

城市韧性承洪理论——另一种规划实践的基础

A Theory on Urban Resilience to Floods—A Basis for Alternative Planning Practices

廖桂贤 著 林贺佳 汪洋 译

Written by Kuei-Hsien Liao Translated by Lin Hejia, Wang Yang

摘要：滨河城市面对水患问题需要一种基于韧性理论的管理方法，而不是简单地修建防洪工程来抵御。通过堤、坝和渠化的防洪工程来抵御洪水，忽略了人与自然互动时所产生的不确定因素，也无法回应因气候变化而不断增加的极端灾害，因此不是解决洪水安全问题的长期有效的方法。通过运用韧性理论提升系统存续能力，笔者提出了“城市韧性承洪”理论，作为替代目前主流方式的城市洪水灾害管理体系。该理论明确了一个城市的承洪力，以及对潜在的物质财产损失和社会经济中断等情况的预警辨识力，从而防止伤亡和保持现有的社会经济特征。通过在周期性洪水中积累经验，可以应对城市的极端洪水灾害。城市韧性承洪理论挑战了“城市如不防洪即无法生存”的传统理念，实际上传统的防洪工程破坏了应对洪水的韧性。为将此理论运用于规划实践中，笔者提出了“可浸区百分比”这一指标，用以评估城市的承洪韧性。应用自然的洪泛区功能建立城市承洪韧性，提升对洪水的适应性以替代防洪工程，将减轻洪水的危害。

Abstract: River cities require a management approach based on resilience to floods rather than on resistance. Resisting floods by means of levees, dams, and channelization neglects inherent uncertainties arising from human–nature couplings and fails to address the extreme events that are expected to increase with climate change, and is thereby not a reliable approach to long-term flood safety. By applying resilience theory to address system persistence through changes, I develop a theory on “urban resilience to floods” as an alternative framework for urban flood hazard management. Urban resilience to floods is defined as a city’s capacity to tolerate flooding and to reorganize should physical damage and socioeconomic disruption occur, so as to prevent deaths and injuries and maintain current socioeconomic identity. It derives from living with periodic floods as learning opportunities to prepare the city for extreme ones. The theory of urban resilience to floods challenges the conventional wisdom that cities cannot live without flood control, which in effect erodes resilience. To operationalize the theory for planning practice, a surrogate measure—the percent floodable area—is developed for assessing urban resilience to floods. To enable natural floodplain functions to build urban resilience to floods, flood adaptation is advocated in order to replace flood control for mitigating flood hazards.

关键词：洪水适应性；防洪；洪水灾害管理；基于韧性的管理；韧性替代指标；韧性城市；城市洪泛区；城市韧性

Keywords: Flood Adaptation; Flood Control; Flood Hazard Management; Resilience-based Management; Resilience Surrogate; Resilient Cities; Urban Floodplains; Urban Resilience

本文原载于《生态与社会》2012年第4期 (*Ecology and Society*, 2012, 17[4]: 48)；韧性联盟 (Resilience Alliance) 授权本刊发表中译文

作者：廖桂贤，香港中文大学建筑系，助理教授

译者：林贺佳，北京万通立体之城投资有限公司，高级研究经理

汪洋，硕士，北京万通立体之城投资有限公司，高级研究经理

引言

尽管许多城市都建有大型防洪工程设施，如堤、坝和渠化，但是全球的滨河城市还是面临着洪灾的威胁。21世纪发生了许多大规模洪灾，如曼谷 (2011)、布里斯班 (2011)、广东 (2007)、新奥尔良 (2005)、德累斯顿 (2002)，以及台北 (2001)。工业化国家深度依赖防洪工程设施来减轻洪水灾害，而这些防洪工程设施和手段会损害河流生态系统，并增加长期的洪水风险 (Burby et al., 2000; Smits et al., 2006)。近年来，与此不同的管理理念已出现，强调必须将水域与陆域做整合管理，工程与非工程措施并重 (如 Schneidergruber et al., 2004; Associated Programme on Flood Management, 2009)。尽管如此，许多学者仍然认为防洪工程设施是城市不可或缺的——反映了根深蒂固、企图控制自然的管理范式。

防洪工程设施无法应对气候变化的不确定因素 (Zevenbergen & Gersonius, 2007)，因为其设计和操作是基于“水流变化模式保持一成不变”的过时假设 (Milly et al., 2008)。城市依靠防洪工程设施仅可抵御一定量级的洪水，但是无法应付超过其设计标准的洪水，以及日益增加的极端降雨所引发的极端洪水，而极端降雨的发生以及规模却充满着不确定性 (Alley et al., 2007)。我们需要不同的减灾方案，因此，本文提出了一个强调韧性的洪灾管理概念。

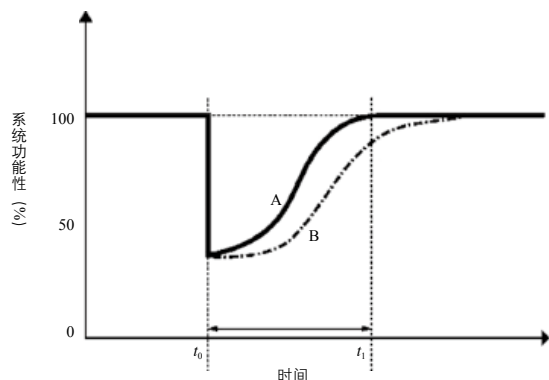
韧性的理念在生态学和工程学领域已有历史，但是将之应用于自然灾害管理则是近年来才开始的 (Berkes, 2007)。虽然在洪灾管理的领域中对韧性理念的关注不断增加，但对于面对洪水的韧性的定义依然不够明确。本文讨论城市建成环境和河流洪水，提出了“城市韧性承洪”理论。现有文献对韧性主要有两方面的解读——工程韧性和生态韧性 (Holling, 1996)。笔者将解释为何后者是更适用的理论架构，更适合用以定义城市承洪韧性。为了将这一理念用于规划实践，本文提出了一个指标用于评估城市承洪韧性，并主张，若要增加城市的承洪韧性，应培养城市对洪水的适应性，而非依赖防洪工程设施。

解读韧性

工程韧性和生态韧性是两种对韧性截然不同的解读 (Holling, 1996)。在洪灾管理实践上，不同的解读会产生不同的问题定义、关注点和方法，因此区分它们的根本差别非常重要。

工程韧性和生态韧性

在工程领域，韧性与影响工程系统功能稳定性的扰动有关，经常与低故障率联系在一起，或者等同于故障工程系统快速恢复正常功能的能力 (Wang & Blackmore, 2009)。这种韧性取决于四种特性：坚固性 (robustness)，即系统在扰动后不会产生功能退化；冗余性 (redundancy)，即系统各部分的可替换性；应变性 (resourcefulness)，即发现问题并调动所需资源的能力；以及快速性 (rapidity)，即及时恢复系统功能的能力 (Bruneau et al., 2003)。工程韧性理念包括两个观念：抵抗扰动及扰动后的恢复，然而目前的韧性衡量标准主要在于后者——全部功能恢复得越快，其系统的韧性越强 (如 Hashimoto et al., 1982; Hollnagel et al., 2008) (图 1)。因此，



注：受损系统经过一段时间后（案例 A 从 t_1-t_0 ）完全恢复之前的功能，时间越长，系统韧性越小（案例 B）。

图 1 工程韧性理念展示

资料来源：根据 Wang & Blackmore (2009) 改绘

工程韧性主要强调当外在压力消除后，系统功能恢复原状的能力 (Wang & Blackmore, 2009)。

在生态学领域，霍林 (Holling, 1973) 引入韧性这个术语，用以表述所观察的生态系统动态，同时也挑战传统的生态平衡范式——假设每个生态系统都处于稳定状态，即便受到扰动也会最终恢复稳定。但是，观察研究显示，一些生态系统由于经常受到扰动，从未处于稳定状态。即使生态系统从扰动中恢复稳定，稳定的状态却与之前不同，表示有多重平衡点的存在。这意味着生态系统具有不同结构和过程，复原到之前的生态系统极其困难，甚至不可能 (Holling, 1973; Scheffer et al., 2001)。基于多重平衡 / 不平衡模式，霍林 (1973) 将韧性定义为系统吸收扰动并仍继续存在的能力。这种生态韧性概念着重系统的持续性，或是系统维持相同的体制——由同一套机制、结构、反馈和特质所定义的体制 (Walker et al., 2004)。由于系统的运行不以追求平衡为终极模式，韧性关乎系统可承受改变的能力，或是重组后更新的能力 (Carpenter et al., 2001)。因此，韧性的大小可以系统在转换至不同的机制前所能承受的扰动规模来衡量。

因为针对的是不同的系统，工程韧性和生态韧性自然存在了差别 (表 1)。这些差别主要源于其所奠基的两种范式对系统动态可能性的假设的不同 (Holling, 1996) (图 2)。工程韧性的终极目标在于系统保持最佳功能状态，这与传统的生态平衡范式观念一致，假定系统永远只有一种理想稳定状态。两种范式的差别反映了对“常态”的不同认知。在工程韧性概念中，任何背离最佳状态的情况都是不正常的；而在生态韧性概念中，由于系统在本质上是动态的，在机制范围内的任何波动都属于正常 (Holling, 1973)。

本质上，工程韧性是保持稳定的能力，即维持系统状态不变，或是保持最小波动；而生态韧性则是任何状态下存续的能力。二者的特性十分不同，甚至相互矛盾。系统的工程韧性高，也许生态韧性就低；工程韧性低，也许生态韧性就高 (Holling, 1973, 1996)。

表 1 工程韧性与生态韧性的差异

	工程韧性	生态韧性
理念架构设想	韧性 = 抵御 + 恢复 一种平衡（一种体制） 可预测	韧性 = 承受力 + 重组 多重平衡（多重体制） 不可预测 + 不确定性
关注现象	背离系统功能理想水平或稳定状态	体制转换
概念重点	稳定 / 连贯性——快速恢复平衡	持续性——保持在现有体制内
衡量标准	恢复到先前稳定状态的速度	在变成不同体制之前，系统能承受的扰动规模
扰动的角色	干扰被视为威胁	干扰被视为学习机会

应对自然灾害的社区韧性

两种韧性概念在混合系统研究领域备受关注，如社会生态系统（如 Berkes & Folke, 1998）和社会技术系统（如 Hollnagel et al., 2008）。自然灾害管理是处理人与自然波动的互动的学问（Mileti, 1999），但在这个领域中，对社区韧性的解读偏向工程韧性概念。大部分学者对社区韧性的定义都包含了最佳参考状态，并且它经常被视作承受灾害和从灾害中快速恢复的能力（表2）。例如，伯克兰和沃特曼（Birkland & Waterman, 2009）提出了社区韧性的三个特征——危害预防、快速恢复和社区功能保护，并强调，社区在维持功能的前提下可承受的压力越大，其功能恢复就越快。

绝大部分对社区韧性的讨论十分强调恢复性（如 Vale & Campanella, 2005; Lamond & Proverbs, 2009）。在许多已有研究中，为了与防御性（即系统功能受到扰动却不中断的能力）有所区分，韧性被单一地解释为恢复到灾害前状态的能力（如 Etkin, 1999）。例如，在洪灾管理中，防御意味着通过防洪工程设施抗洪，而韧性则是从洪灾状态中恢复到正常状态的概率（De Bruijn, 2004）。

生态韧性作为理论架构

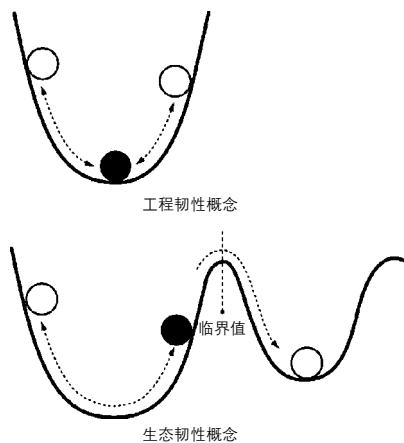
生态平衡的范式已经过时，因此，将工程韧性概念应用于可能遭受自然灾害的社区，根本上是有问题的。“恢复”

经常被理解成回到“灾害前的状态”，这等于是假设系统只有一种最佳参考状态，然而这种最佳参考状态在人与自然耦合系统中并不存在（Berkes, 2007）。城市河岸旁易淹水的低洼地区（过去的自然洪泛区）就是这样的系统，其气候、社会经济趋势、建成系统和河流工事都对洪水危害及灾难产生影响，这样的系统的运转方式更像是生态系统，而不是工程系统——具有非线性、涌现行为、不确定和意外的复杂特性（Liu et al., 2007）。这样动态的系统不会停留在某个预先设定的状态。当然，在灾害之后快速从一种混乱的状态进入有组织的状态至关重要，但是强调恢复到灾害前的社会经济状态和建成环境，却不具建设性，正因为灾害前的状态是脆弱的，才会造成灾害（Klein et al., 2003）。这样的恢复理念等于是假设系统只可能有一种稳定状态，这样的恢复概念对于稳定的过度执着，却尚未受到质疑。如果系统本身在某个时间或空间尺度上是动态的，那么强迫系统维持稳定，将会产生问题（Cumming et al., 2006）。

生态韧性概念是更适合洪灾管理的体系架构，因为其建立在更现实的多重平衡模式之上，更实际地关注变化中的持续性（Adger et al., 2005）。由于综合的社会生态系统研究（如 Berkes et al., 2003），生态韧性概念已经成为一个日趋成熟的韧性理论，强调复杂的人与自然的结合。这一理论对于都市洪灾——基本上源于河流与城市的交互作用——极其有帮助。

从保持稳定到建立韧性

韧性理论中有两个重要的论点将改变洪灾管理范式。其一，韧性产生于对固有的变化性、不确定性和意料之外事件的适应能力（Folke, 2003）。当人为抑制固有的变化性，通过指令控制管理来提升稳定性，人与自然系统的结合将会失去韧性（Holling & Meffe, 1996; Holling et al., 2002）。这说明强制洪泛区不被淹，以强加环境稳定性的方式构建社会经济



注：杯子在状态空间的所有可能状态，或者“吸引域”，包括所有各相关系统变量可能的值，在此区域中系统趋于保持不变。球则表示某个时间点的系统状态。工程韧性概念假设只有一个体制，因此只可能有一种吸引域，并且吸引域最底部代表最理想的稳定状态。生态韧性概念假设有多重体制，因此有多个吸引域，系统在吸引域内移动，永远不会在底部停留，而且也可能跨过临界（阈）值而进入另一个新的吸引域。工程韧性的概念主要是关注系统是否能保持在吸引域的最底部的稳定状态，而生态韧性的概念则关注系统是否能保持在目前的吸引域（Holling, 1996）。

图2 工程韧性与生态韧性的参数差异，可以通过启发式的杯球游戏说明

资料来源：Scheffer et al., 1993; Walker et al., 2004

表2 与工程韧性相似的社区韧性现有定义

韧性定义	文献
可持续的韧性社区定义为社会架构的组织受灾害的影响最低，同时通过恢复社区的社会经济活力能够快速复原。	Tobin (1999: 13)
韧性是防止和减少损失的能力，其次是当损失发生，尽可能维持正常的生活状态，从冲击中恢复。	Buckle et al. (2000: 13)
韧性城市具有承受剧烈冲击而不引起混乱或永久性破坏，并从自然灾害冲击中恢复的能力。	Godschalk (2003: 136)
韧性的建成环境应是可设计、布置、建设、管理的，能保持建成资产最大化的能力，并可联合支撑系统，且人们居住工作的现有环境可经受并从极端自然冲击或人类诱发的灾害中缓解并恢复。	Bosher (2008: 13)
韧性的概念包括灾前规划、预警系统、应急处理程序和灾后重建；城市韧性围绕着城乡从主要灾害及次生灾害中快速恢复的理念。	Lamond & Proverbs (2009: 63)

功能，将损害韧性。本论点挑战了保持洪泛区干燥并且保持社会经济活动稳定的偏见。基于韧性概念的洪水灾害管理将首先承认周期性的洪水是与生俱来的环境动态特征，因此洪泛区内的社会经济活动会无可避免地受到影响。

其二，韧性概念认为逐步发展的周期和突变相辅相成 (Folke, 2006)。频繁受到扰动的生态系统已经证明，韧性是从应对扰动的经历中建立的 (Holling, 1973; Gunderson & Holling, 2002)。对自然资源依赖型的社区研究也表明，通过在系统中引入较小的扰动，应对大规模不确定扰动的韧性才可能被建立起来 (Berkes & Folke, 1998; Berkes et al., 2003)。这一论点说明洪水泛滥本身即是产生韧性的一个媒介，因为每次洪水经验都为城市创造了机会，使其得以调整内在结构、程序及构建相关知识，并逐步发展出多样化的应对策略 (Folke, 2006; Smit & Wandel, 2006)。这与把洪水看作威胁、特殊事件，将防洪合法化的态度截然相反。防洪工程设施预防大部分洪水，城市只能从罕见的、灾难性的洪水事件中痛苦地学习并付出高昂的代价。在以韧性为基础的洪灾管理中，周期性的洪水为城市提供了更好的应对极端洪水的学习机会。

总之，韧性理论认为洪水灾难管理需要转变范式，关注韧性的建立，反对保持稳定。因为洪水是城市常态中固有的一部分，韧性既不是洪水防御也不是恢复到灾害前状态——此两者仅仅是通往稳定状态的方法。这里所说的韧性是一种存续的趋势 (tendency to survive)，其本身也是一种目标。

城市承洪韧性

在建立城市韧性承洪理论之前，必须解决两个源自于生态学的韧性理论问题。生态系统韧性关注系统崩溃，但在城市范畴是不相关的，正如历史经验表明，大部分经历过灾难性破坏的城市仍继续存在甚至更加繁荣 (Vale & Campanella, 2005)。对于死者及因灾难而被迫受苦的人而言，城市是否继续作为一个城市其实并没有太大实际意义 (Klein et al., 2003)。而对独立的个体而言，尽管个体与生态系统通过系统层面的适应性构建其韧性无关，但不能适应的个体终将被持续淘汰 (Gunderson, 2010)。因此城市韧性承洪包括两层含义——保证个体公民的人身安全以及维持城市的当前特性。

定义

韧性概念已经应用于社区韧性范畴，强调承受周期性灾害冲击的能力，以及经历变化时的重组能力，以维持基础架构、流程、特性并进行自我调节 (表 3)。同样地，城市韧性承洪被定义为城市承受洪水的能力，以及当基础设施破坏、社会经济发生崩溃时的重组能力，和防止伤亡和维持目

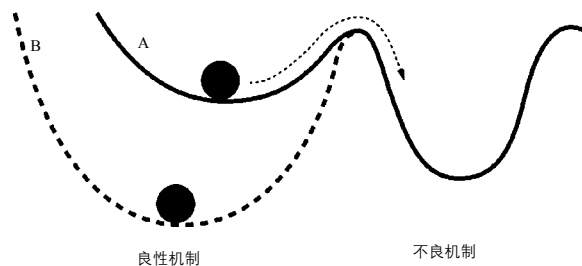
前社会经济特性的能力。换言之，当经历洪水时，使城市保持良性机制的能力。良性机制是由一系列不定因素定义的，如生活安全、经济业绩和移动性，它们共同代表了城市的社会经济特性 (Adger, 2000; Cumming et al., 2005; Gunderson, 2010)。城市承洪韧性由城市可承受的洪水量级来衡量，直到达到极限值或转为不良机制。

与生物物理系统不同，机制是社会性的，而不是科学范畴定义。良性机制反映城市可承受社会经济状态变化的范围，这关乎城市承洪韧性 (图 3)。较大的范围区间表明城市考虑了更强的社会经济正常波动的程度，意味着更大或更深的吸引域；而狭小范围区间则意味着更小或更浅的吸引域，洪水可轻易地引发机制转换 (Carpenter et al., 2001; Walker et al., 2004)。

当经历了涉及广大人员、经济和环境变化，并超过城市自身应对能力的洪灾时，城市即被视作已转换至不良机制 (United Nations International Strategy for Disaster Reduction,

表 3 社区韧性的现有定义 (不包括强调复原的)

韧性的定义	文献
海岸韧性是保持现状的自组能力和在水力及形态变化下保持潜能。	Klein et al. (1998: 263)
韧性是经受极端自然灾害而没有遭受灾难性损失，以及破坏、降低生产率或生活质量，不需要外部的大量援助的能力。	Mileti (1999: 32-33)
韧性是应对和适应灾害压力的能力。它是计划承受潜在灾害程度的产物，无意或有意调整对灾害的反映，包括救援物资和现场营救。	Pelling (2003: 48)
韧性是连接社会生态系统来承担周期性扰动，如飓风或洪水的能力，以保持基本结构、过程和互动。	Adger et al. (2005: 1036)
灾害韧性被视作系统、社区、社会的固有属性，它侧重通过改变自身非本质属性和重建来适应冲击和压力。	Manyena (2006: 446)
韧性是当经过改变仍然保持根本的功能、结构、个性和互动，是系统承担扰动和重组的能力。	Berkes (2007: 284)
韧性系统能承受灾害冲击，且没有改变其基本功能，同时，它能更新、重组，并适应重大灾害冲击。	López-Marrero & Tschakert (2011: 230)



注：狭小范围意味着更小或更浅的吸引域 (A)，宽阔的范围导致更大或更深的吸引域 (B)

图 3 社会经济状态变化可承受的范围控制着良性机制吸引域的形状和大小

2004)。这种不良的机制以资源和资产显著减少,大范围人口背井离乡,生活瓦解,丧失安全为特点(Adger, 2000; Berkes et al., 2003)。一旦陷入这种机制,要转换到稍好的机制,或是恢复到从前的社会经济机制,其代价都是非常高昂的,甚至完全无法实现。

本质上,城市承洪韧性是避免洪水灾害的能力。预防工程设施破坏和社会经济发生崩溃,依靠的是城市的可浸性(floodability),即其适应洪水的能力,而不是抵御洪水的能力。如果破坏和崩溃发生,剩余机制中的剩余部分依靠重组重新建立社会经济秩序。虽然恢复到洪灾之前状态的速度并不是需要讨论的话题,重新组织的速度却是很重要的,因为长时间社会经济崩溃将导致城市陷入不良机制。总之,城市承洪韧性是以城市的可浸性和重组来定义的,而不是工程韧性理论认为的抵御和恢复。

主要特征

韧性经常与自组织、适应能力和冗余度相联系(Carpenter et al., 2001; Low et al., 2003; Tompkins & Adger, 2004)。自组织系统是在应对基于分散特性的扰动时具有韧性(Heylighen, 2001)。适应能力随着时间的推移能增加韧性,因为它与学习能力有关,即调整改变内部需求和外部条件的能力(Gunderson, 2000; Carpenter & Brock, 2008)。冗余度提供防止整个系统失效的措施。这些概念可转换为以下城市韧性承洪的主要特征。

局部的洪灾反应能力

在自组织城市中,每个市民和公共管理者能及时行动去避免损失,更灵活地应对洪水,因此比依靠集中机械装置如防洪工程设施的城市更有韧性。如遇破坏,因为具有内在调整和修复能力,它们也能迅速重组,无需等待通常比较滞后的中央政府或援助机构的外部帮助。

每次洪水后的及时调整

适应能力有助于提升城市承洪韧性,这与从每次洪水中学习的能力相关,例如,行动及时,调整工程设施和公共机构以更好地应对下次洪水。每次洪水都带来新的挑战,如残渣沉积在意想不到的位置。通过理解新的情况和进行必要的调整,城市的洪水可浸性将逐渐提高。这是一个边学边做的过程,不断适应新的情况,以避免重复先前的配置(Walker et al., 2004; Adger, 2006; Berkes, 2007)。

子系统的冗余度

这里,冗余度不仅仅是工程意义上的同一个元素的简单

堆砌,例如在堤上方增加净空要求以限制特定洪峰。它引发不同尺度的多样性和功能复制(Peterson et al., 1998; Adger et al., 2005)。例如,具有冗余度的供水网络可混合区域和局部系统,并利用不同的水源;具有冗余度的洪灾管理系统将包含多样化的缓解、准备、反应和重组方法。洪水反应能力将跨越不同的级别,如个人、社区和市区,即使某一级别的反应能力不及,城市仍然能够依靠其他级别。

上述三种特性之间的基础在于多样性和灵活性。无论是短期的调整,还是长期的适应,没有多样的选择都不可能实现(Folke et al., 2002; Davidon-Hunt & Berkes, 2003)。多样性对于韧性十分关键,因为它能够孕育新的机会,增强适应性(Berkes, 2007)。例如,多样化的经济或谋生方式可促进灾后的重组(Berke & Campanella, 2006)。灵活性在洪水期间通过子系统中更小更快的及时改变,允许自组织城市保持所有功能(Allen et al., 2005)。例如,当洪水发生时,如果公共交通系统能快速调整其服务模式,从以陆地为基础转为水运,将确保城市的机动性从而保持城市功能。灵活性亦能提升适应能力,因为固定性妨碍及时调整。

城市承洪韧性和城市河流韧性

在人类应对灾害的能力中,生态系统韧性扮演着很重要的角色。因为它与生态系统服务的持续性有关,失去持续性将对适应性产生限制(Adger, 2000; Berkes et al., 2003; Gunderson, 2010)。生态系统产品和服务,如来自河流和其他淡水生态系统的渔业和清洁水源,有很高的价值(Costanza et al., 1997)。生态系统对依靠本地资源的社区的重要性是非常明确的(Adger et al., 2005),然而在现代城市中当地城市河流韧性与城市承洪韧性的关联并不明显。

随着水文学、地形学、生物化学和物种组成的改变,许多城市河流目前已处于社会生态的不良机制中,无法提供生态系统服务(Paul & Meyer, 2001; Groffman et al., 2003)。尽管凭借其他生态系统服务缓冲了本地衰退产生的不良影响,退化的城市河流仍然影响城市的承洪韧性。一条污染的河流泛洪将加重损失并使重组变得复杂。更重要的是,如果洪水中断了货物和服务供给,城市将失去如饮用水等重要资源。城市河流韧性对城市承洪韧性如此重要,因为它是应对扰动社会经济的洪水灾害的终极保障。

城市韧性承洪与(常规的)防洪措施

常规认知认为防洪对于城市是必不可少的,然而,韧性理论认为常规的防洪措施削弱了城市的承洪韧性(Holling & Meffe 1996)。事实上,防洪工程设施将城市置于一种非此即彼的境地:要么干燥稳定,要么被灾难性地淹没。由于

防洪工程设施失效导致的洪灾与不设防洪设施相比更加危险 (Tobin, 1995), 在这种逻辑下, 本来应该视为一种自然过程的洪泛, 却成了灾害的代名词。依靠防洪工程设施的城市对洪水有高度的抵抗性, 但这并不是韧性, 因为它们已经适应了人为增加的干燥稳定状态, 对潮湿的状态则完全无法适应 (图 4)。

依赖防洪工程设施的城市, 洪峰大多被限制在河堤之间或被上游水坝阻拦。发生洪水的频率大幅度降低, 水的流动力学被广泛忽略。每抵御一次洪水, 就失去一次学习的机会 (Klein et al., 1998; Colten & Sumpter, 2009)。缺乏应对洪水的经验导致市民对洪水危险的薄弱意识 (Correia et al., 1998), 对干燥稳定的环境习以为常, 一旦防洪工程设施失效, 将完全不知所措。而且, 防洪工程设施的结构死板, 大部分没有预留及时调整边界的余地 (Pahl-Wostl, 2002)。此外, 传统防洪工程设施的存在也阻碍了多样化承洪方式的产生, 因为其

造价十分昂贵 (Castonguay, 2007)。鉴于防洪工程设施作为一个系统, 可以包含多样的工程措施, 每个带有结构上的冗余度, 在工程设施的实体层面则缺少了多样性和跨尺度冗余。由于防洪工程设施作为一种集中的管理方式, 制造安全假象的同时也排除了本地应对洪水能力的需求: 依赖防洪工程设施的城市往往只着眼于河流本身, 而忽视了建成环境。

随着时间推移, 防洪工程设施削弱了城市的承洪韧性, 洪水极可能引起严重的伤亡和破坏, 使严重依赖外部力量的重组工作变得复杂, 把城市推向一个不良机制, 正如 2005 年卡特里娜飓风后的新奥尔良 (Colten & Sumpter, 2009)。防洪工程设施通过其本身的功能, 即阻止周期性洪水, 削弱了城市承洪韧性。周期性洪水是保持生态功能和洪泛区河流高度生态多样性的重要途径 (Junk et al., 1989)。由于本地物种不能适应被改变的洪水机制, 河流生态系统的韧性被逐渐削弱, 以致崩溃 (Poff et al., 1997; Folke, 2003)。因此, 防洪工程设施影响了河流提供生态系统服务的能力 (Tockner et al., 2008), 从而限制了城市提供适应性的选择权。

得到广泛认可的风险转移理念认为, 抵抗洪水的做法削弱城市的承洪韧性, 实质上是把灾害推迟, 不断积累风险, 之后将导致更大的灾害 (Etkin, 1999; Mileti, 1999)。因为防洪影响城市承洪韧性, 由抵御洪水而出现的持续性——产生没有洪水发生的效果——不应被视为韧性。

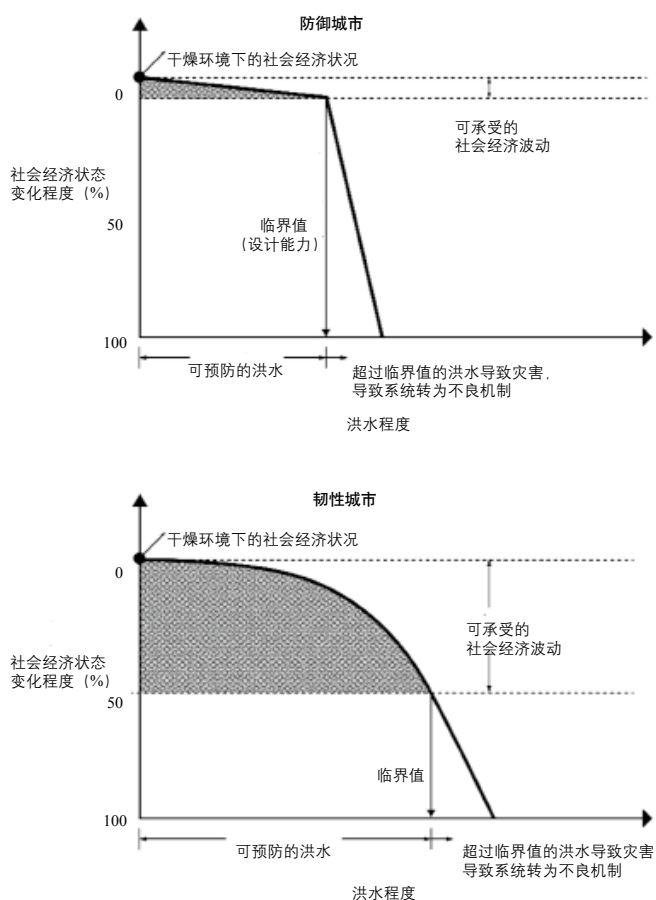
理论实施

将理论付诸实践需要对城市韧性进行量化。对社会生态韧性管理的关注度不断提高, 促进了评估应对未来扰动的韧性潜力的研究 (如 Bennett et al., 2005; Cumming et al., 2005)。由于韧性无法直接观察, 必须从替代指标——未来韧性的前瞻性替代品——推导出来, 当然, 韧性不可能仅靠一个替代指标来体现 (Carpenter et al., 2005)。

评估城市防洪韧性需要通过可浸性和快速重组的能力两个替代指标来实现, 本文将对可浸性进行研究。获得人与自然耦合系统的韧性替代指标的一个方法是, 找到随时间推移改变韧性的内部特性 (Bennett et al., 2005)。缓慢改变特性是较理想的选择, 因为它们界定了系统的基础结构, 因此控制了吸引域模型、临界 (阈) 值的位置和在矢量空间中系统的状态 (Carpenter et al., 2001; Scheffer et al., 2001)。对于滨河城市, 界定其可浸性的特性应该反映洪泛区物理和水文变化, 由于这样的特性, 人与洪水过程之间的冲突导致了洪水灾害。

自然洪泛区的功能

洪泛区实质上是河流的一部分, 它的天然功能是转移和贮存溢出河滩的高径流和沉积物。在大型洪水期间, 洪泛区



注: 防御型城市依赖于防洪工程设施, 只在干燥的环境下起作用, 且无法承受社会经济状况变化, 即其可承受范围较小。这导致良性机制处于一个较小的吸引域 (阴影区域表明它的规模), 因此导致较弱的城市承洪韧性。相反, 韧性城市可承受洪水和较大的社会经济环境波动, 因此拥有较大的吸引域和较强的城市防洪韧性。

图 4 防御型城市和韧性城市对比

的转移和贮存力比河道高很多 (Leopold, 1994), 其贮存功能在河水与主河道水流分开并在洪峰过后缓慢释放时发生作用 (Richards & Hughes, 2008)。较长期的贮存主要出现在洪泛区土壤表层, 可在雨季贮存大量的水 (Keddy, 2000)。洪泛区的植被代表了水力糙率 (hydraulic roughness), 在洪水过程中发挥着重要影响。例如, 覆盖面将增加流动模式的不均匀性; 在小型洪水期间, 密集的植被可抑制洪水波并吸收沉积物; 通过摩擦效应, 洪泛区森林延缓了贮存在表层的洪水的释放, 进一步提高了洪泛区的贮存力 (Tabacchi et al., 2000; Richards & Hughes, 2008)。因为这些水文水力功能, 洪泛区河流比其他类型河流的洪峰和流速要低, 在下游位置的泄洪量也较少 (Leopold, 1994)。

洪泛区城市化后, 其基本功能通常被人为提升的河道容量、排水率和上游蓄水率取代。同时, 河流出现更高的洪峰流量并伴随着下游流量增加, 导致洪水风险增加。由于缺乏转移和贮存洪水波和沉积物的功能, 城市化的洪泛区对洪水的承受力逐渐降低。

可泛洪土地及可浸区百分比

为了评估可浸性, 笔者提出一个新的概念——可泛洪土地 (floodable lands), 其定义为, 在不出现内外部破坏的前提下, 土地贮存、转移洪水和沉积物的能力。可泛洪土地可以从属于任何用地性质, 而非仅仅是那些未开发的土地或如湿地之类的绿地。例如有污染的绿地就无法成为可泛洪土地; 而有柱子挑高建筑的住宅用地却可能作为可泛洪土地。可泛洪的土地促进了城市的洪水承受力, 因此可泛洪区的洪水是良性的。在大面积结合区域, 可泛洪土地可能降低洪峰, 以减少总体的洪水冲击。在其他条件保持不变的情况下, 更多的可泛洪土地意味着更高的可浸性——可以通过可泛洪土地总面积占洪泛区的比例, 即可浸区百分比确定。这里所说的洪泛区指的是在谷壁 (valley walls) 间的整个谷底 (valley floor) (Anderson et al., 1996), 而不是以洪水间歇来定义, 因为更大规模的洪水可能随时出现。

值得强调的是, 即使城市的可浸区百分比为 100%, 仍然有可能被罕见的特大洪水破坏, 在这种情况下, 自我组织能力对城市承洪韧性起重要作用。本文假设可浸区百分比和可浸性的关系是正向非线性的, 这是因为高可浸区百分比对洪泛区的储存和转移能力的边际贡献将显著减少 (Douglas et al., 2007)。本文进一步假设, 正如许多其他复杂系统一样, 可浸区百分比和城市承洪韧性之间可能存在滞后现象 (Scheffer et al., 2001; Alberti & Marzluff, 2004) (图 5)。要使得城市在大部分洪水泛滥期间具有韧性并能够自我组织以保持秩序, 且河流能够保持健康状态并提供正常的生态系统

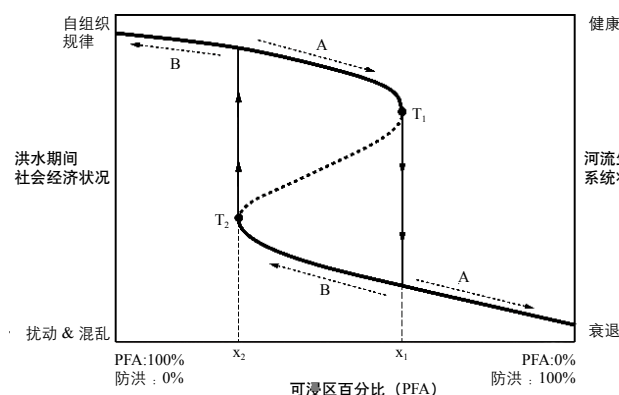
服务, 城市必须在重建洪泛区功能时“向过去追溯”。作为对城市承洪韧性的替代指标, 可浸区百分比体现一个城市的承洪能力, 关系到洪水安全。提升可浸区百分比以建立韧性可以作为另一种管理措施, 而不是一味提高防洪工程设施的保护标准。

基于韧性的洪灾管理

在复杂的适应性系统之中, 提升系统对单一扰动的抵御能力往往增强了其面临其他扰动的脆弱性 (Holling & Mefee 1996, Roberge, 2002)。(常规) 防洪措施忽视复杂性和不可预知性, 增加了洪水危险和产生生态灾害的可能性。当今许多城市都不具备洪水安全, 因为它们以人工环境的稳定性为前提, 这种稳定性依靠的是防洪工程设施, 无法承受太多的社会经济波动 (图 4)。因此, 必须摒弃这种控制型的管理模式 (Folke, 2003; Anderies et al., 2006), 为了长期的洪水安全, 城市必须转变成基于韧性的洪灾管理。

与洪水为伴

韧性源自于对抗动的适应 (Gunderson, 2000; Walker et al., 2004)。研究表明, 社区适应而不是抵抗扰动, 会存续得更持久 (Berkas et al., 2003)。建立城市承洪韧性本质上是一个适应过程, 而不是与河流为敌, 城市面对周期性洪



注：洪泛区城市化的过程中（轨迹A），城市越来越依赖防洪工程设施来保障洪水安全，沿着上面的实线，在临界值T1点（PFA = X1）快速转变到下面的实线。经过T1，洪泛区失去了应对洪水的自然功能，城市陷入不良机制——河流退化，社会经济活力被破坏，一旦洪水发生，城市即陷入混乱。城市可以回到以往的机制——河流健康，在洪水期间能够自我组织以保持秩序，但需要城市通过增加可浸区百分比和减少对防洪设施的依赖建立韧性。显著提高可浸区百分比，可以通过在雨季利用大小开放空间转移和贮存洪水，以及对现有建筑加高、漂浮、防水的改造来实现。在建立韧性的过程中（轨迹B），城市沿着下面的实线移动，但仅到达X1还不足以恢复到（T1）转变前的韧性程度；城市需要更进一步，经过T2（PFA > X2），这样才能返回到更具韧性的机制中。

图5 可浸区百分比 (PFA) 的假设动态

水,允许洪水进入城市并从洪水中学习经验,才能变得有韧性以致安全应对极端洪水。这是从防御型城市到韧性城市模式的转变,城市管理模式从“安全抵御洪水”(safety against floods)向“在洪水中安全”(safety at floods)进行转变(Schielen & Roovers, 2008)。城市承洪韧性基于一个早已存在的原则——比防御河流更好的做法是与河流为伴(如White, 1945; Leopold, 1977),这也呼应了“与洪水为伴”(living with floods)的古老哲学。如今在一些国家,如孟加拉国、柬埔寨和埃及等国的乡村社区,仍然在实践这一古老智慧(Laituri, 2000; Berkes, 2007)。通过区分周期性洪水和罕见灾难性洪水,这些社区选择适应河流动态的生活方式和建成环境,并对洪水过后渔业和农业的生产率提高加以利用(Cuny, 1991)。

尽管在工业社会不太常见,但类似的实践也同样存在,即利用远郊地区作为洪泛区以阻止下游洪水,如美国的萨克拉门托河的约洛疏洪区(the Yolo Bypass)、荷兰的“还地于河”(Room for the River)计划和英国的“给水空间”(Making Space for Water)政策(Moss & Monstadt, 2008; Opperman et al., 2009)。虽然与洪水为伴的理念已被广为接受,但是在许多城市中,土地的文化和经济价值太高,以至于不可能作为洪泛区。加上传统理念认为,利用蓄洪区是解决洪水灾害的基本解决方式,城市与洪水水火不容的理念仍然根深蒂固。虽然这种理念看上去有逻辑性,但是这种禁止论的论调将阻碍选择和创造性解决方案的产生(Antrobus, 2010)。在人口密集地区推行“利用郊区泛洪”的做法有政治困难,且大多数人直觉上认为不可能有洪泛的空间,因此城市只能继续依靠防洪工程设施而别无他法。但是,城市的重要性如此之高,为了存续,改变范式而与洪水为伴是势在必行的。

洪水适应性

毋庸置疑,城市与洪水不能共存的理念是缺乏想象力的,这源于对建成环境的过分依赖而对洪水的适应不足。随着观念的转变和规划设计的创新,城市可以最终逐步淘汰防洪工程设施,并通过不同的建成环境适应洪水,增加冗余度、多样性以及每个子系统的灵活性。在雨季,开敞空间可以转移和贮存洪水,具有多种功能(Douglas et al., 2007)。防洪工程设施可被重新设计成在实际操作中能够灵活运用多功能元素集合(Fiering, 1982),建筑也可被设计成悬空挑高、漂浮,或是防水的建筑(Guikema, 2009)。

这需要在城市设计方面做出改变。正在开展的“水敏型城市”(Water Sensitive Cities)计划,将水管理与城市规划设计整合在一起,以提升应对气候变化的韧性

(Howe & Michell 2012),鹿特丹已成为该计划的代表案例(Jacobs, 2012)。当然在城市设计中,范式转变也是必要的——应基于动力机制,替代假想的环境稳定。洪泛区是不断变化的,不仅通过泛洪实现,也可通过河道转移使土地变为流动的河流,反之亦然。放弃维持稳定和一劳永逸的准则,建立适应的、可动的、临时的结构是洪泛区最可行的方法。

洪水适应性作为一种缓解方法可纠正由防洪产生的若干问题。首先,新的适应性方法不会把城市自身的问题转嫁给其他地方,如修建堤坝和水渠减少了洪泛区的滞留性并增大流速,从而导致下游泛洪;亦不能通过修建防洪堤坝,淹没上游地区,而使当地居民被迫迁移。其次,新方法不会增加长期洪水风险。即使防洪工程设施没有失效的危险,但只要出现大规模洪水,与没有防洪工程设施的情况相比,可能产生更加灾难性的后果(Tobin, 1995)。第三,适应性方法不仅不会与城市河流的生态保护和恢复相抵触,反而通过允许对生态系统有关键性调节作用的周期性洪水重新连通河道和洪泛区,起到协调作用(Nienhuis & Leuven, 2001)。由于河流能够提供生态服务,提升城市韧性,因此基于韧性的管理方式有助于河流恢复健康状态。

韧性在允许变化的过程中将持续地增强(Holling, 1986)。因此,基于韧性的管理本身即具有适应性,是通过实践学习的过程,在每次洪水过后,可以对具体目标进行调整。在韧性城市,建成环境通过两种方式适应:基于历史形态适应已知的河流动力,也可以很容易地根据变化的边际条件进行调整,如气候变化和人口增长。韧性城市是一种持续的工作状态。

重新定义规范

控制韧性的尺度可高于也可低于(被谈论的)系统本身的尺度,因此韧性管理是一项多尺度的工作(Walker et al., 2004; Anderies et al., 2006)。通过控制在吸引域中的位置,城市子系统影响城市承洪韧性。例如对比不同的缓解方法:在高水流期间,由于缺乏泛洪承受力,常规的防洪方式把城市置于良性和不良机制的临界点附近;而韧性方式则让城市远离该临界点。其他影响城市承洪韧性的内部因素包括河流健康状况、家庭经济状况、机构灵活性、建筑设计和运营以及重要工程设施、危机支撑网络等。子系统在区域甚至全球层面上被经济、文化、生态物理学和气候动力学共同影响,改变吸引域的形状进而影响城市承洪韧性。因此管理城市承洪韧性必须加入这些跨尺度的互动。

社会经济运转的规范是对城市承洪韧性有重大影响的一个大尺度因素。依靠防洪工程设施的城市是没有韧性的,不仅因为它们距离临界点过近,也因为当前的良性机制范围

过小/深度过浅(图3),只能承受极小的社会经济波动(图4)。当代社会的规范基于持续增长的社会经济活动的运转,例如当洪水泛滥时,商品停产、服务停止被称为经济损失;移动性受到洪水限制则被视为不便。然而,认为社会经济活动应该持续进行的意识形态是建立在环境稳定的前提下的,而气候变化导致极端暴雨增加时,维持稳定更加困难(Alley et al., 2007)。当环境稳定性变得不确定时,保持良性机制的最佳策略是扩大机制本身(Carpenter et al., 2001)。由于良性机制的范围是社会建立的,因此扩大机制需要重新定义规范——由于支撑性的工程设施即使对洪水有适应性,仍然会受到社会经济活动的限制,因此社会需要接受必要的、与社会经济的形式和强度相对应的改变。当然,这并不意味着在泛洪时单纯地接受系统失效,而是需要考虑社会经济的灵活性和适应性。这个转变必须颠覆传统的沉迷于稳定状态的基本世界观。

总结

伴随着不断增加的使用频率,“韧性”这一专用术语的真实含义,就像“可持续发展”一样,被逐渐稀释和模糊了(Brand & Jax, 2007)。如果没有严谨的定义和计量方法,韧性概念无法指导实践(Manyena, 2006)。本文全面剖析了韧性理论,包括其内在动力和不确定性,提供了从非传统视角应对洪水危害的可能性。文章还着重分析了极端洪水的问题,这个现象已经不容忽视。本理论提出了洪水适应性,挑战了“城市必须防洪”的传统思维。应对洪灾的城市韧性理论的发展,是通过关注特定类型系统的特定问题,尝试进一步深化现有韧性概念的内容。对韧性的研究关系到人与自然的连接,仍处于缺少实际应用以解决现实问题的探索阶段(Carpenter et al., 2005; Folke, 2006)。城市韧性承洪的理论,以及评估可浸性的可浸区百分比替代指标,将促进基于实践的跨学科应用。

然而,现实世界最直接的挑战,并非如何提高城市承洪韧性,而是如何促进城市从防御型城市向韧性城市的转变。令人气馁的是现有的防洪管理机制本身就是防御。尽管灾难有时可能成为作为社会转变的催化剂(Pelling & Dill, 2010),但自觉转变可以大大减少所耗的代价。这要求自觉转变具有可变换性(transformability)——创造新的基础系统的能力,对于这个新系统我们知道的比如何使系统恢复少得多(Walker et al., 2004; Pelling & Manuel-Navarrete, 2011)。因此可预见的是,创建韧性城市将会是新的学术前沿阵地。UPI

注:本文未注明来源的图表均为作者整理或绘制

感谢美国华盛顿大学玛丽娜·阿尔贝蒂(Marina Alberti)、罗伯特·穆格劳尔(Robert Mugerauer)、罗伯特·奈曼(Robert J. Naiman),美国地质学会(USGS: U.S. Geological Society)克里斯托夫·康拉德(Christopher P. Konrad),以及两位匿名审稿专家对本文提出的修改意见。

参考文献

- [1] Adger W N. Social and Ecological Resilience: Are They Related?[J]. *Progress in Human Geography*, 2000, 24(3): 347-364.
- [2] Adger W N. Vulnerability[J/OL]. *Global Environmental Change*, 2006, 16: 268-281. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.02.006>.
- [3] Adger W N, Hughes T P, Folke C, Carpenter S R, Rockström J. Social-Ecological Resilience to Coastal Disasters[J/OL]. *Science*, 2005, 309: 1036-1039. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1112122>.
- [4] Alberti M, Marzluff J M. Ecological Resilience in Urban Ecosystems: Linking Urban Patterns to Human and Ecological Functions[J/OL]. *Urban Ecosystems*, 2004, 7(3): 241-265. <http://dx.doi.org/10.1023/B:UECO.0000044038.90173.c6>.
- [5] Allen C R, Gunderson L, Johnson A R. The Use of Discontinuities and Functional Groups to Assess Relative Resilience in Complex Systems[J]. *Ecosystems*, 2005, 8: 985-966.
- [6] Alley R B, Berntsen T, Bindoff N L, Chen Z, Chidthaisong A, Friedlingstein P, Gregory J M, Hegerl G C, Heimann M, Hewitson B, Hoskins B J, Joos F, Jouzel J, Kattsov V, Lohmann U, Manning M, Matsuno T, Molina M, Nicholls N, Overpeck J, Qin D, Raga G, Ramaswamy V, Ren J, Rusticucci M, Solomon S, Somerville R, Stocker T F, Stott P A, Stouffer R J, Whetton P, Wood R A, Wratt D. Summary for policymakers[M] // Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt K B, Tignor M, Miller H L, eds. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 2007.
- [7] Anderies J M, Walker B H, Kinzig A P. Fifteen Weddings and a Funeral: Case Studies and Resilience-based Management[J/OL]. *Ecology and Society*, 2006, 11(1): 21. <http://www.ecologyandsociety.org/vol11/iss1/art21/>.
- [8] Anderson M G, Walling D R, Bates P, eds. *Floodplain Processes*[M]. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 1996. <http://dx.doi.org/10.1080/11035890401263279>.
- [9] Antrobus D. The Importance of the “Not-So-Cool” Sectors: Creative Solutions to Reconcile Environmental and Economic Sustainability Within a Floodplain[J/OL]. *Local Environment*, 2010, 15(4): 295-308. <http://dx.doi.org/10.2307/951696>.
- [10] Associated Programme on Flood Management. *Integrated Flood Management Concept Paper*. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2009.
- [11] Bennett E M, Cumming G S, Peterson G D. A System Model Approach to Determining Resilience Surrogates for Case Studies[J/OL]. *Ecosystems*, 2005, 8: 945-957. <http://dx.doi.org/10.1007/s10021-005-0141-3>.
- [12] Berke P R, Campanella T J. Planning for Postdisaster Resiliency[J/OL]. *Annals of the American Academy of Political and Social Science*, 2006, 604:192. <http://dx.doi.org/10.1177/0002716205285533>.
- [13] Berkes F. Understanding Uncertainty and Reducing Vulnerability: Lessons from Resilience Thinking[J/OL]. *Natural Hazards*, 2007, 41(2): 283-295. <http://dx.doi.org/10.1007/s11069-006-9036-7>.
- [14] Berkes F, Colding J, Folke C, eds. *Navigating Social-ecological Systems: Building Resilience for Complexity and Change*[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2003.
- [15] Berkes F, Folke C, eds. *Linking Social and Ecological Systems:*

- Management Practices and Social Mechanisms for Building Resilience[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1998.
- [16] Birkland T A, Burby R J, Conrad D, Cortner H, Michener W K. River Ecology and Flood Hazard Mitigation[J/OL]. *Natural Hazards Review*, 2003, 4(1): 46-54. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1527-6988\(2003\)4:1\(46\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1527-6988(2003)4:1(46)).
- [17] Birkland T A, Waterman S. The Politics and Policy Challenges of Disaster Resilience[M] // Nemeth C P, Hollnagel E, Dekker S, eds. *Resilience Engineering Perspectives. Volume 2: Preparation and Restoration*. Surrey, UK: Ashgate Publishing Limited, 2009: 15-38.
- [18] Bosher L. Introduction: The Need For Built-in Resilience[M] // Bosher L S, ed. *Hazards and the Built Environment: Attaining Built-in Resilience*. London, UK: Taylor and Francis, 2008: 3-19.
- [19] Brand F S, Jax K. Focusing the Meaning(s) of Resilience: Resilience as a Descriptive Concept and a Boundary Object[J/OL]. *Ecology and Society*, 2007, 12(1): 23. <http://www.ecologyandsociety.org/vol12/iss1/art23/>.
- [20] Bruneau M, Chang S E, Eguchi R T, Lee G C, O'Rourke T D, Reinhorn A M, Shinozuka M, Tierney K, Wallace W A, von Winterfeldt D. A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities[J]. *Earthquake Spectra*, 2003, 19(4): 733-752.
- [21] Burby R J, Deyle R E, Godschalk D R, Olshansky R B. Creating Hazard Resilient Communities Through Land-use Planning[J/OL]. *Natural Hazards Review*, 2000, 1(2): 99-106. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1527-6988\(2000\)1:2\(99\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1527-6988(2000)1:2(99)).
- [22] Carpenter S R, Brock W A. Adaptive Capacity and Traps[J/OL]. *Ecology and Society*, 2008, 13(2): 40. <http://www.ecologyandsociety.org/vol13/iss2/art40/>.
- [23] Carpenter S R, Walker B, Anderies J M, Abel N. From Metaphor to Measurement: Resilience of What to What? [J]. *Ecosystems*, 2001, 4(8): 765-781.
- [24] Carpenter S R, Westley F, Turner M. Surrogates for Resilience of Social-Ecological Systems[J/OL]. *Ecosystems*, 2005, 8: 941-944. <http://dx.doi.org/10.1007/s10021-005-0170-y>.
- [25] Castonguay S. The Production of Flood as Natural Catastrophe: Extreme Events and the Construction of Vulnerability in the Drainage Basin of the St. Francis River (Quebec), Mid-nineteenth to Mid-twentieth Century[J/OL]. *Environmental History*, 2007, 12: 820-844. <http://dx.doi.org/10.1093/envhis/12.4.820>.
- [26] Colten C E, Sumpter A R. Social Memory and Resilience in New Orleans[J/OL]. *Natural Hazards*, 2009, 48(3): 355-364. <http://dx.doi.org/10.1007/s11069-008-9267-x>.
- [27] Correia F N, Fordham M, Saraiva D G, Bernado F. Flood Hazard Assessment and Management: Interface with the Public[J]. *Water Resources Management*, 1998, 12(3): 209-227.
- [28] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The Value of the World's Ecosystem Services and Natural Capital[J/OL]. *Nature*, 1997, 387: 253-260. <http://dx.doi.org/10.1038/387253a0>.
- [29] Criss R E, Shock E L. Flood Enhancement Through Flood Control[J/OL]. *Geology*, 2001, 29(10): 875-873. [http://dx.doi.org/10.1130/0091-7613\(2001\)029<0875:FETFC>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1130/0091-7613(2001)029<0875:FETFC>2.0.CO;2).
- [30] Cumming G S, Barnes G, Perz S, Schmink M, Sieving K E, Southworth J, Binford M, Holt R D, Stickler C, van Holt T. An Exploratory Framework for the Empirical Measurement of Resilience[J/OL]. *Ecosystems*, 2005, 8: 975-987. <http://dx.doi.org/10.1007/s10021-005-0129-z>.
- [31] Cumming G S, Cumming D H M, Redman C L. Scale Mismatches in Social-Ecological Systems: Causes, Consequences, and Solutions[J/OL]. *Ecology and Society*, 2006, 11(1): 14. <http://www.ecologyandsociety.org/vol11/iss1/art14/>.
- [32] Cuny F C. Living with Floods: Alternatives for Riverine Flood Mitigation[J]. *Land Use Policy*, 1991, 8(4): 331-342.
- [33] Davidson-Hunt I, Berkes F. Nature and Society Through the Lens of Resilience: Toward a Human-in-Ecosystem Perspective[M] // Berkes F, Colding J, Folke C. *Navigating Social-Ecological Systems: Building Resilience for Complexity and Change*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2003: 53-82. <http://dx.doi.org/10.1017/CBO9780511541957.006>.
- [34] De Bruijn K M. Resilience Indicators for Flood Risk Management Systems of Lowland Rivers[J/OL]. *International Journal of River Basin Management*, 2004, 2(3): 199-210. <http://dx.doi.org/10.1080/15715124.2004.9635232>.
- [35] Douglas I, Kobold M, Lawson N, Pasche E, White I. Characterisation of Urban Streams and Urban Flooding[M] // Ashley R, Garvin S, Pasche E, Vassilopoulos A, Zevenbergen C, eds. *Advances in Urban Flood Management*. New York, USA: Taylor & Francis, 2007: 29-58. <http://dx.doi.org/10.1201/9780203945988.ch3>.
- [36] Etkin D. Risk Transference and Related Trends: Driving Forces Towards More Mega-disasters[J/OL]. *Environmental Hazards*, 1999, 1: 69-75. <http://dx.doi.org/10.3763/ehaz.1999.0109>.
- [37] Fiering M B. Alternative Indices of Resilience[J/OL]. *Water Resources Research*, 1982, 18(1): 33-39. <http://dx.doi.org/10.1029/WR018i001p00033>.
- [38] Folke C. Freshwater for Resilience: A Shift in Thinking[J/OL]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London: Series B Biological Sciences*, 2003, 358(1440): 2027-2036. <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2003.1385>.
- [39] Folke C. Resilience: The Emergence of a Perspective for Social-Ecological Systems Analyses[J/OL]. *Global Environmental Change*, 2006, 16: 253-267. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.04.002>.
- [40] Folke C, Carpenter S, Elmqvist T, Gunderson L, Holling C S, Walker B. Resilience and Sustainable Development: Building Adaptive Capacity in a World of Transformations[J]. *Ambio*, 2002, 31(5): 437-440.
- [41] Groffman P M, Bain D J, Band L E, Belt K T, Brush G S, Grove J M, Pouyat R V, Yesilonis I C, Zipperer W C. Down by the Riverside: Urban Riparian Ecology[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2003, 1(6): 315-321.
- [42] Godschalk D R. Urban Hazard Mitigation: Creating Resilient Cities[J/OL]. *Natural Hazards Review*, 2003, 4(3): 136-143. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1527-6988\(2003\)4:3\(136\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1527-6988(2003)4:3(136)).
- [43] Guikema S D. Infrastructure Design Issues in Disasterprone-regions[J/OL]. *Science*, 2009, 323: 1302-1303. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1169057>.
- [44] Gunderson L H. Ecological Resilience—In Theory and Application[J/OL]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2000, 31: 425-439. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.31.1.425>.
- [45] Gunderson L H. Ecological and Human Community Resilience in Response to Natural Disasters[J/OL]. *Ecology and Society*, 2010, 15(2): 18. <http://www.ecologyandsociety.org/vol15/iss2/art18/>.
- [46] Gunderson L H, Holling C S, eds. *Panarchy: Understanding Transformations in Human and Natural Systems*[M]. Washington D C, USA: Island Press, 2002.
- [47] Hashimoto T, Stedinger J R, Loucks D P. Reliability, Resiliency, and Vulnerability Criteria for Water Resource System Performance Evaluation[J/OL]. *Water Resources Research*, 1982, 18(1): 14-20. <http://dx.doi.org/10.1029/WR018i001p00014>.
- [48] Heylighen F. The Science of Self-organization and Adaptivity[M] // Kiel L D, ed. *Knowledge Management, Organizational Intelligence and Learning, and Complexity*. Oxford, UK: The Encyclopedia of Life Support Systems. Eolss Publishers, 2001.
- [49] Holling C S. Resilience and Stability of Ecological Systems[J/OL]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4: 1-23. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.es.04.110173.000245>.
- [50] Holling C S. The Resilience of Terrestrial Ecosystems: Local Surprise and Global Change[M] // Clark W C, Munn R E, eds. *Sustainable Development of the Biosphere*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1986: 292-317.

- [51] Holling C S. Engineering Resilience Versus Ecological Resilience[M] // Schulze P C, ed. Engineering Within Ecological Constraints. Washington D C, USA: National Academy Press, 1996: 31-43.
- [52] Holling C S, Gunderson L H, Peterson G D. Sustainability and Panarchies[M] // Gunderson L H, Holling C S, eds. Panarchy: Understanding Transformations in Human and Natural Systems. Island Press, Washington D C, USA: 2002: 63-102.
- [53] Holling C S, Meffe G K. Command and Control and the Pathology of Natural Resource Management[J/OL]. Conservation Biology, 1996, 10(2): 328-37. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1523-1739.1996.10020328.x>.
- [54] Hollnagel E, Memeth C P, Dekker S, eds. Resilience Engineering Perspectives. Volume 1: Remaining Sensitive to the Possibility of Failure[M]. Burlington, Vermont, USA: Ashgate, 2008.
- [55] Howe C, Mitchell C, eds. Water Sensitive Cities[M]. London, UK: IWA Publishing, 2012.
- [56] Jacobs J C J. The Rotterdam Approach: Connecting Water with Opportunities[M] // Howe C, Mitchell C, eds. Water Sensitive Cities. London, UK: IWA Publishing, 2012: 251-263.
- [57] Junk W J, Bayley P B, Sparks R E. The Flood Pulse Concept in River-Floodplain Systems[J]. Special Publication of the Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1989, 106: 110-127.
- [58] Keddy P A. Wetland Ecology: Principles and Conservation[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2000.
- [59] Klein R J T, Nicholls R J, Thomalla F. Resilience to Natural Hazards: How Useful is This Concept?[J]. Environmental Hazards, 2003, 5: 35-45.
- [60] Klein R J T, Smit M J, Goosen H, Hulsbergen C H. Resilience and Vulnerability: Coastal Dynamics or Dutch Dikes?[J]. The Geographical Journal, 1998, 164(3): 259-268.
- [61] Laituri M J. Cultural Perspectives of Flooding[M] // Wohl E E, ed. Inland Flood Hazards: Human, Riparian, and Aquatic Communities. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2000: 451-468. <http://dx.doi.org/10.1017/CBO9780511529412.018>.
- [62] Leopold L B. A Reverence for Rivers[J/OL]. Geology, 1977, 5: 429-430. [http://dx.doi.org/10.1130/0091-7613\(1977\)5<429:ARFR>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1130/0091-7613(1977)5<429:ARFR>2.0.CO;2).
- [63] Leopold L B. Flood Hydrology and the Floodplain[J]. Water Resources Update, 1994, 95: 11-15.
- [64] Liu J, Dietz T, Carpenter S R, Alberti M, Folke C, Moran E, Pell A N, Deadman P, Kratz T, Lubchenco J, Ostrom E, Ouyang Z, Provencher W, Redman C L, Schneider S H, Taylor W W. Complexity of Coupled Human and Natural Systems[J/OL]. Science, 2007, 317: 1513-1516. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1144004>.
- [65] López-Marrero T, Tschakert P. From Theory to Practice: Building more Resilient Communities in Flood-prone Areas[J/OL]. Environment & Urbanization, 2011, 23(1): 229-249. <http://dx.doi.org/10.1177/0956247810396055>.
- [66] Low B, Ostrom E, Simon C, Wilson J. Redundancy and Diversity: Do They Influence Optimal Management?[M] // Berkes F, Colding J, Folke C. Navigating Social-Ecological Systems: Building Resilience for Complexity and Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2003: 83-114.
- [67] Manyena S B. The Concept of Resilience Revisited[J/OL]. Disasters, 2006, 30(4): 433-450. <http://dx.doi.org/10.1111/j.0361-3666.2006.00331.x>.
- [68] Mileti D S. Disasters by Design: A Reassessment of Natural Hazards in the United States[J]. Washington D C, USA: Joseph Henry Press, 1999.
- [69] Milly P C D, Betancourt J, Falkenmark M, Hirsch R M, Kundzewicz Z W, Lettenmaier D P, Stouffer R J. Stationarity is Dead: Whither Water Management?[J]. Science, 2008, 319: 573-574.
- [70] Moss T, Monstadt J, eds. Restoring Floodplains in Europe: Policy Contexts and Project Experiences[M]. London, UK: IWA Publishing, 2008.
- [71] Nienhuis P H, Leuven R S E W. River Restoration and Flood Protection: Controversy or Synergism?[J]. Hydrobiologia, 2001, 444: 85-89.
- [72] Opperman J J, Galloway G E, Fargione J, Mount J F, Richter B D, Secchi S. Sustainable Floodplains Through Large-scale Reconnection to Rivers[J/OL]. Science, 2009, 326:1487-1488. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1178256>.
- [73] Pahl-Wostl C. Towards Sustainability in the Water Sector—The Importance of Human Actors and Processes of Social Learning[J/OL]. Aquatic Sciences, 2002, 64: 394-411. <http://dx.doi.org/10.1007/PL00012594>.
- [74] Paul M J, Meyer J L. Streams in the Urban Landscape[J]. Annual Review of Ecology & Systematics, 2001, 32: 333-365.
- [75] Pelling M. Vulnerability of Cities: Natural Disasters and Social Resilience[M]. London, UK: Earthscan Publications, 2003.
- [76] Pelling M, Dill C. Disaster Politics: Tipping Points for Change in the Adaptation of Sociopolitical Regimes[J/OL]. Progress in Human Geography, 2010, 34: 21-37. <http://dx.doi.org/10.1177/0309132509105004>.
- [77] Pelling M, Manuel-Navarrete D. From Resilience to Transformation: The Adaptive Cycle in Two Mexican Urban Centers[J/OL]. Ecology and Society, 2011, 16(2):11. <http://www.ecologyandsociety.org/vol16/iss2/art11/>.
- [78] Peterson G, Allen C R, Holling C S. Ecological Resilience, Biodiversity, and Scale[J/OL]. Ecosystems, 1998, 1: 6-18. <http://dx.doi.org/10.1007/s100219900002>.
- [79] Poff N L, Allan J D, Bain M B, Karr J R, Prestegard K L, Richter B D, Sparks R E, Stromberg J C. The Nature Flow Regime: A Paradigm for River Conservation and Restoration[J]. BioScience, 1997, 47(11): 769-784.
- [80] Richards K, Hughes F. Floodplains in Europe: The Case for Restoration[M] // Moss T, Monstadt J, eds. Restoring Floodplains in Europe: Policy Contexts and Project Experiences. London, UK: IWA Publishing, 2008: 16-43.
- [81] Roberge M. Human Modification of the Geomorphically Unstable Salt River in Metropolitan Phoenix[J/OL]. The Professional Geographer, 2002, 54(2):175-189. <http://dx.doi.org/10.1111/0033-0124.00324>.
- [82] Scheffer M, Carpenter S, Foley J A, Folke C, Walker B. Catastrophic Shifts in Ecosystems[J/OL]. Nature, 2001, 413(11): 591-596. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tree.2003.09.002>.
- [83] Scheffer M, Hosper S H, Meijer M-L, Moss B, Jeppesen E. Alternative Equilibria in Shallow Lakes[J/OL]. Trends in Ecology and Evolution, 1993, 8(8): 275-279. [http://dx.doi.org/10.1016/0169-5347\(93\)90254-M](http://dx.doi.org/10.1016/0169-5347(93)90254-M).
- [84] Schielen R M J, Roovers G. Adaptation as a Way for Flood Management[C]. Proceedings of the 4th International Symposium on Flood Defence: Managing Flood Risk, Reliability and Vulnerability. Toronto, Ontario, Canada: May 6-8, 2008.
- [85] Schneidergruber M, Cierna M, Jones T. Living with Floods: Achieving Ecologically Sustainable Flood Management in Europe. WWF European Policy, Brussels, Belgium, 2004.
- [86] Smit B, Wandel J. Adaptation, Adaptive Capacity and Vulnerability[J/OL]. Global Environmental Change, 2006, 16: 282-292. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.03.008>.
- [87] Smits A J M, Nienhuis P H, Saeijs H L F. Changing Estuaries, Changing Views[J/OL]. Hydrobiologia, 2006, 565: 339-355. <http://dx.doi.org/10.1007/s10750-005-1924-4>.
- [88] Tabacchi E, Lambs L, Guiloy H, Planty-Tacacchi A, Muller E, Décamps H. Impacts of Riparian Vegetation on Hydrological Processes[J/OL]. Hydrological Processes, 2000, 14: 2959-2976. [http://dx.doi.org/10.1002/1099-1085\(200011/12\)14:16/17<2959::AID-HYP129>3.0.CO;2-B](http://dx.doi.org/10.1002/1099-1085(200011/12)14:16/17<2959::AID-HYP129>3.0.CO;2-B).
- [89] Tobin G A. The Levee Love Affair: A Stormy Relationship?[J]. Water Resources Bulletin, 1995, 31(3): 359-367.
- [90] Tobin G A. Sustainability and Community Resilience: The Holy Grail of Hazards Planning?[J]. Environmental Hazards, 1999, 1: 13-25.
- [91] Tockner K, Bunn S E, Gordon C, Naiman R J, Quinn G P, Stanford J A. Flood Plains: Critically Threatened Ecosystems[M] // Polunin N V C, ed. Aquatic Ecosystems. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2008, 45-61. <http://dx.doi.org/10.1017/CBO9780511751790.006>.
- [92] Tompkins E L, Adger W N. Does Adaptive Management of Natural Resources Enhance Resilience to Climate Change?[J/OL]. Ecology and Society, 2004, 9(2): 10. <http://www.ecologyandsociety.org/vol9/iss2/art10/>.
- [93] United Nations International Strategy for Disaster Reduction. Living with

- Risk: A Global Review of Disaster Reduction Initiatives. New York, USA: United Nations, 2004.
- [94] Vale L J, Campanella T J, eds. The Resilient City: How Modern Cities Recover from Disaster[M]. Oxford, UK: Oxford University Press, 2005.
- [95] Walker B, Holling C S, Carpenter S R, Kinzig A. Resilience, Adaptability and Transformability in Social-Ecological Systems[J/OL]. Ecology and Society, 2004, 9(2): 5. <http://www.ecologyandsociety.org/vol9/iss2/art5/>.
- [96] Walker B, Westley F. Perspectives on Resilience to Disasters Across Sectors and Cultures[J/OL]. Ecology and Society, 2011, 16(2): 4. <http://www.ecologyandsociety.org/vol16/iss2/art4/>.
- [97] Wang C, Blackmore J M. Resilience Concepts for Water Resource Systems[J/OL]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2009, 135(6): 528-536. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2009\)135:6\(528\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2009)135:6(528)).
- [98] White G F. Human Adjustment to Floods: A Geographical Approach to the Flood Problem in the United States. Chicago, Illinois, USA: Department of Geography, University of Chicago, 1945.
- [99] Zevenbergen C, Gersonius B. Challenges in Urban Flood Management[M] // Ashley R, Garvin S, Pasche E, Vassilopoulos A, Zevenbergen, eds. Advances in Urban Flood Management. New York, USA: Taylor & Francis, 2007: 1-11. <http://dx.doi.org/10.1201/9780203945988.ch1>.

(本文校译：王枫)