

王江波, 胡勤才, 苟爱萍. 灾后城市基础设施恢复力模型构建研究——以“7·20”郑州特大暴雨灾害为例[J]. 灾害学, 2023, 38(1): 32-36, 56. [WANG Jiangbo, HU Qincai, GOU Aiping. A Resilience Rapidity Model for Post-disaster Infrastructure—an Illustrative Case at “7.20” Zhengzhou Torrential Rain Disaster[J]. Journal of Catastrophology, 2023, 38(1): 32-36, 56. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2023.01.006.]

灾后城市基础设施恢复力模型构建研究*

——以“7·20”郑州特大暴雨灾害为例

王江波¹, 胡勤才¹, 苟爱萍²

(1. 南京工业大学 建筑学院, 江苏 南京 211816; 2. 上海应用技术大学 生态技术与工程学院, 上海 201418)

摘要: 基础设施系统是城市运行的根本, 对城市的生产生活起着重要的作用, 灾害事件频发对城市基础设施造成了极大的损失。近年来, 因极端天气造成的城市灾害愈发频繁, 对城市基础设施系统带来了巨大的压力, 为了面对日益严重的自然灾害的压力, 必须量化城市应对灾害的恢复力。韧性是一个包含准备、响应以及恢复的过程, 该文以恢复力矩阵框架为基础, 结合 PSR 模型构建用于评估基础设施恢复力的方法。该方法总结了多阶段恢复过程的状态和优先事项, 可以用于特定的场景选择适合的指标, 将其应用于“7·20”郑州特大暴雨灾害事件, 基于灾后新闻发布会公布的灾情数据, 选择了与当地相关的恢复评估指标, 以探究本次灾害过程中的基础设施恢复力, 这有助于对当地灾害恢复以及备灾进行补充。

关键词: 灾害恢复力; RM 框架; PSR 模型; 基础设施系统

中图分类号: X43; X915.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2023)01-0032-06

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2023.01.006

随着人类社会的不断进步发展, 资源与环境之间的冲突迅速加剧。21 世纪以来, 各类重大自然灾害事件频繁发生。据灾害流行病学研究中心 (CRED) 报告, 2021 年极端灾害事件高达 432 起, 而在 2001—2020 年间, 该数据平均水平仅为 347 起^[1]。极端灾害事件不仅使得人们流离失所甚至死亡, 也对城市基础设施系统带来了严重的破坏。一般来说, 假设两周是企业能够承受的城市基本服务如电力和通信等中断的最长时间, 那么当城市基本服务中断一个月乃至更长时间时, 就会迫使企业关闭甚至搬离。因此, 灾后城市基础设施系统的快速恢复能力至关重要。

基础设施系统是居民生活的保障, 而由于系统使用年限、使用状况以及与其他基础设施的紧密联系, 各系统往往面临着越来越多不同程度的中断。基础设施的中断往往意味着城市生产生活的中断, 甚至威胁着城市居民的生命安全。面对着各种破坏性事件以及由此产生的后果, 基础设施的恢复力已成为城市规划中一项重要的问题, 基础设施系统恢复力通常通过性能和恢复时间来衡量, 一般采用线性函数来表示。基础设施系统的设计必须使其具有足够的抵抗力以承受灾害并从中快速恢复。目前, 各地备灾计划的重点是预防和承受重大灾害事件, 但是此类计划不足以抵御超级灾害事件, 如 2005 年的美国卡特里娜飓风、2010 年的海地 7.0 级地震、2011 年的东日本 9 级

大地震和海啸、2012 年的美国桑迪飓风、2019 年的美国艾达飓风等, 因为在实践中不可能将基础设施系统强化到能抵御所有类型的破坏性灾害的程度。因此, 恢复力概念的出现补充了以缓解灾害为重点的理念, 使人们认识到及时响应和从灾害中恢复的重要性和必要性。

韧性主要包含四大特性: 分别为鲁棒性 (Robustness)、冗余性 (Redundancy)、智慧性 (Resourcefulness) 以及快速性 (Rapidity), 也被称为韧性的 4R 框架 (4R Framework)。其中快速性即系统快速恢复的能力, 基本表现为系统恢复到灾前水平的速度^[2], 可以用平均恢复速率来表示^[3]。4R 框架的提出为理解韧性的构成提供了参考依据, 也是后期各类韧性测度模型研究的关键理论。杯球模型通过更加直观的方式表现出了工程系统恢复韧性的时间量^[4]。以 4R 框架为基础, 损失三角形测度模型建立了韧性“三阶段”框架并得到了广泛的运用^[5-7], 该模型通过将灾后系统的机能曲线同未受灾状态下系统机能曲线以及横纵坐标轴之间围成的面积的比值表征韧性的大小。考虑到不同系统在灾害中可能经历不同的阶段, 韧性三角形测度模型被进一步扩展为韧性矩形模型^[8-11]。如今评估灾害韧性主要有三种方法: 指标法^[12-14]、记分卡^[15-16]以及韧性工具^[17], 这些模型能被运用

* 收稿日期: 2022-08-03 修回日期: 2022-11-17

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“海陆交互作用下海岸带灾害韧性的时空演化特征与空间治理机制研究: 以粤港澳大湾区为例”(51978329)、“气候变化影响下城市公共空间景观韧性肌理与调适策略研究”(51778364)

第一作者简介: 王江波(1976-), 男, 汉族, 河南鹤壁人, 教授, 主要从事韧性城市与安全防灾研究. E-mail: wjb623@163.com

通信作者: 苟爱萍(1971-), 女, 汉族, 重庆市人, 教授, 主要从事韧性城市和公共空间研究. E-mail: aipingou@hotmail.com

到从城市群到基础设施系统等不同尺度。

针对灾害中基础设施的研究大多用响应曲线法^[18]研究单一或整体系统韧性,在表现上常用的有性能响应曲线法、韧性曲线模型和韧性三角形模型等。尽管对于韧性的定量评估已有较为成熟的体系以及方法,但对于单一特性的研究还较为缺乏。美国标准研究院(NIST)基于韧性中鲁棒性和快速性的目标制定了社区韧性规划指南^[19-20],用于指导地区灾害恢复计划,在俄勒冈州和加利福尼亚州圣地亚哥等地得到了运用,实践证明基于快速性的目标有助于帮助城市更好的应对下一次的灾难。

灾害发生短时间内通常会对受损情况进行评估,以评价灾害对城市的影响程度,基础设施系统灾后恢复是城市灾后最紧迫、最关键的任務,目前少有模型用于量化灾后基础设施恢复力。因此,本文关注的问题是:量化基础设施系统应对灾害的恢复能力。基于这一需求,本文构建并展示了结合 PSR 模型的恢复力矩阵方法,并将该模型用于郑州案例分析。该模型在考虑基础设施系统整体性的情况下,充分考虑基础设施系统的灾害后果以及恢复时间进行评估,通过选取基于灾害事件背景的指标,可以适用于灾害视角下基础设施系统恢复力评估,探究基础设施系统网络中的薄弱环节。该研究建立了对恢复力的科学的评价体系,有助于地方提高基础设施恢复力和灾害适应能力。

1 模型构建

1.1 恢复力矩阵

恢复力矩阵(Resilience Matrix, RM)^[21-22]根据美国国家科学院(NAS)定义的灾难发生过程中的准备、吸收、恢复、适应四个阶段,结合美国陆军网络中心战理论中描述的任何复杂系统中的四个一般管理领域物理、信息、认知和社会,构建的一个4×4的矩阵,如图1所示。其中一个轴包含任何系统的主要领域,另一个轴列出了灾害事件的阶段。使用者可以以此构建一个框架,用于评估灾害事件中的系统恢复力。

	准备	吸收	恢复	适应
物理				
信息				
认知				
社会				

图1 恢复力矩阵框架^[21]

这16个单元格可以对灾害事件进行详细的描述,然后对每个单元格赋值的方法,该分数能反映灾害阶段中该领域的能力指标。将赋值结果矩阵进行汇总,可以呈现系统整体恢复力,在一定时间内进行持续追踪,可以仔细分析评估系统中的不足^[23]。

RM 框架可以应用于任意系统当中,该系统可以是某一个建筑例如学校,也可以扩大到城市、区域乃至国家,区域的大小将决定所选指标的精确度。RM 框架通过在一定范围内寻找系统漏洞,以帮助提升系统恢复力。不同于其它恢复力评估

方法, RM 框架利用利益相关者理论来确定特定于当前事件中的系统性指标和阈值,根据当地需求而不是普遍指标来确定,充分发挥 RM 框架的优势。另外, RM 框架可以与其它方法相结合,能突出两种方法的优点。

在以往的研究中, RM 框架先后被运用于纽约罗卡韦半岛^[24]和阿拉巴马州莫比尔市^[25]的洪水灾害案例研究中。除此之外, RAND 等人将基础设施恢复与受灾人口回迁联系起来,根据需求对 RM 框架进行定制(图2),系统评估了灾害后基础设施系统的恢复力^[26]。

	交通	建筑	给排水	电力	通信	燃油/天然气
物理						
社会						
信息						
项目管理						

图2 恢复力矩阵框架扩展^[26]

1.2 PSR 模型

PSR(Pressure - State - Response)模型即“压力-状态-响应”模型,是环境质量评价学科中常用的一种评价模型,常用于生态系统安全以及评估框架的构建,体现了人类与自然环境间的相互关系,是一种常见的因果方法^[27]。其中压力代表了外界对系统的干扰和压迫,反映了产生某一问题的诱因;状态代表外界压力下生态系统的当前状态,反映了系统的健康状况;响应代表了针对问题所采取的应对措施,即系统对外界压力的反馈。该框架详细的阐述了生态系统与社会系统之间的联系。通常来说,由于自然灾害或社会要素对城市或生态系统造成影响,进一步改变了系统当前的状态,最后通过自然系统的韧性以及主动采取一系列调整措施来回复系统受损前的状态。

PSR 框架可以用来结构化的理解信息,在各类领域均得到了广泛的运用。随着人们对灾害学的进一步研究,以城市系统为主体, PSR 模型被广泛运用于灾害脆弱性^[28-30]以及灾害风险评估^[31-34]中。可见 PSR 模型具有极强的实用性,并且在城市灾害评估领域中已得到了广泛的运用。

1.3 郑州暴雨灾害基础设施恢复力模型构建

基础设施系统灾后恢复力与恢复时间以及恢复效率紧密相关^[35],因此,我们提出了一个以基础设施灾后恢复表现为目标的评估方法,该方法为一个3×N的矩阵:与城市功能恢复息息相关的基础设施系统为行,以 PSR 模型的三个阶段为列。每个单元格都会分配一个或多个指标,以作为该评估的基础。

基础设施系统恢复的主要挑战之一是各系统之间的复杂关系即相互依赖性。在本次案例中,根据实际情况选择了与城市的基本功能密不可分,并且在本次灾害中受到了不同程度破坏的4个基础设施系统,包括交通系统、给排水系统、电力系统以及通信系统,各系统之间有着密切的关系。

表1为郑州暴雨灾害事件中的恢复力主要指标,指标的选取融合了灾害后果以及恢复时间等关键特征因素,这些指标具有较高的针对性并且是综合性的。指标的选择一般可以使用容易获取并且有效的数据,通过定性和定量两种方法来定义。

表1 模型指标表

	交通	给排水	电力	通信
压力	道路网密度	建成区排水管网密度	年平均停电时间	千人通讯基站数
状态	下穿隧道淹没比例	水厂停运比例	变电站停运比例	基站损毁比例
	长途汽车停运比例	断水小区比例	断电小区比例	受影响人口比例
	城市公交车停运比例	积水小区比例	与暴雨前负荷使用水平	
	地下车库淹没比例		受影响人口比例	
响应	出租车	积水抽排耗时	断电基本恢复时间	通讯基本恢复时间
	市际客车线路	供水恢复时间		
	市内公交线路(除地铁)			
	地铁线路			

2 案例分析：河南郑州“7·20”特大暴雨灾后恢复力

2.1 数据来源

本文数据来源主要分为两类，一类是年度统计数据，包括2021年度《中国主要城市道路网密度与运行状态监测报告》^[36]、《2020年全国电力可靠性年度报告》^[37]和《2020年城市建设统计年鉴》^[38]。另一类是灾情数据，包括灾害受损数据和灾害恢复数据，主要来源是河南省人民政府新闻办公室^[39]，内容包括10场河南省防汛救灾新闻发布会、6场河南省加快灾后重建新闻发布会以及官方新闻报道。

2.2 事件简介

本次方法选取的案例研究对象是郑州市。据百度百科记载，郑州市位于河南省中北部，地处黄河中下游分界处，属温带大陆性季风气候，具有四季分明的特点，多年平均降水量为632.4 mm。郑州已形成铁路、公路、航空三种运输方式构成的交通运输体系，在区域乃至全国交通网络中都发挥着较为重要的作用。截至2020年郑州市常住人口达1 262万人，其中城镇常住人口有989万人。2016年郑州入选河南省海绵城市建设省级试点城市，并于2018年完成了海绵城市专项规划。此次研究范围为沿黄快速通道、京港澳高速以及郑州西南绕城高速围合范围内(图3)，面积约892 km²，城区人口约416.64万。



图3 研究区域范围(来源：高德卫星地图)

郑州市主要自然灾害为旱灾以及雨涝灾害，其中旱灾多发生在春季，频率最高，雨涝灾害多发生在夏季，平均3年一遇。近年来，郑州市并未出现特大自然灾害事件。2021年7月，受北美洲“热穹顶”事件的上下游效应影响，西太平洋副热带高压异常北移，与此同时台风烟花和台风查帕卡将太平洋水汽凝聚成急流，输送到华北平原与河南上空对流系统叠加，遇到伏牛山和太行山地形抬升后化为持久的特大暴雨落下^[40]。

根据国务院灾害调查组发布的《河南郑州

“7·20”特大暴雨灾害调查报告^[41]，郑州市规划于2030年达到50年一遇的国家排涝标准即24 h降水量199 mm。19—20日郑州发生了长历时特大暴雨，最大日降雨量达624.1 mm，接近郑州年平均降雨量，20日16—17时出现201.9 mm的极端小时雨强，突破了我国大陆气象观测记录历史峰值(198.5 mm)。而目前郑州市主城区有38个排涝分区，只有1个达到了规划排涝标准，部分分区实际应对降雨能力不足5年一遇即24 h降雨量127 mm，即使达到规划排涝标准也无法满足当天降雨排涝需要。这导致7月20日全市超过一半的小区地下空间和重要公共设施受淹，多个区域断电断水断网，道路交通断行，路面最大水深近2.6 m，因灾死亡失踪380人，死亡人数位居2021年全球自然灾害事件第5^[1]。

2.3 打分依据和结果

通过定量和定性方法评估郑州特大暴雨灾害恢复力指标，其结果如表2所示。定性度量法通过评估度量值在低-较低-中-较高-高中的位置确定指标得分，定量指标通过给定指标的上下限计算得分，范围从0~1，通过线性效用函数计算度量值得分。组合指标通过平均分配权重的方法计算最终得分。

在压力阶段中，交通系统指标为道路网密度，其数据及上下限的选定均来源于中国城市规划设计研究院公布的我国36个主要城市道路网密度。给排水指标为建成区排水管网密度，该数据及其上下限的选择均来源于《2020年城市建设统计年鉴》^[38]。电力系统指标为年平均停电时间，根据电力可靠度评价，年平均停电时间共分为小于1 h、1~2 h、2~5 h、5~10 h以及大于10 h五个程度。通信系统指标为千人通讯基站数，对比下2020年全国千人通信基站数为6.65，因此通过定性量表法确定其得分等级。

在状态阶段中，交通系统指标分别有下穿隧道淹没比例、长途汽车停运比例、城市公交停运比例以及地下车库淹没比例，在灾害发生后，郑州迅速反应，关闭了城市各类交通，从侧面反映了本次暴雨的史无前例，根据河南省人民政府新闻办公室公布^[39]，一半的下穿隧道和三成地下车库均受到了不同程度的灾害，其中京广快速路北隧道事件甚至导致了人员死亡，而地下车库的受灾则导致了大量车辆的损坏。给排水系统指标分别有水厂停运比例、断水小区比例及积水小区比例，其数据均来源于河南省人民政府新闻办公室^[39]。郑州9个水厂均因停电或积水影响中断供水，造成特别重大水源和供水突发事件，断水小区达到三成，但政府迅速反应搭建了41处取水点，基本保障了居民用水需求。电力系统指标选择了变电站停运比例、断电小区比例、与暴雨前电力负荷使用水平以及受影响人口比例。通信系统指标则选择了基站损毁比例以及受影响人口比例。本文将状态阶段指标在0%~100%内均等划分为五类，分别赋值为0、0.25、0.5、0.75、1.0。

表2 评估指标及得分

阶段	城市系统	指标	值	上限(高性能)	下限(表现不佳)	得分	
压力	交通	道路网密度/(km/km ²)	6.7	9.6	3.5	0.52	
	给排水	建成区排水管网密度/(km/km ²)	7.78	18.72	3.38	0.29	
	电力	年平均停电时间/h	2~5	<1	>10	0.5	
	通信	千人通讯基站数	18.96	定性: 低-较低-中-较高-高		1.0	
状态	交通	下穿隧道淹没比例/%	50	0~20	80~100	0.5	
		长途汽车停运比例/%	100	0~20	80~100	0	
		城市公交车停运比例/%	100	0~20	80~100	0	
		地下车库淹没比例/%	31.50	0~20	80~100	0.75	
	给排水	水厂停运比例/%	100	0~20	80~100	0	
		断水小区比例/%	31.67	0~20	80~100	0.75	
		积水小区比例/%	11.79	0~20	80~100	1.0	
	电力	变电站停运比例/%	6.50	0~20	80~100	1.0	
		断电小区比例/%	20.36	0~20	80~100	0.75	
		与暴雨前负荷使用水平/%	44.59	80~100	0~20	0.5	
		受影响人口比例/%	16.49	0~20	80~100	1.0	
	通信	基站损毁比例/%	45	0~20	80~100	0.5	
		受影响人口比例/%	22.56	0~20	80~100	0.75	
	响应	交通	市内公交线路(除地铁)/d	5	定性: 低-较低-中-较高-高		0.5
			出租车/d	9	定性: 低-较低-中-较高-高		0.25
			市际客车线路/d	6	定性: 低-较低-中-较高-高		0.5
地铁线路/d			76	定性: 低-较低-中-较高-高		0	
给排水		积水抽排耗时/d	7	定性: 低-较低-中-较高-高		0.25	
		供水恢复时间/d	5	定性: 低-较低-中-较高-高		0.5	
电力		断电基本恢复时间/d	5	定性: 低-较低-中-较高-高		0.5	
通信		通讯基本恢复时间/d	2	定性: 低-较低-中-较高-高		0.75	

在响应阶段, 本文选择了关键性的恢复时间为指标, 交通系统选择了市内交通线路、出租车、市际客车线路以及地铁线路基本恢复时间, 在各城市公共交通突发性应急预案中, 一般将造成交通瘫痪 24 h 以上的定为特别重大事件, 但对此之上并未有细分标准。给排水系统选择了积水抽排耗时和供水恢复时间两项。电力系统选择了断电基本恢复时间。通信系统选择了通讯基本恢复时间。通过研究国外恢复时间的划分方法, 本文将各基础设施系统恢复时间分为 1 d 内、2~3 d、一周内、一个月内、大于一个月五类, 分别赋值为 1.0、0.75、0.5、0.25、0。

通过将矩阵中的各单元值表现为热力图形式, 采用五级颜色量化表显示郑州市基础设施系统应对本次水灾的恢复力能力评估结果, 可用于根据选择的指标确定最需要关注的恢复力问题, 通过优化恢复计划和资源分配来减少恢复时间和成本。

如图 4 所示, 在本次事件中, 压力阶段表现出了给排水系统的脆弱性, 较低的排水管网密度意味着在暴雨来临时容易形成积水地区, 在隧道、地铁等区域甚至会影响居民生命安全。在状态阶段, 交通系统面临了较大的压力, 城市部分道路严重积水, 长途客运及城市公交车等在暴雨影响下完全无法正常出行。在响应阶段, 本次灾害中受影响最严重的交通系统和给排水系统也体现了较低的恢复力, 其中地铁交通由于疫情影响试运行一时中断, 导致地铁系统恢复时间一再延后。整体而言, 郑州市在面对于此次“7·20”特大暴雨灾害过程中, 交通系统与给排水系统恢复力较弱, 与交通系统和给排水系统相比较, 供电系统和通信系统有着更强的适应能力。

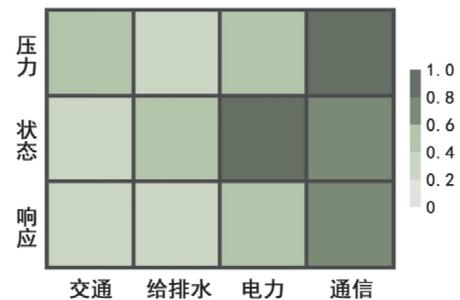


图4 基础设施恢复力指数热图

3 结论与讨论

城市灾害恢复力评估是一个发展前景较大的领域, 城市基础设施系统恢复能力也需要城市政府密切关注, 灾后业务的连续性对城市灾后迅速恢复也起着不可替代的作用。本文参考国外相关规划, 将恢复时间指标作为重要参考内容。

在指标选取方面, 决定灾害恢复力的一个重要指标是恢复时间, 因此各类设施的恢复时间指标能在一定程度上直接体现其恢复力。另一方面影响指标选择的因素是指标数据的可获取性。

在模型构建方面, 结合 RM 框架和 PSR 模型, 构建了灾害恢复力评估模型。该模型能够结构化解构灾害过程中各系统的应对能力, 同时, 通过矩阵能更直观体现各系统的恢复能力得分。

在模型应用方面, 在郑州市本次“7·20”特大暴雨灾害中, 从压力、状态、响应三个层面对交通、给排水、电力和通讯系统选取相关指标, 对

各系统恢复能力进行系统评估。分析结果表明郑州市交通系统和给排水系统在应对本次灾害中表现较差,急切需要得到提升,相比之下,电力系统和通讯冗余性较好,灾害应对也较为充足。

本文通过指标评价的方法,针对城市灾后基础设施的恢复情况,构建了用于评估基础设施恢复力的模型,同时结合响应曲线法能凸显灾害后果、恢复时间等特征,对指标的选取进行了严格的筛选,针对基础设施灾后快速恢复能力进行详细评估。

基于 PSR 模型的恢复力矩阵方法,其优点在于通过对灾后基础设施系统恢复能力进行结构化分析,了解不同阶段不同系统应对灾害的能力,并通过直观的方法表现出来。另外,结合以往各种基础设施恢复力评估的优势,在选取恢复力指标时充分考虑灾害结果及恢复时间等因素,对灾后基础设施恢复过程针对性更强。

但同时该方法也有一些显而易见的缺点。由于相关指标鼓励使用可获得并有效的数据,因此必须仔细考虑指标的可用性。另外该方法并未考虑到人员、资金以及供应等方面的因素,无法就这些方面提供恢复指导。除此之外,恢复力还与灾害严重程度有关,面对不同程度的灾害可能呈现出不同的恢复力,需要针对具体情况具体分析。

参考文献:

- [1] Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED). Disasters in numbers 2021 [EB/OL]. (2022) [2022-05-10]. https://cred.be/sites/default/files/2021_EMDAT_report.pdf.
- [2] 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.
- [3] AYYUB B M. Practical resilience metrics for planning, design, and decision making[J]. *ASCE - ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, 2015, 1(3): 04015008.
- [4] GUNDERSON L H. Adaptive dancing: interactions between social resilience and ecological crises[C]//BERKES F, COLDING J, FOLKE C. *Navigating social - ecological systems: Building resilience for complexity and change*. Cambridge University Press, 2003: 33-52.
- [5] SAHEBJAMNIA N, TORABI S A, MANSOURI S A. Integrated business continuity and disaster recovery planning: towards organizational resilience[J]. *European Journal of Operational Research*, 2015, 242(1): 261-273.
- [6] ZOBEL C W. Representing perceived tradeoffs in defining disaster resilience[J]. *Decision Support Systems*, 2011, 50(2): 394-403.
- [7] ZOBEL C W, KHANSA L. Characterizing multi - event disaster resilience[J]. *computers & Operations Research*, 2014, 42: 83-94.
- [8] GHOSH D, MOHANTA D K. Resiliencetrapezoid - based operational reliability of distribution system[C]//Advances in Smart Grid Automation and Industry 4.0. Singapore, Springer, 2021: 639-647.
- [9] HOSSAIN E, ROY S, MOHAMMAD N, et al. Metrics and enhancement strategies for grid resilience and reliability during natural disasters[J]. *Applied Energy*, 2021, 290: 116709.
- [10] PANTELI M, TRAKAS D N, MANCARELLA P, et al. Power systems resilience assessment: hardening and smart operational enhancement strategies[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2017, 105(7): 1202-1213. DOI: 10.1109/JPROC.2017.2691357.
- [11] PANTELI M, MANCARELLA P, TRAKAS D N, et al. Metrics and quantification of operational and infrastructure resilience in power systems[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32(6): 4732-4742.
- [12] CUTTER S L, ASH K D, EMRICH C T. The geographies of community disaster resilience[J]. *Global Environmental Change*, 2014, 29: 65-77.
- [13] CUTTER S L, BURTON C G, EMRICH C T. Disaster resilience indicators for benchmarking baseline conditions[J]. *Journal of Homeland Security and Emergency Management*, 2010, 7(1): 51.
- [14] SHERRIEB K, NORRIS F H, GALEA S. Measuring capacities for community resilience[J]. *Social indicators research*, 2010, 99(2): 227-247.
- [15] SEMPIER T T, SWANN D L, EMMER S H, et al. Coastal community resilience index: A community self - assessment [EB/OL]. (2010) [2022-06-30]. <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/37845>
- [16] POLAND C. Defining resilience: what San Francisco needs from its seismic mitigation policies [EB/OL]. (2009) [2022-06-30]. <https://www.jstor.org/stable/resrep22914>. 7.
- [17] MILES S B, CHANG S E. ResilUS: a community based disaster resilience model [J]. *Cartography and Geographic Information Science*, 2011, 38(1): 36-51.
- [18] MURDOCK H J, DE BRUIJN K M, GERSONIUS B. Assessment of critical infrastructure resilience to flooding using a response curve approach[J]. *Sustainability*, 2018, 10(10): 3470.
- [19] MCALLISTER T P. community resilience planning guide for buildings and infrastructure systems, volume I [EB/OL]. (2015-10-29) [2022-06-30]. <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.1190v1>.
- [20] MCALLISTER T P. Community resilience planning guide for buildings and infrastructure systems, volume II [EB/OL]. (2015-10-29) [2022-06-30]. <http://dx.doi.org/10.6028/NIST.SP.1190v2>.
- [21] LINKOV I, EISENBERG D A, BATES M E, et al. Measurable resilience for actionable policy [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(18): 10108-10110.
- [22] LINKOV I, EISENBERG D A, PLOURDE K, et al. Resilience metrics for cyber systems[J]. *Environment Systems and Decisions*, 2013, 33(4): 471-476.
- [23] EISENBERG D A, LINKOV I, PARK J, et al. Resilience metrics: lessons from military doctrines [J]. *Solutions*, 2014, 5(5): 76-87.
- [24] FOX - LENT C, BATES M E, LINKOV I. A matrix approach to community resilience assessment: an illustrative case at Rockaway Peninsula [J]. *Environment Systems and Decisions*, 2015, 35(2): 209-218.
- [25] FOX - LENT C, LINKOV I. Resilience matrix for comprehensive urban resilience planning [M]//SHARIFI A, YAMAGATA Y. *Resilience - oriented urban planning*. Springer: Cham, 2018: 29-47.
- [26] RAND K, KURTH M, FLEMING C H, et al. A resilience matrix approach for measuring and mitigating disaster - induced population displacement[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2020, 42: 101310.
- [27] WOLFSLEHNER B, VACIK H. Evaluating sustainable forest management strategies with the analytic network process in a pressure - state - response framework [J]. *Journal of Environmental Management*, 2008, 88(1): 1-10.
- [28] CHEN J F, YU X Y, QIU L, et al. Study on vulnerability and coordination of water - energy - food system in northwest China [J]. *Sustainability*, 2018, 10(10): 3712.
- [29] CHUNG E S, LEE K S. Identification of spatial ranking of hydrological vulnerability using multi - criteria decision making techniques: case study of Korea [J]. *Water Resources Management*, 2009, 23(12): 2395-2416.
- [30] MEN B H, LIU H Y. Water resource system vulnerability assessment of the Heihe River Basin based on pressure - state - response (PSR) model under the changing environment [J]. *Water Supply*, 2018, 18(6): 1956-1967.
- [31] BAI X R, TANG J C. Ecological security assessment of Tianjin by PSR model [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2010, 2: 881-887.
- [32] YE H, MA Y, DONG L M. Land ecological security assessment for bai autonomous prefecture of Dali based using PSR model: with data in 2009 as case [J]. *Energy Procedia*, 2011, 5: 2172-2177.
- [33] ZHOU D, LIN Z, LIU L, et al. Assessing secondary soil salinization risk based on the PSR sustainability framework [J]. *Journal of Environmental Management*, 2013, 128: 642-654.
- [34] KIM J, UNIVERSITY I, CHOI C, et al. Damage prediction using heavy rain risk assessment: (1) estimation of heavy rain damage risk index [J]. *Korean Society of Hazard Mitigation*, 2017, 17(2): 361-370.
- [35] FRANCIS R, BEKERA B. A metric and frameworks for resilience analysis of engineered and infrastructure systems [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2014, 121: 90-103.
- [36] 中国城市规划设计研究院. 2021年度中国主要城市道路网密度与运行状态监测报告 [R/OL]. (2021-05-26) [2022-11-17]. <https://www.caupd.com/think/zixun/detail/786.html>.

tion. This paper classifies The types of reactivation of co-seismic landslides are classified as slope toe erosion type and slope surface rainfall type according to the location of the deposit where the deformation of co-seismic landslides is reactivated and the main triggering factors. Based on InSAR technology, UAV multi-phase aerial photography and ground survey data, the deformation characteristics, process and causes of the landslide in Qinglingou and Shabacun are analysed respectively. The toe of slope type mainly deforms and reactivates in the mode of “gully erosion – slope slip – slope retreat”; the surface of slope type is deformed and reactivated in the mode of “particle transport – infiltration enhancement – particle coarsening – slip surface development”. The application of InSAR technology to the monitoring of large – scale and long-time series deformation of co-seismic landslides is not only an effective means for the study of deformation and reactivation of co-seismic landslides, but also of great significance for the evaluation, prediction and prevention of geological hazards.

Keywords: co-seismic landslide; deformation characteristics; reactivation mode; InSAR; Wenchuan earthquake

(上接第 36 页)

- [37] 国家能源局. 2020 年全国电力可靠性年度报告[R/OL]. (2021-10-09) [2022-11-17]. <http://prpq.nea.gov.cn/uploads/file1/20211009/616107fe94a8e.pdf>.
- [38] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2020 年城市建设统计年鉴[EB/OL]. (2021-10-12) [2022-11-17]. <https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgnr/sjfb/tjxx/jstjnj/index.html>.
- [39] 河南省人民政府新闻办公室. 新闻发布会直播实录[EB/OL]. (2021-08) [2022-11-17]. https://www.henan.gov.cn/ywdt/xwfb/wqhg/index_5.html.
- [40] 中国气象爱好者. 河南郑州的这场超特大暴雨, 和大台风烟花密切相关[EB/OL]. (2021-07-20) [2022-11-17]. https://mp.weixin.qq.com/s/mup_9MY1OkICtF26JDMcuA.
- [41] 国务院灾害调查组. 河南郑州“7·20”特大暴雨灾害调查报告[R/OL]. (2022-01) [2022-11-17]. <https://www.mem.gov.cn/gk/sgcc/tbzdsgdcbg/202201/P020220121639049697767.pdf>.

A Resilience Rapidity Model for Post – disaster Infrastructure ——an Illustrative Case at “7 · 20” Zhengzhou Torrential Rain Disaster

WANG Jiangbo¹, HU Qincai¹, GOU Aiping²

- (1. *College of Architecture, Nanjing Technology University, Nanjin 211816, China;*
2. *School of Ecological Technology and Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China*)

Abstract: The frequent occurrence of disasters causes great losses to cities. Infrastructure systems are fundamental to urban operation and play an important role in the productivity of cities. However the frequent occurrence of disasters causes great losses to city infrastructure systems. Urban disasters caused by extreme weather have become more frequent in recent years, placing tremendous pressure on infrastructure systems. It is critical to quantify the resilience of cities in order to face the pressures of increasing natural disasters. Resilience is a process that encompasses preparation, response, and recovery. A resilience modeling approach combining the resilience matrix approach with the press – state – response model is presented to quantify the resilience of infrastructure systems after extreme events. The method summarizes the states and priorities of the multi-stage recovery process are summarized, which can be used to select suitable indicators for specific scenarios. Based on data released at the “7 · 20” Zhengzhou torrential rain disaster press conferences, we select relevant indicators to explore the infrastructure resilience in this disaster, which helps to supplement local disaster recovery and preparedness.

Keywords: disaster resilience; RM framework; PSR model; infrastructure systems