

中文引用格式:陈超,谭心鑫,王迪,等. 油库抗震韧性动态评估模型[J]. 中国安全科学学报,2024,34(4):87-92.

英文引用格式:CHEN Chao, TAN Xinxin, WANG Di, et al. Dynamic assessment model for seismic resilience of oil depot [J]. China Safety Science Journal,2024, 34(4):87-92.

## 油库抗震韧性动态评估模型\*

陈超<sup>1,2</sup>教授,谭心鑫<sup>1</sup>,王迪<sup>3</sup>,李长俊<sup>1</sup>教授

(1 西南石油大学石油与天然气工程学院,四川成都610500;2 代尔夫特理工大学安全科学系,荷兰代尔夫特2628 BX;3 国家石油天然气管网集团,北京100028)

中图分类号:X915.5 文献标志码:A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.04.1002

基金项目:四川省重点研发项目资助(2023YFS0412);英国劳氏基金资助(Sg3\100021)。

**【摘要】** 为解决油库面临地震时的安全管理问题,首先,将抗震韧性定义为油库为保持储存功能表现出的抵御地震破坏、减轻地震次生灾害、适应震后环境和震后快速恢复的能力,并量化油库抗震韧性表现出的4种能力,建立油库抗震韧性评估模型;其次,考虑到抵御阶段和减轻阶段的不确定性,基于动态蒙特卡罗法,定量评估油库抗震韧性,并获得油库的抗震韧性值;最后,以某地震区域油库为例,验证模型的有效性。结果表明:油库韧性能力的不确定性导致韧性值出现大幅波动;多米诺效应对油库韧性的影响较大,不可忽略;震源距离越远、断层滑移率越小,抗震韧性越高;远离活动断层、预测地震危害、减少应急响应时间等措施可提高抗震韧性。

**【关键词】** 油库; 地震; 安全韧性; 抗震韧性; 动态评估; 评估模型

### Dynamic assessment model for seismic resilience of oil depot

CHEN Chao<sup>1,2</sup>, TAN Xinxin<sup>1</sup>, WANG Di<sup>3</sup>, LI Changjun<sup>1</sup>

(1 School of Petroleum Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;  
2 Safety and Security Science Group, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands,  
2628 BX; 3 China Oil & Gas Pipeline Network Group, Beijing 100028, China)

**Abstract:** To address the safety management issues of oil depots in case of earthquakes, firstly, seismic resilience is defined as the ability of oil depots to maintain their storage functions in terms of resisting earthquake damage, mitigating secondary disasters, adapting to environments after earthquakes, and quickly recovering after earthquakes. Moreover, an assessment model for the seismic resilience of Oil depot is proposed by quantifying the four types of abilities. Secondly, a quantitative assessment of the seismic resilience of the oil depot is realized through a dynamic Monte Carlo method, considering the uncertainty of the resistance and mitigation stages, thereby obtaining the seismic resilience value. Finally, the performance of the proposed model is validated against the oil depot in an earthquake area. The results indicate that the uncertainty of the resilience ability of the oil depot results in a significant fluctuation in resilience values, and the domino effect has a significant influence on the oil depot's resilience and cannot be ignored. Moreover, the farther the earthquake source distance and the lower the fault slip rate lead to higher seismic resilience. The seismic resilience can be improved by staying away from active faults,

predicting earthquake hazards, and reducing emergency response time.

**Keywords:** oil depot; earthquake; safety resilience; seismic resilience; dynamic assessment; assessment model

## 0 引言

油库是储存各种易燃、易爆油品的重要基础设施,一旦发生突发事件导致储罐损坏,极易引发火灾、爆炸等重大事故。油库是由多个储罐构成的储油罐区,单个储罐发生火灾、爆炸等事故容易诱发多米诺效应,导致连锁事故。近年来,随着气候变化、极端天气的加剧,自然灾害频发,不断影响工业基础设施的安全运行。地震作为我国主要的自然灾害,具有预报难度大、破坏性大、影响面广等特点,容易导致储罐破损,并诱发火灾、爆炸等次生灾害,妨碍油库的正常运营和安全管理。目前,油库地震安全防控的研究主要以地震预警<sup>[1]</sup>和储罐结构抗震设计<sup>[2]</sup>为主,忽略了地震减灾、应急响应和灾后恢复的重要性。因此,基于安全韧性理论开展油库抗震韧性动态评估研究具有重要意义。

安全韧性研究方面,国内外学者进行了大量理论研究。韧性最早由 HOLLING<sup>[3]</sup>提出,指的是森林周期性成长状态,包括植被增殖、破坏后的骤减以及再生,强调了恢复能力。DOORN 等<sup>[4]</sup>认为韧性是一个“正式”概念,并证明韧性表现为保持或增强系统某些功能的能力。近年来,韧性已成为安全和风险研究的重要概念。AVEN 等<sup>[5]</sup>探究了韧性和风险的关系,并对韧性进行了定性评估,改进韧性管理模式;黄浪等<sup>[6]</sup>全面分析了韧性理论在安全科学领域的应用现状,指出韧性理论有由静态分析向动态分析的发展趋势;李鑫等<sup>[7]</sup>运用事故树分析法构建了工人疲劳安全韧性模型,提高了工厂对工人的疲劳

管理能力。随着研究的深入,不断有学者将韧性应用到工业领域的安全防控中<sup>[8-10]</sup>。然而,安全韧性研究主要集中于韧性理论与韧性指标,定量研究较少,罕有安全事故动态演变对韧性影响的研究。

鉴于此,为增强油库抗震韧性,减轻次生灾害的破坏,笔者拟提出一种动态评估模型,量化油库的恢复能力,考虑灾害的演变过程,提出增强韧性的措施,为提高油库的安全管理、增强油气供给韧性提供理论依据。

## 1 油库抗震韧性

韧性原理已经被运用于各行各业中,不同领域对韧性的定义存在差异。借鉴美国国家科学院提供的韧性定义<sup>[11]</sup>,油库抗震韧性被定义为油库在灾害中为保持其储存性能,表现出抵御地震破坏、减轻地震次生灾害、适应震后环境和震后快速恢复的能力。根据油库抗震韧性的定义,当发生地震灾害时,随着灾害的动态演变,油库可能处于6个阶段,演变过程如图1所示。第1阶段为初始阶段,在发生地震之前油库处于初始状态,储存性能为 $S_0$ ;第2阶段为地震突发阶段,当地震发生时,由于1个或多个储罐受损,油库储存性能立即降低,并导致重大事故;第3阶段为升级阶段,初始的重大事故场景可能会诱发多米诺效应,破坏邻近储罐,进一步降低储存性能,在时间 $t_2$ 时储存性能达到最小值 $S_2$ ;第4阶段为适应阶段,当灾害演变结束后,油库可以调整其操作策略,达到提高储存性能的效果;第5阶段为恢复阶段,工作人员在此阶段采用恢复策略,通过修复

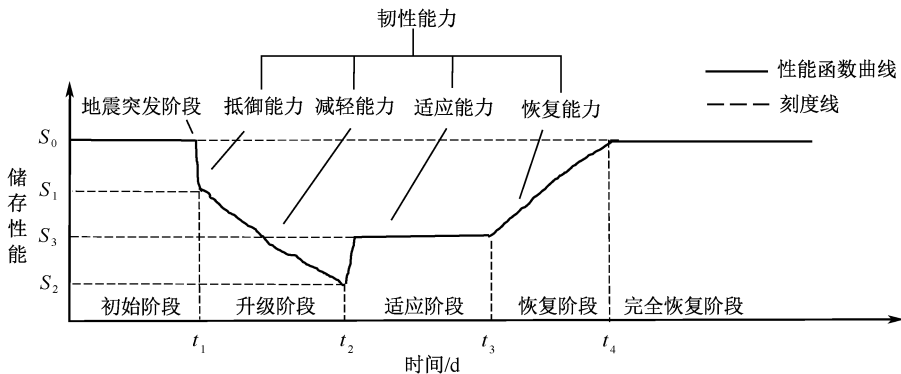


图1 储存性能随时间的演变

Fig. 1 Storage performance evolution over time

或重建受损储罐( $t_3-t_4$ )来恢复储存性能;第6阶段为完全恢复后的阶段。

## 2 油库抗震韧性评估模型

基于储存性能曲线构建油库抗震韧性模型是建立油库抗震韧性动态评估模型的关键步骤。

### 2.1 储存性能指标

油库承担着接收、储存、供给石油产品的重要角色。因此,油库的储存性能可用油库初始阶段的每日油品平均周转量表示,按下式计算:

$$h_Q = \sum_{i=1}^n h_i \quad (1)$$

式中: $h_Q$ 为油库平均周转量, $m^3/d$ ; $h_i$ 为单种油品平均流量, $m^3/d$ ; $n$ 为油品的种类总数。

另一个储存性能指标是油库库容,油库储罐数量为 $i$ ,则初始阶段油库总容积为所有储罐容积之和:

$$V_Q = \sum_{i=1}^m V_i \quad (2)$$

式中: $V_Q$ 为油库总容积, $m^3$ ; $V_i$ 为单个储罐容积, $m^3$ ; $m$ 为储罐总数。

### 2.2 抗震韧性评估模型

根据韧性理论<sup>[12]</sup>,量化图1的储存性能曲线,得到抗震韧性:

$$R = \frac{\int_{t_1}^{t_4} S(t) dt}{S(t_0)(t_4 - t_1)} \quad (3)$$

式中: $R$ 为油库抗震韧性; $S(t)$ 为储存性能, $m^3$ ; $S(t_0)$ 为初始储存性能, $m^3$ ; $t_1$ 、 $t_4$ 为韧性过程时间, $d$ 。不同事故演化场景的韧性值 $R$ 可能随式(3)中积分上限( $t_4$ )变化而变化<sup>[13]</sup>。如有 $M$ 个事故演变场景, $t_4$ 的最大值为 $t_{\max}$ ,则韧性表示为:

$$R = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \frac{\int_{t_1}^{t_{\max}} S_i(t) dt}{S(t_0)(t_{\max} - t_1)} \quad (4)$$

其中, $0 < R < 1$ , $R$ 越接近1韧性越强。 $R=1$ 是一种理想状态,在这种情况下,地震不会导致油库储存性能退化,地震对油库的影响被完全吸收。 $R=0$ 是一种极限状态,在这种情况下,油库被损坏并且无法恢复。大部分演化场景的韧性值位于 $0 \sim 1$ 之间。

### 2.3 抵御能力评估模型

1) 抵御能力计算。抵御能力的大小主要取决于地震的强度,可用储罐的易损性表示:

$$C_s = 1 - P_f \quad (5)$$

式中: $C_s$ 为单个储罐抵御能力; $P_f$ 为单个储罐的失效概率。

地震作用下,多个储罐可能同时受到影响,导致油库的储存性能突然下降,其剩余的储存性能为 $S_1$ 。

2) 储罐失效概率计算。地面运动引起的地面强烈震动现象是造成油库储罐破坏的主要原因<sup>[14]</sup>。峰值地面加速度(Peak Ground Acceleration,PGA)常作为灾害因子,用于分析易损性<sup>[15]</sup>。为了动态评估储罐的地震易损性,采用Probit概率模型<sup>[16]</sup>计算地震导致设备失效的概率:

$$Y = k_1 + k_2 \ln(100PGA) \quad (6)$$

式中: $Y$ 为设备失效概率; $k_1$ 和 $k_2$ 为Probit系数;储罐的失效概率 $P_f$ 可以基于累积标准正态分布的密度函数 $\Phi$ 计算<sup>[17]</sup>:

$$P_f = \Phi(Y - 5) \quad (7)$$

由于抵御能力模型的不确定性,通过 $P_f$ 随机抽样数确定地震作用下受损的储罐。因此,地震发生后的储存容量按下式计算:

$$V_{t_1} = V_Q - \Delta V_e \quad (8)$$

式中: $V_{t_1}$ 为地震发生后油库储存容量, $m^3$ ; $\Delta V_e$ 为地震中损坏的储存容量, $m^3$ 。

### 2.4 减轻能力评估模型

地震灾害导致储罐破损时,可能造成多罐火灾,引发协同效应<sup>[18]</sup>。因此,储罐接收的热辐射等于不同火灾产生的热辐射之和。在初始阶段,可根据总热辐射计算储罐的失效时间(Time To Failure, TTF)。

$$TTF_{k,t_i} = \frac{\exp(c_1 \times V_k^{c_2} + c_3 \ln(Q_{k,t_i}) + c_4)}{60} \quad (9)$$

式中: $Q_{k,t_i}$ 为储罐 $k$ 受到的总热辐射强度; $V_k^{c_2}$ 为储罐体积, $m^3$ ; $c_1$ 、 $c_2$ 、 $c_3$ 和 $c_4$ 为取决于设备类型的常数<sup>[12]</sup>。

储罐遭受的热辐射可能随时间变化,在计算TTF时,应叠加每个周期内储罐接收到的热量,即叠加效应。 $t_{i+1}$ 的TTF $_{k,t_{i+1}}$ 可通过 $t_i$ 的TTF $_{k,t_i}$ 来更新<sup>[18]</sup>:

$$TTF_{k,t_{i+1}} = \left( \frac{Q_{k,t_{i+1}}}{Q_{k,t_i}} \right)^{c_3} \times (TTF_{k,t_i} - t_{i+1} + t_i) \quad (10)$$

当TTF=0时,认为储罐失效,并发生多米诺效

应。应急响应对于防止多米诺效应至关重要,其性能主要由应急响应时间(Time Emergency Response, TER)决定。考虑到应急响应的不确定性,通常使用对数正态分布对TER进行建模<sup>[12]</sup>:

$$\ln \text{TER} \sim N(\mu, \sigma^2) \quad (11)$$

式中: $\mu$ 为均值; $\sigma^2$ 为方差。

如果应急响应及时到达,则认为多米诺效应被制止。多米诺效应演变结束时( $t_2$ ),总储存容量如下:

$$V_{t_2} = V_{t_1} - \Delta V_{\text{up}} \quad (12)$$

式中: $V_{t_2}$ 为升级阶段后储存容量, $\text{m}^3$ ;  $\Delta V_{\text{up}}$ 为升级阶段中损坏的储罐容量, $\text{m}^3$ 。

## 2.5 适应能力评估模型

储备罐可直接增加总储存量,从而增加每日油品流量,计算过程如下:

$$V_{t_3} = V_{t_2} + V_{\text{ad}} \quad (13)$$

$$f_{t_3} = \frac{V_{t_2} + V_{\text{ad}}}{V_{t_2}} f_{t_2} \quad (14)$$

式中: $V_{t_3}$ 为 $t_3$ 时的总储存量, $\text{m}^3$ ;  $f_{t_3}$ 为油品的日流量, $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $V_{\text{ad}}$ 为增加的储存容量, $\text{m}^3$ 。通过适应策略,损失的储存性能可以得到部分恢复。

## 2.6 恢复能力评估模型

恢复阶段,所有受损储罐都可以进行重建,储罐恢复时间(Time To Recovery, TTR)是一个定量指标。通常重建储罐需要几个月时间,如果多个储罐损坏,重建顺序也可能影响TTR。恢复能力与施工时间呈负相关,所以,增加投资可以缩短TTR,从而提高储存韧性。恢复完成时间 $t_4$ 表示为:

$$t_4 = t_3 + \text{TTR} \quad (15)$$

鉴于韧性模型中存在诸多不确定性,文中采用动态蒙特卡罗算法,动态求解油库抗震韧性<sup>[19]</sup>。

# 3 韧性评估模型案例分析

## 3.1 案例描述

将第2节提出的韧性动态评估模型应用于成品油油库的抗震韧性。该油库由16个储罐(T1—T16)组成,油品全部为汽油,油库的布局如图2所示。油库TER的均值为15 min,方差为5 min。一旦发生事故导致储罐受损,事故调查时间( $t_2-t_3$ )为30天,为恢复储罐做准备。恢复阶段,依据储罐容积从大到小重建受损储罐。



图2 油库储罐布局

Fig. 2 Layout of oil storage tanks in oil depots

## 3.2 油库韧性结果分析

采用动态蒙特卡罗算法随机动态模拟案例油库的韧性,迭代次数 $N$ 设置为 $10^5$ 次,共形成 $10^5$ 个灾害演化场景,每个场景都存在一个韧性值。通过对这些韧性值排序,获得韧性最小值、均值以及最大值。韧性最大值、均值、最小值对应的灾害演化场景(3条曲线)如图3所示。由此得到目标油库抗震韧性 $R$ (均值)为0.97、最大值为1、最小值为0.449 1。油库韧性(0.97)较强,因为油库离地震带的距离较远,地震对油库的冲击较小。韧性的最大值和最小值之间存在明显差距,韧性的随机特性不能忽视。在韧性均值对应灾害场景下,地震导致储罐(T6)立即失效,在随后的升级阶段中,储罐(T5、T7、T9)受损。

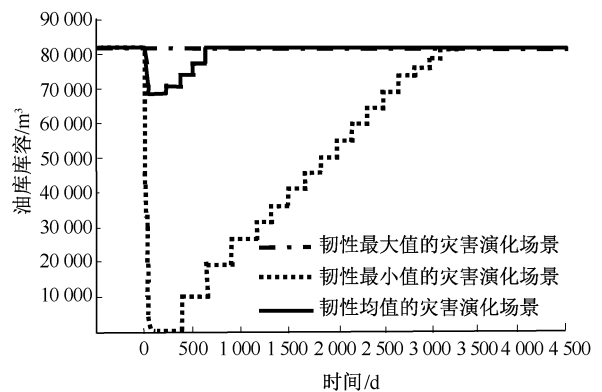


图3 地震灾害下油库的灾害演化场景

Fig. 3 Disaster evolution scenarios of oil depots in case of earthquakes

## 3.3 韧性评估模型参数分析

1) 多米诺效应对油库韧性的影响。韧性最小值的灾害演化场景分析多米诺效应效果更显著。如果不考虑多米诺效应,韧性最小值将从0.449 1增

加到 0.784 1。多米诺效应对灾害场景演化的影响如图 4 所示。演化过程中实线常高于虚线,表明多米诺效应对油库韧性的影响较明显,忽略多米诺效应,油库的韧性可能被高估。

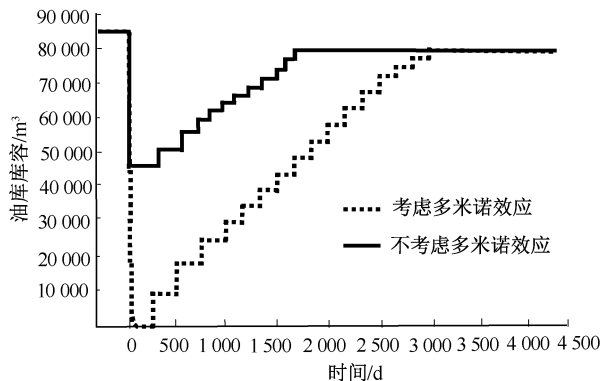


图 4 多米诺效应对地震灾害下油库韧性的影响

Fig. 4 Influence of domino effects on oil depot resilience in case of earthquake

2) 应急响应对油库韧性的影响。应急响应措施可以有效防止多米诺效应,提高油库的安全性。应急响应参数  $\mu$  和  $\sigma^2$  对油库韧性的影响如图 5 所示, $\mu$  为减轻能力的关键参数,油库韧性随着  $\mu$  的增加而明显降低,但  $\sigma^2$  对油库韧性的影响并不明显。因此,缩短应急响应时间,可有效减小油库储存性能损失,提高油库抗震韧性值。

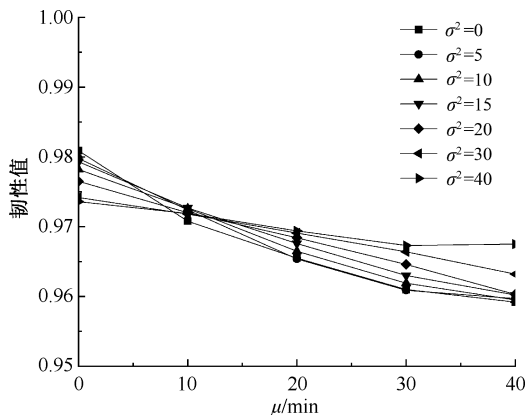


图 5 应急响应对油库韧性的影响

Fig. 5 Influence of emergency response on oil depot resilience

3) 距离与滑移率对油库抗震韧性的影响。油库和震源的距离  $D$  与滑移率  $\delta$  均对地震灾害发生概率有显著影响,从而间接影响油库的韧性。油库离震源的  $D$  越远, $\delta$  越小,受地震灾害的影响概率越低,油库抗震韧性越强,如图 6 所示。

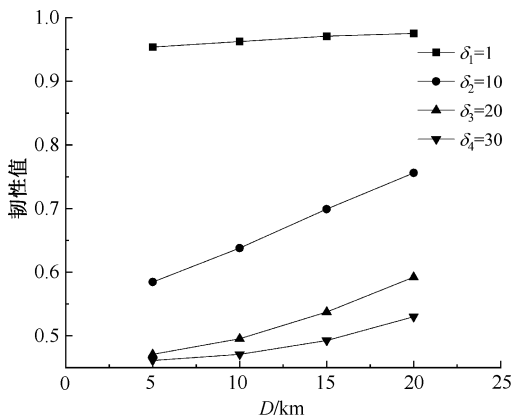


图 6  $D$  与  $\delta$  对油库韧性的影响

Fig. 6 Influence of distance and slip rate on oil depot resilience

随着油库与震源的  $D$  越来越远, $\delta$  的减小,油库的抗震韧性值不断增大。因此,油库建设时,选址应远离  $\delta$  大的活动断层,以增强韧性。

## 4 结论

1) 由于韧性的不确定性,不同灾害演化场景对应的韧性值可能出现大幅变化,油库抗震韧性中的不确定性不容忽视。此外,由于油库危险源集中,多米诺效应对油库的抗震韧性影响非常明显,忽略多米诺效应会高估油库抗震韧性。

2) 油库与震源的距离  $D$  越远,活动断层的滑移率  $\delta$  越小,油库的抗震韧性值越高。因此,油库与震源的  $D$  以及活动断层的  $\delta$ ,对油库抗震韧性的影响不可忽视。

3) 油库的抗震韧性主要取决于地震的强度和油库抵御地震破坏、减轻地震次生灾害、适应震后环境和震后快速恢复的能力。提高油库的抗震韧性措施包括油库选址时远离活动断层、及时预测地震危害以及减少应急响应的到达时间。

## 参考文献

[1] 王红蕾,朱宏,毛国良,等.地震预警数据流监控与分析[J].震灾防御技术,2023,18(2):389-397.  
WANG Honglei, ZHU Hong, MAO Guoliang, et al. Data flow monitoring and analysis of earthquake early warning system[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2023, 18(2): 389-397.

[2] 郝进锋,高小波,孙建刚,等.大型立式石油储罐考虑桩土作用地震响应分析[J].沈阳建筑大学学报:自然科学版,2018,34(3):430-438.

- HAO Jinfeng, GAO Xiaobo, SUN Jiangan, et al. Seismic response analysis of large vertical oil storage tank considering pile-soil interaction[J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science*, 2018, 34(3): 430-438.
- [3] HOLLING C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4(1): 1-23.
- [4] DOORN N, GARDONI P, MURPHY C. A multidisciplinary definition and evaluation of resilience: the role of social justice in defining resilience[J]. *Sustainable and Resilient Infrastructure*, 2019, 4(3): 112-123.
- [5] AVEN T. How some types of risk assessments can support resilience analysis and management [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2017, 167: 536-543.
- [6] 黄浪, 吴超, 杨冕, 等. 韧性理论在安全科学领域中的应用[J]. *中国安全科学学报*, 2017, 27(3): 1-6.  
HUANG Lang, WU Chao, YANG Mian, et al. Application of resilience theory in field of safety science[J]. *China Safety Science Journal*, 2017, 27(3): 1-6.
- [7] 李鑫, 阳富强, 洪溢都, 等. 流水线作业疲劳安全韧性模型及应用[J]. *中国安全科学学报*, 2022, 32(9): 200-205.  
LI Xin, YANG Fuqiang, HONG Yidu, et al. Fatigue safety resilience model of assembly line work and its application [J]. *China Safety Science Journal*, 2022, 32(9): 200-205.
- [8] HOSSEINI S, BARKER K. Modeling infrastructure resilience using Bayesian networks: a case study of inland waterway ports[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2016, 93: 252-266.
- [9] 袁必和, 杨家祺, 罗欣昱, 等. 基于模糊物元的化工园区安全韧性评估方法[J]. *安全与环境学报*, 2023, 23(8): 2 624-2 629.  
YUAN Bihe, YANG Jiaqi, LUO Xinyu, et al. Evaluation method of safety resilience of chemical industry park based on fuzzy matter element[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2023, 23(8): 2 624-2 629.
- [10] DINH L T T, PASMAN H, Gao Xiaodan, et al. Resilience engineering of industrial processes: principles and contributing factors[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2012, 25(2): 233-241.
- [11] LINKOV I, TRUMP B D, KEISLER J. Risk and resilience must be independently managed [J]. *Nature*, 2018, 555(30): DOI: 10.1038/d41586-018-02567-0.
- [12] CHEN Chao, YANG Ming, RENIERS G. A dynamic stochastic methodology for quantifying HAZMAT storage resilience[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2021, 215: DOI:10.1016/j.ress.2021.107909.
- [13] SHARMA N, TABANDEH A, GARDONI P. Regional resilience analysis: a multiscale approach to optimize the resilience of interdependent infrastructure[J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2020, 35(12): 1 315-1 330.
- [14] ANBAZHAGAN P, KUMAR A, SITHARAM T. Ground motion prediction equation considering combined dataset of recorded and simulated ground motions[J]. *Soil Dynamics Earthquake Engineering*, 2013, 53: 92-108.
- [15] EBRAHIMIAN H, JALAYER F, FORTE G, et al. Site-specific probabilistic seismic hazard analysis for the western area of Naples, Italy[J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2019, 17: 4 743-4 796.
- [16] HUANG Kongxing, CHEN Guohua, YANG Yunfeng, et al. An innovative quantitative analysis methodology for Natech events triggered by earthquakes in chemical tank farms [J]. *Safety Science*, 2020, 128: DOI: 10.1016/j.ssci.2020.104744.
- [17] SALZANO E, IERVOLINO I, FABBROCINO G. Seismic risk of atmospheric storage tanks in the framework of quantitative risk analysis[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2003, 16(5): 403-409.
- [18] CHEN Chao, RENIERS G, ZHANG Laobing. An innovative methodology for quickly modeling the spatial-temporal evolution of domino accidents triggered by fire[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2018, 54: 312-324.
- [19] YOUNESI A, SHAYEGHI H, SAFARI A, et al. Assessing the resilience of multi microgrid based widespread power systems against natural disasters using Monte Carlo Simulation [J]. *Energy*, 2020, 207: DOI: 10.1016/j.energy.2020.118220.

作者简介: 陈超 (1991—),男,四川广安人,博士,教授,主要从事油气及新能源储运系统安全韧性与完整性管理等方面的研究。E-mail:chenchaoswpu@gmail.com。

