

# 流行病传播自组织临界性模型适用性探讨<sup>\*</sup>

姚 冶<sup>1</sup>, 姚令侃<sup>2</sup>

(1. 西南交通大学 材料科学与工程学院, 四川 成都 610031;

2. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031)

**摘 要:** 自组织临界状态(SOC)理论已被用于解释地震、森林火灾、恐龙灭绝等灾难性事件, 将 SOC 引入流行病传播模型的研究也是很有前景的方向, 但必须明确 SOC 在该领域的适用条件。首先对 SOC 系统的基本性质与流行病传播特征进行了对比分析, 提出对各类流行病的传播过程而言, 人类社会已经演化到了小事件引起的连锁反应可能导致一场大灾难的临界状态, 具有近距离接触的传染方式是应用 SOC 模型的控制条件; 然后通过以非典型性肺炎(SARS)病毒(2002~2004 年)为范例的研究, 发现流行病的传播仅在未经人为强力干预阶段才具有 SOC 效应; 最后在 SOC 的概念框架下对流行病防治对策进行了讨论。

**关键词:** 流行病; 自组织临界状态; 适用性; 非典型性肺炎

**中图分类号:** R181.2<sup>+</sup>2    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1000-811X(2008)04-0020-04

## 0 引言

为了对流行病进行预报, 建立具有确定演化法则的流行病传播的演化模型已成为研究的热点。流行病传播具有高维性、复杂性、开放性、动态性以及非线性等特点。自组织临界状态(Self-organized Criticality)理论是当代非线性物理学中的最新成果, 近年来用自组织临界状态(SOC)研究疾病传播机制的研究也有见报道。如 Hans-Martin Boker 等<sup>[1]</sup>研究了借鉴杂草模型引入的、不考虑免疫情况的流行病传播模型。与定向渗流模型不同的是, 这个模型没有把感染率或康复率作为控制参量, 而是通过除去多余的杂草来直接控制杂草的总数量保持不变, 结果发现控制对象的变化导致模型中产生了 SOC 效应; 又如张培培<sup>[2]</sup>等研究了 *Apis melliferacapensis* (AMC) 蜂侵入正常的 *A. M. Scutellata* (AMS) 蜂造成破坏的机制, 这种 AMC 蜂在正常蜂群中的失控的自复制行为可能与一些强传染性流行病的传播机制相似, 文中用一个原胞自动机模型对破坏过程进行模拟, 说明了这种破坏可以对应于一个逾渗相变, 并且是一种自组织临界现象; 此外还有用 SOC 描述麻疹等传

染性疾病的传播现象、用沙堆模型模拟流行病中的非平衡相变等报导<sup>[3]</sup>。

SOC 理论是 Per Bak 等人为解释无序的、非线性复杂系统的行为特征提出的新概念<sup>[4]</sup>。这类系统包含着众多的发生短程相互作用的组元, 并自发地向着一种临界状态进化。在临界状态下小事件引起的连锁反应可能对系统中大量数目的组元发生影响, 从而导致大规模事件的发生, 这时所有的时空关联函数都是幂次(Power-law)的, 故幂律可以作为自组织临界状态(SOC)的证据。沙堆模型是 SOC 的范例, 处于临界坡度的沙堆, 对新添加沙粒的响应是无法预测的, 沙粒可能固定在沙堆上、也可能引起小范围沙粒的滑动、还可能导致更大规模的崩塌, 但崩塌规模与发生频率与幂律相符<sup>[5]</sup>。

SOC 的概念已被用于解释地震、森林火灾、恐龙灭绝等灾难性事件。但在目前利用 SOC 研究疾病传播机制的有关工作中, 多为范例性的探讨, 缺乏对 SOC 理论建立流行病传播模型普适性条件的论述。本文即从 SOC 的原始定义和流行病传播特点出发, 探索 SOC 理论在流行病研究领域的适用范围、以及呈现 SOC 效应的流行病传播性质等基本问题。

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2008-02-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(50478085); 西南交通大学 SRTP 科研训练计划项目(070101)

作者简介: 姚冶(1985-), 女, 四川成都人, 博士研究生, 主要从事生物医学工程研究. E-mail: yaoye@home.swjtu.edu.cn

## 1 自组织临界性系统的基本性质与流行病传播特征

SOC 系统应具有的基本性质是<sup>[6]</sup>:

(1) 系统自发地朝着临界状态进化, 并将会永久性地或起码在一个有意义的时段内被锁定在这个状态。

(2) 系统是耗散的, 包含大量(数目应在数百万个以上)发生短程相互作用的组元; 大量自由度以某种均衡态势存在, 不出现优势自由度而使系统仅由几个集体自由度来表征的现象。

(3) 组元之间是一种最近邻位置的相互作用, 但存在着长程相关关系。

具有以上性质的系统, 所有的时空关联函数都应是幂次的。故幂律可以作为 SOC 的判据。

系统自发地朝着临界状态进化, 一旦到达就会被永久性地(或起码在一个有意义的时段内)被锁定在这个状态, 即临界状态是 SOC 系统的总体性质。从历史上来看, 流行病的爆发和蔓延与人类生活环境改变密切相关。据考古学家考证, 在人类还处于原始的狩猎和采集生产阶段。流行病是几乎不存在的。大约 1 万年前人类进入农耕文明时代后, 人类开始大规模开垦农田并驯养动物, 微生物生态环境发生变化, 导致细菌变异, 流行病也开始蔓延。如公元前 431 年在希腊南部肆虐的瘟疫导致了其人口 1/4 的死亡, 公元 165 ~ 180 年间罗马帝国发生的黑死病瘟疫在 15 年内导致罗马帝国本土 1/3 的人口死亡, 1347 年欧洲爆发的鼠疫导致了欧洲境内很多地方 1/3 甚至 1/2 的人口死亡。随着人类对环境的进一步开发和破坏, 这种情况越演越烈。据 2007 年 8 月世界卫生组织 (WHO) 发布的一份名为《2007 年世界卫生报告—构建安全未来: 21 世纪全球公共卫生安全》的年度报告指出, 过去 5 年, 各类流行病爆发和流行已超过 1 100 多起。人类在征服流行病的过程中, 病菌也在不断变异繁殖, 在旧病毒被征服的过程中, 新流行病正以每年 1 ~ 2 种的“惊人速度”出现, 过去 20 多年来, 世界各地至少出现了 30 多种新的流行病, 如艾滋病、埃博拉病毒、尼巴病毒; 与此同时, 旧传染病也改头换面, 卷土重来。所以我们有理由认为, 人类社会已经演化到了大规模流行病随时都可能发生的一种临界状态, 这是对各种流行病而言都具有的公共背景。

一个复杂的动力学系统, 在特定条件下会发

生“维数降低”而仅剩几个集体自由度的自组织现象。这是由于系统内部诸要素间协同和竞争而造成的有序化结果。但是, 在自然界中, 还存在着一大类既复杂又有序的系统, 其有序状态无法用少数集体自由度来描述, 也不能用相变理论的平均场理论来处理。这类系统的要素无法保持着十分协调的关联, 大量的自由度以某种均衡态势存在, 不出现优势自由度而使系统仅有几个集体自由度来表征的现象。这也就是组织成 SOC 的基本要求。

流行病在人群的传播过程中, 当接触到感染源时, 每个个体都可能具有以下状态:

(1) 个体被病原体接触但不致病;

(2) 个体被病原体接触且患病, 但不将该病传染给他人;

(3) 个体被病原体接触且患病, 并将该病传染给他人。

这就意味着每个个体起码具有 3 种状态, 每一种状态叫作一个“自由度”, 对千百万人群而言就具有无穷多的自由度。一般而言, 每个个体都面临着这种传染性消失与传染性分岔的选择, 但从逻辑上看, 仅当人类群体传染性消失与传染性分岔的概率在总体上平衡时, 人类才可能具有在多次大规模流行病侵蚀下仍能存活至今的所谓鲁棒性。因此我们认为在流行病传播时不存在优势自由度的条件对目前所知的构成威胁的流行病都应是适宜的。

组元之间是一种最近邻位置的相互作用, 但存在着由于链式反应体现的长程相关关系, 是 SOC 系统组元间作用的重要性质。对流行病而言这就意味着只有人与人之间的近距离接触的传染方式才符合这种作用规则。显然这种规则不能覆盖所有流行病, 如对于某些以受感染的动物作为传染源的流行病, 个体之间不具有近邻间直接的相互作用, 能否应用 SOC 理论还有待研究。

综上所述, 对各类流行病的传播过程而言, 在 SOC 的基本条件中, 仅流行病的传播方式应符合组元之间是一种最近邻位置的相互作用这一条具有控制性外, 其它条件均不构成约束。

## 2 外部环境对流行病传播中 SOC 效应的影响

SOC 系统演化到复杂的临界态时应该没有受到任何的外界作用, 其动力学特性是系统自组

织的结果，而非在外部强制力下的表现。在流行病的传播过程中，当然会受到自然因素和社会因素对流行过程的影响。自然因素主要为地理因素和气候因素，直接作用于流行过程，影响流行病的流行，造成较为严格的季节性和地区性；社会因素包括社会制度，居住条件，卫生设施，防疫工作，劳动条件等。这里我们仅以 SARS 为例，就人工干预对 SOC 效应的影响进行讨论。

SARS 具有人与人之间近距离接触的传染方式，但 SARS 疫情的发展，特别是后期，是一种社会过程，不同于相对简单的物理过程。根据 SARS 的流行受人工干预程度的不同，我们将 SARS 的流行分为前后两个阶段进行研究：第一阶段为 2002/2003 年、第二阶段为 2003/2004 年。两个阶段 SARS 流行状况数据见表 1、表 2<sup>[7]</sup>。

表 1 2002/2003 年世界各地报告 SARS 病例数及构成比 (该地病例数/全世界病例数)

国家或地区	病例数/例	构成比/%
澳大利亚	5	0.059 3
巴西	1	0.011 9
加拿大	250	2.963 1
中国	5 327	63.138 6
中国香港	1 755	20.801 2
中国澳门	1	0.011 9
中国台湾	671	7.953 1
芬兰	1	0.011 9
法国	7	0.083 0
德国	10	0.118 5
印度	3	0.035 6
印度尼西亚	2	0.023 7
意大利	4	0.047 4
科威特	1	0.011 9
马来西亚	5	0.059 3
蒙古	9	0.106 7
新西兰	1	0.011 9
菲律宾	14	0.165 9
爱尔兰	1	0.011 9
韩国	3	0.035 6
罗马尼亚	1	0.011 9
俄罗斯联邦	1	0.011 9
新加坡	206	2.441 6
南非	1	0.011 9
西班牙	1	0.011 9
瑞典	3	0.035 6
瑞士	1	0.011 9
泰国	9	0.106 7
英国	4	0.047 4
美国	75	0.888 9
越南	63	0.746 7
合计	8437	100.000 0

表 2 2003/2004 年世界各地 SARS 累计病例数及构成比 (该地病例数/全世界病例数)

国家或地区	病例数/例	构成比/%
新加坡	1	6.25
中国台湾	1	6.25
中国广东	5	31.25
中国北京	7	43.75
中国安徽	2	12.50
合计	16	100.00

资料显示出第一阶段的 SARS 病毒虽呈全球性分布，但具有极强的聚集性。SARS 在短短的几个月时间内，波及 31 个国家或地区，在世界发生的 8 437 例患者中，中国、中国香港、中国台湾、加拿大、新加坡共发生 8 209 例，占 97.30%。我们还发现，从世界各国的 SARS 病例数及构成比可以看出，SARS 的传播与各地的人口基数等并无必然的联系。于是我们认为可将某国或地区的 SARS 病例数，视为“沙堆”在扰动下的一次反应过程。这样根据表 1 的数据，若令  $X$  为各国或地区 SARS 病例数， $N$  为病例数大于  $X$  的各国或地区数目，通过回归分析，可得  $X$  与  $N$  之间的关系式如下：

$$\ln(N(>X)) = 3.112 - 0.374 \ln X,$$

样本相关系数  $r_{xy} = 0.983$ 。

即  $N(>X) \propto X^{-b}$ ， $b = 0.374$ 。

通过对第一阶段各国或地区 SARS 病例数的统计分析，病例数与出现频率的关系中确实存在着明显的大者少、中者次之而小者居多这样的负幂律特征。

在 SARS 开始蔓延、肆虐之际，人类对这种新的流行病的认识几乎是空白，未能采取有效的应对措施。SARS 的传播基本上是在自组织作用下的一种物理过程，其传播方式主要通过人与人之间近距离空气飞沫、接触病人分泌物、排泄物传播。根据病例数与出现频率的关系服从负幂率关系的判据，表明第一阶段的传播过程具有 SOC 效应。在第二阶段，人类社会不断努力抗击遏制其传播扩散，从最初的仓促应对到逐渐全民动员，综合部署，多层次多战线进行“危机应对”，SARS 流行病更多的体现为一种社会过程。其传播方式是以实验室作为主要传播途径，其次才为自然环境条件下感染。通过人为的强力干预，SARS 在全球一度嚣张的扩散势头得到了有效的遏制，SOC 模型已不适用于描述第二阶段的 SARS 的传播过程。

3 结束语

(1) 流行病传播是一个开放的动态的复杂的非

线性系统, 针对这类系统的控制与管理, 无论采用经典的理论, 还是传统的技术, 都遇到了困难。SOC 是当代非线性物理学中的最新成果, 在 SOC 的概念框架下从整体理论上解释流行病传播的普适性动力学特征, 应该是很有前景的方向。但在应用中首先应注意 SOC 的应用条件。如前面所讨论的不具有人与人之间近距离接触的传染方式、以及传播过程中外部强制力已大于系统自组织能力的阶段, SOC 模型都不适用。

(2) 当已能判断某种流行病符合 SOC 的定义时, 根据普适性原理, 就可以利用各式各样显示 SOC 的模型中具有规律性的普适性的经验, 用于该流行病传播规律和防治对策的研究。例如 SOC 理论认为许多复合系统自然地朝着一种临界状态进化, 在临界状态下, 小事件能引发任何规模的连锁反应, 包括灾难性的大事件。这一理论的启示是小事件和大事件可能有相同的起因, 也就说灾难性的大规模流行病事件和不为人们所重视的小规模流行病事件都遵从同样的动力学, 这就为我们研究不同规模的流行病提供了方法论。又如根据 SOC 的理论, 大规模事件都是由链式反应所引起, 那么设法切断这种“链式反应”, 从而防止多米若骨牌效应也是值得贯彻的理念。在应对 SARS 的措施中, 虽然人类目前还未能生产出抵抗

SARS 的疫苗, 但若采取严格隔离方法, 从而控制或切断链式反应, 就能达到阻止该类流行病蔓延的目的。这也是在第二阶段的 SARS 防治对策的主要措施之一, 事实证明是极为有效的。

**致谢:** 黄楠教授对本文工作给予了热情的帮助和指教, 在此深表谢意!

## 参考文献:

- [1] Broker H M, et al. SOC in a population model with global control [J]. *Physica A*, 1999, (267): 453 - 470.
- [2] 张培培, 苏培培, 许田. 失控自复制导致的社会结构破坏与自组织临界现象[J]. *自然科学进展*, 2004, 14(1): 107 - 110.
- [3] Dickman R. Non - equilibrium phase transition in epidemics and sandpiles [J]. *Physica A*, 2002, (306): 90 - 97.
- [4] Bak P, Chen K. Self - organized criticality [J]. *Scientific American*, 1991, 264(1): 26 - 33.
- [5] Yao Lingkan, Huang Yuan, Lu Yang. Self - organized criticality and its application in the slope disasters under gravity [J]. *Science in China: Ser. E Technological Sciences*, 2003, (46): 20 - 30.
- [6] 姚令侃, 李仕雄, 蒋良滩. 自组织临界性及其在散粒体研究中的应用[J]. *四川大学学报: 工程科学版*, 2003, 35(1): 9 - 14.
- [7] 曾文霞, 戴应基. 2004 年 SARS 流行特征[J]. *现代预防医学*, 2005, 32(10): 1270 - 1272.

# Applicability of Self-organized Criticality in Epidemic Spreading

Yao Ye<sup>1</sup> and Yao Lingkan<sup>2</sup>

(1. College of Material Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. College of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Self-organized criticality (SOC) has been used to explain the dynamics of many catastrophes such as earthquake, forest fire and demise of the dinosaurs. The application of SOC in the modelling of epidemic spreading is very promising, while the applicable condition of SOC in this field is not clear yet. In this paper, first, based on comparing the basic features of SOC system and epidemic spreading, it is suggested that human society has evolved to a critical state that a minor event may start a chain reaction and lead to a catastrophe, and close-distance infection is the control parameter of applying SOC. Then, based on the data of Severe Acute Respiratory Syndrome(SARS) spreading from 2002 to 2004, it is found that epidemic spreading is of SOC features under little human interference, while SOC features are not found under much human interference. Finally, some measures for epidemics prevention are suggested from the principle of SOC.

**Key words:** epidemic; self-organized criticality; applicability; SARS