

# 韧性城市恢复力评价模型构建

吴波鸿<sup>1,2</sup>, 陈安<sup>1,2</sup>

1. 中国科学院科技战略咨询研究院, 北京 100190

2. 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 近年来,韧性城市逐步取代传统意义上的可持续性发展城市,成为城市规划、地理学和应急管理研究学术界新的热门领域。当前学界还没有形成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。针对韧性城市的恢复力评价模型进行了研究,界定了韧性城市恢复力的内涵,分析了韧性城市在遭遇外部扰动过程中不同阶段的演化机制,并提出了韧性城市恢复力演化过程中关键节点的社会意义。为韧性城市规划和管理所强调的城市长期适应能力和智慧性提供量化评价指标参考。

**关键词** 韧性城市;恢复力;评价;应急管理

根据民政部、国家减灾委员会办公室发布的数据,2017年,中国各类自然灾害共造成全国1.4亿人次受灾,881人死亡,98人失踪,直接经济损失3018.7亿元<sup>[1]</sup>。城市最初产生的重要原因之一是帮助人类抵御各种威胁和多重危机,随着时代的进步,城市逐渐演化成复杂且脆弱的巨型系统。为了抵御自然和人为灾害,人类不断应用现代化科技在城市内部修建大量的防灾工程,但大多数城市在灾害风险面前仍然不堪一击,甚至陷入瘫痪。以洪灾为例,美国第四大城市休斯顿在20世纪持续修筑了数千千米的排洪管道和两座巨大水库,希望“人定胜天”,但2017年飓风“哈维”重创美国德州的同时,也使得休斯顿成为一片泽国。对此,Burdy等指出工业化国家所深度依赖的防洪工程设施并不能减轻洪水灾害,相反,这些防洪手段和设施会损害河流的生态系统,增加长期的洪水风险<sup>[2-3]</sup>。由此可见,企图控制自然的管理范式以及完全以对抗外来抵

御灾害风险的城市治理理念已经无法满足未来城市发展的需要。

韧性理念源于工程学领域,近年来不断有学者将之用于风险及应急管理中<sup>[4]</sup>。针对人类社会面临的自然灾害和人为灾害,城市韧性(resilience)被用来衡量城市抵御外部“扰动”(disturbance)的能力,更强调前期准备及灾后恢复的能力。疾病传播、环境污染、恐怖袭击为主的人为扰动及其引发的负面效应也已成为不可忽视的问题。此外,一些以往经常被人们忽视的缓慢扰动,例如气候变化、经济依赖、能源危机,甚至非理性城市化等,同样成为城市发展不确定性的影响因素。

目前,中国韧性城市研究还处在起步阶段,还没有形成针对中国韧性城市独特性的系统研究,尚未建立全面、可操作的韧性城市研究框架,更没有应用于具体的社会实践。

本文提出的韧性城市恢复力评价模型旨在提供一

收稿日期:2018-02-13;修回日期:2018-07-19

基金项目:北京市自然科学基金面上项目(9182017)

作者简介:吴波鸿,博士后,研究方向为应急管理、应急管理信息系统、石油地质、钻井工程,电子信箱:wubohong@casipm.ac.cn;陈安(通信作者),研究员,研究方向为现代应急管理、管理机制、灾难文化、智库方法,电子信箱:anchen@casipm.ac.cn

引用格式:吴波鸿,陈安.韧性城市恢复力评价模型构建[J].科技导报,2018,36(16):94-99;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2018.16.011

种可以量化评价韧性城市恢复力的新思路,对该模型的概念、定义和内涵进行了详细的阐述,从而为韧性城市所强调的城市长期适应能力和智慧性服务,使得韧性城市可以在每次扰动之后及时采取物理性、制度性调整,以更好地应对下一次可能的扰动。

## 1 韧性城市概念及恢复力评价研究进展

### 1.1 韧性概念的提出及理论演变

韧性概念起源于工程领域,与影响工程系统功能

稳定性的扰动有关,等同于故障工程系统快速恢复正常功能的能力<sup>[5]</sup>。Bruneau<sup>[6]</sup>用4种特性定义这种韧性:系统在扰动后不会产生功能退化的能力,即坚固性(robustness);系统各部分的可替代性,即冗余性(redundancy);发现问题并调动所需资源的能力,即智慧性(resourcefulness);系统及时恢复功能的能力,即快速性(rapidity)。抵抗扰动及扰动后的恢复能力是工程韧性理念的两个核心指标,对于韧性的衡量标准主要在于系统受到扰动后的恢复能力,可以说,一个系统的韧性越强,其全部功能就恢复得越快<sup>[7-8]</sup>(图1<sup>[5,9]</sup>)。

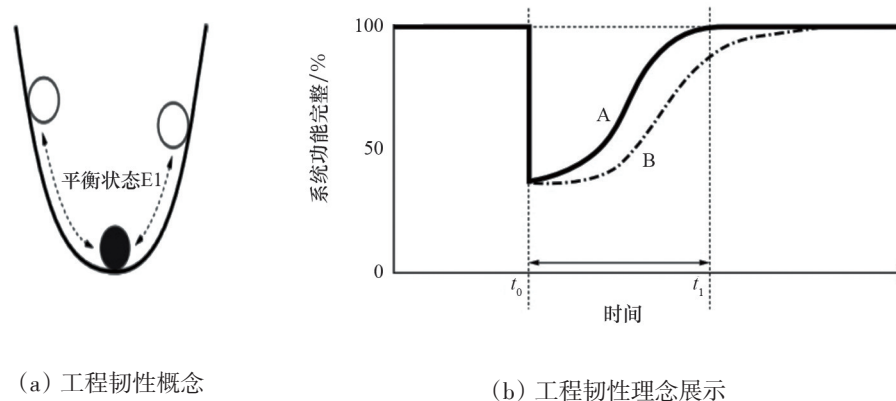


图1 工程韧性概念图

Fig. 1 Conceptual diagram of resilience in engineering

在生态学领域,Holling于1973年引入术语“韧性”,并提出“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”,用以表述所观察的生态系统动态。在传统的生态平衡理论中,如果每个生态系统都处于稳定状态,整个系统即使受到外部扰动也会最终回到平衡状态。但Holling等<sup>[10-11]</sup>的研究却表明,一些经常受到外部扰动的生态系统从未处于稳定状态,并且这些生态系统存在多重平衡点。Holling<sup>[12]</sup>基于多重平衡/不平衡模式将韧性定义为系统吸收扰动并仍继续存在的能力。系统平稳不再是系统运行追求的终极模式,韧性更关注系统可承受外部扰动的能力,或是重组后自我更新的能力<sup>[13]</sup>。

从此,韧性成为一个理解社会生态系统动力学的有效途径<sup>[4]</sup>,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。

### 1.2 韧性城市恢复力评价研究进展

联合国人居署对韧性城市的定义是增加城市应对自然和人为危机影响的韧性,这一目标的主要支柱之一是确保城市能够抵御灾难性事件并迅速恢复。洛克菲勒基金会将城市韧性定义为城市中的个人、社区、机构、企业和系统在各种慢性压力和急性冲击下存续、适应、发展的能力。由于韧性城市涉及的领域十分宽泛,韧性城市的恢复力评价必然要考虑到城市整体复杂性和包括技术、组织、社会和经济多个方面的不同维度。

Bruneau等<sup>[14-15]</sup>对韧性城市恢复力提出了非常宽泛的定义,其中包含可以减少灾害损失的全部举措,包括如何缓解灾害损失和快速恢复。但其提出的评估社区恢复力的基本框架体系并没有详细的定义和定量指标。Bruneau等提供总体框架,又有学者进行了各种研究,目的是提出具有可操作性的韧性城市恢复力的概念,并确定其测量方法。

Bruneau<sup>[15]</sup>首次将概率函数、脆弱性和复原力进行

了关联,并把他们用于急性护理设施的单一综合方法研究。在定义了恢复力的主要特性和概念后,该研究提出了两种用于量化急性护理灾后恢复力的方法,健康人群的百分比以及每天可接受医疗服务的患者数量。Miles等<sup>[16]</sup>提出了恢复力的综合性概念模型,该模型建立了社区家庭业务、生命线网络和社区之间的关系。该研究的主要目的是讨论社区恢复力概念并且尝试去实际运用,尽管在他们的研究中没有明确提出如何测量恢复力,但指出了将恢复力概念与现实因素联系起来起来的必要性。Davidson等<sup>[17]</sup>开发了电力系统的地震后恢复过程模型。建立了基于可用数据的离散事件模拟模型,目的是提高评估经济损失所需恢复时间的定量估计,并确定改善未来地震恢复过程的方法。Chang等<sup>[18]</sup>以孟菲斯水系统为研究对象,对韧性恢复力的定量测量做出了贡献,探讨了损失评估模型用于测量恢复力的可能性。Cimellaro<sup>[19]</sup>等试图第一个制定量化计算恢复力的模型框架,但研究仅考虑了强度测量值不确定性,其他不确定性未被提及。

### 1.3 韧性城市恢复力评价体系构建的意义

当前韧性城市恢复力评价研究仍处于起步阶段,国内文献及研究成果可谓凤毛麟角。Klein<sup>[20]</sup>指出,如果没有研究对韧性指标进行明确且可操作界定,那么这个概念仅是一个模糊概念,无法作为实际的政策或者管理工具。对韧性城市恢复力评价指标及体系进行构建既有助于客观评价一个城市在遭遇灾难情况下的快速恢复能力,又可以进行比较研究为城市规划者及管理者提供必要的的数据支撑。

## 2 韧性城市恢复力评价模型构建

### 2.1 定义

城市韧性恢复力问题涉及多主体、多客体及多维度,不能依靠直接观察测定,必须通过机理分析、替代指标和韧性因子推导。同时,由于城市韧性恢复力的复杂性,应该对韧性问题降维并对研究对象和应对风险合理简化,即对韧性城市恢复力问题中的最小表现单元在某种单一风险或外部扰动影响下的韧性表现进行分析。选择替代指标和韧性因子应符合城市韧性的基本定义,具有代表性并可以量化的进行比较,这些指标可以通过搜集历史资料或经过合理假设获得。

韧性城市恢复力评价分为3个方面,强度( $S_1$ :

strength)、刚度( $S_2$ :stiffness)和稳定性( $S_3$ :stability)。其中,强度是指城市抵抗外来灾害破坏的能力,用以描述研究对象在外来扰动侵袭下维持其自身功能正常运转的能力;刚度是指城市或其他研究对象在一定灾害破坏下功能性免于遭受损失的能力;稳定性是指城市保持其未受灾害影响状态下自有平衡状态的能力,与城市的组织结构关系密切。如图2所示,城市A抵抗外来灾害破坏的能力高于城市B,城市B的城市功能受外来灾害破坏的影响小。换言之,城市A的韧性强度高于城市B,城市B的韧性刚度高于城市A。

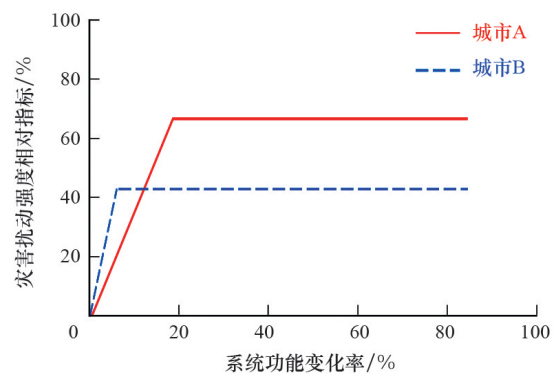


图2 韧性城市恢复力强度与刚度指标概念

Fig. 2 Conceptual diagram of strength and stiffness of resilience cities

对韧性城市而言,强度越高,说明城市可以抵抗的外来灾害规模越大,城市越不易完全丧失自身的功能性;城市刚度越高,说明城市功能越不易受到外部灾害的影响和扰动;稳定性越高,说明城市的内部组织结构越合理,城市的冗余性和智慧性越强。城市韧性计算公式为

$$R = \sum_{m=1}^3 S_m = S_1 + S_2 + S_3 \quad (1)$$

### 2.2 演化机制

在受到外来灾害破坏时,韧性城市恢复力可用灾害强度与城市系统功能性变化率的函数进行评价。整体分为4个阶段,依次是:弹性恢复阶段、恢复力损失阶段、恢复力强化阶段和恢复力丧失阶段。城市的韧性不仅是指减少灾害带来的风险和损害,更是指迅速恢复到稳定状态并保持城市必要的系统功能正常运转的能力。本文提出的韧性城市恢复力整体模型如图3所示,该模型适用于低维度的城市组成个体韧性评价,韧性城市所遭受的灾害以灾害扰动强度相对指标衡量,

该指标是指城市所遭受的单个灾害强度与该城市所能承受的同类灾种的最大强度的比值。

弹性恢复阶段如图4所示,当城市受到一定强度的外来灾害扰动时,城市系统功能受到一定程度的损失,但当外来扰动逐渐减小时,城市功能受到的影响将完全恢复。曲线的O-A-A<sub>1</sub>斜率越大,韧性城市恢复力的刚度指标越强,该城市在面对外来灾害扰动时城市功能越不易受到损失。A<sub>1</sub>点是韧性城市弹性恢复阶段的极限点,A与A<sub>1</sub>点越接近,城市的韧性化程度越高。

恢复力损失阶段如图5所示,在图5中B点之后,尽管外来灾害扰动破坏变化很小(甚至减弱),城市功能却出现了较大的损失;这一阶段城市恢复力损失阶段,遭受损失的城市系统功能无法不可恢复到初始状态;该阶段为韧性城市自我恢复最为关键的阶段,也是城市自我调节抵御能力最弱的阶段。B<sub>1</sub>点是韧性城市恢

复力的下限,是韧性城市规划者和管理者最应该关注和构建的指标。

恢复力强化阶段如图6所示,B<sub>n</sub>点之后,如果外来灾害扰动强度不再增大,城市功能的损失不再增加。换言之,如果城市功能继续丧失,必须出现更大强度的外部灾害扰动。该阶段为韧性城市恢复力整体有所强化,是一个城市仍具有韧性恢复力的最后阶段。在此过程中,整个城市功能的整体性可能遭受到破坏。C点是韧性城市可恢复性所能承受的外部扰动的上限;E点是韧性城市规划者及管理者所应注意的预警上限。

恢复力丧失阶段如图7所示,C点之后,韧性城市完全丧失恢复力,城市各项功能再也无法自行恢复。如果没有外部支援或重建力量辅助,受外来灾害扰动的城市功能体系开始崩溃,即便外来灾害扰动不再增加或者减少,城市功能也无法再恢复或者正常运转。

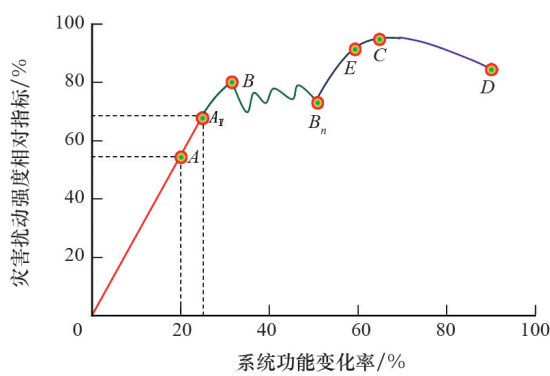


图3 韧性城市恢复力评价模型概念

Fig. 3 Conceptual diagram of evaluation model of resilience cities

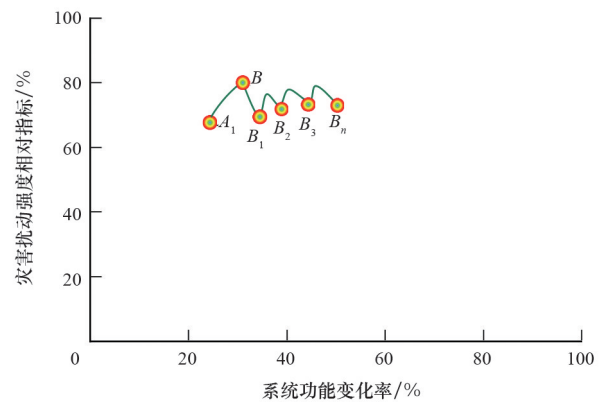


图5 韧性城市恢复力损失阶段概念

Fig. 5 Conceptual diagram of recovery ability loss phase of resilience cities

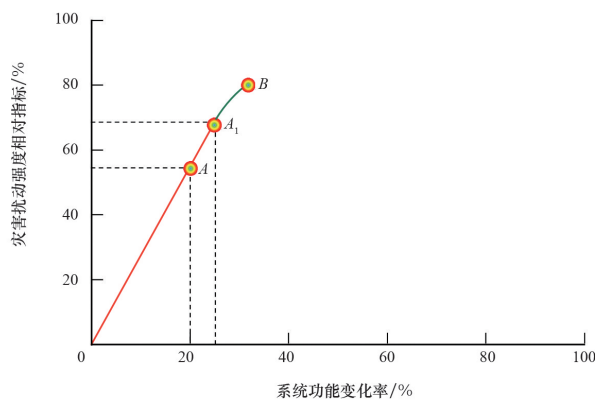


图4 韧性城市弹性恢复阶段概念

Fig. 4 Conceptual diagram of elastic recovery phase of resilience cities

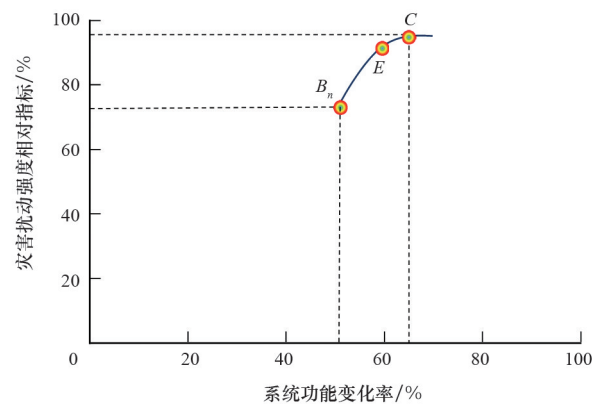


图6 韧性城市恢复力强化阶段概念

Fig. 6 Conceptual diagram of recovery ability enhancement phase of resilience cities

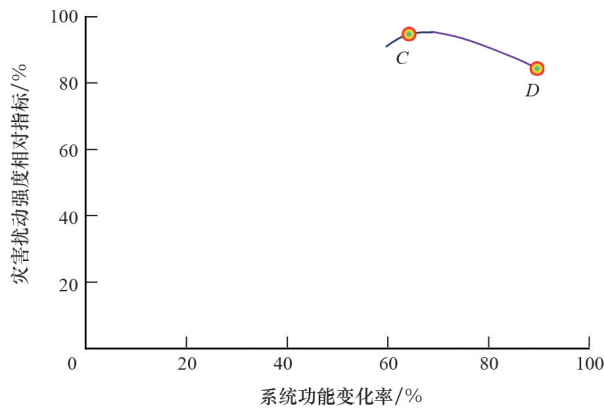


图7 韧性城市恢复力丧失阶段概念

Fig. 7 Conceptual diagram of recovery ability vanishing phase of resilience cities

### 3 结论

城市是一个由物质系统和人类社会组成的可持续网络。物质系统需要考虑城市中的自然和人造环境要素,包括建成的道路、建筑、基础设施、通信和能源设施以及水系、土壤、地形、地质和其他自然系统。人类社会是城市的社会和制度构成元素,包括城市区域内正式和非正式的、固定和机动的人类组织:学校、社区、机关、团体、企业等。

当前,中国韧性城市的研究尚处于起步阶段,还没有针对中国城市特色的韧性城市研究框架。本文提出韧性城市恢复力模型为城市韧性评估和量化决策分析提供了新的思路,尽管如此,必须正视实际操作过程中实证数据获得相当困难,对各指标的评价具有相当的主观性,城市的动态演化也充满了不确定性和非线性,以上种种问题需要在实际评估工作中充分加以考虑。

当前韧性城市理论研究还存在诸多亟需完善的方面,有待来自不同领域的学者进一步探索与研究,未来对中国韧性城市评估研究应注意以下3点。

1) 在未来的韧性城市恢复力评价研究中,需要研究者根据中国不同区域不同城市所面临的不同地理环境、经济环境和社会环境,制定具有差异化、不同尺度的韧性城市恢复力评价体系。

2) 在韧性城市恢复力评价中充分引入新技术。例如,复杂网络理论是研究网络化系统的拓扑结构,已形成完备成熟理论框架,该方法可以将城市的基础设施

简化为数学模型,以有效性指标测度城市韧性,并模拟不同重建策略下的城市恢复效率。数值模拟方法也不失为计算和模拟城市韧性的有效方法。

3) 在政府主导、各方协调的机制下,多学科、多专业将在多元尺度和多元部门之间逐步构建具有韧性的中国现代城市。

### 参考文献(References)

- [1] 民政部、国家减灾委办公室发布2017年上半年全国自然灾害基本情况[EB/OL]. [2018-01-20]. [http://www.gov.cn/xinwen/2017-07/12/content\\_5209930.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2017-07/12/content_5209930.htm).
- [2] Burby R J, Deyle R E, Godschalk D R, et al. Creating hazard resilient communities through Land-Use Planning[J]. *Natural Hazards Review*, 2000, 1(2): 99-106.
- [3] Smits A J M, Nienhuis P H, Saeijs H L F. Changing estuaries, changing views[J]. *Hydrobiologia*, 2006, 565(1): 339-355.
- [4] Berkes F. Understanding uncertainty and reducing vulnerability: Lessons from resilience thinking[J]. *Natural Hazards*, 2007, 41(2): 283-295.
- [5] Wang C H, Blackmore J M. Resilience concepts for water resource systems[J]. *Journal of Water Resources Planning & Management*, 2009, 135(6): 528-536.
- [6] 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.
- [7] Hashimoto T, Stedinger J R, Loucks D P. Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation[J]. *Water Resources Research*, 1982, 18(1): 14-20.
- [8] Hollnagel E, Nemeth C P, Dekker S. Resilience engineering perspectives, volume 1: Remaining sensitive to the possibility of failure[M]. Aldershot: Ashgate, 2008.
- [9] Liao K H. A Theory on urban resilience to floods--a basis for alternative planning practices[J]. *Ecology & Society*, 2012, 17(4): 388-395.
- [10] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. *Annual Review of Ecology & Systematics*, 1973, 4(4): 1-23.
- [11] Scheffer M, Carpenter S, Foley J A, et al. Catastrophic shifts in ecosystems[J]. *Nature*, 2001, 413(6856): 591-596.
- [12] Walker B, Holling C S, Carpenter S R, et al. Resilience,

- adaptability and transformability in social-ecological systems [J]. *Ecology & Society*, 2004, 9(2): 3438-3447.
- [13] 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.
- [14] Cimellaro G P, Reinhorn A, Bruneau M. Seismic resilience of a hospital system[J]. *Structure & Infrastructure Engineering*, 2010, 6(1-2): 127-144.
- [15] Bruneau M, Reinhorn A. Exploring the concept of seismic resilience for acute care facilities[J]. *Earthquake Spectra*, 2007, 23(1): 41-62.
- [16] Miles S B, Chang S E. Modeling community recovery from earthquakes[J]. *Earthquake Spectra*, 2006, 22(2): 439-458.
- [17] Davidson R A, Çagnan Z. Restoration modeling of lifeline systems[J/OL]. [2018-01-20]. Research Accomplishments, [https://www.researchgate.net/publication/247403672\\_Restoration\\_Modeling\\_of\\_Lifeline\\_Systems](https://www.researchgate.net/publication/247403672_Restoration_Modeling_of_Lifeline_Systems).
- [18] Chang S E, Shinozuka M. Measuring improvements in the disaster resilience of communities[J]. *Earthquake Spectra*, 2004, 20(3): 739-755.
- [19] Cimellaro G P, Fumo C, Reinhorn A, et al. Seismic resilience of health care facilities[J]. *Anidis*, 2008, 2(4): 64-70.
- [20] 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(1/2): 35-45.

## Framework of the evaluation model resilient cities

WU Bohong<sup>1,2</sup>, CHEN An<sup>1,2</sup>

1. Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Recently, resilient cities have gradually replaced the traditional concept of sustainable development cities and become the objects of a new research field in urban planning, geography and emergency management. At present, no consensus is reached for a systematic, comprehensive and operable research framework for resilient cities in China, with Chinese characteristics. This paper focuses on the framework of the evaluation model for resilient cities, the connotation of the resilience evaluation, the evolution mechanism of resilient cities in different stages of external disturbance and the significance of key nodes in the evolution process of resilient cities. This study provides a reference for establishing quantitative evaluation indicators for the long-term adaptability and the intelligent urban planning and management.

**Keywords** resilient cities; recovery; evaluation; emergency management ●



(责任编辑 傅雪)