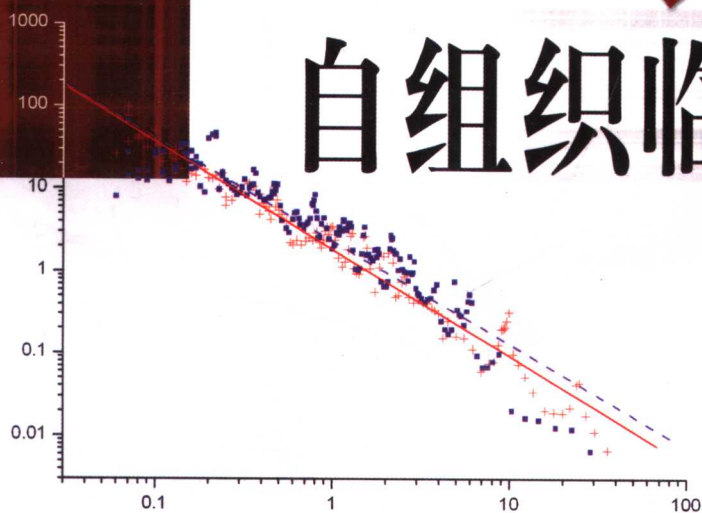


宋卫国 王 健 郑红阳 著

火灾系统的 自组织临界性分析



中国林业出版社

火灾系统的自组织临界性分析

宋卫国 王 健 郑红阳 著

中国林业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

火灾系统的自组织临界性分析/宋卫国, 王健, 郑红阳著.—北京: 中国林业出版社, 2006.12

ISBN 7-5038-4594-5

I.火… II.①宋…②王…③郑… III.森林火-自组织系统-临界-分析 IV.S762

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 136731 号

出版 中国林业出版社 (100009 北京西城区德内大街刘海胡同 7 号)

网址 www.cfph.com.cn

E-mail cfphz@public.bta.net.cn 电话: (010) 66184477

发行 新华书店北京发行所

印刷 北京地质印刷厂

版次 2006 年 12 月第 1 版

印次 2006 年 12 月第 1 次

开本 787mm×1092mm 1/16

印张 7.5

字数 168 千字

印数 1~1500 册

定价 30.00 元

内容简介

火灾系统整体上是一个复杂系统，如何从宏观、整体上认识该系统是火灾防治的重要内容。本书基于森林火灾元胞自动机模型和数据分析，对火灾系统的幂律分布等自组织临界性特性进行了系统阐述，包括经典模型的改进、真实火灾分布特性与模型的对比、火灾发生频率与影响因素的定量关系等，并介绍了其在科学研究上的价值和实际应用的意义。

本书可供从事火灾安全研究、火灾防治和相关领域的科技工作者参考，也可作为火灾安全工程专业研究生教材。

前 言

火灾系统整体是一个涉及自然、社会、经济的复杂系统。对于火灾系统复杂性的基础研究，成为当今火灾科学研究的一个热点。自组织临界性是复杂性科学的重要研究内容之一，由 Bak 等人首先提出，用来描述一个系统自发地演化到一个临界状态，而与系统初始状态无关，也不需要系统参数满足特定的协调关系。当达到自组织临界状态时，系统的“频率—尺度”或者“频率—强度”分布满足幂律关系。已有的研究发现地震、森林火灾等灾害满足较好的幂律分布规律，具有自组织临界性的基本特性。而灾害系统所具有的稳定的幂律分布对灾害防治具有重要的指导意义。

在本书中，作者基于多年来的研究成果，对火灾系统的自组织临界性特性进行了详细阐述。第一章介绍了复杂系统和自组织临界性研究的基本情况。第二章介绍了经典森林火灾元胞自动机模型的框架、规则、模拟结果及其与真实森林火灾系统的对应关系，并分析了森林火灾的分形特性。第三章重点介绍了在经典模型基础上扩展出的森林火灾模型，以及新的模拟计算结果，包括量化综合了真实森林火灾系统的外界因素构造出的更具一般性的森林火灾模型；以密度为控制参数的模型及其特性；森林火灾的有限尺度效应及其与火灾分隔的关系等。第四章研究了森林火灾的相关性分析，分析了几种典型参数对森林火灾发生概率的影响规律，并定量介绍了气象参数、人口密度对森林火灾的影响，阐述了火灾发生频率与影响因素之间的一元相关性和多元相关性以及森林火险预测方法。第五章对城市火灾数据进行了详细的分析，介绍了城市火灾的“频率—损失”分布、Zipf 图及其表现出的幂律分布规律。

本书得到了中国科学技术大学范维澄院士、汪秉宏教授，中国林业科学研究院的舒立福研究员和日本国立消防研究所的 Satoh 博士的指导和帮助，在此对他们表示深深的谢意！感谢火灾科学国家重点实验室的研究生马剑，并感谢所有对本书完成有帮助的人。本书是作者承担的国家重点基础研究发展规划项目（973 项目）（2001CB409600）和国家自然科学基金项目（30400344）研究成果的结晶，在此感谢国家科技部和国家自然科学基金委在研究经费上的大力资助。

由于作者水平有限，时间仓促，错误和疏漏在所难免，敬请读者批评指正！

作 者

2006 年 8 月

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 复杂性科学	(2)
1.2 复杂性与元胞机	(4)
1.3 自组织临界性	(6)
第 2 章 自组织临界性森林火灾模型	(13)
2.1 经典森林火灾模型	(14)
2.2 森林火灾模型的数值模拟	(16)
2.3 真实森林火灾的自组织临界性	(21)
2.4 真实森林火灾系统的分形特性	(27)
第 3 章 更具一般性的森林火灾模型	(30)
3.1 外界因素对自组织临界性的影响	(31)
3.2 森林类型对自组织临界性的影响	(42)
3.3 森林火灾模型的有限尺度效应	(52)
第 4 章 森林火灾的相关性分析	(69)
4.1 森林火灾的相关性分析	(70)
4.2 森林火灾的频率—间隔分布	(75)
4.3 森林火险与气象参数的多元相关分析	(78)
第 5 章 城市火灾自组织临界性研究	(87)
5.1 研究方法与火灾数据	(88)
5.2 火灾系统的“频率—损失”幂律分布	(90)
5.3 葫芦岛市城市火灾分布	(97)
5.4 城市火灾分布的结论	(103)
参考文献	(104)

绪 论

自人类有史以来,火灾就成为危害人类最持久、最剧烈的灾害之一。火灾危害巨大:它不仅毁坏自然资源、破坏生态环境,而且可以造成巨大的生命和财产损失。其负面影响涉及到能源、资源与环境、人口与健康等重要领域。在我国,重大恶性火灾及爆炸事故频繁发生。例如,河南洛阳东都商厦的大火灾一次死亡 309 人,数十人受伤;大兴安岭火灾过火林地 133 万公顷,损失 20 多亿元 [森林火灾统计年表,1987];2006 年 4 月 6 日晚,云南安宁发生特大森林火灾,过火面积约两万亩;深圳危险品仓库爆炸,财产损失逾 2 亿元;煤田自燃年损失优质煤达 1000 万吨,煤矿每年都因火灾造成人员的重大伤亡,等等 [中国火灾统计年鉴]。火灾年平均损失近 200 亿元,仅 1999 年一年,我国就发生火灾近 18 万起,造成 2744 人死亡,4572 人受伤,火灾直接损失 14.4 亿元 [中国火灾统计年鉴]。近年来,随着国民经济的发展,我国的火灾形势呈现出愈演愈烈之势。防治火灾、减少损失现已成为国家十分重视、社会普遍关注、迫切需要解决的重大问题之一。

火灾系统是一个复杂系统。它的复杂性表现在两个方面,即火灾过程本身的复杂性和火灾过程中所受到的外界影响因素的复杂性。

首先火灾本身具有复杂性:火灾的孕育、发生和发展包含着流体湍流流动、相变、传热传质和复杂化学反应等物理化学作用,是一种涉及物质、动量、能量和化学组分在复杂多变的环境条件下相互作用的三维、多相、多尺度、非定常、非线性、非平衡态的动力学过程。这方面的复杂性体现为火灾各分过程的复杂性行为,包括建筑火灾中的回燃和轰燃现象、矿井火灾中火灾导致的网络系统风流紊乱、森林火灾中阴燃向明火的转化、火旋风、飞火以及高山峡谷林火可能出现烟气倒灌和淤积等等。

其次,火灾系统还涉及致灾因素与人、材料、环境及其他干预因素的复杂的相互耦合作用。一次火灾要涉及到可燃物的本身条件、环境条件、人为因素、地理、生态等等多方面因素的相互影响。

我们以森林火灾系统为例来看一下火灾系统的复杂性,如表 1-1 所示。

表 1-1 森林火灾系统的复杂性

子系统	子系统演化	子系统间的相互作用
森林	树木的生长、繁衍与死亡;树木之间由共生、竞争、寄生、互惠等关系相互连接形成树丛,小的树丛由于树木的生长连接成为大树丛,不同树种共同形成植物群落,最终构成整个森林;森林随时间向前演化	森林影响气候变化、火灾的发生和发展、为人类提供资源…… 气候影响森林的生长和衰退、火灾的发生发展和熄灭、人类的发展……
气候	水汽蒸发到大气层;大气层的水汽又形成云;云层影响日照的辐射;日照影响温度;水汽对辐射的吸收与成云能力影响气温的分布模式;大气层气温的差异引起气压差,进而产生风;而风又会为降雨创造条件……	火灾破坏森林,同时清理枯枝败叶又会促进新树木的生长;火灾烟气影响气候;火灾本身直接影响到人的生命财产……
火灾	火灾过程本身的复杂性;发生的偶然性(人为、自燃、雷电等等)、发展的不可预见性(大火、小火)与形式的多样性和相互转化(阴燃、地表火、树冠火、飞火等等)	人可以引发火灾、扑灭火灾、防治火灾以及合理利用林火;砍伐森林、植树造林、管理森林等等进而影响气候的变化……
人的因素	人类社会本身是一个复杂系统	
地理子系统 生态子系统 其他子系统	……	……

因此,火灾系统具有多层次、自适应性、不确定性、不可预见性、开放性、非平衡性、非线性、自组织性、耗散性等特性,这使得火灾系统整体上成为了一个涉及自然、社会、经济的复杂系统。正是由于火灾系统的复杂性,人类在该方面的科学研究仍处于探索阶段。火灾具有什么样的确定性和随机性规律?灾害孕育发生和发展的机理是怎样的?如何科学地对灾害进行防治?这些越来越成为社会和公众密切关注的科学问题。动力系统理论的成熟和非线性科学、复杂性科学的发展,为火灾系统的研究提供了理论基础。对于火灾系统复杂性的基础研究,以其鲜明的前沿性、交叉性和挑战性成为当今火灾基础研究的一个热点。

1.1 复杂性科学

对复杂系统的研究始于 20 世纪 80 年代,一场跨学科的科学革命在那时兴起,孕育了 21 世纪一门新科学的诞生。这门科学不依赖牛顿式的宇宙观——即世界如钟表一般有规律而可预测;它所要探讨的是复杂系统中,各组成部分之间相互作用所突现出的特性。这就是所谓的复杂性科学 [Waldrop, 1997]。21 世纪的科学更加突出学科的相互交叉和融

合,以多学科交叉、渗透和融合为重要特点的复杂性科学将在人类探索各种未知的科学奥秘中发挥重要的作用并将推动整个科学的发展。

复杂性科学主要研究复杂系统与复杂性,尽管目前它仍处在萌芽和发展形成阶段,但已引起了科学界的广泛重视。复杂性科学中的“复杂性”(complexity)一词与通常词义上的杂乱、混乱、混沌等词义不同。目前,对于复杂性和复杂系统还没有统一的公认的严格定义,但复杂系统必定是由大量彼此相互作用的相同或不同的单元组成的系统,而复杂性就是复杂系统的行为、组织特性。具有自适应行为的复杂系统有时又称作适应复杂系统(adaptive complex system)。我国著名科学家钱学森认为复杂系统是一个开放的巨系统,复杂性是开放的复杂巨系统的动力学特性[钱学森,于景元,戴汝为,1990;王寿云,于景元,戴汝为等,1996;戴汝为,1997]。按照一些研究者观点,复杂系统有几个基本特征[张知彬,1998;戴汝为,1997]:

- 1) 组成单元数量庞大;
- 2) 单元之间存在相互作用;
- 3) 具有多层次;
- 4) 具有开放性;
- 5) 具有自适应性和进化能力(指适应复杂系统);
- 6) 具有复杂的动力学特性。

复杂性科学的研究涉及到但是并不等同于混沌理论。有人认为,复杂性科学是研究复杂系统在一定规则下产生宏观有序的组织和行为,而混沌理论恰恰相反,它是研究系统在简单规则下如何产生混沌行为[Gleick J, 1987]。所以,有人又将复杂性研究称为反混沌(antichaos)理论。由于二者的研究系统都是动力学系统,二者又存在一定联系。复杂性科学家Langton认为,复杂性位于有序和混沌之间的一个狭窄区域,即混沌的边缘(edge of chaos)[Lanton, 1989]。可见,混沌理论与复杂性科学是有密切关系的。

从哲学的角度看复杂性科学基本上属于整体论或活力论的范畴,即整体大于部分之和。它认为,系统内部之间的关系搞清了并不等于系统的行为就自然清楚了。例如,即使某一生态系统内各物种之间的捕食、竞争、寄生、互惠等关系搞清了(甚至包括定量作用),当这些物种放在一起时,整个系统的行为(如多样性和稳定性)却是难以预料的,需要采用整体论的理论和方法重新加以研究。但需要指出的是,复杂性科学特别强调低层水平上个体行为之间的关系对高层水平上宏观行为的重要作用。所以,复杂性科学在很大程度上又吸收了某些还原论的思想[张知彬, 1998]。

复杂性科学的研究深度不限于对客观事物的描述,而是着重于揭示客观事物构成的原因及其深化的历程,并力图尽可能准确地预测其未来的发展。复杂性科学的研究方法是定性判断与定量计算相结合、微观分析与宏观分析相结合、还原论与整体论相结合、科学推理与哲学思辩相结合。具体说来,主要研究手段有元胞自动机(cellular automata)、遗传算法(genetic algorithm)、博弈论(game theory)及组合优化(combinatorial optimization)等,而这些方法又非常依赖计算机模拟。因此结合理论分析进行计算机模拟是研究复杂系统的一个重要手段。

复杂和简单之间有着密切的联系。物理学最惊人的方面之一就是定律的简单性：麦克斯韦方程、薛定谔方程和哈密顿力学都只用几行就能表示。形成我们世界观的思想实际上也非常简单：世界受自然规律支配，而同一基本规律普遍适用。任何事物都可以用普通的数学，常微分方程或偏微分方程简单干净地表示。然而，我们生活的这个世界是复杂的 [Goldenfeld, 1999]。在自然界和人类社会中真正普适的、起作用的是开放的复杂巨系统 [钱学森, 于景元, 戴汝为, 1990]。真实世界中的任何一个地方都存在复杂：巨大的山脉，一个沙丘表面上的精巧纹理，盐雾形成的波，金融市场的相互依赖，生命体形成的真正生态。每一种情形都是高度组织化和特殊化的，同时生物系统形成了一个异常复杂性的极端情况。一个复杂性的世界是高度结构化的，一个混沌的世界使得我们不知道接下来会发生什么。我们的世界既混沌又复杂，但是世界也包含规律性。例如，气候是非常复杂的，但是冬天之后是春天，四季的轮换是以一种可预测的模式在进行。因此：

“简单的规律可以产生复杂的结构，在复杂情形下也能遵循简单的规律。”

1.2 复杂性 with 元胞机

复杂性科学的一个重要之处是局部规则 (local rule) 导致系统宏观变化 (global change)，即有序行为和组织的出现 [Waldrop, 1997; Lewin, 1992]。一般来说，复杂系统由基本单元组成，各基本单元根据功能结构的不同而分成若干不同的层次。高层次的变量或自由度较少，它从低层次得到信息，并对低层次起支配作用。当这些子系统或基元相互作用时，主要是邻近基元之间的相互作用，而且一个基元的状态演化受周围少数几个基元状态的影响。在相应的空间尺度上，基元间的相互作用往往是比较简单的确定性过程，如细胞的生与死，物态的冰相与汽化，自旋的左旋和右旋等都是常见的二值逻辑状态。而复杂的宏观变化却不是这些局部的、低层次的基元状态的简单叠加，而是由它们通过局部规则相互作用而突现出来的。这个思想可以通过元胞自动机 (Cellular Automata, CA) 来进行说明。

元胞自动机最初是由计算机创始人、著名数学家冯·诺伊曼 (von Neumann) 在 20 世纪 50 年代提出的，用来研究生物体发育中细胞的自我复制。伯克斯 (Burks) 在诺伊曼去世后完善和扩充了这项工作。20 世纪六七十年代是元胞自动机研究起步阶段，以 Conway 的“生命游戏” (game of life) 为代表。到 20 世纪 80 年代，进入元胞自动机的理论研究阶段，Wolfram 对元胞自动机进行了分类。物理学家、计算机科学家对元胞自动机模型的兴趣大增，原因是这类简单的模型能十分方便地复制出复杂的现象或动态演化过程中的吸引子、自组织和混沌现象。从 20 世纪八九十年代起，进入应用阶段。其中 HPP-FHP 格子气模型、Langton 和 Packard 的人工生命等研究开始展开。

元胞自动机是一个离散的的动力学系统，它的基元 (即元胞) 具有状态 (state) 离散化、空间 (space) 离散化、时间 (time) 离散化、相互作用的局域化和动力学演化的同步性等特点 (也可以有不同步更新的元胞自动机)，因而与传统的计算机数值计算和模拟方法比较，元胞自动机能更好地模拟晶格生长、雪花形成、分形晶体生长、化学过程和液体

及湍流的形成等难以解析表达的复杂现象,甚至能逼真地反映大量个体相互作用的细致结构模式 (pattern),因而成为与计算神经网络同时迅速发展的并行计算模型。

元胞自动机中的元胞可以取任意有限种状态。元胞的状态根据局部规则 (local rule) 来更新。也就是说,每个元胞的状态取决于它本身和它的邻域在上一个时间步的状态。所有元胞都根据这样的规则同步更新。这样,整个网格的状态不断向前演化。元胞自动机的特点可以归纳为:

- 1) 各元素分散在离散的网格点上。
- 2) 各元素的状态随时间离散地变化。
- 3) 每个元素都是完全相同的且具有有限种状态,称为元胞。
- 4) 每个元胞都只与其周围的元胞局部连接。
- 5) 元胞的状态变化都是由确定性规则表示,同步进行。

常用的元胞自动机为一维或二维。对一维情况,常用的连接方式是每个元胞与周围 $(2r+1)$ (包括它自己) 个元胞相连;对二维情况,常见的连接方式有冯·诺伊曼连接和穆尔连接 (Moore),其每个元胞与冯·诺伊曼邻域或穆尔邻域中的元胞相连。冯·诺伊曼邻域和穆尔邻域都可以进行扩展。

如图 1-1 所示:

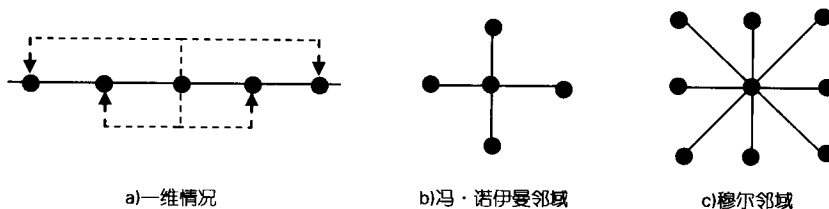


图 1-1 元胞自动机的领域

一维元胞自动机的状态更新过程如图 1-2 所示。对于二维或者更高维的元胞自动机,其状态更新规则和一维元胞自动机是类似的。一维元胞自动机由一个线性网格组成,其中的每个格点是一个元胞。每个元胞有 k 种状态, k 为一个有限值。元胞 i 在时刻 t 的 (局部) 状态表示为: $s_t^i \in \Sigma = \{0, 1, \dots, k-1\}$ 。元胞自动机在时刻 t 的 (全局) 布局取决于当前所有元胞的状态,即: $S_t = (S_t^0, S_t^1, \dots, S_t^{N-1}) \in \Sigma^N$, 其中 N 为元胞的数目,可以是无限多的。

在每一时间步,所有元胞根据局部更新规则 (local update rule) ϕ 进行同步更新。局部更新规则的输入为局部邻域布局 (local neighborhood configuration) η , 其中考虑了元胞 i 本身及其 $2r$ 个最近邻域 (两侧各 r 个) 的状态。因此,元胞 i 的局部邻域为: $\eta^i = (S^{i-r}, \dots, S^{i+r})$ 。 r 称为元胞自动机的半径 (radius)。这样,根据更新规则就可以得到元胞 i 在下一时刻的状态: $S_{t+1}^i = \phi(\eta^i)$, 从而得到了元胞自动机在下一时刻的布局。

局部更新规则 ϕ 对每个元胞是相同的,它可以用“查找表 (Look Up Table, LUT)”来表示。查找表中列出了所有可能的邻域布局 ($|\eta| = k^{2r+1}$) 以及对应的更新后的元胞状态 S_{t+1}^i 。

全局的更新规则 $\phi: \Sigma^N \rightarrow \Sigma^N$ 通过局部更新规则 ϕ 应用于所有元胞得到。当元胞数目 N 为有限值时, 应当给定元胞自动机的边界条件, 如循环边界条件 $S^{N+i} = S^i$ 等, 使得处于边界附近的元胞可以应用局部更新规则进行更新。

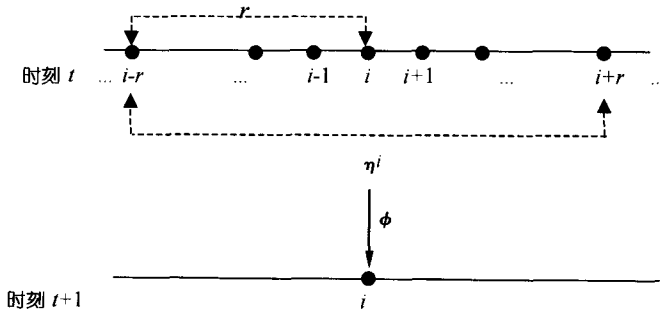


图 1-2 元胞自动机的状态更新。根据邻域布局得到元胞在下一时刻的状态

元胞自动机的状态取决于元胞的数量、连接方式和每个元胞可取的值。这里我们遇到一个典型的组合爆炸问题。假设一个元胞自动机中每个元素存在 k 种状态, 每个元胞与它周围 $n=2r+1$ 个元胞 (包括它自己) 相连, 则它的邻域存在 k^n 个状态。元胞的输出函数或称自动机的转变函数要将 k^n 种状态映射为 k 种状态的一种, 则共有 k^{k^n} 种状态函数存在。假设一个元胞自动机中, 每个元胞存在 10 种状态 ($k=10$), 元胞以冯诺伊曼方式连接 ($n=5$), 则共有 $10^{10^5} = 10^{100000}$ 种转换函数。

研究表明, 在所有这些规则中, 较简单的几种规则, 如可加规则、总和规则、压迫规则和可逆规则等容易分析。特别是总和规则, 它规定每个元胞的状态, 只与其领域的状态之和有关。非常重要的一点就是, 沃尔弗拉姆 (S.Wolfram) 证明, 总和规则描述的自动机展现所有元胞自动机可能表现的动态行为, 而这些行为可以用类似于连续动态系统中的吸引子来表示。换言之, 元胞自动机的整体行为可以用吸引子来表示。

元胞自动机充分体现了复杂性研究中“自下而上”的原则, 即先确定局部规则, 然后观察和研究突现的宏观行为特征。本书中的森林火灾模型就是元胞自动机模型。

1.3 自组织临界性

科学家们很早就提出了有序是如何产生的这一问题, 并且已经对开放的、耗散的、远离平衡态的系统展开了研究。普利高津 (Pringogine) 对自组织进行了研究, 提出了耗散结构理论 [Nicolis and Pringogine, 1987]。在自然界中许许多多的基本过程是不可逆的、随机的, 这些基本过程无法用决定性和可逆性的定律进行分析。普利高津等人研究发现在远离平衡态的情况下, 分子之间可以互相传递信息。他们将非线性、非平衡态系统的概率分析方法同动力学理论, 特别是混沌动力学理论所表达的决定性系统也可以对初始条件很敏感这一特性相结合, 从而解释了大尺度宏观行为是如何从微观活动中产生的。德国科学家

哈肯 (Haken) 也研究了远离平衡态的相变 [Haken, 1987]。

一个复杂系统可以经历很多相变, 或者说一个复杂系统能够呈现出很多系统形态, 那么这些不同的相变和形态是否有规律可循呢? 自组织临界性的概念可以部分地回答这个问题。自组织临界性的概念是由 Brookhaven 实验室的 Bak 等人提出的 [Bak, 1987, 1988]。他们利用一个元胞自动机模型——“沙堆模型”解释了自组织临界性: 向一个沙堆上不断添加沙粒, 沙堆会逐渐变大达到临界状态, 这时再继续加沙粒就会引起“雪崩”——沙堆塌落。虽然沙粒是持续、均匀地添加上去的, 但是沙堆的“雪崩”事件——即能量耗散事件的发生是不均匀、不确定的, 每次“雪崩”的尺度大小不一, 经研究发现, “雪崩”事件的“频率—尺度”分布满足幂律分布。由此 Bak 等人得到了自组织临界性的概念。自组织临界性就是指一个系统会自发地演化到临界状态, 与系统的初始状态无关, 也不需要系统参数满足特定的协调关系。也就是说, 在相当大的系统参数范围内和各种初始条件下, 系统都可以演化到临界状态, 这种自发的演化是“鲁棒性 (Robust)”的。他们认为, 自组织临界性系统具有一些共同特征: 系统的能量注入是持续、缓慢、均匀的, 而系统的能量耗散是突发的、“雪崩”式的。当系统达到平衡状态时, 能量耗散事件的强度或尺度分布符合幂律关系, 即“频率—强度”或“频率—尺度”分布满足幂律关系。图 1-3 中是森林火灾模型的“频率—面积”关系。由此可以看出, 森林火灾中的“频率—面积”分布可望用自组织临界性来解释。

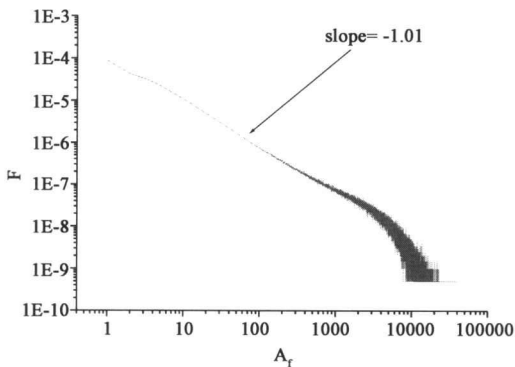


图 1-3 森林火灾模型的“频率—面积”幂律关系曲线。在双对数坐标下幂律关系表现为一条直线, 图中直线的斜率为-1.01, 根据 Drossel 对森林火灾模型进行理论分析的结果, 这个斜率的理论值为-1。进一步的研究发现, 真实的森林火灾数据也满足这个规律。

自组织临界性可望解释自然界中两个重要的现象: $1/f$ 噪声和分形 [Bak, 1988], 因而得到了广泛关注。 $1/f$ 噪声是一种自然界中普遍存在的现象, 在频率较低时这种噪声的功率谱 $S(f)$ 与 $1/f$ 有关。分形具有尺度不变性、自相似性等特点, 是非线性科学研究的三大主题 (包括混沌动力学、孤子、分形) 之一。自然界中许多现象都具有自组织临界性特征, 如地震 [Carson, 1989]、Internet 网络 [Barabasi, 1999, 2000; Lawrence, 1998; Adamic, 2000; Huberman, 1999; Albert, 1999]、姓氏分布 [Miyazima, 1999]、降水 [Pinho, 1998]、论文引用 [Redner, 1998]、经济活动 [Okuyama, 1999; Gopikrishnan, 2000; Blank, 2000]、人口分布 [Blank, 2000]、生物物种分布 [Crawley, 2001] 等。正是因为自组织临界性的这些特点, 自从 Bak 提出这个概念以来, 对于自组织临界性的研究引起了广泛的兴趣。

研究自组织临界性的一个重要手段是建立计算机模型, 进而进行理论解析和数值模拟。研究得比较多的此类模型有: 沙堆模型 [Bak, 1988]、滑块模型 [Turcotte, 1989]、森林火灾模型 [Drossel, 1992a] 等。Drossel 等人提出的森林火灾模型是一个结合蒙特卡洛模拟 (Monte Carlo Simulation) 的随机元胞自动机模型, 它定义在一个 d 维边长为 L 的超立方体网格上, 故而含有 L^d 个格点。树木以概率 p 生长, 火灾以概率 f ($f \ll p$) 发生, 如果一棵树的最近邻中有着火的树, 那么它被点燃。这样, 这个模型模拟了树木的生长、火灾的发生和蔓延等森林火灾系统中最基本的过程。树木的生长就是系统的能量输入, 它是缓慢、均匀、持续进行的; 森林火灾则是系统中的能量输出, 它的发生次数比较少, 它的时间尺度与能量输入的时间尺度产生了分离, 并且火灾的发生是“雪崩”式的, 一棵着火的树将引燃所有与它相连的树。经过理论解析和数值模拟, 研究者们发现森林火灾模型具有自组织临界性。每次森林火灾的过火面积有大有小, 但是在一段足够长时间内, 火灾的发生频率与火灾的面积有一定的关系: “频率—面积”分布满足幂律关系, 如图 1-3 所示。

自组织临界性森林火灾模型前身是 Bak 和 Chen [1990] 提出的森林火灾模型, 在这个模型中只有一个参数——树木生长的概率 p , 而没有点火概率, 或者说点火概率为 0。火灾蔓延与树木生长的时间尺度接近, 因此火灾蔓延是持续存在的。Bak 发现这个模型在 $p \rightarrow 0$ 时会达到自组织临界状态, 在二维和三维情况下, 火焰-火焰相关函数符合幂律关系。在临界状态时火焰前锋是一个分形结构, 能量耗散就是在这样的结构上进行的。然而, 当对 Bak 的模型使用更大的森林尺度和更小的参数 p 进行数值模拟时发现, 随着参数 p 的减小, 火灾火焰前锋的演化越来越趋向确定性, 火焰前锋变为规则的螺旋形, 并且螺旋的尺度及彼此的距离与 $1/p$ 同一量级。这说明, Bak 的森林火灾模型并不是自组织临界性的 [Grassberger, 1991]。Finjord [1992] 对 Bak 模型进行了改进, 加入了自激发项, 从而可以避免规则的火焰前锋的出现。Santra [1992] 等人也做了这方面的工作。

对 Bak 模型本质的改革出现在 1992 年。Drossel [1992a, 1992b] 等人在 Bak 森林火灾模型基础上, 引入点火概率 f , 提出了一个全新的模型。在点火概率 f 、树木生长概率 p 以及它们的比值 (f/p) 三者的尺度分离且都趋近于 0 时, 这个新的森林火灾模型是自组织临界性的。Drossel 等人利用平均场理论分析了森林火灾模型的自组织临界性, 并求得了临界指数。以这个经典模型的提出为起点, 对于森林火灾模型的研究就展开了。

1.3.1 理论研究

理论方面的研究首先是对经典模型的完善工作, 如发现新的相关指数与相关函数 [Henley 1993; Grassberger 1993; Honecker and Peschel, 1996, 1997]、修正森林火灾模型的标度关系 [Pastor-Satorras, 2000] 等。

在森林火灾模型自组织临界性的理论分析方面, 由于一维模型的简单性和易于进行数值模型, 因此针对一维模型进行的理论解析工作进行得比较多。Drossel 等人 [1993b] 给出了一维森林火灾模型的解析解, 并求出了对应的临界指数。Paczuski 和 Bak [1993] 利用一维森林火灾模型来研究湍流中的级联过程 (cascade processes)。

对于高维模型, 直接进行理论解析遇到了困难, 这就需要新的研究方法。

Turcotte [1999b] 从森林火灾模型出发提出了“逆级联” (inverse-cascade) 模型, 解释了自组织临界性产生的原因, 作为一个简化的森林火灾模型, 逆级联模型特别解释了森林火灾模型自组织临界性产生的机理。在进一步的工作中, Gabrielov 等人 [1999] 又分析了逆级联模型与自相似、标度律的关系, 讨论了如何用逆级联模型来解释森林火灾模型、沙堆模型、滑块模型的自组织临界性。Sinha-Ray 和 Jensen [2000] 提出了一个新模型, 这个模型的意义在于它是确定性的, 适合进行理论分析。在这个模型中, 火灾的发生是自动的——树木达到一定的年龄会自动着火。这个模型具有同森林火灾模型同样的宏观统计性质, 并且通过这个模型可以阐述森林火灾模型、沙堆模型与地震模型的关系。

对森林火灾模型的自组织临界性可以通过平均场理论 [Drossel, 1992a; Christensen 48] 进行分析, Vespignani [1998b] 提出了所谓统一的动力学平均场论 (a unified dynamical mean-field theory), 用来分析随机自组织临界系统, 尤其是沙堆模型和森林火灾模型。不过平均场理论只能在宏观的、平均意义上进行分析。重整化群是另一个理论分析方法。研究者们 [Loreto, 1995, 1997; Vespignani, 1996, 1998a] 已经开展了这方面的工作, 他们提出了动力学驱动的重整化群方法, 来研究自组织临界性模型的相变行为和临界现象。然而意外的是, Loreto 等人 [1995] 经过研究认为森林火灾模型事实上不具有自组织临界性, 而只有普通的临界性, 因为它的参数设置要满足特定的关系。他们对此作了理论分析和数值模拟, 以证明他们的论点。Drossel [1997a] 对此与 Loreto [1997] 等人进行了讨论, 指出了他们的研究方法中的不完善之处, 同时澄清了自组织临界性的概念: 使系统达到临界状态的参数之间可以具有一定尺度分离的关系, 这和“系统参数满足特定的协调关系”是不同的; 另外, 自组织临界性产生的幂律关系要跨过几个数量级。

此外, 还有其他一些分析方法。Patzlaff 和 Trimper [1994] 利用一个主方程对森林火灾模型进行了进一步的解析分析。Mendez 和 Llebot 等人 [1997] 利用反应扩散方程描述了森林火灾模型中火焰的蔓延过程。Paczuski 等人 [1996] 研究了“雪崩”动力学并讨论了几个常用模型的自组织临界行为。Kuittu 等 [1998] 结合 Monte Carlo 模拟, 研究了二维和三维森林火灾模型在临界点附近的动力学特性。Chen 和 Bak [2000] 由 Bak 模型出发, 发现火灾的空间分布是一个分形, 并且其分形维数随森林的长度尺度发生变化, 并且会出现分形维数的跳变。他们还将森林火灾模型与湍流的中间层 (intermediate range) 进行了比较。

幂律关系是自组织临界性的一个重要表征, 但是具有幂律关系的系统却不一定是自组织临界性的。Tainaka 和 Itoh [1996] 讨论了真实自组织临界性与表面上的自组织临界性的区别。有很多系统也可演化得到临界状态, 也具有“频率—尺度”或“频率—强度”的幂律分布, 然而却不是真正的自组织临界性系统。自组织临界性系统的特点是: 具有幂律分布并且这种幂律分布是健壮的 (robust), 即系统可以自发地演化到临界状态, 而不需要参数满足特定的关系。

1.3.2 数值模拟

在理论分析和解析的基础上, 可以进行数值方面的研究并与理论结果相对照, 对于无

法进行理论解析的情况,数值模拟显得更加重要。数值方面的研究包括临界指数值的确定 [Grassberger, 1993; Christensen et al, 1993]、进行多维的模拟 [Clar and Drossel, 1994]、验证森林火灾模型自组织临界性的普遍性 [Drossel et al, 1994b] 等。Drossel、Clar 和 Schwabl 研究了森林火灾模型自组织临界性的普遍性:对于 1 维模型,他们采用 $2k$ 个邻域来代替传统的 2 邻域,通过理论解析发现自组织临界性具有普遍性,理论解析结果和数值模拟结果得到了很好的符合。对于 2 维模型,他们通过改变森林的空间分布状况来研究自组织临界性的普遍性,并通过重整化群方法发现高维模型的自组织临界性同样具有普遍性。Clar 和 Drossel 等 [1994] 对森林火灾模型进行了进一步的阐述,进行了 1 到 8 维的数值模拟,发现 6 维是一个临界维数。他们在数值模拟中改变了森林的空间分布状况以及考虑到树木的抗火性,发现自组织临界性指数在这些不同条件下是不变的,从而进一步证实了自组织临界性的普遍性。Christensen 等人 [1993] 论述了平均场、渗流和森林火灾模型之间的相互联系,并对森林火灾模型进行了 1 到 6 维的模拟,求得了对应的幂律指数。发现当维数大于 3 时,森林火灾模型与渗流模型完全一致。

经典的森林火灾模型当火灾面积较大或者森林面积过小时,由于森林总面积的有限性会出现“有限尺度效应”(finite-size effect)。Schenk 和 Drossel [2000] 等人针对“有限尺度”问题,模拟了不同森林尺度情况下经典森林火灾模型的自组织临界性,研究了森林形态、火灾规模的分布随着森林尺度的变化情况。他们认为:森林是由很多尺度不一、形状不一的块状林地(patchs)组成,每个块状林地内部的森林状态是近似均一的,相邻块状林地的森林状态不同。火灾可以分为两类:一类是跨越块状林地的火灾,另一类是相对块状林地尺度来说较小的、局部的火灾。当森林的尺度逐渐变小时,森林中的块状林地数目逐渐减少,最终整个森林变为一个状态均一的系统,从而使得森林密度在系统演化过程中出现大的波动。常规的有限尺度标度律在这种情况下不成立了。

1.3.3 模型的发展

以经典森林火灾模型为基础,研究者们考虑了更多的影响因素,对经典模型做了修正和发展。

Drossel 和 Schwabl [1993a] 提出了更具一般性的新的森林火灾模型,将树木的抗火性质(immunity from fire)引入到森林火灾模型中,使得森林火灾的蔓延以概率方式进行。他们发现在点火概率为 0 时,树木抗火性存在一个临界值,当大于或者等于这个临界值时,火灾就熄灭了。也就是说,发生了从有火的稳定状态到无火的稳定状态的相变。1994 年 Drossel [1994a] 等人将树木的抗火性引入,并且在点火概率不为 0 的情况下进行了研究,发现同样存在一个临界的树木抗火性,当树木抗火性高于临界值时,火灾面积分布和临界指数与随机键渗流模型相似;而当树木抗火性小于这个临界值时,森林火灾模型才会表现出自组织临界性。这样,森林火灾模型就出现了从渗流到自组织临界性的相变。一棵树的“邻居”(即相邻的树)中可能有多个都同时处于着火状态,Drossel 等人 [1994a] 为此建立了模型,考虑了着火邻居数目的差别。在稍后的研究中,Drossel 等人 [1994c] 考虑了树木抗火性对火灾发生的影响,分析了在参数不同时模型出现的三种状态:螺旋

波、渗流状态、自组织临界状态。Albano [1994, 1995] 研究了考虑树木抗火性的森林火灾模型, 详细讨论了模型在次临界、临界、超临界条件下的行为, 并将森林火灾模型与其他一些现象之间建立了联系。

Strocka 等人 [1995] 在经典森林火灾模型 [Drossel, 1992a] 的基础上提出了一个新模型: 森林中同时存在乔木和灌木, 二者的生长速度是不同的, 灌木的生长速度要快得多, 同时在火灾蔓延时二者可以互相引燃对方。在这个模型中, 灌木由于其生长速度相对较快而具有森林火灾模型所具有的自组织临界性; 而乔木由于生长速度相对较慢, 大的树林在形成之前就被灌木火灾破坏掉了, 因而不具有自组织临界性。

经典森林火灾模型的控制参数是点火概率与种树概率的比值, 为了研究自组织临界性系统中的相变行为, 研究者们对以树木密度 (或空地密度) 为控制参数的模型进行了研究。Clar、Drossel 和 Schwabl [1995] 研究了以森林密度作为控制参数的森林火灾模型, 随着参数由小到大的变化, 系统由只有小尺度“雪崩”——即火灾, 变为自组织临界状态——火灾面积分布满足幂律关系, 再变为只有无限大的火灾 (类似于渗流)。1997 年, Clar [1997a, 1997b] 研究了以空地密度作为控制参数的森林火灾模型, 通过理论分析和数值模拟, 他们发现随参数的变化森林形态表现为三种物相: 自组织临界状态 (即 Drossel 等人 1992 年提出的模型)、螺旋波 (Bak 等人 1990 年提出的模型)、火焰在树丛边缘燃烧的状态。1996 年, Drossel [1996] 研究了一维森林火灾模型, 通过改变规则, 同样得到了三种状态: 自组织临界状态、同步状态和一种中间状态。

其他的研究情况可见 Clar、Drossel、Schwabl、Schenk 等人 [1996, 1999], 以及 Turcotte [1999] 的论述。

1.3.4 与森林火灾模型有关的其他模型

Sneppen 和 Newmann [1997] 讨论了一个新的模型, 在这个模型中, 即使单元之间没有相互作用也可以表现出幂律关系, 即模型具有自组织临界性。Turcotte [1999d] 由森林火灾出发, 提出了一个倍增级联 (multiplicative cascade) 模型, 并由此解释了地震的发生规律。Broker [1999] 提出了一个类似于森林火灾模型的人口模型, 并研究了其自组织临界性。Chan TC 等人 [1995a] 提出了一个元胞自动机模型, 在这个模型中网格点的能量可以扩散; 网格点能量的耗散 (称为点燃) 和能量耗散的“雪崩”传播 (称为蔓延) 通过两个能量阈值来控制。根据参数的不同, 这个模型可以出现两个非临界状态, 中间被一个临界点分隔开。通过适当地设置阈值, 这个模型可以得到与森林火灾模型类似的自组织临界行为。在稍后的研究中 [1995b] 他们还分析了在超临界状态下这个模型的特征。Drossel [1997b] 论述了能量尺度的分离可以使一个系统 (具有缓慢均匀的能量输入、雪崩式能量耗散) 演化到自组织临界状态, 第一个能量尺度是“雪崩”被引发的能量阈值; 第二个是一个元胞能够被“雪崩”影响到的能量阈值, 当一个元胞的能量低于这个阈值时, 即使它的邻域中发生了雪崩, 它的能量也不会改变。文章给出了新的模型并进行了平均场理论分析和计算机模拟。Schulz 和 Trimper [1996a, 1996b] 提出了新的模型: p-state 模型, 它是一个具有普遍性的模型, 森林火灾模型可以看作这个模型的一个特例。他们在