

火灾系统的复杂性与可持续防治

宋卫国¹ 王 健²(中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 博士、副教授¹; 博士研究生² 合肥 230026)

〔摘要〕 火灾系统即火灾和它的影响因素构成的整体,它是一个复杂系统。本文介绍了火灾系统复杂性的研究。森林火灾的分布满足较好的幂律分布,并且具有尺度不变性和时间不变性,实际的火灾数据与自组织临界性森林火灾模型的计算和分析结果相互符合,这表明森林火灾系统是一个自组织临界性系统。当考虑降水、森林尺度等更多火灾影响因素时,森林火灾模型的计算结果与实际数据符合得更好。对实际火灾数据的分析表明,城市火灾的分布同样满足具有时间不变性和尺度不变性的稳定的幂律分布。稳定的幂律分布对于火灾防治具有实际意义,当获得了足够多的火灾历史数据时,可以预测未来的火灾发生情况,可以利用小火灾的发生情况预测大火灾的发生概率,利用自组织临界性森林火灾模型,可以评估火灾防治措施的长期效果。

〔关键词〕 复杂系统 自组织临界性 有限尺度效应 森林火灾 城市火灾 〔中图分类号〕 TK121 O4

〔文献标识码〕 A

〔文章编号〕 1000-7857(2004)08-0015-04

COMPLEXITY AND PERSISTENT PREVENTION OF FIRE DISASTERS

SONG Wei-guo WANG Jian

(State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Fire system, which is composed of fire and its effect factors, is a complex system. In this paper, the recent studies on fire complexity are introduced. The frequency-size distribution of forest fire satisfies a power law relation that is invariant with time and system size. Actual forest fire data accords well with the simulation and calculation results of the forest-fire model, indicating that the forest fire system is a self-organized critical system. If more effect factors such as precipitation and forest scale are considered, the forest-fire model gets better accordance with actual forest fire data. The city fire data is also found satisfying power-law relation invariant with system size and time. A steady power-law relation has practical implications. The future fire distribution can be forecasted by enough historical fire data, the occurrence probabilities of large fires can be calculated by those of small fires, and the forest-fire model can be used to assess the long-term performance of fire protection policies.

Key Words: complex system, self-organized criticality, finite-size effect, forest fire, city fire**CLC Number:** TK121 O4**Document Code:** A**Article ID:** 1000-7857(2004)08-0015-04

1 研究背景

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。我国是火灾多发国家,森林火灾每年造成的直接经济损失达 70~100 亿元,其它类型火灾年平均损失近 200 亿元。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。

火灾系统包括火灾及其影响因素,是一个典型的复杂系统。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、能量和化学组份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的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、环境及其它干预因素的复杂的相互耦合作用。一次火灾涉及到可燃物的本身条件、环境条件、人为因素、地理、生态等多方面因素的相互影响,不同的火灾相互之间有或强或弱的关联。

正是由于火灾系统的复杂性,人类在火灾系统整体性研究方面的科学探索仍处于初级阶段。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。

2 森林火灾系统的自组织临界性

自组织临界性的概念是由 Brookhaven 实验室的 Bak 等人提出的^[1,2]。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,即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

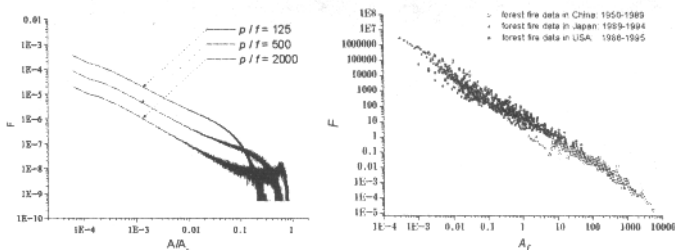
的,但是沙堆的“雪崩”事件。即能量耗散事件的发生是不均匀、不确定的,每次“雪崩”的尺度大小不一。经研究发现,“雪崩”事件的“频率-尺度”分布满足幂律分布。由此 Bak 等人得到了自组织临界性的概念。自组织临界性就是指一个系统会自发地演化到临界状态,与系统的初始状态无关,也不需要系统参数满足特定的协调关系。自然界中许多现象都具有自组织临界性,如地震^[3]、Internet^[4]、姓氏分布^[5]、论文引用^[6]、经济活动^[7]、人口分布^[8]、生物物种分布^[9]等。因此,自从 Bak 提出这个概念以来,人们对于自组织临界性的研究有了广泛的兴趣。

森林火灾系统是一个自组织临界性系统^[10],它的性质可以用森林火灾模型来描述^[11]。森林火灾模型是一个元胞自动机模型,它用一个二维的网络表示森林,其中的每个格点可以被树木占据,也可以是空地;在森林中,树木以一定的概率生长,同时火灾以更小的概率发生。这个模型在任意初始条件下和很大的参数范围内都可以达到稳定状态,即临界状态,因此是一个自组织临界性模型。数据分析表明,实际的森林火灾具有与森林火灾模型相同的性质。

图 1 和图 2 表明森林火灾的频率-面积分布较好地满足幂律关系,并且与森林火灾模型得到的火灾分布得到较好的符合;实际的森林景观和火灾的蔓延范围与森林火灾模型也具有相同的性质,即森林中具有分形性质的斑块结构和火灾蔓延范围。这表明,森林火灾模型^[11]可以用来描述实际森林火灾行为。进一步的数据分析表明森林火灾的幂律分布具有尺度不变性和时间不变性^[12,13],不同国家和地区的火灾分布具有同样的规律。因此,森林火灾系统是一个自组织临界性系统。森林火灾的自组织临界性表明,不同大小、不同时期的森林火灾具有相关性。如果小尺度森林火灾发生频率较多,大规模森林火灾的发生频率就会降低;而如果对小火灾的扑救过于严格,反而会使得大规模火灾更容易发生(图 1a)^[10]。这就提供了一条新的火险预测方法,即由小火灾的发生频率来预测大火灾的分布规律,或由历史数据来预测未来的火灾情况;并且,可以利用森林火灾模型来评估火灾防治措施的长期效果。

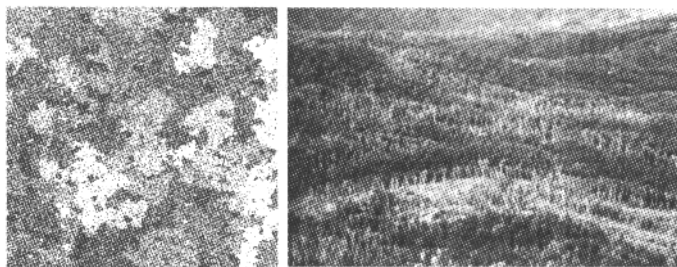
为了理解这些实际森林火灾与模型结果之间的差距,研究者们构建了新的模型^[12-14]来模拟森林火灾系统中火灾抑制因素、森林类型等的作用,开始深入研究森林火灾系统的动力学规律,探索森林中局部相互作用与宏观、整体行为之间的关联。模型对经典森林火灾模型做出了修正,引入了广义的“树木抗火性” g 来描述外部条件(包括树种、气象条件和人为因素)对火灾发生和蔓延的阻力,可望更加真实地反映森林火灾受外界因素影响的情况。由图 3a 可以看到,由于降水的作用,火灾分布的重尾现象出现得更早,较大的降水量使火灾的重尾现象更加明显,并且使小火灾的发生频率增加。随着 g 的增加,“频率-面积”曲线在火灾面积比较大的区域逐渐向下弯曲,最大火灾面积逐渐减小;同时在中型火灾区域的火灾频率增加。这是森林火灾受外界影响的结果。图 3 右侧图为我国南方林区(年降水量 1 200 毫米)和北方林区(年降水量 600 毫米)的火灾分布。由于我国的森林管理方式、力度的南北差别很小,即人为因素对森林火灾的影响没有差别,南北林区主要树种的抗火性相差也不大,因此气候条件(主要是降水)就成为影响森林火灾的一个关键因素。南方林区的年降水量较北部大,森林的 g 值相对较

大。通过图 3 的比较表明,该模型较好地模拟了降水等对森林火灾的作用。



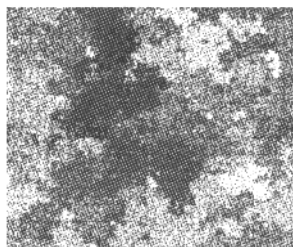
(a)由模型得到的火灾分布 (b) 中国、美国、日本的实际火灾分布

图 1 森林火灾频率-面积幂律关系



(a) 模型中的森林景观

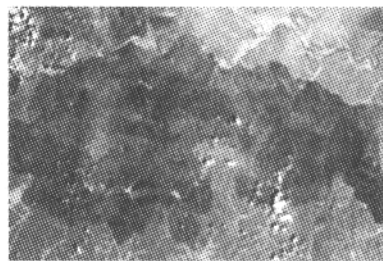
(b) 实际的森林景观



(c) 模型中的火灾蔓延范围



(d) 实际草地火灾的蔓延范围



(e) 实际森林火灾的蔓延范围(1987 年大兴安岭火灾)

图 2 森林火灾的大尺度景观

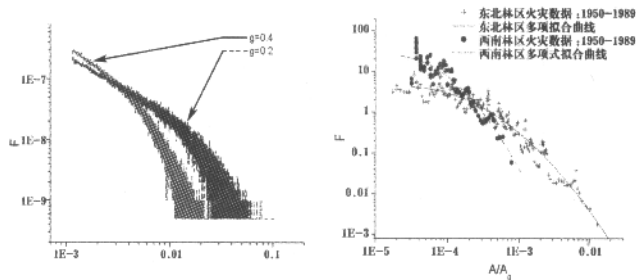


图 3 降水对森林火灾分布的影响(左侧为森林火灾模型的结果,右侧为我国南方和北方林区的实际火灾分布)

在森林尺度过小时会出现有限尺度效应^[14,15]。Schenk 和

Drossel 等人针对有限尺度效应,模拟了不同森林尺度对经典森林火灾模型的自组织临界性的影响,研究了森林形态、火灾尺度分布、森林密度及其概率分布等随着森林尺度的变化情况。他们发现:森林是由很多补丁(patch)组成,每个补丁内部的森林状态是近似均一的,相邻补丁的森林状态不同。火灾可以分为两类:一类是跨越整个子区域的火灾,另一类是相对子区域来说较小的、局部的火灾。当森林的尺度逐渐变小时,森林中的补丁数目逐渐减少,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就不成立了。

进一步的研究发现^[15]:当森林尺度的减小,使得森林尺度远大于森林相关长度的条件不能满足时,出现有限尺度效应,此时最大火灾面积受到限制而变小,同时面积与森林子块面积相当的火灾次数增加,在“频度-面积”曲线上形成一个频率峰,表明横越整个森林的火灾的出现频率大大增加。这个频率峰随着森林尺度的进一步减小而升高,当森林尺度非常接近于甚至小于森林相关长度时,频率峰变为单侧峰;有限尺度效应使得最大火灾的规模受到限制,从而引起森林密度的上升,从而使火灾平均面积下降。在实际森林中的防火隔离带是引起有限尺度效应的主要原因之一,在防火隔离带的研究中,火灾跨越隔离带的难易程度可以用“隔离性能”表示。随着隔离性能下降,火灾跨越隔离带的概率增加,有限尺度效应得到缓解。在隔离性能比较好的区间,隔离性能微小的变化,会对森林形态、森林火灾分布产生很大的影响,表明有限尺度效应敏感地依赖于“隔离性能”;而当隔离性能变差时,由于有限尺度效应的减弱,它的变化对森林和森林火灾的影响也变小,系统越来越接近森林尺寸足够大的情况。这些研究不仅对于认识自组织临界性,同时对于设置和评估防火隔离带性能具有实际意义。

3 城市火灾的幂律分布

如果把城市火灾及其影响因素作为一个整体定义为“城市火灾系统”,在研究中综合城市火灾本身性质和外界因素的影响,探索整个系统随时间的演化规律,将可望揭示城市火灾的宏观规律,进而促进城市火灾的“可持续防治”。

目前对于城市火灾的研究主要集中于揭示火灾本身的性质,如热解、着火、火蔓延、烟气运动规律等等。事实上,城市火灾会受到多种外界因素的影响,如气候条件、人的行为、可燃物种类及其分布等。人可以扑灭火灾、引发火灾,火灾亦可以伤害人;气候可以促进火灾、抑制火灾,火灾亦可以改变局部气候;可燃物的状况可以影响火灾的发生和发展,火灾亦可以改变可燃物的分类和分布。这些影响因素与城市火灾构成了相互耦合的一个整体。

已有的研究^[16]对城市火灾系统进行了初步的分析,发现城市火灾分布具有明显的幂律分布,如图4所示。城市火灾数据分为两段,大火灾的分布满足幂律分析,小火灾分布则偏离了幂律分布,一般认为是数据缺失引起的。通过对中国和瑞士的城市火灾数据的分析,发现城市火灾的频率-损失幂律分布具有尺度不变性和时间不变性。稳定的幂律分布往往对应着自组织临界性,城市火灾系统具备了自组织临界性系统的典型特征。

与森林火灾的自组织临界性类似,城市火灾的幂律分

布也表明不同规模、不同时期的火灾具有相互关联。这对于火灾的预测和长期防治具有一定的实际意义。

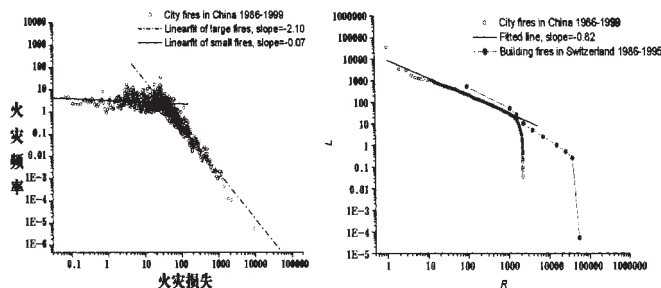


图4 我国城市火灾的幂律分布(左边为我国城市火灾的频率-损失分布,右边为我国和瑞士的城市火灾 Zipf 图)

5 结论和展望

火灾系统是一个与火灾本身、气候、地理、人类活动、森林生态、社会、环境相关的典型的复杂系统。

真实森林火灾具有森林火灾模型所反映出的自组织临界性,表现为“频率-面积(尺度)”的幂律关系,并且具有尺度不变性和时间不变性,即不同大小、不同时期的森林火灾具有相关性。通过与森林火灾模型的比较表明,森林火灾系统是一个自组织临界性系统。城市火灾分布同样具有自组织临界性系统的典型特征,即稳定的幂律分布。通过幂律分布规律,可以由火灾的历史数据预测未来的火灾发生情况,并且可以由小火灾发生频率预测大火灾发生概率。火灾的幂律分布规律还表明:由于火灾事件之间的关联性,防治火灾时应当有科学的指导;一个近期效果明显的火灾防治措施并不一定具有长期防治效果,甚至会起到相反作用。

通过适当地考虑降水等外界因素对森林火灾的自组织临界性的影响,可以发展出新的森林火灾元胞自动机模型。通过进一步研究自组织临界性产生的原因、大规模森林火灾的分布规律、森林火灾与其它因素(气候、环境、人、生态等等)的多元相关性等等,可望得到与真实森林火灾系统的定量对应关系,从而对火灾的可持续防治有所推进。

参考文献(Reference)

- [1]Bak P, Tang C, Wiesenfeld K. Self-Organized Criticality: An Explanation of $1/f$ Noise[J]. Phys.Rev. Lett., 1987, 59: 381~384
- [2]Bak P, Tang C, Wiesenfeld K.. Self-organized criticality[J]. Phys. Rev.A, 1988, 38: 364~374
- [3]Carson M, Langer J S. Mechanical model of an earthquake fault [J]. Phys.Rev.A. 1989, 40:6 470~6 484
- [4]Barabasi AL, Albert R. Emergence of scaling in random networks [J]. Science. 1999, 286: 509~512
- [5]Miyazima S, Lee Y et al. Power-law distribution of family names in Japanese societies[J]. Physica A. 2000, 278: 282~288
- [6]Redner S. How popular is your paper? An empirical study of the citation distribution [J]. The European Physical Journal B. 1998, 4:131~134
- [7]Okuyama K, Takayasu M Takayasu H. Zipf's law in income distribution of companies[J]. Physica A. 1999, 269: 125~131
- [8]Blank A, Solomon S. Power laws in cities population, financial markets and internet sites (scaling in systems with a variable number of components)[J]. Physica A. 2000, 287: 279~288

对“关于用经典力学计算氢分子结构的商榷”的答复

陈 景

(云南大学化学与材料工程学院, 教授、中国工程院院士 昆明 650091)

〔摘要〕 指出张武寿同志曲解了笔者的氢分子结构模型, 其“商榷文”(发表于本刊 2004 年第 5 期)中进行的论证、公式推导及计算结果都是错误的。

〔关键词〕 经典静电力学 氢分子结构 量子力学 量子化学

〔中图分类号〕 O3 O4

〔文献标识〕 A

〔文章编号〕 1000-7857(2004)08-0018-03

IN REPLY TO THE PAPER TITLED“DISCUSSION ON CALCULATION OF HYDROGEN MOLECULE STRUCTURE BY CLASSICAL STATIC MECHANICS”

CHEN Jing

(College of Chemical and Material Engineering, Yunnan University, Kunming 650221, China)

Abstract: In this paper, the author indicated that Mr. Zhang Wushou misconstrued the author's hydrogen molecule structure model, and therefore in his paper, those discussion, deduction of formulas and calculation results were all false.

Key Words: classical static mechanics, hydrogen molecule structure, quantum mechanics, quantum chemistry

CLC Number: O3 O4

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2004)08-0018-03

在自然科学的发展史中,任何新理论观点的提出都经历了一个“客观的依据、理性的怀疑、多元的思考、平权的争论、实践的检验”的过程^[1]。相信张武寿同志在予以“多元的思考”^[2]后,可以全面地、正确地理解笔者的氢分子结构模型^[3]。笔者模型的理论精髓是两个球壳形的氢原子交叠后产生了由两个球冠面组成的核间电子云,依靠核间电子云对异核的吸引力抵消两核间的排斥力,当两种力达到动态平衡时则形成了稳定的氢分子。这就要求核间距 R 只能变化在 $a_0 < R < 2a_0$ 范围,因为只有在这个范围才会出现核间电子云。在理论推导上是用积分求出核的正电荷对球冠面负电荷的吸引力 f_a 和 f_b , 以两个吸引力之和等于两核的排斥力去求出平衡核间距 R ; 以球冠面负电荷在两核中点的等效电荷重心求出它们在异核正电场中的势能降之和,用维里定理处理后获得键能 D_e 。笔者的理念是优先考虑物质运动中的吸引和排斥关系,而不是优先考虑能量最小原理。张武寿同志虽然声称使用了笔者的模型,但他把 R 变动在 0 与 $2a_0$ 之间,

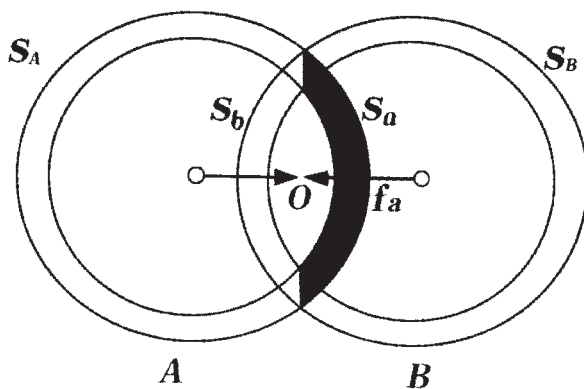


图 1 氢分子结构模型

殊不知 $0 < R \leq a_0$ 之间不会出现核间电子云,而且 R 接近 0 时,两个氢原子将几乎叠合在一起,其物理意义是荒谬的。在理论推导上,他先求出 $0 < R \leq 2a_0$ 之间的作用力 F 的两个

[9]Crawley MJ, Harral JE. Scale dependence in plant biodiversity[J]. Science. 291: 864-868

[10]Malamud BD, Morein G, Turcotte DL. Forest fires: An example of self-organized critical behavior[J]. Science. 1998, 281: (5 384) 1 840~1 842

[11]Drossel B, Schwabl F. Self-Organized Critical Forest-Fire Model [J]. Phys.Rev.Lett. 1992, 69(11):1 629~1 632

[12]宋卫国, 范维澄, 汪秉宏. 中国森林火灾的自组织临界性研究 [J]. 科学通报. 2001, 46: (6) 512~525

[13]Song Weiguo, Fan Weicheng, Wang Binghong. Self-Organized

Criticality of Forest Fire in China [J]. Ecological Modeling. 2001, 145:(1) 61~68

[14]Schenk K, Drossel B, Clar S, Schwabl F. Finite-size effects in the self-organized criticality forest-fire model [J]. Eur.Phys.J., 2000, 15: 177~185

[15]宋卫国, 范维澄, 汪秉宏. 有限尺度效应对森林火灾模型自组织临界性的影响[J]. 科学通报. 2001, 46(21): 1 841~1 845

[16]Song Weiguo, Zhang Heping, Chen Tao, Fan Weicheng. Power-law distribution of city fires[J]. Fire Safety Journal. 2003, 38: 53~465

(责任编辑 王宏章)