

经济金融中的自组织临界性

曹雪薇 熊婉婷 王有贵

DOI:10.13405/j.cnki.xdwz.2015.03.012 (北京师范大学系统科学学院 100875)

复杂性科学在最近二三十年取得了突破性进展,目前从这个学科中发展起来的许多范式和方法都已经渗透到多门传统学科并与其不断融合促成了各种门类的交叉学科和方向。其中自组织临界性就是复杂性科学领域发展出来的一种独特方法,也是理论物理学家对理解复杂系统的一般规律的一个最重要的贡献。在理解和解释由大量个体通过相互作用所导致的复杂系统时空长程相关特性问题上,自组织临界性理论提供了一种非常新颖和通用的机制方法,其应用领域涵盖了物理学、地学、生物学、经济学等多门学科以及它们的交叉方向。本文重点介绍自组织临界模型在经济金融系统中的可能应用及其发展前景。

一、自组织临界概述

我们所面对的自然世界和社会系统一般都是由大量微小单元通过一些特定的相互作用联结而成的。这类系统尽管内部组分各式各样,相互作用方式也五花八门,但在一些关键内生因素的相互作用下,这些独立组分往往会自发地组织到一个看似复杂却拥有统一的时间演化模式和空间结构特征的状态。尽管演化过程的具体细节各有不同,但其整体的趋势在不同尺度上都呈现出相似的时空结构,其中最具代表性的案例是 $1/f$ 噪声和幂律分布。所谓 $1/f$ 噪声就是像闪烁的烛光那样复杂而又有趣的音频信号,它在各个频率 f 上的数量按照 $1/f$ 规律分布。幂律分布就是事件发生的频度与其规模呈现出一种简单的幂次反比关系,就是小的事件经常发生但是大的事件却偶尔发生。这样的时空结构符合分形学中对于不同尺度下的自相似性的描述,因此也被称为分形特征。长期以来,这种在不同系统内部普遍存在的幂律分布和自相似特性引起了来自各个领域的研究者的共同关注。为了抛开纷繁多样的具体表象,找到复杂现象背后共有的简单机理,学者们相继提出了一系列理论和方法,其中,自组织临界性的发现和自组织临界理论的提出就是对复杂性

科学的重要贡献。

在1987年《物理评论快报》上发表的一篇文章中,丹麦物理学家帕·巴克(Per Bak)和他的同事首次提出了自组织临界性(SOC)这一概念。在这篇文章中所提出的沙堆模型成为了展示复杂系统中自组织临界性的经典案例。如图1所示,在一个平面上持续不断地注入沙粒,随着沙粒缓慢地注入,起初平缓的沙堆会变得越来越高,不时有少量的沙粒则沿着沙堆滑动。随着沙堆坡度的增加,一个微小沙粒的注入所引起的滑动将会变大,甚至沙堆的大部分可能会连续崩塌,表现为大面积的雪崩现象。最终,在一段时间内进入沙堆系统的沙粒数量和崩塌离开平面的沙粒数量平均意义上大致相等,沙堆将不再持续增长,而是保持在一个间歇性崩塌的非平衡状态上。由于在这个状态上沙堆的崩塌规模满足幂律分布,崩塌发生的时间间隔又具有分形特性,这些特性与冰在零度时化成水这类物质状态转换时的相变特性非常相近,因此称之为临界态。又因为这个状态并不是像冰变成液态水是通过

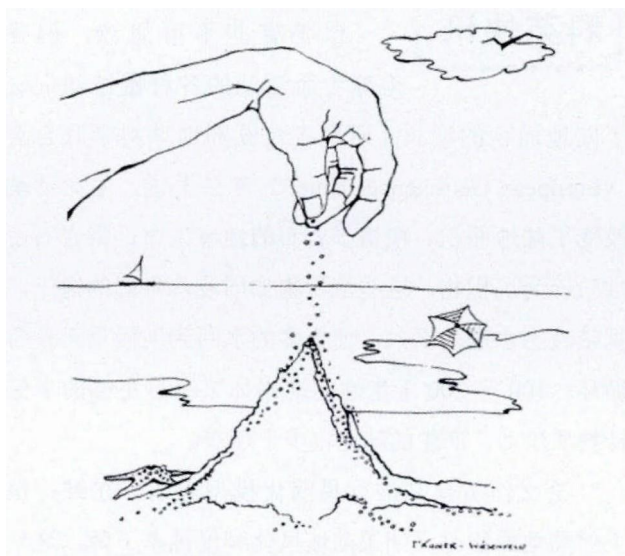


图1 沙堆模型示意图

(引自: Bak P. How nature works: the science of self-organized criticality[M]. New York: Springer-Verlag, 1996.)

调节温度这个参数而得到的，却是通过系统的自组织的形式自发地演化出来的，于是称之为自组织临界态。尽管后来发展起来的各类自组织临界模型在机制设置上各具特色，以至于迄今发生自组织的必要条件还不明确，但是自组织临界产生的过程拥有共同的特征，那就是缓慢均匀的粒子注入逐渐积累最终会达到某一临界状态，导致雪崩式的粒子流出。

巴克提出自组织临界这个概念最初的企图是要解释为什么时间效应上的 $1/f$ 规律和空间结构上的不同标度的自相似特性普遍存在，但随着自组织临界性理论应用在解释地震、森林火灾、生物演化等现象的非凡成功，它被看作是迄今为止可以解释复杂性为何产生的一般机制的唯一理论。巴克也因此成为复杂性科学中具有广泛影响力的理论物理学家。随着不同类型自组织临界性模型的相继提出，对这一概念的发展和应用，已经拓展到了城市化、脑认知、经济组织和管理等更为广泛的领域，对于这些系统的研究反过来也促进了人们对这一概念更进一步的准确把握和理解。关于自组织临界这一概念的发展历程和相关应用可以参见华中师范大学出版社出版的帕·巴克所著并由李炜和蔡勖翻译的《大自然如何工作》一书。

由于其理论构架的简洁性和应用的普适性，自组织临界性理论得到了来自各个领域的普遍关注和高频引用。这个话题目前最主要的研究方向有：（1）各种模型变种和可能的应用，比如地震、野外火灾、太阳耀斑、宇宙结构、物种演化、神经雪崩等；（2）临界动力学空间结构的拓展，如探讨各种网络结构上的自组织临界现象；（3）对于各类自组织临界现象分析严格的数学化；（4）自组织临界状态的控制和预测等。所有这些研究大都集中在自然科学领域，与此对比，自组织临界性在社会科学尤其在经济学的应用仍然处于萌芽阶段，并未得到广泛关注。其实，经济系统具有自组织临界理论所关注的复杂系统的一切典型特征，尤其是经济学家们最关心的经济波动、信贷周期和金融危机等现象都和自组织临界理论所描述的系统演化特性有极强的类似性。因此，如何用自组织临界理论来理解和解释经济金融波动成为交叉领域的研究者们应该重点关注并且大有前景的研究方向。

二、沙堆模型和自组织临界发生条件

为了更好地展示沙堆中的自组织临界态产生的过程，需要做一个理想化的假设，即假设每一粒沙都是大小为 1 的立方体，这样沙粒之间能够完美的结合到一起。我们将沙粒一个接着一个缓慢均匀地添加到一个具有边界的 2 维晶格上，每一个晶格都有一个坐标 (x, y) ，而定义 $z(x, y)$ 表示位于 (x, y) 位置上的沙粒个数。这个模型运行的简要程序如下：

步骤 1：设定晶格平面大小 L （即 $1 \leq x \leq L$ ， $1 \leq y \leq L$ ）和临界值 z_c ；

步骤 2：随机选取一个格子 (x, y) ，将格子高度增加 1。即 $z(x, y) \rightarrow z(x, y) + 1$ ；

步骤 3：如果某一个格子出现 $z(x, y) > z_c$ ，则发生一次崩塌，即这个格子的沙粒数目一次性减少 4 个，其周边 4 个邻居每个格子的高度都增加 1 个，即

$$\begin{cases} z(x, y) \rightarrow z(x, y) - 4, \\ z(x+1, y) \rightarrow z(x+1, y) + 1, \\ z(x-1, y) \rightarrow z(x-1, y) + 1, \\ z(x, y+1) \rightarrow z(x, y+1) + 1, \\ z(x, y-1) \rightarrow z(x, y-1) + 1. \end{cases}$$

继续步骤 3 判断相邻格子是否连带出现崩塌现象，直到对于任意的 x 和 y 都满足 $z(x, y) \leq z_c$ 时，即这一递归过程一直要进行到系统中的每一个格子都不会崩塌才会转至步骤 2。

我们对上述过程所描述的沙堆模型进行计算机模拟，其自组织的过程可以用沙粒总数的变化反映出来。如图 2 所示，从计算结果我们可以看到，随着沙堆的不断加入，当沙粒总数超过了一定水平后，整个系统自组织达到了一个临界状态，在这样的状态下，沙粒的总量总是不规则地起起伏伏。经统计分析发现在临界态下崩塌规模遵从幂律分布，而在频谱上表现出了 $1/f$ 噪声的性质。

由上述沙堆模型的结果可以看出，在一个开放的系统中，粒子的注入是持续的、缓慢的、均匀的；而与之相对，粒子的耗散是瞬时的、雪崩式的，这类广延的耗散系统能够自发地演进到一个临界状态，在这种状态下，一个微小的改变就可能触发较大并且连续的雪崩事件。

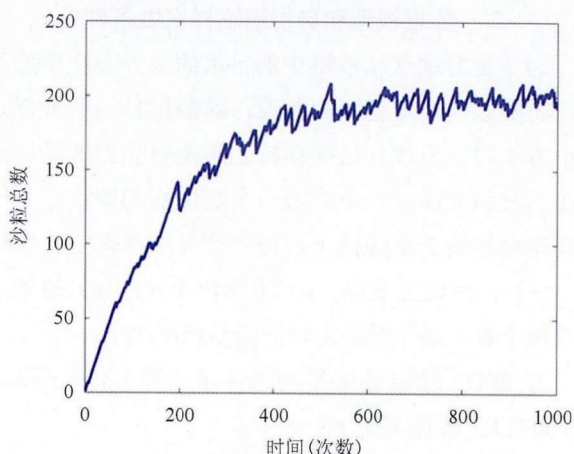


图2 沙堆模型模拟实验中沙粒总数随时间的变化

三、经济波动与自组织临界性

资本主义经济的演化可以描述成这样一个过程：总产出在持续地增加的同时总是伴随着幅度不一但永不停歇的经济波动。在经济学界关于经济波动究竟从何而来是一个长期争议的话题。主流经济学认为经济波动的源头是外生的技术扰动，我们看到的波动现象不过是众多个体对这些扰动的理性回应的结果。该理论的问题在于它需要存在负面的技术冲击，实际上我们无法在现实经济中看到这样的冲击。而对经济波动的另外一种解释则强调经济系统具备一些内在的动力学特性，在没有外部冲击的情况下，经济变量也会产生持续波动并存在与混沌相关的奇异吸引子。按照这个理论可以断定这个扰动理应是随机行走运动，但在经济数据的时间序列分析中我们观察到的却是扰动规模呈现幂律分布形式。

的确，现实经济体系中各个部门之间的相互关联结构极其复杂，而要理解经济各主体或部门之间的相关性需要构建一个简单模型，使经济各主体之间能够通过内生因素自组织演化到了一个远离平衡的临界态。1992年巴克、陈侃和两位经济学家合作首次将自组织临界性理论引入到对经济波动的分析中来，为了满足自组织临界性的几个特性，他们将生产链设计成一个网络晶格，考察来自总需求的冲击会对整个生产系统造成怎样的影响。

如图3所示，每一个点位代表一个生产商，其颜色对应这个生产商的库存状况，黑色实心点表示该生产商库存一单位商品，白色空心点表示该生产商没有存货。在他们设计的网络晶格中，每一行代表一个生产层级，其中每个生产商都从下一层的两个生产商那

里购买他们所需要的原料，如果下层的生产商有存货则立即提供一个产品，若没有他则还需向下一层的两个生产商去订购原料。

假定图3中箭头所指的点(1,4)代表的最终产品生产商在 $t=0$ 时刻接到一个订单，由于他当前是一个白色空心点，即没有存货，因此他必须向位于下一层的两个邻居(2,3)和(2,4)各订一个单位的中间产品。由于这两个点也是空心的，因此这两个生产商不能立即供货，都不得不向更下一层的3个生产商订货。原来没有存货的都不要要为订货商生产1个单位产品，还要多生产1个作为自己的库存，原来有存货的直接供货而无需再组织生产，因此白色点接到订单会向下层发出订单，并变成黑色，而黑色点接到订单直接供货不发出订单，变成白色。如图3下面的图形所示，在初始单一订单的冲击下，引发了一系列链式反应，反应区域由图中的不规则六边形给出，对比上图和下图可以看出，其中各点的颜色都是依次发生了黑白转换的结果。第7层居于六边形之中的两个点原来都是有存货的，因此他们从原来的黑色变成了白色，并且不再向下层发出订单，链式反应在这里终止。从下图可以看出，在整个链式反应中总共有8个供应商(六边形中的8个黑点)需要生产才能满足订单需求，而每个供应商实际生产了2个单位产品，因此生产总量是16。

这个生产链的雪崩过程也如同沙堆模型一样，当

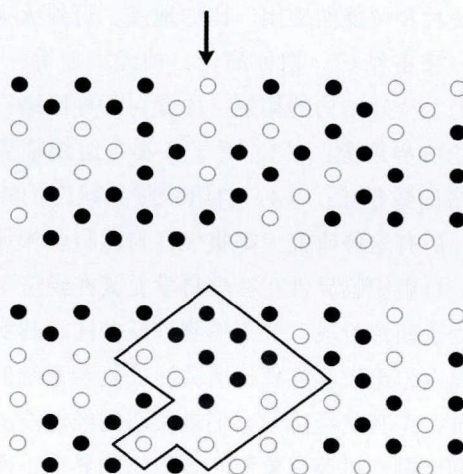


图3 冲击后各个企业之间生产链反应示意图^① (此图改编自: Bak P, Kan Chen, José A. Scheinkman, M. Woodford Self-Organized Criticality and Fluctuations in Economics, SFI WORKING PAPER: 1992-04-018)

我们关注总产出量随时间的变化曲线时，也会发现这个体系同样通过自组织达到一个临界态。

在对于经济波动产生的机制进行理论探讨的同时，也有一些学者对经济波动的事实和数据进行研究，这些工作对于经济波动的理解给出了重要的启示。英国经济学家保罗·奥默罗德（Paul Ormerod）等学者对多个国家很长一段时间的人均 GDP 数据进行了一系列分析，实证结果都表明无论是紧缩期还是扩张期其持续时间的分布都展示出幂律特性。图 4 是对经合组织（OECD）国家的真实季度 GDP 数据进行分析给出的分布结果，紧缩期和扩张期的持续时间的频度分布在双对数坐标都近似是一条直线，说明经济中实际产出在时间尺度上的无标度特性。

一般来讲，一个经济体包含很多相互影响的产业。在不同的结构以及 / 或者技术水平下，这些产业的生产力将会不同。假设生产力最低的产业进行创新以提高其存活可能性，那么一些其他与该产业紧密相关的产业则必须针对这一创新进行相应调整。这种级联式的变化将会累积并导致一系列变化。因此我们可以认为经济波动性是一连串产业创新导致的结果，这恰恰是描述生物适应性进化的 Bak-Sneppen 模型所描述的组织自组织临界过程。

于是，我们建立了一个二维的 Bak-Sneppen 模型来再现历史数据显示的统计模式。模型构建如下：经济体由 $K \times K$ 个产业组成。对每个产业我们用适应度来表示其生产力水平。我们用所有产业的平均适应度来衡量整个经济体的表现。这些产业分布在一个具有周期性边界的二维网络上。每个产业与其相连周边的产业相互影响。初始时，我们最初以随机数给每个产业的适应度赋值，于是经济体在一个不连续的时间内进行演化。每一个时间步长内，我们将给适应度最低的产业赋予一个新的随机数。一般来讲，因为给适应度最低的产业赋予新的适应度值时，即意味着该产业通过创新来提高自身的适应度。同时，该产业的 4 个邻居产业也会相应获得新的随机赋值，即单个产业的创新将影响其周边产业的适应度。然而，对于给定的邻居产业而言，新的适应度水平导致其适应度增加和减少的可能性是相同的。创新本身对引进创新的产业将会产生正面影响，而对和该产业相似的竞争产业而言它将产生负面影响。

通过对这个模型进行计算机模拟，得到的结果如

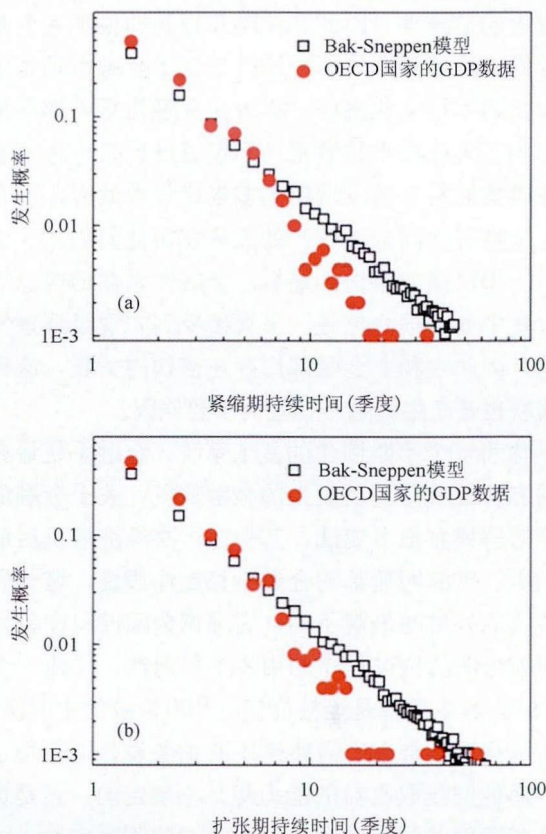


图 4 由 Bak-Sneppen 模型和 OECD 数据得到的紧缩期和扩张期持续时间的幂律分布特性的比较。（引自：N. Xi, P. Ormerod, Y. Wang. Technological innovation, business cycles and self-organized criticality in market economies[J]. EPL 97(6): 68005 (2012).）

图 4 所示，紧缩期和扩张期持续时间的频度分布都具有幂律特性。从图 4 我们可以看出模型所得出的分布与经合组织数据集给出的前 6 个点的结果十分相似，表明二者符合的很好^②。

四、金融危机与自组织临界性

在自然科学领域中得到广泛成功应用的自组织临界理论不仅可以用来解释经济周期和波动，我们相信它也能够解释金融危机与政策应对上做出独特的贡献。

金融系统自身的结构具有复杂系统的典型特征，金融系统的复杂性体现在其由大量个体组成，并且个体之间的连接方式以及相互作用极其复杂多样。首先，随着金融创新和金融深化的发展，金融系统呈现出机构和产品的多样性，并具有一定的层级结构。这样的结构促成了很多类别的正反馈环路，一旦受到内部或者外部冲击，就会通过体系内部的反馈环逐级放大。其次，金融市场的参与者在对市场运行的理念上、对信息的获取和解读上、对未来的预测和预期上都表现

出很大的差异性，因此其策略和行为的根基完全是异质性的。这种预期的不一致性造就了金融市场处于跌宕起伏的不稳定状态中。再者，金融体系内部主体之间的相互关联越来越紧密，不仅通过反映金融本质的债务链条而易于触发倒闭的多米诺骨牌效应，还有通过大量持有共同金融资产的关联使得他们陷入一荣俱荣、一损俱损的境地。最后，金融体系在形成总需求的过程中处于核心位置，又直接受到宏观经济景气的影响，因此它和非金融部门存在密切的关联，这种宏观关联也是产生金融不稳定的重要原因。

作为一个不断演化的复杂系统，金融系统最典型的动态特征就是反复发生的金融危机。关于金融危机成因的解释有很多说法，其中在本次经济危机后最为人们所认可的明斯基的金融不稳定性假说。这一假说与传统的外生冲击观不同，它强调金融部门在包含创造和毁灭的信贷过程中的内生不稳定性。任何一个金融机构，其本质都是连接借贷者和出资者的中间媒介。明斯基强调借贷者所需要偿还的债务量是一个稳定流量，而他们获取收益的能力却是不确定的。正是这种资产和负债的强关联和负债者收益的不确定性，才是造成金融危机的根本原因。

具体而言，当金融体系的债务量相对不多的时候，负债者一般都有较好的收益，使得他们偿还债务的承诺基本都能够得以实现，因此信贷部门的业绩也是可观的。于是，为了追求高回报，更多的信贷被创造出来，加速了信贷扩张并进一步提高了投资者的收益。在乐观预期的驱动下，借贷者和信贷部门都倾向于冒险，投资出现一定的盲目性，同时信贷标准也不断放宽，导致债务质量普遍下降。这种下降最初反而会造就更多的货币量和更多的流动性，但在这种情形下它们往往直接进入资产市场而不是实体经济，推高了资产价格并形成了资产泡沫。“兴旺”的资产市场反过来再进一步带动投机的盛行，使得杠杆率不断升高，越来越多的金融机构超越了其信用边界，而且由于其内部关联愈发紧密，此时金融体系已经进入一个随时暴发的临界状态。一旦某一种负面冲击触发了金融市场，一个连续的破产事件就会发生。最初也许是资产市场价格跳水，触发人们因恐慌而纷纷抛售，造成纸面财富大幅缩水。银行和金融部门通过债务链条和资产关联，净资产急剧塌缩甚至为负，使得它们对外信贷能力减少，甚至提前收回贷款进行清偿，由此导致信贷

总量急速减少，最终造成了总需求下降。同时企业遭受总需求的负面冲击，有的立即破产，无法偿还已有的债务，余下的也对未来信心不足不再愿意扩大投资，进一步恶化危机。

基于这些事实，我们不难发现，金融危机与自组织临界现象具有极高的相似性：它们都是由多个主体通过自发的相互作用内生导致的特殊波动现象。金融危机的酝酿过程可看作是一个债务风险的逐渐累积的相对稳定过程，而它的暴发和扩散则却是风险累积到某一个临界态后自发出现的一个不稳定的崩塌过程。因此，金融危机可以理解作为一种典型的自组织临界事件。正像沙堆模型那样，金融危机中的相变发生也是因为企业和金融机构都存在信用阈值和破产条件。当债务链条或者资产关联把相当多的临近破产边缘的金融主体连接起来的时候，其中一个单个主体破产，就会通过债务链条波及并伤害到与其连接的主体，从而可能引发一系列破产的级联反应。

因此，我们认为，应用自组织临界理论来解释金融危机具有合理的逻辑联系和科学依据。特别是当我们希望找到应对金融危机的解决方案时，自组织临界理论可以帮助我们判断在金融崩塌来临之前，我们是否能够通过调节金融机构的破产阈值的大小来控制相变的临界条件从而推迟和延缓崩塌的发生，进而达到避免泡沫破灭的目的。我们还可以进一步探究如何通过改善债务质量来消除金融体系内的隐患，甚至从根本上杜绝金融危机的发生。

五、结束语

综上所述，自组织临界性理论不仅在自然科学领域有其应用的空间，同样对于理解经济和金融系统也有非常重要的帮助，特别是在解释经济波动和金融危机方面有着非常大的潜力。经济周期无论是时间维度和波动尺度都显示了标度不变的特性，需要从自组织临界性的视角和框架建立起特定的理论模型予以解释。同时，利用自组织临界理论来审视金融危机，可以帮助我们更好地理解金融危机的成因，并且更加科学地寻找应对金融危机的最佳方案。

①图3中加上一个不规则多边形只是突出链式反应所涉及的点。

②数据给出的分布中的前六个点，尽管与后面点的数量之比并不大，其实它们包含了所有数据量的90%，因此可以认为与模型结果相符。