

面向完整性管理的城镇气源管道风险评价与管控研究

向仕永

广元市天然气有限责任公司, 四川 广元

收稿日期: 2026年7月23日; 录用日期: 2026年8月24日; 发布日期: 2026年9月2日

摘要

气源管道作为城镇燃气输配系统的上游关键环节,其安全运行直接关系到城市能源供应保障和公共安全。然而,现有管道风险评价规范主要基于长输管道特点构建,在评价指标体系、指标权重分配等方面与气源管道存在差异,因此现有长输管道和城镇燃气管网风险评价方法难以直接适用于气源管道。鉴于此,本文构建了一套包含181项底层指标的气源管道半定量风险评价体系。该体系采用“失效可能性 × 失效后果”的风险评价模型,运用序关系法确定指标权重,建立了五级风险分级标准。将该体系应用于西南某地区气源管道,所评价管道25个管段中,低风险管段占80.0%,较低风险管段占20.0%,无较高风险及高风险管段。基于评价结果,从风险分级管控与资源配置优化、自然灾害防控等维度提出了风险管理建议,为气源管道的安全管理提供了理论依据和实践参考。

关键词

城镇燃气, 气源管道, 风险评价, 指标体系

Research on Risk Assessment and Control of Urban Gas Pipeline for Integrity Management

Shiyong Xiang

Guangyuan Natural Gas Co., Ltd., Guangyuan Sichuan

Received: July 23, 2026; accepted: August 24, 2026; published: September 2, 2026

Abstract

As the upstream key link of urban gas transmission and distribution system, the safe operation of

gas source pipeline is directly related to urban energy supply security and public safety. However, the existing pipeline risk assessment specifications are mainly based on the characteristics of long-distance pipelines, which are different from gas source pipelines in terms of evaluation index system and index weight distribution. Therefore, the existing risk assessment methods for long-distance pipelines and urban gas pipeline networks are difficult to be directly applied to gas source pipelines. In view of this, this paper constructs a semi-quantitative risk assessment system for gas source pipelines, which includes 181 underlying indicators. The system adopts the risk evaluation model of “failure possibility $\times$ failure consequence”, uses the order relation method to determine the index weight, and establishes the five-level risk classification standard. The system was applied to a gas source pipeline in a southwest region. Among the 25 pipeline sections evaluated, 80.0% were low-risk pipeline sections, 20.0% were lower-risk pipeline sections, and there were no higher-risk and high-risk pipeline sections. Based on the evaluation results, risk management suggestions are put forward from the dimensions of risk classification control and resource allocation optimization, natural disaster prevention and control, which provides theoretical basis and practical reference for the safety management of gas source pipelines.

Keywords

Urban Gas, Gas Source Pipeline, Risk Assessment, Index System

Copyright © 2026 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

随着我国能源结构持续优化和“双碳”战略深入实施,天然气作为清洁、高效、低碳能源,在城镇能源供应体系中的占比不断提升。近年来,全国天然气消费量、燃气用户数量及城镇燃气管网规模持续增长,城镇燃气输配系统已成为保障城市运行和民生安全的重要基础设施。气源管道作为连接长输天然气管道与城市燃气管网的关键环节,承担着城市天然气输送和调配的重要任务,其运行安全直接关系到天然气稳定供应及公共安全。与传统长输管道相比,气源管道通常敷设于城乡结合部及城市外围区域,既具有高压、大输量等长输管道特征,又受到城市建设、第三方施工、人口聚集及复杂环境等因素影响,运行风险具有多源耦合、影响范围广和管理要求高等特点。一旦发生泄漏、火灾或爆炸事故,不仅可能造成设备损毁和人员伤亡,还可能引发城市供气中断及次生灾害。因此,建立适用于气源管道特点的风险评价方法,实现风险精准识别和科学管控,对于提升城镇燃气系统本质安全水平具有重要意义。

目前国内外已有许多学者对管道高后果区的潜在影响半径和识别项进行了分析,取得了一定的研究成果。国外研究方面,美国 Battelle Columbus 研究院于 1985 年发表的《风险调查指南》最早运用评分法对燃气风险进行分析,奠定了管道半定量风险评价的基础[1]。W. Kent Muhlbauer 在《管道风险管理手册》中详细阐述了管道风险评价的常用方法及模型,对风险评价的实际应用具有重要指导意义[2]。挪威 DNV 公司基于全球各行业灾难事故统计建立了完善的泄漏事故数据库,开发了包含多种事故模型的风险评价软件,已广泛应用于石油化工、油气储运等领域[3] [4]。欧盟于 2007 年建立欧洲燃气安全统计协会,系统收集整理燃气运行风险信息并量化安全性能指标[5] [6]。此外,美国 DOW 化学公司开发的爆炸火灾指数法及英国 ICI 公司 MOND 分部提出的补偿修正方法,为化工及管道行业的风险量化提供了重要工具[7]。国内研究方面,我国天然气管道风险评价研究起步较晚,仍处于理论探索阶段。潘家华教授于 1995 年对 Muhlbauer 的《管道风险管理手册》进行系统介绍,引发了国内学者对管道安全运行风险评价的关

注[8]。刘红芳等阐述了天然气开发、运输、储存和使用过程中的风险产生原因及评价方法[9]。张德元等结合川渝地区天然气净化厂实际,对比分析了 RBI、RCM 评价技术的技术路线与发展趋势[10]。翁帮华等针对含硫天然气在复杂地形条件下的开发进行了定量风险评价研究,计算了事故发生后的个人风险值和社会风险值[11]。李军等利用模糊综合评价法和层次分析理论对第三方破坏因素进行失效可能性计算,提出了专家权重的修正方法[12]。施林圆等在收集输气站场设计、安全、消防、环保、施工等多方面标准规范的基础上,建立了输气站场半定量风险评价系统[13]。王明凤等结合管道线路、埋地设施、压力容器等应用 FTA 方法对天然气集输站场进行了风险评价[14]。邢金朵等运用 AMEA 与 HAZOP 相结合的方法,将行为失效模式分析引入站场风险评价,充分考虑了多因素自身及耦合作用对输气站场安全运行的影响[15]。

本研究结合气源管道运行特点,在分析国内外风险评价理论及相关标准的基础上,构建了适用于城镇气源管道的风险评价体系。评价体系采用“失效可能性 × 失效后果”评价模型,建立覆盖设计施工、运行维护、介质危害性及受体易损性的多层级指标体系,共包含 181 项底层指标;采用序关系法确定各级指标权重,建立风险值计算模型;结合英国 TWI 风险矩阵思想,建立低风险、较低风险、中等风险、较高风险、高风险五级风险分级标准。以西南某地区气源管道为工程案例,对 25 个评价管段开展风险评价及风险分析。首先依据关键节点分段与长度分段相结合的原则完成管段划分,组织专家完成现场勘查与资料审查,按照 181 项底层指标评分细则逐项判定状态等级并赋分,经权重聚合后得到各管段失效可能性得分、失效后果得分及相对风险值,识别不同管段的主要风险控制因素,并提出针对性的风险管控建议,为城镇气源管道风险决策提供技术支撑。

2. 气源管道风险评价方法

风险评价指标体系是一个系统化的方法,用于识别、评估和管理可能影响组织目标的各种风险。风险被定义为任何可能带来不利影响的事件或情境,通常涉及不确定性、威胁或机会。有效的风险管理体系帮助组织在面对潜在风险时能够预防、减轻或应对,以确保组织目标的实现和应对突发事件的能力。

2.1. 风险评价指标体系

指标体系采用“目标层 - 准则层 - 一级指标 - 二级指标 - 三级指标 - 四级指标 - 五级指标”的七层架构。目标层为气源管道风险等级,准则层划分为失效可能性和失效后果两大维度,一级指标共 4 个,二级指标 15 个,三级指标 26 个,四级指标 58 个,五级指标 78 个,底层指标总计 181 项。体系架构如图 1 所示。

(1) 失效可能性准则层

失效可能性用于评价气源管道发生泄漏、破裂等失效事件的概率,重点反映设计建造质量及运行维护水平对管道安全状态的影响。结合气源管道运行特点,将失效可能性划分为设计与施工、运行与维护两个一级指标。

设计与施工主要评价管道在规划设计、材料选型、施工安装、检验试验等建设阶段形成的固有风险,反映管道本质安全水平。该类风险一旦在建设阶段形成,将伴随管道整个服役周期,仅能通过局部修复、技术改造等措施进行一定程度的风险降低。因此,设计与施工指标下设置设计和计算、施工和安装两个二级指标,进一步细化为设计文件、计算分析、施工单位及人员资质、工程施工、检验试验、安全防护和工程资料等 7 个三级指标,共包含 38 个四级指标和 17 个五级指标。

运行与维护主要评价管道投运后受自然环境、人为活动及运行管理等因素影响而发生失效的可能性。该类风险具有可监测、可维护和可控制的特点,可通过巡检维护、隐患治理和管理持续改善。该一级指

标下设置自然因素、人为因素和管道运行现状 3 个二级指标，涵盖自然灾害、腐蚀、第三方破坏、误操作、运行压力、在役年限、失效历史等 10 个三级指标，共包含 20 个四级指标和 61 个五级指标。

(2) 失效后果准则层

失效后果用于评价管道发生泄漏或破裂后可能造成的人员伤亡、财产损失、环境影响及社会影响，重点体现事故危害程度及风险承受对象的易损性。结合天然气介质特性及气源管道周边环境特点，将失效后果划分为介质危害性和受体易损性两个一级指标。

介质危害性主要评价天然气介质自身危险特性及事故发生后的危害能力，包括介质燃烧、扩散及泄漏等因素对事故后果的影响。该一级指标下设置可燃性、毒性、最大泄漏量、扩散性和最高工作压力 5 个二级指标，并进一步细化为 3 个三级指标。

受体易损性主要评价管道周边人员、建筑物、生态环境及社会对事故影响的敏感程度，以及事故发生后的应急处置和恢复能力。该一级指标下设置人口与建筑物密度、环境敏感性、社会影响、应急响应和供应中断影响 5 个二级指标，并进一步细化为 6 个三级指标，用于表征事故影响范围、应急保障能力及供气中断造成的社会影响，从而全面反映事故后果的严重程度。

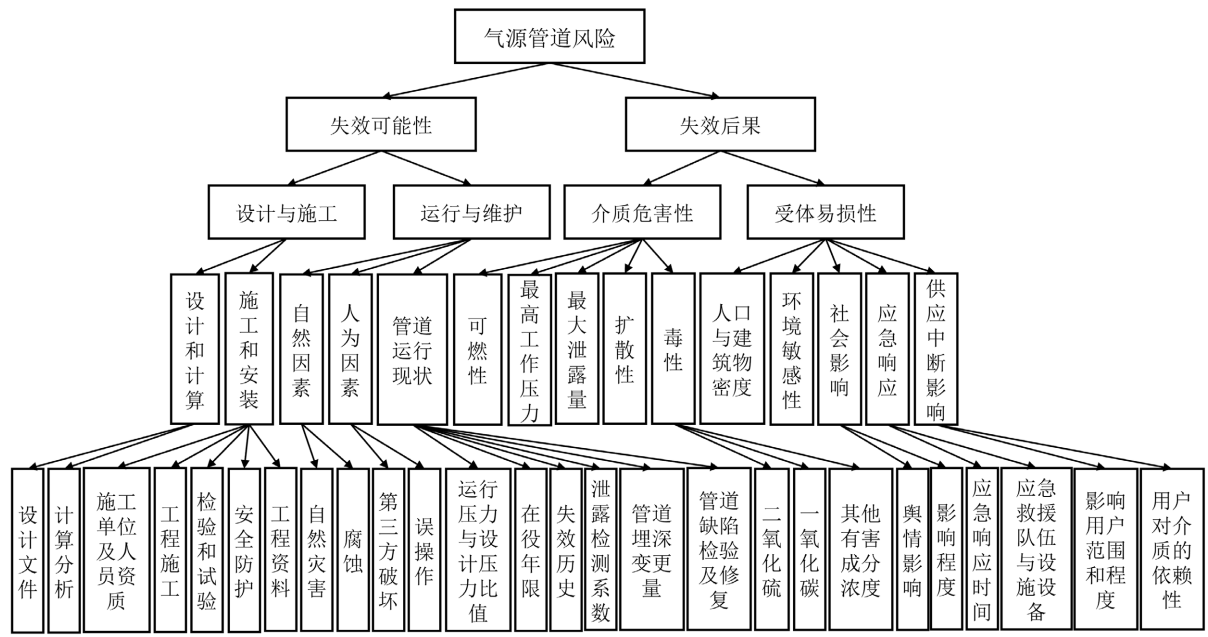


Figure 1. Risk evaluation index system of gas source pipelines

图 1. 气源管道风险评价指标体系

2.2. 权重计算方法

本研究采用序关系法进行各级指标权重计算。相较于传统的层次分析法，序关系法无需构建判断矩阵，省略了复杂的一致性检验环节，计算量显著降低，且同样能够体现指标间的重要度关系，特别适用于指标数量多、专家评估工作量大的场景。

序关系法的基本思想是首先根据专家经验建立评价指标的重要性排序，然后依据相邻指标之间的重要程度进行赋值，最终递推得到各指标权重。设某层共有 m 个评价指标，经过专家排序后得到指标序列：

$$X_1 > X_2 > \dots > X_k > \dots > X_m \quad (1)$$

其中， X_1 表示最重要指标， X_m 表示最不重要指标。

随后,对相邻指标的重要程度进行比较,定义相邻指标的重要性比值为:

$$r_k = \frac{w_{k-1}}{w_k} (k = m, m-1, \dots, 2) \quad (2)$$

其中, w_k 为第 k 个指标的权重, r_k 为相邻两指标的重要程度比值。依据专家判断,通常采用 1.0~1.8 之间的赋值,其中 1.0 表示两指标同等重要,1.2 表示稍微重要,1.4 表示明显重要,1.6 表示强烈重要,1.8 表示极端重要。

获得各相邻指标的重要程度比值后,可根据序关系法递推计算指标权重。首先计算排序最后一个指标的权重:

$$w_k = \left(1 + \sum_{i=2}^m \prod_{i=k}^m r_i \right)^{-1} \quad (3)$$

然后按照逆序递推计算其余指标权重:

$$w_{k-1} = r_k w_k (k = m, m-1, \dots, 2) \quad (4)$$

最终得到满足下式的指标权重。

$$\sum_{k=1}^m w_k = 1 \quad (5)$$

为保证赋权结果的科学性和可靠性,序关系法通常采用专家咨询方式确定指标排序及相邻指标的重要程度。专家应具有天然气管道、安全工程、完整性管理等相关专业背景,并具备较丰富的工程实践经验。通过汇总多位专家的评价结果,形成最终的指标排序及重要程度赋值,再依据上述计算过程获得各层级指标权重。

2.3. 指标评分细则

底层指标评分采用“状态描述-分值对应”的离散分级方式,每个五级指标设置 2~5 个评分等级,对应 0 分至满分的不同分值。评分依据来源于国家现行规范以及企业运行实践经验。

以“运行与维护-人为因素-第三方破坏-活动类型-建设活动”指标为例,见表 1。

Table 1. Example of indicator scoring

表 1. 指标评分示例

状态描述	分值
位于无建设活动地区	0 分
位于有地下设施、水沟等维护活动地区	1.5 分
位于在建经济开发区	3.0 分
位于矿藏开发或重工业生产地区	4.5 分
建设活动施工单位未技术交底	6.0 分

评分时,评价人员根据现场勘查、资料审查和专家判断,确定每个底层指标所处的状态等级,获取对应分值,再按权重逐级向上聚合,最终得到管段的失效可能性得分 S_i 和失效后果得分 C_i 。

2.4. 风险计算模型

2.4.1. 风险值计算方法

风险值计算过程分为三个层次:指标评分、准则层计算和目标层计算。

1、指标评分

评价人员根据各底层指标的评分细则,对评价管段进行逐项评分。评分细则依据国家现行标准规范、企业历史事故数据及专家经验制定,采用分级赋分方式。所有指标分值越高表示风险越大(危险性越高)。

2、准则层计算

(1) 失效可能性 S_i 计算

失效可能性综合反映管段发生失效的概率大小,由设计与施工得分和运行与维护得分加权求和得到:

$$S_i = V_i + L_i \tag{6}$$

式中 V_i 为设计与施工得分; L_i 为运行与维护得分。

(2) 失效后果 C_i 计算

失效后果表征管段破裂(受损)泄漏引起的损失大小,由介质危害性得分和受体易损性得分加权求和得到:

$$C_i = K_i + U_i \tag{7}$$

式中 K_i 为介质危害性得分; U_i 为受体易损性得分。

3、目标层计算

为使最终风险评价结果处于 0~100 的直观区间内,便于工程人员理解和使用,引入相对风险系数对风险值进行归一化处理。相对风险值计算公式为:

$$R_i = a \cdot S_i \cdot C_i \tag{8}$$

式中, R_i 为评价区段 i 的相对风险值,取值范围为 0~100 分; a 为相对风险系数,取值为

$a = \frac{1}{1000} \times \frac{1}{1000} \times 100 = 1 \times 10^{-4}$; S_i 为失效可能性评分,取值范围 0~1000 分; C_i 为失效后果评分,取值范围 0~1000 分。

该公式的物理意义为:风险值与失效可能性和失效后果均呈正相关关系,当任一准则层得分较高时,风险值将显著增大,体现了风险评价中“概率 × 后果”的基本逻辑。

2.4.2. 风险分级标准

1、分级依据

美国石油协会(American Petroleum Institute, API)以大量工程实践为基础,在 API581《基于风险的检验-基础资源文件》中提出了矩阵的风险等级划分方法,分为 4 个等级。英国焊接学会(The Welding Institute, TWI)对该方法进行了局部调整,将 API581 中给出的低风险区再分为低风险区和较低风险区,最终分为 5 个等级[16]。TWI 将调整后的风险等级矩阵划分为 25 个单元格,其中低风险:较低风险:中等风险:较高风险:高风险 = 3:3:7:8:4。

本研究的风险分级采用英国 TWI 提出的风险分级标准。则设管道最小风险值为 Min,最高风险值为 Max,按照上述比例可以确定气源管道风险相对等级与风险值区间的对应关系,结果见表 2。

Table 2. Classification of relative risk levels for gas source pipelines
表 2. 气源管道风险相对等级划分表

风险等级	风险值区间
低风险	$[\text{Min}, \text{Min} + (\text{Max} - \text{Min}) \times 3/25]$
较低风险	$[\text{Min} + (\text{Max} - \text{Min}) \times 3/25, \text{Min} + (\text{Max} - \text{Min}) \times 6/25]$
中等风险	$[\text{Min} + (\text{Max} - \text{Min}) \times 6/25, \text{Min} + (\text{Max} - \text{Min}) \times 13/25]$
较高风险	$[\text{Min} + (\text{Max} - \text{Min}) \times 13/25, \text{Min} + (\text{Max} - \text{Min}) \times 21/25]$
高风险	$[\text{Min} + (\text{Max} - \text{Min}) \times 21/25, \text{Max}]$

2、分级标准

设管道最小相对风险值为 $R_{\min}$ ，最大相对风险值为 $R_{\max}$ 。由于本模型中 S_i 和 C_i 的最小值均为 0 (理想安全状态)，最大值为 1000 (最危险状态)，因此根据 TWI 比例分配原则，各风险等级对应的风险值区间见表 3。

Table 3. Risk classification criteria for gas source pipelines
表 3. 气源管道风险分级标准

风险等级	相对风险值区间
低风险	[0, 12]
较低风险	(12, 24]
中等风险	(24, 52]
较高风险	(52, 84]
高风险	(84, 100]

3. 气源管道风险评价实例分析

3.1. 管道概况与分段方案

本次评价对象为西南某地区气源管道，该管道线路全长约 60 km。管道沿线设置多个工艺站场，承担城市主干气源输送功能，连接长输管道与城市燃气管网，运行压力较高，输送规模较大。管道途经区域以城郊结合部及工业用地为主，周边环境存在一定复杂性。

管道主要技术参数如下：部分管段采用公称直径 168.3 mm、壁厚 6.3 mm 的钢管，其余管段采用公称直径约 114.3 mm、壁厚约 5.6 mm 的钢管，管材等级均为 L245NB 钢管，防腐层采用三层聚乙烯结构。管线设计压力为 4.0 MPa，当前运行压力 1.5~2.5 MPa。管道以埋地敷设方式为主，服役年限较长，存在一定程度的腐蚀风险与第三方施工干扰风险。

根据该气源管道的布线特征，本研究提出的分段原则建议如下：

- (1) 管材、管径、壁厚及起止里程等基本特征不一致时，自动划分管段；
- (2) 管体、焊缝等基本情况发生变化，自动划分管段；
- (3) 管道附属设施状况发生变化，自动划分管段；
- (4) 防腐层、阴极保护等防护系统状况，以及杂散电流影响评价发生变化，自动划分管段；
- (5) 输送介质组分、运行压力、介质温度等运行参数改变，自动划分管段；
- (6) 管道沿线周边自然社会与社会环境发生变化，自动划分管段；
- (7) 按照管线两侧人口聚居密度、建筑物分布等级分段。

综合上述分段原则，并结合该管道沿线分布情况，最终将此气源管道划分为 25 个管段，作为后续风险评价的基本单元。

3.2. 评价过程与结果分析

3.2.1. 指标评分与风险值计算

组织由管道工程师、安全管理人员、地质灾害专家、腐蚀防护专家组成的评价组，完成 25 个管段的现场勘查和资料审查。按照 181 项底层指标评分细则，逐项判定状态等级并赋分，经权重聚合后得到各管段的设计与施工得分、运行与维护得分、介质危害性得分、受体易损性得分和相对风险值。评价结果汇总见图 2。

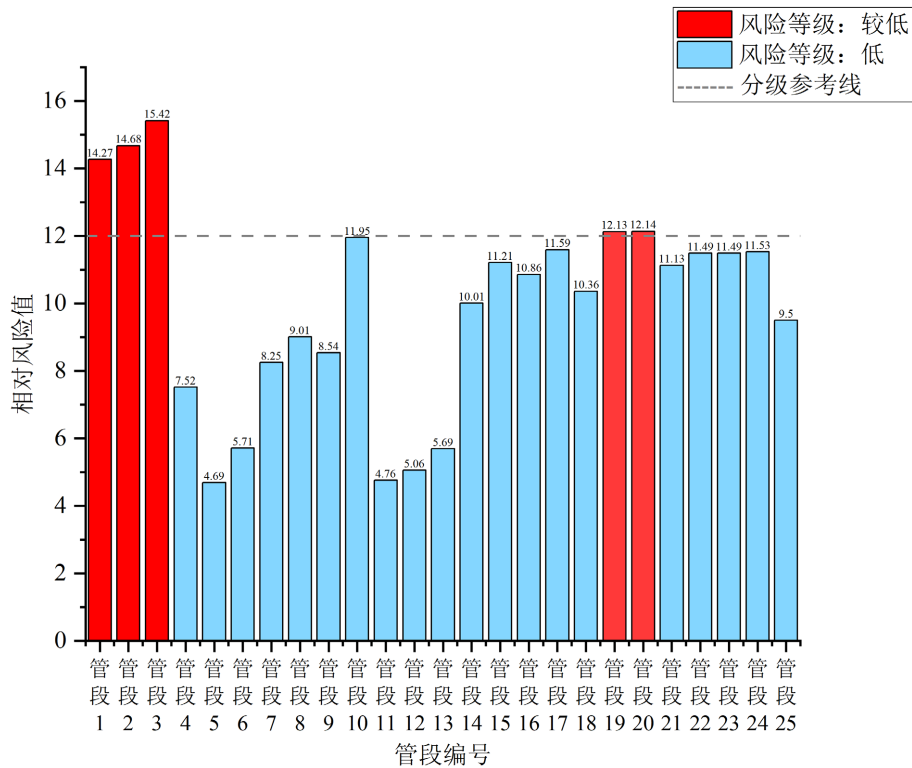


Figure 2. Bar chart of relative risk value distribution for each pipe section
图 2. 各管段相对风险值分布柱状图

整体评价结果显示，低风险管段 20 段，占 80.0%，较低风险管段 5 个，占 20.0%，与管道实际安全状况基本吻合。总体而言，该气源管道风险水平处于可控范围。

3.2.2. 风险值分析

为深入揭示气源管道各评价单元风险特征的内在差异，识别关键致因因素，本节选取相对风险值排名前 3 位的典型管段(管段 1、管段 2、管段 3)进行逐项指标分解与对比分析。三个管段涉及门站出口、山区滑坡隐患区、大中型河流穿越段等多种典型场景，具有充分的代表性。

(1) 管段 1

该管段位于门站出口，承担门站向下游管网输气的重要任务，同时采用大型河流穿越方式跨越某河流，属于运行工况复杂、事故后果较大的区域。经现场勘查与资料核查，该管段设计与施工得分 59.6 分，运行与维护得分 255.7 分，失效可能性 $S_1=315.3$ 分；介质危害性得分 215.7 分，受体易损性得分 237 分，失效后果 $C_1=452.7$ 分。相对风险值 $R_1=14.27$ ，属较低风险等级。

从失效可能性分析来看，该管段风险主要来源于门站出口高压力、频繁波动的运行工况，以及河流穿越段受洪水冲刷、水流淘刷等自然因素影响导致的覆土厚度及埋深不确定性。同时，河流穿越段检测维护条件复杂、维修施工难度大，进一步推高了运行维护指标得分。

从失效后果角度分析，该管段介质危害性得分较高，主要源于介质可燃性、周边易燃物分布及中等偏高的泄漏量，加之风速较低、地形闭塞不利于气体扩散，增加了泄漏爆炸风险。受体易损性得分较高则源于沿线区域人口密度较大，属于三级地区，存在商服、工矿仓储用地及特别重要建筑，社会影响与供应中断影响指标得分较高，且应急响应时间在 0.5~1 小时之间，还存在应急救援队伍配备不足、险情控制时间较长以及供应中断影响大等因素，进一步加剧了受体易损性，导致风险分值较高。

综上所述,管段 1 风险值处于较低风险等级,但运行压力较高、河流穿越特殊工况决定了该管段应作为管理重点对象。后续应重点加强河床冲刷监测、穿越段完整性检测、门站运行压力优化以及高后果区应急保障能力建设。

(2) 管段 2

该管段位于山区丘陵地带,沿线存在滑坡隐患点,地质灾害风险较高,位于三级地区,农业活动频繁,植被覆盖以灌木和农作物为主。经现场勘查与资料核查,该管段设计与施工得分 59.6 分,运行与维护得分 264.7 分,失效可能性 $S_2 = 324.3$ 分;介质危害性得分 215.7 分,受体易损性得分 237 分,失效后果 $C_2 = 452.7$ 分。相对风险值 $R_2 = 14.68$,属较低风险等级。

与管段 1 相比,管段 2 的运行与维护得分增加 9.0 分,是导致其相对风险值上升的首要因素。这一增量主要来源于自然因素与人为因素的双重叠加。自然因素方面,该管段沿线存在滑坡隐患点且防护措施部分受损,同时位于支流汇水区,雨季山洪冲刷风险较高;人为因素方面,农业机械化耕种活动频繁,管道周边存在小型挖掘作业,第三方破坏因素得分高于管段 1。

从失效后果角度分析,管段 2 与管段 1 的介质危害性得分和受体易损性得分完全相同,这是因为两管段同属 A 段,运行压力、介质特性及地区等级一致,失效后果主要取决于管道本体参数和周边环境特征,而非沿线具体地貌。

综上所述,管段 2 综合风险值仍处于较低风险等级,但其失效后果仍是综合风险的主要贡献因素。同时,相较于管段 1,受滑坡隐患、山洪冲刷及农业机械活动等因素影响,失效可能性进一步增加,导致综合风险值有所上升。后续风险治理应重点加强地质灾害隐患治理和监测预警,完善雨季巡检及风险排查机制,并持续提升应急处置能力。

(3) 管段 3

该管段位于山区丘陵地带,沿线植被以灌木及农作物为主,局部存在边坡及浅丘地貌,管道沿线仍属于三级地区。经现场勘查与资料核查,该管段设计与施工得分 59.6 分,运行与维护得分 281.0 分,失效可能性 $S_3 = 340.6$ 分;介质危害性得分 215.7 分,受体易损性得分 237 分,失效后果 $C_3 = 452.7$ 分。相对风险值 $R_3 = 15.42$,属较低风险等级,在五个典型管段中失效可能性得分最高。

从失效可能性分析来看,运行与维护得分 281.0 分为所有评价管段最高,是导致综合风险值最大的决定性因素,主要源于自然因素、第三方破坏及运行管理因素的共同叠加。该管段位于山区丘陵区域,局部边坡稳定性较差,雨季易发生边坡失稳等地质环境变化;沿线农业生产及零星建设施工频繁,构成第三方破坏风险;加之山区地形复杂,巡检及检测难度较大,巡护效率受到一定影响。

从失效后果角度分析,该管段与管段 1、管段 2 同属 A 段,介质危害性和受体易损性得分保持一致。但需注意的是,该管段自然因素风险较高,一旦发生管道失效,地质灾害可能加剧次生灾害,且复杂地形不利于气体扩散,周边生产活动亦增加了泄漏风险,使实际失效后果影响存在扩大可能。

综上所述,管段 3 综合风险值高于管段 1 和管段 2,主要是受山区自然环境复杂、运行维护难度较大以及第三方活动共同影响所致。后续应重点加强山区边坡稳定性监测、雨季巡检频次、第三方施工监管以及管道检测。

4. 气源管道风险管控建议

风险评价的目的不仅在于识别风险等级,更重要的是识别风险主导因素,为完整性管理资源配置提供依据。根据 25 个评价管段风险计算结果,评价区域整体处于低风险和较低风险水平,但不同管段风险形成机制存在明显差异。其中,门站出口段、河流穿越段及山区复杂环境段风险特征最为典型。因此,应对不同风险类型实施差异化治理,提高风险控制措施的针对性和资源利用效率。

4.1. 风险分级管控与资源配置优化

4.1.1. 风险分级管控

评价结果表明,较低风险管段共 5 个,占评价管段总数的 20.0%,整体仍处于可接受风险范围,但风险水平相对高于其余管段,应作为重点管理对象;其余 20 个为低风险管段,占比 80.0%,运行状态总体良好,可采用常态化管理模式。建议依据风险评价结果建立分级管理制度,将风险等级与巡检频次、检测周期、维护资源配置相结合,实现有限资源向高风险区域倾斜。

(1) 较低风险管段管控措施

对于管段 1~3 和管段 19~20,应实施以下差异化管控。

① 提升巡检频次。常规巡检周期缩短至每 3 天 1 次;汛期、连续降雨期间加密至每日 1 次;第三方施工活跃期实行 24 小时专人值守。

② 缩短检测周期。防腐层检测周期由常规的 3 年 1 次缩短至每年 1 次;阴极保护系统检测由每年 2 次增加至每季度 1 次;管道壁厚检测由 5 年 1 次缩短至 2 年 1 次^[17]。

③ 布设智能监测。在管段 1 河流穿越段安装分布式光纤振动监测系统,实时预警河床冲刷、管道悬空等异常;在管段 2、3 滑坡隐患区布设位移监测设备和降雨量传感器,实现降雨量、边坡位移和管道应力分析。

(2) 低风险管段常态化管理

对于 20 个低风险管段,维持现有巡检制度,重点做好以下工作。

① 每半年开展 1 次阴极保护电位测试,确保保护电位维持在 $-0.85\text{ V}\sim-1.25\text{ V}$ 范围内。

② 每 2 年开展 1 次管道壁厚抽检,重点关注服役年限超过 10 年的管段。

③ 建立年度风险复评机制,对风险值变化趋势进行动态分析,当管段风险值上升超过 20%时,及时上调管控等级。

4.1.2. 资源配置优化

风险评价的目的不仅在于确定管段综合风险等级,更重要的是识别导致风险升高的关键因素,为完整性管理资源配置提供依据。由于不同管段的风险形成机制存在差异,即使综合风险值处于同一等级,其主要风险来源及控制需求也可能不同。因此,仅依据风险等级进行资源投入难以实现精准管控。基于此,本文进一步结合风险评价指标体系中的准则层、一级指标及关键二级指标评分结果,建立“风险主导因素-管控措施”的关联机制。

(1) 失效可能性主导型管段资源配置

对于失效可能性得分占主导的管段,应进一步分析设计与施工、运行与维护两个一级指标的贡献程度,并根据具体风险来源配置针对性资源。

当设计与施工指标贡献较高时,表明管道风险主要来源于建设阶段形成的固有缺陷。针对设计和计算指标异常的管段,应重点开展设计文件复核、强度校核、运行参数评价等分析,避免因设计阶段风险遗留导致长期运行安全隐患。针对施工和安装指标得分较高的管段,应重点加强焊缝质量检测、防腐补口质量检查、埋深复测以及隐蔽工程资料核查等工作,通过完善建设阶段质量控制降低管道本质风险。

当运行与维护指标贡献较高时,应进一步根据自然因素、人为因素和管道运行现状等二级指标开展风险溯源分析。

① 对于自然因素主导型管段,应根据具体灾害类型配置监测与治理资源。对于滑坡、崩塌等地质灾害风险较高区域,应重点开展地质稳定性评价、边坡位移监测以及工程加固治理;对于河流穿越、冲沟等水文环境影响明显区域,应重点开展河床冲刷监测、覆土厚度检测和防冲刷工程建设。例如,管段 2、

管段 3 位于山区丘陵区域,运行与维护风险受到地质环境、边坡稳定性以及农业活动等共同影响,因此后续治理重点应优先投入地质灾害监测预警和雨季巡检资源,而非单纯增加管道本体检测频次。

② 对于人为因素主导型管段,应根据第三方破坏、误操作等具体指标评分情况确定资源投入方向。当第三方破坏指标得分较高时,风险控制重点应由管道内部检测转向外部环境管理,主要措施包括建立施工信息共享机制、完善第三方施工审批制度、加强施工全过程监护以及增加重点区域巡检频次。当误操作指标贡献较高时,应重点完善运行操作规程,加强人员培训和操作行为管理,降低人为失效概率。以管段 3 为例,该管段沿线存在农业生产活动及零星施工行为,第三方破坏因素对运行维护风险贡献较大,因此应优先配置施工监管和巡护资源。

③ 对于管道运行现状主导型管段,应重点关注腐蚀、在役年限、失效历史以及运行压力等三级指标。当腐蚀相关指标得分较高时,应优先开展防腐层完整性检测、阴极保护有效性评价以及管体壁厚检测,并依据缺陷程度实施补口修复、防腐层修复或局部换管。当服役年限和失效历史指标贡献较高时,应提高检测频率,开展剩余寿命评价和适用性评价;当运行压力指标得分较高时,应优化压力控制策略,降低压力波动对管道长期服役性能的不利影响。

(2) 失效后果主导型管段资源配置

对于失效后果占主导的管段,应重点降低事故发生后的影响程度,并根据介质危害性和受体易损性两个一级指标进一步确定资源配置方向。

当介质危害性指标贡献较高时,应重点关注可燃性、最大泄漏量、扩散性以及最高工作压力等三级指标。针对高压、大输量管段,应加强压力监测和泄漏监测能力建设,完善紧急切断设施,提高事故初期响应速度;针对泄漏量较大或扩散条件较差区域,应开展事故影响范围分析,优化应急处置方案,降低事故影响范围。

当受体易损性指标贡献较高时,应根据人口与建筑物密度、环境敏感性、社会影响、应急响应以及供应中断影响等指标采取针对性措施。对于人口密集区域,应加强高后果区识别和重点巡护;对于环境敏感区域,应完善环境风险防控措施;对于供应中断影响较大的区域,应优化供气调度方案,建立备用供气 and 应急保障机制。

本文管段 1 位于门站出口,同时存在河流穿越情况,其失效可能性并非最高,但由于人口密度较高、供气影响范围较大,受体易损性和供应中断影响指标贡献明显,因此管理重点应由降低失效概率进一步转向降低事故后果。针对该类管段,应重点投入应急保障、远程监测以及事故快速处置资源。

(3) 双重风险主导型管段资源配置

对于失效可能性和失效后果均较高的管段,应同时开展风险预防和事故减缓措施。一方面,应针对导致失效概率升高的关键因素开展主动防控,例如降低第三方破坏风险、加强腐蚀管理、开展自然灾害治理等;另一方面,应针对事故后果较大的因素完善应急响应体系、供气保障措施和事故影响控制方案。

综上所述,基于风险评价结果开展资源配置时,应避免仅依据综合风险等级采取统一管理措施,而应进一步结合指标层评分结果识别风险主导因素,形成“评价结果-风险来源-管控措施”的管理模式。

4.2. 自然灾害防控

4.2.1. 监测预警体系

风险分析结果显示,山区丘陵地带的管段受自然环境的影响显著,运行维护维度风险相对突出,滑坡、崩塌及暴雨冲刷等自然因素是影响失效可能性的主要风险源。其中地形条件最复杂的山区管段,自然环境因素对风险的贡献最为明显。针对上述管段,应建立监测预警、工程治理、动态巡查的防控模式。

(1) 卫星遥感与航空监测

利用 InSAR 卫星遥感技术,对管段 2、3、19、20 沿线滑坡体、危岩体进行形变监测,监测精度达到毫米级,监测周期为每月 1 次。以及每年汛期前开展 1 次无人机激光雷达航测,获取高精度地形数据,识别新增地质灾害隐患点。

(2) 地面智能传感监测

在典型灾害点布设监测设备,见表 4。

Table 4. Ground intelligent sensing and monitoring equipment
表 4. 地面智能传感监测设备

监测类型	设备配置	监测参数	布设位置
位移监测	GNSS 位移计	水平/垂直位移	滑坡体前缘、管道穿越段
雨量监测	自动雨量计	小时降雨量	汇水区上游、冲沟出口
裂缝监测	裂缝计	裂缝开合度	地裂缝发育段
管道应力	应变计	管道轴向应变	穿越段、应力集中点
视频监控	摄像头	图像识别	重点隐患点

(3) 管道本体监测

在管段 1 河流穿越段安装管道应变监测系统和河床冲刷监测设备,实时监测管道应力变化和覆土厚度变化。

4.2.2. 工程治理

通过对地质风险的识别与评价,制定针对性风险管控措施,进一步降低管道穿越段发生地质风险的可能性。管道地质风险的管控应遵循以下原则:始终以管道安全为核心导向,通过全方位管理确保管道系统安全、可靠、高效运行,筑牢风险防控的基础防线[18]。对地质条件复杂、灾害风险突出且可能造成严重后果的重点管段,则需采取“主动治理”策略,通过工程改造、结构加固等措施,消除安全隐患。

(1) 滑坡治理

对管段 2、3 沿线滑坡隐患点,根据稳定性评价结果分级治理,稳定性差的滑坡体实施抗滑桩和挡土墙工程,稳定性中等的滑坡体实施削坡减载和坡面防护,稳定性较好的滑坡体实施截排水和植被恢复。

(2) 水毁灾害防治

对管段 1 河流穿越段,实施河床护底、抛石护岸工程,防止水流淘刷导致管道悬空;每年汛后开展 1 次穿越段专项检测,评估河床变化对管道安全的影响。对管段 2、3 沿线冲沟,修建谷坊、拦沙坝等沟道防护工程,减少山洪对管道的冲刷破坏。

4.3. 门站出口及高后果区管控

评价结果表明,管段 1 位于门站出口,同时穿越河流,其失效后果得分在全部评价管段中最高。虽然该管段失效概率并非最高,但由于人口密集、供气影响范围大,一旦发生事故,将造成较大的社会影响。因此,该类高后果区管理重点应由降低事故概率进一步扩展为降低事故影响。

一方面,应持续优化门站运行压力控制策略,根据季节及用气负荷合理调整压力运行区间,减少压力波动对管道长期服役性能的不利影响;另一方面,应完善门站出口远程紧急切断系统及压力监测系统,实现异常工况自动报警和快速关断。同时,应加强土地利用管理,及时掌握沿线建设项目动态,严格控制新增占压和违章施工,对人口增长较快区域及时调整风险等级。此外,应进一步完善供气保障预案,提高事故状态下供气切换和应急保供能力,降低事故造成的社会影响。

4.4. 第三方破坏管控

从典型管段分析结果来看,第三方施工活动是影响运行维护得分的重要组成部分,其中农业机械作业、公路建设及市政施工均对管道安全运行构成持续威胁。管段 3 沿线存在工业生产活动,第三方破坏因素得分较高。建议建立施工信息共享机制,加强与地方住建、交通、水利部门协同管理,及时获取沿线建设计划,对施工活动实行监护,降低第三方破坏风险。

(1) 联席会议机制

① 建立由政府主管部门牵头,管道企业、建设单位、施工单位、监理单位参加的管道保护联席会议机制,每季度召开 1 次,通报施工计划、共享风险信息、协调重大问题。

② 建立施工信息共享平台,实现管道企业与政府部门、建设单位之间的信息互联互通,确保管道企业能够提前获知施工计划。

(2) 施工审批与报备制度

① 在燃气管道安全保护范围内开展施工作业,建设单位应会同施工单位于开工前向管道企业书面告知,报送施工方案、作业范围、工期工艺、施工设备等关键资料。

② 管道企业与建设单位、施工单位共同编制施工保护方案,签订保护协议,必要时组织专家论证。

③ 对采取顶管、开挖、定向钻等施工工艺的建设项目,认真研判可能对燃气管道运行造成的安全风险,落实专项安全防护技术措施。

(3) 农业机械与零散作业管控

针对管段 2、3 沿线农业机械化耕种活动频繁的特点,提出以下建议。

① 在农田段管道上方埋设警示带和保护板,警示带距管顶不小于 0.3 m,保护板覆盖宽度不小于管道两侧各 0.5 m。

② 在农机作业频繁区域增设地面警示标识,标识间距不超过 100 m,标识内容包含管道位置、埋深、禁止机械开挖等警示信息。

③ 每年春耕、秋收前,对沿线农户开展管道保护宣传,告知管道位置和安全注意事项。

4.5. 腐蚀监测与维护

从典型管段分析结果来看,部分管段腐蚀检测周期较长、防腐层老化及土壤腐蚀环境变化增加了长期运行风险。应依据风险评价结果,对运行维护得分较高管段优先开展防腐层检测、阴极保护有效性测试及管体壁厚检测[19]。

(1) 检测方法选择

① 防腐层检测。采用电流交流衰减和交流电位梯度联合检测,对评价为“重”的缺陷点采用直流电位梯度或密间隔电位测量进行校验。

② 阴极保护检测。通过测试桩测量管地电位,确保保护电位处于 $-0.85\text{ V}\sim-1.25\text{ V}$;对强制电流阴极保护系统,每月检测电源输出电流、电压;每季度检测全线保护电位分布。

③ 壁厚检测。采用超声测厚或导波检测,对腐蚀泄漏历史管段优先检测,检测点应覆盖弯头、三通、焊缝等应力集中部位。

(2) 防腐层修复

对检测发现的防腐层缺陷,根据缺陷等级采取差异化修复措施。轻度缺陷采用补伤带修复;中度缺陷采用热收缩套修复;重度缺陷采用开挖换管或内衬修复。对补口补伤质量一般的管段(如管段 19),优先开展补口专项检测和修复。

(3) 阴极保护系统优化

对阴极保护电位不达标区域, 分析原因并采取增设牺牲阳极、调整恒电位仪输出参数、修复绝缘接头等措施。对存在杂散电流干扰的区域(如铁路、高压输电线路附近), 安装排流装置或采取屏蔽措施。

5. 结论

本文针对气源管道风险评价方法缺失的行业痛点, 以西南某地区气源管道为研究对象, 构建了一套系统化的半定量风险评价体系, 并通过实例应用验证了体系的科学性与适用性。主要研究结论如下:

(1) 针对现有城镇燃气领域缺乏适用于气源管道风险评价方法的问题, 结合气源管道的特征, 构建了以“失效可能性 × 失效后果”为总体框架的半定量风险评价体系。评价体系共包含 4 个一级指标、15 个二级指标、26 个三级指标、58 个四级指标和 78 个五级指标, 共计 181 项底层指标, 实现了对设计施工、运行维护、介质危险性及受体易损性等风险因素的系统识别, 可较全面地反映气源管道全生命周期风险特征。

(2) 采用序关系法完成指标权重计算, 并建立了“指标评分 - 准则层计算 - 目标层评价”三级风险计算模型, 结合英国 TWI 风险矩阵思想提出了五级风险分级标准。相比传统层次分析法, 该方法减少了一致性检验过程, 降低了多指标评价体系的计算复杂度, 既保证了评价结果的科学性, 又提高了模型在工程实践中的可操作性, 为燃气企业开展大规模管道风险评价提供了较为高效的方法支撑。

(3) 以西南某地区气源管道为工程实例, 对 25 个评价管段进行了风险评价。结果表明, 20 个管段属于低风险, 占总管段数量的 80.0%; 5 个管段属于较低风险, 占 20.0%, 未出现较高风险及高风险管段, 说明评价区域整体运行状态良好。进一步分析发现, 影响不同管段风险水平的主导因素具有明显差异。管段 1 主要受山区复杂地形及自然灾害影响; 管段 2 受第三方施工活动影响较大; 管段 3 同时受到第三方施工与自然灾害共同作用。评价结果能够较好地地区分不同管段的风险来源, 与现场实际运行情况具有较好的一致性, 验证了所建模型的合理性和工程适用性。

(4) 基于风险评价结果, 提出了针对性的风险管控措施, 包括加强地质灾害监测预警与工程治理、强化第三方施工全过程管控、完善腐蚀检测等。并且进一步提出了面向完整性管理的差异化风险管控策略, 针对不同风险形成机制, 构建了“风险主导因素识别 - 管控措施匹配 - 资源优化配置”的管理模式, 避免传统风险管理中仅依据综合风险等级采取统一管控措施的问题。研究表明, 该风险评价方法不仅能够实现气源管道风险等级的定量评估, 还能够进一步识别影响管道风险水平的主导因素, 并建立风险评价结果与管控措施之间的关联关系。通过针对不同风险因素配置相应管理资源, 为燃气企业制定差异化巡检策略、优化维护资源配置以及开展完整性管理提供决策依据。

参考文献

- [1] Mhulbuaer, W.K. (1992) Pipeline Risk Management Manual: Ideas, Techniques, and Resources. Gulf Publishing Company.
- [2] Muhlbaue, W.K. (1996) Pipeline Risk Management Manual. 2nd Edition, Gulf Publishing Company.
- [3] Reyshahri, M., Malmasi, S. and Anoosheh, Z. (2014) A Hazop Risk Assessment on the Persian Gulf Star Gas Condensate Refinery in Bandar Abbas. *Jundishapur Journal of Health Sciences*, 6, 227-244.
- [4] Mohamud Sharif, A. and Basri, S. (2011) Software Risk Assessment: A Review on Small and Medium Software Projects. In: Zain, J.M., Wan Mohd, W.M.B. and El-Qawasmeh, E., Eds., *Software Engineering and Computer Systems*, Springer, 214-224. https://doi.org/10.1007/978-3-642-22191-0_19
- [5] 刘华, 张乃方. 欧洲燃气安全信息的公开化发展趋势[J]. 煤气与热力, 2012, 32(9): 37-40.
- [6] Glachant, J.M. (2011) A Vision for the EU Gas Target Model: The MECO-S Model. RSCAS Working Papers, 2011/38, 1-13.
- [7] Sweet, L., Kaley, L.C., Valbuena, R.R. and Warnock, A. (2001) Risk Based Inspection Prioritization Applied to an

-
- Ammonia Plant. *Ammonia Plant Safety and Related Facilities*, **20**, 147-156.
- [8] 陈利琼, 张鹏, 马剑林, 等. 油气管道风险的模糊综合评价方法探讨[J]. 天然气工业, 2003, 23(2): 117-119.
- [9] 刘红芳, 刘成敏, 王海宁. 我国天然气风险及评价方法分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2014, 10(2): 86-92.
- [10] 张德元, 邱斌, 刘启聪, 等. 天然气净化厂 RBI 与 RCM 风险评价技术分析[J]. 石油与天然气化工, 2016, 45(4): 97-101.
- [11] 翁帮华, 张林霞, 胥云丽, 等. 复杂地形条件下含硫天然气开发定量风险评价技术[J]. 天然气工业, 2012, 32(12): 102-105, 135-136.
- [12] 李军, 张宏, 梁海滨, 等. 基于模糊综合评价的燃气管道第三方破坏失效研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(08): 140-145.
- [13] 施林圆, 郑洁, 李晶. 四川输气站场风险评价研究[J]. 天然气工业, 2004(11): 135-138, 27.
- [14] 王明凤. 集输场站量化风险评价应用研究[D]: [硕士学位论文]. 荆州: 长江大学, 2012.
- [15] 邢金朵, 赵东风, 韩丰磊, 等. 基于 HAZOP 与 AEMA 的输气站场风险评估[J]. 石油与天然气化工, 2015, 44(4): 114-118.
- [16] 美国石油协会. API 581 基于风险的检验-基础资源文件[S]. 第 3 版. 华盛顿: API Publishing Services, 2016.
- [17] GB/T 38942-2020 压力管道规范 公用管道[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [18] 陈情来, 李成. 长输油气管道运营的安全管理[J]. 安全, 2016, 37(7): 53-54, 56.
- [19] 陈洁. 城镇燃气管道安全风险防范技术[J]. 石油石化物资采购, 2020(18): 57.