

张立新.地震次生火灾研究进展[J].地震工程学报,2020,42(6):1693-1699.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.06.1693
ZHANG Lixin,Advances in Research on Post-earthquake Fires[J].China Earthquake Engineering Journal,2020,42(6):1693-1699.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.06.1693

地震次生火灾研究进展

张立新

(北方民族大学土木工程学院,宁夏 银川 750021)

摘要: 由于双重灾种叠加,地震次生火灾曾经带来过巨大生命财产损失,并始终严重威胁人类社会。梳理历史上几次重大地震次生火灾情况,归纳地震次生火灾的成灾与蔓延研究成果,讨论现有研究成果中常用的分析手段和研究方法;从工程结构和装备设施,以及灾害区划单元两个层面总结分析了地震次生火灾的风险与损失评估研究成果;从民用建筑、油气化工设施、核电站、灾后安置点与林业等多个方面探讨地震次生火灾的预防和控制研究进展。采用文献计量学方法对近二十年以“地震次生火灾”为主题的中文文献进行统计,并分析研究热度与地震事件的联系。

关键词: 地震次生火灾;地震;火灾;进展;综述

中图分类号: P315.9; TU375.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2020)06-1693-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.06.1693

Advances in Research on Post-earthquake Fires

ZHANG Lixin

(School of Civil Engineering, North Minzu University, Yinchuan 750021, Ningxia, China)

Abstract: Due to the superposition of double disasters, post-earthquake fires cause massive loss of life and property and pose serious threats to human life. In this paper, we review the history of secondary fires associated with several major earthquakes. We summarize the occurrence and spread of post-earthquake secondary fires, and discuss the analysis and research methods most commonly used to study them. We also summarize and analyze evaluations of the risks and losses associated with post-earthquake secondary fires. Recent advances in the prevention and control of these secondary fires are discussed with respect to civil buildings, oil and gas chemical facilities, nuclear power plants, post-disaster resettlement sites, and forestry. We used the bibliometric method to search for entries in the CNKI database in the past two decades related to the theme “secondary earthquake fire,” and analyzed the relationship between heat and earthquake events.

Keywords: post-earthquake fire; earthquake; fire disaster; advance; review

0 引言

地震是一种常见且有危害巨大的自然灾害,全球范围内每年约发生 500 多万次地震,由于其突发

性强、成灾广泛、社会经济损失巨大始终是学界研究热点。然而,地震造成的直接破坏并非震害全部,其所引起的次生灾害往往会带来更大损失。

随着震害调查研究的深入,地震次生火灾逐渐

收稿日期:2019-05-16

基金项目:宁夏回族自治区重点研发计划(2018BDE02049, 2018BEG03009);北方民族大学重点科研项目(2019KJ30)

第一作者简介:张立新(1979—),男,博士,副教授,主要从事水资源高效利用与边坡稳定性研究。E-mail:zhanglixin2014@163.com。

受到广泛关注。1906 年美国旧金山地震和 1923 年日本东京地震的次生火灾被认为是人类历史上和平时期最大的火灾^[1],其中,1906 年旧金山 8.3 级地震造成 3 000 多人丧生,28 000 余栋建筑物损毁,25 万余人流离失所,调查显示全部损失的 80% 源自震后持续了三天的火灾。1923 年东京 7.9 级地震造成 14 万人丧生,约 45 万间房屋被毁,而次生火灾损失

几乎占了全部损失的 77%。1994 年美国加利福尼亚州北岭大地震引发大约 30 至 50 场大火,所幸消防系统受损较轻且消防部门反应迅速,才使得火灾而造成的损失相对较小。此外,1995 年日本神户大地震引发次生火灾 142 起;1999 年土耳其地震则引发炼油厂火灾;1999 年台湾省集集大地震引发次生火灾 161 起^[2-3]。图 1 所示为地震次生火灾情况。



(a) 孤神地震次生火灾



(b) 旧金山地震次生火灾

图 1 地震次生火灾

Fig.1 Post-earthquake fires disaster

无论是人口密集的城区还是植被茂密的村镇,地震次生火灾都不容忽视。系统研究地震次生火灾的成灾与蔓延,风险与损失评估以及预防和控制等研究成果,将有助于决策者制定科学合理的防震减灾应急预案,控制次生火灾发生频度和范围,减轻地震及其次生火灾损失。

1 地震次生火灾的成灾与蔓延

大量震害调查资料显示^[4],地震次生火灾的成灾通常受到多个复杂因素共同影响,例如结构类型与建筑材料、建造年代、使用功能、防火隔断设计、消防系统工作性能,风向风速等气象条件,以及高层建筑烟囱效应燃烧方式等。日本和美国民宅多为底层木结构建筑,其所用维护结果也多为塑料板和绝缘板等可燃材料,而且木结构连接方式以及加热器和壁炉等都是地震次生火灾的隐患^[1]。

目前,研究地震次生火灾成灾与蔓延机制以数值模拟方法为主。许镇等^[5]提出基于建筑信息模型和美国下一代性能评估方法 FEMAP-58 的地震次生火灾模拟方法,该方法可以模拟多种火源自然熄灭时各场景烟气扩散情况,可以为地震次生火灾中人员安全疏散路径和方案的设计提供参考。孟晓静等^[6]针对城市危险源对地震次生火灾不利影响问题,利用基于元胞自动机的城区火灾蔓延概率模型。

谢旭阳等^[7]提出了基于惠更斯原理的地震次生火灾动态蔓延模拟方法,并开发了基于地理信息系统的城市地震次生火灾动态蔓延模拟系统,从而实现对单个或多个起火点动态蔓延过程的模拟。顾一波等^[8]通过构建贝叶斯网络分析了地震引起建筑物燃气管道泄露次生灾害,确定结构属性和地震烈度是影响结构破坏程度的主要因素,而气象条件会显著影响燃起扩散所引发的二次灾害。由此可见,地震次生火灾的发生及蔓延除了受到结构自身特性的影响,还气象条件的影响不可忽视。合理设置道路、公园等阻火单元阻火单元,不仅有助于火灾发生时消防部门开展灭火工作,而且,即使缺少消防灭火条件下,对于延缓火灾蔓延仍然具有一定有利作用。

地震次生火灾成灾与蔓延机制极其复杂,基于某一特定理论模型的数值模拟计算不可避免存在一定局限性,因此,探索更为全面的理论模型就十分必要了。Anderson D 等^[9]拟合了广义线性模型,广义加性模型和增强回归树三种模型,对日本地震地面运动和海啸泛滥引起的火灾的数量和地理分布进行预测。钟江荣等^[10]综合石化系统储罐、附属连接设施、供电系统地震破坏程度,以及地震碰撞火花等因素,提出了用于储罐地震次生火灾分析的故障树模型。Himoto K^[11]针对地震次生火灾源数据稀缺而造成模型不确定性问题,在无差别收集震中现场数

据的基础上,将分层贝叶斯方法引入地震后着火概率估计,有效提高了计算可靠性和稳定性。魏文晖等^[12]在单体建筑火灾概率模型基础上,通过引入燃气设备破坏等级对火灾影响概率系数,建立了燃气系统地震次生火灾概率模型,并对武汉市燃气系统的火灾概率进行验证和分析。柳春光等^[13]建立了基于元胞自动机的城市地震次生火灾蔓延模型,以某小区为分析模型进行火灾蔓延模拟,发现如道路、公园等均为重要阻火单元,而且气象条件对火灾蔓延影响显著。

有关地震次生火灾的成灾与蔓延的研究成果,现阶段主要集中于将其他领域成熟分析手段和研究方法改进和引入,而且鲜有关于定量分析的研究成果。总体来看,该领域研究成果较为分散,尚未形成科学体系。

2 地震次生火灾风险及损失评估

灾害评估主要包括灾前风险评估和灾后损失评估。其中,灾前风险评估是消灭风险源、制定灾害防控和应急预案的重要依据,灾后损失评估则是灾后救援和重建的主要参考。针对地震次生火灾的研究,现有研究成果可以大体划分为具体工程结构和装备设施,以及灾害区划单元两个层面的风险和损失评估。

在具体工程结构和装备设施层面,陈适才等^[14]将结构地震损伤与热传导分析、热力分析相结合,实现了结构受地震次生火灾作用研究,结果表明,地震作用后结构的火灾破坏形态将发生改变,而且结构耐火极限受地震强度影响。Vitorino H 等^[15]针对地震作用对钢筋混凝土构件耐火性能破坏问题,通过数值仿真分析发现地震作用将造成钢筋混凝土结构防火性受损。肖科^[16]认为保护层对剪力墙变形、承载力和耐火性能具有显著影响,楼板对剪力墙提供的平面外约束作用可以有效降低此类影响。魏利军等^[17]则针对储罐地震损伤问题,通过建立地震动强度与储罐损伤概率关系,提出了基于 Probit-Bayes 方法对储罐易损性进行计算的方法。Suwondo R^[18]研究了地震次生火灾中隔热层板对受保护横梁影响,发现增加隔热层板的厚度以及提高防火等级可以有效增强整个建筑物的耐火性。

作为地震次生火灾中的首要灾害,地震强度对结构损失具有重要影响,因此,提高结构抗震性能是控制灾害损失的首要环节。次生火灾则可能造成比地震更为严重的损失,提高消防系统可靠性,确保其

在地震过后仍能正常运行,是防止灾害损失扩大重要保障。

与地震次生火灾对具体工程结构和装备设施服役性能造成破坏相比,不少学者更加关注地震次生火灾所造成的宏观损失。余世丹等^[19]基于灾害链理论建立了基于主要影响因素的地震灾害链物理模型,分析了地震次生灾害的发生概率,并在此基础上探讨了断链减灾方法实施方法。与灾害链理论相似,魏利军等^[20]通过将事故链模型转化为贝叶斯网络的方法研究了化工园区地震次生灾害演化过程,分析了应急救援与地震次生灾害发生概率的关系;建议通过采取针对性处置措施从而在关键要素上遏制化工事故发生。韩晓飞等^[21]根据运城市中心城区次生火灾和爆炸危险源分布情况,对不同烈度地震所对应的潜在次生火灾数量和失火风险进行预测。Farshadmanesh P 等^[22]针对缺少早期地震次生火灾数据的地区风险难以预测的问题,提出了一种地震次生火灾易损性分析模型对住宅火灾失效加以量化。



图 2 地震灾害链中的“地震→火灾”环节^[19]

Fig.2 Links from earthquake to fire in the earthquake disaster chain^[19]

如前文所述,地震与次生火灾之间存在着极其复杂的非线性关系,而且次生火灾发生后,其所能造成的损失也会受到多种因素的影响,使得地震次生火灾一般呈现呈高斯分布或近似高斯分布。针对地震次生火灾这一特性,王飞等^[23]在蒙特卡洛随机模型基础上提出了随机模拟—三角模糊理论耦合模型,并采用专家意见法和层次分析法对各指标权重度量值进行评定,进而实现了地震次生火灾风险评估指标风险级别和重要性定量评价。郭惠^[24]基于民事火灾风险评估指标体系,结合地震次生火灾潜在火源、起火原因、影响因素以及消防系统特征等因素,运用专家调查法和层次分析法建立了城市地震火灾风险评价指标体系。然而,专家意见法(又称专家调查法)和层次分析法都存在定性分析较多且主观因素占比过大的缺点。对此,茹反反^[25]基于地震损失与影响因素的非线性映射关系,通过建立人工神经网络对城市地震次生火灾损失进行分析和预测。

除了普通民用建筑结构,油气化工产业由于其生产线多存在易燃物或可燃物,是地震次生火灾的重点防范领域。Omidvar B 等^[26]针对伊朗克曼沙赫市地下燃料管道系统潜在的地震次生火灾问题,采用蒙特卡洛模拟方法通过10 000次迭代计算确定了地震影响面积以及暴露于火灾和爆炸的房屋数量的概率分布函数,并使用修复率关系来估算管道损坏情况。柴永新等^[27]系统分析了国内外石化企业过去五十年储罐事故,针对地震次生火灾和爆炸,以及人员匆忙撤离导致生产设施失控事故,建议成立专门机构,改进石化企业防震技术。Li J^[28]以中国石化企业为研究对象,基于以前的地震火灾隐患模型,建立了企业地震风险评估模型,并采用地震损失预测评估方法,计算了各县地震后的预期火灾损失,并绘制了风险图,并指出北京—天津—唐山地区以及山东,江苏和浙江省为高风险地区。

油气化工产业生产工艺大都由多个串联工艺组成,其中任何一个环节发生火灾都极有可能引发连锁反应,并导致出现更多起火点甚至发生爆炸事件,进而造成更为惨重的人员伤亡和财产损失。然而,油气化工企业一旦出现火情,现场情况就会变得十分复杂。火灾与爆炸相互交织是其主要特点,而这一特点也为消防抢险工作的开展带来极大困难。从灾害链角度来看,首先应当增强此类企业生产设备的抗震防震能力,防止其因震受损或降低地震损伤程度都将有效降低次生火灾发生几率,因此,新材料、智能监测系统、新型减隔震技术的应用将可能成为一种新思路。

3 地震次生火灾预防和控制

将计算机和数值仿真技术应用于消防抢险将有助于消防人员及时了解结构布局。Lu X Z 等^[29]提出了一种基于建筑物信息模型和虚拟现实的室内震后火灾救援场景的仿真框架,使用所提出的方法建立消防救援场景对一家19层医院进行了案例研究。虚拟与现实场景实时交互有助于掌握现场火情,从而选择最佳救援路线。

对地震次生火灾及时扑救是避免火情扩散,降低灾害损失的最有效方法,而如何保证震后消防工作不受外界干扰并及时实施同样十分重要。陈艳华等^[30]在对比分析现有灾害区划单元的基础上,将地理信息系统图层叠加法应用于灾害区划单元的划分中,从而使灾害区划更为真实、准确。赵成帅^[31]在

系统分析城市次生火灾的成灾原因、时空分布及其危害的基础上,从应急处置和长远处置两个层面探讨了应对措施。姚伟等^[32]则从消防车辆分布优化配置角度探讨了避免救援延迟的方案,通过对沈阳市消防车辆配置进行分析,认为沈阳市消防车辆配置分布趋近合理,81.2%的建筑能够得到有效保护。Baser B^[33]针对燃料储罐地震次生火灾问题,通过研究多个彼此相邻的储罐及其潜在的失火多米诺效应案例,认为在9分钟内控制火情可以有效防止火灾散布至相邻储罐。

2011年东日本大地震中日本福岛核电站放射性物质泄露,对生态环境造成了不可修复的严重破坏,这次事件这也为我们敲响了警钟,必须万无一失避免地震及其次生灾害对核电站造成严重破坏。刘刚^[34]以福清3、4号机组核岛消防供水系统为试验对象,通过研究核岛消防供水系统应对地震次生灾害的响应能力,发现即使供水系统稳压装置失效,封闭环路核岛消防系统仍然可以提供稳定压力,确保核岛消防用水安全。吕雪峰等^[35]系统总结了核电站地震次生火灾的起火原因、影响因素和发展特点等火灾特性,并提出防控核电站次生火灾注意事项。

地震过后,除了需要采取及时有效的措施应对较短时期内出现的次生火灾,在时间相对较长的灾后重建期内同样需要进行火灾防控。黄勇^[36]结合芦山地震灾后重建和灾民安置消防需求,通过系统分析火灾隐患与消防管理问题,针对灾民过度安置点提出了火灾防控措施。宋晓勇^[37]在系统研究汶川地震灾区安置点潜在次生灾害的基础上,建议组团布置安置住房和设置防火单元,并提出采用水枪灭火、阻火和冷却实现迅速破拆的灭火战术。刘海燕等^[38]以汶川地震灾区安置点火灾事故案例为研究对象,在分析总结火灾事故教训的基础上提出了安置点消防工作需要坚守的原则。

除了以上民用建筑、油气化工产业、核电站和灾后安置点等人类活动相对密集的区域外,地震次生火灾对林业的破坏同样需要予以足够的关注。蒋岳新等^[39]针对四川省地震区域火灾多发的问题,建议基于现场山情、火情和社情综合分析采取科学扑救方法。

统筹规划消防力量,制定科学合理的应急预案,是防范地震次生火灾的第一步。采取及时有效的主动消防和被动消防措施,根据火灾现场具体情况采取灵活有效处置措施,是减轻地震次生火灾损失的

重要环节。

4 总结与讨论

采用文献计量学方法对中国知网数据库中以“地震次生火灾”为主题的中文文献进行统计,在 1982 年至 2019 年的 37 年中仅有 105 篇文献。在本世纪过去的二十年间共有相关文献 86 篇,从 2008 年以后文献数量有所增加,在 2011 年达到年文献数峰值 12 篇,如图 3 所示。分析可知与该年份相对应地震事件的分别是 2008 年汶川地震和 2011 年东日本地震,说明地震次生火灾问题在较大地震事件发生后关注度就会有所增加。

地震次生火灾涉及地震和火灾两种灾害议题,加之二者之间相互关系,及其成灾和蔓延机制、风险与损失评估等均存在极其复杂的非线性关系。多数学者倾向于尝试将其他领域分析手段和研究方法引入其中,而且现有成果大都研究尚处于定性分析阶段。从所搜集文献来看,该领域研究成果较为分散,尚未形成科学体系。

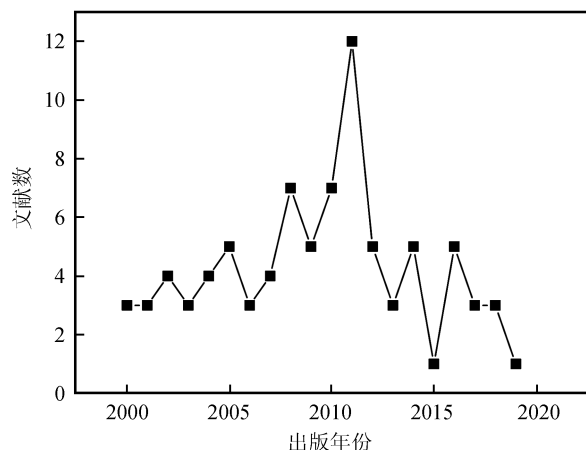


图 3 文献统计图

Fig.3 Literature statistics

地震次生火灾应当从具体工程结构和装备设施,以及灾害区划单元两个层次去着手防控。对于具体工程结构,在掌握不同形式结构地震次生火灾后其性能退化规律的基础上,针对各结构尤其是油气化工产业中重点防控结构的抗震和防火要求,综合制定不同损伤等级的定量指标,从而便于对其开展性能设计。对于灾害区划单元,则需根据各灾害区划单元具体属性进行危险源分类监管,加强定期巡查,保证区划单元内各建筑结构和装备设施的抗震和防火可靠完备。

参考文献 (References)

- [1] Engineering Earthquake Investigation Committee of the Technical Council of Lifeline Earthquake. Chile Earthquake of 2010 [M]. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2013.
- [2] TODD D R, CARINO N J, CHUNG R M, et al. 1994 Northridge Earthquake: Performance of Structures, Lifelines and Fire Protection Systems[R]. 1994. NIST Special Publication 862. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Md.
- [3] DANIELL J, SCHAEFER A, WENZEL F. Losses Associated with Secondary Effects in Earthquakes[J]. Frontiers in Built Environment, 2017, 3: 30.
- [4] HIMOTO K. Comparative Analysis of Post-Earthquake Fires in Japan from 1995 to 2017[J]. Fire Technology, 2019, 55(3): 935-961.
- [5] 许镇, 张宗才, 陆新征, 等. 基于 BIM 和 FEMAP-58 的建筑地震次生火灾模拟[J]. 消防科学与技术, 2018, 37(6): 745-749.
XU Zhen, ZHANG Zongcai, LU Xinzhen, et al. Building Post-earthquake Fire Simulation Based on BIM and FEMA P-58[J]. Fire Science and Technology, 2018, 37(6): 745-749.
- [6] 孟晓静, 杨立中. 城市危险源对地震次生火灾影响的计算机模拟[J]. 热科学与技术, 2009, 8(1): 90-94.
MENG Xiaojing, YANG Lizhong. Simulation of Effect of City Hazards on Post-earthquake Fire[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2009, 8(1): 90-94.
- [7] 谢旭阳, 任爱珠. 基于 GIS 的地震火灾动态蔓延模拟[J]. 中国工程科学, 2007, 9(8): 82-87.
XIE Xuyang, REN Aizhu. Dynamic Simulation of Fire Following Earthquake Based on GIS[J]. Engineering Sciences, 2007, 9(8): 82-87.
- [8] 顾一波, 霍宇芒. 基于贝叶斯网络的地震次生燃气管道泄漏事件链构建[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(7): 134-139.
GU Yibo, HUO Yumang. Construction of Event Chain for Secondary Gas Pipeline Leakage Induced by Earthquake Based on Bayesian Network[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016, 12(7): 134-139.
- [9] ANDERSON D, DAVIDSON R A, HIMOTO K, et al. Statistical Modeling of Fire Occurrence Using Data from the Tohoku, Japan Earthquake and Tsunami[J]. Risk Analysis, 2016, 36(2): 378-395.
- [10] 钟江荣, 赵振东, 于世舟. 故障树分析方法评估储油罐地震次生火灾[J]. 自然灾害学报, 2013, 22(6): 191-194.
ZHONG Jiangrong, ZHAO Zhendong, YU Shizhou. Estimation of Seismic Secondary Fires of Storage Tanks by Using Fault Tree Analysis[J]. Journal of Natural Disasters, 2013, 22(6): 191-194.
- [11] HIMOTO K. Hierarchical Bayesian Modeling of Post-Earthquake Ignition Probabilities Considering Inter-Earthquake Heterogeneity[J]. Risk Analysis, 2020, 40(6): 1124-1138.
- [12] 魏文晖, 周斌, 陈凯. 城市燃气系统地震次生火灾研究[J]. 武

- 汉理工大学学报,2011,33(10):100-103.
- WEI Wenhui,ZHOU Bin,CHEN Kai.Analysis of Secondary Earthquake Fire Disaster of City Gas System[J].Journal of Wuhan University of Technology,2011,33(10):100-103.
- [13] 柳春光,王碧君,潘建伟.基于元胞自动机的城市地震次生火灾蔓延模型[J].自然灾害学报,2010,19(1):152-157.
- LIU Chunguang,WANG Bijun,PAN Jianwei.Urban Post-earthquake Fire Spread Model Based on Cellular Automata[J].Journal of Natural Disasters,2010,19(1):152-157.
- [14] 陈适才,田小明,闫维明,等.建筑结构地震火灾效应分析方法[J].土木建筑与环境工程,2011,33(6):90-95,119.
- CHEN Shicai,TIAN Xiaoming,YAN Weiming,et al.A Preliminary Survey on Analysis Method of Building Structures under Post-Earthquake Fire[J].Journal of Civil,Architectural & Environmental Engineering,2011,33(6):90-95,119.
- [15] VITORINO H,RODRIGUES H,COUTO C.Evaluation of Post-earthquake Fire Capacity of Reinforced Concrete Elements[J].Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2020,128:105900.
- [16] 肖科.地震损伤对钢筋混凝土墙耐火性能的影响研究[J].消防科学与技术,2019,38(1):147.
- XIAO Ke.Study on the Effect of Earthquake Damage on the Fire Resistance of Reinforced Concrete Walls[J].Fire Science and Technology,2019,38(1):147.
- [17] 魏利军,王向阳,罗艾民,等.基于 Probit-Bayes 方法的储罐地震易损性研究[J].中国安全生产科学技术,2017,13(11):17-21.
- WEI Lijun,WANG Xiangyang,LUO (Ai|Yi)(Min),et al.Investigation on Seismic Vulnerability of Storage Tanks Based on Probit-Bayes Method[J].Journal of Safety Science and Technology,2017,13(11):17-21.
- [18] SUWONDO R,CUNNINGHAM L,GILLIE M,et al.Improving the Performance of Composite Floors Subjected to Post-earthquake Fire[J].Fire Safety Journal,2018,102:18-26.
- [19] 余世舟,张令心,赵振东,等.地震灾害链概率分析及断链减灾方法[J].土木工程学报,2010,43(增刊1):479-483.
- YU Shizhou,ZHANG Lingxin,ZHAO Zhendong,et al.Probability Analysis of Earthquake Disaster Chain and Chain-cutting Disaster Mitigation Method[J].China Civil Engineering Journal,2010,43(Suppl):479-483.
- [20] 魏利军,王向阳,罗艾民,等.基于贝叶斯网络的化工园区地震次生灾害情景分析[J].中国安全生产科学技术,2017,13(12):73-78.
- WEI Lijun,WANG Xiangyang,LUO (Ai|Yi)(Min),et al.Scenario Analysis on Secondary Disasters of Earthquake in Chemical Industry Park Based on Bayesian Network[J].Journal of Safety Science and Technology,2017,13(12):73-78.
- [21] 韩晓飞,曾金艳,李自红,等.运城市中心城区地震火灾灾害预测分析[J].消防科学与技术,2019,38(2):299-302.
- HAN Xiaofei,ZENG Jinyan,LI Zihong,et al.Prediction and Analysis of Earthquake Fire Disasters in the Central City of Yuncheng City[J].Fire Science and Technology,2019,38(2):299-302.
- [22] FARSHADMANESH P,MOHAMMADI J.A Probabilistic Methodology for Assessing Post-Earthquake Fire Ignition Vulnerability in Residential Buildings[J].Fire Technology,2019,55(4):1295-1318.
- [23] 王飞,张辉,王威,等.基于 SS-TFN 耦合模型的潜在地震次生火灾风险评估[J].科学技术与工程,2019,19(22):389-394.
- WANG Fei,ZHANG Hui,WANG Wei,et al.Risk Assessment of Potential Post-earthquake Fire Based on SS-TFN Coupling Model[J].Science Technology and Engineering,2019,19(22):389-394.
- [24] 郭惠.城市地震火灾风险评估指标体系研究[J].中国安全生产科学技术,2013,9(3):56-59.
- GUO Hui.City Fire Risk Assessment Index System of Earthquake[J].Journal of Safety Science and Technology,2013,9(3):56-59.
- [25] 茹反反.用人工神经网络预测城市地震火灾损失[J].自动化应用,2010(1):65-66.
- RU Fanfan.Forecasting of City Earthquake and Fire Damage with Artificial Neural Networks[J].Automation Application,2010(1):65-66.
- [26] OMIDVAR B,ESKANDARI M,PEYGHHALEH E.Seismic Damage to Urban Areas Due to Failed Buried Fuel Pipelines Case Study: Fire Following Earthquake in the City of Kermanshah,Iran[J].Natural Hazards,2013,67(2):169-192.
- [27] 柴永新,刘小辉,屈定荣,等.大型储罐的常见事故原因分析及防范对策研究[J].石油化工设备技术,2013,34(4):33-37,7.
- CHAI Yongxin,LIU Xiaohui,QU Dingrong,et al.Cause Analysis and Countermeasure Research on the Common Accidents of Large Storage Tanks[J].Petrochemical Equipment Technology,2013,34(4):33-37,7.
- [28] LI J,WANG Y,CHEN H,et al.Risk Assessment Study of Fire Following an Earthquake:a Case Study of Petrochemical Enterprises in China[J].Natural Hazards and Earth System Sciences,2013,14(4):891-900.
- [29] LU X Z,YANG Z B,XU Z,et al.Scenario Simulation of Indoor Post-earthquake Fire Rescue Based on Building Information Model and Virtual Reality[J].Advances in Engineering Software,2020,143:102792.
- [30] 陈艳华,张琳.基于 GIS 的图层叠加法在地震次生火灾区划单元中的应用[J].河北联合大学学报(自然科学版),2014,36(2):124-128.
- CHEN Yanhua,ZHANG Lin.Application of Overlapping Layer Method on Regionalizing Units of Post-earthquake Fire Based on GIS[J].Journal of Hebei United University (Natural Science Edition),2014,36(2):124-128.
- [31] 赵成帅.城市地震次生火灾分析及处置对策[J].防灾科技学院学报,2010,12(1):30-35.

ZHAO Chengshuai. Urban Fires Analysis and Firefighting Activities during Earthquakes[J].Journal of Institute of Disaster-Prevention Science and Technology,2010,12(1):30-35.

[32] 姚伟,柴琨皓.地震次生火灾扑救力量评估及优化[J].消防科学与技术,2010,29(7):613-617.

YAO Wei, CHAI Kunhao. Assessment and Optimization of Post-earthquake Fire Fighting Power[J]. Fire Science and Technology,2010,29(7):613-617.

[33] BASER B, BEHNAM B. An Emergency Response Plan for Cascading Post-earthquake Fires in Fuel Storage Facilities [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2020,65:104155.

[34] 刘刚.核电厂地震工况下核岛消防供水系统火灾响应能力研究[J].给水排水,2016,42(增刊2):52-55.

LIU Gang.Study on the Fire Response Capability of Nuclear Island Fire Water Supply System under Earthquake Conditions [J]. Water & Wastewater Engineering, 2016, 42 (supp2):52-55.

[35] 吕雪峰,张鑫.核电站地震次生火灾的扑救与防护[J].中国核电,2011,4(4):372-375.

LÜ Xuefeng, ZHANG Xin. Fighting and Preventing Post-earthquake Fires in Nuclear Power Plant[J].China Nuclear Power,2011,4(4):372-375.

[36] 黄勇.地震灾区灾民过渡安置点火灾防控对策[J].消防科学与技术,2013,32(9):1042-1044.

HUANG Yong. Fire Prevention Countermeasures in Earthquake Transitional Settlements[J].Fire Science and Technology,2013,32(9):1042-1044.

[37] 宋晓勇.汶川地震灾区安置点的防灾研究[J].消防科学与技术,2010,29(12):1058-1064.

SONG Xiaoyong. Disaster Prevention of Settlements of the Wenchuan Earthquake Hit Area[J].Fire Science and Technology,2010,29(12):1058-1064.

[38] 刘海燕,蒲远祥.由汶川地震灾区安置点“3·29”火灾引发的思考[J].消防科学与技术,2009,28(10):788-790.

LIU Haiyan, PU Yuanxiang. Thought about “3·29” Fire of Makeshift Sites Occurred in Wenchuan Earthquake Areas[J]. Fire Science and Technology,2009,28(10):788-790.

[39] 蒋岳新,舒立福,王秋华.四川省地震灾区森林火灾特点及防火对策[J].森林防火,2009(1):22-25.

JIANG Yuexin, SHU Lifu, WANG Qiuhua. Forest Fire Characteristics and Fire Prevention Countermeasures in Sichuan Earthquake Disaster Area[J].Forest Fire Prevention,2009 (1):22-25.