

刘严萍, 何继新. 设施韧性评估国内外研究现状及未来研究方向[J]. 灾害学, 2021, 36(3): 153–159. [LIU Yanping and HE Jixin. Review on Infrastructure Resilience Assessment and Future Direction[J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(3): 153–159. doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2021.03.026.]

设施韧性评估国内外研究现状及未来研究方向^{*}

刘严萍, 何继新

(天津城建大学 经济与管理学院, 天津 300384)

摘 要: 设施韧性评估最初源于地震工程学领域, 当定性研究不能满足现实中的韧性评估需求时, 量化研究随之兴起与发展。随着评估技术侧重点不同、研究对象着眼点不同、提升路径设计出发点不同, 该领域研究成果形成了不同分支。围绕功能时间曲线、空间信息技术、建模仿真及智能支撑技术开展研究方法梳理; 从单体设施和关联设施视角开展不同研究对象的相关文献梳理; 从全生命周期、关联协同、标准建设等角度开展改进路径相关文献梳理。研究发现, 该领域研究还存在一定空间: 侧重供给角度研究, 实际需求角度研究有待拓展; 偏重单体设施研究, 集成化视角研究有待丰富; 侧重理论研究, 实证研究有待深入。治理需求导向的设施韧性综合评估模型研究, 问题导向的理论研究和实证研究融合, 韧性引领下在建、已建、新建设施系统性评估, 将丰富和发展设施韧性研究理论创新和知识体系。

关键词: 设施; 韧性; 韧性评估; 研究综述

中图分类号: X43; X915.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2021)03–0153–07

doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2021.03.026

随着传感器、网关、处理器等智能技术的发展, 设施变得越来越智能和高效, 设施之间的关联日益复杂, 设施级联效应日趋明显。人们逐步认识到并不是所有风险均可预测, 韧性思维指导设施规划、设计、建设、运维全过程, 提升设施整体韧性方面发挥重要作用。尤其是关键基础设施, 其任何中断都可能引起重大的经济、社会、公众健康、安全 and 环境影响, 必须保持高度可靠性和安全性。关键基础设施韧性发展被纳入了联合国可持续发展议程^[1]。有必要对国内外设施韧性评估相关研究成果进行详尽回顾, 以概括已有研究成就, 明确未来研究方向, 为今后理论研究和政策实践提供参考。设施韧性评估研究发展迅速, 大量作者、机构的文献信息奠定了该领域的基础。总体而言, 该领域研究经历了设施承灾能力评估、脆弱性评估和韧性评估三个发展阶段。其中, 在韧性评估阶段, 该领域研究经历了从静态量化评估到围绕功能时间曲线、空间信息技术、建模仿真与智能支撑技术等主题焦点演变的动态量化评估这一发展过程。在此基础上, 不同学者开展了设施韧性提升路径研究, 以促进和彰显设施韧性评估模型的应用价值, 这标志着设施韧性研究从碎片化研究向着系统性研究方向迈进。

1 设施韧性相关概念内涵的界定

1.1 韧性内涵的界定

生态学、材料科学、心理学、经济学、社会学和工程等不同学科对韧性的理解和表述有所不同。他们共性的部分可以概括为: 韧性是在给定破坏性事件或事件集情境下, 系统更改控制变量和结构之前吸收干扰^[1], 性能短暂中断、衰减或损失, 在一个可接受水平上运行并通过适应动荡环境而恢复和成长的能力^[2]。涵盖组织韧性、社会韧性、经济韧性(静态经济韧性、动态经济韧性)和工程韧性^[3–7]。韧性强调评估系统预测和吸收潜在的中断、发展适应方法以适应系统内或系统周围的变化、建立反应能力以经受住破坏、尽快恢复^[8]。

1.2 设施系统及其韧性内涵的界定

对设施内涵狭义上的界定, 是指为顺利进行各种经济活动和其他社会活动而建设的各类设施的总称, 涵盖电力系统、供水系统、石油和天然气系统、通信系统、交通系统等实体性设施系统, 以及涵盖银行金融系统、教育系统、医疗系统、

^{*} 收稿日期: 2020–12–07

修回日期: 2021–02–26

基金项目: 天津市住房城乡建设领域课题(ZTCC–2004128–GP28)

第一作者简介: 刘严萍(1979–), 女, 汉族, 河南汝南人, 博士, 讲师, 主要从事城市安全与应急管理研究。

E-mail: liuxiaoy@126.com

政府服务系统等社会性设施系统。对设施内涵广义上的界定,可以表述为:不论物理的或是虚拟的,一旦其功能失能或遭到破坏,将削弱国家安全、经济安全、国家公共卫生安全或以上安全的任何系统组合。设施韧性是指设施预防和承受生命周期中各类扰动、吸收初始损坏、扰动后维护核心功能,控制性能下降,恢复正常运行状态的能力,蕴含一个基于不断增强系统预防、吸收、恢复和适应突发扰动的循环过程。设施韧性是设施内在属性,设施结构决定了与性能相关的属性(如鲁棒性、适应性、冗余性),而维护资源决定了与时间相关的属性(如即可修复性、可恢复性、快速性)。衡量设施韧性不仅需要对设施结构特性和运行过程有全面了解,也需对不确定因素全面考虑,因此设施韧性逐步引入适应性、灵活性作为其关键属性^[9-15]。

2 设施韧性评估研究

2.1 设施韧性评估研究方法

2.1.1 定性研究

(1)指标与框架研究。韧性评估定性研究着眼于构建涵盖韧性基础概念与原则的理论体系框架^[16-17]。基于复杂性、特殊性、充分性、公正性和专门知识等指标遴选原则,设施韧性指标选取应兼顾以下方面:设施环境所蕴含风险的辨识与评估;设施关键组件的识别;设施规划、设计、建设过程的可靠性、运营阶段设施对潜在扰动的响应能力、操作规范和资源要求及标准^[18-21]。CHANG E S^[22]在 BRUNEAU M^[16]研究成果的基础上,将损失的绝对水平和系统恢复的持续时间视为韧性指标,提出适用于地震作用下各类设施韧性评估方法。

(2)半定量研究。半定量分析准确性比定量分析稍差,其特点是简单、迅速、费用低。目前设施韧性半定量研究多采用李克特量表、德尔菲法等。2009年美国国土安全部使用基础设施调查工具收集数据,用于确定关键基础设施安全差距,通过规划、培训等改善关键基础设施安全性^[23]。FISHER R E等^[24-25]开发保护性措施指数(Protective Measures Indices, PMI)以确定单体设施保护措施状况“最薄弱环节”。2012年, PETIT F D等^[26]在整合业务连续性概念和关键基础设施关联关系基础上,开发新版本韧性测量指数(Resilience Measurement Index, RMI),并将关键基础设施韧性组成部分分为防备、缓解措施、应对能力和恢复机制四方面。

2.1.2 定量研究

量化研究以其从系统局部到整体、从物理系统到复杂系统、从现状到未来的描述能力,逐步

在设施韧性评估研究领域展现优势^[27]。起初,韧性多采用静态量来衡量,如基于静态贝叶斯网络构建的设施韧性评估模型^[6]; LI Y^[28]所提出的韧性指数公式,以系统故障和恢复可能性比率来度量韧性; ATTOH O N O等^[29]采用可置信函数改进该公式等。在不断的观察、分析和研究中,人们逐渐发现,服务需求和活动的变化常带来相关标准或准则的改动,新技术集成不断出现等,这些现象容易导致设施系统抵抗、吸收和恢复能力产生变化,却无法通过静态分析捕获,需要开发新方法来分析韧性演化和非线性过程。FRANCIS R^[8]首先提出韧性动态评估思想。

(1)基于功能时间曲线的评估。韧性可表示为系统功能曲线与横纵坐标轴所围成的面积,系统恢复过程分为线性恢复型、指数恢复型和三角函数恢复型。一些学者基于非线性损失函数和恢复函数尝试克服损失估计模型面临的数据整合难题^[22,30]。将功能时间曲线细分为灾害预防期、损失累积期和评估恢复期,进行多灾害情景耦合下的设施韧性评估^[31]。一些学者基于系统功能时间曲线,从系统鲁棒性、冗余性、恢复性等韧性特征出发,对设施韧性进行评估^[16,32]。

(2)空间信息技术融合建模。不同类型的空间信息技术逐步应用于设施韧性评估研究。基于图论工具和 GPS 技术,对设施结构性缺陷、网络连通性不足和空间分布风险开展集合测度^[33-34],针对飓风灾害的网络设施系统韧性评估^[35]。在对软硬基础设施韧性描述性统计分析的基础上,利用空间关联方法的局部指标识别集群中弱韧性区域,通过对设施韧性和风险水平比较分析的基础上,确定突发事件发生时可能遭受重大损失的区域^[36]。

(3)建模仿真与智能支撑技术下的设施韧性评估。模拟不同极端事件情境中设施性能的方法模型主要有:基于模糊数学的关联基础设施韧性评估^[37];基于 agent 的建模^[38];基于蒙特卡罗模拟评估洪水期间能源、供水和废水等关联基础设施韧性^[39],交通设施韧性灾前准备和灾后恢复阶段韧性的多重量化度量^[40];由场景树生成算法捕获随机故障,由最小成本流模拟网络流再分配与运维资源优化配置,评估暴露于不同级别突发事件下地铁和电力设施的韧性^[41];基于情景模拟评估城市绿色和灰色排水设施韧性^[42]。

数据挖掘技术应用于关键基础设施关联分析(critical infrastructure interdependency, CII)领域,展示了其处理复杂基础设施数据的能力。广义连续模式算法(generalized sequential pattern, GSP)可用于提取关键基础设施故障记录中基于序列的 CII 知识,生成故障事件顺序模式^[43]。采用因果贝叶斯网络和 RFID 技术,从吸收能力、适应能力和恢复能力方面对市政设施、人、车辆仪表和网络信

息之间复杂交互过程进行韧性评估建模,研究结果表明底层 CBN 模型效果与 RFID 数据较为契合^[44]。

2.2 不同研究对象下的设施韧性评估

2.2.1 单体设施韧性评估

从研究对象而言,以上研究大多是侧重于单体设施在某类或几类扰动事件场景下的韧性评估。在如此丰硕的模型基础上,学者们开始从适用性角度出发,探索模型简化。韧性导向的风险管理理念使得管理者需要全面分析与基础设施响应相关的所有不确定性来源。在此背景下,概率韧性量化框架被开发,并在一个简化系统上验证其适用性^[45]。

2.2.2 关联视角下的设施韧性评估相关研究

(1)关联设施韧性评估。对于关联设施韧性评估而言,梳理清楚依存关系是首要问题,其次才是评估模型的建立。研究表明,设施关联关系可分为物理、网络、地理和逻辑四类。其中逻辑关联依赖于无形的链接,使用标准数据收集和调查方法无法检测。为此,一些学者提出建立统一的记录机制进行跨设施系统故障的记录归档,以研究相互关系的实现过程^[43,46-47]。根据事故报告建立相关数据库,识别频繁和重要的故障模式,有助于分析设施依存关系^[27]。在此基础上,学者们提出了各种关联设施韧性评估的模型,如以设施中断客户端占比表征设施系统脆弱性,用投入产出模型表征设施关联性,而建立的基于设施机能曲线的设施韧性评估模型^[48];用于识别和绘制关联设施网络漏洞的综合韧性评估模型^[49];基于有偏 PageRank 算法和多层加权有向网络的关联设施韧性评估模型^[50-51]。一些学者进一步拓宽视野,把设施系统视为城市系统的子系统,在历史数据及精细城市结构模型支撑下,构建评估模型并拓展其应用^[52]。

(2)设施和社区结合视角下的设施韧性评估。基于社区和设施结合的视角,TOSE 框架提出韧性具备健壮性、冗余性、智能性和快速性特性,应从技术、组织、社会和经济四个相互关联的方面进行量化^[35]。PEOPLES 框架提出从人口统计、环境生态、政府服务、实体设施、经济发展和社会资本多维度量化韧性^[53]。一些学者提出综合考虑建筑、设施和开放空间等物理部分、社会组成部分(社区)、动态交互作用,对每个单独物理元素作概率脆弱性分析,探索衡量社区灾后恢复力的综合指数方法,并采用复杂网络方法开展韧性评估^[54-55]。

(3)设施与建筑群落结合视角下的设施韧性评估。建筑群落的功能需求依赖于生命线设施服务,对这一点的认识,使得该领域的研究逐步向着建筑群落和设施结合的视角侧重。近年来,该研究

领域出现了系列成果:ZHANG W 等提出用总恢复时间(total recovery time, TRT)和恢复轨迹偏移(skew of the recovery trajectory, SRT)指标衡量设施恢复速度和效率,并构建了用于灾前减灾优先级确定、灾后应急资源调配及长期恢复过程优化的分阶段韧性评价模型^[56]。方东平等将交通系统韧性评估、生命线系统韧性作为社区韧性的组成部分,开发了韧性评估系统应用示范软件平台^[57]。

(4)基础设施与经济系统结合的视角。随着美国国土安全政策从关键基础设施保护转向关键基础设施韧性,他们亟需一个统一框架以评估关键基础设施系统和依赖于这些系统的经济韧性。一个评估基础设施和经济系统韧性总体框架被创立,该框架涵盖:基础设施系统韧性定义;通过评估对系统性能的影响和恢复成本,建立一个定量模型用于衡量系统对破坏性事件的恢复能力等^[58]。

2.2.3 组件层次的设施韧性研究

不论是单体设施还是关联视角下的设施韧性评估,都是着眼于系统层面的。随着研究逐步深入,人们逐步认识到,组件的韧性决定了由其组成的关键基础设施子系统和系统的韧性,对此,一些学者开始着眼于组件层面探讨设施韧性。相关研究经历了从恢复阶段系统层面的关联关系研究与评估到组件层面韧性评估这一发展脉络^[46-47]。关键设施组件韧性评估(Critical Infrastructure Elements Resilience Assessment, CIERA)方法的创立,该方法提出评估程序由选择和描述被评估组件、识别和描述威胁、评估已确定各个组件韧性级别、提出改进措施等活动构成。该方法的优点是它允许评估活动在特定组件层次上进行^[18]。

3 设施韧性提升路径研究

不同领域学者对于如何改进韧性进行了相关研究。通过投资提高韧性规划,减少漏洞和增强可恢复性。通过优化设计,减少设施系统中断建模漏洞、提高可恢复性。随着人们对于设施全生命周期的认识不断深入,一些学者开始从负反馈循环视角改进规划、设计、建设和维护全过程。随着对于设施利益相关者在设施韧性中所发挥作用认识的深入,协同视角下的设施韧性提升研究也逐步开展开来。

3.1 基于设施全生命周期某环节或过程的视角

设施韧性评估结果应有利于指导韧性规划。灾害易发区的设施规划设计亟需改进,以减少突发扰动破坏下灾害要素的释放。设施规划设计阶段的韧性提升策略包括战略选址、类型配置、韧性评估路线设计、功能程序等的优化^[59]。设施运营阶段,设施系统灵活的资源整合能力与设施应急规划同等重要。通过给予不同利益群体优先访

问权,可有效维持设施服务或使其服务恢复更迅速,进而促进社区、城市层面生产生活秩序恢复。针对设施关键节点失效、设施系统网络破坏、响应、恢复等不同时间节点,设施管理者应采取不同韧性提升策略,确定优先干预的对象和策略^[2,60-63]。基于复杂适应系统理论,MONTGOMERY M 等提出从设施全生命周期视角进行提升路径设计,发展由因果交互的数据库,组成因果循环图,促进知识共享,提高干预效果,并基于负反馈循环改进设施规划、设计、建设和维护策略^[64]。

3.2 基于关联协同的视角

各级政府之间、公私部门间建立信息共享网络平台促进各方风险沟通,确保设施所遇到的潜在威胁得以及时、有效识别与处理。用于记录关于时间、操作性能的关键信息系统之间的依赖关系,及较少时间延迟统计量估计不同事件概率的方法被创立。用以评估单独的运营变化如何改变每个保护和恢复策略的成本,以及设施整体运营价值。通过支持平衡直接和间接损失的处理,提高基础设施韧性^[8]。

3.3 设施韧性管理标准研究

随着突发事件频率和规模增加,设施管理战略不仅要实现对设施系统功能中断的响应,还应减轻恢复成本和恢复时间。为此,除半量化的各类韧性指数以外^[23-26],欧洲联盟已经着手建立设施韧性管理标准。针对关键基础设施,CIR(Critical infrastructure resilience,简称 CIR)管理标准应以可测量性基础,具易于操作的特点,包括一些基本的、普遍认可的条目,便于设施利益相关各方理解从而统一设施韧性管理行动。为此,设施运营商需要增强量化数据积累,以便为设施韧性评估提供高质量数据^[65]。在 RESOLUTE 项目中,欧洲恢复力管理指南提出交通基础设施恢复能力评估操作工具,实证研究结果表明,通过使用适当工具进行持续监测,有助于及早发现漏洞,增强交通基础设施韧性^[66]。

4 研究述评

4.1 已有研究评估

综上所述,已有研究对设施韧性的内涵、评估框架、评估模型、改进路径等问题有了比较广泛的研究,这些研究为推进设施韧性改善提供了借鉴,为理论研究提供了方向。然而,已有研究是否触碰到设施韧性评估的“真实需求”?对政策、规范及管理方法的制定起到了多大影响?目前对这些问题尚未形成统一的认识。总体而言,已有研究尚存在以下不足:

(1)侧重供给角度,实际需求研究有待拓展。

大多数研究是从政府供给角度出发,对各个利益相关群体的实际需求关注不足。只有很少的研究者从需求方视角探讨了设施韧性提升路径设计。忽视对需求的考察,很容易导致设施韧性评估的建模脱离实际需要,使得设施韧性评估模型简化、可操作性方面与实际需要产生偏差,制约了理论研究成果价值的发挥。

(2)偏重单体设施,集成化视角研究有待丰富。早期研究侧重于比较设施受到干扰之前、期间和之后的系统性能表现,而没有关注系统结构。为捕获与设施系统性能表现相关的随机性,基于结构的设施韧性评估研究得以发展,并探索各种方法对设施系统特性进行建模仿真。随着研究不断深入,学者们对设施韧性的理解更为全面,开始着手从技术、组织、社会和经济四个关联因素角度量化韧性,从而使得设施韧性研究从单体设施向着设施和社区、建筑群的韧性评估方向集成化发展。随着物联网技术等智能支撑技术不断发展,设施韧性智能化评估研究也取得一定进展,但是建模所需资源的可得性、可操作性、结果的适用性有待进一步考证。

(3)侧重理论研究,实证研究有待深化。总体而言,以往研究在理论和实证研究方面均取得了丰硕成果。在大多数情况下,专注于设施韧性的研究者和实践者没有相互借鉴对方的经验和成果,这导致了设施韧性提升效果不能尽如人意。实证研究在多大程度上改进了已有理论框架,尚缺乏系统性分析与披露。实证研究对象多侧重于选取交通、电力、废水处理、燃气管网等设施中的一类,或者两两之间开展建模仿真,一是其可移植性需要进一步验证,二是基于复杂适应系统理论的设施韧性评估还存在较大空间。尤其是 CIM、BIM、GIS、物联网、区块链等技术融合与支撑下的设施与社区之间、设施与建筑群落之间的整体韧性评估实证研究有待深化。

4.2 未来研究的关键问题

(1)治理需求导向下设施韧性综合评估模型研究。现有研究成果多侧重于定性分析,或侧重于物理和技术层面的设施韧性量化评估。这些建立在逻辑推理和理论分析基础上的设施系统分类,一是侧重于供给侧,而忽视了设施相关利益群体韧性治理需求侧的调查分析,忽视了治理需求的社会性、层次性和差异性,使得评估结果缺乏针对性、可操作性、时效性。二是缺乏微观—宏观尺度结合的、不同典型灾害情景下,兼顾物理、技术、社会多维度的综合评估。三是城市关联基础设施韧性在智能评估与优化过程分析方面,存在广阔研究空间。

(2)问题导向下理论研究和实证研究相互融合。已有研究更多从理论层面分析问题,而忽视

了理论研究和实证研究的相互融合与促进。一是已有研究侧重于外在扰动因子,如地震、洪涝等突发事件,而对实证层面设施自身的内在扰动因素缺乏信息收集、归类和分析,例如设施在规划、设计、建设、运营过程中自身缺陷导致的韧性降低问题。二是不同的扰动因子,在不同地域,对于同类设施的韧性影响程度是不同的,而现有研究缺少对设施环境的关注。三是同样类型设施,在同一个区域,所面临的使用者素质、时间、情境等因素,直接影响设施韧性,因此,问题导向下的设施韧性评估应关注实证层面使用者素质的变化情况。

(3)韧性引领下在建、已建、新建设施系统性评估。在建、已建设施的韧性评估是分立进行的。今后的研究亟待着眼于系统性视角,加强各类在建、已建设施韧性系统性评估研究,阶段性评估与过程评估研究,为各类在建设施规划、设计的早期调整,运维策略调整等提供依据。以5G、工业互联网、云计算、区块链为代表的信息基础设施,以智能交通、智慧能源为代表的融合基础设施,凸显新基建为设施韧性赋能的契机。“新基建”会推动其在信息化和智能化改造,标准规范升级与地方性探索有助于提升设施韧性。在此背景下,设施韧性评估不论是基础框架、抑或是评估方法、改进路径方面面临革新的挑战、契机,其中网信、信息基础设施韧性研究是重中之重。安全自主可控性、可信性、保障度和风险度等应引起应有的关注,新的评估指标体系亟待研发。

参考文献:

- [1] LUDWIG D. Barriers and bridges to the renewal of ecosystems and institutions [J]. *Ecological Economics*, 1996, 19(2): 185-188.
- [2] ALLENBY B, FINK J. Social and ecological resilience: toward inherently secure and resilient societies [J]. *Science*, 2000, 24(3): 347-364.
- [3] HAIMES Y Y. On the definition of resilience in systems [J]. *Risk Analysis*, 2009, 29(4): 498-501.
- [4] TRAN H T, BALCHANOS M, DOMERCANT J C, et al. A framework for the quantitative assessment of performance-based system resilience [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2017, 158(2): 73-84.
- [5] ROCHAS C, KUZNECOVA T, ROMAGNOLI F. The concept of the system resilience within the infrastructure dimension: application to a Latvian case [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 88(2): 358-368.
- [6] 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.
- [7] 刘严萍,王慧飞,钱洪伟,等.城市韧性:内涵与评价体系研究[J]. *灾害学*, 2019, 34(1): 8-12.
- [8] FRANCIS R, BEKERA B. A metric and frameworks for resilience analysis of engineered and infrastructure systems [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2014, 121(1): 90-103.
- [9] 赵辰.城市关联基础设施系统网络建模及韧性优化[D].北京:清华大学,2018.
- [10] STAFF C G P O. Critical foundations: protecting America's infrastructures [R]. United States Government Printing Office, 1998.
- [11] TURNQUIST M, VUGRIN E. Design for resilience in infrastructure distribution networks [J]. *Environment Systems & Decisions*, 2013, 33(1): 104-120.
- [12] CAI B P, XIE M, LIU Y H, et al. Availability-based engineering resilience metric and its corresponding evaluation methodology [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2018, 172: 216-224.
- [13] CUTTER S L, BARNES L, BERRY M, et al. A place-based model for understanding community resilience to natural disasters [J]. *Global Environmental Change*, 2008, 18(4): 598-606.
- [14] 李亚,翟国方,顾福妹.城市基础设施韧性的定量评估方法研究综述[J]. *城市发展研究*, 2016, 23(6): 113-122.
- [15] BAO S, ZHANG C, OUYANG M, et al. An integrated tri-level model for enhancing the resilience of facilities against intentional attacks [J]. *Annals of Operations Research*, 2019, 283(1): 87-117.
- [16] BRUNEAU M, REINHORN A. Exploring the concept of seismic resilience for acute care facilities [J]. *Earthquake Spectra*, 2007, 23(1): 41-62.
- [17] RUS K, KILAR V, KOREN D. Resilience assessment of complex urban systems to natural disasters: A new literature review [J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2018, 31: 311-330.
- [18] REHAK D, SENOVSKY P, HROMADA M, et al. Complex approach to assessing resilience of critical infrastructure elements [J]. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 2019, 25: 125-138.
- [19] SARWAR A, Khan F, Abimbola M, et al. Resilience analysis of a remote offshore oil and gas facility for a potential hydrocarbon release [J]. *Risk Analysis*, 2018, 38(8): 1601-1617.
- [20] ALIZADEH H, SHARIFI A. Assessing resilience of urban critical infrastructure networks: a case study of Ahvaz, Iran [J]. *Sustainability*, 2020, 12(9): 1-20.
- [21] EDDAOUI I, ELHAMI A, ITMI M, et al. Resilience assessment as a foundation for systems-of-systems safety evaluation: application to an economic infrastructure [J]. *Safety Science*, 2019, 115: 446-456.
- [22] CHANG E S, SHINOZUKA M. Measuring improvements in the disaster resilience of communities [J]. *Earthquake Spectra*, 2004, 20(3): 739-755.
- [23] WHITFIELD M C, FREDERIC P, WILLIAM B, et al. Protective measures and vulnerability indices for the enhanced critical infrastructure protection programme [J]. *International Journal of Critical Infrastructures*, 2011, 7(3): 200-219.
- [24] FISHER R E, BASSETT G W, BUEHRING W A, et al. Constructing a resilience index for the enhanced critical infrastructure protection program [R]. Argonne National Laboratory, Decision and Information Sciences Division, Argonne, USA, 2010.
- [25] PETIT F D, EATON L, FISHER R, et al. Developing an index to assess the resilience of critical infrastructure [J]. *International Journal of Risk Assessment and Management*, 2012, 16(1): 28-47.
- [26] PETIT F D, BASSETT G W, BLACK R, et al. Resilience measurement index: an indicator of critical infrastructure resilience [R]. Argonne National Laboratory, Decision and Information Sciences Division, Chicago, 2013.
- [27] OUYANG M. Review on modeling and simulation of interdependent critical infrastructure systems [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2014, 121: 43-60.

- [28] LI Y, LENCE B J. Estimating resilience for water resources systems[J]. *Water Resources Research*, 2007, 43(7): 256 – 260.
- [29] ATTOH O N O, COOPER A T, Mensah S A. Formulation of resilience index of urban infrastructure using belief functions[J]. *IEEE Systems Journal*, 2009, 3(2): 147 – 153.
- [30] CIMELLARO G P, REINHORN A M, BRUNEAU M. Framework for analytical quantification of disaster resilience[J]. *Engineering Structures*, 2010, 32(11): 3639 – 3649.
- [31] OUYANG M, DUENAS O L, MIN X. A three – stage resilience analysis framework for urban infrastructure systems[J]. *Structural Safety*, 2012, 36: 23 – 31.
- [32] BRUNEAU M, CHANG S E, EGUCHI R T, et al. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities[J]. *Earthquake Spectra*, 2003, 19(4): 733 – 752.
- [33] BERCHE B, FERBER V C, HOLOVATCH T, et al. Resilience of public transport networks against attacks[J]. *European Physical Journal B*, 2009, 71(1): 125 – 137.
- [34] LEU L, ABBASS H, CURTIS N. Resilience of ground transportation networks: A case study on Melbourne [C]// *Proceedings of the 33rd Australasian Transport Research Forum Conference*, Canberra, Australia, 29 September – 1 October 2010.
- [35] REED D A, KAPUR K C, CHRISTIE R D. Methodology for assessing the resilience of networked infrastructure[J]. *IEEE Systems Journal*, 2009, 3(2): 174 – 180.
- [36] LEE D W. An exploratory assessment of infrastructure resilience to disasters[J]. *International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment*, 2020, 11(4): 519 – 533.
- [37] GEORGE M. Fuzzy architecture assessment for critical infrastructure resilience[J]. *Procedia Computer Science*, 2012, 12: 367 – 372.
- [38] DUDENHOEFFER D D, PERMANN M R, MANIC M. A Framework for infrastructure interdependency modeling and analysis [C]// *Proceedings of the Winter Simulation Conference WSC 2006*, Monterey, California, USA, December 3 – 6, 2006.
- [39] HOLDEN R, VAL D V, BURKHARD R, et al. A network flow model for interdependent infrastructures at the local scale[J]. *Safety Science*, 2013, 53(2): 51 – 60.
- [40] MILLER H E, ZHANG X, FATURECHI R. Measuring and maximizing resilience of freight transportation networks[J]. *Computers & Operations Research*, 2012, 39(7): 1633 – 1643.
- [41] GOLDBECK N, ANGELOUDIS P, OCHIENG W Y, et al. Resilience assessment for interdependent urban infrastructure systems using dynamic network flow models[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2019, 188: 62 – 79.
- [42] DONG X, GUO H, ZENG S. Enhancing future resilience in urban drainage system: green versus grey infrastructure[J]. *Water Research*, 2017, 124: 280 – 289.
- [43] CHOU CC, TSENG SM. Collection and analysis of critical infrastructure interdependency relationships[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2010, 24(6): 539 – 547.
- [44] 周诗伟, 黄弘, 李瑞奇. 城市基础设施韧性评估与敏感性分析[J]. *武汉理工大学学报(信息与管理工程版)*, 2020, 42(3): 189 – 195.
- [45] GEORGE M. Fuzzy architecture assessment for critical infrastructure resilience[J]. *Procedia Computer Science*, 2012, 12: 367 – 372.
- [46] MENDONCA D, WILLIAM WA. Impacts of the 2001 world trade center attack on New York City critical infrastructures[J]. *Journal of Infrastructure Systems*, 2006, 12(4): 260 – 270.
- [47] CHUNLI Z, XING G, WEIXIN F, et al. Synthesis, characterization, and properties of a novel aromatic ester – based polybenzoxazine [J]. *RSC Advances*, 2020, 10(12): 6953 – 6959.
- [48] KAPUR K C, REED D A, CHRISTIE R D. Methodology for assessing the resilience of networked infrastructure [J]. *Systems Journal*, 2007, 3(2): 174 – 180.
- [49] MARYAM I, DONYA H. A resilience assessment framework for critical infrastructure networks' interdependencies[J]. *Water Science and Technology*, 2020, 81(7): 1420 – 1431.
- [50] MAO Q, LI N. Assessment of the impact of interdependencies on the resilience of networked critical infrastructure systems[J]. *Natural Hazards*, 2018, 93: 315 – 337.
- [51] ZHAO C, LI N, FANG D. Criticality assessment of urban interdependent lifeline systems using a biased PageRank algorithm and a multilayer weighted directed network model [J]. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 2018, 22(9): 100 – 112.
- [52] 李瑞奇, 黄弘, 周睿. 基于韧性曲线的城市安全韧性建模[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2020, 60(1): 4 – 11.
- [53] RENSCHLER C S, FRAZIER A E, ARENDT L A, et al. Developing the 'PEOPLES' resilience framework for defining and measuring disaster resilience at the community scale [C]// *Proceedings of the 9th U. S. National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering*. July 25 – 29, 2010, Toronto, Ontario, Canada.
- [54] RUS K, KILAR V, KOREN D. Resilience assessment of complex urban systems to natural disasters: a new literature review[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2018, 31: 311 – 330.
- [55] ZHANG W, WANG N. Bridge network maintenance prioritization under budget constraint [J]. *Structural Safety*, 2017, 67: 96 – 104.
- [56] ZHANG W, WANG N, NICHOLSON C. Resilience – based post – disaster recovery strategies for road – bridge networks [J]. *Structure & Infrastructure Engineering*, 2017, 13(11): 1 – 10.
- [57] 方东平, 李全旺, 李楠, 等. 社区地震安全韧性评估系统及应用示范[J]. *工程力学*, 2020, 37(10): 28 – 44.
- [58] ERIC D V, DRAKE E W, MARK A E, et al. A framework for assessing the resilience of infrastructure and economic systems[J]. *Sustainable and Resilient Critical Infrastructure Systems*, 2010, 77 – 116.
- [59] EFTHIMIA P, ANDREW P, FRANCIS E F. Roadmap layers and processes: resilient and sustainable care facilities[J]. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 2019, 26(9): 1986 – 2007.
- [60] OLIVERI J. Systems integration for a more resilient facility[J]. *Facility Management Journal*, 2019, 29(3): 74 – 76.
- [61] HOSSEINI S, BARKER K, RAMIREZ M J E. A review of definitions and measures of system resilience[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2016, 145(1): 47 – 61.
- [62] ELMS D, MCCAHOON I, DEWHIRST R. Improving infrastructure resilience[J]. *Civil Engineering and Environmental Systems*, 2019, 36(1): 83 – 99.
- [63] CAPOLONGO S, GOLA M, BRAMBILLA A, et al. COVID – 19 and healthcare facilities: a decalogue of design strategies for resilient hospitals[J]. *Acta Biomed*, 2020, 91: 50 – 60.
- [64] MONTGOMERY M, BROYD T, CORNELL S, et al. An innovative approach for improving infrastructure resilience[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 2012, 165: 27 – 32.
- [65] ROD B, LANGE D, THEOCHARIDOU M, et al. From risk management to resilience management in critical infrastructure [J]. *Journal of Management in Engineering*, 2020, 36(4): 1 – 13.
- [66] BELLINI E, GAITANIDOU E. European resilience management guidelines for critical infrastructure operationalised for the urban transport system [C]// *8th International Congress on Transportation Research in Greece*, 2017.

Review on Infrastructure Resilience Assessment and Future Direction

LIU Yanping and HE Jixin

(School of Economics and Management, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

Abstract: Facility resilience assessment is originally originated in the field of seismic engineering. The qualitative research could not meet the needs, and the quantitative research emerged. Later, with different assessment techniques, different research objects and different focus points of improving path design, different branches of this field have been formed. The research methods of facility resilience assessment based on functional curve, spatial information technology integration, modeling and simulation and artificial intelligence support technology are summarized. Relevant literature review is carried out from the perspective of single facilities and associated facilities, and from the perspectives of the whole life cycle, association and collaboration, and standard construction. It is found that there is still a large space for research; more research is done from the perspective of supply, but less from the perspective of actual demand; The research on individual facilities is more than that from the perspective of integration. A theoretical research is more than an empirical research. Research on the comprehensive assessment model under the guidance of governance needs, the mutual promotion of theoretical research and empirical research under the guidance of problem, and the systematic evaluation of facilities under construction, already and newly built under the guidance of resilience will undoubtedly enrich the theoretical innovation and knowledge system of urban infrastructure resilience research.

Key words: facilities; resilience assessment; research review

(上接第 130 页)

- [24] 陈亚芳, 张其林, 张晓黄, 等. 风云四号闪电成像仪聚类算法的参数化方案[J]. 电瓷避雷器, 2019(2): 103–108.
- [25] 靳小兵, 卜俊伟, 刘婷立, 等. 四川省雷电探测网效率评估和改进方法研究[J]. 高原山地气象研究, 2011, 31(4): 65–68.
- [26] 纪奎秀, 张亮, 卜俊伟, 等. 复杂地形对雷电云地闪观测电磁场传输影响的实例分析[J]. 高原山地气象研究, 2017, 37(4): 78–83.
- [27] 靳小兵, 卜俊伟, 陆茂. 四川省雷电监测预警预报及其应用研究[J]. 高原山地气象研究, 2012, 32(3): 54–57.
- [28] 卜俊伟. 基于闪电定位资料的四川省雷电风险区划分分析[J]. 高原山地气象研究, 2014, 34(2): 86–90.
- [29] 周春花, 青泉, 师锐. 21 世纪以来四川强对流天气特征[J]. 高原山地气象研究, 2009, 29(4): 40–44.

Analysis of Forest Fire Causes and Application of Lightning Monitoring Data in Muli County

LI Bing, ZHOU Jian, BU Junwei, JIN Xiaobing, CHENG Xiang, PAN Bo and FENG Jiandong

(1. Liangshan Meteorological Bureau, Xichang 615000, China; 2. Liangshan Forest Public Security Bureau, Xichang, 615000, China; 3. Sichuan Lightning Protection Center, Chengdu 610072, China; 4. Sichuan Meteorological Disaster Prevention Technology Center, Chengdu 610072, China; 5. Sichuan Lightning Protection Center, Chengdu 610072, China; 6. Chengdu Lightning Protection Center, Chengdu 610041, China)

Abstract: On March 30, 2019, a huge forest fire in Lier Village, Yalong River town, Muli County, Liangshan Prefecture, killed 30 people and caused heavy economic losses. According to the eyewitness report on the scene, through the analysis of the geographical environment, climate characteristics and meteorological conditions near the fire site, it was found that the hazard-affected body near the fire point was extremely vulnerable. The weather situation and satellite cloud map analysis show that there are likely to be lightning clouds around the fire site during the fire. The temporal and spatial characteristics of lightning were further analyzed by using the lightning monitoring data of National Three-Dimensional lightning detection network, Sichuan Lightning monitoring network and Xichang Satellite Base. The results show that cloud-ground lightning is the direct disaster-inducing factor of this forest fire. The fire is caused by a tall tree in the fire site during cloud-ground lightning. The high temperature and heat effect of lightning channel in the process of releasing the lightning current through the trunk into the ground first causes the burning of dead leaves and saprolite layer on the ground, which further causes a large area of forest fire. Therefore, lightning detection is an effective technical method for assessing forest fire hazard factors and locating fire locations in forest areas that lack ground meteorological observation station network and cannot be covered by meteorological radar. It can provide important technical basis for the government to judge the nature of forest fire and the decision of fire prevention.

Key words: forest fire; meteorological conditions; satellite cloud map; lightning; hazard-affected body; disaster-inducing factor