

# 天然气长输管道地区等级升级管理与风险评价

姚安林<sup>1,2</sup> 周立国<sup>1</sup> 汪龙<sup>1</sup> 王棠昱<sup>3</sup> 李又绿<sup>1</sup>

1. 西南石油大学石油与天然气工程学院 2. 油气消防四川省重点实验室

3. 中国石油工程建设有限公司西南设计分公司

**摘要** 为了有效管理和控制地区等级升级后所引起的输气管道风险变化,有必要依据管道完整性管理的基本原则,结合输气管道地区等级变化条件,制订相应的管理流程,建立风险评价模型,并提出风险管控原则。为此,首先结合地区等级划分标准识别高后果区,分类管理地区等级升级后的管段。然后,评价地区等级升级后管段的风险水平:①引入模糊语言与其量化值修正 EGIG 统计的失效概率,得到适用于特定管段的总失效概率;②按最严重事故后果选取蒸气云爆炸模型进行计算,依据泄漏 50% 致死率估算出死亡人数作为后果等级评价标准;③依据失效概率与失效后果,利用风险矩阵评定风险等级。最后引入风险可接受准则,分析管道泄漏的个人风险与社会风险,判定管道地区等级升级后的风险可接受性。案例分析结果表明:①地区等级升级后天然气长输管道风险也随之增大;②对于升级后风险增大的管段,需根据风险管控原则决定是否采取安全措施。

**关键词** 长距离输气管道 地区等级升级 风险管理 风险评价 修正概率 个人风险 社会风险

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2017.01.016

## Management of and risk evaluation on long-distance gas pipelines related to regional level upgrading

Yao Anlin<sup>1,2</sup>, Zhou Ligu<sup>1</sup>, Wang Long<sup>1</sup>, Wang Tangyu<sup>3</sup> & Li Youlü<sup>1</sup>

(1. School of Oil & Natural Gas Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 2. Oil & Gas Fire Protection Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu, Sichuan 610500, China; 3. Southwest Company, China Petroleum Engineering & Construction Corp., Chengdu, Sichuan 610017, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 37, ISSUE 1, pp.124-130, 1/25/2017. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

**Abstract:** In order to manage and control effectively the change of gas pipeline risks caused by the regional level upgrading, it is necessary to establish a management process, develop a risk evaluation model and propose risk control principles according to the basic principle of pipeline integrity management, combined with the regional level change conditions of gas pipelines. In this paper, a high-consequence zone was identified according to the regional level classification standard to perform classified management on the pipeline sections where the regional level is upgraded. Then, the risk level of the pipeline sections where the regional level is upgraded was evaluated. First, the failure probability of EGIG statistics was corrected by introducing the fuzzy language and its quantified value to obtain the total failure probability suitable for the specific pipeline section. Second, the vaporous cloud explosion model was adopted to make calculations based on the most serious accident consequence, and the fatality estimated based on 50% lethal rate of leakage was taken as the consequence grade evaluation criterion. And third, the risk level was evaluated by using the risk matrix based on failure probability and failure consequence. Finally, the risk acceptability criterion was introduced to analyze personal and social risks related to pipeline leakage and discriminate pipeline risk acceptability of regional level upgrading. Case analysis shows that risks increase with the upgrading of regional level. In the pipeline sections where risks increase after the regional level upgrading, it is necessary to decide whether to take safety measures according to risk management and control principles.

**Keywords:** Long-distance gas pipeline; Regional level upgrading; Risk management; Risk evaluation; Correction probability; Personal risk; Social risk

**基金项目:** 中国石油东部管道公司科研项目“地区等级升级给长输管道带来的风险和防控措施研究”(编号: JCF-2013-13)。

**作者简介:** 姚安林, 1959年生, 教授; 主要从事油气管道结构可靠性分析、风险评价及完整性管理等方面的研究与教学工作。地址: (610500) 四川省成都市新都区新都大道8号。电话: (028) 83035190。ORCID: 0000-0003-2460-8996。E-mail: yaoalt@sina.com

天然气长输管道在设计建设时,通常都会尽量避开人口密度大、施工作业频繁的地区。但伴随地方经济的发展与城市的扩张,天然气管道周围住宅、工厂等人口聚集场所增多,使管道通过的部分地区等级升高,出现了当初设计与目前状况不符的情况<sup>[1-2]</sup>。

地区等级升级增大了对管道安全运行的威胁,本着防患于未然的原则,有必要对管道经过的等级升级地区进行完整性管理与风险评价,制订风险管控原则<sup>[3-7]</sup>。董绍华等<sup>[1]</sup>从管道风险出发,借鉴国外管道公司升级管理的法律法规,对我国地区等级升级问题进行系统研究,提出升级后采取的措施,然而,对管道地区等级升级管理,尤其是风险评价方法没有进行具体研究。鉴于此,笔者根据长输管道完整性管理和地区等级升级的特点,针对地区等级升级后并非为高后果区,制订了一套有针对性的地区等级升级管理流程,同时提出了一种定量的风险评价模型,该模型能对 EGIG 统计失效概率进行修正<sup>[8-9]</sup>,分析管道泄漏最大事故后果,建立蒸气云爆炸的数学模型确定死亡人数,依据失效概率与失效后果对输气管道地区等级升级进行定量风险评价,并针对地区等级升级带来的高风险,根据计算结果分析个人风险与社会风险,制订风险管控原则,判定风险可接受性。

## 1 输气管道地区等级划分与升级管理

地区等级是高后果区划分的重要依据,对于地区等级的划分,国内外有不同的规范标准<sup>[10-12]</sup>。我国 GB 50251—2015《输气管道工程设计规范》中规定:一级一类地区为不经常有人活动及无永久性人员居住的区段;一级二类地区为户数在 15 户或以下的区段;二级地区为户数在 15 户以上 100 户以下的区段;三级地区为户数在 100 户或以上的区段,包括市郊居住区、商业区、工业区、发展区以及不够四级地区条件的人口稠密区;四级地区为 4 层及 4 层以上楼房(不计地下室层数)普遍集中、交通频繁、地下设施多的地区。美国 ASME B 31.8、加拿大 CSA Z 184 与英国 IGE/TDI 1 规定:一级地区为户数在 10 户或以下的区段;二级地区为户数在 10~46 户之间区段;三级地区为户数在 46 户或以上的区段;四级地区为 4 层以上(含 4 层)建筑物普遍集中、交通频率、地下设施较多的地区。通过对比国内外地区等级划分规范,发现国外划分的地区等级更严格。

目前,地区等级升级的现象普遍存在且有逐年

增加的趋势。图 1 为某管道公司 2015 年地区等级升级的统计数据,由其可知升级后的地区等级多为 3、4 级。

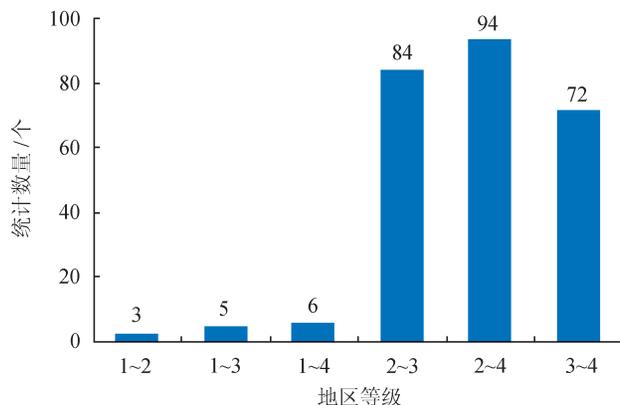


图 1 某管道公司地区等级统计数据图

对存在地区等级升级的管段可按照图 2 的流程开展管理<sup>[1,13-15]</sup>,并采取有效管理措施。为避免事故的发生,首先应进行高后果区识别,我国与美国都将气体管道经过的三、四级地区列入高后果区<sup>[16]</sup>。处于高后果区的管道,按照高后果管理措施进行管理;若升级后不处于高后果区,直接对管道进行风险评价,依据风险评价结果确定风险管控措施。由于进行完整性评价投资大、耗时长,且在部分地区不可行。因此对存在地区等级升级的管段进行风险评价是必要的,风险评价在整个管理体系中起着至关重要的作用。

## 2 地区等级升级管段风险评价

随着评价方法与技术的不断改进,管道的风险评价过程逐渐由定性往定量过度<sup>[17]</sup>。天然气管道地区等级升级定量风险评价由失效可能性定量分析与失效后果定量分析组成,风险评价流程如图 3 所示。

### 2.1 失效概率计算

由于国内缺少对管道失效的统计数据,故采用欧洲天然气管道事件数据组(EGIG)的统计数据<sup>[18]</sup>(表 1)。EGIG 统计了包括 15 个国家共 143 727 km 长管道的失效事故,但其得出的失效概率值只能视为各因素在平均状态下的失效概率,具体到我国某管段以及处于不同地区等级管段的失效概率计算,还需进行修正。

为了对各因素导致管道的失效可能性进行定量

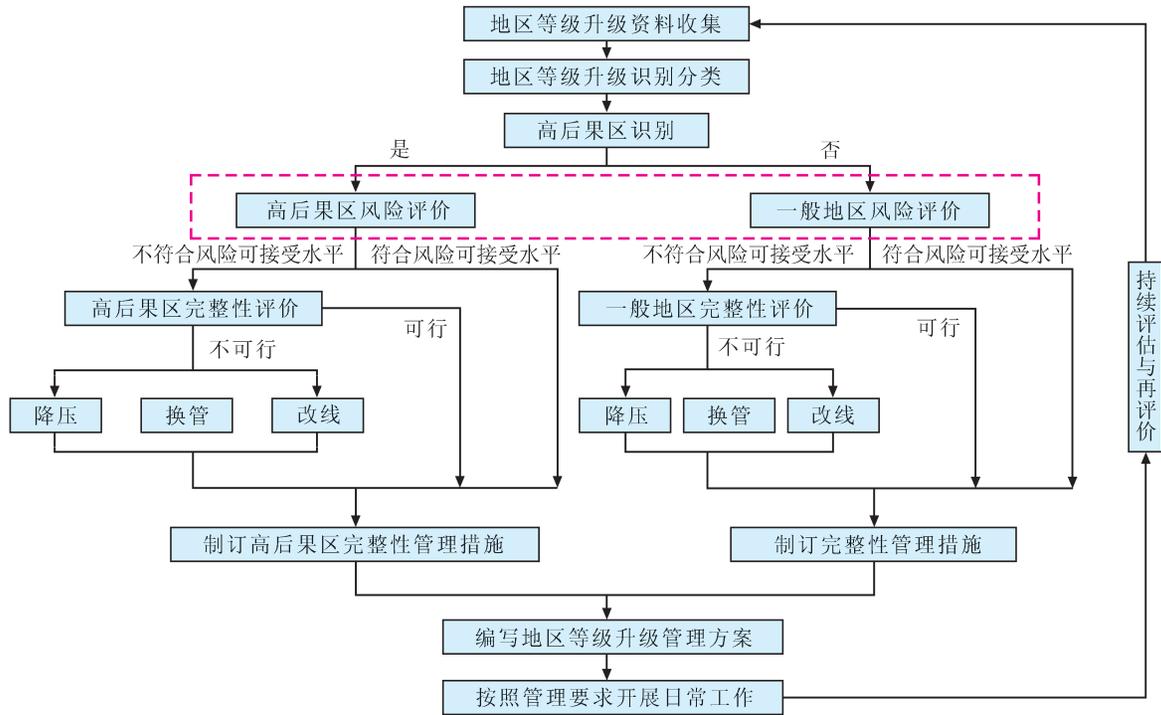


图 2 地区等级升级管理流程图

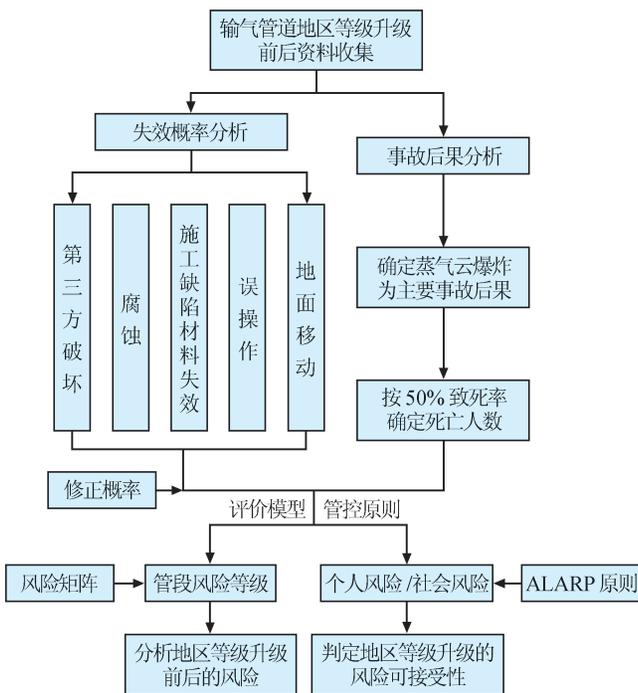


图 3 输气管道地区等级升级风险评价流程图

表 1 2004—2013 年影响因素的失效概率表

失效因素	失效概率 / [10 <sup>-4</sup> 次 / (km · a) <sup>-1</sup> ]
第三方破坏	0.55
腐蚀	0.38
施工缺陷 / 材料失效	0.25
误操作	0.06
地面移动	0.20

化，引入关于失效可能性的模糊等级，其包括肯定不失效、极低、很低、低、较低、中等、较高、高、很高、极高和肯定失效 11 个等级，对应的失效可能性值为：0、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9 和 1。由专家对影响因素的失效等级进行评判，评判结果为该因素 1 km/a 内导致管道的失效可能性值 ( $x_i$ )。

失效可能性值与失效概率的转化关系为<sup>[19]</sup>：

$$x_i = \frac{1}{1 + \left[ \frac{1}{K_i} \lg \left( \frac{1}{Q_i} \right) \right]^3} \quad (i=1,2,\dots,5) \quad (1)$$

其中  $K_i = \lg \frac{1}{q_i}$  (2)

式中  $Q_i$  表示第  $i$  个因素的修正失效概率； $q_i$  表示第  $i$  个因素的通用失效概率，即为第  $i$  个因素 EGIG 数据库的统计数据。

根据式 (1) 得：

$$Q_i = \begin{cases} \frac{1}{10^{k_i}}, & x_i \neq 0 \\ 0, & x_i = 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中  $k_i = K_i \left( \frac{1-x_i}{x_i} \right)^3$

总修正失效概率 ( $Q$ ) 为：

$$Q = \sum_{i=1}^5 Q_i \quad (4)$$

### 2.2 失效后果计算

天然气管道持续泄漏的事故包括喷射火焰、闪火和蒸气云爆炸，取最大泄漏事故后果进行计算，其中蒸气云爆炸的事故后果危害性最大<sup>[12]</sup>。

气体泄漏速率 ( $W$ ) 为：

$$W = \delta_g p A_0 \sqrt{\frac{\gamma M}{RT} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (5)$$

式中  $p$  表示天然气输送压力，Pa； $\gamma$  表示绝热指数，取 1.33； $\delta_g$  表示泄漏系数，取 1； $A_0$  表示管道破口面积， $m^2$ ； $M$  表示气体分子质量，取 0.016 kg/mol； $R$  表示气体常数，8.314 J/(mol·K)； $T$  表示介质的温度，K，取 313.15 K。

等效 TNT 当量为：

$$m_{TNT} = \frac{\lambda m H_d}{Q_{TNT}} \quad (6)$$

式中  $m_{TNT}$  表示 TNT 当量； $\lambda$  表示效率因子，取 0.03； $m$  表示泄漏的天然气质量，kg， $m = Wt$ ； $H_d$  表示气体爆炸热，用燃烧热表示， $5.56 \times 10^4$  kJ/kg； $Q_{TNT}$  表示标准 TNT 爆源的爆热值，取 4 520 kJ/kg。

泄漏后果 50% 死亡半径 ( $r$ ) 为<sup>[20-21]</sup>：

$$r = 13.6 \left(\frac{m_{TNT}}{1000}\right)^{0.37} \quad (7)$$

死亡面积 ( $A$ ) 为：

$$A = Y\pi r^2 \quad (8)$$

式中  $Y$  表示发生某泄漏事故后果的概率，蒸气云爆炸发生的概率为 0.04。

死亡人数 ( $N$ ) 为：

$$N = \rho P A \quad (9)$$

式中  $\rho$  表示危险区域内的人口密度，人/ $m^2$ ； $P$  表示事故人员死亡概率，取 50%。

### 2.3 风险评价模型

参照 DNV-RP-F 116<sup>[22]</sup> 与《生产安全事故报告和调查处理条例》<sup>[23]</sup>，将失效概率等级（表 2）与失效后果等级（表 3）划分成 1~5 个等级。

表 2 失效概率等级划分表

失效概率等级	失效概率
1	[0, 0.000 01)
2	[0.000 01, 0.000 1)
3	[0.000 1, 0.001)
4	[0.001, 0.01)
5	[0.01, 1]

表 3 失效后果等级划分表

失效后果等级	死亡人数 / 人
A	< 3
B	[3,10)
C	[10,20)
D	[20,30)
E	$\geq 30$

基于风险矩阵（图 4）确定地区等级升级前后的风险等级。

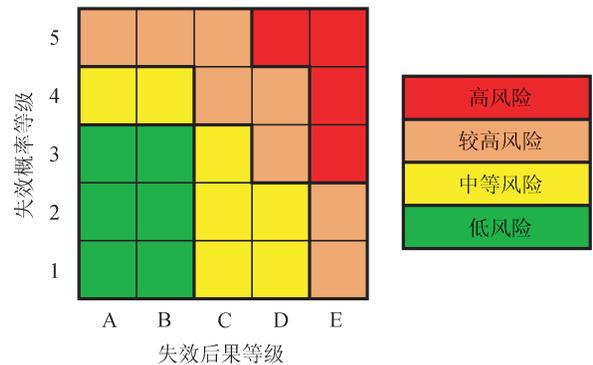


图 4 风险矩阵图

### 2.4 风险管控原则

输气管道风险可接受准则大多采用 ALARP 原则来界定，ALARP 原则将风险分为 3 个区域，即不可接受风险区、尽可能降低区和可接受风险区。当落入不可接受风险区，应立即采取措施降低风险；当落入尽可能降低区，需分析措施的成本与效益决定是否采取控制措施降低风险；当落入可接受风险区，无需采取安全措施<sup>[24]</sup>。

用个人风险与社会风险来衡量输气管道地区等级升级后的泄漏风险<sup>[25]</sup>。

1) 个人风险指事故发生时造成管道附近人员死亡的概率 ( $\pm l$ )，可以采用积分的方法计算，积分区间示意图如图 5 所示。

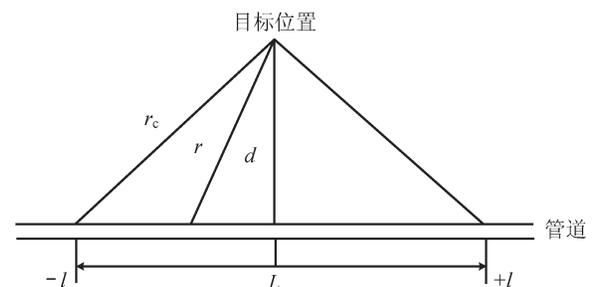


图 5 个人风险积分区间示意图

$$\pm l = \pm \sqrt{r_c^2 - d^2} \quad (10)$$

式中  $r_c$  表示目标位置与 50% 致死率临界失效点的距离, m;  $d$  表示目标位置与管道的距离, m。

个人风险值 (IR) 为:

$$IR = \int_{-l}^{+l} QPY dL \quad (11)$$

式中  $Q$  表示管道失效概率, 次 / (km · a)。

基于 ALARP 原则, 同时考虑地区等级升级后普遍为 3、4 级地区的情况<sup>[24,26]</sup>, 并根据《危险化学品重大危险源监督管理暂行规定》与我国输气管道周边环境特点, 确定个人风险接受准则 (表 4)。

表 4 个人风险接受准则表

ALARP 原则	个人风险值
可接受风险区	$IR \leq 1 \times 10^{-6}$
尽可能降低区	$1 \times 10^{-6} < IR \leq 1 \times 10^{-5}$
不可接受风险区	$1 \times 10^{-5} < IR$

2) 社会风险为多人受到伤害的概率, 死亡人数为:

$$N = \int_A \rho P dA \quad (12)$$

累计频率 (F) 为<sup>[27]</sup>:

$$F = QYL_{CFL} \quad (13)$$

式中  $L_{CFL}$  表示事故致死人数大于或等于  $N$  时的管道长度。

社会风险的 ALARP 准则是建立在  $F-N$  曲线的基础上, 我国石油化工企业多采用《危险化学品重大危险源监督管理暂行规定》中推荐的社会风险标准<sup>[28]</sup> (图 6)。根据事故累计频率 (F) 与死亡人数 (N) 分析输气管道泄漏的社会风险。

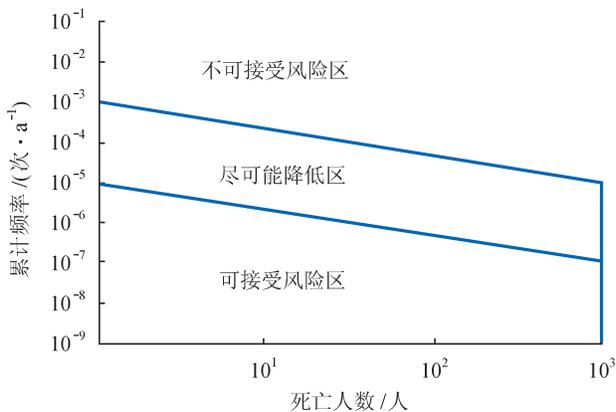


图 6 可容许社会风险标准要求图

### 3 案例分析

由于我国输气管道地区等级升级后发生特大泄漏事故的案例鲜有, 故以某输气管段为例来验证第 2 节的评价方法。管道穿越规划居民区, 管段两侧建起 4 层以上安置房 (10 层以上), 最近距离管道 50 m, 人口密度与施工建设活动增多, 导致管段所处地区的地区等级升级。假设某施工单位不了解管道的位置, 在施工时不慎将管道损坏, 致使管道出现 1 个 100 mm × 50 mm 的长方形漏洞, 导致大量天然气泄漏, 已知该管段的运行压力为 8 MPa, 从泄漏到停输约需 30 min。依据地区等级划分原则 (管道中心线两侧 200 m, 任意长度为 2 km), 确定管道周围暴露人口密度由升级之前的 740 人 /km<sup>2</sup> 增加到 5 350 人 /km<sup>2</sup>。

#### 3.1 管段风险评价

根据管段地区等级升级前后现场实际情况, 并通过收集设计施工与管道运行的相关资料, 得知该管段处于平原地区, 区域内的盗气、非法施工等第三方破坏行为较多, 管道防腐措施较为落后, 施工技术较国外水平有一定差距, 但是公司管理严格, 员工素质高。由 10 名专家与现场技术人员对各因素导致地区等级升级前后管道失效可能性的模糊等级进行评判, 并取评判出的 10 个模糊等级对应失效可能性值的平均值 (表 5)。由于地区等级升级主要影响的是第三方破坏, 因此升级前后第三方破坏的失效可能性会发生变化, 而其他因素保持不变。根据式 (2) 得到各因素升级前后的修正失效概率值如表 5 所示。

表 5 地区等级升级前后各因素的失效可能性表

失效因素	升级前		升级后	
	失效可能性值 / [次 · (km · a) <sup>-1</sup> ]	失效概率	失效可能性值 / [次 · (km · a) <sup>-1</sup> ]	失效概率 / [次 · (km · a) <sup>-1</sup> ]
第三方破坏	0.63	$2.71 \times 10^{-4}$	0.71	$41.08 \times 10^{-4}$
腐蚀	0.60	$1.56 \times 10^{-4}$	0.60	$1.56 \times 10^{-4}$
施工缺陷 / 材料失效	0.57	$1.20 \times 10^{-4}$	0.57	$1.20 \times 10^{-4}$
误操作	0.53	$0.10 \times 10^{-4}$	0.53	$0.10 \times 10^{-4}$
地面移动	0.48	$0.12 \times 10^{-4}$	0.48	$0.12 \times 10^{-4}$

根据式 (3) 得地区等级升级前该管段总修正失效概率  $Q_{前} = 5.69 \times 10^{-4}$  次 / (km · a), 对应的失效概率等级为 3 级; 地区等级升级后总修正失效概率  $Q_{后} = 4.41 \times 10^{-3}$  次 / (km · a), 对应的失效概率等

级为 4 级。

由式 (4) ~ (6) 可得泄漏事故后果 50% 的死亡半径为 55.30 m, 再根据式 (7) ~ (8) 得地区等级升级前的死亡人数为 4 人, 对应的失效后果等级为 B 级; 地区等级升级后的死亡人数为 26 人, 对应的失效后果等级为 D 级。

由图 4 可得该管段地区等级升级前的风险为低风险; 升级后的风险为较高风险。随着管段所在地区等级升级, 该区域的风险随之增大。

### 3.2 判定风险可接受性

由于地区等级的升级带来了较高风险, 需根据风险管控原则, 判定风险可接受性。

根据式 (9)、(10) 求出地区等级升级后的个人风险值如图 7 所示。

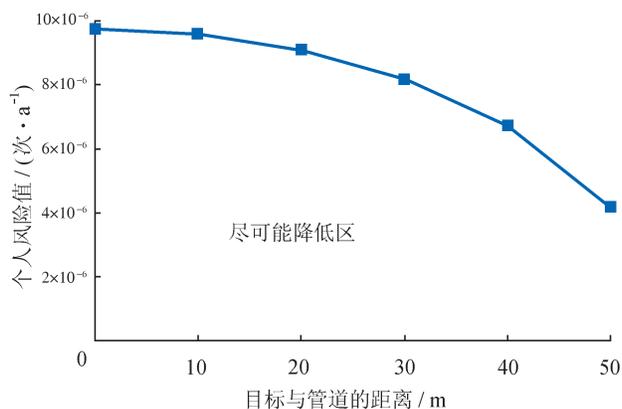


图 7 升级后的个人风险图

根据式 (11)、(12) 估算出潜在死亡人数与累计频率, 得到地区等级升级后的  $F-N$  曲线如图 8 所示。

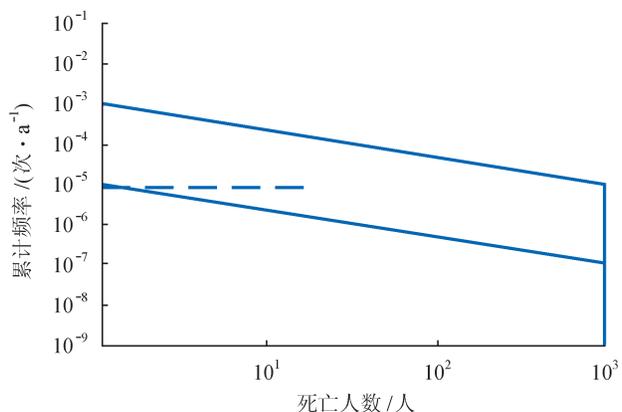


图 8 升级后的社会风险图

由图 7、8 可知: 该管段地区等级升级后的个人风险与社会风险均处于尽可能降低区, 需根据措施的成本与效益决定是否采取安全管理措施来进一步降低风险。

## 4 结论

1) 由于管道地区等级升级后的等级不同, 对其进行统一管理缺乏针对性, 而通过对升级后地区等级的分类, 进行高后果区识别, 可以明确管控重点, 降低管理成本。

2) 通过对 EGIG 数据库的天然气长输管道统计失效概率进行修正, 避免了传统失效可能性计算过程中主观因素的影响, 使量化结果更加适用于我国的输气管道。

3) 管道地区等级的升级, 虽然可能导致区域风险随之增大, 但并非所有升级地区都必须采取相应的降险措施。应当依据风险可接受性原则, 决定是否采取安全措施, 这样才能在保证安全的前提下实现管理效益的最大化。

### 参 考 文 献

- [1] 董绍华, 王东营, 费凡, 安宇, 董秦龙, 周永涛. 管道地区等级升级与公共安全风险管控 [J]. 油气储运, 2014, 33(11): 1164-1170.  
Dong Shaohua, Wang Dongying, Fei Fan, An Yu, Dong Qinlong & Zhou Yongtao. Upgrading of pipeline regions and control of public security risks[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33(11): 1164-1170.
- [2] 张健, 刘畅, 黎洪珍, 胡德芬, 苏尚田. S-Y 气田集输工艺装置腐蚀与位移控制措施 [J]. 天然气勘探与开发, 2016, 39(2): 78-81.  
Zhang Jian, Liu Chang, Li Hongzhen, Hu Defen & Su Shangtian. Corrosion and displacement control for gathering and transportation device in S-Y Gasfield[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2016, 39(2): 78-81.
- [3] 赵新伟, 张华, 罗金恒. 油气管道可接受风险准则研究 [J]. 油气储运, 2016, 35(1): 1-6.  
Zhao Xinwei, Zhang Hua & Luo Jinheng. Risk acceptance criteria for oil and gas pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2016, 35(1): 1-6.
- [4] 王泽根, 席明军, 黄秋爽. 基于环境风险的输油管道地震安全性评价体系 [J]. 油气储运, 2016, 35(3): 245-249.  
Wang Zegen, Xi Mingjun & Huang Qiushuang. Earthquake safety assessment system for oil pipelines based on environmental risks[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2016, 35(3): 245-249.
- [5] 周利剑, 李振宇. 管道完整性数据技术发展现状与展望 [J]. 油气储运, 2016, 35(7): 691-697.  
Zhou Lijian & Li Zhenyu. The development status and prospect of pipeline integrity data technologies[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2016, 35(7): 691-697.
- [6] 高海康, 刘亮, 郭磊, 韩文超, 徐杰. 管道完整性数据库的优化策略 [J]. 油气储运, 2016, 35(9): 932-935.  
Gao Haikang, Liu Liang, Guo Lei, Han Wenchao & Xu Jie. Optimization strategies on pipeline integrity database[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2016, 35(9): 932-935.

- [7] 孙洁, 李松, 刘凯蕾, 徐鸣伟. 油气管道安全预警技术现状 [J]. 油气储运, 2016, 35(9): 1023-1026.  
Sun Jie, Li Song, Liu Kailei & Xu Mingwei. Current status of security pre-warning technologies for oil and gas pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2016, 35(9): 1023-1026.
- [8] 黄小美, 李百战, 彭世尼, 张家兰. 燃气管道失效概率评估方法研究 [J]. 石油学报, 2010, 31(4): 664-667.  
Huang Xiaomei, Li Baizhan, Peng Shini & Zhang Jialan. Assessment methods of failure probability on gas pipelines[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(4): 664-667.
- [9] 靳书斌, 郑洪龙, 侯磊, 刘佳, 魏巍, 杨玉锋. 高压燃气管道第三方破坏失效概率计算 [J]. 油气储运, 2014, 33(5): 510-514.  
Jin Shubin, Zheng Honglong, Hou Lei, Liu Jia, Wei Wei & Yang Yufeng. Calculation of failure probability of the third-party interference for high pressure gas pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33(5): 510-514.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50251—2015 输气管道工程设计规范 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB 50251-2015 Code for design of gas transmission pipeline engineering[S]. Beijing: China Planning Press, 2015.
- [11] The American Society of Mechanical Engineers. ASME B 31.8S-2014 Managing system integrity of gas pipelines[S]. New York: ASME, 2014.
- [12] 魏沁汝. 天然气长输管道高后果区识别与风险评价研究 [D]. 成都: 西南石油大学, 2015.  
Wei Qinru. High consequence area identification and risk assessment of natural gas long-distance pipeline[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015.
- [13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB 32167—2015 油气输送管道完整性管理规范 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China & Standardization Administration of the People's Republic of China. GB 32167-2015 Oil and gas pipeline integrity management specification[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [14] 董绍华, 王联伟, 费凡, 周永涛, 谭春波. 油气管道完整性管理体系 [J]. 油气储运, 2010, 29(9): 641-647.  
Dong Shaohua, Wang Lianwei, Fei Fan, Zhou Yongtao & Tan Chunbo. Integrity management system of oil & gas pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2010, 29(9): 641-647.
- [15] 么惠全, 毛建, 吴志平, 张照旭, 赵冬野. 西气东输管道完整性管理实践及效能分析 [J]. 天然气工业, 2013, 33(12): 124-130.  
Yao Huiquan, Mao Jian, Wu Zhiping, Zhang Zhaoxu & Zhao Dongye. Integrity management practices in the West-to-East Natural Gas Pipelines and their competence appraisal[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(12): 124-130.
- [16] 刘军. 对比国内外油气管道高后果区标准 [J]. 当代化工, 2014, 43(12): 2609-2611.  
Liu Jun. Comparison of standards for high consequence areas of oil and gas pipelines at home and abroad[J]. Contemporary Chemical Industry, 2014, 43(12): 2609-2611.
- [17] 黄维和, 郑洪龙, 吴忠良. 管道完整性管理在中国应用 10 年回顾与展望 [J]. 天然气工业, 2013, 33(12): 1-5.  
Huang Weihe, Zheng Honglong & Wu Zhongliang. Overview of pipeline integrity management application over the past decade and its prospect in future in China[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(12): 1-5.
- [18] European Gas Pipeline Incident Data Group. Gas pipeline incidents[R]. Amsterdam: European Gas Pipeline Incident Data Group, 2014: 23-25.
- [19] Onisawa T. Subjective analysis of system reliability and its analyzer[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1996, 83(2): 249-269.
- [20] 冯文兴, 项小强, 闫啸, 李保吉, 王兆芹. 高压天然气管道泄漏燃烧爆炸后果 [J]. 油气储运, 2010, 29(12): 903-904.  
Feng Wenxing, Xiang Xiaoqiang, Yan Xiao, Li Baoji & Wang Zhaoqin. Consequence of combustion and explosion after high-pressure natural gas pipeline leakage[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2010, 29(12): 903-904.
- [21] 张圣柱. 油气长输管道事故风险分析与选线方法研究 [D]. 北京: 中国矿业大学, 2012.  
Zhang Shengzhu. Accident risk analysis and route selection method of long-distance oil and gas transportation pipeline[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, 2012.
- [22] Leinum BH & Veritas DN. DNV-RP-F 116 Integrity management of submarine pipeline systems[S]. Hovik: DNV, 2009.
- [23] 中华人民共和国国务院. 生产安全事故报告和调查处理条例 [Z]. 北京: 中国法制出版社, 2015.  
The State Council of People's Republic of China. Regulations for production safety accident reporting and investigation[Z]. Beijing: China Legal Publishing House, 2015.
- [24] 赵忠刚, 姚安林, 李又绿, 李大全. 油气管道可接受风险标准值的界定研究 [J]. 西南石油大学学报 (自然科学版), 2008, 30(2): 147-150.  
Zhao Zhonggang, Yao Anlin, Li Youlü & Li Daquan. Defining acceptable risk standard values of oil and gas pipeline[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2008, 30(2): 147-150.
- [25] 邢志祥. 天然气长输管道的定量风险评价方法 [J]. 石油机械, 2008, 36(4): 15-17.  
Xing Zhixiang. A quantitative method of risk assessment of natural gas pipeline[J]. China Petroleum Machinery, 2008, 36(4): 15-17.
- [26] 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.
- [27] 原文娟. 基于屏障的在役海底管道量化风险评价技术研究 [D]. 北京: 中国地质大学, 2014.  
Yuan Wenjuan. Study on quantitative risk evaluation of in-service subsea pipeline[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2014.
- [28] 唐秋香. 石油化工企业区域定量安全评价方法的研究 [D]. 北京: 中国石油大学, 2010.  
Tang Qiuxiang. Study on regional quantitative assessment method for petrochemical industry[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2010.