

社会-生态系统恢复力研究综述

孙 晶, 王 俊*, 杨新军

(西北大学 城市与资源学系, 陕西 西安 710127)

摘要: 目前国内外对脆弱性的论述很多, 然而关于恢复力的研究却刚刚起步且困难重重。1973 年 Holling 创造性地将恢复力引入到生态系统稳定性的研究中, 并将其定义为系统吸收干扰并继续维持其功能、结构、反馈等不发生质变的能力。30 多年来这一术语的概念和内涵在大量的案例研究中得到了丰富和完善, 然而这些研究对恢复力的不同解释亦造成了大量的混淆, 因此需要在统一的理论基础上, 根据控制系统变化的属性来构建恢复力的概念并进行应用研究。在社会-生态系统框架下, 分析了恢复力研究的基础理论——适应性循环及扰沌, 对其概念及内涵做了进展综述, 回顾了恢复力的应用案例, 探讨了量化问题, 在此基础上对社会-生态系统恢复力的研究进行了展望, 提出了面临的关键问题及今后的研究方向。

关键词: 社会-生态系统; 干扰; 恢复力; 适应性循环; 扰沌

文章编号: 1000-0933(2007)12-5371-11 中图分类号: Q143 文献标识码: A

An overview on the resilience of social-ecological systems

SUN Jing, WANG Jun*, YANG Xin-Jun

Department of Urban and Resource Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China

Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(12): 5371 ~ 5381.

Abstract: In his seminal paper, Holling coined the term resilience as the ability of ecosystems to absorb changes without a major transformation of system dynamics and feedbacks. This concept is becoming increasingly significant in many interdisciplinary studies, such as ecology, economics, environmental studies, sociology and political science. These studies deal with the interactions between humans and nature, providing a fresh and useful way to explore sustainable development. However, different interpretations of what is meant by resilience can cause confusion. Hence, the resilience of a system needs to be considered in terms of the attributes that govern system dynamic, based on a uniform scientific foundation. This paper first provides an overview of the related theories of adaptive cycle and of panarchy, which are newer developments drawing on the earlier work on resilience, and then traces the evolution of the concept of resilience. The meaning of resilience has evolved and expanded greatly since the 1970s, with some new insights gained during the last decade. Nowadays, the study of resilience has been incorporated into the framework of linked social-ecological systems. Resilience, for social-ecological systems, is related to (a) the magnitude of shock that the system can absorb and remain within a given state, (b) the degree to which the system is capable of self-organization, and (c) the degree to which the system can build capacity for learning and adaptation. A growing number of case studies have revealed the close connection between

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30500077); 陕西省自然科学基金项目(2006D02)

收稿日期: 2006-10-27; **修订日期:** 2007-04-29

作者简介: 孙晶(1982~), 男, 天津人, 硕士生, 主要从事社会-生态系统恢复力和旅游规划研究. E-mail: sunjingchanges@yahoo.com.cn

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangj@nwu.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 30500077) and Science Foundation of Shanxi Province, China (No. 2006D02)

Received date: 2006-10-27; **Accepted date:** 2007-04-29

Biography: SUN Jing, Master candidate, mainly engaged in the resilience of social-ecological system and tourism planning. E-mail: sunjingchanges@yahoo.com.cn

resilience, diversity and sustainability of social-ecological systems. Finally, we suggest some future areas of study for a better understanding of the resilience of social-ecological systems. There are still critical questions to be solved in the future, to build resilience and increase the capacity of social-ecological systems to cope with surprise in today's changing world.

Key Words: social-ecological systems (SES); disturbance; resilience; adaptive cycle; panarchy

20 世纪中叶以来,在全球领域中发生了一系列重大变化。交通工具的发展拉近了人们之间的距离,信息革命加深了各国的联系,一个国家发生的事件不再局限于国界,可能会波及相邻地区甚至全球。尤其是 20 世纪 90 年代以来,苏联的解体及其随后 10 多年的恢复重建工作、亚洲金融危机及其对世界市场的影响、“9·11”恐怖袭击对美国的冲击及其全球战略的调整,这些重大的社会经济变革将全球带入了一条不可预知的轨道中。与此同时,生态系统亦发生着巨大的改变——从业已来临的全球变化到臭氧空洞和各种新疾病的蔓延,这些信号似乎都预示着更大变化的来临。大量证据表明全球气候变化导致恶劣天气的频繁发生,由此造成的后果已经反映到不断上升的保险索赔案件和死亡人数中^[1]。在区域或更小的尺度上,生态系统也发生着剧烈的变化,其连锁反应可能会对当地社会、经济造成重大影响。极端的天气情况、动荡的社会局势、经济全球化的压力等因素共同造成了生物多样性、语言多样性、文化多样性等的加速丧失,阻碍了可持续发展的进程。因此,如何在充满讶异(surprises)和不确定性(uncertainty)的世界中维持各组成系统的持续、稳定发展成为众多学者关注的热点,社会-生态系统恢复力理论为解决这些问题提供了思路。

1 社会-生态系统恢复力理论基础及概念分析

1.1 社会生态系统的理论基础

1.1.1 社会-生态系统

近十几年来,人们逐渐认识到自然界与人类社会是相互依存的,需要寻求某种有机联系的理论框架将对二者恢复力的研究纳入到统一的体系中。我国学者提出的“社会-经济-自然复合生态系统”^[2,3]、“有序人类适应”^[4,5]等学术思想都在强调人类社会经济系统与自然生态系统的整合,人类作为管理者应该被纳入到整个系统中加以研究。从国外研究状况看,以“社会-生态系统(social-ecological systems,简称 SESs)”作为主要研究对象,从复杂系统动力学角度研究系统对外界干扰的恢复力和适应力,则是近年来可持续与全球变化研究的一个重要趋势。社会-生态系统是人与自然紧密联系的复杂适应系统,受自身和外界干扰与驱动的影响(图 1)^[6],具有不可预期、自组织、非线性、多稳态、阈值效应、历史依赖和多种可能结果等特征^[7,8],因此必须在多尺度的复合研究中去理解和研究社会-生态系统的恢复力。社会-生态系统恢复力理论也已经成为可持续发展研究的新视角,不同于系统的稳定性研究,该理论更关注变化中的持续性——确切地说是依托于 Gunderson 和 Holling 所论述的适应性循环理论^[1]。

尽管每个系统具体属性的不同会造成恢复力概念的差异,但它们概念的构建都是基于适应性循环理论^[1],所以适应性循环与扰沌一同成为研究和测定恢复力的重要理论。

1.1.2 适应性循环

以 Holling 为首的著名国际性学术组织“恢复力联盟(Resilience Alliance)”^[1,7~14]运用适应性循环理论对

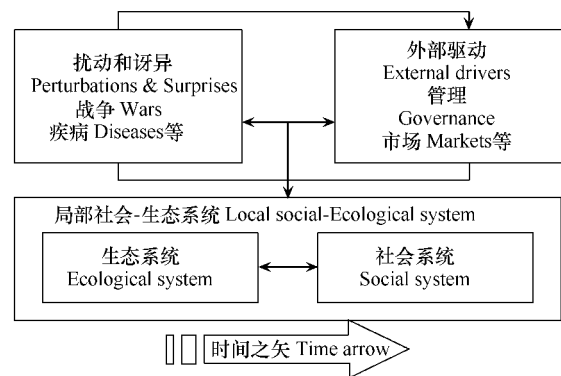


图 1 社会-生态系统示意图^[6]

Fig. 1 Sketch of Social-Ecological Systems^[6]

社会-生态系统的动态机制进行描述和分析,提出社会-生态系统将依次经过开发(r)、保护(K)、释放(Ω)和更新(α) 4 个阶段,构成一个适应性循环。

适应性循环包含 3 种属性,潜力(*potential*)、连通度(*connectedness*)、恢复力(*resilience*)。潜力决定了系统未来可供选择的范畴,被认为是系统的“财富(*wealth*)”。包括诸如:生态、经济、社会 and 文化的积累资本及无法表示的创新和变化等。在生态系统中,所谓的“财富”积累相当于营养、生物量的积累。在经济或社会系统中,则相当于技术的提高、人类关系网的构建以及在此过程中逐步增进的信任与融合。连通度是指系统各组分之间相互作用的数量和频率,表示的是系统控制自身状态的程度,如系统对于干扰的敏感程度等。恢复力,即系统的适应力,是系统对非预期或不可预测干扰脆弱性的量度,可看成是与系统脆弱性相对的概念。这三个属性存在于各个尺度上,从细胞到整个生物圈,从个体到整体文化^[14]。在区域发展和经济管理的案例中,适应性循环的属性也已经用来解释生态系统、人类社会应对危机时的各种反应^[15]。

适应性循环是基于生态系统演替的传统观点之上,并对其加以补充和延伸。传统观点认为生态系统的演替是由两个功能控制的:开发(*exploitation*, r),受干扰地区的快速建群(*colonization*)行为;保护(*conservation*, K),能量和物质的缓慢积累与存储。在生态学中,开发阶段的物种是 r -策略者,保护阶段则属于 K -策略者。这两个名称来自 Logistic 方程的参数(r 代表种群生长的瞬时速率, K 则表示种群的持续稳定或最大值)^[16]。随着研究的深入,学者们发现需要补充两个功能才能完整描述生态系统的演替过程,即组成一个完整的适应性循环,如图 2 (A) 所示。首先需要增加的功能是释放(*release*, Ω),或者称“创造性毁灭”,该术语来自经济学家 Schumpeter 的相关论述^[17],Elliott 对其做过相应的回顾^[18]。该阶段中,营养和生物量的积累变得十分微弱,此时出现的某些外界干扰,如火灾、干旱、虫灾、过度放牧等都可能将积累“财富”的突然释放,此即释放阶段。下一个要补充的是更新(*reorganization*, α) 功能,具体是指先锋物种的出现和生长,这些物种可能来自以前受抑制的植被、土壤的种子库、远距扩散的繁殖体等。适应性循环的更新阶段相当于工厂或社会中的重组与创新——在经济衰退或社会转型时采取的财政措施和政治策略,此即更新阶段。

适应性循环各阶段的时间分配是不平均的。系统的轨迹是在资源缓慢积累和转变的长周期与创新和重组的短周期期间运行的,系统的连通度和潜力亦随之变化。将恢复力作为第三维加入图 2 (A) 的二维平面中,得到适应性循环的三维模型,如图 2 (B) 所示。可以直观地看到,系统的恢复力也是随系统的运行而不断发生变化的。

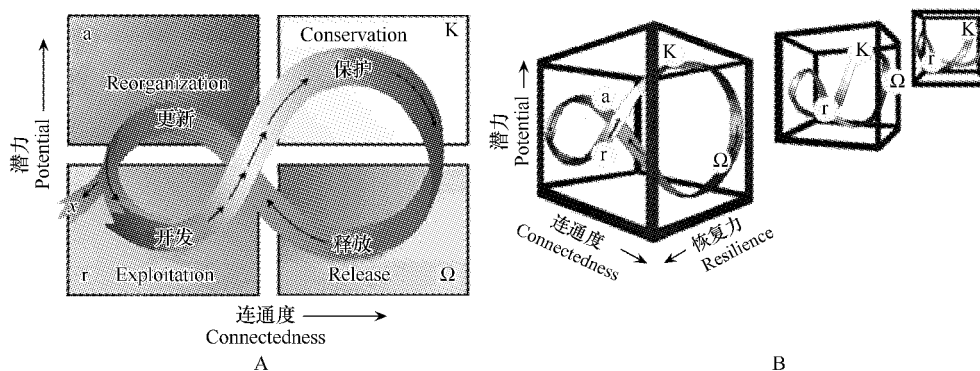


图 2 适应性循环(A)和增加了恢复力的三维视图(B)^[1]

Fig. 2 Adaptive cycle (A) & its three-dimensional views (B)^[1]

时间分配的差异是由系统在适应性循环 4 个阶段中运行的具体情况造成的。(1)在从 r 到 K 的过程中,残留的存活植被与自然结构可以看作是上一循环的生物遗产(*biotic legacies*)^[19]。所谓的生物遗产是指土壤的种子库、残留的自然结构、存活的物种等。由于适应了迅速变化的小气候及恶劣的土壤条件并通过扩散占据大量领地,生物区系(*biota*)变得十分繁茂, r 阶段迅速成为主导过程。这些对外界变化的适应虽然可以提高恢复力,但系统的连通度依然很低,容易受到外部变化(机会或限制)的影响,导致物种的进化或淘汰。当

存活的物种开始生长、扩张并从获取的资源中积累潜力时,从 r 到 K 的进程开始了。随着扩张的继续,易化 (facilitation) 和种间竞争的不断进行,物种间的连通度开始上升,但系统的恢复力却在降低,系统对干扰变得更加脆弱。(2) 在从 K 到 Ω 的过程中,系统的僵硬度 (Rigidity) 逐渐趋于临界水平,在干扰的作用下随时可能崩溃。由于系统的低恢复力,以前微不足道的干扰,此刻可能导致巨大的危机和转变。按 Schumpeter 的话来说, Ω 阶段中将产生大量的“创造性毁灭”。本阶段中的反抗和稳定因素间产生了强烈的正反馈,这一短暂过程在资源消耗完结时结束。短时间内,系统潜力骤然下降。(3) 相对于 r 到 K 过程的可预测性来说, Ω 到 α 的过程具有高度的不确定性,前一过程积累的变化、创新、资本等在本阶段中将进行分类和重组,同时系统中出现了无秩序的行为。虽然从 r 到 K 的可预测行为到无秩序行为间的变化限制了系统的周期性检测,但这种无秩序行为也带来并维持了系统的多样性。这种“在等待中”的多样性增强了系统对未来非预期外部变化的反应能力。大量生态系统就是在 α 阶段建立并在随后的阶段中发展和完善。

可见,从 r 到 K 的过程将生产和积累最大化,以增长和稳定为主;从 Ω 到 α 的过程则将创新和分类最大化,以改变和更新为主。两个过程不能同时发生,只能按顺序进行。如果适应性循环以 Ω 阶段代表循环的终结, α 阶段就是新一轮循环的开始——这是一个既有生态意义又颇具哲理的过程。

1.1.3 扰沌

每个适应性循环既可能是上一循环的重复,也可能表现出全新的特性,系统内不同等级尺度的循环通过“记忆 (remember)”或“反抗 (revolt)”相互依赖形成一种扰沌 (panarchy) 现象, (图 3)。扰沌是描述复杂适应性系统进化性质的术语^[1], 提供了跨尺度过程的联结模式,反映了适应性循环的嵌套性^[7]。它较自组织临界理论中的“沙堆模型 (sandpile model)”^[20] 更能全面完整的描述系统的运行情况。类似于 Logistic 曲线,“沙堆模型”只能表征单一尺度上系统自组织临界态的特征,即从开发、保护到崩溃的过程,不能对系统崩溃后的情况做出判断和模拟。而扰沌则是一套更为全面完整的具有普适性的理论,已成为构建恢复力不可或缺的重要基础。

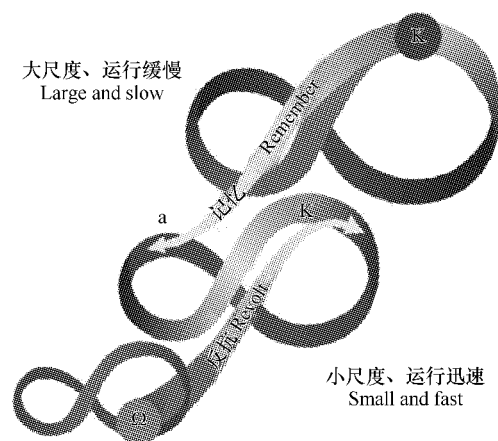


图 3 扰沌现象^[1]

Fig. 3 Panarchy Model^[1]

自然界中的扰沌已经造成了大量的变化(飓风、虫灾、干旱等),许多潜藏在自然界中的资源因此得以释放,但系统内部的严谨结构亦同时丧失。人类公司也具有相似的行为,当 IBM、AT&T、通用等公司在其内部僵硬度积累到危险阈值时,持股人就会要求公司进行重组和改革(相当于“反抗”),提高公司的恢复力,使其维持于现状(即上一循环的重复)或进入更大尺度的循环中^[21,22]。而前苏联则提供了一个由于积累的僵硬度过大而无法恢复导致社会突然崩溃的实例^[10,17]。跨尺度相互作用中的“记忆”存储于上一循环积累的生物遗产中^[18]。Nyström 等^[23]考察了人类主导的环境中珊瑚礁的恢复力时指出,遭受飓风袭击的珊瑚礁会依靠生物遗产及作为自身成分的“海景记忆”进行重组和更新的。Adger 等^[24]在研究海岸带社会-生态系统的应灾机制时也发现,得益于世代传承的知识,某些受灾地区土著居民的灾后重建过程进展的很快。

由此可见,扰沌联结了系统中不同等级间(向上或向下)的相互作用,在快速运行的低层次中进行创新、实验和检测;在慢速运行的高层次中对过去的成功经验进行记忆和保护,因此,扰沌既具有创造性又具有保守性。

1.2 恢复力概念的演变

恢复力 resilience 源自拉丁文 resilio (re = back 回去, silio = to leap 跳),即跳回的动作。韦氏字典将其解释为:收缩的物体在受到压力变形后恢复其尺寸和形状的能力;从不幸或变化中恢复或适应的能力^[25]。从机

力学学的概念来理解,恢复力是指材料在没有断裂或完全变形的情况下,因受力而发生形变并存储恢复势能的能力^[26]。从 20 世纪 70 年代后,恢复力引申为承受压力的系统恢复和回到初始状态的能力。

1.2.1 进入生态系统

Holling^[9]首次将恢复力的概念引入生态系统的研究中,他将恢复力定义为“生态系统吸收变化并能继续维持的能力量度。”早期研究中,恢复力与系统的状态及外部干扰都是相关联的,而基于不同的研究视角,恢复力产生了两种表达方式:机械恢复力(engineer resilience)和生态恢复力(ecological resilience)。机械恢复力是指系统受到干扰后回复到均衡态的时间,关注效率、稳定性和可预测性。从这个意义上讲生态系统存在于均衡稳态附近,它的恢复力是系统受干扰后回复稳态的能力^[27~31]。这种远离和回复稳态的思想也是经济理论的中心^[1,32,34]。生态恢复力是系统状态改变前吸收干扰的总量,关注持续、变化和不可预测性。它更关注远离均衡稳态的条件,这样的不稳定性可以使系统移入其它行为域中^[28,34],即进入另一种稳态(regime)^[9]。在这种情况下,恢复力是系统通过改变那些控制系统行为的变量和过程并对其自身结构进行重新定义前所能吸收干扰的量级。生态恢复力是基于多稳态的,而机械恢复力只注重单一稳态(或整体均衡),因此尽管机械恢复力和生态恢复力是相关联的,但由于大多数系统都是复杂多稳态的,且在不同尺度上相互嵌套,例如从家庭到社区到国家,从一棵树到丛林到整个森林景观,所以机械恢复力不适宜作为恢复力的测度。

1.2.2 进入社会系统

在复杂性、连通度日益提升,干扰不断加剧的世界中,人们不再机械地将社会视为可控制的人造物,取而代之的是更加灵活动态的观点,进而引用生态学中恢复力的概念描述社会系统的运行状况,从政府部门的日常运作、区域发展、经济管理乃至恐怖袭击的预警措施都涉及恢复力的研究。Adger^[35,36]调查了社会恢复力和生态恢复力之间的联系,将社会恢复力定义为人类社会承受外部对基础设施的打击或干扰(如环境变化、社会变革、经济或政治的剧变)的能力及从中恢复的能力。社会恢复力可以用制度变革和经济结构、财产权、资源可获取性以及人口变化来衡量。其中,作为嵌入社会系统的动态子系统,企业在世界经济运行中发挥着举足轻重的作用,所以存在大量有关企业恢复力的案例研究。美国俄亥俄州立大学恢复力研究中心通过对企业运行情况的深入调查和研究,给出了企业恢复力的一个定义,即作为动态系统的企业,它需要根据股东和持股人的意愿和需求,制定相应的方法政策保证企业的持续增长和发展,通过风险预测、机会辨识、产品选择和销售设计等一系列措施应对外部变化的能力^①。

1.2.3 进入社会-生态系统

随着社会-生态系统理论的引入,恢复力的定义也日臻完善。Gunderson 和 Holling^[10]将恢复力定义为系统经受干扰并可维持其功能和控制的能力,即恢复力是由系统可以承受并可维持其功能的干扰大小测定的。Carpenter 和 Walker^[37]等认为恢复力是干扰的大小,即在社会-生态系统进入到一个由其它过程集合控制的稳态之前系统可以承受干扰的大小。Walker 等^[7]在研究外部干扰下社会-生态系统未来演化轨迹的属性时,将恢复力定义为系统能够承受且可以保持系统的结构、功能、特性以及对结构、功能的反馈在本质上不发生改变

1.3 恢复力概念的内涵

在研究恢复力时,关心的主要是系统进入其它“状态空间(state space)”或集合前承受干扰的大小^[7]。基于这种理解,恢复力的属性可分为 3 方面:(1)系统能承受的并仍存在于原稳态(即保持结构和功能不变)的变化量;(2)系统自组织的能力(与系统无组织或受外部因素驱动的组织相对应);(3)系统构建学习与适应能力的程度(适应能力是恢复力的重要因素,反映了系统面对干扰时的学习能力)^[1]。

应用“状态空间”可以直观地理解恢复力的内涵。“状态空间”是由系统的状态变量定义的。例如,用草地、灌丛面积、牲畜数量来定义牧场系统,“状态空间”就是由这 3 个变量的全部组合构成的三维空间。在其

① Center for Resilience. www.resilience.osu.edu/EnterpriseResilience.html

中运行的系统多是处于某一吸引盆地(basin of attraction)中,吸引盆地是“状态空间”的特定区域,处在其中的系统趋于稳定。但现实世界的社会-生态系统经常受到外部干扰、随机性及管理者决策的影响,所以系统总是在某一盆地内或若干盆地间(如牧场中草地、灌丛面积、牲畜数量的若干组合)移动。系统可进入的盆地及分离这些盆地的界限称为稳定性景观(stability landscape,图4,图中黑点为系统所在位置)。稳定性景观中恢复力的构成元素有4个:范围(latitude, L):系统在丧失恢复能力前可改变的最大量;抗性(resistance, R):改变系统状态的难易程度;不稳定性(precariousness, Pr):系统距阈值的距离;扰沌(panarchy):由于跨尺度相互作用,局部尺度上系统的恢复力将受到不同尺度上系统状态及其变化的影响。例如:军事入侵、市场转型、全球气候变化引起的局部恐慌、政权更迭等。

外部驱动因子(降雨、汇率)和内部过程(植被更替、捕猎循环、管理实践)都可导致稳定性景观的改变,包括盆地数量的变化、盆地宽度的变化(范围 L ,图4A)、盆地深度的变化(盆地深度表征系统在盆地中移动的难易程度——深的盆地意味着需要更大的干扰或管理才能改变系统的当前状态,即抗性 R ,图4A)、盆地形态或系统位置的变化(盆地形态或系统位置的变化将改变系统距盆地边界的位置,即变化 Pr ,图4A或进入新盆地,图4B)^[7]。管理者的目标就是使系统维持于所需的盆地中,(例如:大量的草地和牲畜、少量灌木),防止系统进入不需要的盆地(一旦发生很难回复)^[28,38,39]。

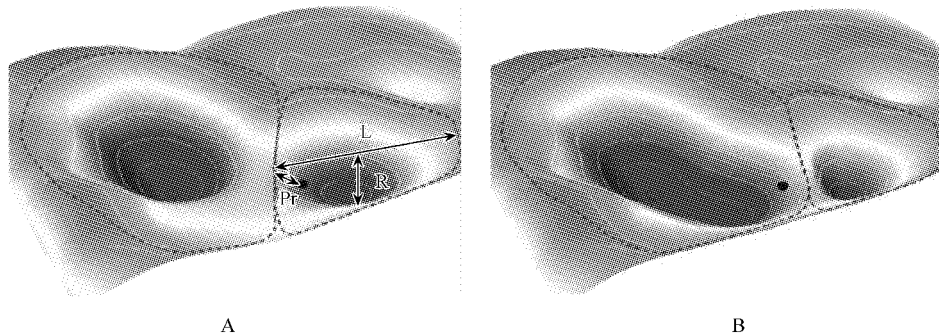


图4 稳定性景观的三维视图^[1,7]

Fig. 4 Three-dimensional views of stability landscape^[1,7]

2 恢复力研究的案例回顾及其测度

恢复力反应了复杂适应系统进行自组织、学习并构建适应力的能力^[7,12,37,38]。随着理论的成熟,许多国外学者开始在案例中对社会-生态系统恢复力及其测定进行研究。

Adger 等^[24]在研究海岸带社会-生态系统应灾机制时提出,恢复力是该系统吸收周期性干扰,如飓风或洪水,同时维持海岸社会-生态系统基本结构、过程和反馈不发生本质变化的能力。他认为谋生手段的多样性、社会具备的知识,地方应急机构等都可成为缓冲极端自然灾害,进行更新的重要资源。例如,在2004年末发生的海啸中,苏门答腊西部的 Simeulue 岛接近海啸的中心位置,但此处的损失情况并不是最严重的,其灾后重建进行的也很快。这归功于当地土著世代传承的关于灾害特别是海啸的知识,加上当地居民谋生手段的多样性。这些因素都增强了该岛应对灾害的恢复力,使当地的社会-生态系统得以迅速复原。

Berkes 等^[38]在构建泻湖的社会-生态系统恢复力时,以 Gunderson 和 Holling 关于恢复力的定义为基础,根据具体因素提出了恢复力研究的4个方面:(1)学习与变化和不确定性共存;(2)为更新培育多样性;(3)整合不同类别的知识;(4)为自组织创造机会。Bengtsson^[40]在研究土壤生物种群的干扰和恢复力时认为生物多样性是生态系统恢复力的重要构成因素。干扰维持了生态系统的多样性和整体景观,生物多样性对维持生态系统恢复力起着十分重要的作用。Klein 等^[41]等将海岸带复杂系统的恢复力分为自然恢复力、生态恢复力和社会经济恢复力3部分,认为海岸系统没有初始或平衡状态,海岸带恢复力是海岸带在不断变动的水文和地貌环境中保持实际和潜在功能的自组织能力。这种能力源于自然、生态和社会经济的动态过程,并受所要维

持功能的限制。Adam^[42]在研究地震的经济恢复力时将恢复力定义为灾后的条件和响应,而与灾前通过减灾措施降低潜在损失的行为区分开来,并从概念、实践、经验 3 方面对经济恢复力进行了论述。Milestad 和 Hadatsch^[43]对奥地利阿尔卑斯山 Sölkaler 峡谷地区的社会-生态系统进行研究时指出有机农业为当地提供了经济保证,并维持环境的良性运作,因此有机农业已成为当地的支柱产业,增强了 Sölkaler 地区的恢复力。Allison 和 Hobbs^[44]运用适应性循环理论对澳大利亚西北农业区的恢复力和适应能力进行了分析。IHDP Update^[45]第二期中论述了社会-生态系统恢复力在全球变化的大背景下,在资源利用、应对危险、降低脆弱性和提高未来生态系统完整性等方面的重要性。以上这些研究触及社会-生态系统的各个领域,恢复力的具体属性也有差异,表现形式各不相同,但多为理论性分析,即借助恢复力的概念来更好地理解和管理复杂系统^[7]。

由于社会-生态系统的多稳态机制,任何外部干扰都可能导致系统状态的突变,进入到管理者所不希望的状态中,因此对系统恢复力的测度成为进一步探讨恢复力、研究系统稳定性的重要步骤^[46]。从理论向实际应用的转变需要对恢复力进行评估和计算,但社会-生态系统的行为往往是由几个不同关键变量共同决定的^[14],且迄今尚缺乏有关恢复力测算的案例,这都构成下一步工作的障碍^[7]。

直接测定恢复力是困难的,因为需要测定社会-生态系统每个稳态的阈值。虽然恢复力的主要构成因素无法直接观测,但可以间接推断^[47]。推断方法之一就是在系统中找出与恢复力相关且可以测定的属性,从中选取恢复力的替代因子作为替代物(surrogate)。使用“替代物”这个词来区别传统生态学经常使用的“指示因子(indicator)”,因为替代物是从社会-生态系统的评估理论中提取的,与恢复力呈动态、复杂和多维的关系,而且恢复力的管理是在充满讶异与未知的快速变化的系统中维持持续性,所以替代物应当具有前瞻性^[47,48]。选取替代物应首先建立模型,然后参照模型和具体系统属性逐一筛选(图 5)。Bennett 等^[49]在案例研究中建立了一个选取社会-生态系统恢复力替代物的模型(表 1)。

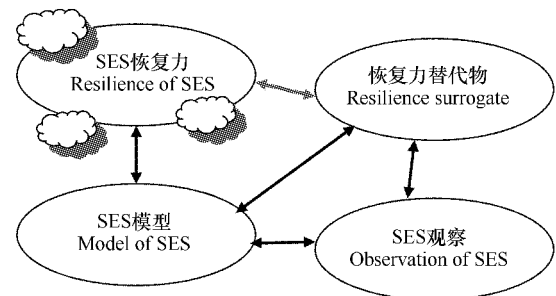


图 5 恢复力及其替代物关系示意图^[6]
Fig. 5 Sketch of the relationship between resilience and its surrogates^[6]

3 社会-生态恢复力研究的讨论与展望

3.1 恢复力与脆弱性

脆弱性是恢复力密切相连的一个概念,而且早期的学者更关注脆弱性的研究。随着恢复力研究的不断深入,其渐渐脱离脆弱性并成为与之并列的术语。当今对恢复力和脆弱性关系的理解存在两种观点:Folke 等^[48]学者认为恢复力和脆弱性是同一硬币的两面:脆弱性的反面就是恢复力,即某一系统是脆弱的,那它的恢复力就很低;反之亦然。而以 Buckle^[50]为代表的学者们则认为恢复力和脆弱性的关系就如同一个双螺旋结构,在不同的社会层面和时空尺度中交叉,所以它们是不可分离的,既不能简单视为硬币的正反两面,也不能归纳为一个连续体的端点,应该强调两者之间直接且紧密地联系;恢复力和脆弱性可以呈正相关性,恢复力由低变高的同时,脆弱性也由低变高;恢复力和脆弱性亦可呈负相关性,当恢复力由低变高时,脆弱性由高变低。双螺旋结构形象地强调了脆弱性和恢复力不可分离的关系。

在国内外学者对脆弱性长期深入研究的基础上,可根据 Folke 等的观点,通过脆弱性的研究反推出恢复力的某些指标,进而对恢复力进行(半)定量计算。这虽然不失为研究恢复力的一种途经,但其可行性仍值得商榷。例如:1992 年当 Andrew 飓风(强度 5 级)袭击美国佛罗里达时,造成了 265 亿美元经济损失,23 人丧生。1991 年孟加拉一场强度相同的飓风却造成了 10 万人死亡,淹没区数百万人流离失所。尽管两地的社会-生态系统在面对飓风时的脆弱性相似,但在佛罗里达,由于当地健全的机构、早期的预警机制、完备的危机处

理能力构成了当地社会生态系统的高恢复力,将灾害的影响限制在最小范围内;受相似灾害袭击的孟加拉,社会生态系统恢复力很低,造成的损失远远大于佛州^[51~53]。由此可见,该观点显然存在缺陷,尚待进一步探讨。尽管恢复力与脆弱性同为描述社会-生态系统对外界干扰反应的术语,但两者之间的关系并不确定,即相联系但不相关。

表1 选取恢复力替代物的系统模型^[49]Table 1 Models in identifying resilience surrogates^[49]

步骤 Steps	问题 Questions	答案 Answers
1. 评估和问题定义 Assessment and Problem Definition	系统哪些方面应当具有恢复力? What aspect of the system should be resilience?	系统边界,构建系统模型标准 System boundaries, criteria for building system model
	管理者希望系统对哪些变化具有恢复力? What kind(s) of change would we like the system to be resilient to?	外部驱动、干扰、系统预期状态 External drivers, disturbances, desired state of the system
2. 反馈过程辨识 Identifying Feedback Processes	什么变量在变化? What variables are changing?	系统要素 System elements
	什么过程和驱动造成这些变化? What processes and drivers are producing these changes?	系统驱动 System drivers
	是什么控制产生变化的过程? What forces control the processes that are generating change?	过程和要素间的联系 Connection among processes and elements
3. 系统模型设计 Designing a Systems Model	关键要素是什么,它们如何联系? What are the key elements and how are they connected?	要素和过程联系的审核与提炼 Editing and refining connections among elements and processes
4. 恢复力替代物辨识 Identifying Resilience Surrogates	存在什么样的正负反馈圈,这些反馈圈和哪些变量相联? What positive and negative feedback loops exist and which variables do they connect?	辨识模型中的反馈圈 Identifying loops in model
	是什么(如果存在的话)将由一个反馈圈控制的系统移至另一个反馈圈? What (if anything) moves the system from being controlled by one feedback loop to another?	辨识反馈圈中的阈值和支撑点 Identifying threshold and leverage points in loops
5. 恢复力替代物选取的条件 Question on the selection of resilience surrogates	根据反馈圈,状态变量的阈值? As indicated by the feedback loops, what is the threshold value of the state variable?	阈值条件 Threshold conditions
	状态变量离阈值的距离? How far is the state variable from the threshold value?	当前状态和阈值的比较 Compare current state to threshold level
	变量靠近或远离阈值的速度? How fast is the variable moving toward or away from the threshold?	系统是变得脆弱还是更有恢复力 Whether system is becoming more vulnerable or more resilient
	外部控制与干扰是如何影响状态变量的? 影响的概率是多少? How do external controls and shocks affect the state variable and how likely are those shocks and controls?	系统是否具有恢复力取决于系统对外部干扰是否有恢复力 Whether system is resilient is the system to external shocks
	缓慢变化变量是以何种方式影响阈值位置的? How are slow variables changing in ways that affect the threshold location?	系统组织中的缓慢变化是否提升或降低系统恢复力 Whether slow changes in the organization of system decreasing or increasing the resilience of the system
	什么因素控制缓慢变化变量改变? What factors control the changing of these slow variables?	系统恢复力的控制 Controls of the resilience of the system

3.2 恢复力与可持续性

尽管恢复力为可持续发展的研究提供了新的视角,但它又不同于可持续性。恢复力所维持的情况可好可坏。例如:污染的水域,政治上的独裁,都可能具有很高恢复力。而可持续性关注的是有利于社会进步、人类发展、自然和谐的目标^[38]。研究恢复力的目标就是希望使社会-生态系统朝着有利的方向运行,或者说使社会-生态系统在可持续发展的吸引盆地中稳定运行。因此,增强系统恢复力就抽象为拓深拓广吸引盆地,使系统更稳定地在其中运行,实现可持续发展。

3.3 恢复力的“不可逆性”

从物质系统演化的角度来看,可逆过程在严格意义上是不存在的,即可逆过程发生时所带来的环境影响

不足以消除上一过程所带来的影响,从而造成环境的变迁。所以部分生态学家认为恢复力很强的生态系统在受到外界干扰后,也会发生改变,无法完全回复到干扰前的状态。因此,如何通过研究系统恢复力,寻找增强系统恢复力的手段,从而避免系统进入人们所不希望的状态(尽管这种状态可能也是稳定的)中,正是恢复力研究的目标所在。

3.4 恢复力研究展望

近年来“9·11”恐怖袭击、SARS、印度洋海啸相继发生,受害国及地区的社会-生态系统受到巨大冲击,然而在经过一系列调整和转变后,这些国家管理恢复力的能力都得到了显著增强。提升恢复力,究其根本在于维持系统的异质性(例如维持生态系统的多样性),使系统有充分的准备应对外部干扰。类似于这些局部地区的事件,经过从生长、适应、转变到最后崩溃的扰沌过程后可能波及全球,造成无法预料的后果^[37,54]。尤其是美国领导的反恐行动,已经引起了国际局势继冷战后的深刻改变。这些突发事件质疑了传统的最优化理论,促进了对动态适应性管理的关注,同时拓宽了恢复力的研究领域。通过管理恢复力可以增强系统处理讶异的能力,提升在动荡变化的世界中维持可持续发展的机率。2002年在瑞典召开的“可持续发展世界峰会(World Summit on Sustainable Development)”提出构建恢复力是全人类共同的责任,并建议将恢复力的观点作为补充内容加入《21世纪议程》中^[55]。与此同时,国内恢复力的研究才刚刚起步,刘婧、史培军等人^[56]对恢复力的科学价值和重要性进行了论述,分析了灾害脆弱性与灾害恢复力的关系,总结了恢复力评估的主要方法、特点和难点,并在此基础上对灾害恢复力未来的研究进行了展望。

目前,在恢复力的研究中逐渐加大了有关社会元素的探讨,这说明恢复力已扩展成为多学科的研究领域,社会-生态系统恢复力的耦合研究将成为未来学科发展的方向。回顾以往,不难发现恢复力的研究中依旧面临诸多问题,如社会-生态系统的理论框架不甚完善、研究尺度界限不清、恢复力缺乏科学统一的定义等等,但现阶段面临的瓶颈就是恢复力的量化问题,即测算出系统处于适应性循环的何种位置,距离系统崩溃阈值的远近,朝阈值运行的速率。尽管恢复力替代物为量化研究提供了模型和思路,但大多数系统都是由若干关键变量共同决定的,所以如何选取变量,确定变量的权重,如何界定研究系统及在何种尺度上对其进行研究,如何增强并维持系统的恢复力,恢复力变化的具体机理等一系列问题尚待解决。而且,此前有关恢复力的研究多是基于假设,并在人为控制的情况下进行实验,由此得出的结论在实际的社会-生态系统中无法验证,这是因为现实情况中多数变量是无法控制和管理的,甚至连简单的复制也很困难或不可能^[57]。因此,今后应优先开展实践理论的研究,以自然科学、社会科学的基本原则为基础,特别是生态学、经济学、政治学和考古学,从大量案例的比较分析中总结提取可操作的方法。建议在构建社会-生态系统恢复力时,可根据具体情况选取社会-生态系统的主要变量构建指标体系,在确定系统主要干扰因子的基础上,采用数学模型和系统动力学方法,通过情景设计和适应性管理对社会-生态系统恢复力进行分析,预测各种可能的结果和行为,甄别并选取管理恢复力的政策,进而构建具有高适应能力的管理体系。诸如此类问题是单一学科难以完成的,这就期待各领域的学者,就如同“恢复力联盟”的构成人员一样,从生态学家、经济学家到社会学家、数学家、考古学家等的共同努力。世界每天都在发生改变,互联网的普及、基因工程的突破,这些新变化在引起恐慌的同时亦造就了大量的机会,恢复力自身的研究亦将伴随这些变化开始新一轮的扰沌。

References:

- [1] Gunderson L H, Holling C S. Panarchy: Understanding transformations in human and natural systems. Washington D. C.: Island Press, 2002.
- [2] MA S J. Social-economic-natural complex ecosystem. *Acta Ecologica Sinica*, 1984, 4 (1): 1—9.
- [3] Zhao J Z, Ouyang Z Y, Wu G. Sustainable development research of social-economic-natural complex systems. Beijing: Environment Science Press, 1999. 141—165.
- [4] Fu C B, Dong W J, Wen G, *et al.* Regional response and Adaptation to global change. *Acta Meteorologica Sinica*, 2003, 61(2): 4—10.
- [5] Ye D Z, Fu C B. Some advance in global change study. *Academy Publication of CAS*, 2004, 19(5): 336—341.
- [6] Cumming G S, Barnes G, Perz S, *et al.* An exploratory framework for the empirical measurement of resilience. *Ecosystems*, 2005, 8: 975—987.

- [7] Brian Walker, Holling C S, Carpenter S R, *et al.* Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems. *Ecology and Society*, 2004, 9(2): 5—12.
- [8] Beisner B E, Haydon D T, Cuddington K. Alternative stable states in ecology. *Front Ecol Environ*, 2003, 1(7): 376—382.
- [9] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 7(4): 1—23.
- [10] Gunderson L H, Holling C S. Understanding the complexity of economic, ecological and social systems. *Ecosystems*, 2001, 6: 390—405.
- [11] Berkes F, Folke C. Linking social and ecological systems: management practices and social mechanisms for building resilience. UK: Cambridge University Press, 1998.
- [12] Folke C, Carpenter S, Elmqvist T, *et al.* Resilience and sustainable development: Building adaptive capacity in a world of transformations. *Ambio*, 2002, 31(4): 437—440.
- [13] Walker B, Carpenter S, Anderies J, *et al.* Resilience management in social-ecological systems: a working hypothesis for a participatory approach. *Conservation Ecology*, 2002, 6(1): 14.
- [14] Pimm S L. The complexity and stability of ecosystems. *Nature*, 1984, 307: 321—6.
- [15] Gunderson L H, Holling C S, Light S S. Barriers and bridges to the renewal of ecosystems and institutions. New York: Columbia University Press, 1995.
- [16] Pearl R. The growth of populations. *Quarterly Review of Biology*, 1927, 2: 532—548.
- [17] Schumpeter J A. Capitalism, socialism and democracy. New York: Harper & Row Press, 1950.
- [18] Elliott J E. Marx and Schumpeter on capitalism's creative destruction: A comparative restatement. *Journal of Economics*, 1980, 95: 46—58.
- [19] Franklin J F, MacMahon J A. Ecology-messages from a mountain. *Science*, 2000, 288: 1183—1185.
- [20] Bak P, Tang C, Wiesenfeld K. Self-organized criticality. *Annual Physics Review*, 1998, 38(1): 364—374.
- [21] Hurst D K. Crisis and renewal. Boston: Harvard Business School Press, 1995.
- [22] Hurst D K, Zimmerman B J. From life cycle to ecocycle. *Manage Inquiry*, 1994, 16(3): 339—354.
- [23] Nyström M, Folke C, Moberg F. Coral reef disturbance and resilience in a human-dominated environment. *Trends Ecol*, 2000, 15: 413—417.
- [24] Adger W N, Hughes T P, Folke C, *et al.* Social-ecological resilience to coastal disasters. *Science*, 2005, 309: 1036—1039.
- [25] Merriam-Webster's 11th Collegiate Dictionary. Copyright by Merriam-Webster, Incorporated, MA, USA, 2003.
- [26] Gordon J E. Structure. Harmondsworth, UK: Penguin Books, 1987.
- [27] Gunderson L H, Holling C S, Pritchard L, *et al.* Resilience. In: Mooney H A, Canadell J G eds. The earth system: biological and ecological dimensions of global environmental change. In: Munn T ed. Encyclopedia of global environmental change. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, Published Online, 2001. 2, 530—531.
- [28] Holling C S. Engineering Resilience versus ecological resilience. In: Schulze P C ed. Engineering within ecological constraints. Washington, D. C.: National Academy Press, 1996. 31—43.
- [29] Pimm S L. The Balance of Nature. Chicago: University of Chicago Press, 1984.
- [30] O'Neil R V, De Angelis D, Waide J B, *et al.* A Hierarchical concept of ecosystems. New York: Princeton University Press, 1986.
- [31] Tilman D. Biodiversity: population versus ecosystem stability. *Ecology*, 1996, 77(6): 350—363.
- [32] Varian H R. Microeconomic analysis. New York: Norton Press, 1992. 1—506.
- [33] Kamien M I, Schwartz N L. Dynamic optimization: the calculus of variations and optimal control in economics and management. New York: Elsevier Science Publishing Corporation, 1991. 149—377.
- [34] Walker B H, Holling D, Holling C S, *et al.* Stability of semi-arid savanna grazing systems. *Ecology*, 1969, 69: 473—498.
- [35] Adger W N. Sustainability and social resilience in coastal resource use. Global environmental change working paper. Center for social and economic research on the global environment. University of East Anglia, London, UK, 1997. 23.
- [36] Adger W N. Social and ecological resilience: Are they related? *Progress in Human Geography*, 2000, 24(3): 347—364.
- [37] Carpenter S, Walker B H, Anderies J M. From metaphor to measurement: resilience of what to what? *Ecosystems*, 2001, 4: 765—781.
- [38] Fikret Berkes, Cristiana S. Seixas. Building resilience in lagoon social-ecological systems: a local-level perspective. *Ecosystems*, 2005, 8: 967—974.
- [39] Gunderson L H. Ecological resilience-in theory and application. *Annual Review of Ecology Systematics*, 2000, 31: 425—39.
- [40] Janne Bengtsson. Disturbance and resilience in soil animal communities. *Soil Biology*, 2002, 38: 119—125.
- [41] Klein R J T, Smith M J, Goosen H, *et al.* Resilience and vulnerability: coastal dynamics or Dutch dikes? *The Geographical Journal*, 1998, 164(3): 159—268.
- [42] Adam R. Defining and measuring economic resilience to earthquake. Buffalo: MCEER Publication, 2004. 41—54.
- [43] Milestad R, Hadatsch S. Organic farming and social-ecological resilience: the Alpine Valleys of Solktaler, Austria. *Conservation Ecology*, 2003,

8(1):3—15.

- [44] Allison H E, Hobbs R J. Resilience, adaptive capacity, and the "Lock-in Trap" of the Western Australian agricultural region. *Ecology and Society*, 2004, 9(1):3.
- [45] IHDP update (Special edition on Resilience): Building Resilience to Promote Sustainability-An agenda for coping with globalization and promoting justice. IHDP, 2003.
- [46] Scheffer M, Carpenter S R, Folke J, *et al.* Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature*, 2001, 413: 591—696.
- [47] Carpenter S R, Frances Westley, Turner M G. Surrogates for resilience of social-ecological systems. *Ecosystems*, 2005, 8: 941—944.
- [48] Folke C, Carpenter S, Elmqvist T, *et al.* Resilience and sustainable development: building adaptive capacity in a world of transformations. Scientific background paper on resilience for the process of the worked summit on sustainable development on behalf of the environmental advisory council to the Swedish government, 2002.
- [49] Bennett E M, Cumming G S, Peterson G D. A systems model approach to determining resilience surrogates for case studies. *Ecosystems*, 2005, 8: 945—957.
- [50] Buckle P, Graham M, Smale S. Assessing resilience and vulnerability. Principles, strategies and actions. Emergency Management Australia, Department of Defense Project, 2001, 15.
- [51] Miller F, Thomalla F, Rochstr m J. Paths to sustainable recovery after the Tsunami. *Sustainable Development Update*, 2005, 5(1).
- [52] Mirza M M Q. Climate change and extreme weather events: can developing countries adapt? *Climate Policy*, 2003, 3: 233—248.
- [53] Huq S, Karim Z, Asaduzzaman M, *et al.* Vulnerability and adaptation to climate change in Bangladesh. Netherlands: Kluwer Academic Publisher, 1999. 21—38.
- [54] Holling C S. From complex regions to complex world. *Ecology and Society*, 2004, 9(1): 23—33.
- [55] Folke C, Carpenter S, Elmqvist T, *et al.* Resilience and sustainable development: building adaptive capacity in a world of transformations. Scientific Background Paper on Resilience for the process of the World Summit on Sustainable Development on behalf of The Environmental Advisory Council to the Swedish Government, 2002.
- [56] Liu J, Shi P J, Ge Y, *et al.* The review of disaster resilience research. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(2):211—218.
- [57] Brian H Walker, John M Anderies, Ann P Kinzig, *et al.* Exploring resilience in social-ecological systems through comparative studies and theory development: Introduction to the special issue. *Ecology and Society*, 2006, 11(1):12.

参考文献:

- [2] 马世骏. 社会-经济-自然复合生态系统. *生态学报*, 1984, 4(1):1~9.
- [3] 赵景柱, 欧阳志云, 吴钢. 社会-经济-自然复合系统可持续发展研究. 北京: 中国环境科学出版社, 1999.
- [4] 符淙斌, 董文杰, 温刚, 等. 全球变化的区域和相应. *气象学报*, 2003, 61(2): 4~10.
- [5] 叶笃正, 符淙斌. 全球变化科学领域的若干研究进展. *中国科学院院刊*, 2004, 19(5): 336~341.
- [56] 刘婧, 史培军, 葛怡, 等. 灾害恢复力研究进展综述. *地球科学进展*, 2006, 21(2): 211~218.