

# 城市韧性——基于“三度空间下系统的系统”的思考

方东平 李在上 李楠 韩林海 吴建平

陆新征 孔祥明 李勇 吕孝礼

(清华大学,北京 100084)

**摘要:** 自然、技术和人为灾害给城市的有序运转和城市居民的正常生活带来巨大冲击和损失。城市韧性是城市系统及其各类子系统在受到扰动时维持或迅速恢复其功能,并通过适应来更好地应对未来不确定性的能力。城市韧性概念为城市的防灾减灾提供了新的视角。该文将城市视为一个在物理、社会、信息组成的三度空间下由多个子系统构成的“系统的系统”,并以若干子系统及其交互为例来阐述城市韧性的内涵与特征。城市必须进行“韧性管理”,只有将有限的资源合理地配置到三度空间下的各个子系统和韧性建设的各个环节,才能在城市的建设和管理中最为有效地确保和提升其韧性。

**关键词:** 城市韧性; 三度空间; 系统的系统; 韧性管理

中图分类号: TU981 文献标识码: A 文章编号: 1000-431X(2017)08-0001-07

DOI:10.15951/j.tmgcxb.2017.07.001

## Urban resilience: a perspective of system of systems in trio spaces

Fang Dongping Li Zaishang Li Nan Han Linhai Wu Jianping

Lu Xinzheng Kong Xiangming Li Yong Lu Xiaoli

(Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Natural, technical and man-made disasters pose enormous threats on both cities and their citizens worldwide. The concept of “urban resilience”, which is defined as the ability of an urban system and all its constituent sub-systems to maintain the necessary functions during disturbance, rapidly recover in the aftermath of the disturbance, and adapt to uncertainties in the future, brings about a new perspective of understanding disaster prevention and reduction in urban systems. In this paper, the authors propose to view a city as a system of systems in trio spaces (physical, societal and cyber spaces), and illustrate the connotation and properties of urban resilience using several sub-systems of a city and their interactions as an example. Moreover, the concept of “resilience management” is proposed, and it is advocated that only by optimal allocation of resources among different sub-systems as well as different phases of resilience (resistance, recovery and adaptation) can urban resilience be ensured and enhanced in the most effective manner.

**Keywords:** urban resilience; trio spaces; system of systems; resilience management

**E-mail:** fangdp@tsinghua.edu.cn

## 引言

城市是人们生产和生活的重要载体<sup>[1]</sup>。在全球高速城镇化的当下,越来越多的人口涌入城市<sup>[2]</sup>。2016年,中国的城镇化率已经达到了57.35%<sup>[3]</sup>;预计到2050年,全球城市人口将占到66%<sup>[4]</sup>。城市规模越来越大,组成越来越复杂,地位越来越重要。然而,

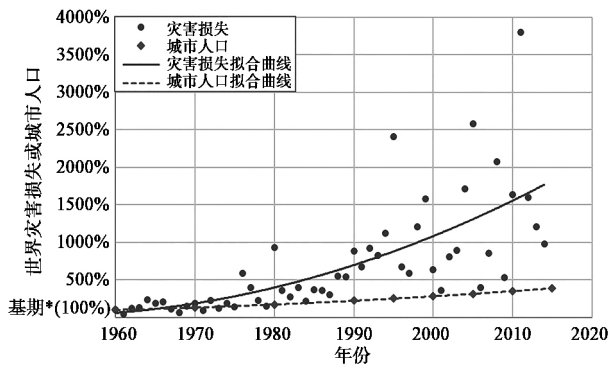
近年来,大量的自然灾害(如2008年的中国汶川地震、2015年的尼泊尔地震等)、技术灾害(如2011年日本福岛核事故等)和人为灾害(如2014年的中国昆明火车站暴力袭击事件、2015年法国巴黎恐怖袭击事件等)的频繁发生给城市系统的有序运转和城市居民的正常生活带来了巨大影响<sup>[2]</sup>。如图1所示,就自然及技术灾害而言,其造成损失的增加明显快于城市人口的增长,城市的安全与稳定面临着日益严峻的挑战。

在各类灾害下,不同城市的表现不尽相同。有的在灾后得以迅速恢复,而有的却一蹶不振。“韧性”(resilience)概念的出现,为理解复杂系统运作和其可持续发展,尤其是系统防灾减灾方面提供了新的角度<sup>[6]</sup>。一个具有韧性的城市,其不仅对灾害有着充分

基金项目: 清华大学自主科研计划(2014z21050、2015THZ0)、苏州-清华创新引领行动专项(2016SZ0212)和浙江智慧城市区域协同创新中心科研基金

作者简介: 方东平, 博士, 教授

收稿日期: 2017-06-12



注: \* 以1960年为基期。1960年世界自然及技术灾害所造成的损失(以2014年美元汇率折算)为100.2亿美元,城市人口为10.19亿。(数据来源:联合国<sup>[4]</sup>、EM-DAT<sup>[5]</sup>)

图1 世界自然及技术灾害损失增加与城市人口增长关系  
Fig.1 Relationship between the increase of total economic damage caused by natural and technical disasters and the increase of urban population all around the world

的抵抗能力,而且其在遭受破坏后还能够迅速恢复其主要功能,实现城市的持续运转,并能通过学习进一步提高对未来不确定性的适应能力。理解城市韧性并建设具有韧性的城市在灾害频发的当下具有重要意义。

## 1 韧性

韧性,即 resilience(亦有人将其翻译为弹性<sup>[7]</sup>、恢复力<sup>[8]</sup>、抗逆力<sup>[9]</sup>等),源于拉丁词 resilio,表达“反弹(bounce to back)”之意<sup>[10]</sup>。20世纪70年代,生态学家 Holling 首次描述了自然系统的多平衡态的现象,并使用韧性一词表征系统吸收各类变化的能力<sup>[11-12]</sup>。其后,相继出现了工程韧性(engineering resilience)与生态韧性(ecological resilience)两类观点。前者主张系统仅存在单平衡态,并用系统对抗动的抵抗能力和恢复到平衡态的速度度量韧性。该观点认为,韧性的要义在于抵抗扰动和变化从而保持原貌<sup>[13]</sup>;后者则主张系统存在多平衡态,并用系统从一个稳态到另一个稳态所能吸收的扰动量度量韧性<sup>[14-15]</sup>。Folke<sup>[13]</sup>综合 Holling 等人的研究成果,结合人与生态系统的互动关系提出了社会-生态韧性(social-ecological resilience)。Folke 主张系统是不断发生变化的,不必保持在某种平衡态,而且扰动恰恰是系统发生变革的源头。韧性不仅表征了系统吸收扰动以保持原有状态的能力,还表征了系统自组织能力以及学习和适应能力。这种不主张平衡态的韧性观点又被称作演进韧性(evolutionary resilience)<sup>[16]</sup>。

## 2 城市韧性

### 2.1 城市韧性:抵抗、恢复和适应

随着人们对系统的认识不断加深,学界对韧性的理解也愈来愈深入,韧性的内涵也愈来愈完善。韧性理论与城市学研究的结合,开拓了城市学研究的内容与视野<sup>[7]</sup>,城市韧性(urban resilience)已然成为一个热点话题。诚然,在各类灾害不断发生的当下,人们希望城市是具有充足韧性的,从而保证各类生命线系统以及其他支撑设施在灾害中也能发挥其作用<sup>[17]</sup>,尽可能减少灾害造成的损失,维持城市的长久运转。然而,尽管近几年出现了很多有关城市韧性的研究<sup>[18-24]</sup>,可何谓城市的韧性,学界尚无统一的定义<sup>[25-26]</sup>。

事实上,我们如何定义城市韧性很大程度上取决于我们如何理解这个问题。科学研究的开展通常可以通过两条途径:或是从个别到一般,即归纳;或是从一般到个别,即演绎<sup>[27]</sup>。Holling 最初定义韧性是基于他对于生物种群发展现象的观察,是一个“归纳”的过程;而从“生态韧性”,到引入了“人”的“社会-生态韧性”,再到以人类社会为主的“城市韧性”,这一发展过程更类似“演绎”。不同于客观的生态系统中的韧性,城市韧性的内涵具有主客观两面性。一方面城市韧性是城市的客观属性,很多历史案例表明城市在受灾后具有一定的恢复能力<sup>[28-31]</sup>;另一方面城市韧性又被赋予了人们的主观意志,即究竟城市想要达到怎样的韧性以及如何达到这一韧性是由人所主导的。因而在定义城市韧性时,既要尊重城市在灾害中的客观表现,又要发挥人的主观能动性,实现城市的可持续发展。

Bozza 等<sup>[18]</sup>将城市韧性定义为城市吸收外部干扰并达到一个动态平衡的能力。该平衡可以不同于最初状态,但系统的效率和质量应不低于原状态。Jha 等<sup>[19]</sup>将城市韧性划分为四个部分:基础设施韧性(infrastructural resilience)、制度韧性(institutional resilience)、经济韧性(economic resilience)和社会韧性(social resilience)。基础设施韧性涉及了建成结构脆弱性的降低,同时也涉及了城市庇护能力、逃生路线的可达性以及社区应急反应能力等;制度韧性是指政府和非政府组织对社区的管理能力;经济韧性主要涉及就业、交易量等方面的经济多样性,以及灾后的恢复能力;社会韧性是社会人口组成及社会资本的要素的集成。Bruneau 等<sup>[32]</sup>定义了社区地震韧性,社区地震韧性是指各类社会单元(如组织、社区)在灾害发生时减少伤害、吸收灾害影响并能够以最小化社会扰动

和降低未来地震破坏的方式进行重建的能力。Meerow 等<sup>[6]</sup>对2013年以前有关城市韧性的文献进行了较全面的综述,讨论了定义城市韧性所涉及的五个方面(平衡态、韧性的词性、系统变化机理、适应性以及系统行为的空间尺度),并对现有城市韧性的定义做了比较和梳理。总结来说,城市韧性是城市系统及其各类子系统在受到扰动时可以维持或迅速恢复其功能,并通过适应来更好地应对未来不确定性的能力。

城市韧性的表现具有过程性,其包含了抵抗(resistance)、恢复(recovery)与适应(adaptation)等三个主要环节(如图2)。其中,“抵抗”是指一个具有韧性的城市系统可以吸收扰动所产生的负面作用,其核心功能不会被扰动完全破坏。“恢复”是韧性的关键,指在灾害等扰动发生后,城市系统可以迅速恢复其受损部分至所期望的状态。该“所期望的状态”可能是初始状态,也有可能是新的状态。“适应”则是指城市系统可以通过主动或被动地学习来改变其结构,进而更好地应对未来的不确定性。就三者的关系来说,每次扰动的抵抗与恢复过程为城市的适应提供了机会;而城市系统适应能力的提升反而会提高城市对于该类扰动甚至是其他扰动的抵抗与恢复能力。城市系统不断发生的抵抗、恢复与适应使得城市系统自身一直处于动态演进的过程。

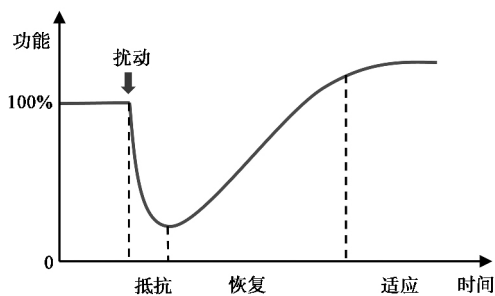


图2 城市韧性

Fig.2 Urban resilience

## 2.2 城市韧性提供了一个理解城市在灾害中反应的全过程视角

事实上,城市韧性并不是一个完全新的概念,其很多思想在以往的防灾减灾研究中均有所涉及。城市韧性的价值在于,其提供了一个全过程地理解城市在灾害中反应的视角。以往的防灾减灾研究往往着眼于城市受灾过程的部分环节,如灾前的结构加固、灾后重建策略研究等。这些研究是城市韧性研究的关键组成部分,是提升城市韧性的重要基础。然而在资源有限的前提下,无论是单体建筑还是城市系统都无法做到绝对“安全”。因此本文认为,在各环节韧性研究相对成熟的基础上,应当尽可能考虑城市受灾反

应的全过程(例如,在做灾前建设时考虑其可恢复性及恢复成本;在恢复的过程中有意识地汲取经验,为后续类似的灾害做准备),从灾害事件的全周期和承灾载体响应和应对的全过程的视角进行管理和优化,更加高效、综合地提高城市系统的灾害应对能力。

## 3 从“三度空间下系统的系统”的视角看城市韧性

研究城市韧性首先需要深刻理解城市。城市不是建筑的简单集合,人类的活动、信息的流通都是城市的重要组成部分,城市可被看做是由物理、社会、信息组成的“三度空间”<sup>[33]</sup>。三度空间中最直观的是物理空间,其涵盖所有可见的除人以外的自然物体与人工物体,如自然环境、基础设施、建筑等。社会空间是城市区别于“建筑群”的关键要素,是指人及人类活动所组成的空间,包括经济、文化、教育、医疗等。随着社会的不断进步,城市的运转越来越离不开信息技术,互联网技术、BIM(建筑信息模型)、GIS(地理信息系统)、大数据、人工智能等技术日益改变着人们的生活方式。在经历城市化的同时,城市也在经历着“信息化”。信息对于现代城市来说已经不可或缺。因此,除物理空间、社会空间外,现代城市还具有信息空间。信息空间是指各类信息流所组成的空间,包括人们之间的沟通信息、互联网信息等。物理、社会、信息三度空间共同组成了整个“城市空间”。

从功能的角度出发,城市的核心功能是为城市里的人提供各类服务,包括交通服务、医疗服务、金融服务、教育服务等。每一类服务可被划分在一个系统中,如交通系统、医疗系统、金融系统、教育系统。这些系统既相互独立,可独自发挥功能;又相互依存,共同实现整个城市的功能。学界把这一类内部子系统既独立又关联的系统称之为“系统的系统”<sup>[34]</sup>,城市是一个典型的系统的系统<sup>[33,35]</sup>。构成城市的所有系统均处于城市的“三度空间”中(如图3),每个系统均可在物理、社会和信息空间找到其相应的“投影”。例如对于交通系统,道路、桥梁、交通工具等实体处于物理空间,道路的建设、乘客、交通法规等处于社会空间,信号灯信息、人的交流处于信息空间。

城市问题表现出高度复杂性与关联性,一个系统内所表现出的城市问题,其根源有时却不在这个系统中。例如,城市的道路交通拥堵问题,可能既不在于平均小汽车拥有率,也不在于道路宽度,而是因为教育系统的政策使得该地区某普通小学升为重点小学。因此,解决城市问题不可过于局限在单个领域,而是要用全局的视角理解城市。在理解城市各类

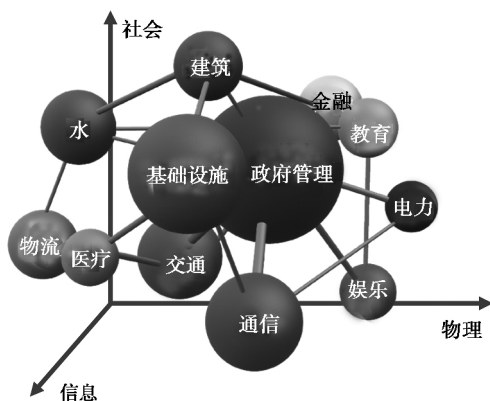


图3 三度空间下系统的系统

Fig. 3 System of systems in trio spaces

子系统的基础上,建立起各子系统之间的关联关系,同时协同考虑城市整体以及每个系统在物理、社会、信息三度空间中的投影,从而综合地、全面地理解城市,科学地解决城市各类问题。

作为一类城市问题,城市韧性同样需要用“三度空间下系统的系统”的视角看待。城市各子系统的韧性决定了城市的韧性,首先需要在“三度空间”下看待城市子系统的韧性。

### 3.1 城市基础设施系统的韧性

城市里重大基础设施的韧性是保障城市系统基本功能的关键。从“三度空间下系统的系统”的视角来看,基础设施系统的物理要素包括建筑结构、维护体系和通讯设施等;社会要素包括应急管理、使用者之间的相互关系等;信息要素则包括基础设施系统内部各类信息流,如通讯信息等。由于我国土木工程建设具有后发优势,与国外大型复杂工程多使用钢结构或钢筋混凝土结构所不同,我国不少大型复杂工程多使用结构性能优越、高韧性的钢-混凝土混合结构,该类结构的特点在于其组成材料或结构体系中各构件之间的组合作用或协同互补<sup>[36-37]</sup>。城市里的重大基础设施在其全寿命周期中会面临地震、火灾以及爆炸等典型非常规突发灾害的威胁。目前,国内已有学者<sup>[38]</sup>针对重大基础设施里较多应用的钢管混凝土,梳理了基于全寿命周期的各类灾害荷载作用下该类结构的设计理论。重大基础设施全寿命期的安全性和耐久性将影响城镇化建设过程中环境、社会、经济等各个方面,从“三度空间下系统的系统”的视角研究基于全寿命周期城市重大基础设施的韧性,是保障城市系统基本功能的关键。

### 3.2 城市建筑系统的韧性

建筑是城市的基本载体,其韧性对保障城市基本功能具有重大意义。在灾害后迅速恢复使用功能是

建筑系统韧性的核心内容,它包括:在物理空间上,建筑系统的结构和非结构构件的破坏要尽量少或者可以迅速恢复;在社会空间上,建筑物所依赖的周围社区服务及社区人员应尽量保持稳定;在信息空间上,维持社会正常运行的通讯、广电基础设施应能尽快恢复。在建筑系统的三度空间中,物理空间为城市居民提供庇护,研究物理空间的恢复过程具有重要意义。在微观方面,借鉴仿生学概念的建筑材料乃至建筑结构的自免疫、自适应、自修复等问题一直是研究热点。比如将聚合物微胶囊、充填树脂的中空纤维等具有触发-自修复功能的材料加入到混凝土中,在混凝土结构开裂后可以实现力学性能或抗渗性能的自动修复。在宏观方面,美国 FEMA 版布了 FEMAP-58 新一代性能化设计方法,为建筑抗震韧性评价提供了详尽的修复成本、修复时间以及人员伤亡计算方法。本文作者基于 FEMAP-58 对按照中美规范设计的高层建筑抗震韧性进行了详细的对比和分析,发现建筑在震下的经济损失和停工时间主要由非结构构件破坏导致<sup>[39]</sup>;进一步地,本文作者将该建筑抗震韧性评价拓展到城市区域<sup>[40]</sup>,发现经济损失主要来源于不可维修的残余变形而非房屋倒塌。除了物理空间,未来研究还需考虑社会空间及信息空间在建筑系统韧性中的作用,只有统筹三度空间才能全面理解城市建筑系统韧性。

### 3.3 城市医疗系统的韧性

城市医疗系统在城市救灾、灾后恢复等方面扮演着十分重要的角色。一个具有“韧性”的医疗系统不仅可以减轻灾害对其设施和功能的影响,更重要的是,有效运转的医疗系统将能够救治更多的受灾市民,提振受灾市民的信心,提升城市整体的韧性。从“三度空间下系统的系统”的视角来看,医疗系统的物理要素包括医疗建筑、医疗设施与物资等;社会要素包括医疗制度、医患关系、应急管理等;信息要素则包括医疗系统内部各类信息流,如急救通讯、电子病历、挂号信息等。同时,医疗系统也是城市系统的一个子系统,与建筑、基础设施、交通、通讯、政府等其他子系统密切相关。现有研究多集中在灾害下的医院自身抗灾能力上,如对医院建筑结构的灾害风险评估,对医院建筑内部组成部分、关键功能系统、家具设备、科室设备等脆弱性的研究<sup>[41-43]</sup>,对医疗系统韧性的研究较少。

### 3.4 城市交通系统的韧性

交通系统作为城市系统中十分重要的一个子系统,历来在城市规划、城市运行和城市管理中备受关注。在“三度空间”框架下,“物理”代表交通系统中供给端路网和需求端的机动车出行,“社会”代表出行者

和管理者构成的空间,包括各类出行行为和管理政策;而“信息”则代表交通大数据的采集、处理、分析与应用。城市交通系统的韧性代表着在灾害来临时,交通系统中交叉口和路段的通行速度、通行能力等抵御灾害的能力以及灾后的恢复能力。关于交通系统灾害韧性方面的整体研究目前较少,大多停留在灾害影响程度的定性、定量分析和对交通灾害的仿真评价层面。在各类自然灾害对交通系统的具体影响方面,随着数据采集和分析方法的不断进步,国内外已陆续发表了多个交通灾害研究成果<sup>[44-46]</sup>。在各类自然灾害中,暴雨灾害对城市交通系统的影响程度最大、范围最广、频率最高,因此从20世纪末期以来,该领域持续受到学者们的广泛关注。针对此问题,本文作者曾结合气象和道路环境因素研究暴雨灾害情况下的交通系统韧性,并结合动态交通仿真平台,系统分析交通瘫痪的发生、演化规律以及动态调控管理技术<sup>[47-48]</sup>。城市交通系统的韧性分析有助于理解自然灾害对城市交通系统的影响以及城市面临灾害时城市交通系统的抵抗能力和恢复能力。

### 3.5 政府管理系统的韧性

政府管理系统是城市韧性建设各子系统的枢纽,为各子系统的运转提供制度保障。一个具有韧性的政府管理系统要确保其系统内部的各组织机构、组织机构间的交互协调的可靠性和适应性,同时也需要与政府系统外的参与各方建立的协同应对体系。从“三度空间下系统的系统”的视角来看,政府管理系统的物理要素包括政府机构的办公场所、政府主导建设的工程设施、储备的装备物资等;社会要素包括对参与各方进行利益协调、监管、共治的政策法规、人员力量及社会资本等;信息要素既包括政府体系内部横向和纵向信息共享与命令传达,也包括政府与社会间的信息收集与发布等。现有研究主要分散在各自子领域的探讨,如城市韧性的概念探讨<sup>[49-50]</sup>、信息沟通和协调能力的决定因素、社会资本对韧性建设的影响<sup>[51-52]</sup>、社会体系的脆弱性研究<sup>[53]</sup>,对政府体系提升城市韧性的因果关联探讨较少。

### 3.6 城市通信系统的韧性

具有“韧性”的城市通信系统在面对灾害时对于降低经济损失、挽救人民生命财产具有至关重要的意义。正常运转的通信系统不仅可以及时地传导受灾信息、降低救灾抢险的响应时间、稳定受灾群众的信心,更可以将城市中的多个子系统有效地组织起来,提高城市的综合抗灾救灾能力。从“三度空间下系统的系统”的角度分析,通信系统在物理空间的投影为通信媒介、通信基础设施与通信终端设备等;在社会

空间的投影为通信系统支撑的社交网络和社会协作等;在信息空间的投影则表现为信息的收集、传递与交换等。通信系统既是城市系统的一个子系统,同时又为教育、建筑、医疗、政府等其他子系统提供不可或缺的基础服务,使得城市内的各个子系统能够实现高效的协作与融合。已有的研究工作主要集中在通信系统基础设施的抗灾能力上,如通信系统在极端环境下的通信能力、在灾害中应急通信系统的构建、通信基础设施对灾害风险的抵抗能力等<sup>[54-56]</sup>。

如上所述的各子系统只是城市众多子系统的一部分,城市还有其他的子系统,如金融系统、物流系统、教育系统等。在理解城市子系统韧性的基础上,应结合“系统的系统”的思想,充分考虑这些子系统间的关联关系,基于城市韧性“全过程”的内涵,最终提出全面的城市韧性提升方案。

## 4 城市的韧性管理

城市所有子系统的韧性共同决定了城市系统的韧性,但城市系统的韧性并非是各子系统韧性的简单加和。由于各子系统之间存在着不同程度的关联,单个子系统的行为往往会对其他子系统产生影响,比如,城市电力系统的崩溃会导致供水系统的失效,因此单纯将资源投入到供水系统本身有时可能并不能够有效提升供水系统的韧性。对于整个城市系统来说,各个子系统的重要性不尽相同,有些子系统与其他子系统仅有较弱的关联性或者为城市提供较次要的功能,过分投入资源提升这些子系统的韧性将并不一定能够有效提升整个城市系统的韧性。与此同时,城市韧性的内涵具有过程性,包括抵抗、恢复和适应三个主要环节。有些城市的灾害“抵抗”能力已经较强,比如建筑抗震设防等级已经较高,为应对发生概率很低的超强地震而继续大幅度投入资源到“抵抗”阶段的效果就很差;而如果能够更全面地考虑如何提高城市在地震灾害下的“恢复”及“适应”能力,降低城市的恢复成本、减少恢复时间,为将来的灾害做好准备,则能够更有效地全面提升城市系统的韧性。

城市的资源总是有限的,城市的管理者要在有限的资源下最大程度地确保和提升城市的韧性,必须在深入理解城市系统和城市韧性的基础上,研究城市韧性的指标体系,提出合理的政策、建立相关的制度、制定技术和管理标准并确保有效实施,将有限的资源合理地配置到三度空间下的各个子系统和韧性建设的各个环节,即对城市进行“韧性管理”(resilience management)。

## 5 结语

中国正处于快速城镇化的阶段,城市人口和财富急剧增加,如何在灾害频发的当下保证城市的安全与稳定也是城市建设与管理的要务之一。希望城市韧性的概念有助于理解城市在遭受各种灾害时的全过程反应,“三度空间下系统的系统”的思想有助于为把握城市韧性内涵提供新视角,城市“韧性管理”有助于为提升城市韧性提供方法与路径。本文作者所组成的团队今后将继续对城市韧性的本质进行探索,完善“三度空间下系统的系统”的理论框架,建立城市的韧性管理方法与工具,帮助城市管理者提升城市的韧性。

### 参考文献

- [1] 兰柏超,卜令军. 城市发展过程中的环境问题研究[J]. 学术交流, 2013(3): 146-149
- [2] 李在上,李楠,方东平. 韧性: 城市防灾减灾的新视角[C]//中国土木工程学会2016年会, 2016: 21-29
- [3] 中国经济网[EB/OL]. [http://www.ce.cn/xwzx/gnsz/gdxw/201701/20/t20170120\\_19752962.shtml](http://www.ce.cn/xwzx/gnsz/gdxw/201701/20/t20170120_19752962.shtml)
- [4] Nations U. World Urbanization Prospects: The 2014 Revision[M]. New York, 2015
- [5] EM-DAT[EB/OL]. [http://www.emdat.be/disaster\\_trends/index.html](http://www.emdat.be/disaster_trends/index.html)
- [6] Meerow S, Newell J P, Stults M. Defining urban resilience: A review[J]. Landscape and Urban Planning, 2016, 147: 38-49
- [7] 蔡建明,郭华,汪德根. 国外弹性城市研究述评[J]. 地理科学进展, 2012(10): 1245-1255
- [8] 张茜,顾福妹. 基于城市恢复力的灾后重建规划研究[C]//城乡治理与规划改革——2014中国城市规划年会, 2014: 13
- [9] 朱华桂. 论社区抗逆力的构成要素和指标体系[J]. 南京大学学报: 哲学·人文科学·社会科学版, 2013, 50(5): 68-74
- [10] Klein R J T, Nicholls R J, Thomalla F. Resilience to natural hazards: How useful is this concept? [J]. Environmental Hazards, 2003, 5(1): 35-45
- [11] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annu. Rev. Ecol. Systemat, 1973, 4: 1-23
- [12] Chen N, Graham P. Climate Change as a Survival Strategy: Soft Infrastructure for Urban Resilience and Adaptive Capacity in Australia's Coastal Zones[M], 2011
- [13] Folke C. Resilience: the emergence of a perspective for social-ecological systems analyses [J]. Global Environmental Change, 2006, 16: 253-267
- [14] Carpenter S R, Gunderson L H. Coping with collapse: Ecological and social dynamics in ecosystem management[J]. Bioscience, 2001, 51(6): 451-457
- [15] Angeler D G, Allen C R. Quantifying resilience [J]. Journal of Applied Ecology, 2016, 53(3): 617-624
- [16] Davoudi S, Brooks E, Mehmood A. Evolutionary resilience and strategies for climate adaptation[J]. Planning Practice & Research, 2013, 28(3): 307-322
- [17] Godschalk D R. Urban hazard mitigation: Creating resilient cities [J]. Natural Hazards Review, 2003, 4(3): 136-143
- [18] Bozza A, Asprone D, Manfredi G. Developing an integrated framework to quantify resilience of urban systems against disasters [J]. Natural Hazards, 2015, 78(3): 1729-1748
- [19] Jha A K, Miner T W, Stanton-Geddes Z. Building urban resilience: Principles, tools, and practice [M]. Washington D C: The World Bank, 2013
- [20] Lu P W, Stead D. Understanding the notion of resilience in spatial planning: A case study of Rotterdam, The Netherlands [J]. Cities, 2013, 35(4): 200-212
- [21] 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, 29(8): 608-625
- [22] Sharifi A, Yamagata Y, Ijee. Major principles and criteria for development of an urban resilience assessment index [J]. Proceedings of the 2014 International Conference & Utility Exhibition on Green Energy for Sustainable Development (Icue), 2014, 45(3): 1-5
- [23] 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 Sciences, 2013, 13(2): 221-230
- [24] Ahern J. From fail-safe to safe-to-fail: sustainability and resilience in the new urban world [J]. Landscape and Urban Planning, 2011, 100(4): 341-343
- [25] Balsells M, Barroca B, Amdal J R, et al. Analysing urban resilience through alternative stormwater management options: Application of the conceptual spatial decision support system model at the neighbourhood scale [J]. Water Science and Technology, 2013, 68(11): 2448
- [26] Kim D, Lim U. Urban resilience in climate change adaptation: A conceptual framework [J]. Sustainability, 2016, 8(5): 405
- [27] 林先发,司马志纯. 试论归纳与演绎的辩证关系[J]. 武汉大学学报: 哲学社会科学版, 1980(4): 69-72
- [28] 张纯,张洋,吕斌. 唐山大地震后重建与恢复的反思: 城市规划视角的启示[J]. 城市发展研究, 2012, 19(5): 119-126
- [29] 尉建文,谢镇荣. 灾后重建中的政府满意度——基于汶川地震的经验发现[J]. 社会学研究, 2015(1): 97-113
- [30] Tate E, Strong A, Kraus T, et al. Flood recovery and property acquisition in Cedar Rapids, Iowa [J]. Natural Hazards, 2016, 80(3): 2055-2079
- [31] Aldrich D P. It's who you know: Factors driving recovery from Japan's 11 March 2011 disaster [J]. Public Administration, 2016, 94(2): 399-413
- [32] Bruneau M, Chang S E, Eguchi R T, et al. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities [J]. Earthquake Spectra, 2003, 19(4): 733-752
- [33] Kasai S, Li N, Fang D. A system-of-systems approach to understanding urbanization—state of the art and prospect [J]. Smart and Sustainable Built Environment, 2015, 4(2): 154-171

- [34] Eisner H, Marciniak J, Memillan R. Computer-aided system of systems (S2) engineering [C]//IEEE International Conference on Systems, 2002, 1(1): 531-537
- [35] Javidrooz V, Shah H, Cole A, et al. Towards a city's systems integration model for smart city development: a conceptualization [J]. International Conference on Computational Science and Computational Intelligence, 2015: 312-317
- [36] 聂建国. 钢-混凝土组合梁结构——试验、理论与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2005(14): 2419-2419
- [37] 韩林海, 陶忠, 王文达. 现代组合结构和混合结构 [M]. 北京: 科学出版社, 2009
- [38] 韩林海. 钢管混凝土结构 [M]. 第三版. 北京: 科学出版社, 2016
- [39] Tian Y, Lu X, Lu X, et al. Quantifying the seismic resilience of two tall buildings designed using Chinese and US Codes [J]. Earthquakes and Structures, 2016, 11(6): 925-942
- [40] Zeng X, Lu X, Yang T Y, et al. Application of the FEMA-P58 methodology for regional earthquake loss prediction [J]. Natural Hazards, 2016, 83(1): 177-192
- [41] 辛衍涛. 医院灾害脆弱性的相关因素 [J]. 中国急救复苏与灾害医学杂志, 2009(4): 618-620
- [42] De Wulf A, Aluisio A R, Muhlfelder D, et al. Emergency care capabilities in north east haiti: A cross-sectional observational study [J]. Prehospital and Disaster Medicine, 2015, 30(6): 553-559
- [43] Achour N, Miyajima M, Kitaura M, et al. Earthquake-induced structural and nonstructural damage in hospitals [J]. Earthquake Spectra, 2012, 27(3): 617-634
- [44] Ibrahim A T, Hall F L. Effect of adverse weather conditions on speed-flow-occupancy relationships [M], 1994
- [45] Lam W H K, Tam M L, Cao X, et al. Modeling the effects of rainfall intensity on traffic speed, flow, and density relationships for urban roads [J]. Journal of Transportation Engineering, 2013, 139(7): 758-770
- [46] Angel M L, Sando T, Chimba D, et al. Effects of rain on traffic operations on Florida freeways [J]. Transportation Research Record, 2014, 2440(1): 51-59
- [47] Jia Y, Wu J, Du Y, et al. Impacts of rainfall weather on urban traffic in Beijing: Analysis and modeling [J]. Physics, 2015
- [48] Jia Y, Wu J, Du Y, et al. Application of FLOWSIM for traffic management and assessment in Shenzhen [J]. Aiaa Journal, 2015
- [49] Comfort L K, Boin A, Demchak C C. Designing resilience: preparing for extreme events [M]. University of Pittsburgh Press, 2010
- [50] The National Academies. Disaster resilience: A national imperative [M]. The National Academies Press, 2012
- [51] Aldrich D P. Building Resilience: Social Capital in Post-Disaster Recovery [M]. University of Chicago Press, 2012
- [52] Tierney K. The social roots of risk: Producing disasters, promoting resilience [M]. Stanford University Press, 2014
- [53] Cutter S L. Resilience to what? Resilience for whom? [J]. The Geographical Journal, 2016, 182(2): 110-113
- [54] 赵曼勇, 周红阳, 余江, 等. 光纤电流差动保护在应对冰灾期间采用公用通信网通道的改进措施 [J]. 南方电网技术, 2008, 2(2): 27-30
- [55] Eisenman D P, Cordasco K M, Asch S, et al. Disaster planning and risk communication with vulnerable communities: lessons from Hurricane Katrina [J]. American Journal of Public Health, 2007, 97(S1): S109
- [56] Meissner A, Luckenbach T, Risse T, et al. Design challenges for an integrated disaster management communication and information system [C]//Information System, Diren, 2002

方东平(1963-) 男, 博士, 教授。主要从事建筑工程安全、城镇化等方向的研究。

李在上(1992-) 男, 博士研究生。主要从事城市韧性方向的研究。

李楠(1987-) 男, 博士, 副教授。主要从事土木工程信息化、城市韧性等方向的研究。

韩林海(1967-) 男, 博士, 教授。主要从事组合结构、混合结构和工程抗火等方向的研究。

吴建平(1957-) 男, 博士, 教授。主要从事智慧城市、交通仿真等方向的研究。

陆新征(1978-) 男, 博士, 教授。主要从事工程防灾减灾等方向的研究。

孔祥明(1974-) 男, 博士, 副研究员。主要从事混凝土智能检测与自修复等方向的研究。

李勇(1985-) 男, 博士, 助理教授。主要从事移动数据与城市计算等方向的研究。

吕孝礼(1982-) 男, 博士, 助理教授。主要从事公共组织行为、危机管理等方向的研究。