

山地城市交通关键基础设施韧性风险评价体系研究

黄博亚^{1,2,3}, 龚华凤^{1,2,3}, 张潇丹^{1,2,3}, 陈俊成^{1,2,3}, 徐嗣轩⁴

[1. 林同校国际工程咨询(中国)有限公司, 重庆市 401121; 2. 重庆市山地城市可持续交通工程技术研究中心, 重庆市 401121; 3. 重庆市首席(龚华凤)专家工作室, 重庆市 401121; 4. 东南大学, 江苏 南京 211189]

摘要: 城市道路交通基础设施的高质量建设是城市可持续发展和民生安全的基本保障。山地城市由于其特殊的地形地貌, 局限的用地布局和功能, 敏感的生态环境等, 导致山地城市道路交通基础设施存在立体交通占比大, 桥梁、隧道数量多, 交通线网布局紧凑, 可替代通道少, 基础设施新旧更替明显等特征。加之山地城市易发的自然和地质灾害等问题, 导致山地城市道路交通基础设施系统相较于平原城市更加脆弱。采用文献计量分析方法, 对山地城市基础设施韧性有关研究进展进行梳理和分析, 并以桥梁、隧道和城市道路3类山地城市关键基础设施为研究对象, 梳理和归纳可能的风险场景和风险因素, 从抵抗能力、吸收能力和恢复能力3个维度构建山地城市道路交通关键基础设施韧性风险评价体系。

关键词: 山地城市; 道路交通基础设施; 韧性风险; 评价体系

中图分类号: U491.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)02-0011-06

Study on Resilience Risk Assessment System of Critical Infrastructure for Transportation in Mountainous Cities

HUANG Boya^{1,2,3}, GONG Huafeng^{1,2,3}, ZHANG Xiaodan^{1,2,3}, CHEN Juncheng^{1,2,3}, XU Sixuan⁴

[1. T.y. Lin International Engineering Consulting (China) Co., Ltd., Chongqing 401121, China; 2. Chongqing Mountainous City Sustainable Transportation Engineering and Technology Research Center, Chongqing 401121, China; 3. Chongqing Chief (GONG Huafeng) Expert Studio, Chongqing 401121, China; 4. Southeast University, Nanjing 211189, China]

Abstract: The high-quality construction of urban road transportation infrastructure is the basic guarantee of sustainable urban development and people's livelihood security. In the mountainous cities, due to the special topography, limited land layout and function, sensitive ecological environment and so on, the road traffic infrastructure of mountainous cities has the characteristics of large three-dimensional traffic proportion, large number of bridges and tunnels, compact transportation network layout, few alternative channels, and obvious replacement of new and old infrastructure. In addition, the mountainous cities are prone to natural and geological disasters and other problems, resulting in the road traffic infrastructure system in the mountainous cities more vulnerable than the plain cities. The bibliometric analysis method is adopted to sort out and analyze the research progress related to the resilience of infrastructure in mountainous cities. Focusing on three critical infrastructure types of bridges, tunnels and urban roads, the possible risk scenarios and risk factors are sorted out and summarized. The resilience risk assessment system for the critical infrastructure of mountainous urban road transportation is constructed from three dimensions of resistance, absorption and resilience.

Keywords: mountainous cities; road transportation infrastructure; resilience risk; assessment system

0 引言

道路交通基础设施是城市基础设施的重要环节, 城市交通基础设施的韧性对于确保城市的可持

续发展和居民的生活质量至关重要。山地城市与平原城市相比, 因其特殊的地形地貌、敏感的生态环境、紧凑的空间结构与功能布局, 导致山地城市交通基础设施系统具有立体交通占比大, 桥梁、隧道、涵洞数量多, 交通线网布局紧凑, 可替代通道少, 交通基础设施新旧更替明显等特征。此外, 山区易发的气象与地质灾害等问题, 进一步导致山地城市交通基础设施系统相较于平原城市更加脆弱^[1]。虽然, 通过新建交通基础设施可以缓解短时间或短距离内

收稿日期: 2024-03-29

基金项目: 重庆市建设科技计划项目(城科字2022第6-6)

作者简介: 黄博亚(1990—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事交通规划工作。

通信作者: 龚华凤(1972—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 从事交通工程设计研究工作。电子信箱: gonghuafeng@tylin.com.cn

的道路交通问题,但当某个关键基础设施发生故障(如重大自然灾害或突发事件),且短时间内无法疏导时,这种“故障”将会导致整个基础设施系统的级联失效甚至瘫痪,并造成重大的社会经济损失^[2]。因此,推进安全、韧性的道路交通基础设施建设是山地城市现代道路交通建设的重中之重,且具有独特的研究价值和实践意义。

城市韧性概念源于生态学中的“生态系统韧性”,生态学家Holling于20世纪70年代首次提出了该概念,用以描述生态系统在扰动下保持结构、功能的能力^[3]。后经不断演化发展,韧性理论被广泛应用于工程学、社会经济学、心理学等诸多领域。Bhavathrathan等^[4]针对道路交通进行研究时,则将其系统韧性定义为系统能在保证原态稳定前提下所能接受的最大外界冲击扰动量。评估和提升道路交通基础设施韧性是当前城市发展的重要课题。Ouyang等^[5]提出了基于复杂网络理论的韧性分析框架;唐少虎等^[6]利用模糊层次分析法对暴雨内涝下的城市道路交通韧性进行了评估。Freckleton等^[7]评估了交通网络在自然灾害和人为灾难(包括战争和恐怖主义活动)之后的恢复力和弹性。这些研究为韧性评估提供了多种视角和技术方法,但仍存在操作性差、指标选取有争议等问题。山地城市由于其独特的自然地理环境,道路交通基础设施面临着更大的脆弱性和风险^[8],因此,需要对山地城市开展针对性的研究和评估。刘亚丽等^[9]针对山地城市的自然气候与地理空间,与海绵城市理念结合,构建了山地城市立体防涝体系。曾标等^[10]针对云南高原八个地级市构建了山地城市韧性测度评价指标。但目前的研究往往局限于单一灾害视角或特定基础设施案例,缺乏对城市道路、桥梁与隧道等多元基础设施体系以及不同灾害情况的综合考量,韧性评价涉及多重复杂因素,单从特定指标出发难以全面反映实际情况。因此,从多视角深入探讨山地城市道路交通基础设施韧性评价体系,全面系统地分析影响山地城市道路交通基础设施韧性的各项关键因素对促进山地城市的可持续发展至关重要。

1 山地城市的定义

山地是地理学上的一种地貌类型,具有一定海拔和坡度。仅从狭义上来对山地进行类别划分,山地分为低山、中山、高山和极高山;从广义上出发,山地分为3类:一是指海拔高度1 000~8 000 m的高原;

二是海拔高度为500~1 000 m的山地;三是海拔高度为200~500 m的丘陵^[11]。

全球对山地城市都有独到的理解和定义。如日本将其命名为“Slide Cities”,欧美国家则称之为“Hillside Cities”,中国重庆因城市建设于倾斜的山坡地带而被誉为“山城”^[12]。然而,山地城市的规划建设很大程度上受到了高程、垂直梯度、周边地形地貌以及环境等因素的影响,因此仅以“坡度”为依据来定义山地城市是具有局限性的。黄光宇^[13]针对这一缺陷对山地城市提出了一个更为全面的相对概念,即“泛指城市的选址和建设在山地地域上的城市,形成于平原城市不同的空间形态和环境特征。”基于这一定义,山地城市可分为两大类:第一类是山地坡度对于城市规划建设的影响远远超过高程的影响,且城市建设用地的坡度大于50°的城市,诸如重庆、遵义、攀枝花、兰州和香港等;第二类是城市建设用地坡度小于50°,从地貌上看与平原地区相似,但城市周围的地形和自然环境对城市的规划发展布局有重大的影响,诸如贵阳、桂林和昆明等。考虑广义上山地城市的影响特征,国内城市学学者从海拔高度、地形地貌特点和周边环境等方面对山地城市进行了分类,将山地城市分为7种类型^[14],见表1。本文所指的山地城市是指“山区城市”中的“坡地城市”,即忽略高度对城市规划的影响,城市建设地点选择在起伏不平的坡地上。

表1 山地城市分类标准选取

一级指标	二级指标	三级指标	是否定义为山地城市
高海拔城市	山区城市	坡地城市	是
		平地城市	是
	平原城市	坡地城市	是
		平地城市	是
低海拔城市	山区城市	坡地城市	是
		平地城市	是
	平原城市	坡地城市	是
		平地城市	否

2 山地城市基础设施韧性研究

2.1 基于CiteSpace的山地城市基础设施韧性研究趋势分析

本文采用文献计量分析方法,使用CiteSpace 6.2软件对山地城市基础设施韧性有关研究进行梳理和分析。以中国知网(CNKI)为数据资料来源,搜索6个关键词:山地城市基础设施、基础设施韧性、韧性

城市指标体系、山地城市韧性、山地城市灾害和山地韧性,检索时间为2005年1月至2024年3月,检索出包含期刊、硕士论文及会议论文共计1 162篇文献,经去重筛选后剩余有效文献为1 076篇。

基于CiteSpace 6.2研究趋势及聚类分析结果,见图1,山地城市基础设施韧性研究可以分为3个阶段:(1)2005—2008年,该研究阶段重点关注城市空间、用地及城市特征对基础设施建设的影响;(2)2009—2017年,该研究阶段主要关注山地城市基础设施的量化研究,包括通过建模等方式对山地城市特殊的地形地貌进行模拟,并增加了城市交通领域的研究;(3)2018—2024年,由于全球环境复杂化,自然灾害频发,城市脆弱性更加显著,这一阶段研究主要关注山地城市基础设施建设与维护中面临的复杂性与不确定性,且研究对象从单一基础设施个体扩展到社区或片区基础设施系统的研究。

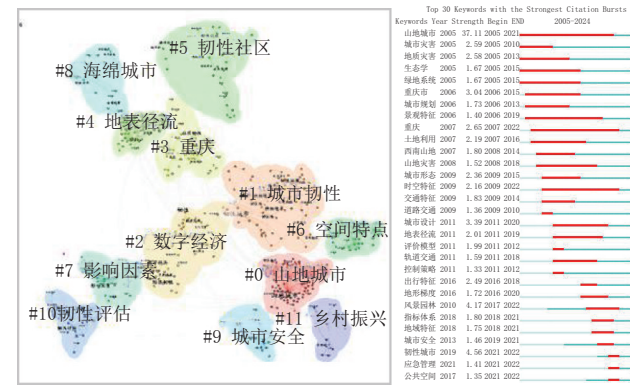


图1 基于CiteSpace的山地城市基础设施韧性研究趋势与关键词

2.2 山地城市道路交通基础设施韧性理论

交通基础设施的韧性一般指:交通基础设施系统抵抗、减少和吸收扰动(冲击、中断或灾难)的影响,保持可接受的服务水平(静态韧性),并在合理的时间和成本内恢复正常和平衡运行的能力(动态韧性),对应了突发事件发生前、中、后抵抗扰动的全过程^[15]。

相较于交通网络韧性定义中关注网络系统整体的功能完整性,道路交通基础设施韧性更侧重于包含公路、桥梁、隧道等设施在内的道路设施结构本身的功能完整性。Zoubir等^[16]对此的解释为:基础设施韧性指物理系统抵御风险(如降低结构能力的腐蚀和疲劳等)、最大限度减少功能损失以及减少恢复时间和恢复成本的能力。Zimmerman等^[17]在对极端天气条件下的基础设施研究中,将陆路交通基础设施韧性描述为关键脆弱点承受不利因素扰动的能力及其从受损中恢复的能力,并强调了道路交通基础

设施对其他相关设施的依赖性的影响。

综合以上观点,无论是针对交通网络系统整体的韧性定义,还是针对道路交通基础设施的韧性定义,几乎所有定义描述中都涉及到以下一个或两个部分:交通运输系统抵抗或者吸收外界扰动的能力;从受损的服务功能中恢复的能力。基于道路交通基础设施韧性的表征,见图2。其中,阴影部分面积代表由外界扰动造成的道路交通基础设施功能损失总量,主要分为Ⅰ、Ⅱ两个部分。Ⅰ部分阴影面积表示在 $t_1 \sim t_2$ 的时间段内造成的系统功能下降损失,面积越小则代表系统抵御或吸收外界扰动的能力越强。Ⅱ部分阴影面积表示在扰动结束后至系统服务能力恢复至原水平的期间内功能损失,同时 $t_1 \sim t_2$ 代表了系统在扰动后恢复正常状态所需时间,其长短与Ⅱ部分阴影面积大小共同代表了系统受损后的恢复能力。其面积越小, $t_1 \sim t_2$ 之间的时间越短,则表示系统受损后的恢复能力越强,系统恢复功能所需的时间越短。

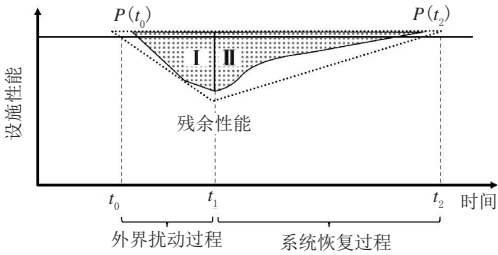


图2 道路交通基础设施韧性示意

此外,在对道路交通基础设施概念进行定义时,一般是从其自身功能和服务能力进行释义和表征。这就意味着在考虑道路交通基础设施韧性时,需要从系统性思维的角度全面考虑其所面临的多样化地域特征、复杂性环境挑战、多变性致灾因素等,充分认识多因素间的复杂动态耦合作用,充分考虑复杂致灾因子作用下的灾变演化行为的多维度特征,注重灾变演化的链式过程及其突变特征^[18]。同时,应从社会经济层面综合考虑自然条件和人为因素引起的各种致灾因子,从预防、响应、治理和反思等多方面入手提升道路交通基础设施的韧性。

3 山地城市道路交通关键基础设施韧性风险评价

3.1 评价理论和方法

本研究以桥梁、隧道和城市道路3类山地城市关键基础设施为研究对象,梳理和归纳可能发生的风险场景和风险要素,从基础设施的抵抗能力、吸收能

力和恢复能力3个维度构建韧性山地城市道路交通关键基础设施韧性风险评价体系,评价理论和框架见图3。

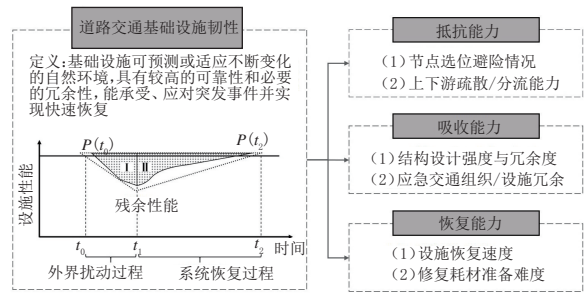


图3 道路交通基础设施韧性评价框架

其中,抵抗能力也称为系统主动防御和避险能力,其关注重点是突发事件发生前交通基础设施的选位、布设情况等方面,避开风险高的区域或场景,降低交通系统遭受损害的可能性。吸收能力指系统受到灾害事件冲击时保持一定程度运行的能力,其关注重点是突发事件发生前交通基础设施的规划建设水平、系统的冗余度、网络运行连通性和可靠性、迂回绕行程(可用线路、迂回时间、迂回距离)等方面,从而减轻 $t_0\sim t_1$ 阶段设施性能下降程度。恢复能力指系统经突发事件破坏后的修复和恢复运营的能力,其关注重点是设施自身的修复能力和整合外部力量集聚资源的能力、抢修保通难度(自身结构复杂度、施工维修条件、通达性)等方面,从而缩短 $t_1\sim t_2$ 阶段设施性能的恢复时长^[19]。

3.2 韧性风险

一般来说,基础设施韧性风险泛指各类冲击和扰动发生时,基础设施功能或服务能力的折损或丧失,其影响程度和范围往往取决于风险场景和类型。山地城市交通基础设施韧性风险可以归纳总结成以下几类。

(1)常规病害

常规病害指在设计、施工、使用和维护过程中由于材料老化、环境侵蚀、设计或施工缺陷等原因所导致的典型损伤和故障。这类风险主要会影响基础设施的功能性、安全性和耐久性。这类风险包括但不限于裂缝、腐蚀、孔洞、渗漏、沉降、磨损、剥落、冻害等。

(2)恶劣天气

恶劣天气指超出正常气候条件范围,可能对人类活动、安全、健康和环境造成负面影响的天气现象。这类风险不仅会导致道路交通基础设施结构损坏,还可能导致功能服务中断,对社会经济活动和公

共安全造成广泛影响。这类风险包括但不限于台风、强降水、极端气温、冰冻、大雾等。

(3)突发事件

突发事件是指由自然灾害、人为因素、技术故障或蓄意攻击等原因引起的,对道路交通基础设施造成严重损害或功能中断的非预期事件。这类风险偶发性因素较大,对社会正常运行和公众安全构成直接性威胁,需要立即采取应急响应措施来降低损失、恢复服务并保护公众安全。这类风险包括但不限于地震、火灾、重大交通事故、战争、疫情、恐怖袭击等。

3.3 城市道路

城市道路是山地城市中最常见的交通基础设施。道路系统的有效规划和运营能够促进城市的发展,提升城市的综合发展水平。相较于平原城市,道路在规划、设计、建设和运维等各方面都面临着更为复杂的挑战。首先,山地城市由于地质条件和地形地貌的独特性,这不仅要求道路在设计时需充分考虑地形适应性,还需要面对较高的建设成本。其次,山地城市道路极易受到滑坡、泥石流、地震等地质灾害的影响,加之脆弱的生态环境对建设活动的限制,对其在建设运营阶段灾害防控和环境保护方面提出了更高的要求。此外,由于山地城市在道路交通安全管理方面面临更大挑战,如降雨、雪天及雾天行车难度增加,因此在应对特殊情况时需采取更为精密的安全措施和维护策略。最后,山地城市道路在促进区域经济社会发展、旅游业拓展以及提供紧急救援通道等方面扮演着重要角色,其规划和建设需充分融入区域发展的整体框架。山地城市道路主要韧性风险排查见表2。

表2 山地城市道路韧性风险排查表

关键设施	风险场景	风险隐患	风险频次
城市道路	常规病害	路面裂缝	常见
		路面沉降	常见
		路基水毁	少见
		路基坍塌	少见
		危岩落石	少见
	恶劣天气	强风	常见
		强降雨	常见
		冻害	少见
	突发事件	地震	罕见
		火灾	常见
		重大交通事故	少见
		配套设施故障	常见
		恐袭、战争	罕见

山地城市公路是连接城市与外部区域的重要基础设施,相较于桥梁和隧道,公路更容易受到常规性病害的影响,同时公路作为区域交通路网系统的重要组成部分,其功能和通行能力的折损也会影响到整个路网的运行效率和分担能力。因此,山地城市公路韧性的提升关键要素应关注常规性病害问题,提高路基路面的耐久性和使用寿命,同时重点关注在恶劣天气或突发情况下公路交通运行状态,以保障公路在遭受扰动和冲击下基本通行能力的维持和灾后快速恢复能力。山地城市道路韧性评价体系见图4。

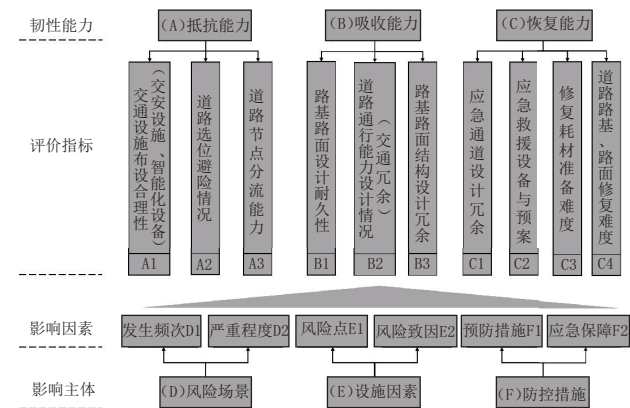


图4 山地城市道路韧性风险评价体系

3.4 桥梁

桥梁是城市道路交通系统中连接隔离地形、保障城市交通顺畅的关键基础设施。受地质条件、地形地貌、城市可利用空间等因素的影响和制约,山地城市的桥梁存在弯坡桥多、高墩大跨多、墩台形式多、桥梁所处位置地形地貌复杂,河床两侧地形高差较大等特征。此外,相较于平原城市,山地城市的桥梁占路线总长比例较大,路桥相间更为频繁,桥梁作为城市交通节点的作用更为明显。山地城市桥梁主要韧性风险排查见表3。

基于山地城市桥梁的特征和功能,结合主要韧性风险因素和发生场景,桥梁韧性评价和提升的关键因素除了解决常规性病害以外,还应重点考虑桥梁作为城市重要交通节点的选址避险能力和冗余性设计,包括其自身结构设计冗余性、上下游路段的通行能力以及应急通道设计冗余性等,以保证桥梁在受到冲击后能快速恢复基本功能。山地城市桥梁韧性评价体系见图5。

3.5 隧道

在山地城市中,隧道是实现区域内部与外界连通的重要方式,对于保障城市的交通运输、经济发展

表3 山地城市桥梁韧性风险排查表

关键设施	风险场景	风险隐患	风险频次
常规病害		结构老化	常见
		车辆超偏载	常见
		腐蚀	常见
		裂缝	常见
		附属设施失效	少见
桥梁	恶劣天气	洪水	少见
		台风	罕见
		持续性高温	少见
		船舶撞击	罕见
突发事件		火灾	少见
		地震	罕见
		重大交通事故	少见
		恐袭、战争	罕见

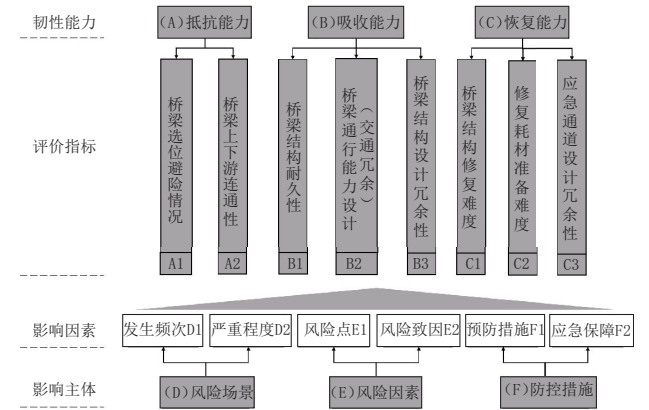


图5 山地城市桥梁韧性风险评价体系

和应急救援至关重要。山地城市隧道在规划设计阶段,往往会考虑地形条件、地质岩性、建筑景观、路网结构、工程造价等多方面因素的影响,会出现如平纵线形存在局限、平面线形弯曲、纵坡坡度大等几何特征。在功能方面,山地城市隧道除了需克服复杂的地形障碍,促进区域间的交通功能以外,还必须考虑应对复杂多变自然灾害和突发事件的抗性,实现复合性功能和用途,比如作为应急的逃生和避难场所。山地城市隧道主要韧性风险排查见表4。

山地基于山地城市隧道的特征和功能,结合主要韧性风险因素和发生场景,隧道韧性评价和提升的关键因素除了应对和解决常规病害外,还应重点考虑隧道作为重要交通枢纽的平急两用功能,提升自身结构抗灾毁能力的同时兼顾隧道内部空间环境和安全疏散设计,以保证隧道在遭受扰动和冲击后能够快速、高效地保证人员的安全撤离以及救援物资的及时送达。山地城市隧道韧性评价体系见图6。

表4 山地城市隧道韧性风险排查表

关键设施	风险场景	风险隐患	风险频次
隧道	常规病害	渗漏水	常见
		裂缝	常见
		机电设备故障	常见
		塌方	少见
		危岩落石	少见
	恶劣天气	山体滑坡	少见
		冻害	少见
		强降雨	少见
	突发事件	淤积	少见
		地震	罕见
		火灾	常见
		重大交通事故	少见
		恐袭、战争	罕见

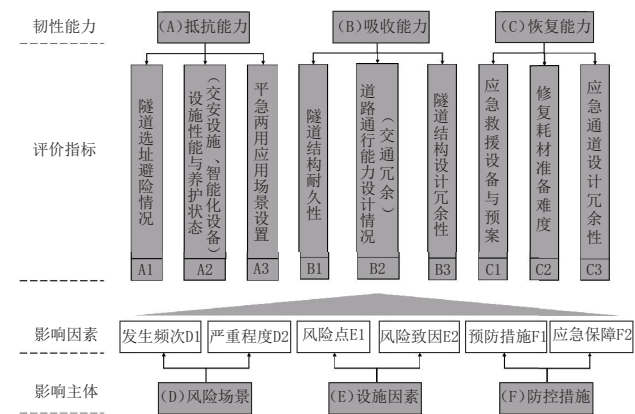


图6 山地城市隧道韧性风险评价体系

4 结 语

(1)山地城市道路交通系统是一个复杂的体系,由于其城市地形地貌的特殊性和城市规划建设中的局限性,在面对突发事件所带来的扰动时,山地城市交通设施系统的韧性与平原城市相比明显存在差异和不足。

(2)近年来针对城市基础设施韧性的研究已从单一的个体研究扩展到社区或片区基础设施系统的研究,而研究主题也从传统防灾减灾向系统风险韧性的复杂性与不确定性转变,研究领域更为宽泛和包容。

(3)本研究重点针对山地城市中桥梁、隧道和道路3类关键基础设施,梳理和归纳可能发生的风险场景和影响因素,从抵抗能力、吸收能力和恢复能力3个维度构建山地城市关键基础设施的韧性评价体

系框架,为山地城市韧性评估提供了理论支撑和指导框架。

参考文献:

[1] 徐思淑,徐坚.山地城镇规划设计理论与实践[M].北京:中国建筑工业出版社,2012.

[2] 李泽荃,刘飞翔,赵法森.城市关键基础设施网络级联失效研究进展[J].华北科技学院学报,2022(3):97-103.

[3] Alexander D E.Resilience and Disaster Risk Reduction: An Etymological Journey[J].Natural Hazards and Earth System Science, 2013, 13(11): 2707-2716.

[4] Bhavathrathan B, Patil G.Quantifying resilience using a unique critical cost on road networks subject to recurring capacity disruptions[J].Transportmetrica A:Transport Science, 2015, 11(9): 836-855.

[5] Ouyang M, Dueñas-Osorio L, Min X. A three-stage resilience analysis framework for urban infrastructure systems[J]. Structural Safety, 2012(36): 23-31.

[6] 唐少虎,朱伟,程光,等.暴雨内涝下城市道路交通系统安全韧性评估[J].中国安全科学学报,2022(7): 143-150.

[7] Freckleton D, Heaslip K, Louisell W, et al. Evaluation of resiliency of transportation networks after disasters[J].Transportation research record, 2012, 2284(1): 109-116.

[8] 王新胜,滕德贵,谢伟,等.山地城市滑坡灾害空间分布特征及影响因素分析[J].重庆大学学报,2020, 43(8): 87-96.

[9] 刘亚丽,曹春霞,龚浩.“韧性城市”与“海绵城市”耦合的山地城市防涝规划研究[J].规划师,2022, 38(11): 97-103.

[10] 曾标.云南省高原山地城市韧性测度的评价指标探讨——以八个地级市为例[C]//人民城市,规划赋能——2023中国城市规划年会论文集.北京:中国城市规划学会,2023.

[11] 《中国大百科全书》总编委会.中国大百科全书(典藏版)[M].北京:中国大百科全书出版社,2012.

[12] 曾永松,盛志前,王弟鑫.基于交通功能分析的山地城市立交选型建议——以重庆市雷家坡立交为例[J].交通科技与经济, 2017, 19(4): 20-25, 80.

[13] 黄光宇.山地城市学原理[M].北京:中国建筑工业出版社,2006.

[14] 陈俊.山地旧城改造项目强度控制的经济因素及策略[D].重庆:重庆大学,2005.

[15] 黄晓明,赵润民.道路交通基础设施韧性研究现状及展望[J].吉林大学学报(工学版),2023(6): 1529-1549.

[16] Lounis Z, Mcallister T P. Risk-Based Decision Making for Sustainable and Resilient Infrastructure Systems[J].Journal of Structural Engineering, 2016, 142(9): 1545-1556.

[17] Zimmerman R, Zhu Q, De Leon F, et al. Conceptual modeling framework to integrate resilient and interdependent infrastructure in extreme weather[J].Journal of Infrastructure Systems, 2017, 23(4): 1-13.

[18] 顾祥林,余倩倩,姜超,等.城市土木工程基础设施韧性提升理论与方法[J].工程力学,2023, 40(3): 1-13.

[19] 嵇涛,姚炎宏,黄鲜,等.城市交通韧性研究进展及未来发展趋势[J].地理科学进展,2023, 42(5): 1012-1024.