韧性城市研究新进展

New Progress in Study on Resilient Cities

李彤玥
Li Tongyue

摘要: 本文以“resilient”“resilience”“city”“urban”作为四个关键词进行组合,运用web of science 搜索平台(包括SCI、SSCI等引文数据库),对2000—2015年在国际主要杂志,如《城市》《景观与城市规划》《环境与城市化》等上发表的论文进行检索,加上相关经典著作、会议报告等,共收集约120份文献资料,基于此详细分析了韧性城市理论演变以及研究的主要内容。韧性的概念最早出现自1970年代的生态学,经历了从“平衡性”到“适应性”的演变,目前主要应用于灾害和气候变化、城市和区域经济韧性、城市基础设施韧性、城市恐怖袭击韧性、空间和城市规划等领域。其研究的内容主要集中在韧性城市演化机理、韧性城市评价、韧性城市规划等方面。

Abstract: The review is based on 120 articles published on the main international journals, such as *Cities*, *Landscape and Urban Planning*, *Environment and Urbanization* etc. and focuses on the theoretical evolution and major research contents. Derived from ecology of 1970s, the concept of resilience has evolved from the perspective of equilibrium to adaptation. The research mainly concentrates in the fields of hazards and climate change, urban and regional economy, urban infrastructure, terrorist attack, spatial planning and urban planning and pays attention to the evolution mechanism, evaluation and planning of resilient cities.

关键词: 韧性城市; 适应; 灾害; 气候变化; 区域经济; 机理; 评价; 城市规划

Keywords: Resilient Cities; Adaptation; Hazard; Climate Change; Regional Economy; Mechanism; Evaluation; Urban Planning

作者: 李彤玥, 清华大学建筑学院, 博士研究生。
litongyue190@163.com

引言

当代城市正面临周期性经济危机、全球温度增加、极端气候灾害、城市恐怖袭击等紧急危机威胁,科学家、政治家和城市管理工作者们纷纷开展相关研究并采取应急对策,营建韧性城市(resilient city)是其中最重要的方面。城市韧性所针对的问题,来源于外部“扰动”(disturbance)带来的危机,这些“扰动”种类繁多,但都具有“不确定性高”、“随机性强”与“破坏性大”等特点^[1]。政府间气候变化专门委员会(IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change)认为:“韧性用来描述一个系统能够吸收干扰,同时维持同样基础结构和功能的能力,也是自组织、适应压力和变化的能力”。韧性研究联盟进一步分析韧性具有三个本质特征:(1)系统能够承受一系列改变并且仍然保持功能和结构的控制力;(2)系统有能力进行自组织;(3)系统具有能够建立和促进学习自适应的能力^[2]。本文主要介绍目前灾害和气候变化韧性、城市和区域经济韧性、韧性空间和城市规划等领域韧性演化机理、评价方法及规划方法研究的进展,并基于研究现状提出展望。

1 韧性城市概念及理论演变

1.1 2008年之前的研究:从“平衡”到“适应”、从“生态系统”到“社会—生态系统”

韧性的概念最早出现于1970年代的生态学,美国佛罗里达大学生态学教授霍林(C. S. Holling)于1973年在其著作《生态系统韧性和稳定性》(*Resilience and Stability of Ecological Systems*)中提出“生态系统韧性”的概念,即“自然系统应对自然或人为原因引起的生态系统变化时的持久性”,并于1996年在《工程韧性与生态韧性》(*Engineering Resilience Versus Ecological Resilience*)一书中进一步辨析了“生态韧性”区别于传统“工程韧性”概念的特殊之处,指出这两种不同韧性定义源于对于“稳定性”和“平衡”等概念的不同理解。“工程韧性”关注单一的终极平衡状态,用“系统恢复至平衡状态的速度”这一指标进行测度,“生态韧性”则关注系统的进化和发展,用“系统在向另一个体制

(regime) 转换之前能够承受的扰动量级”这一指标进行测度^[3]。2001 年霍林在其著作《扰沌：理解人类和自然系统中的转变》(Panarchy: Understanding Transformations in Human and Natural Systems) 中首次将生态系统韧性的概念运用于人类社会系统，在此基础上提出“适应性循环”模型，描述社会—生态系统中干扰和重组之间的相互作用及其韧性变化。总体来看，源于生态学视角的韧性概念经历了“单一平衡（工程韧性）—多重平衡（生态韧性）—复杂适应性系统（适应性循环）”、从“平衡”到“适应”、从“生态系统”到“社会—生态系统”的演变。当前，基于适应性循环、强调综合系统反馈、跨尺度动态交互（扰沌）的社会生态系统韧性理论，已成为城市韧性研究所参照的基准（表 1）。

2001—2007 年间，美国城市和区域规划学者、生态学者、环境学者陆续开始关注城市系统应对灾害的韧性问题^[7-10]，韧性的概念开始被多种学科运用，具有从技术语汇到概念隐喻的多重定义^[4,11-13]。研究对象从生态系统韧性拓展至社会—生态系统韧性（定义为“系统经受变化时吸收干扰、重组，并能够从本质上保持相同的结构、识别性和反馈的能力”），具备韧性的社会生态系统具有以下特征^[14,15]：

- 系统能够承受大量变化并仍然能够控制功能和结构；
- 系统能够进行自组织以应对外部变化；
- 系统能够建立和增加学习、适应能力。

从此，韧性成为一个理解社会生态系统动力学的有效途径^[4]，用于解释城市系统面临急性冲击和慢性压力的适应性问题。城市生态系统韧性受到城市多尺度社会—经济和生物物理过程的影响，长期处于适应性循环过程中^[7]。城市化地区从开发（r）阶段向保存（k）阶段变化时，城市人口的增

长引发无节制的城市蔓延，城市模式和系统在这一过程中逐渐变得刚性和死板。城市韧性随着稳定域的收缩而降低，应对突发事件的脆弱性增加，城市从一个具有良好连通性、自然稳定的用地状态变为碎片化的用地状态，生态系统服务逐渐被城市蔓延削弱。例如，美国新奥尔良在 2005 年遭受卡特里娜飓风毁灭性打击之前的 40 年中，城市景观日趋致密、郊区蔓延、人类的干预导致滨海湿地消失、堤坝系统维护缺失等一系列缓慢的变化都推动着城市走向受飓风冲击破坏的关键性阈值^[16,17]；美国凤凰城在独栋住宅文化价值导向下，“郊区化”引导分散的城市布局，造成基础设施、建设材料和通勤能源的巨大消耗，能源危机风险增加。由于缺乏反馈，城市在慢性压力或者急性冲击的作用下进入释放（ Ω ）这一快速崩溃的动态过程中。此后，城市规划或其他恢复性干预措施使得城市在重组（ α ）阶段能够有机会改变之前的轨迹，进入生态和社会经济相互作用的自组织发展中。

1.2 2008 年至今的研究：应对长期不确定性的韧性研究

从 2008 年开始，随着人们对金融危机、全球气候变暖、极端灾害、城市恐怖袭击等危机认识的深入和应对意识的提升，世界各国来自工程学、公共管理学、计算机科学、社会学、经济学等更多学科背景的研究者加入到韧性城市的研究队伍中，短短五年中产生了大量研究成果，这些成果主要来自于美国、英国、日本等国家和区域规划、环境科学、工程学、生态学、地理学、公共管理及政策等研究领域。

韧性概念由于具有动态性、共同进化及“弹向更好的状态”等内涵特征^[18,19]，开始被广泛运用到城市系统面对未来不可完全预测的、大量的、不确定的气候变化的适应性策略研究中^[20]，成为目前研究的重点^[21]。

表 1 韧性理论视角的转变

韧性视角	工程韧性	生态系统韧性	社会—生态韧性
特点	恢复时间，效率	缓冲能力，抵挡冲击，保持功能	重组，维持，发展
关注	恢复，恒定	坚持，抗扰性	适应能力，可变换性，学习，创新
语境	邻近单一平衡状态	多重平衡	适应性循环，综合系统反馈，跨尺度动态交互
图示

资料来源：作者根据参考文献 [4-6] 整理

2 韧性城市研究进展

目前,韧性城市主要应用于灾害和气候变化、城市和区域经济韧性、城市基础设施韧性、城市恐怖袭击韧性、空间和城市规划等领域。其研究的内容主要集中在韧性城市演化机理、韧性城市评价、韧性城市规划等方面。

2.1 韧性城市演化机理研究

2.1.1 基于复杂适应性系统的韧性城市演化机理

城市作为一个复杂系统的状态是实现韧性特性的基础,部分研究从城市复杂适应系统的多重反馈出发进行韧性城市框架构建^[22](图1)。复杂系统或者复杂适应性系统(CAS)通过多方向的反馈过程创造了自组织或者涌现模式(emergent patterns),识别和研究这些反馈是框架构建的关键,包括城市要素(components)、压力源(stressors)、压力源作用结果(outcomes)、增强作用(enhancer)、抑制作用(suppressors)、作用影响(impact)、干预手段(interventions)等部分。城市系统和代理人作为“物理”和“社会”两种要素类型,与自然、技术、经济和人类四种类型压力源之间存在交互作用^[22]。其中,物理要素是物理资源(如材料)和过程(如收集传递工具及布局材料);社会要素包括人、制度和行动;自然压力源指飓风、地震、海啸及与气候变化相关的外生性灾害;技术压力源指技术体系故障及其传播扩散^[23];经济压力源指经济波动及失业、贫穷加剧等^[24];人类压力源指恐怖袭击、战争、犯罪和骚乱等^[25]。城市系统在压力源的作用下,可能出现破坏、衰退和毁灭三种损伤。人这一关键角色通过强化和抑制作用调控压力源对城市要素的影响。强化作用指增加压力源强度及其作用于城市要素的持续时间;抑制作用是降低压力源强度及其作用于城市要素的持续时间。例如,接受过良好教育的劳动力和社会资本因素将发挥抑制作用,以抑制人类压力源(恐怖袭击等)对城市造成的不利影响^[22]。

图1 韧性城市框架
资料来源：参考文献[22]

其中,城市规划是构建韧性城市的参与方式之一,其作用是在城市中布局新的要素,灵活的规划(plans that are flexible)是塑造城市韧性的重要机会,规划最基本的方面在于激活和捕捉自组织原则。公共机构应当意识到他们不能“为市民规划”,而必须“与市民规划”,使得信息和潜在的反馈能够多向流动^[22]。

2.1.2 基于演化经济地理学的韧性城市演化机理

经济地理学者也运用韧性概念研究应对不确定、不稳定和变化的城市区域经济韧性问题。起初基于“单一平衡”的“区域经济韧性”的定义是“区域经济在面对一些外生冲击时保持预先存在的平衡状态的能力”及“区域和国家经济经历外生冲击后能够回到冲击前水平的增长速率”^[26]。另一些韧性解释来自于演化理念的制度学文献,强调路径依赖和封闭稳定的系统结构,采用“多重平衡和次级持续”视角^[27],区域经济韧性的概念指“经济被锁定为一个低水平的平衡之后快速转换至一个‘更好的平衡’的能力”^[26]。

然而,近年来城市区域经济“单一平衡”和“多重平衡”假设因具有局限性而受到批判^[28],它们不能够解释韧性的地理空间分异问题。最近的研究趋势是从演化经济地理的视角定义“适应”的概念以更好地解释韧性的地理多样性和不均匀性^[29]。“适应性”是指能够通过松散和微弱的社会代理人的耦合产生多重演化动态轨迹,综合响应偶然事件,不至于破坏整个系统^[29,30]。“锁定”是“政治、经济、社会制度和关系的配置随着时间逐渐僵化(rigid)”^[31],依赖于之前的增长路径,随着时间自我加强,不利于塑造适应性^[29]。在演化的框架内,锁定是不可避免的,但是很多“去锁定”的机制有助于塑造适应性,例如技术的发展、多样化经济代理人的创新、进口和植入外部资源以及经济结构的多样化^[32]。适应性视角的韧性是一种典型的演化视角,关注韧性的动态过程,而不仅是一个特征(与熊彼得的“破坏性创新”学说关系紧密)。城市区域经济韧性框架如下^[28](图2):

图2 城市区域经济韧性框架
资料来源：参考文献[28]

2.2 韧性城市评价研究

2.2.1 韧性城市特征

城市韧性相比于传统减灾概念，更关注城市的社会维度及城市应对灾害的非物质条件。城市灾害韧性与以下特性密切相关（表 2）。

与面向相对确定灾害的减灾策略不同，气候变化韧性更关注城市系统所面对的未来的、不可完全预测的、大量不确定的冲击和压力及适应性策略^[20]。研究者从生态学理论出发，结合系统动力学^[19,44,45]提出六项韧性特征。内稳态：多重反馈循环以抵消干扰并加固系统；多样性：资源和方式的多样性；高流动性：系统中的资源高速流动，确保能够快速调动资源应对扰动；平整性：非“头重脚轻”的层级水平（过度缺乏地方能力的层级系统行动时非常不灵活）；缓冲性：超尺度的本质能力，使得临界阈值不容易被跨越；冗余性：功能的重叠^[46]。并基于“代理人—系统—制度”框架，解释城市气候变化韧性特征（表 3）。

其中，学习能力使得韧性城市区别于仅具有“抵抗力”

的城市。例如，为了抵御洪水，城市往往修筑洪水控制基础设施，使城市长期处于安全状态，但是基础设施一旦失效，由于城市 and 市民严重缺乏洪水风险意识和应对经验，可能会非常危险^[5]（图 3）。具有“抵抗力”的城市并不意味着具有“韧性”，韧性城市应更加关注从过去的灾害经验中转换学习，使城市在面对跨越阈值的灾害时具有缓冲空间和“忍受度”^[46]（图 4）。学习能力通过组织学习来积累。

组织学习是指组织不断努力改变或重新设计自身以适应持续变化。组织学习的核心是“反射行动”^[51-58]，这种反射行为取决于“心理地图”和“所处的城市网络环境”两个因素。人们在决策时通常使用一个源于之前生活经历、知识、感受、情绪、隐含假定和惯例的“心理地图”^[53,58]。当进行决策时，就会将当下的情形与“心理地图”中之前相似的情形进行对比，从经验出发进行决策。人们进入一个城市网络，即进入了一系列隐含的假定、态度、文化意象、价值观和制度环境，市民参与和广泛的学习过程是对“心理地图”的不断实践^[59]。在此基础提出组织学习的循环模式五原则（图 5）^[60]。

表 2 城市灾害韧性特征

特性	含义
自组织	自组织系统的分布式特征有助于从干扰中恢复。如果受到了破坏，市民和公共管理者能够立即行动起来避免损伤，局部修复功能使系统迅速重组而无须等待来自于中央政府或其他机构的援助，外部的援助往往不很及时
冗余性	相似功能组件的可用性及跨越尺度的多样性和功能的复制，确保某一组件或某一层次的能力受损，城市系统功能仍然能够依靠其他层次正常运转
多样性	土地利用模式、生物、基础设施、知识和人口结构的多样性确保城市系统存在冗余功能
适应能力 (学习能力)	城市能够在每次灾害之后及时采取物理性、制度性的调整，以更好地准备应对下一次灾害，“边做边学”，新经验不断被纳入适应能力中，从过去的干扰中学习
独立性	自力更生，系统在受到干扰影响时能够在没有外部支持的情况下保持最小化功能运转
相互依赖性	确保系统作为综合集成网络的一部分，获得其他网络系统的支持
抗扰性	系统抵挡内部和外部冲击，主要功能不受损伤
智慧性	城市规划和决策者能够使用资源，以准备、响应和从可能的破坏中恢复
创造性	城市系统能借助受破坏的机会向更先进的状态过度，要求城市规划和管理创新
协同性	城市系统应促进利益相关者积极参与决策过程

资料来源：作者根据参考文献 [33-43] 整理

表 3 气候变化韧性特征

框架要素	要素	特性	特性含义
系统	物理基础设施和生态系统	灵活性和多样性	在多种情况下能够运转核心功能，转换资产或者调整结构以引入新的运转方式，包括空间多样性和功能多样性
		冗余性和模块性	闲置的生产能力以应对偶然情况，在某一个组件或者多个组件失效的时候相互代替
		避免安全故障	避免某一结构或联系的失效引起串联式影响
代理人	个人、家庭、私人和公共部门	响应能力	定义问题、期望、计划并准备应对事件干扰，能够快速响应进行适当组织和再组织
		智慧性	调动多元财产和资源采取行动
		学习能力	从过去的经验中学习，避免重复失败，创新以提升技能
制度	社会和经济互动中建构人类行为 and 交换的社会规则和惯例，代理人 and 系统在制度内交互作用以响应气候压力	使用系统的权利和权限	明确使用关键资源和访问城市系统的权限
		决策过程	决策过程的透明性和责任性，关注最容易受影响的群体并保证他们能够进行合法决策
		信息流动	家庭、企业、社区组织和其他决策代理人能够获得可靠信息以判断风险和脆弱性
		新知识的应用	交换和应用新的知识以提升韧性

资料来源：作者根据参考文献 [47-50] 整理

韧性城市的组织制度特性是促成城市系统形成“转换学习”能力的关键，即研究不同类型的治理模式和政策安排如何影响地方的韧性^[46,61-63]，目标是使决策者、研究者、企业、社区共同发现新的实现韧性的有效路径（图6）。

起初的组织制度依赖于中央政府的控制，试图通过资源分配及相关机制、综合规划来实现韧性^[64]，但人们逐渐意识到自组织、冗余性、灵活性等特性，韧性政策开始转向更小的空间尺度和日常活动^[65]，认为塑造个人、邻里的韧性是实

现整体韧性的最有效路径^[11]，“自下而上”从市民和市民社会到国家和城市政府的韧性构建非常关键^[66]。地方层面的韧性实践整合成为热点，强调将个人而非国家的需求放在安全话语的中心^[66]。因此具有多中心性、透明性、责任性、灵活性、包容性的城市治理能够促进城市应对气候变化的韧性^[46]，目标在于培养城市系统的自组织能力，形成一种有效的集体选择机制以响应气候灾害^[47,50]。

目前，美国洛克菲勒基金会（The Rockefeller Foundation）邀请全球各地城市参与恢复力城市申请，并从中选出100座城市成为韧性城市网络会员，作为推行恢复力研究框架的主要载体。这些城市最近经历过大的冲击，或正在经历慢性压力。它们所采取的韧性行动，体现出多中心性（multicentric）、分布式（distributed）、内稳态（homeostasis）、连通性（connectedness）、多样性（diversity）等显著特征（表4）。

图3 “抵抗力”城市
资料来源：参考文献[5]

图4 韧性城市
资料来源：参考文献[5]

图5 从实践经验中学习循环
资料来源：参考文献[57]

图6 韧性城市关键要素和多重治理
资料来源：参考文献[60]

表4 洛克菲勒基金会韧性城市案例及特征

城市	干扰或冲击	韧性行动	韧性特征
苏拉特 (Surat), 印度	洪水、疫情、社会动荡	地方性委员会：设置跨部门的地方性委员会推行洪水管理、提升排水设施、提升公众健康普遍认知和劳动力健康水平。采取家庭层面监控，在脆弱地区设立健康中心防止疾病蔓延	多中心性、分布式
新奥尔良 (New Orleans), 美国	2005 年卡特里娜飓风和 2010 年英国石油公司漏油事件	社区行动：社区成立发展社团，鼓励居民通过技术交换重建家园，提供社会服务、健康支持和生计培训；当地牧师带领居民进行弥撒活动，帮助居民建立安全感和归属感	多中心性、分布式
卡利 (Cali), 哥伦比亚	洪水	基层组织：基层组织制定社区引导策略，加强社区和邻里的多样性，提供培训、小额信贷和情感支持	多中心性、分布式
康塞普西翁 (Concepción), 智利	2010 年 2 月 8.8 级地震	高效社交网络：强震后唯一能够运行的社交网络为公众提供了宝贵的信息来源，使得居民们能够相互交流，成为社会稳定的核心	内稳态、连通性
三宝垄 (Semarang), 印度尼西亚	洪水和滑坡	转变生计：家园、商店、道路定期被洪水淹没，渔民在当地大学的帮助下，转而培育其他的渔业品种，继续繁荣生计	多样性

资料来源：参考文献[67]

2.2.2 韧性城市指标体系

基于社会—政治—技术、经济、水文三方面，以抗扰性（R₁: robustness）、冗余性（R₂: redundancy）；智慧性（R₃: resourcefulness）；迅速性（R₄: rapidity）四个特征建构指标体系（表 5）。

$$Resiliency = \sum_{m=1}^4 R_m = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$$

基于社会韧性、经济韧性、制度韧性、基础设施韧性等方面的社区韧性指标体系（表 6）。

2.2.3 韧性城市模拟

复杂网络理论已被证明是一个强大的理论框架，用以研究网络化系统的拓扑结构^[70-72]，已经被应用于城市道路、输电、通讯等基础设施空间网络拓扑结构的定量和建模分析^[73]，方法是根据图论（graph theory）的方法将城市基础设施网络抽象为简化模型，定义其中的节点、边等要素及韧性公式，测度网络韧性^[74-77]。例如，将韧性分解为抵抗能力、吸收能力和恢复能力，并定义城市道路网络图的“冗余率”指标来测度韧性^[78]。

然而，城市系统由很多相互联系依赖的子系统共同构成，其性能大于单个组件的线性总和。近年来，为实现城市系统韧性的定量测度，复杂网络理论被拓展到城市系统韧性研究中。方法是在基础设施系统复杂网络的基础上，加入与城市社会、其他物理组件相关的信息，例如市民、住宅楼、服务

表 5 韧性城市指标体系（应对洪水）

数据集	因素	特征
社会—政治—技术	每平方米避难所数量（疏散中心）	R2
	人们基于过去 10 年经历对洪水的意识和防范	R4
	过去事件中的平均恢复能力	R3
	现存的灾害管理制度组织	R4
	数据记录工具的可用性	R1
	风险管理规划及实施	R1
	数据及时间文件系统的可用性	R1
	保险（与洪水相关的人、事务）	R3
	灾害中紧急沟通系统的可用性	R3
	高中文化水平率	R3
	关键设施的可用性（警局等）	R4
	洪水威胁地图	R4
经济	人均收入	R1
水文	排水系统长度	R1
	多样的排洪途径	R2
	洪水预防结构（储蓄容量）	R1
	洪水预警系统	R4

资料来源：参考文献 [68]

表 6 社区韧性评价指标

类型	变量
社会韧性	
社会能力	年轻人口比例
	采取机动车交通的人口比例
	使用电话的人口比例
	未将英语作为第二语言使用的人口比例
	健全人口比例
	非制度化人口比例
	非少数民族人口比例
	至少高中文凭人口比例
社区健康 / 幸福	居住在高密度地区的人口比例
	每千人社会援助项目
	每千人成人教育和培训项目
	每千人儿童保育项目
	每千人社区服务（娱乐设施、公园、历史名胜、图书馆、博物馆）
	每千人网络、电视、无线电、通讯服务和设施
	每千人心理支持设施
	每千人医疗服务
公平	大学文凭获得率与非高中文凭率的比值
	少数民族比例与非少数民族比例的比值
经济韧性	
经济和生计的稳定性	拥有住房者比例
	劳动年龄人口就业比例
	女性劳动力参与率
	家庭人均总收入
经济多元化	企业平均销量
	非第一产业就业比例
	大企业和小企业的比例
	每千人零售中心
资源公平	每千人商业机构
	每千人借贷机构
经营性基础设施暴露性	每千人医生和卫生专业人员数量
	高灾害风险区以外的商业机构
	经营性基础设施的密度
制度韧性	
灾害缓解 / 规划	当前灾害缓解规划覆盖的人群
	应对洪水的社区评级系统参与人口比例
准备	全国洪水保险项目政策覆盖家庭比例
	市民服务队项目参与人口比例
发展	紧急服务雇佣的劳动力比例（消防、执行、保护等）
	灾害声明数量
基础设施韧性	
住房类型	1990—2000 年变为城市用地的用地比例
	没有移动电话的家庭比例
响应和恢复	建于 1970—1994 年之间的住房比例
	空置出租的房屋比例
	每平方英里酒店和旅馆
	每千人火灾、警察、紧急救援服务、临时避难所
进入和疏散	高灾害风险区以外的火灾、警察、紧急救援服务、临时避难所比例
	每平方英里小学和中学
基础设施暴露性	主干道英里数
	铁路里程
	独栋住宅密度
	洪水和风暴潮区域以外的基础设施建设比例
	高风险暴露地区以外的基础设施建设比例

续表

类型	变量
社区资本	
社会资本	每千人宗教组织、社会倡导组织、艺术、娱乐中心、社会组织
创意阶层	专业性职业雇佣比例 每千人专业、科学、技术服务数量 每千人研究和发展公司数量 每千人贸易和专业组织数量
文化资源	每平方英里国家注册历史名胜数量
场所感	出生并仍然定居在此的人口比例 非国际移民人口比例
环境系统韧性	
风险和暴露	不包含易受侵蚀土壤的土地比例 不处于洪水泛滥地区的土地比例（100 或 500 年一遇的洪水及风暴潮） 不处于严重山体滑坡事故地区的土地比例 河流里程
可持续性	未开发森林的土地比例 湿地面积未减少的土地比例 在 1992—2001 年间土地覆盖和土地利用没有变化的土地比例 受保护的地区比例 适于耕种的土地比例
防护性资源	防风林和环境保护植物种植土地比例 湿地、沼泽、红树林、沙丘或自然障碍土地比例 被开发为开敞空间的土地比例
灾害发生频率	造成损失的天气事件发生频率（冰雹、风灾、龙卷风、飓风）

资料来源：详见文末参考文献 [69]

设施等，针对新网络提出有效性指标来测度韧性，并模拟不同重建策略下复杂网络的恢复效率。例如，在城市道路网络拓扑结构的基础上加入住宅建筑、商业建筑（物品供给）、公共服务设施节点及连接这些新节点与原道路网络的边，形成城市“混合式社会—物理复杂性网络”（HSPN: Hybrid Social-Physical Complex Networks）^[79]（图 7）。

模型基于图论对网络性能的定义提出居住 HSPN 模型效率指标：

图 7 居住 HSPN 建构示意

资料来源：参考文献 [79]

$$ECC = \frac{1}{H_{tot}(H_{tot}-1)} \sum_{i \in \beta} H_i \left((H_i-1) + \sum_{j \in \beta, j \neq i} H_j \frac{d_{ij}^{eucl}}{d_{ij}} \right)$$

$$= \frac{1}{H_{tot}(H_{tot}-1)} \sum_{i \in \beta} H_i \left((h_i-1) + \sum_{j \in (\beta/T)} H_j \frac{d_{ij}^{eucl}}{d_{ij}} \right)$$

其中 i, j 是住宅节点， H_{tot} 是城市中的居民总数， H_i 是居住在住宅 i 中的居民数量， β 是一系列住宅建筑节点， d_{ij} 是 i 和 j 之间的最短路径， h_i 是与住宅 i 距离为 0 的居民数。类似地可以得出物品供给 HSPN 模型效率和公共服务设施 HSPN 模型效率。

定义城市系统在 t 时刻的性能和城市系统中有 C 量的市民被重新安置时的性能 $y(C)$ ，定义城市系统韧性值：

$$R = \frac{\int_0^{C_{max}} y(C) dC}{C_{max}}$$

其中 C_{max} 为特定事件之后被疏散的总人数，评定不同量级灾害、不同重建策略、不同重建时间节点下的城市系统韧性值。

同时，韧性模拟基于韧性测度方法展开，方法是模拟城市复杂网络在不同韧性策略情景下（表 7）的韧性值，并根据模拟结果选择韧性策略序列（图 8）。

此外，计算机智能体也被用于城市韧性模拟中，方法是模拟特定城市形态调整策略下的灾害疏散情景，寻找最优策略以优化城市空间形态（图 9，图 10）^[79,81]。

目前，如何恰当计算和模拟城市韧性的方法仍然在不断的讨论中^[82]。

表 7 不同阶段的韧性提升策略（基础设施网络）

阶段	测度指标	韧性提升策略
第一阶段 抵抗 (resistant capacity)	灾害发生频率、初始损伤水平	通过风险管理来识别和加固关键设施组件； 运用事故模型从过去的事故中学习和提升，例如系统理论事故模型及过程（Systems-Theoretic Accident Model and Processes）的方法； 基于新兴的基础设施模型技术（贝叶斯网络 [Bayesian networks]），结合系统状态可视化表达实时感应、监测、更新系统状态
第二阶段 吸收 (absorptive capacity)	最大影响水平	调整基础设施拓扑结构； 系统冗余设计； 增设自我修复和自我适应基础设施响应机制
第三阶段 恢复 (restorative capacity)	恢复时间、恢复成本	建立有利于快速响应的有效沟通途径提升决策支持平台以快速准确制定恢复策略

资料来源：参考文献 [80]

2.3 韧性城市规划方法研究

韧性概念对城市规划而言意义重大。一方面，它为空间规划和城市发展提供了一个建构和响应不确定性、脆弱性的新方式；另一方面，它提供了一个范式，使得城市发展策略能够应对大尺度的社会、环境或者经济变化。城市规划运用韧性概念，一方面能够与自然和生态系统相关联，另一方面能够与社会和人的要素相关联，而二者都是规划工作关注的重点。

韧性概念和规划关系的研究始于1990年代末期，应对调整社会和制度框架的环境威胁以及关注物理基础设施的提升以预防干扰。这一时期韧性规划的文献强调地方层面的准备和减缓行动（preparation and mitigation action）^[83]。这与传统的土地利用规划最小化干扰（例如：通过特定的土地利用隔离避免“坏的邻居”[bad neighbours]）和降低可能干扰风险（例如：发展布局远离生态敏感和易于受到洪水袭击的地区）的方法非常接近。后来，韧性规划的文献拓宽至减缓策略，例如减少温室气体排放应对气候变化。近年来，气候

变化的挑战变得更加明显，规划者和政策制定者逐渐意识到运用减缓的方法（mitigation approach）来确保完全安全非常困难（或者是不可能的），而韧性策略则更加适应、灵活。

目前大量研究认为，空间规划能够通过城市空间构型（spatial configuration）促进城市应对气候变化的韧性（例如土地利用管理方式），韧性空间规划提供了一个兼具适应气候变化负面影响和降低可能导致气候变化排放（例如二氧化碳）的框架^[33,84,85]。因此面向韧性的城市规划存在缓解^[86]（减少终端用户的能源使用量、减少能源供应中碳供应的强度）和适应^[87]两种存在争议的价值取向。尽管如此，研究者提出“脆弱性分析—政府管制—预防—不确定性导向规划”韧性城市规划框架^[88]，同时纳入了缓解和适应的内容。目前文献中的韧性城市研究非常多元，强调城市韧性的不同侧面（facets），理论面临的挑战在于将多元的城市维度（社会的、经济的、文化的、环境的）整合进入一个统一的框架。提出包含脆弱性分析（vulnerability analysis matrix）、城市管治（urban governance）、预防（prevention）和以不确定为导向的规划（uncertainty-oriented planning）四个部分的韧性城市规划框架^[88]（图7）。首先进行脆弱性分析，识别城市中相对脆弱的人群和社区，评估城市非正式空间的规模及其社会经济和环境状况，同时分析城市未来可能的不确定性情景，并将以上信息在空间分布上进行表达。同时，城市规划决策（清理棚户区及重新安置）可能会促进或者降低气候脆弱性，讨论咨询不足或者参与性不足，可能会加重脆弱性^[66]。其次建立政府管制机制，将与韧性相关的多样化参与者纳入规划协作过程，并制定减缓气候变化的有效制约行动。然后实施预防策略，减少城市温室气体排放、倡导替代性能源等。最后编制不确定导向的规划，运用土地利用管理、街区和建筑设计调节灾害频发地区的发展，营造可持续的城市形态^[88]（图11）。

注：Case 0 原始输电网；Case 1 原始输电网+韧性提升1阶段策略；Case 2 原始输电网+韧性提升2阶段策略；Case 3 原始输电网+韧性提升3阶段策略；Case 4 原始输电网+韧性提升1/2/3阶段策略

图8 不同韧性策略施加组合下城市韧性值变化

资料来源：参考文献[80]

图9 模拟地震情境下的受损物理网络空间构型

资料来源：参考文献[79]

图10 不同类型韧性策略选择下城市重安置变化

资料来源：参考文献[79]

目前,城市实践通过空间规划的方式促进韧性的积累。南非开普敦(Cape Town)为应对种族和社会隔离起草了一份《空间发展框架(2012)》来促进社区和基础服务设施的综合发展。在非正规定居区域中,城市非政府组织还采取包容性的重构措施来增强社区凝聚力,例如增加社交空间、增加服务供给、提升火灾事故等紧急情况的响应^[67]。然而目前规划研究中韧性概念的运用没有一个准确的、定义明确的方式,而是作为“通用的涵盖性术语”(versatile umbrella term)^[84]或“适应性”(adaption)的同义词存在,韧性概念在规划方法中的运用仍不清晰,韧性的规划实践常常被嵌入或者与其他方法混合,规划方法的韧性视角并不明确,并且缺乏可操作的韧性规划范式和行动方式研究。

3 小结

最早出现于1970年代的生态学的韧性概念,经历了从“平衡性”到“适应性”的演变,目前主要应用于灾害和气候变化、城市和区域韧性、城市基础设施韧性、城市恐怖袭击韧性、空间和城市规划等领域。其研究的内容主要集中在韧性城市演化机理、韧性城市评价方法、韧性城市规划等方面,探讨着实现可持续发展的全新途径:即承认环境不确定性和自身能力有限性,摒弃了工程和生态思想中必须达成平衡的偏见,以演进的观点尊重社会生态系统基本规律。

未来的韧性城市研究可以将复杂性的概念应用于城市组织研究。历史城市缓慢而有机的增长带来了密度及复杂的、相互连接的层级结构,具备了吸收连续转变而不丧失其本质结构的能力,即韧性。现代城市因为缺乏复杂性而不具有韧性^[89]。自组织与协同科学采用了自下而上、从微观到宏观的

方法,与混沌理论的规则与非线性、分形理论的自相似和迭代生成等概念和数学方法关联起来,是研究全球变化与城乡社会系统的重要理论基础,能够用以分析并模拟城市韧性的机制和演化过程。同时,城市虽然是一个整体,但是其韧性并非均匀分布,一些地区比另一些地区更具韧性,往往与其地形、财政收入相关,不均匀的韧性分布威胁着城市作为一个整体运行的经济、社会和政治功能。目前韧性研究往往忽略了这一维度,没有明确地将韧性与提升弱势群体的生活质量关联起来、没有回答为谁塑造韧性等问题。城市管理者、城市规划者应当思考城市的哪一部分(或者哪部分居民)在某次危机中最需要关注,应选择城市建成环境的哪一部分来投资,衡量哪部分人群最应当受益^[90],即将社会公平问题纳入韧性城市的考虑范畴中。此外,还应将城市创新置于核心位置重新思考韧性理论,在社会生态系统的视角下,在多元尺度和多元部门之间寻求增强城市韧性的机会^[91]。

韧性概念包容着社会、经济、文化、环境和空间多重维度,韧性城市正在取代传统思路成为城市可持续发展的关键战略,对于解决我国现阶段城市中一系列制约经济社会持续健康发展的干扰和压力具有重要的理论和实践意义。目前,中国韧性城市研究还处在起步阶段,并没有针对中国城市的独特性构建系统、全面、可操作的韧性城市研究框架,更没有应用于实践。中国城市处在特定的自然环境和发展阶段中,其框架研究不能够直接借鉴国际现有的研究成果,应当针对其存在的问题并结合中国城市的特殊性作出调整和创新。UPI

参考文献

- [1] 徐江,邵亦文.韧性城市:应对城市危机的新思路[J].国际城市规划,2015(2):1-3.
- [2] 李彤玥,牛品一,顾朝林.弹性城市研究框架综述[J].城市规划学刊,2014(5):23-31.
- [3] Holling CS. Resilience and Stability of Ecological Systems[M]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4(4): 1-23.
- [4] C. Folke, Resilience: The Emergence of a Perspective for Social-ecological Systems Analyses[J]. Global Environmental Change, 2006, 16(3): 253-267.
- [5] Liao K. A Theory on Urban Resilience to Floods-A Basis for Alternative Planning Practices[J]. Ecology and Society, 2012, 17(4): 388-395.
- [6] Gunderson L H. Panarchy: Understanding Transformations in Human and Natural Systems[M]. Island Press, 2001.
- [7] Holling C S. Engineering Resilience Versus Ecological Resilience[J]. Engineering Within Ecological Constraints, 1996: 31-44.
- [8] Pickett S T A, Cadenasso M L, Grove J M. Resilient Cities: Meaning, Models, and Metaphor for Integrating the Ecological, Socio-economic, and Planning Realms[J]. Landscape and Urban Planning, 2004, 69(4): 369-384.
- [9] Clout H. Lawrence J. Vale, Thomas J. Campanella, eds. The Resilient City: How Modern Cities Recover from Disaster[J]. Journal of Historical Geography, 2007, 33(2): 458-459.
- [10] Maru Y T. Resilient Regions: Clarity of Concepts and Challenges to Systemic Measurement[R]. CSIRO Sustainable Ecosystems, 2010.
- [11] Adger W N. Social and Ecological Resilience: Are They Related?[J]. Progress

图 11 韧性城市规划框架
资料来源：参考文献[88]

- in Human Geography, 2000, 24(3): 347-364.
- [12] Carpenter S, Walker B, Anderies J M, et al. From Metaphor to Measurement: Resilience of What to What? [J]. Ecosystems, 2001, 4(8): 765-781.
- [13] Klein R J T, Nicholls R J, Thomalla F. Resilience to Natural Hazards: How Useful is This Concept? [J]. Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards, 2003, 5(1): 35-45.
- [14] Walker B, Holling C S, Carpenter S R, et al. Resilience, Adaptability and Transformability in Social-ecological Systems [J]. Ecology and Society, 2004, 9(2): 5.
- [15] Resilience Alliance, Resilience [EB/OL]. <http://www.resalliance.org/576.php>.
- [16] Campanella R, Etheridge D, Meffert D J. Sustainability, Survivability, and the Paradox of New Orleans [J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 2004, 1023(1): 289-299.
- [17] Kates R W, Colten C E, Laska S, et al. Reconstruction of New Orleans after Hurricane Katrina: A Research Perspective [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2006, 103(40): 14653-14660.
- [18] Wildavsky A B. Searching for safety [M]. Transaction Publishers, 1988.
- [19] Barnett J. Adapting to Climate Change in Pacific Island Countries: the Problem of Uncertainty [J]. World Development, 2001, 29(6): 977-993.
- [20] Thomalla F, Downing T, Spanger-Sieghfried E, et al. Reducing Hazard Vulnerability: Towards a Common Approach Between Disaster Risk Reduction and Climate Adaptation [J]. Disasters, 2006, 30(1): 39-48.
- [21] Evans J P. Resilience, Ecology and Adaptation in the Experimental City [J]. Transactions of the Institute of British Geographers, 2011, 36(2): 223-237.
- [22] Desouza K C, Flanery T H. Designing, Planning, and Managing Resilient Cities: A Conceptual Framework [J]. Cities, 2013, 35(4): 89-99.
- [23] Rinaldi S M. Modeling and Simulating Critical Infrastructures and Their Interdependencies [C] // System Sciences, 2004. Proceedings of the 37th Annual Hawaii International Conference on IEEE, 2004: 8.
- [24] Sassen S. Cities in a World Economy [M]. Sage Publications, 2011.
- [25] Harrigan J, Martin P. Terrorism and the Resilience of Cities [J]. Economic Policy Review—Federal Reserve Bank of New York, 2002, 8(2): 97.
- [26] Hill E, Wial H, Wolman H. Exploring Regional Economic Resilience [R]. Working Paper, Institute of Urban and Regional Development, 2008.
- [27] Pendall R, Foster K A, Cowell M. Resilience and Regions: Building Understanding of the Metaphor [J]. Cambridge Journal of Regions, Economy and Society, 2010, 3(1): 71-84.
- [28] Martin R. Regional Economic Resilience, Hysteresis and Recessionary Shocks [J]. Journal of Economic Geography, 2011, 12(1): 1-32.
- [29] Pike A, Dawley S, Tomaney J. Resilience Adaptation and Adaptability [J]. Cambridge Journal of Regions, Economy and Society, 2010(3): 59-70.
- [30] Grabher G, Stark D. Organizing Diversity: Evolutionary Theory, Network Analysis and Postsocialism [J]. Regional Studies, 1997, 31(5): 533-544.
- [31] Grabher G. The Weakness of Strong Ties: the Lock-in of Regional Development in the Ruhr Area [J]. The Embedded Firm: On the Socioeconomics of Industrial Networks, 1993: 255-277.
- [32] Martin R, Sunley P. Path Dependence and Regional Economic Evolution [J]. Journal of Economic Geography, 2006, 6(4): 395-437.
- [33] Fleischhauer M. The Role of Spatial Planning in Strengthening Urban Resilience [M] // Resilience of Cities to Terrorist and Other Threats. Springer Science+ Business Media BV, 2008: 273-298.
- [34] Krasny M E, Tidball K G. Applying a Resilience Systems Framework to Urban Environmental Education [J]. Environmental Education Research, 2009, 15(4): 465-482.
- [35] Peterson G, Allen C R, Holling C S. Ecological Resilience, Biodiversity, and Scale [J]. Ecosystems, 1998, 1(1): 6-18.
- [36] Adger W N, Hughes T P, Folke C, et al. Social-Ecological Resilience to Coastal Disasters [J]. Science, 2005, 309(5737): 1036-1039.
- [37] Adger W N. Vulnerability [J]. Global Environmental Change, 2006, 16(3): 268-281.
- [38] Berkes F. Understanding Uncertainty and Reducing Vulnerability: Lessons from Resilience Thinking [J]. Natural Hazards, 2007, 41(2): 283-295.
- [39] Frazier T G, Thompson C M, Dezzani R J. A Framework for the Development of the SERV Model: A Spatially Explicit Resilience-Vulnerability Model [J]. Applied Geography, 2014, 51: 158-172.
- [40] Roggema R, van den Dobbelsteen A. Swarm Planning for Climate Change: An Alternative Pathway for Resilience [J]. Building Research & Information, 2012, 40(5): 606-624.
- [41] Priscilla P, Nelson, Raymond L. Sterling, Sustainability and Resilience of Underground Urban Infrastructure: New Approaches to Metrics and Formalism [C] // GeoCongress 2012 © ASCE 2012.
- [42] Cutter S L, Barnes L, Berry M, et al. A Place-based Model for Understanding Community Resilience to Natural Disasters [J]. Global Environmental Change, 2008, 18(4): 598-606.
- [43] Frommer B. Climate Change and The Resilient Society: Utopia or Realistic Option For German Regions? [J]. Natural Hazards, 2011, 58(1): 85-101.
- [44] Dessai S, Sluijs J P. Uncertainty and Climate Change Adaptation: A Scoping Study [M]. Utrecht: Copernicus Institute for Sustainable Development and Innovation, Department Of Science Technology And Society, 2007.
- [45] Watt K E F, Craig P P. System Stability Principles [J]. Systems Research, 1986, 3(4): 191-201.
- [46] Wardekker J A, De Jong A, Knoop J M, et al. Operationalising A Resilience Approach to Adapting An Urban Delta to Uncertain Climate Changes [J]. Technological Forecasting and Social Change, 2010, 77(6): 987-998.
- [47] Tyler S, M Moench. A Framework for Urban Climate Resilience [J]. Climate and Development, 2012, 4(4): 311-326.
- [48] Hodgson G M. Economics and Institutions [J] // Journal Of Economic Issues, 1988.
- [49] UNDP. Governance for Sustainable Human Development [M]. UNDP, 1997.
- [50] Huntjens P, Lebel L, Pahl-Wostl C, et al. Institutional Design Propositions for the Governance of Adaptation to Climate Change in the Water Sector [J]. Global Environmental Change, 2012, 22(1): 67-81.
- [51] Bateson G. Steps To an Ecology of Mind: Collected Essays in Anthropology, Psychiatry, Evolution, and Epistemology [M]. University of Chicago Press, 1972.
- [52] Bateson G. Mind and Nature: A Necessary Unity [M]. New York: Dutton, 1979.
- [53] Argyris C, Schön D A. Theory in Practice: Increasing Professional Effectiveness [M]. Jossey-Bass, 1974.
- [54] Argyris C, Schön D A. Organizational Learning: A Theory of Action Perspective [J]. Reis, 1997: 345-348.
- [55] Schön D A. The Reflective Practitioner: How Professionals Think in Action [M]. Basic Books, 1983.
- [56] Schön D A. The Design Studio: An Exploration of Its Traditions and Potentials [M]. London: RIBA Publications for RIBA Building Industry Trust, 1985.
- [57] Kolb D A. Experiential Learning: Experience as the Source of Learning and Development [M]. Pearson Education, 2014.
- [58] Senge P M. La quinta disciplina en la práctica [M]. Ediciones Granica SA, 2005.
- [59] Dieleman H, Huisingh D. Games by Which to Learn and Teach about Sustainable Development: Exploring the Relevance of Games and Experiential Learning for Sustainability [J]. Journal of Cleaner Production, 2006, 14(9): 837-847.
- [60] Dieleman H. Organizational Learning for Resilient Cities, Through Realizing Eco-Cultural Innovations [J]. Journal of Cleaner Production, 2013, 50: 171-180.
- [61] Ostrom E. Polycentric Systems for Coping with Collective Action and Global Environmental Change [J]. Global Environmental Change, 2010, 20(4): 550-557.
- [62] Duxbury J, Dickinson S. Principles for Sustainable Governance of the

- Coastal Zone: In the Context of Coastal Disasters[J]. *Ecological Economics*, 2007, 63(2): 319-330.
- [63] Garschagen M. Resilience and Organisational Institutionalism from a Cross-cultural Perspective: An Exploration Based on Urban Climate Change Adaptation in Vietnam[J]. *Natural Hazards*, 2013, 67(1): 25-46.
- [64] Edwards C. Resilient Nation[OL]. <https://www.mysciencework.com/Publication/Show/8e80db1e6a8118d9780481256f24e547>.
- [65] Coaffee J, Murakami Wood D, Rogers P. The Everyday Resilience of the City: How Cities Respond to Terrorism and Disaster[J]. *Progress in Human Geography*, 2008, 34(3): 402-403.
- [66] Satterthwaite D. The Political Underpinnings of Cities' Accumulated Resilience to Climate Change[J]. *Environment and Urbanization*, 2013, 25(2): 381-391.
- [67] Rockefeller Foundation, ARUP. City Resilience Framework [EB/OL]. http://publications.arup.com/publications/c/city_resilience_framework.aspx.
- [68] Karamouz M, Zahmatkesh Z, Nazif S. Quantifying Resilience to Coastal Flood Events: A Case Study of New York City[C] // *World Environmental and Water Resources Congress 2014*, 2014: 911-923.
- [69] 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[J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 2015, 105(1): 67-86.
- [70] Strogatz S H. Exploring Complex Networks[J]. *Nature*, 2001, 410(6825): 268-276.
- [71] Newman M E J. The Structure and Function of Complex Networks[J]. *SIAM Review*, 2003, 45(2): 167-256.
- [72] Boccaletti S, Latora V, Moreno Y, et al. Complex Networks: Structure and Dynamics[J]. *Physics Reports*, 2006, 424(4): 175-308.
- [73] BarthÉlemy M. Spatial Networks[J]. *Physics Reports*, 2011, 499(1): 1-101.
- [74] Albert R, Jeong H, Barabasi A L. Error and Attack Tolerance of Complex Networks[J]. *Nature*, 2000, 406(6794): 378-382.
- [75] Callaway D S, Newman M E J, Strogatz S H, et al. Network Robustness and Fragility: Percolation on Random Graphs[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(25): 5468.
- [76] Cohen R, Erez K, Ben-Avraham D, et al. Resilience of the Internet to Random Breakdowns[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(21): 4626.
- [77] Paul G, Tanizawa T, Havlin S, et al. Optimization of Robustness of Complex Networks[J]. *The European Physical Journal B-Condensed Matter and Complex Systems*, 2004, 38(2): 187-191.
- [78] Lhomme S, Serre D, Diab Y, et al. Analyzing Resilience of Urban Networks: A Preliminary Step Towards More Flood Resilient Cities[J]. *Natural Hazards and Earth System Science*, 2013, 13(2): 221-230.
- [79] Cavallaro M, Asprone D, Latora V, et al. Assessment of Urban Ecosystem Resilience Through Hybrid Social-Physical Complex Networks[J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2014.
- [80] Ouyang M, Dueñas-Osorio L, Min X. A Three-stage Resilience Analysis Framework for Urban Infrastructure Systems[J]. *Structural Safety*. 2012, 36-37: 23-31.
- [81] Franchin P, Cavalieri F. A Framework for Physical Simulation of Critical Infrastructures, Accounting for Interdependencies and Uncertainty[C] // *11th International Conference on Structural Safety & Reliability, ICOSSAR*, 2013: 16-20.
- [82] LeÓN J, March A. Urban Morphology as a Tool for Supporting Tsunami Rapid Resilience: A Case Study of Talcahuano, Chile[J]. *Habitat International*, 2014, 43: 250-262.
- [83] Godschalk D R. Urban Hazard Mitigation: Creating Resilient Cities[J]. *Natural Hazards Review*, 2003, 4(3): 136-143.
- [84] Davoudi S, Crawford J, Mehmood A. Planning for Climate Change: Strategies for Mitigation and Adaptation for Spatial Planners[M]. Routledge, 2009.
- [85] Gleeson B. Critical Commentary. Waking from the Dream: An Australian Perspective on Urban Resilience[J]. *Urban Studies*, 2008, 45(13): 2653-2668.
- [86] Xiao L, Li X, Wang R. Integrating Climate Change Adaptation and Mitigation into Sustainable Development Planning for Lijiang City[J]. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2011, 18(6): 515-522.
- [87] De Vries J. Climate Change and Spatial Planning Below Sea-level: Water, Water and More Water, Interface Section[J]. *Planning Theory & Practice*, 2006, 7(2): 223-227.
- [88] Jabareen Y. Planning the Resilient City: Concepts and Strategies for Coping with Climate Change and Environmental Risk[J]. *Cities*, 2013, 31: 220-229.
- [89] Salat S, Bourdic L. Power Laws for Energy Efficient and Resilient Cities[J]. *Procedia Engineering*, 2011, 21(1): 1193-1198.
- [90] Vale L J. The Politics Of Resilient Cities: Whose Resilience and Whose City?[J]. *Building Research & Information*, 2014, 42(2): 191-201.
- [91] Ernstson H, Leeuw S E V D, Redman C L, et al. Urban Transitions: On Urban Resilience and Human-dominated Ecosystems[J]. *Ambio*, 2010, 39(8): 531-545.

(本文编辑：秦潇雨)