

DOI: 10.5846/stxb202107121874

石龙宇, 郑巧雅, 杨萌, 刘玲玉. 城市韧性概念、影响因素及其评估研究进展. 生态学报, 2022, 42(14): 6016-6029.

Shi L Y, Zheng Q Y, Yang M, Liu L Y. A review of definitions, influence factors and assessment of urban resilience. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(14): 6016-6029.

城市韧性概念、影响因素及其评估研究进展

石龙宇^{1,*}, 郑巧雅^{1,2}, 杨 萌^{1,2}, 刘玲玉^{1,2}

1 中国科学院城市环境研究所 城市环境与健康重点实验室, 厦门 361021

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:在城市化快速进程中,不确定性的多元干扰对城市发展造成威胁,如何增强城市吸收、抵御、适应与学习能力是亟待解决的热点议题。韧性城市作为城市应对不确定性风险的新兴理念范式,对提高城市韧性水平与应变能力具备指导意义。对韧性概念进行辨析,阐述了城市韧性的概念,并提出多要素融合、多能力转变与多时空尺度的城市韧性概念见解。基于所提出的城市韧性概念,从过程化视角系统总结了多元干扰、城市系统状态、城市应对能力对城市韧性的影响。对单领域和多领域评估进行梳理,针对基于城市韧性要素、韧性特征、韧性实现过程的三种评估指标进行具体探讨,总结与比较了定性和定量的城市韧性评估方法。基于上述分析,提出当前存在缺乏城市如何实现韧性的研究、评估指标较少关注组织要素、多干扰和多主体、评估方法缺乏机理与动态模拟的应用、理论与落地实践脱轨等问题。最后提出未来展望,即注重城市韧性过程分析,设计更具完整性与针对性的指标体系,推动研究方法科学化与动态化改进,加强形成“机制-评估-管理”的可操作性闭环。

关键词:韧性;城市;干扰;影响因素;研究进展

A review of definitions, influence factors and assessment of urban resilience

SHI Longyu^{1,*}, ZHENG Qiaoya^{1,2}, YANG Meng^{1,2}, LIU Lingyu^{1,2}

1 Key Lab of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: In the rapid urbanization process, uncertain and diverse disturbances pose a threat to urban development. Enhancing the city's ability to absorb, resist, adapt and study has become a hot topic that needs to be resolved urgently. As a new paradigm for cities to deal with uncertain risks, a resilient city has guide significance for improving urban resilience and emergency response capability. This paper discriminates resilience detail, which realized the cognitive changes from engineering, ecological, and evolutionary perspectives, then compares resilience with recovery and elasticity. It puts forward the idea about the concept of urban resilience of multi-factor integration, multi-capacity transformation, and multi-temporal and spatial scales based on the study of existing concepts of urban resilience. In this study, the concept of urban resilience is the ability of the whole urban system to optimize resilience independently in the current and future periods. It reflects an ability to face disturbances by integrating and exerting the functional role of various urban elements (including economy, society, organization, ecology, infrastructure), mobilizing the participation of multiple subjects such as urban individuals, communities, social organizations, and governments. It improves urban resilience by coping capacities of prevention, resistance, recovery, learning, adaptation, and transformation. Based on the concept of urban resilience proposed above, the paper systematically summarizes the impact of multiple disturbances, city system status, and urban coping capabilities on urban resilience from a process perspective. The single-domain and multi-domain assessments of urban resilience are

基金项目:国家自然科学基金面上项目(71874174)

收稿日期:2021-07-12; 采用日期:2021-11-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lyshi@iue.ac.cn

sorted out. Three assessment index systems based on urban resilience elements, urban resilience characteristics, and the process of urban resilience realization are discussed in detail. And qualitative and quantitative urban resilience assessment methods are summarized and compared. Through the above analysis, the paper clarified the weaknesses, such as lacking of research on how to achieve urban resilience, paying less attention to the organizational factors, diverse disturbances and multiple subjects to evaluation indicators, lacking the application of mechanism and dynamic simulation about evaluation method, derailing between theory and practice. At last, the paper put forward the research prospects. That is, further work should pay more attention to process analysis of how the city achieves resilience rather than the result of the city's resilience, and try to design a more complete and targeted indicator system by introducing multi-source data. In addition, studies should continue to promote the scientific and dynamic improvement of research methods, and aim to strengthen the formation of an operable closed loop of mechanism-evaluation-management oriented by empirical research.

Key Words: resilience; city; disturbance; influence factors; research progress

城市是一个巨大的自然-社会-经济复合系统,在其快速发展进程中形成了复杂和开放的人地关系^[1]。人口和经济活动的激增和聚集破坏了人地关系的平衡,增大干扰出现的风险,对人类当前自身利益和未来可持续性发展构成严重威胁^[2]。现今全球灾难性事件的频发映射出城市应急能力的不足,全球气候变暖^[3]、极端天气发生(高温、干旱、极端降水、强台风等)^[4]、重大自然灾害(地震、海啸等)^[5]等自然灾害干扰与军事战乱、病毒入侵等人为灾难干扰对社会经济、人类生存和社会稳定性产生极大的负面效应。例如,根据 EM-DAT 数据 1965 年至今,气候类、气象类、水文类共造成全球 361 万人死亡,受灾人数累积达 76 亿人^[6];新冠肺炎的突发掠夺了无数生命,截至 2021 年 5 月 25 日,世界卫生组织的统计数据显示全球新冠肺炎患者达 1.66 亿人,死亡人数达 345.99 万人。据联合国预测数据显示,2050 年世界城市化水平将超 70%,中国的城市人口将达到 75.8%^[7],未来城市化与人口的过度发展将预见更为突出的人地矛盾,人类所面临的未知干扰将更具挑战性。因此,如何减缓干扰所带来的负面影响,提升城市应对不确定性风险的动态适应能力是目前亟需解决的难题。

针对不确定性及频发的城市问题,相继出现了城市宜居、城市低碳、绿色城市、海绵城市、智慧城市、城市韧性等城市建设理念^[8]。相较以往的治理观念,城市韧性突破了传统硬性的城市规划与管理思维,除了关注灾害的刚性应对能力,还强调城市通过系统性的要素整合所获得的适应、变化与学习能力,注重人类参与、应对与决策的主观能动性^[9],为城市建设、管理与发展提供了新的理论范式,成为近年来城市发展的热点议题。

基于以上的现实背景,追溯前人研究成果,本文归纳了城市韧性研究趋势,对韧性、城市韧性概念内涵进行回顾与解析,基于过程化视角分析多元干扰、城市系统状态、城市应对能力对城市韧性的影响,探讨了城市韧性评估现状,并结合当前研究趋势提出未来展望。

1 概念解析

1.1 韧性概念

1.1.1 韧性概念演变

追溯韧性(resilience)语义,其最早源于词意为“恢复到原始状态”的拉丁语“resilio”^[10],随后被借鉴到意为“撤回或取消”的法语“résiler”和意为“恢复原状”的英语“resile”中^[11]。自韧性的概念提出以来,首先应用于工业领域用以描述物质的特性,表示金属、化工与建筑等物质材料在生产和利用过程中受到外力作用后仍可恢复到初始的状态,用系统恢复平衡的速度来衡量韧性^[11]。20 世纪 50 至 60 年代前后,韧性的思想融入到人类生理学、心理学中,分别描述身体物理结构的弹性和伸展能力、个体遭受消极经历或重大压力后心理能够适应并恢复^[12]。从上述可见,韧性均强调系统恢复到原始的单一稳态的能力,体现工程韧性的特点。1973 年 Holling 阐明了生态系统实现稳定性的途径是吸收扰动量级,被广泛认定为现代韧性理论的渊源^[13]。随后, Berkes 和 Folke 提出系统稳态并非唯一可存在多个^[14],打破了工程韧性的主流观点,生态韧性孕育而生,

并逐步应用于自然环境系统^[15]。20 世纪 90 年代至今,“以人为本”逐步融入韧性内涵中,研究范围由自然环境系统外延至人类社会系统,该阶段强调复合系统的学习适应能力和转变能力^[16],体现演进韧性的特点。在这一全新观点的支撑下,学界认为韧性是系统响应压力下激发的转变、适应和转变的能力^[17]。

综上,随着各领域对韧性理念的需求增加,韧性内涵不断丰富并被广泛运用于不同研究领域,均存在共性,即系统受到内外部环境的影响下不断吸收、适应、恢复、学习或更新。韧性概念范式处于不断升级优化的过程,经历了“工程韧性→生态韧性→演进韧性”的演变阶段(表 1),从而契合系统复杂性和动态性的特点。

表 1 韧性概念范式演变^[11]
Table 1 The paradigm evolution of resilience concept

	工程韧性 Engineering resilience	生态韧性 Ecological resilience	演进韧性 Evolutionary resilience
平衡认知 Cognition of bouncing forth	单一的平衡稳定状态	多种平衡稳定状态	超越对平衡稳定状态的认知
能力差异 Ability variance	系统恢复至原本状态的能力	系统承受外界扰动且转化到不同状态的能力	系统响应干扰激发的转变、适应、学习、创新能力
韧性度量 Resilience measurement	回到初始平衡状态的速度	系统改变自身结构之前所能吸收的干扰量级	系统吸收干扰、自组织学习和重组能力度量
理论思想 Theoretical support	工程思维	生态学思维	系统论思维,适应性循环
系统特征 System feature	有序的,线性的	复杂的,非线性的	混沌的,开放性,跨尺度动态交互
领域体现 Applications	工业、人体生理、心理领域	自然环境领域	人类社会领域

1.1.2 恢复、弹性与韧性的辨析

自韧性从国际学术界引入国内,由于译法的多元化、语义理解角度的不一,恢复、弹性、韧性被混为一谈,为避免概念混淆对三者进行辨析。

在概念内涵方面,一些学者对恢复、弹性与韧性的解释并无本质区别。闫海明认为恢复强调复杂适应系统对外部干扰的抵御能力、自组织能力、学习能力与适应能力^[18]。关皓明支持弹性是系统回应干扰而激发的一种变化、适应和改变的观点,系统始终处于持续动态变化的过程^[19]。但实际上,当前部分恢复、弹性的定义模糊了三者的本质特征,有必要对其进行区分。恢复是指系统经历较小规模干扰的情况下在短期内能够回归到最初的常态,弹性强调系统遭受较小或中等规模的干扰后短期内的平衡恢复能力^[20],韧性是以应对多元、多规模的干扰为导向,强调系统在变化过程中不断实现自适应、自恢复的动态平衡能力^[8]。显然,三者概念存在本质区别,在应对干扰的规模、时间及能力上各有侧重。同时三者存在联系,韧性汲取了恢复之意和弹性的平衡能力,成为系统应对干扰的最优防线,突显出能随时应对不同类型干扰、长期适应风险能力的优势。

在词汇表达与应用方面,恢复、弹性和韧性存在差异。在中文权威辞典的释义中,恢复均阐述为回复原状之意,弹性被释义为物体受外力作用变形后,除去作用力时恢复到原来形状的性质并具有伸缩性,韧性主要是指物体受外力作用不易折断,涵盖了恢复和弹性之意^[21]。在国际学界中,恢复主要表达为“recover, return, self-righting, reconstruction, bounce back, restore, resume, rebuild, re-establish”,弹性主要以“elasticity, flexibility”为关键词,学者们主要通过恢复(recover)、吸收(absorption/tolerate/resist)、适应(adaptation/adjust/flexibility)、改善(improvement/grow)、预防(prevention/avoid)、应对(coping)、缓解(mitigation)、学习(learning)、创新(innovation)等来描述韧性所囊括的能力^[22]。基于上述可知,恢复和弹性是韧性的关键组成部分和重要属性。此外,目前恢复、弹性和韧性的常用领域不同,恢复多应用于生态环境、农业领域,弹性多应用于建筑学、经济、材料领域,韧性多应用于城市、灾害与公共安全领域。

综上,恢复、弹性和韧性之间既有区别又有联系。恢复、弹性、韧性在概念内涵、词汇表达与应用方面存在实质区别,值得注意的是,三者的概念内涵是逐步丰富与提升的过程。相较恢复、弹性而言,韧性内涵呈现出

应对的干扰更为多元化、适应干扰的能力更为强大和灵活的特征,并在一定程度上包含了恢复与弹性的内涵。

1.2 城市韧性概念

2002 年联合国可持续发展全球峰会上提出城市韧性,在国际组织的推动下学者们对其概念展开探讨,目前仍无形成一致见解^[23]。韧性联盟认为城市韧性是城市具有消化和吸收外界干扰,保持原有主要特征、结构和关键功能的能力^[24]。事实上,韧性城市并非仅是恢复至原有状态的单一转变机制,亦强调通过自组织、自适应和学习能力不断循环和优化韧性能力^[25]。部分学者从城市组成要素出发,为韧性城市需完善哪些载体提供了良好思路,Jha 将城市韧性定义为由基础设施韧性、经济韧性、制度韧性和社会韧性组成的系统,同时涵盖生命线工程与社区的应急反应能力^[26],美国洛克菲勒基金认为城市韧性是个人、社区、机构、行业等组成的系统,无论是经历突发性或缓慢性干扰仍具备生存、适应和发展能力^[27]。然而,上述不能彰显城市系统的完整性,韧性城市实际上交互融合了经济、社会、基础设施、生态、制度、组织等自然与人文要素。近年来,城市韧性的时空动态变化特点受到关注,Meerow 注重时空多尺度的表达,指出城市韧性是城市系统及其所有组成的跨时空网络在受到干扰时能够保持或迅速恢复所需功能,并快速转换限制当前或未来的自适应能力^[28]。显然可见,城市韧性概念阐述不一致,其原因在于学者切入视角不一、城市系统的复杂性、综合性及动态性特点,但概念存在共性,即突出城市应对干扰的能力。

综合上述分析,城市韧性被视为复合概念,主要体现在城市韧性的多能力转变、城市环境的多要素融合、城市韧性的多时空特征(图 1)。然而,当前阐述主要关注能力转变、能力与要素复合,强调城市系统实现韧性目标的结果导向内涵,忽视了如何实现韧性的动态过程。因此,本研究认为城市韧性概念应融合城市的多能力、多要素和多时空尺度并注重分析实现韧性的过程,即城市系统在面临干扰的情况下,集成并发挥经济、社会、组织、生态、基础设施等各类城市要素的功能作用,调动城市个体、社区、社会组织、政府等多元主体参与,通过预防、抵抗、恢复、学习适应和转化等应对能力,形成在当前和未来时期城市全域自主实现并优化韧性的能力。

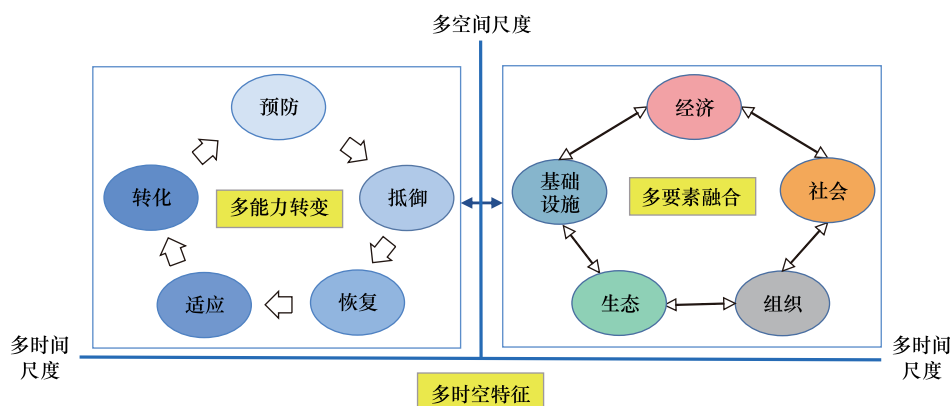


图 1 韧性城市复合概念的表现

Fig.1 The performance of the composite concept of urban resilient

2 城市韧性影响因素

影响因素辨识是构建城市韧性评估体系的关键基础,能够简化描述城市韧性水准,加以支持城市决策。根据本文所提出的城市韧性概念与已有研究,基于过程化视角归纳多元干扰、城市系统状态及应对能力对城市韧性的影响,旨在为城市韧性评估指标体系构建提供理论参考(图 2)。

2.1 多元干扰对城市韧性的影响

在韧性城市发展过程中,城市系统面临着干扰因素的挑战(表 2)。根据干扰发生并对城市产生影响作用

的速度分为急性和慢性干扰。急性干扰不确定性和突发性强,预测难度大,具备强烈的破坏冲击力。慢性干扰作用速度缓慢,虽在短时段内未对城市造成威胁,但当干扰达到一定阈值时城市系统本质属性将发生转变^[29]。根据干扰的主要来源分为自然干扰和非自然干扰。自然干扰属于城市外界因素,发生具备普遍性;非自然干扰的孕育环境是人文环境,其对城市韧性的影响具备主观能动性。

作为韧性城市的压力,干扰的压力表征体现在以下三点。其一,干扰发生的频率、强度及作用时间影响城市韧性,一般情况下当干扰发生频率越频繁、强度越大、作用时间越长,城市韧性衰退越明显。其二,城市受到的干扰众多且关系链复杂,不同的干扰组合对城市韧性产生差异化的压力。其三,干扰之间存在级联效应,一种干扰可能通过多层次的链式效应引发多种干扰,当多种干扰并存时某一干扰可能使其他干扰的状态发生变化^[30]。如 2011 年东日本大震灾伴随海啸的发生,袭击日本 474 个城市,改变了城市分布格局,造成 1575 亿美元的经济损失^[31]。显然,过度干扰严重危害人类的身心健康和社会福祉,造成巨大的经济损失,对城市系统提高韧性和可持续性造成风险。

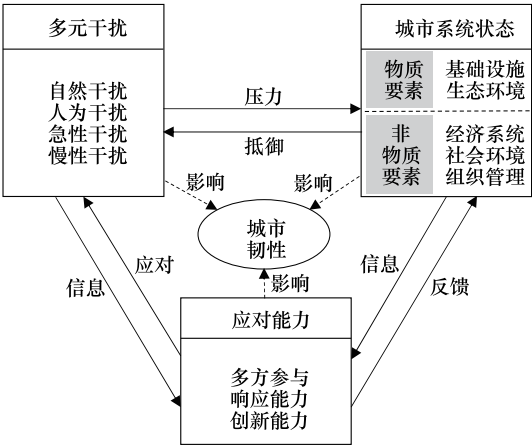


图 2 城市韧性影响因素框架
Fig.2 A framework of factors influencing urban resilience

表 2 韧性城市遭受的干扰分类

	急性 Acute disturbance	慢性 Chronic disturbance
自然干扰 Natural disturbance	洪涝、飓风、地震、火山喷发、干旱、暴雨、极端气温、沙尘暴、泥石流、滑坡、雷电、海啸	气候变化、海平面上升、自然资源枯竭、生物多样性减少、海水入侵
非自然干扰 Unnatural disturbance	突发疫情、疾病传播、军事战争、恐怖袭击、突发公共安全事件、交通事故、贸易战、科技战、核泄漏	环境污染、人口老龄化、经济危机、交通堵塞、基础设施脆弱性、失业率高、贫穷、社会和政治动荡

2.2 城市系统状态对城市韧性的影响

在面对各种变化和干扰,城市系统状态的好坏关乎其韧性水平提升与否。目前,多数学者从城市系统要素组成的角度来描述城市系统状态,主要分析物质要素(基础设施、生态)与非物质要素(经济、社会、组织)对城市韧性的影响^[32](图 3)。

2.2.1 物质要素对城市韧性的影响

(一)基础设施对城市韧性的影响

基础设施是城市的主要承灾体,属于城市抗灾的第一线,是保障城市系统韧性活力与居民正常生产生活的重要载体。城市基础设施主要包括城市建筑、交通设施、公共基础设施以及通讯设施^[32]。其中,城市建筑主要为城市人口提供居住与工作功能,Pal 等认为降低建筑物的脆弱性与提高安全性能是保障人们生命财产安全的首要屏障^[33]。交通网络在灾害救援中发挥重要作用,道路交通性能越好,越有利于救援^[34]。公共基础设施与通讯设施同外界保持物质流、信息流的联系与畅通,为城市居民提供水、电、气等能源服务,满足城市居民对教育、医疗、体育娱乐的硬件设施需求,支撑城市韧性发展。

(二)生态环境对城市韧性的影响

生态环境是协调人与城市环境系统的重要载体,通过发挥供给、调节、文化、支持等多种生态系统服务功能来集成抗干扰能力,对维护城市生态安全与提升城市韧性具有重要意义。生态环境影响城市韧性的主要因素有生态环境类型、质量及空间特征。城市生态环境主要分为城市自然环境与以人工主导的城市生态景观,

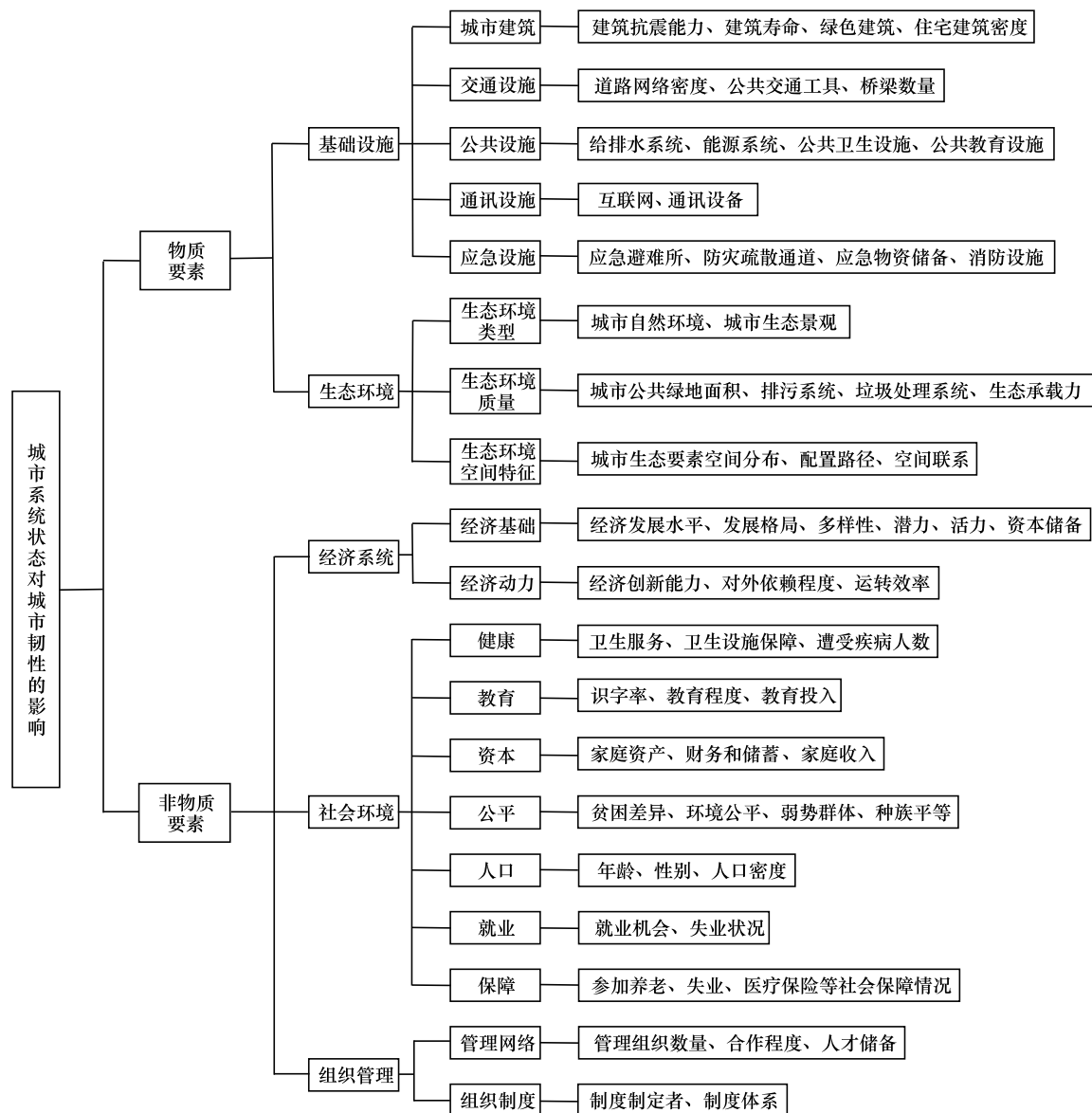


图3 城市系统状态影响城市韧性的要素框架

Fig.3 A framework of factors affecting urban resilience by environmental conditions

二者韧性程度存在差异。当城市遭受外界干扰时,相较于后者,自然生态系统表现出更为强大的抵抗力与更加迅速的恢复力^[35]。在生态环境质量方面,完善生态环境质量是减少次生灾害与提高城市韧性水平的有效途径。朱金鹤认为城市公共绿地面积锐减、排污系统与垃圾处理系统存在缺陷、能量流中断和生态系统超负荷增加城市实现韧性的风险^[36]。此外,城市韧性需注重同生态要素空间分布、配置路径和空间尺度的联系,通过构建科学合理的空间特征来保障城市空间可持续性和韧性^[37]。研究显示良好的生态网络助于增强景观连通性,提高生态系统服务价值和环境保护能力^[38]。当前生态环境建设在降低洪涝风险、缓解城市热岛效应、改善空气质量和保护生物多样性等方面得到广泛认可,成为城市规划中增加城市韧性战略的重要成分^[39]。

2.2.2 非物质要素对城市韧性的影响

(一)经济系统对城市韧性的影响

城市经济系统不仅能够为城市韧性建设提供物质基础和经济保障,同时可作为调控与维系城市韧性的动力。已有研究表明,城市经济同城市韧性呈现正相关关系,经济发展水平和经济发展格局对基础设施建设、社

会发展成熟度、城市应对干扰能力有影响^[40]。城市适应能力在一定程度上还取决于经济多样性、城市财政能力、经济活力、经济创新能力及经济潜力等相关因素^[41]。此外,城市经济在保证同外界联系紧密的情况下较少依赖于外界经济,利于城市有效地拥有更多的经济资源进而摆脱受干扰的困境^[42]。在城市经济运转过程中,生产-供应-消费链条所产生的适度经济效率加快城市韧性的形成,高速的经济效率以扩大生产规模为代价,预见更多的环境依赖和社会经济成本,从而抑制城市韧性的发展^[43]。综上可知,城市韧性受到城市经济基础状况(发展水平和格局、多样性、潜力、活力、资本储备)、经济创新能力、对外依赖程度以及运转效率的影响。

(二) 社会环境对城市韧性的影响

城市社会环境同人类生活密切相关,稳定的社会环境能够保障人民生活,维持城市韧性的发展。目前,诸多学者将社会环境具体细化后纳入衡量城市韧性状态的体系中,孙阳将人均住房面积、恩格尔系数、卫生机构床位数、参保人数等纳入城市韧性评估体系中^[44];Ribeiro 等认为社会经济、社区资本、人口统计特征、社会风险、人力资本、生活方式等是影响城市韧性的社会因素^[45];Saja 等总结出使用最广泛的社会环境韧性指标,包括社会人口特征、社会资本、社区参与、社区价值观、健康服务以及社区能力^[46]。近年来,社会公平逐渐被视为塑造韧性城市应关注的核心问题,如弱势群体的脆弱性、贫困问题、环境公平、公众决策参与等^[47]。此外,完善的社会保障覆盖、高水准的教育环境与公众素质、合理的城市人口数量及结构对城市韧性具备促进作用^[32]。综合而言,社会环境涵盖健康、教育、资本、公平、人口、就业和保障,各项要素对强化城市韧性均有贡献作用。

(三) 组织管理对城市韧性的影响

组织管理是强化城市系统韧性的关键,主要包括组织管理网络和组织制度体系。其中,组织管理网络由多方面多层级的管理组织架构组成,管理网络的组织数量及其之间的合作程度、储备人才的数量与质量对城市韧性起着重要保证作用^[48]。Huck 等指出单一的管理组织架构阻止城市韧性多层次治理网络的高效协作^[49],多层级部门与组织网络协作是当今城市应急治理的必要条件与实施城市韧性的关键^[50],尤其是横向组织网络提高了跨部门问题解决的有效性^[51]。作为促进城市韧性建设的重要手段,组织制度是发挥决策和领导作用的政府主体应对灾害所构筑高效联防的制度与章法体系。制度体系的设计与建立所考虑的延续性、稳定性、灵活性、衔接性、制定者思维片面性等均与提高城市韧性的贯彻落实息息相关^[52]。近年来,强调由“自上而下”转变为“自下而上”的权利下放制度被认定为是最适合强化城市韧性的组织制度方式^[53],是实现个体-社区-区域-国家整体韧性的有效制度路径。整体来看,多元化与协作化的组织管理模式利于保障城市结构和功能的正常运行,使受干扰的人类生产生活状态得以恢复,为人们创建安全有序的城市环境。

2.3 城市应对能力对城市韧性的影响

2.3.1 多方参与

如何高效整合多方资源、形成多方主体应对干扰的最优合力是构建韧性城市的重要环节。作为城市必不可少的主体,政府、社会组织、社区、个体共同致力于韧性城市建设。其中:(1)政府是韧性城市发展进程中关键的引导者与决策者^[54],其对城市韧性定位的准确性、管治的合理性、应急的灵活性、决策有效性等均决定了城市实现韧性的可能性。(2)社会组织为城市结构和功能的稳定运行提供有力支撑,主要体现在资金投入、社会动员和社会调控。例如,通过投资、融资等方式支持韧性城市建设项目的运营^[55];组织志愿群体、调动民间公益力量共同构建韧性城市体系;通过调配应急资源、传递媒体信息等方式来提高城市适应能力。(3)社区是韧性城市空间结构的基本单元,是城市开展全面的韧性提升工作的细胞载体。近年来,韧性社区不再限于公共管理和城市规划的组织单元,拓展为社区成员克服危机时所处的社会文化网络^[56]。(4)个体是构建韧性城市的基础实践者,亦是实现城市韧性愿景的根本受益主体。个体韧性意识与行动能力的培养利于形成强大的心理韧性,使其能从容应对干扰,如主动汲取风险安全知识、提高防灾意识、掌握逃生技能、自救与互救能力、定期参与灾害演习等^[57]。不同主体在城市中发挥各自功能,为城市注入多元化的强心剂,相互联结交织

成韧性网络,形成多元主体参与、共同协作治理的格局。

2.3.2 响应能力

响应能力的目标是降低干扰带来的韧性损失,该能力高低主要取决于城市系统的预防、恢复及学习适应的能力,三者同韧性城市生命周期中的计划、恢复和适应相对应^[58]。①预防能力处于响应干扰的第一线,包括监测与预警、应急预案制定和灾前储备。监测与预警通过 3S 技术搭建大数据平台实时掌握灾害动态数据,应急预案明确了各层级详细具体的行动策略,灾前储备能为城市在面临干扰时提供充足的应急救援物资与装备、高联动性的人力资源及冗余的基础设施^[59]。②政府是保障城市恢复力的实施主体,通过多种治理手段减缓干扰对城市造成的负面效应。如增加建筑抗震级别与加强震后抢险抢修是抗震防灾的基本手段;完善海绵城市建设和提高雨水处理能力是雨洪管理体系中的重要措施;社会资金、财政资金和绿色金融是生态文明战略背景下环境治理的经济手段^[60]。③学习适应能力是指城市不断学习积累经验,并创建出新知识,利于城市储备韧性性能以应对未来干扰。它是个动态的循环过程,可以将经验、知识与行动力转化为政策、法律、制度、标准等抽象实体,并不断整合出新的经验和知识,为韧性城市的决策提供参考依据。

2.3.3 创新能力

城市的创新能力是提高韧性的重要动力机制,当前研究主要从知识创新和技术创新进行论述。构建韧性城市离不开知识的内部创新和外部创新,内部创新强调创新知识来源于城市内部的韧性实践经验,外部创新强调新知识得益于外部知识和资源的支持^[61]。此外,凝聚不同领域的人才开展知识交流,利于韧性城市理论知识与实践的创新与完善^[23]。于技术创新而言,城市通过不断更新与技术迭代为城市实现韧性提供更多的可能性,信息通信技术、数字技术、人工智能技术、物联网技术、遥感监测技术等现代化技术取代了传统的技术方法,使城市管理者能够随时随地、高精度、高效地掌握城市韧性现状。同时,科学工作者的创新思维、创造力、城市决策者对于创新的投入对城市韧性起着一定的激发作用^[62]。

3 城市韧性评估

3.1 城市韧性评估领域

依据评估领域划分,目前韧性城市评估主要分为单领域评估和综合领域评估。单领域评估是指仅对城市中某单一要素进行评估,主要集中在基础设施、灾害、能源、网络、心理、社区、社会生态系统等方面。综合领域评估通常结合社会、经济、生态、制度、物质等多要素对城市整体韧性状况进行测评,反映城市的综合适应变化能力。由于综合领域包含的要素冗杂且范围广泛、因果链条不易挖掘、完整的数据获取难度大^[63],现有的城市韧性评估学者们更多针对单领域,强调城市如何应对单一的干扰。城市是综合社会、经济和生态等多个子环境的复合系统,时刻面临着多源干扰的挑战,因而城市韧性评估亟需注重城市的整体性、综合性和系统性,尽可能整合城市所有要素使其效能达最大化,以缓解多源干扰带来的冲击,提升城市韧性。

3.2 城市韧性评估指标体系

基于城市韧性组成要素的评估指标体系受到广泛应用。洛克菲勒基金会在全球 100 韧性城市项目中构建了 100RC 韧性框架,包含健康及福祉、经济及社会、基础设施及环境、领导力及策略四个维度,共计 50 个指标^[64];Ribeiro 等将城市弹性分为自然、经济、社会、物质和制度五个维度^[45];Xun 等从经济、社会、市政设施和生态环境四个维度构建了 28 个因子^[65]。综上,自然、社会、经济、基础设施和组织环境是城市韧性评估体系中常用的维度,由于数据可获得性的原因,自然、社会、经济、基础设施环境的指标应用较组织更为广泛。

基于城市韧性特征构建的评估指标体系属于导向型框架,有助于城市朝向具体的韧性特征发展。韧性城市的功能特征主要包括敏感性、抗扰性、适应性、包容性、效率性、创新性和连结性等^[38],结构特征主要有多样性、冗余性、坚固性、模块化等。学者们最早将坚固性和快速性纳入基于城市韧性特征的评估体系中,随后根据研究区域的发展需求逐步扩充城市韧性的基本特征^[66]。此外,有些学者将城市特征与城市组成要素相结合,目的在于通过组成要素的合理配置使城市达到相对应的韧性特征。如抗扰性、冗余性、智慧性、迅速性在

社会-政治-技术、经济和水文等方面中显现^[67];物、人、社会经济等要素的有机整合利于城市培养敏感度、应对力、交互度和成长度^[68]。

基于城市实现韧性过程的评估指标体系以时间为轴,能够量化各干扰阶段城市应对干扰的能力。Ouyang 基于抵抗、吸收和恢复三个阶段评估城市基础设施韧性^[69];Zhang 等表明当城市面临降雨诱发滑坡灾害时城市先发挥物理系统的抵御能力后发挥人类社会的反馈能力,并据此评估了深圳市灾害韧性^[70];殷为华从抵抗能力、更新能力、再定位能力和恢复能力四个维度评价长三角城市群工业韧性水平^[71]。陈丹羽借鉴安全领域中的“压力-状态-响应”模型,动态评估了黄石市响应干扰下的韧性能力^[41]。当前,城市韧性的影响因素作用链式繁多,过程机制复杂及韧性过程观点存在差异认知,因此针对韧性过程构建的评估体系较少。

当前,评估指标体系构建思路是以要素划分为主,特征与过程划分为辅,由于学者们专业与指标划分思路不同,指标选取存在较大差异,但也有常用的共性指标(表3)。从整体上看,基于城市要素、特征与实现韧性过程的三种框架所建立的指标具有一定的对应关系。基于要素的指标对应着不同的韧性城市特征,如抗扰性是最常用的特征,与大部分指标相挂钩,意味着发挥城市系统要素抵抗干扰的能力是城市保持韧性的重要途径;包容性对应着社会中对于弱势群体的关注;效率性反映的是组织通过监控体系与信息反馈迅速应对问题。在基于过程思维构建的指标体系中,状态类的指标占主要,其综合了城市各要素的指标,压力对应敏感性指标,响应主要对应组织要素方面的指标。然而,目前已有研究多数基于单一的视角构建指标框架,缺乏韧性城市要素、特征与过程的联系。实际上,识别城市要素所显现的韧性特征及其在实现韧性过程中发挥的作用对构建全面的评估指标体系具备重要意义,因而在构建指标体系时应注重将生态、经济、社会、设施与组织同城市韧性特征、过程相挂钩。从指标上看,社会要素类融合客观与主观指标,人类应对风险的态度与主观感知成为构建韧性城市的重要一环。Saja 等将社区价值观与对当地风险的了解感知程度纳入社会韧性评估中^[46],Zhong 等认为儿童的风险认知对于提高抗灾能力和适应气候变化至关重要^[72],Li 等从风险关注、收益、风险、接受和信任五方面评估中国公众风险感知情况^[73]。由于数据可获取性的限制,组织要素类、非自然干扰、脆弱性群体的相关指标运用较少,边缘化多元主体参与。未来应增加组织管理与实施效应、多元干扰、抗灾弱势群体、多元主体参与等指标,时刻追踪与创新指标以顺应时代发展需求,建立一套主客观结合、全面科学的评价指标体系。

表 3 城市韧性评估常用指标及框架对应情况

Table 3 Common indicators and correspondence of indicator frameworks for urban resilience assessment

对应要素 Elements	城市韧性评价常用指标 Common indicators for urban resilience evaluation	对应特征 Characteristics						对应过程 Process			
		敏感性	抗扰性	适应性	包容性	效率性	创新性	连结性	压力	状态	响应
生态 Ecology	人均公园绿地面积		√							√	
	空气质量优良天数		√							√	
	环保占财政支出的比重			√							√
	建成区绿化覆盖率		√							√	
	单位 GDP 二氧化硫排放量	√							√		
	单位 GDP 工业烟(粉)尘排放量	√							√		
	污水处理率			√							√
	自然灾害频率	√							√		
	一般工业固体废弃物综合利用率			√							√
	城市生活垃圾无害化处理率			√							√
	耕地面积占比		√							√	
经济 Economy	人均 GDP		√							√	
	第三产业占 GDP 的比重		√							√	
	实际利用外商投资额		√							√	
	科学支出占 GDP 比重						√			√	

对应要素 Elements	城市韧性评价常用指标 Common indicators for urban resilience evaluation	对应特征 Characteristics							对应过程 Process		
		敏感性	抗扰性	适应性	包容性	效率性	创新性	连结性	压力	状态	响应
社会 Society	人均家庭可支配收入		√							√	
	家庭资产		√							√	
	人均储蓄存款余额		√							√	
	规模以上的企业		√							√	
	防灾支出			√							√
	人均 GDP 能耗	√							√		
	在岗职工平均工资		√							√	
	第三产业就业人员比重		√							√	
	每万人在校大学生数		√							√	
	非农人口比例		√							√	
	人口自然增长率	√							√		
	公共管理与社会组织就业人员占比		√							√	
	老龄化率				√					√	
	最低生活水平人口比例				√					√	
	每千人拥有卫生人员数		√							√	
	医疗保险覆盖率		√							√	
	社会保险覆盖率		√							√	
	失业保险覆盖率		√							√	
	贫困人口占比				√					√	
	每万人拥有红十字会志愿者人数		√							√	
	对当地防灾教育程度的感知		√							√	
设施 Infrastructure	生活满意度		√							√	
	对当地风险的了解程度		√							√	
	个人抗灾的心理承受能力			√							√
	对政府抗风险能力的信任度		√							√	
	人均道路面积		√							√	
	排水管道长度		√							√	
	燃气普及率		√							√	
	每万人拥有公共汽车量		√							√	
	国际互联网用户数		√							√	
	人均公共卫生设施面积		√							√	
组织 Organization	建筑抗震等级		√							√	
	每万人拥有病床数		√							√	
	学校数量		√							√	
	数字城市管理系统覆盖率					√				√	
	防灾应急预案数量			√							√
	公共安全应急演练次数			√							√
	从事风险应对工作的城市部门比例			√							√
	重大危险源监控率					√					√
	突发公共卫生事件报告及时率					√					√
	居民组织与政府、企业、社会团体等利益相关者联盟数量							√			√

3.3 城市韧性评估方法

城市韧性评估方法分为定量和定性评估方法,按照评价思路将常用方法进行细化,它们之间存在差异,各

有利弊(表4)。整体来说,定性分析主观性强,但数据支撑和科学性不足难以刻画城市韧性的真实情况;定量分析运用数理统计,能够客观科学分析城市韧性,但缺乏主观感知的融入。因而在选取评估方法时应考虑研究领域、研究区域、研究目标、研究需求等具体实况,结合方法特点与利弊,注重城市韧性的本质特征,将定量和定性法相结合,选择科学合适的评估方法。

表 4 城市韧性评估方法说明
Table 4 Description of urban resilience assessment method

方法分类 Method classification	研究方法 Research method	方法说明 Method description	优势 Method advantage	局限 Method limitation
定性方法 Qualitative method	调研法	通过问卷调查或访谈法了解城市中的社会、组织和个体对城市韧性的关注力度和感知程度,评估城市韧性的重要性	主观性强,具备一定的可操作性	调研成本高,结果受到受访者的主观因素影响较大
	资料法	通过资料搜集掌握城市韧性概况,更多是建立概念性框架,以分类描述的方式主观评估城市韧性水平,并划分城市韧性等级	准确的资料来源具备一定的说服力,可较直观地显示韧性状况	灵活性差,对结果进行深入分析难
定量方法 Quantitative method	指标体系评价法	选取评价指标,构建指标体系,赋予指标权重,以评估城市韧性	数据简单,易获得与易操作,存取方便	可能受到权重确定的主观影响,不同案例的可比性较低
	模型模拟法	运用数学函数模型评估城市韧性状态及其变化状况,确定城市韧性要素间的相互作用关系	助于分析城市韧性的动态机制与形成机理,韧性城市系统各因素间的反馈关系以及预测城市韧性能力	函数科学性难以印证,结果验证困难,目前城市要素、韧性形成机制观点未统一
	空间分析法	运用地理信息数据、遥感数据等空间数据,通过空间叠置等空间分析法评估城市韧性特征	利于城市韧性时空动态变化的模拟及其纵向、横向对比	数据精度、信息真实性依赖于数据来源与数据质量,难以直观表征不同要素对城市韧性的影响差异

目前评估方法处于由定性分析法向成熟的定量分析法过渡的阶段。定性方法主要以概念框架或定性案例研究为评估终点,在一定程度上为定量方法提供理论依据,却较少考虑概念框架的可量化程度与实践应用性。在定量方法中,城市单领域评估方法应用较成熟,如阈值法和替代法常用于生态系统,滞后效应模型常用于城市经济领域,网络模型常用于城市基础设施和社交网络等^[32],城市综合领域评估方法较为匮乏,综合指数法是评估城市整体韧性运用最广泛的方法。学界不断完善定量方法并取得一定进展,当前主要集中于测度单一干扰下静态的城市韧性水平值与识别关键影响因素。然而,作为城市系统的长期发展目标,韧性实现需要城市各子系统的韧性累积、多因素机制耦合和反馈以及动态预警,这便是限制城市韧性定量评估方法的难点和关键点。

4 结论与展望

面对多元且频繁发生的灾害,城市韧性为指引城市发展方向、灵活应对干扰与提升抗扰能力提供全新视野,突破了为追求短期效益的传统硬性工程思维,助于客观全面看待城市系统的本质特征、内在耦合机制与动态变化。近年来城市韧性发展迅速并取得一定进展,主要集中在概念范式探索、影响因素辨析及城市韧性水平评估。本文对城市韧性相关研究进行回顾总结可知,强调多元干扰应对与灵活适应能力的“韧性”一词适用于城市系统,城市韧性所包含的“预防、抵抗、恢复、学习适应能力”内涵是学界的广泛共识,但由于城市是高度复杂的耦合系统使得城市韧性概念不一。现有研究多从城市组成要素总结城市韧性影响因素^[74],从多元干扰、城市系统状态、应对能力出发为学者们构建过程化的因素体系提供参考依据。当前城市韧性评估多

集中于单领域研究,形成以城市系统要素为主导的指标框架,评估方法逐步完善并由定性向定量过渡,定量方法主要应用于短时空尺度分析和影响因素简要辨识,但仍存在不足需进一步探索。其一,城市韧性通常被视为城市发展的目标结果,缺少对于“如何使韧性成为城市本质特征?”的回答;其二,受数据可得性限制,评估指标对组织要素、多干扰、多主体的关注较少,构建指标体系思路单一;其三,评估方法处于定性引导定量的探索阶段,存在缺乏深入的城市韧性影响因素耦合与动态模拟预测方法的瓶颈;其四,整体研究滞留于理论向实证研究的过渡阶段,难以落地实践。

因此,未来有待推进四方面内容。一是,注重城市韧性过程分析,加强探究面对多元干扰城市系统在不同干扰时期系统状态变化、响应能力及主体参与情况,明晰城市韧性如何形成的问题。二是,设计更具完整性与针对性的指标体系,强化组织管理、制度落实、非自然干扰、多元主体参与的数据支撑并将其引入指标体系,着重考虑不同主体的心理感知与公平效益。构建指标框架时应衡量指标对于城市韧性的特征及其形成过程的贡献作用,串联城市系统要素、城市韧性特征及其形成过程的三者关系,如利用矩阵法挖掘城市韧性的薄弱之处。三是,推动研究方法科学化与动态化改进,构建城市韧性非线性因果分析、影响因素交互耦合机制、预警预测模型,进一步融合定量与定性方法。四是,加强形成“机制-评估-管理”的可操作性闭环(图4),未来需思考如何将城市韧性机制与评估结果同城市管理无缝衔接,研究管理者决策对理论实证研究的反馈作用。

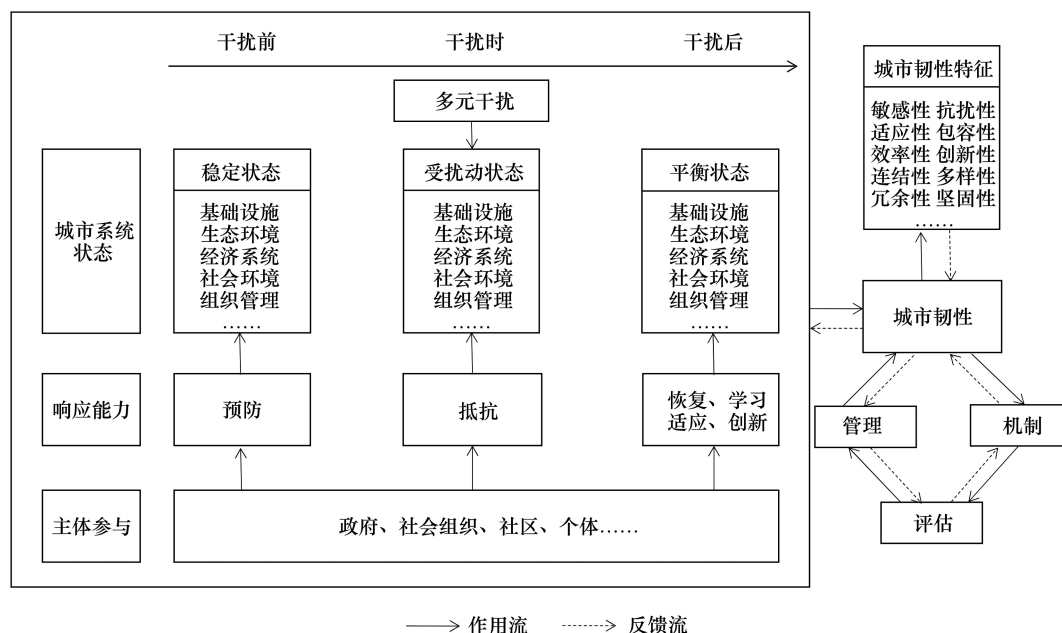


图4 城市韧性分析框架构想

Fig.4 Outlook of an analytical framework for urban resilience

参考文献 (References):

- [1] 刘焱序, 傅伯杰, 王帅, 赵文武, 李琰. 空间恢复力理论支持下的人地系统动态研究进展. 地理学报, 2020, 75(5): 891-903.
- [2] 黄晓军, 黄馨. 弹性城市及其规划框架初探. 城市规划, 2015, 39(2): 50-56.
- [3] Root T L, Price J T, Hall K R, Schneider S H, Rosenzweig C, Pounds J A. Fingerprints of global warming on wild animals and plants. Nature, 2003, 421(6918): 57-60.
- [4] Coumou D, Rahmstorf S. A decade of weather extremes. Nature Climate Change, 2012, 2(7): 491-496.
- [5] 史培军, 袁艺. 重特大自然灾害综合评估. 地理科学进展, 2014, 33(9): 1145-1151.
- [6] 刘甜, 方建, 马恒, 史培军. 全球陆地气候气象及水文灾害死亡人口时空格局及影响因素分析(1965-2016年). 自然灾害学报, 2019, 28(3): 8-16.
- [7] Desouza K C, Flanery T H. Designing, planning, and managing resilient cities: A conceptual framework. Cities, 2013, 35: 89-99.
- [8] 陈安, 师钰. 韧性城市的概念演化及评价方法研究综述. 生态城市与绿色建筑, 2018, (1): 14-19.

- [9] 李亚, 翟国方. 我国城市灾害韧性评估及其提升策略研究. 规划师, 2017, 33(8): 5-11.
- [10] Cimellaro G P, Reinhorn A M, Bruneau M. Framework for analytical quantification of disaster resilience. *Engineering Structures*, 2010, 32(11): 3639-3649.
- [11] 邵亦文, 徐江. 城市韧性: 基于国际文献综述的概念解析. 国际城市规划, 2015, 30(2): 48-54.
- [12] Lazarus R S. From psychological stress to the emotions: a history of changing outlooks. *Annual Review of Psychology*, 1993, 44: 1-21.
- [13] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4: 1-23.
- [14] Berkes F, Folke C, Colding J. *Linking Social and Ecological Systems: Management Practices and Social Mechanisms for Building Resilience*. New York: Cambridge University Press, 2000.
- [15] Holling C S. Engineering resilience versus ecological resilience//Schulze P E, ed. *Engineering Within Ecological Constraints*. Washington DC: National Academy Press, 1996.
- [16] Folke C, Carpenter S R, Walker B, Scheffer M, Chapin T, Rockstrom J. Resilience thinking: Integrating resilience, adaptability and transformability. *Ecology and Society*, 2010, 15(4): 20-20.
- [17] Walker B, Holling C S, Carpenter S R, Kinzig A. Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems. *Ecology and Society*, 2004, 9(2): 5.
- [18] 闫海明, 战金艳, 张韬. 生态系统恢复力研究进展综述. 地理科学进展, 2012, 31(3): 303-314.
- [19] 关皓明, 张平宇, 刘文新, 李静. 基于演化弹性理论的中国老工业城市经济转型过程比较. 地理学报, 2018, 73(4): 771-783.
- [20] 郭小东, 费智涛, 王志涛. 城市灾害应对的刚性、弹性与韧性. 城乡规划, 2021, (3): 35-42.
- [21] 汪辉, 徐蕴雪, 卢思琪, 任懿璐, 象伟宁. 恢复力、弹性或韧性? ——社会——生态系统及其相关研究领域中“Resilience”一词翻译之辨析. 国际城市规划, 2017, 32(4): 29-39.
- [22] Wied M, Oehmen J, Welo T. Conceptualizing resilience in engineering systems: An analysis of the literature. *Systems Engineering*, 2020, 23(1): 3-13.
- [23] 徐耀阳, 李刚, 崔胜辉, 许义平, 潘军标, 童宁军, 徐继荣, 朱永官. 韧性科学的回顾与展望: 从生态理论到城市实践. 生态学报, 2018, 38(15): 5297-5304.
- [24] Alliance R. Urban resilience research prospectus. [2007-02-24]. http://81.47.175.201/ET2050_library/docs/scenarios/urban_resilience.pdf.
- [25] 李彤玥. 韧性城市研究新进展. 国际城市规划, 2017, 32(5): 15-25.
- [26] Jha A K, Miner T W, Stanton-Geddes Z. Building urban resilience. [2013-10-13]. <https://elibrary.worldbank.org/doi/abs/10.1596/978-0-8213-8865-5>.
- [27] Spaans M, Waterhout B. Building up resilience in cities worldwide-Rotterdam as participant in the 100 Resilient Cities Programme. *Cities*, 2017, 61: 109-116.
- [28] Meerow S, Newell J P, Stults M. Defining urban resilience: A review. *Landscape and Urban Planning*, 2016, 147: 38-49.
- [29] 汪辉, 任懿璐, 卢思琪, 杜钦. 以生态智慧引导下的城市韧性应对洪涝灾害的威胁与发生. 生态学报, 2016, 36(16): 4958-4960.
- [30] 史培军, 吕丽莉, 汪明, 王静爱, 陈文方. 灾害系统: 灾害群、灾害链、灾害遭遇. 自然灾害学报, 2014, 23(6): 1-12.
- [31] Kondo T, Lizarralde G. Maladaptation, fragmentation, and other secondary effects of centralized post-disaster urban planning: The case of the 2011 “cascading” disaster in Japan. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2021, 58: 102219.
- [32] Shi Y J, Zhai G F, Xu L H, Zhou S T, Lu Y W, Liu H B, Huang W. Assessment methods of urban system resilience: From the perspective of complex adaptive system theory. *Cities*, 2021, 112: 103141.
- [33] Pal I, Bhatia S. Disaster risk governance and city resilience in Asia-Pacific region//Shaw R, Shiwaku K, Izumi T, eds. *Science and Technology in Disaster Risk Reduction in Asia*. Amsterdam: Elsevier Inc., 2018: 137-159.
- [34] Zhang J, Zhang M Y, Li G. Multi-stage composition of urban resilience and the influence of pre-disaster urban functionality on urban resilience. *Natural Hazards*, 2021, 107(1): 447-473.
- [35] 夏楚瑜, 董照樱子, 陈彬. 城市生态韧性时空变化及情景模拟研究——以杭州市为例. 生态学报, 2022, 42(1): 116-126.
- [36] 朱金鹤, 孙红雪. 中国三大城市群城市韧性时空演进与影响因素研究. 软科学, 2020, 34(2): 72-79.
- [37] Wu X, Zhang J J, Geng X L, Wang T, Wang K, Liu S D. Increasing green infrastructure-based ecological resilience in urban systems: A perspective from locating ecological and disturbance sources in a resource-based city. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 61: 102354.
- [38] Sharifi A. Resilient urban forms: A macro-scale analysis. *Cities*, 2019, 85: 1-14.
- [39] Meerow S, Newell J P. Spatial planning for multifunctional green infrastructure: Growing resilience in Detroit. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 159: 62-75.
- [40] 白立敏, 修春亮, 冯兴华, 梅大伟, 魏治. 中国城市韧性综合评估及其时空分异特征. 世界地理研究, 2019, 28(6): 77-87.
- [41] 陈丹羽. 基于压力-状态-响应模型的城市韧性评估——以湖北省黄石市为例[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [42] Cutter S L, Ash K D, Emrich C T. The geographies of community disaster resilience. *Global Environmental Change*, 2014, 29: 65-77.
- [43] Bristow D N, Mohareb E A. From the urban metabolism to the urban immune system. *Journal of Industrial Ecology*, 2020, 24(2): 300-312.
- [44] 孙阳, 张落成, 姚士谋. 基于社会生态系统视角的长三角地级城市韧性度评价. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(8): 151-158.
- [45] Ribeiro P J G, Gonçalves L A P J. Urban Resilience: a conceptual framework. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 50: 101625.
- [46] Saja A M A, Goonetilleke A, Teo M, Ziyath A M. A critical review of social resilience assessment frameworks in disaster management. *International*

- Journal of Disaster Risk Reduction, 2019, 35: 101096.
- [47] Jabareen Y. Planning the resilient city: Concepts and strategies for coping with climate change and environmental risk. *Cities*, 2013, 31: 220-229.
- [48] Shamsuddin S. Resilience resistance: The challenges and implications of urban resilience implementation. *Cities*, 2020, 103: 102763.
- [49] Huck A, Monstadt J, Driessen P. Mainstreaming resilience in urban policy making? Insights from Christchurch and Rotterdam. *Geoforum*, 2020, 117: 194-205.
- [50] Bixler R P, Lieberknecht K, Atshan S, Zutz C P, Richter S M, Belaire J A. Reframing urban governance for resilience implementation: The role of network closure and other insights from a network approach. *Cities*, 2020, 103: 102726.
- [51] Bodin Ö, Nohrstedt D. Formation and performance of collaborative disaster management networks: Evidence from a Swedish wildfire response. *Global Environmental Change*, 2016, 41: 183-194.
- [52] 肖文涛, 王鹭. 韧性视角下现代城市整体性风险防控问题研究. *中国行政管理*, 2020, (2): 123-128.
- [53] 李艳, 陈雯, 孙阳. 关联演化视角下地理学区域韧性分析的新思考. *地理研究*, 2019, 38(7): 1694-1704.
- [54] Therrien M C, Normandin J M, Paterson S, Pelling M. Mapping and weaving for urban resilience implementation: A tale of two cities. *Cities*, 2021, 108: 102931.
- [55] 田甜, 闫士忠, 辛培源, 刘彤起, 石宇. 长春市韧性城市规划建设实施路径探索. *规划师*, 2020, 36(S2): 81-84.
- [56] Shevell M C, Denov M S. A multidimensional model of resilience: Family, community, national, global and intergenerational resilience. *Child Abuse & Neglect*, 2021, 119: 105035.
- [57] Vogel C. Foreword: Resilience, vulnerability and adaptation: A cross-cutting theme of the international human dimensions programme on global environmental change. *Global Environmental Change*, 2006, 16(3): 235-236.
- [58] Linkov I, Bridges T, Creutzig F, Decker J, Fox-Lent C, Kröger W, Lambert J H, Levermann A, Montreuil B, Nathwani J, Nyer R, Renn O, Scharte B, Scheffler A, Schreurs M, Thiel-Clemen T. Changing the resilience paradigm. *Nature Climate Change*, 2014, 4(6): 407-409.
- [59] 郭小东, 苏经宇, 王志涛. 韧性理论视角下的城市安全减灾. *上海城市规划*, 2016, (1): 41-44, 71-71.
- [60] 王印红, 李萌竹. 地方政府生态环境治理注意力研究——基于 30 个省市政府工作报告(2006-2015)文本分析. *中国人口·资源与环境*, 2017, 27(2): 28-35.
- [61] Balland P A, Righy D, Boschma R. The Technological Resilience of U.S. Cities. *Papers in Evolutionary Economic Geography (PEEG)* 1419. Utrecht University, 2014.
- [62] Ernstson H, van der Leeuw S E, Redman C L, Meffert D J, Davis G, Alfsen C, Elmqvist T. Urban transitions: On urban resilience and human-dominated ecosystems. *Ambio*, 2010, 39(8): 531-545.
- [63] 郑艳, 林陈贞. 韧性城市的理论基础与评估方法. *城市*, 2017, (6): 22-28.
- [64] 邱爱军, 白玮, 关婧. 全球 100 韧性城市战略编制方法探索与创新——以四川省德阳市为例. *城市发展研究*, 2019, 26(2): 38-44, 73-73.
- [65] Xun X L, Yuan Y B. Research on the urban resilience evaluation with hybrid multiple attribute TOPSIS method: an example in China. *Natural Hazards*, 2020, 103(1): 557-577.
- [66] 翟国方, 邹亮, 马东辉, 汤放华, 刘复友, 赵志庆, 黄富民, 王培茗. 城市如何韧性. *城市规划*, 2018, 42(2): 42-46, 77-77.
- [67] Burton C G. A validation of metrics for community resilience to natural hazards and disasters using the recovery from hurricane katrina as a case study. *Annals of the Association of American Geographers*, 2015, 105(1): 67-86.
- [68] 刘严萍, 王慧飞, 钱洪伟, 王勇. 城市韧性: 内涵与评价体系研究. *灾害学*, 2019, 34(1): 8-12.
- [69] Ouyang M, Dueñas-Osorio L, Min X. A three-stage resilience analysis framework for urban infrastructure systems. *Structural Safety*, 2012, 36-37: 23-31.
- [70] Zhang X W, Song J, Peng J, Wu J S. Landslides-oriented urban disaster resilience assessment-A case study in Shenzhen, China. *Science of the Total Environment*, 2019, 661: 95-106.
- [71] 殷为华. 长三角城市群工业韧性综合评价及其空间演化研究. *学术论坛*, 2019, 42(5): 124-132.
- [72] Zhong S, Cheng Q, Zhang S W, Huang C R, Wang Z. An impact assessment of disaster education on children's flood risk perceptions in China: Policy implications for adaptation to climate extremes. *Science of the Total Environment*, 2021, 757: 143761.
- [73] Li J, Ye Z W, Zhuang J, Okada N, Huang L, Han G Y. Changes of public risk perception in China: 2008-2018. *Science of the Total Environment*, 2021, 799: 149453.
- [74] 赵瑞东, 方创琳, 刘海猛. 城市韧性研究进展与展望. *地理科学进展*, 2020, 39(10): 1717-1731.