全风险分析及管控[J]. 工业安全与环保, 2021, 47(8): 66-68.
HU Min, WANG Honghan, LI Hui, et al. Safety risk analysis and control of confined space operation in industrial and trade enterprises[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2021, 47(8): 66-68.
- [9] WANG Bingyu, ZHAO Jinsong. Automatic frequency estimation of contributory factors for confined space accidents[J]. Process Safety and Environment Protection, 2022, 157: 193-207.
- [10] 康宇, 孙栋伟. 基于 F-N 曲线的非机动车事故风险分级方法优化[J]. 黑龙江科技大学学报, 2022, 32(4): 448-452.
KANG Yu, SUN Dongwei. Method optimization of non-motor vehicle accident risk classification based on F-N curve[J]. Journal of Heilongjiang University of Science and Technology, 2022, 32(4): 448-452.
- [11] EDWARD M M. Tolerable risk guidelines[J]. ISA Transaction, 2001, 40(4): 391-399.
- [12] KANEKO F, ARIMA T, YOSHIDA K, et al. On a novel method for approximation of FN diagram and setting ALARP borders[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2015, 20(1): 14-36.
- [13] PEI Jingjing, WANG Guantao, LUO Sida, et al. Societal risk acceptance criteria for pressure pipelines in China[J]. Safety Science, 2018, 109: 20-26.

- [14] 段欣,罗云,曾珠,等. 特种设备社会风险及可接受准则分析[J]. 安全与环境学报,2014,14(2):102-106.
DUAN Xin, LUO Yun, ZENG Zhu, et al. Analysis of social risk and acceptable criteria of special equipment[J]. Journal of Safety and Environment, 2014,14(2):102-106.
- [15] 汪金辉,王雨,庄磊,等. 全球气体运输船社会风险可接受衡准及应用研究[J]. 安全与环境学报,2022,22(6):3 014-3 020.
WANG Jinhui, WANG Yu, ZHUANG Lei, et al. Study on social risk acceptance criteria of global gas tankers and its application[J]. Journal of Safety and Environment, 2022,22(6):3 014-3 020.
- [16] 汪金辉,周雨,庄磊,等. 全球客船的社会风险可接受标准及应用研究[J]. 中国安全科学学报,2020,30(9):195-201.
WANG Jinhui, ZHOU Yu, ZHUANG Lei, et al. Social risk acceptance criteria of global passenger ships and its application[J]. China Safety Science Journal, 2020,30(9):195-201.
- [17] 王秀明,傅贵. 基于 F-N 曲线的煤矿重特大瓦斯爆炸事故伤亡规律研究[J]. 中国安全生产科学技术,2016,12(7):140-144.
WANG Xiuming, FU Gui. Study on regularities of casualties in major and extraordinarily serious gas explosion accidents of coal mine based on F-N curve[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016,12(7):140-144.
- [18] 杨燕鹏,罗云,曾珠,等. 压力管道社会风险可接受准则研究[J]. 中国安全科学学报,2014,24(9):128-133.
YANG Yanpeng, LUO Yun, ZENG Zhu, et al. Research on acceptable criteria of pressure pipeline social risk[J]. China Safety Science Journal, 2014,24(9):128-133.
- [19] 高建明,王喜奎,曾明荣. 个人风险和社会风险可接受标准研究进展及启示[J]. 中国安全生产科学技术,2007,3(3):29-34.
GAO Jianming, WANG Xikui, ZENG Mingrong. The research development and indication of the acceptable standard of individual risk and social risk[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2007,3(3):29-34.
- [20] 张舒,李夏林,吴超,等. 我国煤矿可接受风险标准研究[J]. 中国安全科学学报,2015,25(1):158-164.
ZHANG Shu, LI Xialin, WU Chao, et al. Study on acceptable risk criteria of coal industry in China[J]. China Safety Science Journal, 2015,25(1):158-164.



作者简介: 李季硕 (1993—),男,吉林长春人,博士,讲师,主要从事系统安全理论与生物物质能方面的研究。E-mail:lijishuo@mail.neu.edu.cn。