

DOI: 10.5846/stxb202203230723

史晨辰, 朱小平, 王辰星, 吴锋. 韧性城市研究综述——基于城市复杂系统视角. 生态学报, 2023, 43(4): 1726-1737.

Shi C C, Zhu X P, Wang C X, Wu F. Review and prospect of resilient cities: From the perspective of urban complex systems. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(4): 1726-1737.

韧性城市研究综述 ——基于城市复杂系统视角

史晨辰^{1,2,3}, 朱小平⁴, 王辰星⁵, 吴锋^{2,6,*}

1 首都经济贸易大学, 城市经济与公共管理学院, 北京 100070

2 中国科学院地理科学与资源研究所, 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101

3 首都经济贸易大学, 城市群系统演化与可持续发展的决策模拟北京市重点实验室, 北京 100070

4 河北科技师范学院, 农学与生物科技学院, 秦皇岛 066004

5 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

6 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 在全球气候变化与持续城市化的背景下, 增强城市韧性是提升城市应急管理能力和实现城市系统可持续发展的重要途径。明确城市韧性的内涵、核心要素及相互作用机理, 开展城市系统韧性测度与城市系统模拟, 对提升变化环境下城市系统恢复力与韧性水平, 缓解变化环境对城市系统运行稳定性冲击压力具有重要意义。基于文献与资料分析, 全面解析韧性城市核心概念与各国韧性城市建设、管理与研究实践。此外, 研究从城市复杂系统视角探究变化环境对城市系统影响机制、测度方法与系统模拟路径。研究为韧性城市理论、方法与实证研究提供了参考, 并为我国韧性城市建设实践提供决策依据与政策建议。

关键词: 城市韧性; 复杂系统; 城市生态系统; 城市应急管理; 系统仿真

Review and prospect of resilient cities: From the perspective of urban complex systems

SHI Chenchen^{1,2,3}, ZHU Xiaoping⁴, WANG Chenxing⁵, WU Feng^{2,6,*}

1 School of Urban Economics and Public Administration, Capital University of Economics and Business, Beijing 100070, China

2 Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

3 Beijing Key Laboratory of Megaregions Sustainable Development Modeling, Capital University of Economics and Business, Beijing 100070, China

4 College of Agronomy and Biotechnology, Hebei Normal University of Science & Technology, Qinhuangdao 066004, China

5 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

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

Abstract: In the context of global climate change and continuous urbanization, enhancing urban resilience is an important way to improve emergency management capacity and achieve sustainable development of urban system. It is of great significance to clarify the connotations, key elements and core mechanisms of resilient cities, measure and simulate the resilience of urban systems, improve urban resilience in changing environment, and mitigate the risks of environmental change to urban stability. Based on literature and document analysis, this paper comprehensively analyzes the core concepts

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(72104149); 首都经济贸易大学特大城市经济社会发展研究院资助项目(ZSXM2021003); 首都经济贸易大学北京市属高校基本科研业务费专项资金资助项目(XRZ2021048, QNTD202009)

收稿日期: 2022-03-23; **网络出版日期:** 2022-09-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wufeng@igsrr.ac.cn

of resilient cities and their construction, management and research practices in various countries. Moreover, from the perspective of urban complex system, the impact mechanism, measurement method and system simulation of the environmental change in urban system are explored. It provides reference for the theoretical, methodological and empirical research of resilient cities, the decision-making basis and policy suggestions for the practice of building resilient cities in China.

Key Words: urban resilience; complex system; urban ecosystem; urban emergency management; system simulation

城市发展的诸多不确定风险,使得城市系统韧性研究成为城市管理研究与实践面临的重点与难点议题。2015年联合国可持续发展目标提出应对气候变化与生态环境变化风险的可持续城市和社区建设的要求,是增强城市韧性的重要体现^[1]。韧性被认为是可持续性的一个重要表达或内核,并被形象的称为可持续性的急诊室^[2]。此外,由于城市可持续性涵盖的内容太过繁杂,在满足当代和不损害后代的大原则下,对于城市“社会-经济-自然”复合生态系统进行综合评估难得要领。而韧性的概念来源于自然生态系统,具有一定方向性,是系统在面对扰动时的变化、阈值、跃迁等一系列综合状态。将这样一个具有方向性的概念应用于城市研究,赋予了城市可持续性研究的方向和顺序。城市可持续性,首先是面对风险能够应付、抵抗,以及不被风险吞噬,这也是韧性城市表达的第一层含义;面对风险或者扰动还可以恢复、能够适应,这是韧性城市更进一步的表现;再者,能够预知、预判、提前预防风险或扰动,这是韧性城市更高一级的表现。综合以上三个层次,韧性城市建设成为城市实现可持续发展的根本。

城市面临着众多自然与社会风险,如地震、洪水、沙尘暴等自然灾害风险,环境污染、生态破坏等生态环境风险,以及疫情传播等公共卫生风险和毒品滥用、群体性冲突事件等社会稳定风险。增强城市韧性既是策略性选择,也是全球变化背景下城市发展的新范式^[3]。例如,城市系统面对气候灾害导致韧性降低,产生城市内涝、城市热岛等现象^[4]。城市应对气候风险韧性依赖于基础设施标准、资源质量禀赋与环境治理投资^[5]。因此,需要科学诊断城市风险,针对不同类型风险与适应目标,设计韧性城市发展路径。

由于城市本身的“社会-经济-自然”复合属性,以及韧性相关的外部扰动、状态阈值、恢复力等方面测度复杂性、高维变动性及演变的不确定性,对于城市韧性的研究都必须引入复杂系统的理论,从系统组成要素、结构功能与过程演变分析入手,测度与解析城市韧性。因此,基于韧性城市理论与实证研究及国内外韧性城市建设管理实践综述,本文首先对城市韧性相关概念进行介绍,探讨“城市韧性”的内涵与外延。其次,对城市韧性测度与模拟方法进行评述。再次,基于城市复杂系统视角,对韧性城市系统组成要素及相互作用机理进行解析,提出系统评价与模拟框架。最后,总结现有韧性城市研究不足,对未来韧性城市理论与韧性城市建设实践进行展望。

1 韧性城市相关概念与实践

1.1 核心概念

1.1.1 韧性概念的发展

“韧性”一词最早出现在心理学与机械工程领域,工程韧性指工程材料遭受挤压后恢复原状的能力。在科学界“韧性”最早在生态学中出现“生态韧性”概念,它是一种对生态系统持久性的度量,指系统吸收变化和干扰,但仍然保持种群或生态系统状态变量之间相互作用关系的能力^[6]。工程韧性强调系统的结构,而生态韧性更强调系统的功能^[7]。最后“韧性”概念扩展到“社会-生态”复合系统,指复杂的社会生态系统在面对外部压力和限制时改变、适应和转化的能力,即演进韧性/社会-生态韧性,是目前城市韧性研究的主要理论依据^[8-9](图1)。

韧性通常是指在有压力(灾害冲击)的时候,系统要素及相互作用路径能不被破坏,或在受损后能否恢复

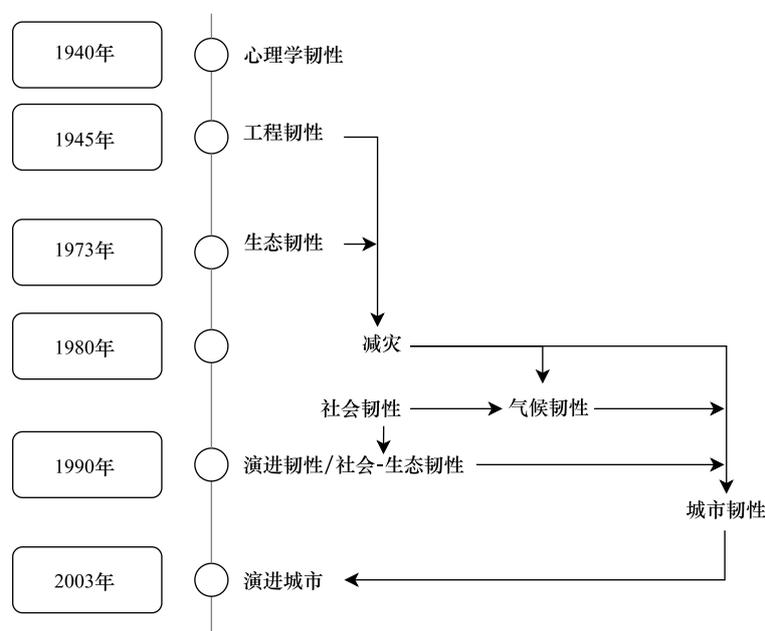


图1 韧性概念的发展

Fig.1 The development of resilience concept

原来状态,形成系统抵御压力或风险的能力。比如当城市在面对内涝时,有良好的应急预案,减少人财物的损失,在洪水发生后,城市排涝系统能较快解决风险,恢复其功能。然而对于韧性尚未形成统一定义,不同学科出于研究背景与关注核心问题差异,对韧性有着不同的概念解析。例如生态学者将韧性定义为系统遭受干扰后回复到维持其基本功能和结构的能力,用以解释生态系统及人类-生态复合系统的韧性^[10]。然而城市本身实际上是比生态更加复杂的系统,生态学只是城市复杂系统内部的社会、经济、文化、生态、环境等子系统之一。因此,探索韧性的概念化对丰富韧性城市内涵和外延,进而厘清城市韧性的机制机理至关重要。

1.1.2 城市韧性与韧性城市

与韧性概念相同,“城市韧性”的概念化也因学科与研究背景而异,也未形成统一的概念。国际上较有影响力的城市研究将城市韧性定义为城市系统在面对冲击或压力时能够保持原状或迅速恢复到期望的程度,能够适应变化,改变限制当前或未来适应能力的功能^[11-12];或城市系统主体(包括个人、社区、机构、企业和政府),在持续压力和突发冲击下存续、适应、发展的能力^[13]。虽然未形成统一定义,但城市韧性的概念已被广泛应用于气候变化适应、灾害风险降低、安全和可持续发展等城市应急管理领域^[14]。

“韧性城市”最早来源于2003年Godschalk提出的一项降低城市安全风险的全面战略,其旨在创建能够抵御自然灾害和恐怖主义的韧性城市。韧性作为复杂系统的特性之一,早期对于“社会-生态”系统韧性概念的研究,就将其置于复杂系统的理论之中^[9]。复杂系统理论描述的系统不是确定的、可预测的和机械的,而是过程相互依赖的有机系统,在多个尺度之间存在反馈,且允许这些子系统进行自组织^[15]。复杂系统的弹性是关于抵御外部冲击并为系统结构重塑与过程演化提供新的机会,促进系统的更新与新的发展轨迹出现^[9]。从这个意义上来讲,韧性城市应具有适应能力^[16],以应对复杂性与不确定性^[17]。

此外,由于不同学科不同研究背景各异,韧性定义、标准各不相同,本文对于城市韧性的探讨强调城市复杂系统应对灾害的抵抗力、恢复力和弹性,且关注的是韧性区间或范围,而非一个绝对的韧性值(判定标准)。当韧性理论被用于城市建设管理,其内涵与外延与其他当代城市概念,如安全城市、健康城市、创新城市与智慧城市等具有一定联系也具有区别。安全、健康、创新和智慧城市多从应急管理和城市发展方面进行指标构建及评价,而韧性城市更侧重城市系统的多维要素及其面对冲击的自我修复与响应能力的评估。几个表述会

存在部分评价指标的一致性,但各有对其评价主题的侧重也会存在差别。

1.2 韧性城市建设实践

在韧性城市建设行动上,韧性城市构建计划作为世界各国城市与国际组织近期管理和研究的重要需求,已成为包括公司和多边组织、非营利组织和慈善基金会、私营部门、公共部门等利益相关主体共同参与的全球城市政策项目^[18]。2010年,联合国减少灾害风险办公室发起了“让城市更具韧性”运动,旨在提高城市抗灾能力。2013年,洛克菲勒基金会启动了“全球100韧性城市”项目(我国的湖北黄石、四川德阳、浙江海盐、浙江义乌入选其中),探索韧性城市建设的实践。2015年,联合国《2030年可持续发展议程》中提出了建设包容、安全、有韧性的城市及人类住区。2016年联合国人居大会《新城市议程》进一步提出建设韧性城市,包括世界银行在内的国际组织提出了建设韧性城市的框架和思路。

在城市实践层面,2011年英国伦敦提出《管理风险和增强韧性》计划,主要防范高温和干旱灾害。2012年美国桑迪飓风发生之后,纽约市提出建设《一个更清大,更有韧性的纽约》。2013年日本出台了《国土强韧政策大纲》,主要用于应对地震海啸风险。类似的,还有《芝加哥气候行动计划》、《鹿特丹气候防护计划》等,都提出建设气候韧性城市。中国同样面临着应对气候变化,增强城市韧性的迫切需求。2017年,中国地震局提出了韧性城市建设要求。“十四五”规划“推进以人为核心的新型城镇化”首次将“建设韧性城市”纳入国家战略规划体系。此前,北京、上海等城市已将韧性城市建设任务纳入城市总体规划中。2020年开始的新冠疫情,2021年河南郑州等地的洪涝灾害,让城市管理者重新思考城市规划建设、应急治理以及可持续发展,增强城市应对风险能力的重要性。

对比目前国内外韧性城市建设实践特征与关注重点,可以发现国外城市的韧性策略更具有针对性,比如明确的面向高温、城市内涝、地震、飓风等灾害的韧性提升,其实践措施也更加具体^[19-21]。这样的针对性带来的益处可能是从研究、政策体系到具体实践措施,有利于形成良好落地性、强针对性与短期内快速提升的效果。但可能的问题在于,对于长时间序列的问题和潜在风险考虑不足。然而,中国的实践在有针对性基础上进行了综合考量,能系统总结经验,虽然发展阶段滞后,但韧性提升效果可能会更好。

2 韧性机制与测度

2.1 文献综述

通过在 Web of Science (WOS)对关键词“urban resilience”的检索发现对城市韧性的英文研究从2012年左右开始增多(图2),学科领域主要涉及生态环境科学、地理学等领域(图3)。通过在中国知网对主题“城市韧性”与“韧性城市”的检索分析,发现中文相关研究晚于国际相关研究,从2018年逐渐开始增多(图2),并主要集中在建筑科学与工程、宏观经济管理与可持续发展等领域(图3)。

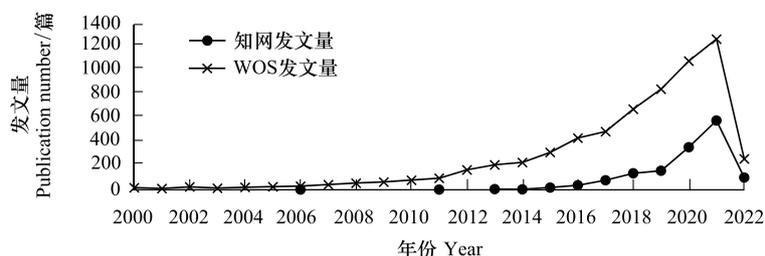


图2 韧性城市相关研究年度分布

Fig.2 Resilient cities publications over time

通过国内外相关研究文献的综述发现,对于城市韧性的作用机制,普遍归纳为“承受(扰动)-韧性(恢复)-再造(更新)”过程^[22]。韧性城市的特征包括多样性、冗余性、适应性、鲁棒性、协同性、恢复力等^[23],不同研究还强调了韧性城市的谋略性、及时性^[24],以及智慧性、自组织力、学习力^[25]等。基于对城市韧性的概

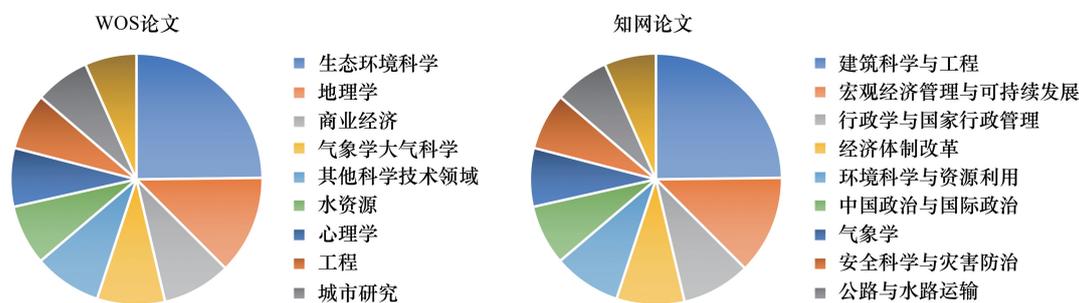


图3 韧性城市相关研究前十名学科分布

Fig.3 Top 10 research areas of resilient cities

念和作用机理的解析,多年来包括土木工程、城市规划、灾害学、地理学、生态学、经济学、政治学、社会学、公共管理学在内的各个学科针对韧性的不同维度展开各有侧重的研究,提出不同的城市韧性发展规划策略(表1)。在韧性城市的研究中需要认识到学科交叉的特性,才能更好的识别韧性构建中经济、社会、空间、物理等多重因素和广泛的利益相关者^[26]。

表1 不同学科领域对城市韧性的研究

Table 1 Research on urban resilience in different disciplines

学科领域 Discipline	研究内容 Research content	参考文献 References
物理学 Physics	工程物理应急管理	[27]
土木工程 Civil engineering and architecture	基础设施韧性增强策略,城市基础设施的韧性规划与设计	[28—29]
城市规划 Urban planning	韧性城市测度与规划	[26,30]
灾害学 Catastrophology	抵御如气候变化、自然灾害、流行病、极端天气、恐怖主义等灾害和威胁的研究。研究比较多的扰动对象是自然灾害,如地震、洪水等	[31—32]
地理学 Geography	韧性评价与时空异质性分析	[33—34]
生态学 Ecology	生态韧性测度,应对生态变化韧性	[35—36]
经济学 Economics	利用经济学模型,对城市韧性进行测度或对韧性的影响因素进行分析,给出定量参考	[37—41]
政治学 Politics	韧性的概念化、政治化,为政策设计和韧性思想提供借鉴	[42—44]
社会学 Sociology	韧性社区理论、方法、实践研究	[45—46]
公共管理学 Public administration	国内外韧性理论与实践梳理,韧性治理建议	[47—50]

2.2 城市韧性测度

城市系统是一个开放的复杂系统,不是一个单独的维度,其具有社会、经济、生态、环境与文化等多个主体要素,且与其交通、公共卫生、教育等多个公共服务设施密切联动,相应的城市韧性也体现在多个维度。一些学者认为对于韧性城市系统的测度需要承认复杂系统非线性、反馈循环、跨尺度交互、自组织等特性,与其寻求用精确的度量标准来度量韧性,或者试图制定通用的韧性指标,不如采用“经验法则”或“代理法则”^[51]。城市韧性的测度包括定性和定量测度两种方式。定性测度通过调研与访谈探索韧性构成要素,定量测度对韧性要素进行数值分析(表2)。目前对韧性的定量测度方法主要包括指标评价、韧性时间函数评价与模型模拟三种方法,其中对于韧性的指标评价还可以按照指标数量、评价尺度和评价要素分成不同子类别。

指标评价多根据模型概念框架选取适当的评价指标、赋权方法与结果表达方式,进行韧性量化统计评估。目前,构建多维复合指标体系是最常见的韧性评价方法,由于不同研究对城市韧性的评价维度、关注主题、数据可获得性的不同,构建出的指标体系也略存差异。最为常见的韧性评价从社会、经济、生态、环境等维度对城市韧性进行综合评价。从复杂系统的视角,这些维度也构成了城市复杂系统的不同子系统,城市系统在不

同维度(子系统)中的韧性及相互作用的系统综合构成了城市系统整体韧性。然而,基于指标体系的韧性测评方法,将系统的韧性视作系统要素(指标)韧性的线性加和。根据复杂系统理论,由于系统内部要素之间、子系统之间及要素与子系统之间均存在相互作用,系统韧性并不是系统要素韧性的线性加和。所以需要从复杂适应性系统的视角对韧性城市进行机理解析,并基于此建立城市韧性测度与模拟的方法。

表 2 城市韧性测度方法总结

Table 2 Urban resilience assessment summary

性质 Nature	方法 Method	子类别 Sub-category	案例 Case	参考文献 References
定性 Qualitative	问卷访谈	<ul style="list-style-type: none"> • 质性分析 • 与系统模型(多主体模型(ABM),系统动力学模型(SDM))相结合做前期模型的概念化 	<ul style="list-style-type: none"> • World Bank CityStrength • 参与式韧性评估 	[52—53]
定量 Quantitative	指标评价(数值计算方法包括:结构方程法、熵权法、层次分析法等)	<ul style="list-style-type: none"> • 单指标评价/韧性替代 • 多维复合指标体系 	<ul style="list-style-type: none"> • 用 GDP/就业率/就业结构量经济韧性 • 代理法则 • Disaster Resilience Indicators 	[54—56]
		<ul style="list-style-type: none"> • 宏观大都市地区 • 中观单个城市 • 微观社区 	<ul style="list-style-type: none"> • 伯克利研究机构大都会地区韧性指标评价体系(RCI) • 洛克菲勒基金会韧性城市指标体系 • Baseline Resilience Indicators for Communities (BRIC) 	[11, 19, 22]
		<ul style="list-style-type: none"> • 基于城市系统要素 • 基于城市韧性特征 • 基于韧性阶段过程 	<ul style="list-style-type: none"> • 社会、经济、生态等城市系统要素 • 坚固性、快速性、冗余度、资源可调配等韧性特征 • 韧性恢复力损失、弹性恢复、恢复力强化等阶段 	[57]
	韧性时间函数	<ul style="list-style-type: none"> • 系统性能曲线 • 生产函数 • 恢复用时与恢复程度 	<ul style="list-style-type: none"> • 社区抗震韧性评估 • 经济韧性曲线 • 建筑重建热力图、韧性矩阵 	[58—59]
	模型模拟	<ul style="list-style-type: none"> • 系统动力学模型 • 多主体模型 	<ul style="list-style-type: none"> • Resilience Assessment Workbook for Practitioners (Resilience Alliance) • 评估社区在地震事件中的恢复力 	[60—61]

3 韧性城市系统模拟

韧性的测度往往基于切面评估,深度不够,而通过城市系统的模拟,能动态全过程表征或测度城市韧性。从城市复杂系统视角建立系统模型,通过动力学机制对韧性城市系统进行模拟,建立城市系统内部人与自然环境之间的联系。把城市作为一个系统,刻画城市系统内部信息流、物质流、能量流等,探索其内部主体与主体间,主体与环境间的交互机制。目前国内外对韧性城市的定量研究中,更多的是构建评价指标体系进行韧性评估,或者构建经济学或数学模型^[62]进行静态的韧性评价或影响因素分析,以期为量化决策提供依据,而对韧性城市进行动态系统模拟较少。

对于城市系统的建模,一般基于系统动力学(SD)模型和基于复杂适应系统理论的多主体模型(ABM)两个角度,一个自上而下关注系统主体及结构,适用较大时间与空间尺度上的模拟;一个自下而上关注个体行为到群体响应及系统涌现过程,更适用于中微观尺度模拟。SD模型的优势在于模拟复杂系统的动态行为和评估替代政策选择,可揭示系统组分、管理策略和绩效之间的复杂反馈和非线性交互,很适合韧性城市演化模拟^[63]。现有研究中对韧性城市的系统模拟,SD模型的优势是可以阐明城市韧性要素之间的因果反馈和动

态互动机制等(表 3)。也有利用系统动力学理论中的因果循环关系对城市韧性进行评价^[52,64-65]。利用 SD 模型进行的韧性城市研究可以模拟相对大尺度(如城市模型)在长时间序列上的韧性变化,可供韧性测评或情景模拟使用。其存在的问题是信息反馈机制相对复杂,需要建立在对韧性机制的科学合理解析上,另外指标的确立主观性较强。

表 3 韧性城市系统动力学模拟案例
Table 3 System dynamic modeling of resilience cities

案例 Case	研究目的 Research aim	案例区与尺度 Study area and scale	韧性子系统 Resilience sub-system	要素及相互作用机制 Elements and interactions	来源 Source
1	城市韧性系统动力学建模方法论框架	综述文章	社会、经济、基础设施、环境	社会:人口状况、福祉、脆弱性、教育机会等,通过 SD 描述要素内在联系。经济:用就业水平,经济混合物和商业部门等揭示和描述所分析的城市系统的经济活力。基础设施:主干道、通讯、能源基础设施和关键服务的冗余,私人 and 公共交通的便利,住房负担能力等。环境:土地利用、废物管理等	[66]
2	评估城市可持续性与韧性	成都市	经济、环境、人口、资源、科技	如果资源需求超过阈值,资源型产业会受到限制;过度的城市化会对资源使用造成压力,进而加剧污染物的排放,影响居民的身体健康;随着更多的工业增长,对科学活动的投资将增加,从而提供更多的可用资源,反向促进经济增长	[67]
3	韧性城市系统模拟与情景预测	北京市	治理韧性、物质与能量韧性、社会经济韧性、基础设施韧性	城市韧性、治理韧性、物质和能源韧性、社会经济韧性、基础设施韧性、GDP 和人口等	[63]
4	评估城市韧性并进行情景分析,预测韧性情景对城市系统的影响	意大利都灵市	经济、社会、建成环境、自然环境、治理	经济:新企业、就业人数。社会:人口构成、居民健康安全。建成环境:再生、新建筑、有危险的建筑物。自然环境:透水表面、土壤消耗等。治理:风险降低、可用资金、利益相关者决策等	[68-69]
5	模拟产业系统动力,提升区域韧性	巴西南部制鞋业	经济、社会、文化、基础设施、制度	不同类型的投资将如何影响城市韧性,如在市场营销和产品开发方面的投资为产品组合带来了新产品,并需要更多合格的劳动力,这增加了城市人口的收入,反映出更高的弹性	[70]
6	气候变化造成的自然灾害对沿海特大城市的经济、社会、组织、健康和物理韧性影响	温哥华、马尼拉、曼谷和拉各斯	自然、社会经济、行政和制度	物理(人造与自然)环境、社会动态、代谢流、管理网络	[71]
7	评估自然灾害情况下饮用水供应系统的韧性演化	意大利拉奎拉省	技术、组织、经济、社会	技术子系统关注供水基础设施与替代性水源。组织子系统通过加强信息获取与分享能力增强对基础设施系统、周围环境与自然灾害的理解与认识。经济子系统关注系统内部经济资源与应对灾害时可调配经济资源。社会子系统模拟当地人口受灾害影响的时空动态	[72]

相较于 SD 模型,在中微观层面自下而上的 ABM 模型,可探索城市主体行为的动态性和不确定性,进而被广泛应用于城市复杂系统的模拟。多主体模型可进行复杂城市管理系统韧性建模,评估和测度韧性,模拟系统应对风险决策^[73]或措施^[74]等(表 4)。实际上多主体模型在生态模拟研究中,已被广泛应用于生态系统的韧性模拟^[75],对社会系统的韧性模拟也成为未来韧性城市研究的重要方向。ABM 被认为是评估复杂社会系统应对极端事件韧性的有效工具^[76]。此外,受舆情传播影响,社会是一个开放的不确定的网络系统,人和人之间会通过物理与虚拟网络相互影响。而多主体模型能够很好的刻画人与人及与环境的行为交互,为管理决策提供了从自下而上的视角。正因为这种视角,导致 ABM 模型的应用尺度有一定局限性,目前只能用来模拟社区等小尺度城市系统,模型的参数设置对实证数据要求较高,且难以一般化。

表 4 城市韧性多主体模拟案例
Table 4 Agent-based modeling of resilient cities

案例 Case	研究目的 Research aim	案例区与尺度 Study area and scale	主体 Agent	环境要素 Environment element	来源 Source
1	应对灾害的电力系统与 应急服务韧性	社区	人	大众媒体、电力供应、 应急服务等	[77]
2	欧洲社区韧性建设 (emBRACE) 复杂适应社 区韧性模型	社区	人	行为、学习、资源与 能力等	[78]
3	灾后电力共享系统	社区、100×100 晶格	房屋、带有光伏模块房 屋、车辆	通讯范围等	[74]
4	地震疏散	社区	行人	地震参数、破败的建筑、 安全区域、通道特征、建 筑等	[79]
5	与最优控制理论结合,提 供韧性评价决策支持	日本东北地区	城市	人口变量、海啸参数等	[76]
6	震后人、组织、建筑韧性	社区	人、建筑、道路	减灾政策和应急计划等	[61]
7	公共池资源管理	阿姆河	政府、农民	水、渔业资源等	[73]

系统模拟方法可对复杂城市系统进行多要素的动态模拟,为韧性规划提供定量依据。此外,由于韧性城市概念本身就采用了系统的观点,旨在提高复杂系统适应变化、应对冲击的能力,因此对韧性城市进行系统模拟可为韧性规划提供更有价值的借鉴。国内外现有的韧性城市系统模型方法中,单一的自上而下的 SD 模型难以体现异质性和个体行为的优化;单一的 ABM 模型,在微观层面上描述不同主体之间的交互,从而自下而上地产生系统行为,但难以一般化。耦合的 SD-ABM 的模型在其他城市研究领域已经有应用^[80-81],但是还没有在韧性城市研究领域的应用。结合自上而下与自下而上视角的耦合模型将成为韧性城市系统模拟的前沿方向。

4 基于复杂适应系统视角的韧性城市机理解析

复杂适应系统理论的核心观点认为微观主体的适应性造就了宏观系统涌现性和复杂性,微观层面的自适应性是宏观系统韧性的基础,然而微观系统到宏观系统之间存在复杂的高阶冗余,宏观系统的韧性是由微观系统的自适应性、宏观系统的涌现性以及宏观系统负熵过程为核心。城市本身就是开放的复杂适应系统,把韧性思维运用于城市建设,要特别关注城市系统中的主动性适应,包括感知能力,应对能力,优化能力和恢复能力^[36]。已有研究将复杂适应系统理论应用于韧性城市的规划建设与管理实践。国外学者从复杂适应系统的要素、过程、交互出发,指出为提升城市韧性需要关注城市脆弱要素,了解影响城市脆弱要素的关键过程与交互,并发展处理要素结构及交互作用的能力^[82];也有学者从复杂社会-生态系统视角,提出提升系统韧性实现可持续发展概念框架^[83]。国内学者基于复杂适应系统理论,构建城市韧性的理论框架与实施路径^[84-85];提出韧性城市设计方法和原则^[86];建立复杂城市系统韧性评价方法^[87];开发基于系统结构、系统环境、系统要素的城市韧健程度评价模型^[88];将城市网络作为复杂适应系统,建立城市网络韧性综合分析框架^[89]。

本文也尝试从复杂适应性系统的视角对韧性城市系统进行机理解析,城市系统内部的要素都是城市韧性组成部分。城市管理者需要通过在城市间与城市内部找到差距(城市体检),识别出城市系统中各要素的风险因素,即风险要素,提出规避风险的方案,因此应急管理是非常有必要的。比如在城市内涝发生时,要进行应急疏散,增强应急疏散能力就是韧性的体现。

尽管城市是复杂的适应系统,我们还是可以为了分析的目的进行抽象,将城市分成若干子系统,并将子系统按要素分解,以帮助管理者更好的设计、规划和管理韧性。在借鉴以往韧性城市理论与实证研究基础上,本文韧性城市系统分解为经济、社会、生态、基础设施、制度五个子系统,分别从城市基础、内部适应、外部扰动三

个方面分析韧性影响机制(图4)。城市复杂系统在受到外部冲击时,通过内部子系统之间交互以及子系统内部要素间交互进行内部适应,适应的结果是增强了各个子系统及城市整体系统的基础能力,这种城市基础的增强即城市韧性的体现。另外系统在内部适应的过程中,适应能力的增强也是城市韧性的体现。

具体地,对于城市经济子系统,经济韧性是城市在就业、企业数量、产业链和灾后运转等方面能力,表征城市经济系统能否在制度变动下持续促进城市生产力发展与城市居民生活水平提升。GDP、人均社会消费等经济要素是居民城市生活的基础,第二、第三产业与科学技术的投入是拉动经济系统持续增长的主要动力。经济系统韧性可能受到的扰动包括环境与气候灾害造成的经济损失等。社会韧性是社会制度方面的韧性,制度能否使城市居民生活和谐、集体行动有效,提供教育与艺术的发展,保障城市居民的物质与精神生活健康。职工工资等要素代表社会基础,通过教育支出、医保覆盖等措施适应包括住房、食品供给在内的社会需求。

基础设施为城市提供关键服务、保护和连接城市居民。在面对突发或持续性的冲击或扰动时,基础设施可为城市正常运行提供支撑,降低城市脆弱性。人均城市道路、排水管道等要素衡量基础设施方面的城市基础,通过公共服务的提供(如公共交通、城市供水供气、城市医疗)等内部适应策略,可以抵御如自然灾害、公共卫生事件等系统扰动。与基础设施的建成环境相对应的是自然生态环境,生态韧性是在自然系统方面为城市提供关键服务、保护和连接城市居民。城市生态韧性的增强需要人与自然和谐共处,节约资源、控制污染。城市绿地、水资源量等构成了城市生态的基础,通过环境保护、节能减排等适应措施抵御如高温、暴雨等气候灾害带来的生态扰动。制度韧性指城市的管理能力,特别是城市应对灾害的准备、组织、缓解、规划、行动等综合风险治理能力。城市政府机构的密度、非农人口比例等是制度韧性的基础,防灾支出、公共卫生支出等要素表征制度韧性的提升策略,以应对自然灾害、公共卫生事件等外部扰动。

需要注意的是,根据复杂适应系统理论,系统的涌现(城市韧性)是微观主体的适应性行为累积的效应,这种适应行为取决于系统内部要素间结构与交互。因此系统的总韧性不是子系统韧性的线性加和,子系统韧性也不是子系统中各要素的韧性的线性加和,一般的韧性测度方法(如构建评价指标体系)并不能体现出这种非线性。对韧性城市系统进行建模,刻画微观主体的适应性行为能模拟出宏观涌现的复杂性。

5 结论与展望

韧性城市建设是现代化治理与建设的重要组成部分。本文基于国内外对韧性城市的研究,总结韧性城市相关概念与实践,甄别城市韧性测度与模拟方法,解析城市韧性核心机理。本文的核心贡献为,从复杂适应系统角度,确定韧性城市系统边界与系统构成要素,厘清要素间相互作用机制,分析韧性的测度方法。另外在韧性城市系统模拟方面,明确韧性城市系统不是一个片面的自然系统,而是以人为主体的“自然-社会-经济”复合系统。系统中的各种要素,如自然灾害应对、资源供给等能力建设都是城市韧性的重要组成部分。韧性城市可通过系统模型方法,模拟城市系统中要素作用强度与系统韧性的相互作用关系。此外,本文对于韧性城市的研究从复杂城市系统视角出发,侧重于对城市要素/子系统的分析。根据系统动力学的观点,城市系统的结构决定了城市功能与韧性特点,因此从系统的视角分析城市要素与要素间相互作用机制对韧性城市建设有极大

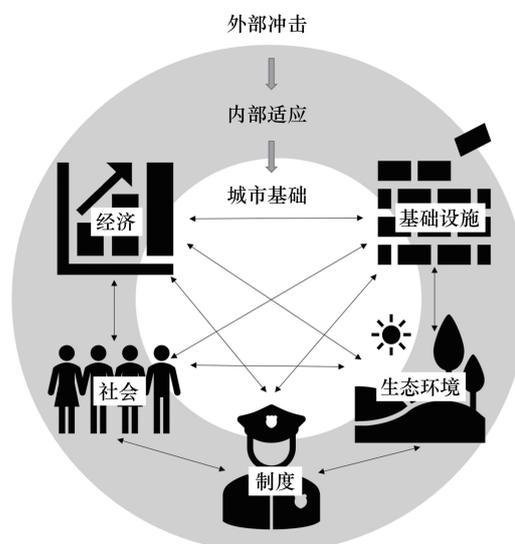


图4 城市复杂系统韧性机制

Fig.4 Resilience mechanism of urban complex system

科学指导意义。

通过文献综述发现, 目前我国的韧性城市研究以下几个方面有待加强。首先, 现有研究对韧性城市缺乏明确定义与核心机理解析, 缺乏应用性实证研究、量化研究与韧性规划后效评价。其次, 在韧性城市的定量测量中, 韧性风险评价是一个难点, 现有指标体系评价方法从不同学科与研究议题出发, 对城市韧性的评价侧重点不同, 再加上不同城市的异质性, 评价指标差异较大。另外, 现有韧性城市研究大多停留在现状评价与规划方面, 而系统模拟工具缺乏。在此需要一个耦合模型, 既能从系统视角分析整个系统的变化, 又能从个体-群体-系统涌现分析着手, 分析系统演化现象。最后, 由于国内外城市系统的自然与社会环境不同, 韧性的扰动因素、作用机理、影响强度均不尽相同, 需要更多情景化的实证研究, 来辅助城市的韧性规划、建设与管理。

参考文献 (References):

- [1] World Commission on Environment and Development. *Our Common Future*. Oxford: Oxford University Press, 1987.
- [2] Philibert Petit E. Smart city technologies plus nature-based solutions: viable and valuable resources for urban resilience//Vacca J R, ed. *Smart Cities Policies and Financing*. Amsterdam: Elsevier, 2022: 377-398.
- [3] 王祥荣, 谢玉静, 徐艺扬, 鲁逸, 李昆. 气候变化与韧性城市发展对策研究. *上海城市规划*, 2016, (1): 26-31.
- [4] 郑艳. 新型城镇化背景下我国韧性城市建设的思考. *城市与减灾*, 2017, (4): 61-65.
- [5] Zheng Y, Xie X L, Lin C Z, Wang M, He X J. Development as adaptation: framing and measuring urban resilience in Beijing. *Advances in Climate Change Research*, 2018, 9(4): 234-242.
- [6] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4(1): 1-23.
- [7] Truchy A, Angeler D G, Sponseller R A, Johnson R K, McKie B G. Linking biodiversity, ecosystem functioning and services, and ecological resilience: towards an integrative framework for improved management. *Advances in Ecological Research*, 2015, 53: 55-96.
- [8] Nunes D M, Tomé A, Pinheiro M D. Urban-centric resilience in search of theoretical stabilisation? A phased thematic and conceptual review. *Journal of Environmental Management*, 2019, 230: 282-292.
- [9] Folke C. Resilience: the emergence of a perspective for social-ecological systems analyses. *Global Environmental Change*, 2006, 16(3): 253-267.
- [10] Walker B, Salt D. 弹性思维. 彭少麟, 陈宝明, 赵琼, 译. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- [11] Cutter S L, Ash K D, Emrich C T. The geographies of community disaster resilience. *Global Environmental Change*, 2014, 29: 65-77.
- [12] Meerow S, Newell J P, Stults M. Defining urban resilience: a review. *Landscape and Urban Planning*, 2016, 147: 38-49.
- [13] Rockefeller Foundation. 100 Resilient cities. [2022-03-17]. <https://resilient-cities.sphaera.world/>.
- [14] Büyükoçkan G, Ilicak Ö, Feyzioglu O. A review of urban resilience literature. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 77: 103579.
- [15] Holland J H. *Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity*. New York: Basic Books, 1996.
- [16] Smit B, Wandel J. Adaptation, adaptive capacity and vulnerability. *Global Environmental Change*, 2006, 16(3): 282-292.
- [17] Sellberg M M, Ryan P, Borgstrom S T, Norström A V, Peterson G D. From resilience thinking to resilience planning: lessons from practice. *Journal of Environmental Management*, 2018, 217: 906-918.
- [18] Webber S, Leitner H, Sheppard E. Wheeling out urban resilience: philanthrocapitalism, marketization, and local practice. *Annals of the American Association of Geographers*, 2021, 111(2): 343-363.
- [19] The Rockefeller Foundation, ARUP. *City Resilience Index*. London: ARUP, 2015.
- [20] Bloomberg M R. *A Stronger, More Resilient New York*. New York: PlaNYC 2013.
- [21] United States. Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology. *Community resilience planning guide for buildings and infrastructure systems*, 2015.
- [22] 陈利, 朱喜钢, 孙洁. 韧性城市的基本理念、作用机制及规划愿景. *现代城市研究*, 2017, (9): 18-24.
- [23] 赵丹, 杨兵, 何永, 黄弘, 周睿. 城市韧性评价指标体系探讨——以北京市为例. *城市与减灾*, 2019, (2): 29-34.
- [24] 崔鹏, 李德智, 陈红霞, 崔庆斌. 社区韧性研究述评与展望: 概念、维度和评价. *现代城市研究*, 2018, (11): 119-125.
- [25] 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.
- [26] Jabareen Y. Planning the resilient city: concepts and strategies for coping with climate change and environmental risk. *Cities*, 2013, 31: 220-229.
- [27] Zhang N, Huang H. Resilience analysis of countries under disasters based on multisource data. *Risk Analysis*, 2018, 38(1): 31-42.
- [28] Lin P H, Wang N Y, Ellingwood B R. A risk de-aggregation framework that relates community resilience goals to building performance objectives. *Sustainable and Resilient Infrastructure*, 2016, 1(1/2): 1-13.
- [29] Zhang W L, Wang N Y. Resilience-based risk mitigation for road networks. *Structural Safety*, 2016, 62: 57-65.
- [30] 刘彦平. 城市韧性系统发展测度——基于中国 288 个城市的实证研究. *城市发展研究*, 2021, 28(6): 93-100.
- [31] Jha A K, Miner T W, Stanton-Geddes Z. *Building Urban Resilience: Principles, Tools, and Practice*. Washington: World Bank Group, 2013.
- [32] 任利生. 建设韧性城市共筑北京安全之都. *城市与减灾*, 2017, (4): 41-48.
- [33] Shi T, Qiao Y R, Zhou Q. Spatiotemporal evolution and spatial relevance of urban resilience: evidence from cities of China. *Growth and Change*,

- 2021, 52(4): 2364-2390.
- [34] 白立敏, 修春亮, 冯兴华, 梅大伟, 魏冶. 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.
- [35] Lade S J, Walker B H, Haider L J. Resilience as pathway diversity: linking systems, individual, and temporal perspectives on resilience. *Ecology and Society*, 2020, 25(3): 19.
- [36] 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.
- [37] Shutters S T, Muneeppeerakul R, Lobo J. Quantifying urban economic resilience through labour force interdependence. *Palgrave Communications*, 2015, 1: 15010.
- [38] 冯洁瑶, 刘耀龙, 王军, 张华明. 经济发展水平、环境压力对城市韧性的影响——基于山西省 11 个地级市面板数据. 生态经济, 2020, 36(9): 101-106, 163-163.
- [39] 叶堂林, 李国梁, 梁新若. 社会资本能有效提升区域经济韧性吗? ——来自我国东部三大城市群的实证分析. 经济问题探索, 2021, (5): 84-94.
- [40] 张明斗, 吴庆帮, 李维露. 产业结构变迁、全要素生产率与城市经济韧性. 郑州大学学报: 哲学社会科学版, 2021, 54(6): 51-57.
- [41] 徐圆, 张林玲. 中国城市的经济韧性及由来: 产业结构多样化视角. 财贸经济, 2019, 40(7): 110-126.
- [42] Deverteuil G, Golubchikov O, Sheridan Z. Disaster and the lived politics of the resilient city. *Geoforum*, 2021, 125: 78-86.
- [43] Sanchez A X, van der Heijden J, Osmond P. The city politics of an urban age: urban resilience conceptualisations and policies. *Palgrave Communications*, 2018, 4(1): 25.
- [44] Aldunce P, Beilin R, Howden M, Handmer J. Resilience for disaster risk management in a changing climate: practitioners' frames and practices. *Global Environmental Change*, 2015, 30: 1-11.
- [45] Shenk L, Krejci C, Passe U. Agents of change—together: using agent-based models to inspire social capital building for resilient communities. *Community Development*, 2019, 50(2): 256-272.
- [46] Varady R G, Albrecht T R, Gerlak A K, Wilder M O, Mayer B M, Zuniga-Teran A, Ernst K C, Lemos M C. The exigencies of transboundary water security: insights on community resilience. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2020, 44: 74-84.
- [47] Duit A. Resilience thinking: lessons for public administration. *Public Administration*, 2016, 94(2): 364-380.
- [48] 朱正威, 刘莹莹, 杨洋. 韧性治理: 中国韧性城市建设的实践与探索. 公共管理与政策评论, 2021, 10(3): 22-31.
- [49] 武永超. 智慧城市建设能够提升城市韧性吗? ——一项准自然实验. 公共行政评论, 2021, 14(4): 25-44.
- [50] 陈玉梅, 李康晨. 国外公共管理视角下韧性城市研究进展与实践探析. 中国行政管理, 2017, (1): 137-143.
- [51] O'Connell D, Walker B, Abel N, Grigg N. The Resilience, Adaptation and Transformation Assessment Framework: From Theory to Application. Australia: CSIRO, 2015.
- [52] Herrera H, Kopainsky B. Using system dynamics to support a participatory assessment of resilience. *Environment Systems and Decisions*, 2020, 40(3): 342-355.
- [53] Lynch C. CityStrength Diagnostic: Methodological Guidebook. Washington: World Bank, 2018.
- [54] Cutter S L, Burton C G, Emrich C T. Disaster resilience indicators for benchmarking baseline conditions. *Journal of Homeland Security and Emergency Management*, 2010, 7(1): 51.
- [55] 高齐. 产业多样性对区域经济韧性的影响——基于后金融危机时代长三角城市群的实证研究. 经济研究参考, 2022, (1): 91-104.
- [56] Carpenter S R, Westley F, Turner M G. Surrogates for resilience of social-ecological systems. *Ecosystems*, 2005, 8(8): 941-944.
- [57] 倪晓露, 黎兴强. 韧性城市评价体系的三种类型及其新的发展方向. 国际城市规划, 2021, 36(3): 76-82.
- [58] Hallegatte S. Economic Resilience: Definition and Measurement. Washington: World Bank, 2014.
- [59] 段怡嫣, 翟国方, 李文静. 城市韧性测度的国际研究进展. 国际城市规划, 2021, 36(6): 79-85.
- [60] Resilience Alliance. Assessing Resilience in Social-Ecological Systems: Workbook for Practitioners. (2010) [2022-05-07]. <http://www.resalliance.org/3871.php>.
- [61] Boston M, Liu Z, Jacques C, Mitrani-Reiser J. Towards assessing the resilience of a community in seismic events using agent based modeling// Proceedings of the 10th U.S. National Conference on Earthquake Engineering: Frontiers of Earthquake Engineering. Anchorage: NCEE, 2014.
- [62] 吴波鸿, 陈安. 韧性城市恢复力评价模型构建. 科技导报, 2018, 36(16): 94-99.
- [63] Li G J, Kou C H, Wang Y S, Yang H T. System dynamics modelling for improving urban resilience in Beijing, China. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, 161: 104954.
- [64] Brzezina N, Kopainsky B, Mathijs E. Can organic farming reduce vulnerabilities and enhance the resilience of the European food system? A critical assessment using system dynamics structural thinking tools. *Sustainability*, 2016, 8(10): 971.
- [65] Links J M, Schwartz B S, Lin S, Kanarek N, Mitrani-Reiser J, Sell T K, Watson C R, Ward D, Slemper C, Burhans R, Gill K, Igusa T, Zhao X L, Aguirre B, Trainor J, Nigg J, Inglesby T, Carbone E, Kendra J M. COPEWELL: a conceptual framework and system dynamics model for predicting community functioning and resilience after disasters. *Disaster Medicine and Public Health Preparedness*, 2018, 12(1): 127-137.
- [66] Datola G, Bottero M, De Angelis E, Romagnoli F. Operationalising resilience: a methodological framework for assessing urban resilience through system dynamics model. *Ecological Modelling*, 2022, 465: 109851.
- [67] Mou Y, Luo Y Y, Su Z R, Wang J, Liu T. Evaluating the dynamic sustainability and resilience of a hybrid urban system: case of Chengdu, China. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 291: 125719.

- [68] Bottero M, Datola G, De Angelis E. A System dynamics model and analytic network process: an integrated approach to investigate urban resilience. *Land*, 2020, 9(8): 242.
- [69] Datola G, Bottero M, De Angelis E. How urban resilience can change cities: a system dynamics model approach//Proceedings of the 19th International Conference on Computational Science and Its Applications. Saint Petersburg: Springer, 2019: 108-122.
- [70] Machado C P, Morandi M I W, Sellitto M. System dynamics and learning scenarios for process improvement and regional resilience: a study in the footwear industry of southern Brazil. *Systemic Practice and Action Research*, 2019, 32(6): 663-686.
- [71] Simonovic S, Peck A. Dynamic resilience to climate change caused natural disasters in coastal megacities quantification framework. *International Journal of Environment and Climate Change*, 2013, 3(3): 378-401.
- [72] Pagano A, Pluchinotta I, Giordano R, Vurro M. Drinking water supply in resilient cities: notes from L'Aquila earthquake case study. *Sustainable Cities and Society*, 2017, 28: 435-449.
- [73] Schlüter M, Pahl-Wostl C. Mechanisms of resilience in common-pool resource management systems: an agent-based model of water use in a river basin. *Ecology and Society*, 2007, 12(2): 4.
- [74] Brudermann T, Hofer C, Yamagata Y. Agent-based modeling—a tool for urban resilience research? //Yamagata Y, Maruyama H, eds. *Urban Resilience*. Cham: Springer, 2016: 135-151.
- [75] Egli L, Weise H, Radchuk V, Seppelt R, Grimm V. Exploring resilience with agent-based models: state of the art, knowledge gaps and recommendations for coping with multidimensionality. *Ecological Complexity*, 2019, 40: 100718.
- [76] Cimellaro G P, Koh Y, Roh H. Applying control theories and ABM to improve resilience-based design of systems//Proceedings of the 10th U.S. National Conference on Earthquake Engineering: Frontiers of Earthquake Engineering. Anchorage: NCEE, 2014.
- [77] Valinejad J, Mili L, Triantis K, von Spakovsky M, van der Wal C N. Stochastic multi-agent-based model to measure community resilience-Part 2: simulation results. (2020) [2022-05-07]. <https://arxiv.org/abs/2004.05185>.
- [78] Deeming H, Fordham M, Kuhlicke C, Pedoth C, Schneiderbauer S, Shreve C. *Framing Community Disaster Resilience: Resources, Capacities, Learning, and Action*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2019.
- [79] D'Orazio M, Quagliarini E, Bernardini G, Spalazzi L. EPES - earthquake pedestrians' evacuation simulator: a tool for predicting earthquake pedestrians' evacuation in urban outdoor scenarios. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2014, 10: 153-177.
- [80] Wang H H, Cao R X, Zeng W H. Multi-agent based and system dynamics models integrated simulation of urban commuting relevant carbon dioxide emission reduction policy in China. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 272: 122620.
- [81] Wang H H, Zhang J R, Zeng W H. Intelligent simulation of aquatic environment economic policy coupled ABM and SD models. *Science of the Total Environment*, 2018, 618: 1160-1172.
- [82] Desouza K C, Flanery T H. Designing, planning, and managing resilient cities: a conceptual framework. *Cities*, 2013, 35: 89-99.
- [83] Nyström M, Jouffray J B, Norström A V, Crona B, Jørgensen S, Carpenter S R, Bodin Ö, Galaz V, Folke C. Anatomy and resilience of the global production ecosystem. *Nature*, 2019, 575(7781): 98-108.
- [84] 朱晨光. 基于复杂适应系统理论的韧性城市建设策略研究. *中国物价*, 2022, (3): 40-43.
- [85] 容志. 构建卫生安全韧性: 应对重大突发公共卫生事件的城市治理创新. *理论与改革*, 2021, (6): 51-65.
- [86] 仇保兴. 基于复杂适应系统理论的韧性城市设计方法及原则. *城市发展研究*, 2018, 25(10): 1-3.
- [87] 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.
- [88] 陈志端, 仇保兴, 陈鸿. 韧性城市系统韧健水平提升与强健模型研究——基于复杂适应系统理论(CAS). *城市发展研究*, 2021, 28(8): 1-9.
- [89] 魏冶, 修春亮. 城市网络韧性的概念与分析框架探析. *地理科学进展*, 2020, 39(3): 488-502.
- [90] 张明斗, 冯晓青. 长三角城市群内各城市的城市韧性与经济发展水平的协调性对比研究. *城市发展研究*, 2019, 26(1): 82-91.
- [91] Tan Y T, Jiao L D, Shuai C Y, Shen L Y. A system dynamics model for simulating urban sustainability performance: a China case study. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 199: 1107-1115.
- [92] Godschalk D R. Urban hazard mitigation: creating resilient cities. *Natural Hazards Review*, 2003, 4(3): 136-143.
- [93] 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.
- [94] 杨莹, 林琳, 钟志平, 欧莹莹, 徐茜, 蒙美响, 郝珊. 基于应对公共健康危害的广州社区恢复力评价及空间分异. *地理学报*, 2019, 74(2): 266-284.
- [95] 修春亮, 魏冶, 王绮. 基于“规模—密度—形态”的大连市城市韧性评估. *地理学报*, 2018, 73(12): 2315-2328.
- [96] 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.