

表现形式? 不同规模火灾的时间分布是否相同? 因此, 针对这些问题, 在本文第三部分, 我们利用变异系数、“频率—时间间隔”、火灾时间序列的 Allan 因子和 Fano 因子等方法对火灾的时间特征进行了研究, 发现森林火灾“频率—时间间隔”满足幂律关系, 而城市火灾“频率—时间间隔”满足指数分布; Allan 因子和 Fano 因子的分析结果显示, 两种火灾系统都满足自相似性和标度性, 具有周期性, 并且这种周期与人类活动和主要气象参数(如相对湿度)具有相关性和相似性。结果表明, 森林火灾时间序列具有分形特征, 城市火灾具有“分形—比率”随机过程特征。

关键词: 气象参数 人口密度 时空分布 幂律 自组织临界性 分形

ABSTRACT

Beyond the memory of men, fire has become one of the most permanent and severe disasters. Besides great casualties and losses of property, fire also endangers the fields such as energy, resource and environment. Effective prevention and control of fire rely on in-depth understanding of the behavior and characteristics of the fire system.

Forest fire system is one part of the forest ecological system. There are many complex interactions between forest fire occurrence and its influencing factors, which may lead to the correlation between fires. To prevent and control fires, we need analyze the fire risk under different conditions and obtain quantitative effect of each parameter on fire system. The human activities also play an important role in the fire occurrence. Thus, we first focus on the effect of several factors on the forest fire probability, including the weather condition, population and so on, based on the fire occurrence principle. Especially, we quantify the influence of population density to the forest fire occurrence probability. Furthermore, impacts of some weather parameters on the urban fire probability are also studied.

In 1998, Malamud et al compared actual forest fire data with simulation results of forest-fire model proposed by Drossel et al. and found that actual forest-fire system has self-organized criticality (SOC) characteristics. From that time, investigations on systemic law of actual forest fire have been carried on. But there are still some problems to solve, such as the applicability of SOC for different forest fire systems, the difference of SOC characteristics between different forest fire regions, etc. On the other hand, in contrast to the researches on forest-fire system, it seems that there have not yet many studies on other fire systems. Song et al investigate the SOC characteristics of the urban fire system of China. Is SOC characteristics of urban fire system universal? Therefore, in the second part of this dissertation, we study the spatial distribution of the fire system. Here, the spatial distribution is referred to fire intensity, i.e. fire area, for forest fires and fire loss for urban fires. Firstly, the “frequency-area” distribution of forest fires in Japan is found to satisfy power-law relation, which is similar to that of China and America. Steady power-law relation of “frequency-size” distribution is one of the important behaviors of SOC, so we investigate the power-law relation in different periods and different regions. The results validate that this power-law relation of “frequency-size”

distribution is steady and scale-invariant. Then we investigate the “frequency-loss” distribution of urban fire system in Japan and several cities of China. It is found that the urban fire system also has SOC characteristics.

Furthermore, a system has not only the spatial distribution characteristics, but also temporal distribution characteristics. So what is the temporal distribution of forest fires and urban fires? What is that of fires with different intensity? Aiming to solve these problems, in the last part, we analyze the temporal characteristics of fire system by means of several statistical methods, including coefficient of variation, “frequency-interval”, Fano factor and Allan factor. It is found that “frequency-interval” of forest fires satisfies power-law relation with a periodical fluctuation, which satisfies exponential relation for urban fires. Results of Allan factor and Fano factor show that both forest and urban fire systems have self-similarity and scaling behavior with periodical fluctuation. The periodical fluctuation of fire time distribution is probably associated with and similar to human activities and main weather parameters (e.g. relative humidity). Results show the fractal characteristics of forest fire time sequence and the “fractal-rate” stochastic point process characteristics of urban fire time sequence.

Key Words: weather parameter, population density, spatial-temporal distribution, power law, self-organized criticality, fractal

符号表

Lat	纬度
$Long$	经度
$P(i)$	火灾发生概率
d	区间编号
n_f	各区间火灾发生次数
n_d	某区间内总三级格点数
$P(h)$	相对湿度对应的火灾发生概率
$P(t)$	日照时间对应的火灾发生概率
P_c	不考虑森林覆盖率时的森林火灾发生概率
P_{ec}	有效森林火灾发生概率（考虑森林覆盖率）
T_f	火灾发生次数
T'_i	三级格点个数
T_i	有效三级格点个数
d_p	人口密度
A, s	火灾面积
α	标度指数
D	分形维
δ	观测尺寸
$N(\delta)$	几何体尺寸
L	火灾损失
I	物价指数
β	标度指数
τ	火灾时间间隔
t_i	火灾发生时间
N_k	火灾次数计数序列
C_v	变异系数

符号表

σ_r	标准偏差
AF	Allan 因子
FF	Fano 因子
A_{th}	火灾面积阈值
L_{th}	火灾损失阈值

表 格

表 1.1	中国森林火灾基本情况.....	2
表 1.2	2000 年至 2007 年全国火灾基本情况.....	2
表 2.1	由一级格点编号 4078 产生的二级格点编号示意.....	19
表 3.1	2000 年至 2006 年中国物价指数.....	43

插图

图 1.1	火灾系统是涉及火灾、气候、人、可燃物等因素的复杂系统	4
图 1.2	森林火灾模型的“频率—面积”幂律关系曲线	12
图 2.1	日本森林火灾发生概率与日平均相对湿度之间的关系	22
图 2.2	日本森林火灾发生概率与日最低相对湿度之间的关系	22
图 2.3	日本森林火灾发生概率与日平均降雨量之间的关系	23
图 2.4	日本森林火灾发生概率与温度之间的关系	23
图 2.5	日本森林火灾发生概率随平均风速的变化趋势	24
图 2.6	日本森林火灾发生概率随最大风速的变化曲线	24
图 2.7	日照时间对日本森林火灾发生概率的影响	25
图 2.8	辽宁葫芦岛市城市火灾发生概率与相对湿度的关系	26
图 2.9	辽宁省葫芦岛市城市火灾发生概率与平均风速的关系	27
图 2.10	辽宁省葫芦岛市城市火灾发生概率随平均温度的变化趋势	27
图 2.11	森林火灾发生概率随人口密度的变化关系（不考虑森林覆盖率）	30
图 2.12	森林火灾发生概率随人口密度的变化关系（考虑森林覆盖率）	30
图 3.1	1989 年到 2000 年日本森林火灾的“频率—面积”分布	37
图 3.2	日本每年森林火灾的“频率—面积”分布（1996 和 1997）	37
图 3.3	日本每年森林火灾的“频率—面积”分布（1998 和 1999）	38
图 3.4	日本东京都、栃木、埼玉三地区总体森林火灾数据	38
图 3.5	日本东京都、栃木、埼玉各地区森林火灾数据	39
图 3.6	不同国家森林火灾的“频率—面积”分布	40
图 3.7	日本城市火灾数据“频率—损失”分布（使用当年实际价格损失）	46
图 3.8	日本城市火灾 Zipf 分布图（使用当年实际价格损失）	46
图 3.9	日本北海道火灾“频率—损失”分布（使用当年实际价格损失）	47
图 3.10	日本北海道火灾 Zipf 分布图（使用当年实际价格）	47
图 3.11	日本不同时期城市火灾“频率—损失”分布	48
图 3.12	日本不同时期城市火灾的 Zipf 图（使用当年实际价格损失）	48
图 3.13	辽宁葫芦岛市火灾“频率—损失”分布图（2000 年-2006 年）	49
图 3.14	哈尔滨市火灾“频率—损失”分布图（2000 年-2006 年）	50
图 3.15	兰州市火灾“频率—损失”分布（2003 年-2006 年）	50

图 3.16 武汉市火灾“频率—损失”分布 (2003 年-2006 年)	51
图 3.17 葫芦岛火灾“频率—损失”幂律关系的时间稳定性	52
图 3.18 兰州火灾“频率—损失”幂律关系的时间稳定性	53
图 3.19 武汉火灾“频率—损失”分布幂律关系的时间稳定性	53
图 3.20 哈尔滨火灾“频率—损失”分布幂律关系的时间稳定性	54
图 4.1 两种事件时间序列生成方法示意图.....	58
图 4.2 由日本森林火灾所得到的点过程时间序列	61
图 4.3 1996 年日本森林火灾时间间隔序列.....	62
图 4.4 日本森林火灾“频率—时间间隔”分布 (1999 年和 2000 年)	63
图 4.5 日本森林火灾时间序列的 Fano 因子 (1996 年至 2000 年)	64
图 4.6 日本森林火灾时间序列的 Allan 因子 (1996 年至 2000 年)	64
图 4.7 面积阈值 A_{th} 对 FF 曲线及火灾时间分布的影响	66
图 4.8 面积阈值 A_{th} 对 AF 曲线及火灾时间分布的影响	67
图 4.9 由日本城市火灾所得到的点过程时间序列	69
图 4.10 由图 4.9 得到的火灾时间间隔序列.....	69
图 4.11 日本 1998 年和 1999 年城市火灾频率—时间间隔分布图.....	70
图 4.12 日本 1998 年至 1999 年城市火灾时间序列的 Fano 因子	71
图 4.13 日本 1998 年至 1999 年城市火灾时间序列的 Allan 因子	71
图 4.14 损失阈值 L_{th} 对 FF 曲线及火灾时间分布的影响.....	73
图 4.15 损失阈值 L_{th} 对 AF 曲线及火灾时间分布的影响.....	74
图 4.16 日本宫崎县都城 1998 年至 1999 年每小时平均相对湿度值	76
图 4.17 1998 年 1 月 1 日至 1 月 20 日平均相对湿度时间序列	76
图 4.18 1998 年至 1999 年日本宫崎县都城平均相对湿度序列的 FF 因子	77
图 4.19 1998 年至 1999 年日本宫崎县都城平均相对湿度序列的 AF 因子	77

中国科学技术大学学位论文原创性和授权使用声明

本人声明所呈交的学位论文,是本人在导师指导下进行研究工作所取得的成果。除已特别加以标注和致谢的地方外,论文中不包含任何他人已经发表或撰写过的研究成果。与我一同工作的同志对本研究所做的贡献均已在论文中作了明确的说明。

本人授权中国科学技术大学拥有学位论文的部分使用权,即:学校有权按有关规定向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版,允许论文被查阅和借阅,可以将学位论文编入有关数据库进行检索,可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

保密的学位论文在解密后也遵守此规定。

作者签名: 王健

2009年6月4日

第1章 引言

- 研究背景
 - ✓ 火灾研究的重要性
 - ✓ 火灾系统的复杂性
- 研究现状
 - ✓ 森林火险分析
 - ✓ 幂律分布与自组织临界性
 - ✓ 系统的时间特征
- 论文的章节安排

1.1 研究背景

1.1.1 火灾研究的重要性

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。火灾的危害巨大，特别是森林火灾，不仅毁坏自然资源、破坏生态环境，而且可能造成巨大的生命和财产损失。表 1.1 给出了中国近几年的森林火灾基本情况（中国统计年鉴，2007）。

中国的森林面积大，森林覆被率低，属于少林国家。而森林火灾严重，年森林过火面积大，年火烧森林覆被率大。鉴于此，深入开展林火研究，进行森林火灾预测方法研究，为预防和防治森林火灾提供指导，科学保护有限的森林资源已是当前的一个重点。

另一方面，城市火灾的危害形势也日趋严峻。城市是人类活动的中心舞台，伴随现代化水平的快速提高，城市人口集中、建筑集中、财富集中、活动集中、生产集中的聚集效应不断增加。城市成为产业和人口高度聚集的地区，成为一定区域的经济、政治、科学技术和文化教育的中心。《中华人民共和国消防法》颁布实施以来，城市消防规划、城市公共消防基础设施建设、火灾预防和灭火救援装备实力等方面都得到了很大的发展和提高。但火灾对人民生命财产的威胁依然严重，我国当前的火灾形势依然严峻。随着城市化发展，消费结构、生产方式向多元化发展，公共场所、大型商场、高层建筑、企业等场所生产用油、

用气、用电的消耗量越来越大，所带来的危险越来越高，其火灾事故的风险更随之增加。表 1.2 给出了近年来我国城市火灾的部分统计数据。虽然总体看来有所下降，但是总量依然居高不下，火灾防治的任务依然十分艰巨。

表 1.1 中国森林火灾基本情况

年 份	森林火灾 次数	火场总面积 (公顷)	受灾森林面积 (公顷)	直接经济损失 (万元)
2000	5934	167098	88390	3069
2001	4933	192734	46181	7409
2002	7527	131823	47631	3610
2003	10463	1123751	451020	37000
2004	13466	344211	142238	20213
2005	11542	290633	73701	15029
2006	8170	562304	408255	5375

表 1.2 2000 年至 2007 年全国火灾基本情况

年 份 \ 四项指标	火灾起数/起	死亡人数/人	受伤人数/人	直接财产 损失/亿元
2007	159000	1418	863	9.9
2006	223000	1517	1418	7.8
2005	235941	2496	2506	13.6
2004	252704	2558	2969	16.7
2003	254811	2497	3098	15.94
2002	258315	2393	3414	15.44
2001	216784	2334	3781	14.03
2000	189185	3021	4404	15.22

总体来说，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。如何科学地防治火灾、减少火灾带来的损失成为目前急需解决的问题之一。

1.1.2 火灾系统的复杂性

火灾系统本身是一个复杂系统。它的复杂性主要表现在两个方面：

首先，火灾本身具有复杂性：火灾的孕育、发生和发展包含着多种物理化学作用，比如流体湍流流动、相变、传热传质和复杂化学反应等，涉及到了物质、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动力学过程，而这个过程是一种具有多相、多尺度、非定常、非线性、非平衡态的三维过程。这方面的复杂性主要体现为火灾过程中的复杂性行为，比如火灾中的各种现象，包括建筑火灾中的轰燃和回燃现象、森林火灾中阴燃向明火的转化、飞火、火旋风以及烟气倒灌和淤积等等。

其次，火灾系统涉及多种因素之间复杂的相互耦合作用，火灾的影响因素与人、材料、环境及其它干预因素等等之间都会相互影响。一次火灾的发生同时会受到可燃物本身、环境条件、人为因素、地形条件、生态环境等等多种因素的相互影响。

我们以森林火灾系统为例来看一下火灾系统的复杂性。

首先，森林火灾系统包含了多个子系统，例如：森林子系统、气候子系统、火灾子系统、人的因素、地理子系统、生态子系统等等各种不同的子系统。而各个子系统本身的演化过程就非常复杂。比如，在森林子系统中，存在着树木的生长、繁衍与死亡等行为；森林中树木之间通过各种关系相互连接形成树丛，小的树丛又通过树木的生长连接成为大树丛，而不同的树种则共同形成植物群落，最终由这些植物群落构成了整个森林。在气候子系统中，包含了多个过程：地面水受热变成水汽蒸发到大气层，大气层的水汽与尘埃凝结形成云，而云层又会影响日照的辐射，同时日照会影响到大气及地表温度；同时水汽对辐射的吸收与成云能力会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，同时还会影响降雨的发生……而火灾子系统则更复杂。火灾的发生本身就是一个非常复杂的过程，包含了多种可能发生原理和机理；同时火灾的发生还具有很强的偶然性，特别是自燃发火、雷击火等等的发生大多不受控制，其随机性非常强；在火灾发生之后，其发展过程的不可预见性又增加了火灾的复杂程度，比如地下火、阴燃、地表火、树冠火、飞火等等常常不可预见，虽然有一定的发生条件，但是往往难以准确判断。同时由于人类活动范围的扩大，很多森林火灾系由人为因素引起，包括纵火、吸烟等各种因素，这些人为因素又涉及到复杂的社会学、心理学等。另外，火灾的发展和蔓延还受到地形条件的影响，而地形则更是复杂多变，没有规律可循。

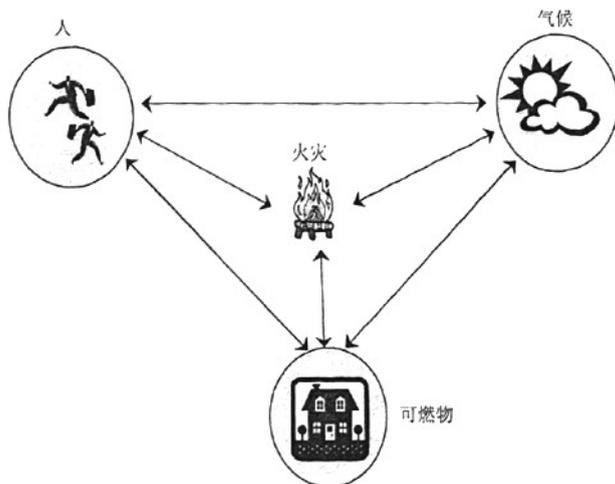


图 1.1 火灾系统是涉及火灾、气候、人、可燃物等因素的复杂系统

城市火灾系统相对于森林火灾系统来说，则具有更多的复杂性。一般来说，森林火灾受到自然因素的影响更大，而在城市火灾系统中，除了会受到自然因素包括气象条件、地形等的影响外，人为因素的影响更大，其发生的不可控性和随机性也更高；同时，由于城市中建筑林立，建筑内部各种建筑材料、装饰材料等对火灾的发生和发展都会有非常大的影响。

因此，火灾系统是一个涉及自然、社会、经济的复杂系统，它是一个具有自适应性、随机性、不确定性的非平衡非线性耗散系统。由于火灾系统的复杂性，而人们对于火灾系统的科学研究和探索目前仍处于初始阶段。例如：火灾的发生和发展有没有确定性？如果有，它又具有什么样的确定性规律？火灾发生和发展的机理是怎样的？如何利用科学知识对火灾进行防治？这些越来越成为社会和公众密切关注的科学问题。随着动力学系统理论的成熟和非线性科学和复杂性科学的发展，对火灾系统的科学研究逐渐具有了理论基础。

复杂性科学对复杂系统的研究开始于 20 世纪 80 年代。传统的牛顿宇宙观认为世界具有简单的一般规律，其发生和发展具有可预测性；而复杂性科学则不同，它不依赖牛顿式的宇宙观，它所探讨的是复杂系统中，各组成部分之间相互作用所涌现出的特性，如突现性、非稳性、非线性、不确定性、不可预测性等等特征 (Waldrop 1997)。我国学者提出了复杂巨系统的概念，并对该系统作了深入研究和探讨，他们认为复杂巨系统是开放的，复杂性是该系统的动力学特性 (钱学森等, 1990; 王寿云等, 1996; 戴汝为, 1997)。

一般来讲，简单系统可以分为两类，一类是系统中的个体对象比较少，而且各个体之间的相互作用也比较弱，另一类具有大量行为相近的个体，比如封闭的气体，因此，对于简单系统而言，我们可以应用简单的统计平均的方法来

研究系统中个体的行为。相对于牛顿时代的简单系统而言，复杂系统与它具有根本性的不同。复杂并不一定与系统的规模成正比，复杂系统要有一定的规模，但也不是越大越复杂。复杂系统中的个体一般都具有一定的智能性，这些个体都可以通过自己的规则根据自身所处的部分环境进行智能判断或决策。复杂性科学所感兴趣的正是这种有组织的复杂系统，其各个元素之间有很强烈的耦合作用。

对于一个复杂系统，整个系统的性质并不能用子系统性质的简单相加得到。同时，系统中局部的规则和行为对整个系统的宏观行为即有序行为和组织的出现有重要的影响作用（Waldrop 1997; Lewin 1992）。复杂性科学的研究深度正是着重于揭示客观事物构成的原因及其演化的历程，而不仅限于对客观事物的描述，并力图尽可能准确地预测其未来的发展。通常来说，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。当这些子系统或基本单元相互作用时，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临近基元状态的影响。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。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，这也表现出了复杂系统的突现性特征。目前，复杂性科学的研究方法主要是定性分析与定量计算相结合、微观分析与宏观研究相结合。一种方法是利用计算机模拟的方法，通过模拟复杂系统中个体的行为，使个体在假定的虚拟环境下进行相互作用并演化，从而让系统的复杂性行为“自下而上”的“涌现”出来，比较常见的方法是利用元胞自动机的方法通过计算机模拟来实现；另一方面，通过研究人脑面对复杂系统是如何解决问题发展而来的方法则是另一种“自上而下”的解决问题的方法（梅可玉，2004），比较常见的方法就是利用人工神经网络来进行研究。对于复杂系统的研究，主要研究手段有元胞自动机、遗传算法、博弈论及组合优化等。“简单的规律可以产生复杂的结构，复杂的情形下也能遵循简单的规律”（Goldenfeld and Kadanoff 1999）是复杂性科学中的一个重要研究思想。

上面所说的一般研究复杂系统的方法，大多是利用模拟的方法，其研究重点主要集中在分析其规律形成机制。对于一个真实的复杂系统，特别是对火灾系统而言，要了解它的内在机制，我们首先要研究它具有哪些简单的规律，如何得到它们的特征参数，以及火灾事件在时空分布上有什么样的规律，利用计算机模拟得到的结果是否与真实系统符合，如何改进模型等。

同时，火灾科学作为一门自然科学在一定程度上必然受到自然条件的影响，其中气象因素对火灾的防治、发生和损失在宏观和微观上都会有所影响，例如

降雨量和温度这两个因素，在温度偏高、降雨量偏少的情况下火灾较易发生，出现火灾后也较难扑灭，损失也比较惨重。国内曾有不少人对此进行了专门的研究，有人提出（崔愕，1995）：对基于城市火灾发生和发展过程结合整个社会的经济、技术和自然因素三方面的综合考虑，对火灾发生的大气候背景的小气候条件进行研究，建立必要的小气候检测理论模型及实施系统，结合气象因素对城市火灾进行早期的预防，以减少城市火灾的危害，具有相当程度的实际价值和应用背景。

1.2 研究现状

1.2.1 森林火灾火险分析

为了防治森林火灾，除了研究森林火灾的发生规律和如何扑救森林火灾以外，如何预测森林火灾的发生、发展情况也是一个重要课题，而这正是森林火险分析的主要内容。做好森林火灾的火险分析有着极为重要的意义：首先，通过森林火险分析我们能够确定（估计）森林火灾发生的概率，这样我们就可以提前做好森林防火的资源配置、人员调度，适当安排资金分配比例，在高火险地区投入较大的人力、物力来防止特大火灾的形成，同时可以避免因安排不当造成的资源闲置、浪费现象。其次，在林火发生以后，通过火险分析我们可以确定火蔓延基本参数，为森林防、灭火工作提供科学的理论指导和必要的技术支持以达到尽量减少由于林火造成的损失，降低灭火工作的投入的目的。同时确定了火蔓延的基本参数也可以有效地指导人员疏散，避免人员伤亡。

由于森林火灾的发生和发展要受到气象条件、植被条件、地形条件和人的活动等的影 响，通过对这些影响因素的分析就可以确定森林火灾发生可能性的大小和火灾信息，确定火险等级，从而预测火灾的发生、发展情况，指导森林火灾的防治。

影响森林火灾的因素很多，如：温度、湿度、风速、降雨量、树种和地形条件等等，林火的发生往往是这些因素综合作用的结果。目前，美国、加拿大、澳大利亚等国家已经发展了森林火险分级方法，通过对多种气象参数的分析确定火灾风险（Lee et al. 2002; Bradstock et al. 1998; Deeming et al. 1977）。我国也制定了行业标准《全国森林火险天气等级》（LY1172-1995）。森林火险分级方法是利用每天的温度、风速、降水量、湿度等参数预测火灾发生概率和蔓延速度，有时还要考虑地形、可燃物条件等。如何找到这些参数与森林火灾之间的相关性是其中的关键问题，对此已经展开了很多的研究工作。

植物含水量是决定森林火险的重要参数。Cruz 等人 (2003) 研究了树冠高度、风速、可燃物含水量等与森林树冠火的发生情况之间的关系。他们假定这些参数都是独立变量, 利用逻辑斯蒂回归 (logistic regression) 进行了分析, 结果表明, 对树冠火发生情况的预测达到了 66%到 90%的准确度。Castro 等人 (2003) 测量了水犀科植物的含水量与气象参数之间的关系, 结果表明含水量与气象参数之间存在稳定的关联, 利用多个地点的样本进行验证表明, 相关系数达到 80%, 这为森林火险的预测提供了一个可靠的方法。Viegas 等人 (2001) 对植物的含水量进行了测量, 得到了活可燃物含水量的季节变化和年度变化, 并根据变化情况将可燃物进行了分类; 将植物含水量与邻近气象站记录的气象参数进行了比较, 并得到了植物含水量与干旱系数的关系。

Flannigan 等人 (2001) 利用加拿大的森林火险分级系统对未来的森林火灾变化情况进行了模拟, 得到的结果与古生态数据得到符合, 表明该系统可以预测未来的火灾情况。Williams 等人 (2001; 1999) 利用澳大利亚的森林火险指数研究了温室效应、厄尔尼诺—南方涛动现象对森林火灾的影响, 表明日最小湿度是受影响最大的气象参数, 从而影响了森林火险的变化。

人类对森林的采伐会改变局部的气候条件。Hoffmann 等人对亚马逊和印度尼西亚森林的分析表明, 森林面积的减小, 增加了气温、风速, 减少了降水和相对湿度, 从而增大森林火灾风险 (Hoffmann et al. 2003)。他们还研究了森林火灾、气候和植被之间的相互作用, 高温天气增加火灾频率, 增大树木损失; 同样, 对森林的破坏增大温度、风速, 降低了降水量和相对湿度, 进而增大了火灾频率 (Hoffmann et al. 2002)。Nepstad 等人 (2004) 开展了类似的工作, 分析了亚马逊地区干旱气候对森林可燃物和树森生长的影响。

林火的预测也是火险分析的主要内容。根据森林燃烧环理论, 林火的发生又在很大程度上与天气状况相关, 因此, 火险天气的预报就成为了森林火险分析的一部分内容。目前的研究表明, 常规的林火预测方法由于影响因素之间存在复杂相互作用, 使得林火概率的预测十分复杂 (Satoh et al. 2004, 2003a, 2003b, 2002; Finney et al. 1998)。一般森林火险预测主要有以下几种方法。

森林火灾变化趋势与周期分析 (杨美和, 张淑玉, 1997)。变化趋势分析是指分析火灾序列的大体变化情况, 即描述时间尺度的演变过程, 主要有两种方法: 一是画历史曲线图, 分析其演变规律, 根据各种因素影响, 分析预测未来变化趋势; 二是对序列用非线性多项式来拟合序列变化, 建立曲线方程。周期分析是将森林火灾 (火灾次数或者火烧面积) 的不规则的波动, 看成由若干个规则波动迭加而成的。

天地生遥相关法 (张强 等, 1996)。Dr. Simard 详尽考虑了厄尔尼诺时间

与美国 48 个州的野地火活动的关系，发现凡厄尔尼诺年美国 22 个州野地火活动明显下降。1990 年陈正洪研究发现，重大天地现象与湖北省神农架林区林火活动严重年相吻合，如太阳活动峰或谷值年、厄尔尼诺年、南方涛动指数 (SO) 中两者或三者出现，当年或下年林火活动频繁。之后，王述洋在大兴安岭发现了类似现象，并提出了区域高风险时段天地生预报理论，主要用遥相关法，选择若干 (6 个) 气象因子异常情况，研究灾害群发性，并在此基础上，用相应的灾害群的异常预测未来一段时期内的高风险时段。6 个因子是 ENSO (厄尔尼诺/南方涛动)、SST (北太平洋海温)、太阳黑子、中国地震次数、地球自转变化及气象要素，对每隔因此推出相应的特征函数，依其相关系数大小为权重建立总的特征函数，据此做出季、年高风险时段预测。

火灾发生原理法 (张强 等, 1996)。一种较为广泛的方法是通过气象参数与森林火灾之间进行相关性分析，得到各种气象参数对火灾的影响。前苏联学者曾于 80 年代利用一下四因子预测春季火灾强度，各因子重要程度从小到大依次为：秋冬季降水、预测的春季水热系数、去年夏天的草高、融雪日期。日本学者 Satoh 利用风速、气温、有效湿度 (带历史加权的相对湿度) 计算火灾发生概率。

Rothermel 在 1991 年研究了 1988 年黄石公园的火灾行为。他对 1988 年黄石地区森林火灾发展趋势提出了长期的、达 30 天的预测。他将预测结果和实际火灾进行了比较，并认为持续的干燥是导致黄石火灾发展的一个主要因素。这不仅仅是因为火灾在干燥燃料中传播的更快，还因为干燥的气候使火灾扑救很困难。与针对 1988 年火灾季节发展而来的研究结果 (Werth, 1990; Simard, 1990; Haines, 1988) 相比，Rothermel 所用的方法，即预测每个气候等级出现的天数，对于每天的火灾行为预测来说是一个更加合理的方法。

美国研究人员 Latham (Latham et al. 1993) 研究了能使火灾熄灭的降雨出现的概率。在他们的研究中，采用的一个标准是：降雨量要求“五天或者更短时间内降雨量至少大于 0.5 英寸”。在研究中，主要是通过 1970 年至 1985 年期间北部山区中四个气象站记录的从 7 月 1 号至 8 月 15 号之间每天的降雨量数据，计算到某一指定时间上述标准出现的累积概率，同时可以计算任意两个时间段中这种概率的大小。概率密度函数如下：

$$f(\omega; \eta, \sigma) = (\eta / \sigma) (\omega / \sigma)^{\eta-1} \exp \left[-(\omega / \sigma)^\eta \right] \quad (1.1)$$

累积概率公式：

$$F(W; \eta, \sigma) = 1 - \exp \left[-(\omega / \sigma)^\eta \right] \quad (1.2)$$

他们采用了气象统计模型中普遍适用的 Weibull 分布函数作为所研究对象

的概率密度函数，以此为基础来完成上述工作。研究者是通过最小二乘法的系数来确定参数 η 和 σ 。计算结果显示，此概率分布很好地和 Weibull 概率分布相吻合。

D.X. Viegas 和 M.T. Viegas (1994) 利用 1975 年至 1992 年葡萄牙每年的火灾面积和降雨量数据，研究了葡萄牙降雨量与火灾面积之间的关系。研究发现，从 1 月到 4 月（对应冬季和早春）的降雨量和年火灾面积表现出了非单调关系，主要是由于这两个季节所涉及到的燃料积累和土壤中水分储存两种机制之间的相互矛盾。从 6 月到 9 月（葡萄牙的主要火灾季节）的降雨量和火灾面积之间表现出反比关系。他们认为 Coimbra 的研究结果和葡萄牙国内其他地方具有很大的相似性，此结果可以推广到整个国家区域内，甚至只要做适当的变化，即可适用于世界上其他地区，特别是有地中海气候的地区。

1.2.2 幂律分布与自组织临界性理论

对于火灾系统而言，我们除了要建立一种火险分级的方法对火灾进行预测以外，还要研究其火灾的发生规律，探索火灾的分布，包括时间分布和空间分布，为防治火灾提供科学依据。本文所说的空间分布是指火灾的大小，即尺度（强度）分布规律。

首先，我们来看一下自组织临界性和幂律分布的概念以及其发展过程。

自组织临界性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。

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。过去的若干年中，人们通过对自然界下述几类经验现象如尼罗河水流的变化、灾难事件、心率涨落、具有几何分形特征的自然事物、DNA 序列、细胞膜电位、音乐旋律、高速公路车流的变化观察和认识，发现它们满足某种共同的规律。Johnson (1925) 首先在热阴极的电流噪声中发现其功率谱 $S(f)$ 与频率谱 f 反比，存在 $1/f$ 规律这一特征，信号的某个分量在时间尺度上的强度与该时间尺度的大小成反比，即时间尺度大的波动，出现的机会要少一些，时间尺度小波动，出现的机会要多一些。比如对于地震系统来说，大震并不常见，而小震却时有发生；对河网水系来说，主流(干流)并不多，而支流分岔较多。这些现象的一个共同特点就是，它们都可以找到一个统计量的分布在其双对数图上是一条直线。哈佛大学的语言学专家 Zipf (1949) 在研究英文单词出现的频率时，发现如果把单词出现的频率按由大到

小的顺序排列, 则每个单词出现的频率与它的名次的常数次幂存在简单的反比关系: $f_1(r) = r^{-\alpha}$, 这种分布就称为 Zipf 定律, 它表明在英语单词中, 只有极少数的词被经常使用, 而绝大多数词很少被使用。实际上, 包括汉语在内的许多国家的语言都有这种特点。意大利经济学家 Pareto (1896) 研究了个人收入的统计分布, 发现少数人的收入要远多于大多数人的收入, 提出了著名的 80/20 法则, 即 20% 的人口占据了 80% 的社会财富。个人收入 X 不小于某个特定值 x 的概率与 x 的常数次幂亦存在简单的反比关系: $P(X \geq x) \sim x^{-k}$, 上式即为 Pareto 定律。Zipf 定律与 Pareto 定律都是简单的幂函数, 一般称之为幂律分布; 还有其它形式的幂律分布, 像“名次—规模”分布、“规模—概率”分布, 这四种形式在数学上是等价的。幂律分布表明对于所观察的量没有一个特征尺度, 各种规模大小的量都可以出现。这种现象一般被称为无标度现象, 即系统中个体的尺度相差悬殊, 缺乏一个优选的规模。那么, 是什么导致自然界中千差万别的现象能够产生如此简单而相似的规律? 幂定律后面又隐藏着什么样的物理机制?

普利高津于 1987 年提出了耗散结构理论 (Nicolis and Pringogine 1987)。他们在研究中发现, 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确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) 创立了协同学, 研究了远离平衡态的相变 (Haken 1987)。然而耗散结构理论和协同学理论解决了耗散结构的动力学系统形成和出现的条件、环境和一般动力学问题, 却没有回答系统演化的模式问题。正是在这种背景下, Brookhaven 实验室的 Bak 等人 (1987) 提出了自组织临界性概念, 并对上述问题作出尝试性的解释和探索。随着自组织临界性理论的发展, 逐渐成为了解释系统幂律形成机制并且影响深远的理论。该理论认为, 多种要素相互作用的复杂系统, 能够自发地向临界状态发展; 在这种自组织临界状态下, 系统中一个小的事件将能够导致大的事件出现甚至发生状态突变。他们利用一个元胞自动机模型—“沙堆模型”来解释自组织临界性: 设想在一个平台上通过任意加沙子来堆砌一个沙堆, 每次加一粒, 随着沙堆的升高, 它的坡度逐渐增加, 一旦沙堆的坡度达到某个阈值, 就会发生一次坍塌, 这时系统将演化到一个临界状态, 系统恰好处于稳定性的边缘上, 此时每增加一粒沙子就会产生具有各种时间和空间尺度的坍塌。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, 每次沙堆塌落的尺度大小不一, 经研究发现, 沙堆“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。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。幂律分布是自组织临界系统在混沌边缘,即从稳态过渡到混沌态的一个标志,利用它可以预测这类系统的相位及相变。

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,即幂律分布是自组织临界性的必要条件而非充分条件。有很多系统可以演化得到临界状态,而且其“频率—尺度”或“频率—强度”也具有幂律分布,然而却不是真正的自组织临界性系统。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。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。

自组织临界性是关于复杂动力学系统的时空演化特性的一个概念,是一种可以解释复杂性如何产生的一般机制的理论概念,即存在这样一种复杂动力学系统,它能自发演化到某种“自组织临界状态”,在这种状态下,系统的时空动力学行为不再具有特征时间和特征空间尺度,而是表现出满足幂律分布的时空关系,一般可解释自然界中四种重要的现象:突变事件的规则性、标度律(Bak 1996)、 $1/f$ 噪声和分形(Bak et al. 1988),相互作用正是系统演化行为的根源。而“自组织临界性”正是从系统演化方面成功地解释了复杂系统的时空行为特性。自组织临界性概念有助于刻画这种多种要素相互作用的大系统的演化行为。物理学定律是简单的,而自然界其实是复杂的;自组织临界性理论的贡献在于,发现了这种耗散动力学系统的行为演化模式—即时间效应上的 $1/f$ 规律和空间结构演化的标度不变的自相似(Bak 1996)。

研究自组织临界性的一个重要手段是通过计算机模拟,建立计算机模型进行理论解析和数值模拟。比较常见的几种模型有:沙堆模型(Bak et al. 1988)、滑块模型(Turcotte 1989)、森林火灾模型(Drossel et al. 1992)等。Drossel 等人提出的森林火灾模型是一个随机元胞自动机模型,它结合了蒙特卡洛模拟,定义在一个边长为 L 的 d 维超立方体网格上,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，大的火灾次数较少，小火灾的次数较多，如图 1.2 所示。

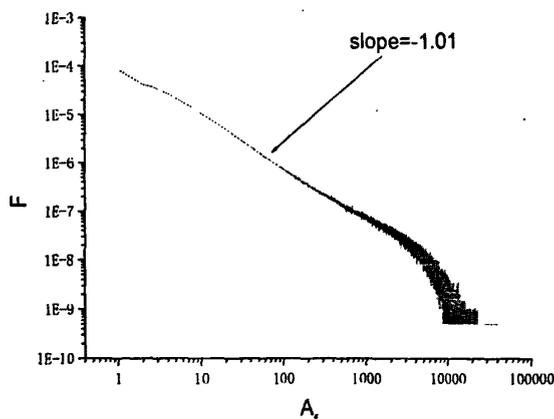


图 1.2 森林火灾模型的“频率—面积”幂律关系曲线。在双对数坐标下幂律关系表现为一条直线，图中森林火灾模型的“频率—面积”分布拟合直线的斜率为-1.01，根据 Drossel 对森林火灾模型进行理论分析的结果，这个斜率的理论值为-1。

随着森林火灾模型的提出，对于森林火灾的研究逐步开展起来。包括对森林火灾模型的完善、理论分析、解析分析和对模型的改进和修正。最初的研究主要都集中在对模型本身的研究上，研究它的自组织临界性特征、模型本身具有的标度行为，以及求取自组织临界性参数等。当研究者们把焦点投向真实世界时，他们发现自组织临界性森林火灾模型可以模拟和解释很多真实的系统和现象。

Drossel 和 Schwabl (1995) 发现表面化学反应的自组织临界性可以用森林火灾模型来解释。Nagel 和 Paczuski (1995) 研究发现交通阻塞中同样具有自组织临界性。Bauer 和 Pratt (1996) 对具有自动换行功能的文字处理软件中的换行操作进行了分析，他们发现自动换行的数目分布满足幂律关系，因而这样的文字处理系统也具有自组织临界性特征。Robert 和 Turcotte (1998) 用森林火灾模型解释了战争事件的分形特性和自组织临界性。Sole 等人 (1999a, 1999b) 与 Fukami 等人 (1999) 讨论了生态进化中的自组织临界性。研究发现其他很多复杂系统的突变行为也都遵循某种简单模式，如地震 (Carson 1989)、Internet 网

络 (Barabasi 2000, 1999; Adamic 2000; Huberman 1999; Albert 1999; Lawrence 1998)、姓氏分布 (Miyazima 1999)、降水 (Pinho 1998)、论文引用 (Redner 1998)、经济活动 (Gopikrishnan 2000; Blank 2000; Okuyama 1999)、人口分布 (Blank 2000)、生物物种分布 (Crawley 2001) 等。Li 等人 (2000) 用自组织临界性解释了生态系统中分形的形成。

对于真实火灾系统的自组织临界性研究目前也已经开展。1998年, Malamud 等人 (1998) 利用美国及澳大利亚的部分真实森林火灾数据, 与森林火灾模型的计算结果进行了对照, 结果发现真实的森林火灾表现出较好的“频率—面积”幂律关系, 具有自组织临界性。这项研究成果使得森林火灾模型与真实森林火灾建立了联系, 他们研究发现: 如果已经知道了某处森林在过去几十年的森林火灾历史记录, 就可以预测出未来 10 到 50 年的森林火灾发生的大体情况; 对于中、小火灾的有效扑救会使大规模火灾发生的可能性增加, 因此可以用中、小火灾的“频率—面积”关系评估大规模森林火灾发生的可能性; 可望通过森林火灾模型的模拟演化结果来指导森林火灾的防治。该项研究对于森林火灾的防治具有重大的意义。Ricotta 等 (1999) 利用沙堆模型研究了野地火数据 (取自意大利的利古里亚区 Liguria) 的幂律关系, 由此他们认为火灾数据的分布是一个分形, 并根据分形的定义求得了火灾数据的分形维数。Turcotte (1999) 和 Malamud (1999, 1998) 论述了以统计力学来研究地震、森林火灾和野地火、塌方等自然灾害的“频率—尺度”关系, 以及河流、树木分支的自相似性的方法。Doyle 和 Carlson (2000) 从森林中的隔离带和防火设施等资源与火灾面积的关系出发, 对真实火灾数据进行了分析, 发现并解释了火灾数据的“频率—面积”幂律关系。Song 等人 (2001) 研究了中国的森林火灾的自组织临界性特征, 发现中国森林火灾的“频率—面积”分布同样满足幂律关系, 并利用加入“树木抗火性”的森林火灾模型解释了实际大火分布与模型幂律关系发生偏离的现象。

1.2.3 系统的时间特征

任何一个系统, 除了具有一定的空间大小分布行为, 如地震系统的“频率—强度”分布、网络节点的度分布等等, 由于其事件的发生时间构成了一个时间序列, 这个序列即会有时间分布特征。比如, 历史地震和现今地震大量资料的统计表明, 地震活动在时间上具有一定的周期性, 即在一个时间段内发生地震的频次高、强度大, 称之为地震活跃期; 而在另一个时间段内发生的地震相对频次低、强度小, 称之为地震平静期。一般来说, 对于一个系统而言, 其内部事件的出现可能具有一定的关联性, 而事件之间的相关性首先就表现在事件发生时间的丛集性 (Clustering), 而分形及涨落方法成为探讨这类事件性过程

规律性的重要工具 (Telesca 2007; 苟学强等, 2006a, 2006b; Turcotte et al. 2004; Sornette 2002; 罗灼礼, 孟国杰, 2002)。相关性是自然界中普遍存在的一种现象, 它反映了系统在演化过程中, 不同时期状态的相互关系, 一般有长程相关和短程相关两种关系。长程相关是指系统将来的状态对过去有“记忆”, 例如系统当前的状态为增加, 则系统在很长的将来区间内保持增加的趋势。这个效应也叫“joseph”效应。反之, 如果是短程相关, 则系统在很长的将来区间内有反转的趋势, 只在很近的将来区间保持历史的趋势 (Steeb 1999)。研究表明, 很多实际系统的事件之间都具有长程相关性, 比如尼罗河的河水流量变化就是典型的长程相关实例。DNA 序列、文章和音乐的符号序列、心跳和步态涨落等都具有长程关联性, 并且其衰减符合指数规律, 即存在自相似结构特征。关联性是系统在时间上的分布特征之一。

Boffetta 等人 (1999) 曾对太阳耀斑做过研究, 发现相邻两次太阳耀斑之间的间歇时间具有幂律分布, Christensen 等人 (2002) 发现地震的时间间隔同样也满足“频率—时间间隔”幂律关系, 并且认为地震是一个分级相关性的事件过程。Peters 等人 (2002) 研究了降雨的时间间隔即干旱时间 D 和干旱的次数 $N(D)$ 之间的关系, 发现其满足幂律分布, 斜率为-1.42。研究发现, 市场价格变化中的物价稳定期长度也满足幂律分布 (Kaizoji T. and Kaizoji M. 2004)。Telesca 等人 (2005a) 研究了意大利 Basilicata 地区的降雨的标度行为, 发现降雨时间具有分形的特征。

对于火灾系统而言, 它除了具有“频率—面积”或者“频率—损失”分布这种描述其空间大小分布特征的方法, 它在时间尺度上会表现出什么样的特点? Lasaponara 等人 (2004) 研究了意大利 Calabria 地区每年的森林火灾所形成的时间序列, 发现森林火灾序列存在着很强的聚类性。Telesca 等人 (2005b) 利用时间序列分析的方法, 研究了意大利 Gargano 地区的森林火灾数据, 发现了该地区森林火灾的时间分形特征, 并且认为空间尺度上的自组织临界性行为可能与时间标度行为有关联。森林火灾的这种时间分形特征是一种普遍现象还是部分地区或者部分时间段内的特殊现象? 城市火灾系统的时间分布有没有类似特征? 火灾与气象参数之间有着密切的联系, 那么气象参数是否具有时间分形?

1.3 论文的章节安排

通过对目前的研究现状的分析可以看到, 对于森林火灾的研究目前进行得比较多的还是森林火灾模型的研究, 而对真实森林火灾的统计分析工作到目前

为止尚处于起步阶段，目前只有部分国家和地区的森林火灾系统的自组织临界性特征得到研究。是否其他国家和地区同样满足这种规律？而且对于其它类型火灾系统，比如城市火灾系统的研究更是刚刚开始，不同的城市火灾系统是否也具有自组织临界性特征？如果有，是否具有普遍性？

同时，对于火灾系统的研究，大多集中在其空间大小分布，即强度的分布，而对于系统的时间分布特征研究也还刚刚起步，目前只见到意大利有所研究。另外，火灾受到气候、人类活动等的影响，它们之间存在着什么样的联系？如何对各种因素对火灾发生的影响进行定量化？因此，本论文的研究目标有三个：一是针对火灾与各种影响因素，探寻其影响规律并进行定量化拟合，探索火灾预测方法；二是对不同国家和地区的森林、城市火灾系统，研究其空间大小分布和分形特征，寻找其共性规律和差异（这里所说的空间分布，是指火灾的大小即规模。具体来说，森林火灾中是指火灾面积，城市火灾中则用火灾的损失来表示）；三是研究火灾系统的时间分形特征。

因此本文第二章利用森林火灾统计数据，针对8种常见气象参数以及人口分布，研究它们与火灾发生概率之间的关系，为火险分级预测的方法提供定量化的概率计算。特别是分析了人口密度对森林火灾的定量影响规律。

第三章针对火灾系统的空间尺寸分布特征展开论述，研究其自组织临界性特征。这一章分为两个部分：真实森林火灾系统和城市火灾系统。第一部分主要以日本的森林火灾为例，分析其火灾的“频率—面积”分布规律，并与中国和美国的森林火灾系统进行对比分析。第二部分，围绕城市火灾系统进行研究，分别对日本以及中国部分城市的火灾数据进行处理，分析比较其“频率—损失”分布。

第四章主要把焦点聚集在火灾系统的时间分布特征上。任何一个系统，都有两种特征：空间分布和时间分布。本章采用统计分析法，以日本森林和城市火灾为例，使用变异系数分析、“频率—时间间隔”、分形分析中的Allan因子和Fano因子对火灾的时间丛集与自相似特征进行探讨，研究火灾的时间分形特征以及火灾强度阈值对火灾时间分布的影响，比较森林火灾系统与城市火灾的分形特征，并将火灾与其影响因素—相对湿度的分形特征进行对比分析。

第五章是结论和展望部分。

接着是参考文献部分，列出了文中涉及到的所有文献。

文中所涉及到的主要符号按出现次序列在目录前面，表格和图例目录列在引言前面，以方便查询。

第2章 一元相关性分析

- 引言
- 森林火灾相关性分析
 - ✓ 数据处理方法
 - ✓ 气象因素与火灾概率的一元相关性
- 城市火灾与气象因素的相关性
- 人口密度对森林火灾的影响
- 本章小结

2.1 引言

森林火灾的发生、蔓延和分布受到人类活动、天气和燃料类型（或者说是树种）等因素的影响。在较长时期内，森林火灾“频率-面积”分布满足幂律关系（Song et al. 2001; Malamud et al. 1998），这个幂律关系是和复杂系统，例如因特网、地震、传染病等的自组织临界性相关的。特大火灾和小火灾的分布又分别存在“重尾”现象和“平头”现象，从而偏离幂律关系曲线。不同年代的森林火灾分布满足相似的幂律关系，小火灾越多，特大火灾就越少。城市火灾的“频率-面积”分布也满足幂律关系，同时存在“平头”现象（Song et al. 2003）。上述这些自组织临界性的形成以及偏离现象被认为是降雨、人类的防火措施和燃料类型的影响所造成的。

由于森林火灾的发生和发展要受到气象条件、植被条件、地形条件和人的活动等的影 响，如何预测森林火灾的发生、发展情况是一个难题，也是森林火险分析的主要内容。通过对这些影响因素对森林火灾产生的作用的分析，可以确定森林火灾发生可能性的大小和火灾信息，确定火险等级，从而预测火灾的发生、发展情况，指导森林火灾的防治。目前火险预测方法主要有几种：森林火灾变化趋势与周期分析、天地生遥相关法和火灾发生原理法。前面两种方法主要用于长期火险的趋势预测，第三种方法主要通过对气象参数与森林火灾之间进行相关性分析，得到火灾的影响因素对火灾的影响程度，从而预测火灾发生的概率。至今为止，对森林火灾发生可能性的研究已经在部分国家开展，例如美国、加拿大、日本、韩国和中国。其中一个基本的研究方法就是综合分析

森林火灾与其相关数据，并探索它们之间的关系。

美国 National Interagency Fire Center (NIFC) 在考虑了 10 分钟内的平均风速、24 小时总降雨量、温度、相对湿度、树种水分含量和地形的条件下，对火灾预测进行了研究，同时还利用卫星图片 (NDVI) 来确认计算结果的准确性。研究结果将火灾分为 5 级火险，并得到了闪电对于火灾发生的影响，此火灾预测系统可以预测 24 小时内的火灾。

加拿大森林维护中心 (CFS) 则考虑了相对湿度、温度、风速、降雨等气象参数，同时考虑了地形影响和 16 种树种类型，并使用了卫星图片 (NDVI)。他们最后得到了 6 级火险，并能给出一定的火灾处理方法。

韩国森林研究机构 (KFRI) 选择了韩国 391 个气象站中的 79 个站点的数据进行研究。主要考虑了最大温度、平均风速、有效湿度、3 种燃料类型 (针叶类、落叶类、混合森林) 以及地形因素的影响。

火灾不仅仅受到各种气象条件和地形、燃料类型等的影响，和人类活动的关系同样也非常密切，由于各个国家和地区人类活动的差别，也使火险预测变得更加复杂。Mollicone 等人 (2006) 研究了人类活动在俄罗斯野火中所扮演的“角色”，发现 85% 的原始森林火灾发生在原始森林边界处 10 公里的区域内，这表明，这些边界区域受到外部火灾的影响，火灾可能是首先由外部发生进而蔓延至原始森林的。2002 到 2003 年，俄罗斯原始森林中发生的火灾次数是平时的两倍，由外部蔓延进入原始森林的火灾是原始森林内部火灾的 7.9 倍以上，上述火灾中只有 13% 是由自然原因引起的。这些结果表明，人对火灾的影响是持续、迅速增加的。研究表明，火灾分布的幂律性质受到人类活动的显著影响，由人为因素引起的火灾，其幂律指数显著增加，并且人类活动使得火灾的时间分布更具有尺度不变性。Amatulli 等人 (2007) 对西班牙阿拉贡自治州的人为森林火灾和闪电火灾进行了研究，发现火灾规模越大，由人引发的火灾所占的比重就越小，由自然原因引发的火灾所占的比重越大。人引发的火灾通常规模比较小。这可能是由于：人引发的火灾通常发生在天气比较好的时候，容易被发现；而雷电引起的火灾不易发现，并且不易扑救。Benavent-Corai 等人 (2007) 也研究了人类活动对森林火灾序列的标度性的影响，结果表明，人类活动对火灾空间和时间分布的基本特性有特定的作用，考虑人类活动的火灾模型将具有更强的预测能力和更大的应用范围，为了提高森林火灾模型的准确性，研究人对火灾的定量作用是非常重要的。因此研究人类活动对火灾的作用具有重要的科学意义和实用价值，气象、地形、人类活动等各种因素如何影响森林火灾的行为是森林火灾研究中的一个重要课题。同时，对自组织临界性和森林火灾防治的进一步研究也需要对森林火灾和相关数据进行详细的分析。

到目前为止,对森林火险的分级特别是预测工作还处于初步阶段,各种气象参数对火灾发生概率的影响的定量研究也并不多,而且,森林火灾会受到人类活动的影响,特别是中国和日本,人为因素引起的火灾占了大多数,因此各种气象因素、人口等与火灾之间的定量关系将是森林火险预测中的基础工作。本章我们利用日本详细的气象记录和火灾记录,计算和分析8种更加详细的气象参数对应的火灾发生概率,以及人口分布情况对火灾的影响。本章所说的火灾发生概率是指统计概率。

2.2 森林火灾与气象参数的相关性

2.2.1 数据处理方法

对于一个面积很大的区域,如果要通过统计的方法得到各种气象参数对火灾概率的影响,一般可以通过对该区域进行网格划分然后进行统计,利用统计的方法进行一元相关性分析,计算各种气象参数对应的森林火灾发生概率。即先统计发生火灾的数量(次数或者格点数),然后统计总数,这样就得到了我们所需要的概率。

目前在日本已经建立了三级网格系统,因此我们可以利用此三级网格系统进行概率计算。所有网格编号的产生共分三步,所以称最后得到的网格编号为三级格点编号。该网格系统利用经纬度进行划分,每个网格代表了一个正方形区域,每个网格的编号通过该网格左下定点的经纬度计算得到。该网格系统编号产生的具体方法如下:

1. 一级格点编号的产生

假设用 Lat 表示某地的纬度, $Long$ 表示该地的经度 ($Long$ 大于 100), 那么我们用 $[Lat \times 1.5] \times 100 + [Long - 100]$ 来计算该地所在的一级格点的编号, 这里 $[]$ 表示对其取整; 如果 $Long$ 小于 100, 则用 $[Lat \times 1.5] \times 100 + [Long]$ 来计算。例如: 某地点为东经 128° , 北纬 27° , 则 $[27 \times 1.5] \times 100 + [128 - 100] = 4078$, 所以 4078 即为东经 128° 北纬 27° 的一级格点编号。

2. 二级格点编号的产生

二级格点编号是在一级格点编号的基础上产生的。将每个一级网格划分为一个 8×8 的矩阵形式的网格, 这样每一个小网格即为一个二级格点。二级格点的编号从西到东, 从南往北依次增大排列。在一级格点编号的基础上, 通过直接在一级格点编号后添加两位数字的方法即产生了二级格点编号。最后一位数字从 0 至 7, 代表了经度方向; 倒数第二位数字也是从 0 到 7, 代表了纬度方向。

这样一个一级网格将产生 64 个二级网格。例如，从一级格点 4078 而衍生出的 64 个二级格点的格点编号，最下面一行从 407800 直到 407807，上面一行从 407810 到 407817，如此直到 407877。如下表 2.1 所示。

表 2.1 由一级格点编号 4078 产生的二级格点编号示意

407870	407871	407872	407873	407874	407875	407876	407877
407860	407861	407862	407863	407864	407865	407866	407867
407850	407851	407852	407853	407854	407855	407856	407857
407840	407841	407842	407843	407844	407845	407846	407847
407830	407831	407832	407833	407834	407835	407836	407837
407820	407821	407822	407823	407824	407825	407826	407827
407810	407811	407812	407813	407814	407815	407816	407817
407800	407801	407802	407803	407804	407805	407806	407807

3. 三级格点编号的产生

和二级格点编号的产生方法类似，先将每个二级格点划分为 10×10 的网格，然后在此二级格点编号后添加两位数字，前一位从 0 到 9 表示从南到北，而后一位从 0 到 9 表示从西到东。

这样，即可以将整个区域进行网格划分，任意给定一个坐标点，即可通过上述方法确定其所属格点的编号。对于气象参数而言，通过对某些气象站的记录数据进行空间离散化，进而得到每个格点的参数值，从而达到我们统计火灾发生概率的目的。在这里，我们采用反距离加权插值法对数据进行空间离散化，该方法主要基于以下设想：如果插值点与已知点离得越近，那么插值点的值与距离最近的已知点的值越相似。它的思想为：距离目标点越近的点的参数对目标点的参数影响越大，距离越远，则影响越小；目标点的值是周围离散点参数值的加权平均，随着目标点离周围离散点距离的增加，其值减小。因此，对于每个三级格点，找到距离其最近的三个气象站 N_1, N_2, N_3 ，三个气象站的参数分别为 x_1, x_2, x_3 ，假设待求格点与各气象站之间的距离分别为 l_1, l_2, l_3 ，则所要求的格点的参数 x 可以用下式 (2.1) 得到：

$$x = \left(\frac{x_1}{l_1} + \frac{x_2}{l_2} + \frac{x_3}{l_3} \right) / \left(\frac{1}{l_1} + \frac{1}{l_2} + \frac{1}{l_3} \right) \quad (2.1)$$

对数据进行空间离散化以后，将每种气象参数分为不同的区间，分别统计

各个区间内火灾的次数以及气象参数落在该区间内的三级格点个数，然后通过公式(2.2)计算某一气象参数所对应的火灾发生概率：

$$P(i) = n_{ij} / n_{id} \quad (2.2)$$

其中， $P(i)$ 为气象参数*i*所对应的火灾发生概率， n_{ij} 为统计得到的火灾发生时气象参数*i*落在某一区间*d*内的次数， n_{id} 为三级格点中气象参数*i*落在*d*区间内的个数。

2.2.2 结果与分析

本章我们使用日本 834 个气象站所记录的日本 1999 年和 2000 年的气象数据，首先以公式(2.1)对气象数据进行空间离散化，然后计算各种火灾影响参数：日平均相对湿度、日最低相对湿度、平均温度、最大温度、平均风速、最大风速、平均降雨量以及日照时间所对应的火灾发生概率。下面对结果进行分析与讨论。

我们将相对湿度值(日平均相对湿度与日最低相对湿度)等分为 10 个区间，以公式(2.2)分别计算各个区间内的火灾发生概率，其结果如图 2.1 和图 2.2 所示。

图 2.1 给出了火灾发生概率与日平均相对湿度的关系，可以看到，1999 年和 2000 年的数据具有同样的变化趋势，两组数据基本上吻合。随着平均相对湿度的增加，火灾发生概率逐渐降低，在相对湿度超过 70% 时，火灾发生概率基本上不再变化，其值基本上为 0。我们对 1999 年的火灾数据进行了多项式拟合，得到火灾发生概率与日平均相对湿度值之间的拟合曲线为 $P(h) = 3.04 \times 10^{-4} - 6.71 \times 10^{-6}h + 3.668 \times 10^{-8}h^2$ ($h < 90\%$)，其中 h 为日平均相对湿度值，拟合相关系数为 0.99051。当平均相对湿度大于 90% 时，可以 85% 代入上述公式计算。图 2.2 中最低相对湿度与图 2.1 中的平均相对湿度具有相似的规律，随着湿度增加，火灾概率非线性降低并趋于稳定。出现这种现象的原因在于，当湿度增大到一定值后，火灾的发生将受到很大的抑制，因此火灾发生概率将不会继续随湿度的变化而变化。

对火灾发生影响比较明显的另外一个因素是降水。图 2.3 给出了 1999 年和 2000 年日本日平均降水量对森林火灾发生概率的影响。可以看到，日平均降雨量超过 1mm 时的火灾发生概率相对于无降雨时的火灾发生概率非常小，两者比值约为 1/10；降雨量大于 1mm 时，随着降雨量的增加，火灾发生概率基本保持不变(有小的波动)。因此可以认为，1mm 是森林火灾中的一个“止火降水量”。降水较大时火灾发生概率并非为零，原因在于，即使是在暴雨天气下，雷击火

依然能够发生。

温度对火灾的影响也比较明显，一般情况下，温度越高，火灾的危险性也越大。我们对日本森林火灾发生概率随温度的变化趋势做了计算，如图 2.4 所示，分别为 1999 年和 2000 年森林火灾发生概率随日最高温度和平均温度的变化。可以看到，森林火灾的发生概率随温度的变化都呈现出“N”字型分布。无论是最高温度还是平均温度，当其大于 27℃ 左右时，火灾发生概率随温度逐渐增大；温度较小时所表现出的波动，可能与日本当地的气候有关。日本夏季重要的特点是：入夏不久就出现梅雨期，而且持续时间较长，而且日本在秋霜季节常常伴有暴雨。因此随着温度逐渐升高进入夏秋季节，由于雨水增多，统计得到的森林火灾发生概率反而会有所降低；而由于温度过高的天气情况出现得比较少，因此在高温条件下得到的火灾发生概率反而更大。

风对森林火灾的发生和蔓延都具有重要的作用，主要体现在它能提供更好的火灾发生和蔓延所需要的空气流动条件，特别是在阴燃向明火的转化中，风的影响更为显著。图 2.5 给出了平均风速对森林火灾的影响。从图中看出，平均风速在达到 2m/s 之前，火灾发生概率随着风速的增加，基本上表现出直线上升的趋势，直线斜率 9.19×10^{-6} 。当平均风速超过 2m/s，随着风速的增大，火灾发生概率上下波动，基本上保持不变。图 2.6 是火灾发生概率随最大风速的变化曲线，其曲线和平均风速类似。当最大风速小于 5m/s 左右时，火灾发生的概率也基本呈直线上升趋势，直线斜率约为 4.67×10^{-6} 。而超过该阈值后，火灾发生概率曲线趋于稳定，最大风速的增加不再引起火灾发生概率的增大。这种变化关系，主要是由于过大的风速会对森林火灾的发生产生负作用，比如会吹熄小火，当风速过大时对火灾发生的正、负两种作用达到平衡。

图 2.7 中火灾发生概率基本随着日照时间的增加而增大，说明长时间的日照能引起更大的火灾发生概率。而在日照时间非常长时，火灾发生概率的降低实际上是统计误差所致：日照时间超过 13 小时的天气比较少，而且其火灾数量过小，所以此时的统计概率偏差很大。我们对日照时间小于 10 小时的区间进行了曲线拟合，发现火灾发生概率随日照时间的变化满足很好的指数分布，拟合方程为 $P(t) = 4.26 \times 10^{-6} \times \exp(t/3.58) - 4.37 \times 10^{-7}$ ，拟合相关系数 0.994。

综上所述，森林火灾发生概率与各种气象参数之间都具有某种稳定的关系。特别是相对湿度对森林火灾发生概率的影响最为平滑，拟合出的曲线较好。随着湿度的增加，森林火灾发生概率以单调非线性降低，当达到一定值时，湿度的增加不再引起火灾发生概率的变化。而温度对火灾发生概率的影响并不是单调的，呈现“N”字型分布。因此，对于森林火灾发生概率的预测，一般可通过对当地气象参数与火灾数据的统计来计算。由于相对湿度与森林火灾发生概

率的单调关系，以相对湿度作为预测因子，得到的结果将更为精确。

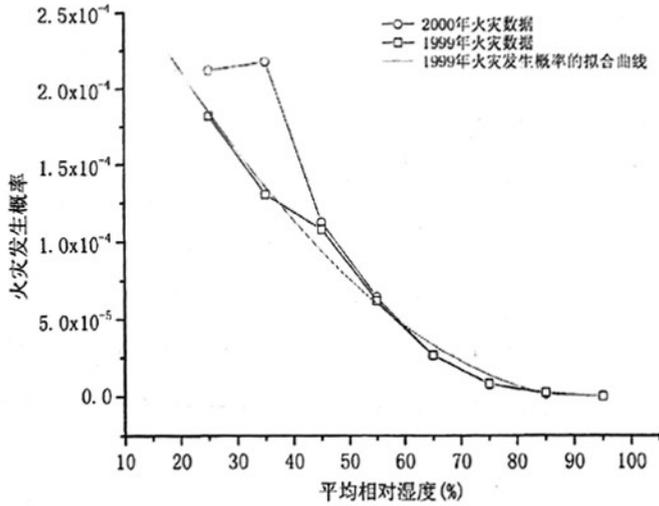


图 2.1 日本森林火灾发生概率与日平均相对湿度之间的关系。可以看到，1999年和2000年的数据具有同样的变化趋势，其数据基本上吻合。随着平均相对湿度的增加，火灾发生概率逐渐降低，在湿度超过70%左右时，火灾发生概率基本上不再变化，其值基本上为0。

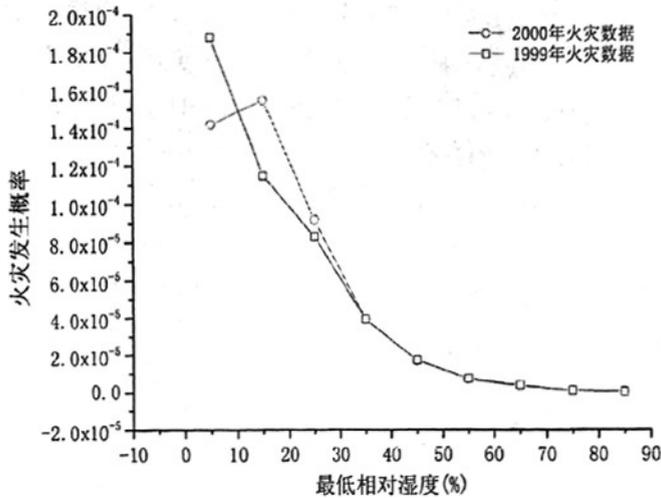


图 2.2 日本森林火灾发生概率与日最低相对湿度之间的关系。从图中可以发现，结果与图 2.1 类似，火灾发生概率随最低相对湿度的变化趋势与日平均相对湿度具有相似性，随着最低湿度值的增加，火灾发生概率以非线性关系逐渐降低。

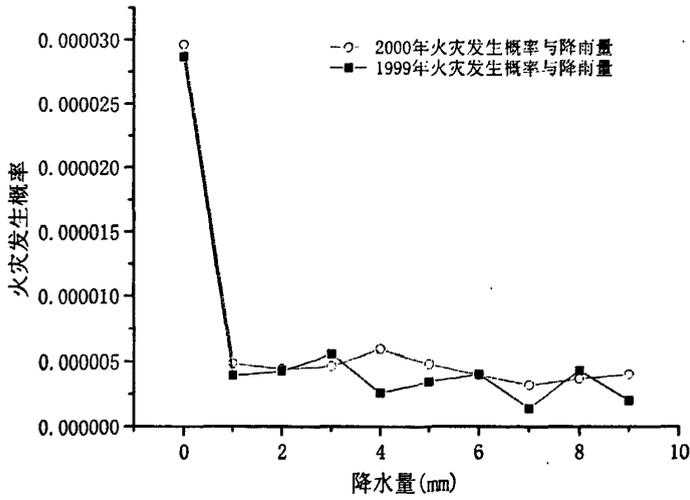


图 2.3 日本森林火灾发生概率与日平均降水量之间的关系。可以看到，日平均降雨量超过 1mm 时的火灾发生概率相对于无降雨时的火灾发生概率非常小，基本上达到 1/10；降雨量大于 1mm 时，随着降雨量的增加，火灾发生概率基本保持不变（有小的波动）。因此可以认为，1mm 是森林火灾中的一个“止火降水量”。

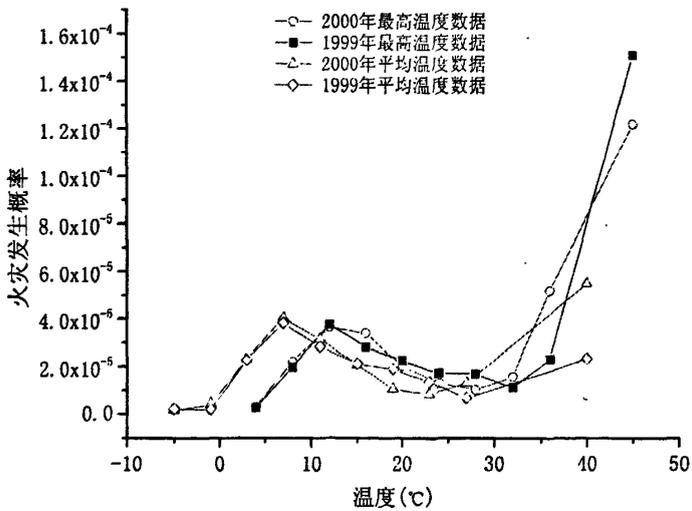


图 2.4 日本森林火灾发生概率与温度之间的关系。图中 4 条曲线分别给出了 1999 年和 2000 年的日平均温度及日最高温度与火灾发生概率的数据。从图中不难看出，随着温度的增加，火灾发生概率呈现“N”字型分布。

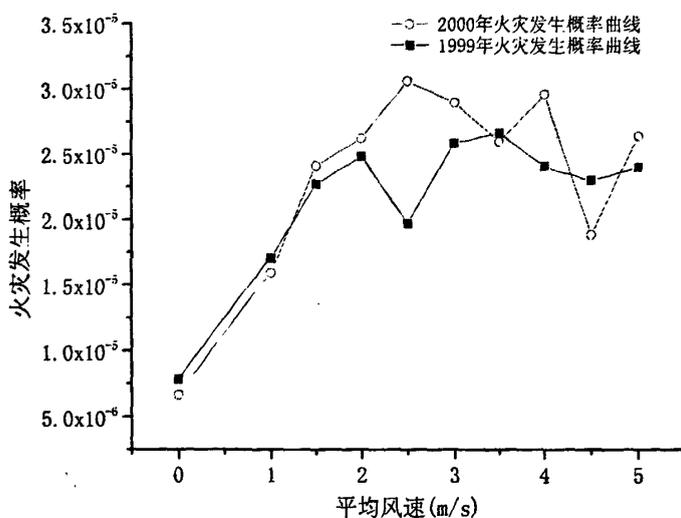


图 2.5 日本森林火灾发生概率随平均风速的变化趋势。可以看到，从无风到有风，随着风速的增加，森林火灾发生概率具有逐渐增加的趋势，并且基本上呈现线性关系；同时，在风速达到一定值以后，火灾发生概率的变化趋于平缓，基本保持稳定。

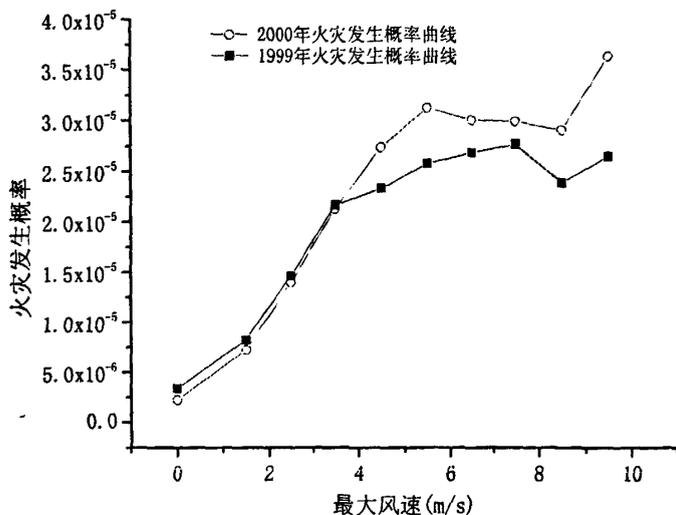


图 2.6 日本森林火灾发生概率随最大风速的变化曲线。不难看出，其结果与森林火灾发生概率与平均风速的关系类似，随着风速的增大，火灾发生概率先是线性增加，而后保持稳定。

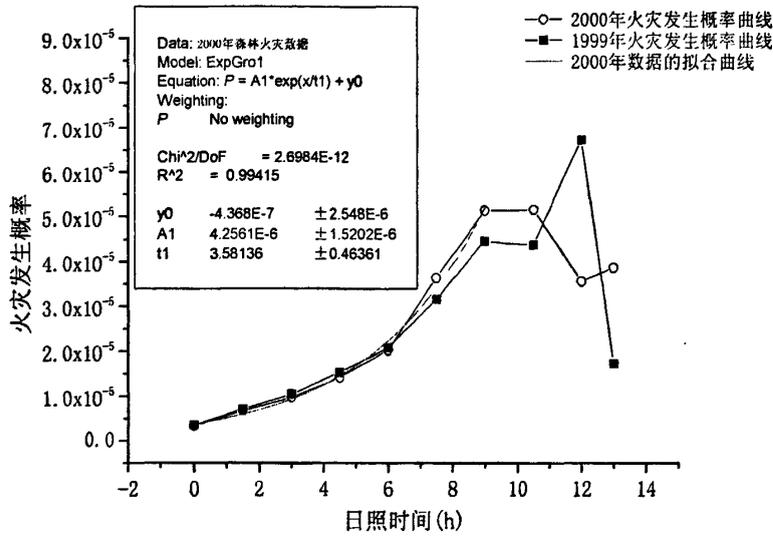


图 2.7 日照时间对日本森林火灾发生概率的影响。从图中可以看到，随着日照时间的增加，火灾发生概率随之增大，达到一定值以后，反而降低。通过观察实际数据，发现由于长时间日照出现得较少，而且火灾次数非常少，导致了统计偏差过大。较小的日照时间对火灾发生概率的影响的拟合曲线基本满足指数分布，得到的拟合公式为 $P(t) = 4.26 \times 10^{-6} \times \exp(t/3.58) - 4.37 \times 10^{-7}$ ，拟合相关系数为 0.994。

2.3 城市火灾与气象因素

森林火灾的发生受气象因素的影响明显，那么城市火灾的发生概率与气象因素之间具有什么样的关系呢？我们以中国辽宁省葫芦岛市为例，研究了中国北方城市火灾发生于气象参数之间的关系，包括相对湿度、平均温度以及平均风速。城市火灾发生概率的计算采用与森林火灾类似的方法，首先将气象参数 i 进行区间划分，统计各个区间内火灾次数 n_{if} 以及所有气象参数在该区间内出现的次数 n_{id} ，火灾统计概率以公式 $P(i) = n_{if} / n_{id}$ 计算。结果显示在图 2.8 至 2.10 中，所用的数据是葫芦岛 2003 年火灾数据与气象记录。

可以看到，葫芦岛市的火灾发生概率与相对湿度之间的关系表现出了负相关性，随着湿度增加，火灾发生概率基本呈现下降趋势，两者之间近似满足线性关系，若对其进行线性拟合，可以得到拟合直线斜率 $P(h) = 0.5071 - 0.0028h$ ，拟合相关系数为 -0.65。这表明，城市火灾的发生受相对湿度影响明显。

平均风速对葫芦岛市火灾发生概率的影响如图 2.9 所示。随着平均风速的

增加，火灾发生概率虽然有波动，但是基本保持稳定。实际上，由于城市建筑物的遮挡，使得风在市内受阻，因此其对火灾发生的影响就会减弱，同时，城市火灾大多发生在室内，因此，风速对城市火灾的发生影响比较弱。一般来讲，对于城市火灾，风速对其蔓延影响相对较大。

平均温度对葫芦岛市城市火灾发生概率的影响如图 2.10 所示。可以看到，火灾发生概率与平均温度之间基本上满足负相关性。这一点是符合实际情况的。由于火灾受到气候的强烈影响，而葫芦岛地处中国北方，冬季持续时间较长，在温度较低时，人们会利用火、空调或者暖气系统供暖；电器和明火的使用，势必会引发更多的火灾。另外一个原因是，每年最寒冷的一月至三月有诸如春节、元宵节等重要传统节日，这段时间人们燃放烟花爆竹的频率也非常高，火灾的频率便会相应升高。

从得到的结果看到，相对湿度对城市火灾发生的影响比较粗糙，原因可能在于我们取得的数据只是一个城市一年的火灾记录，如果有更多的数据，这种变化关系可能会更加明显。

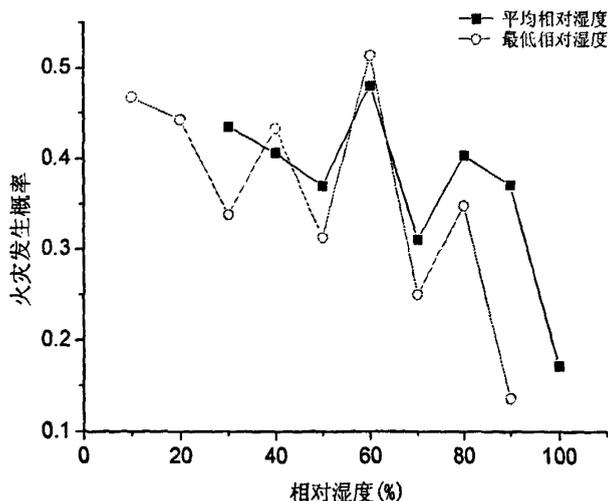


图 2.8 辽宁葫芦岛市城市火灾发生概率与相对湿度的关系（2003 年火灾数据）。从图中的结果可以看到，整体上而言，火灾发生概率随湿度的增加呈下降的趋势，但在相对湿度为 60% 时，火灾发生概率出现峰值。

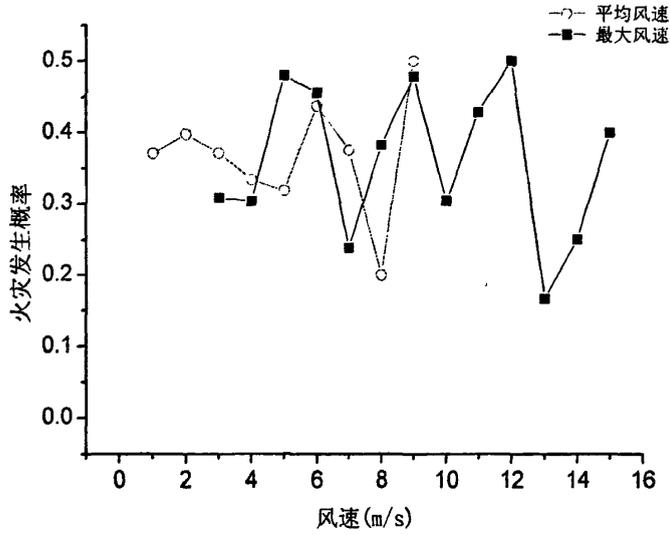


图 2.9 辽宁省葫芦岛市城市火灾发生概率与平均风速的关系（2003 年火灾数据）。随着风速的增加，火灾发生概率基本保持稳定。

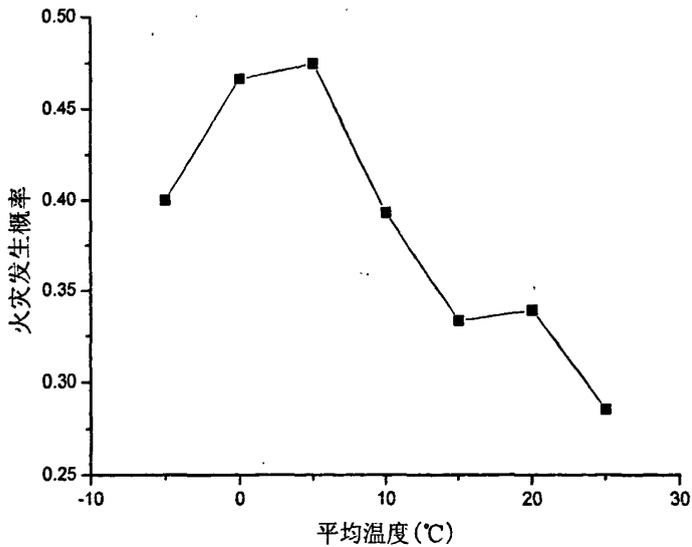


图 2.10 辽宁省葫芦岛市城市火灾发生概率随平均温度的变化趋势（2003 年火灾数据）。火灾发生概率与平均温度之间呈现出负相关性。

2.4 森林火灾与人口密度的一元相关性

森林火灾的发生,不单单受到气象因素、燃料类型以及地形等客观条件的影响,同时,还会受到人类主观行为活动的影响。森林火灾的次数,反映了不同地区林火的发生情况,既反映了森林火灾出现的频繁程度,也说明天然火源与人为火源的多寡。在中国,森林火灾中人为火源占全国总火源的98%以上,而在日本,每年森林火灾高达3000起,其中人为火灾也占到95%以上。可以看到,人类活动对森林火灾的发生具有非常重要的作用。然而,虽然目前对森林火灾的预测已经展开,但是对于森林火灾与人类活动之间的关系的研究还很少,同时对于人类活动与火灾发生概率之间的定量关系也缺少一些实际可靠的分析。基于此,本小节我们针对日本森林火灾数据以及人口分布数据,以人口密度表示人类活动,利用日本1996年至2000年5年的详细森林火灾数据,采用统计分析的方法,研究森林火灾发生概率与人口密度之间的定量关系,其结果可用于森林火险预测的基础数据。

2.4.1 研究方法

火灾发生概率的计算同样建立在日本三级网格系统的基础上。首先将人口密度划分为不同的区间,统计每个区间内的森林火灾次数 T_f ,同时统计所有陆地三级格点中人口密度落在该区间内的个数 T'_i 。如果仅考虑森林火灾发生次数和人口密度落在该区间内的总格点个数,不考虑各个三级格点的森林覆盖率,则森林火灾发生概率可用下式(2.3)来计算:

$$P_c = T_f / T'_i \quad (2.3)$$

其中, T'_i 表示人口密度落在某区间内的三级格点个数, T_f 为某区间内火灾发生次数。考虑到森林火灾的发生概率与森林覆盖率有关,我们以 T'_i 与森林覆盖率的乘积 T_i 来表示人口密度在各个区间的分布情况,则火灾发生概率以公式(2.4)计算:

$$P_{ec} = T_f / T_i \quad (2.4)$$

这里我们称 T_i 为有效三级格点, P_{ec} 称为有效森林火灾发生概率。

2.4.2 结果与分析

针对日本1996年至2000年的森林火灾数据,我们将日本的人口密度划分为60个区间,分别在不考虑森林覆盖率和考虑森林覆盖率的情况下对其进行研

究。人口密度区间以下式产生:

$$c = \begin{cases} \lceil d/10 \rceil + 1 & (d < 100) \\ \lceil d/100 \rceil + 10 & (100 \leq d < 5000) \\ 61 & (d \geq 5000) \end{cases} \quad \text{其中, } \lceil \cdot \rceil \text{ 表示对其取整。}$$

计算得到的人口密度对应的火灾发生概率如图 2.11 和图 2.12 所示。图 2.11 给出了在不考虑每个格点内的森林覆盖率的情况下, 森林火灾发生概率随人口密度的变化趋势。可以看到, 森林火灾发生概率对人口密度的变化满足正相关幂律关系, 其拟合直线方程为 $\lg P_c = 0.39 \times \lg d_p - 2.57$, 相关系数为 0.98。同时可以看到, 当人口密度非常大时, 森林火灾发生概率偏离了拟合直线, 即偏离了幂律关系。这是因为对于人口非常密集的地区, 势必会有高密度的建筑以及其他人类活动设施和场所, 因此树木的数量随着人口密度的增加而降低。尽管如此, 仍然有跨越 3 个数量级的人口密度区间满足幂律关系。

如果考虑每个三级格点内的森林覆盖率, 则森林火灾发生概率可以公式 (2.4) 计算, 其结果显示在图 2.12 中。从图中看到, 当人口密度大于 40 人/平方公里时, 森林火灾发生概率与人口密度之间满足幂律关系, 其拟合直线为 $\lg P_{cc} = 0.73 \times \lg d_p - 2.98$, 相关系数为 0.97, 满足幂律关系的人口密度区间跨越了 3 个数量级。在人口密度比较小的区间内, 随着人口密度的增加, 有效森林火灾发生概率同样呈现增加的趋势, 但是偏离了幂律关系, 原因可能在于, 即使是在没有人类活动的森林区域, 非人为因素或者自然因素, 比如闪电和雷击等同样能引起森林火灾。然而, 在人口密度较大的地区, 由于大量人为因素引起的火灾的出现, 使得自然因素相对于人为因素的作用变弱, 因此其幂律关系在人口密度较大的区间变得更加明显。这说明, 人口密度与人为因素引起的火灾之间满足幂律关系, 而与所有因素引发的火灾满足具有边界效应的渐近幂关系。同时, 在考虑森林覆盖率以后, 森林火灾发生概率尾部对幂律曲线的偏离也变弱。

从图 2.11 与图 2.12 中可以看到, 在人口密度超过 4000 人/平方公里时, 森林火灾发生概率偏离幂律分布, 这一现象的出现, 可能是由于人对森林火灾具有两方面的作用: 抑制和促进。人口密度过大时, 火灾虽然由于人类活动的增加而增多, 但是更容易被及时发现而扑灭, 人口对森林火灾的抑制作用超过了促进作用, 因此其火灾的发生概率会降低。

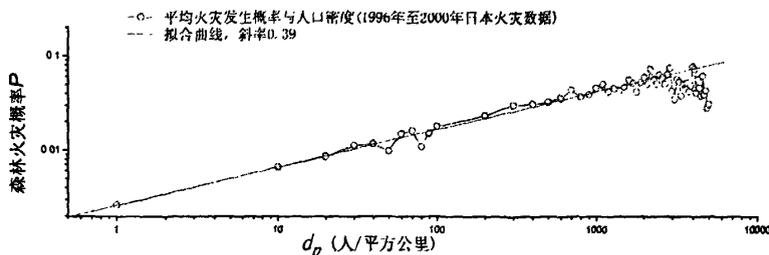


图 2.11 森林火灾发生概率随人口密度的变化关系（不考虑森林覆盖率）。可以看到森林火灾发生概率与人口密度之间存在着正相关性，并且在双对数坐标中具有较好的线性关系，满足幂律分布。

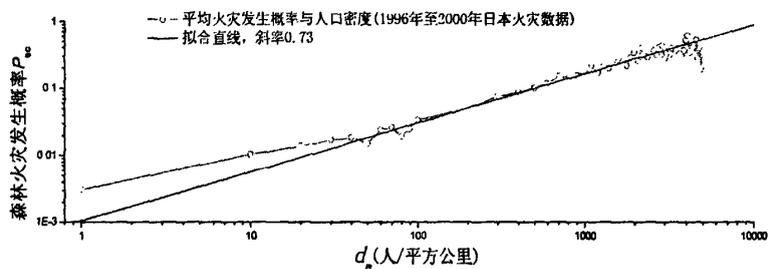


图 2.12 森林火灾发生概率随人口密度的变化关系（考虑森林覆盖率）。从图中看到，在人口密度较小时，森林火灾发生概率偏离了幂律分布。

2.5 本章小结

本章通过对日本森林火灾和中国辽宁省葫芦岛市城市火灾与几种气象因素以及人口密度的一元相关性分析，我们得到以下几点结论：

- (1) 森林火灾受气象参数影响明显，通过分析日本 1996 年至 2000 年森林火灾发生概率随平均相对湿度、最小相对湿度、平均温度、最大温度、平均风速、最大风速、平均降雨量以及日照时间等 8 种气象参数的变化关系，得到了每种气象参数对火灾发生概率的影响曲线和定量关系：
 - a) 森林火灾发生概率受相对湿度影响明显，并且随着相对湿度的增加呈现单调减趋势，其下降趋势逐渐变缓，并趋于稳定。
 - b) 降雨对森林火灾的发生具有很强的抑制作用。当日平均降水量大于 1mm

时,火灾发生概率急剧降低,继续增加降水量,火灾发生概率不再变化。因此,1mm是森林火灾发生的“止火降水量”。

- c) 森林火灾发生概率随温度的升高不具有单调变化,呈现出“N”型分布。
 - d) 风对森林火灾的发生具有促进作用,过大的风速会抑制火灾的发生。随着风速的增加,森林火灾发生概率先增大,而后趋于稳定。
 - e) 日照时间对森林火灾的发生同样具有促进作用。随着日照时间的增加,森林环境温度升高,为火灾的发生提供了有利的环境条件,火灾发生概率呈指数增长。
- (2) 气象参数对城市火灾的发生具有显著作用。通过对中国辽宁省葫芦岛市城市火灾随平均相对湿度、平均风速以及平均温度的变化关系的研究发现,中国北方城市火灾发生概率与相对湿度、温度之间都具有明显的负相关关系,而风速对城市火灾的发生影响较小。
- (3) 通过对日本人口密度数据与森林火灾的分析表明,在一定的人口密度范围内,森林火灾发生概率随人口密度的变化,在双对数坐标中可拟合为一条直线,即火灾发生概率与人口密度之间存在幂律关系,随着人口密度的增加,人类活动范围及强度增加,使得森林火灾发生概率增大。当人口密度过大时,森林火灾的发生概率会受到抑制。

第3章 火灾系统的空间分布特征

- *****
- > 引言
- > 真实森林火灾系统的“频率—面积”分布
- > 城市火灾系统“频率—损失”分布
- > 小结
- *****

3.1 引言

研究者们在对自然界各种现象进行研究时发现,很多不同的系统具有相似的性质—幂律分布。为了解释这种幂律分布的形成机制,人们提出了多种观点和理论。自组织临界性是其中一个影响比较大的理论,长期以来经常被人们认为是复杂系统幂律分布产生的动力学原因,同时,幂律分布也可以用来作为自组织临界性的判据。自组织临界性理论(Bak et al. 1987, 1988)认为,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。这种关系与系统的初始状态无关,也不需要参数满足特定的协调关系。自组织临界性理论提出以后,人们利用不同的系统模型对此进行了研究,包括有:沙堆模型(Bak et al. 1988)、滑块模型(Turcotte 1989)、森林火灾模型(Drossel and Schwabl 1992a)等。其中,Drossel等人提出的森林火灾模型经常被研究者用来研究和解释各种真实的复杂系统中的自组织临界性。任何一个事物都有其两面性,对于森林火灾模型的自组织临界性也存在一些争论。Grassberger(2002)对Drossel和Schwabl所提出的森林火灾模型进行了研究,他认为,通过对该模型进行的更广泛的模拟结果并不能说明模型能得到幂律行为,以往的研究中所发现的幂律行为只是一种暂时性的现象,研究结果得到的幂律关系是一种表面现象,而且这种幂律关系的幂指数会随着树木生长概率 p 与点火概率 f 的比值 p/f 的减小而增加。因此他认为经典的森林火灾模型并不能得到稳定的幂律关系。尽管如此,森林火灾模型依然被大多数研究者所接受。比如,疾病的传播是研究比较多的一种真实自组织临界性现象,很多人做了这方面的工作,如Marco等人(2009)研究发现癌细胞的扩散具有幂律分布,并具有自组织特征。Johansen等(1994)、Rhodes等(1997, 1996a, 1996b)、Schulz和Trimper(1996b)、Cameloneto和Coutinho(1996)等

等研究了传染病的传播特征。传染病在人与人之间的传染对应着森林火灾模型中火灾在树与树之间的传播,因此传染病流行的“频率—规模”分布具有幂律关系,可以用森林火灾模型很好地进行解释。

对森林火灾模型的研究,主要是建立在一些假设的基础上,通过一些假定的参数加入到森林火灾模型中来模拟火灾的发生和蔓延,而要研究实际火灾系统的特征,单靠对模型的研究和发展是远远不够的,因为模型所需要的假设还必须以实际森林火灾的影响因素为基础,并且其模型的结果必须符合实际火灾规律。因此,对森林火灾自组织临界性的应用研究就显得尤为重要。以往的一些研究表明,森林火灾模型可以反应真实火灾系统的一些基本特性,如1998年Malamud等人(1998)将美国和澳大利亚的部分真实森林火灾数据与森林火灾模型的结果建立了联系,发现了真实森林火灾系统的自组织临界性。2001年Song等人(2001)证实了中国森林火灾系统也具有自组织临界性。Telesca等人(2007)使用相关维数分析了Liguria地区1997到2003年森林火灾序列的空间聚类现象。通过研究相关维数的变化,发现森林火灾的空间簇行为具有强可变性,这种可变性受季节周期的影响。

森林火灾与森林系统密切相关,研究发现,森林景观斑块和森林中火灾形成的斑块都具有幂律分布的特征,并且利用模拟得到的森林斑块与观察真实森林中的斑块得到的结果吻合得非常好(Bolliger et al. 2003; Gill et al. 2003)。Turcotte(2002)认为火灾尺度的自组织临界性特征(幂律分布)是森林可燃物分形分布特性的一种体现。森林火灾的幂律分布对于森林火灾风险管理具有一定的意义(Malamud et al. 1998, 2005; Trucotte 1999; Ricotta et al. 1999; Song et al. 2001; Turcotte et al. 2004; Hergarten 2004),并且可以用来作为研究森林景观特性和景观变化的一个指标(Dibari 2003; Li et al. 1997)。

纵观整个火灾研究过程,自从自组织临界性提出以后,对火灾系统的宏观研究还主要集中在森林火灾系统,而对城市火灾系统规律的研究工作还比较少,对于城市火灾的研究还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,这些影响因素与城市火灾构成了相互耦合的一个整体。人可以扑灭火灾、引起火灾,火灾可以伤害人;气候可以促进火灾、抑制火灾,火灾可以改变局部气候;可燃物的状况影响火灾的发生和发展,火灾可以改变可燃物的各类和分布。那么城市火灾是否和森林火灾类似,存在着某些幂律关系?已有研究表明,中国的城市火灾的“频率—损失”分布满足幂律关系(Song et al. 2003)。那么这种关系是否具有普遍性?不同国家的城市火灾有什么区别?因此,这一章分为两部分,首先针对森林火灾的强

度分布特征进行研究,分析其“频率—面积”分布,接着在第二部分针对城市火灾系统分析其“频率—强度”分布,这里我们用火灾的损失来表示城市火灾的强度和规模,所使用的频率是指非累积频率。

3.2 真实森林火灾系统“频率—面积”分布

3.2.1 火灾数据和处理方法

本节对森林火灾的研究,主要使用了日本的森林火灾数据和部分中国、美国的森林火灾数据,包括:

(1) 日本从1989年到2000年的30498次火灾记录。在日本,森林火灾面积大于 100m^2 即被记录。

(2) 美国1986年到1995年间4284次森林火灾记录(National Interagency Fire Center, Fire Management Branch, U.S. Fish and Wildlife Service)。

(3) 中国从1950年到1989年518次火灾(仅包含重大、特大火灾记录)。本文所用的真实森林火灾数据为中国林业科学研究院提供的“1950-1989年中国森林火灾年表”,其中记录了全国范围内1950-1989年间的重要森林火灾案例。

如前文中所述,本文中的空间分布对于森林火灾而言是指其火灾的强度的分布,即火灾面积分布。火灾发生频率的计算方法如下:

假设用 A 表示火灾面积,则面积为 A 的火灾所对应的发生频率 $F(A)$ 可用下式(3.1)计算:

$$F(A) = n(A) / Y \quad (3.1)$$

其中 Y 为统计数据所跨越的总年份, $n(A)$ 为在 Y 年内面积为 A 的火灾的总次数。如果用 $N_{(A>A)}$ 表示面积大于 A 的火灾次数,则有:

$$N_{(A>A)} = \sum_{A'=A}^{A_{\max}} n(A') \propto \int_A^{\infty} n(A') dA' \quad (3.2)$$

由公式(3.2)可知,面积为 A 的火灾次数 $n(A)$ 可用下式(3.3)计算得到:

$$n(A) = -dN_{(A>A)} / dA \quad (3.3)$$

因此面积为 A 的火灾所对应的发生频率 $F(A)$ 又可以表示为:

$$F(A) = -d\dot{N}_{(A>A)} / dA \quad (3.4)$$

其中, $\dot{N}_{(A>A)} = N_{(A>A)} / Y$,表示面积大于 A 的火灾每年发生的次数。如果“频率—面积”分布满足幂律关系,则有:

$$F(A) \propto A^{-\alpha} \quad (3.5)$$

3.2.2 森林火灾系统“频率—面积”分布

我们利用日本森林火灾数据，分别从两个方面对其“频率—面积”分布进行研究：时间稳定性和自相似性。

(1) 时间稳定性

我们首先将日本的火灾数据分成两组进行分析：1989年至1994年和1995年至2000年，图3.1给出了利用日本的森林火灾数据得到的“频率—面积”分布关系。从图中不难看出，两组数据基本上完全重合，其“频率—面积”分布在双对数坐标中均呈现出线性关系，表现出了很好的幂律关系。这表明，面积越大的火灾，其发生的频率越小；面积越小的火灾，发生的频率越大。我们分别对两组数据进行线性拟合，得到了两条拟合直线，其中从1989年到1994年的火灾数据拟合直线为 $\log F = -1.75 \times \log A + 3.55$ ，1995年到2000年的火灾数据拟合直线为 $\log F = -1.75 \times \log A + 3.48$ 。

把日本的森林火灾数据再次细化，分别对1996年到1999年每年的火灾数据进行了处理，得到了其“频率—面积”分布，如图3.2和图3.3中所示。可以看到，在双对数坐标中，它们都呈现出线性关系，均满足很好的幂律关系，并且其拟合直线的斜率范围从-1.70到-1.74。从图3.1到3.3的结果可以看到，虽然森林火灾的发生和发展受到各种因素的影响，但是，无论是长时间范围内（1989年到2000年）的森林火灾数据，或者是从中所抽取的某一年的森林火灾数据，其“频率—面积”分布的线性拟合曲线的斜率都非常接近，并不随着我们所考察的时间段的不同而变化。这说明，日本森林火灾的“频率—面积”分布的幂律关系并不随时间而变化，它具有时间稳定性，而这正是自组织临界性系统所具有的特征之一。正如Malamud等人（1998）指出，这种稳定的幂律关系在灾害防治中具有一定的实际意义。如果我们能得到某一区域森林火灾的详细的歷史数据，即可以用这些数据来预测未来火灾的分布，因为如果森林火灾的幂律行为具有时间稳定性，那么我们用这些历史数据所得到的曲线不因我们考察的时间范围不同而变化，也就是说对于任意的时间段，这种行为特征都满足相同的规律。日本森林火灾的幂律行为具有较好的时间稳定性，这表明，对于日本的森林系统而言，其经过漫长的演化，森林火灾的分布具有自组织临界性特征。如果我们将上述1989年到2000年日本森林火灾看作一个“系统”（仅从时间角度上考虑），那么每年的森林火灾即可认为是其中一个“子系统”，图3.1到图3.3的结果也可以认为是“整体（时间）”与“局部（时间）”的相似性。

(2) 自相似性

我们选取了日本东京都(Tokyo)、栃木(Tochigi)和埼玉(Saitama)三个地区作为研究对象,利用它们从1996年至1999年的森林火灾数据,分析不同尺度内森林火灾的“频率—面积”分布,研究其自组织临界性特征。该三地区地理位置相邻,而且其气候特点近似,因此外界影响条件相似。在计算“频率—面积”分布时,使用相对面积(火灾面积占整个地区森林面积的比例)作为面积变量。

首先,我们将三个地区作为一个系统进行研究,图3.4中给出了该区域内森林火灾的“频率—面积”分布。可以看到,在双对数坐标中,“频率—面积”分布表现为线性关系,拟合直线的斜率为 -1.55 ± 0.04 ,也就是说,该系统的“频率—面积”分布满足幂律关系。

然后,我们分别将这三个地区的森林火灾数据作为一个单独的子系统,图3.5中比较了这三个子系统从1996年到1999年的森林火灾“频率—面积”分布。可以看到,这三个地区的森林火灾均满足幂律关系,并且得到的拟合直线斜率很接近,分别为 -1.44 ± 0.08 , -1.45 ± 0.05 和 -1.54 ± 0.04 。与图3.4中的结果对比可知,森林火灾“频率—面积”幂律分布具有尺度不变性。

从图3.5中看到,在这三个地区中,同样规模(指火烧面积占森林总面积的比例)的森林火灾,栃木地区的频率最低,东京都地区其次,埼玉地区的频率最高。这可以利用我们在前面得到的结论得以证实。我们统计了这三个地区的人口密度数据,栃木人口密度约为388人/平方公里,埼玉人口密度大约为1768人/平方公里,而东京都地区人口密度约为5736人/平方公里。通过第二章的一元相关性分析知道,人口密度对森林火灾发生之间满足正相关的幂律关系,因此,东京都的火灾频率应该最大,但是由于人口密度超过5000人/平方公里时,人口密度对森林火灾发生的抑制作用变强,火灾发生概率与人口密度的关系偏离幂律分布,同时由于东京都的政治地位等原因,其火灾监控和灭火力量在日本全国是最强的,这也使得其火灾控制力量非常强,因此这些原因导致东京都地区同样规模的火灾频率降低,位于第2位。

结合图3.1至图3.5,可以看到,日本森林火灾系统的“频率—面积”幂律关系不随观测的尺度变化,并且这种幂律关系是稳定不随时间变化的,而稳定的幂律关系是自组织临界性的一个非常重要的特征。这表明自组织临界性特征是森林系统本身所固有的属性,在近似外界条件的影响下,它们具有近似或者相同的自组织临界性特征参数。

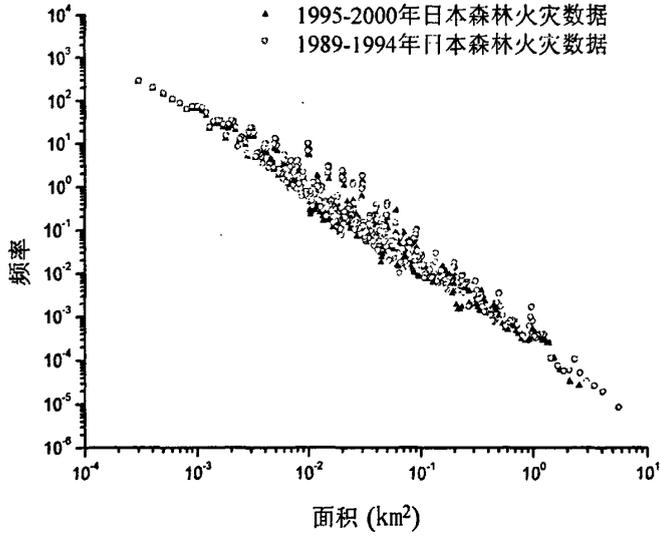


图 3.1 1989 年到 2000 年日本森林火灾的“频率—面积”分布。从图中可以看到，两组日本森林火灾数据的“频率—面积”分布在双对数坐标中均为直线，满足幂律关系。其中拟合直线的斜率绝对值均为 1.75，相关系数均为 -0.98， $p\text{-value} < 0.0001$ 。

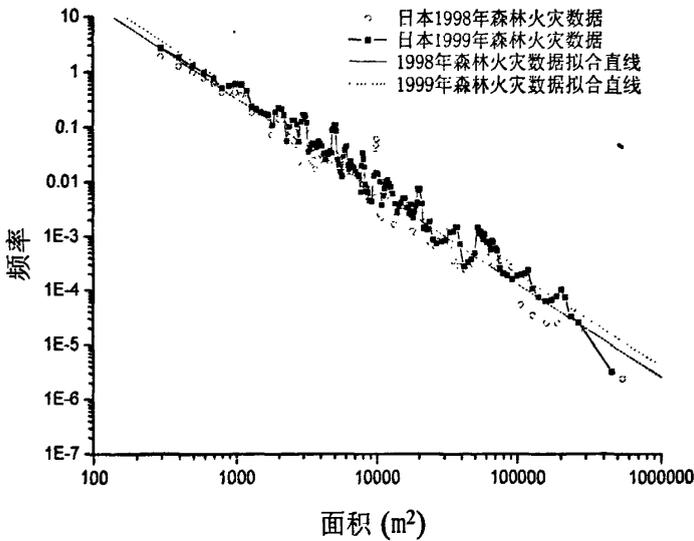


图 3.2 日本每年森林火灾的“频率—面积”分布（1996 和 1997）。两年的火灾数据均满足很好的幂律关系，1996 年和 1997 年火灾数据拟合直线的斜率分别为 -1.74 和 -1.73，拟合相关系数均为 -0.98， $p\text{-value}$ 均小于 0.0001

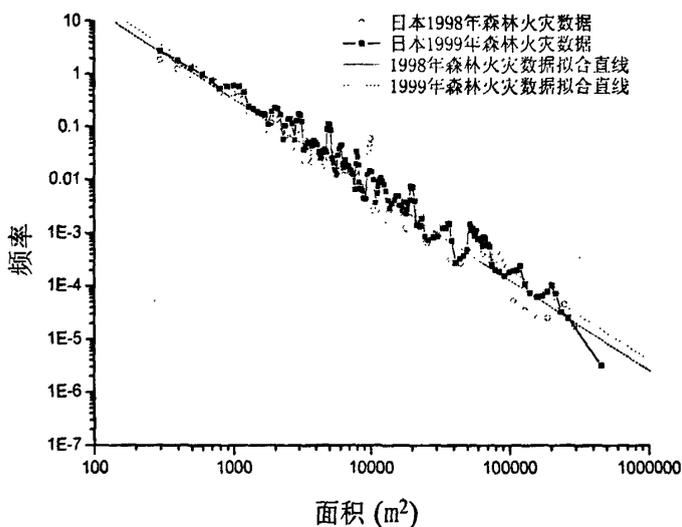


图 3.3 日本每年森林火灾的“频率—面积”分布（1998 和 1999）。与图 3.2 结果相似，两年的火灾数据也满足幂律关系。1998 年和 1999 年火灾数据拟合直线的斜率分别为-1.71 和-1.70，拟合相关系数均为-0.98，p-value 均小于 0.0001。

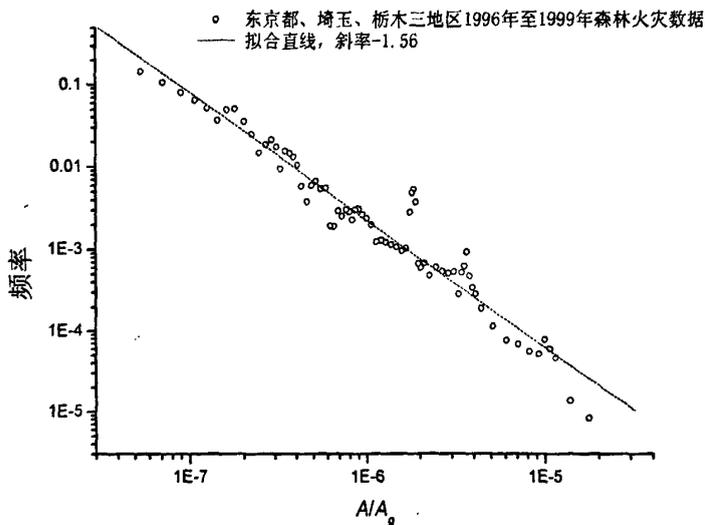


图 3.4 日本东京都、栃木、埼玉三地区总体森林火灾数据，横轴为火灾面积占森林面积的比例。图中数据为上述三地区 1996 年到 1999 年之间所有大于 100m² 的森林火灾数据。可以看到，该区域内森林火灾“频率—损失”分布在双对数坐标中为直线，满足很好的幂律关系，拟合直线的斜率为-1.56。

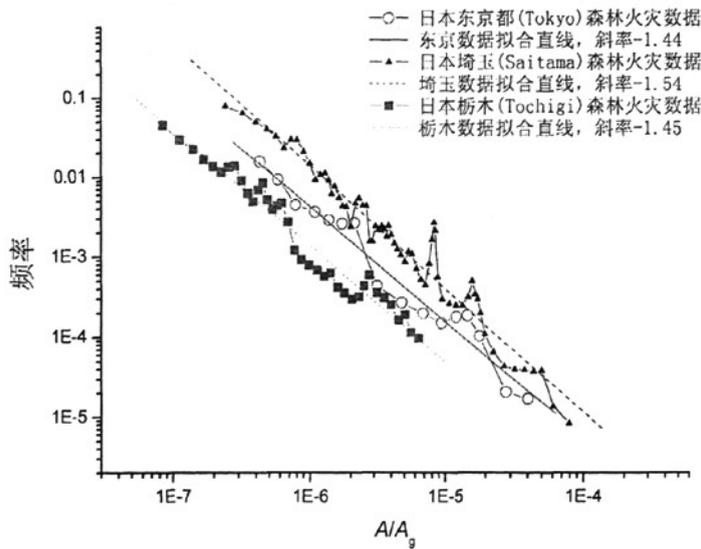


图 3.5 日本东京都、栃木、埼玉各地区森林火灾数据，横轴为火灾面积占森林面积的比例。图中所用数据是该三地区 1996 年到 1999 年之间所有面积大于 100m^2 的森林火灾记录。可以看到，三个地区的森林火灾“频率—面积”分布在双对数坐标中均为直线，都满足很好地幂律关系，其拟合直线的斜率分别为：东京都 -1.44，栃木 -1.45，埼玉 -1.54。

如果将整个日本森林作为一个系统，那么图 3.1 表示了这个系统在较长时间内的空间尺寸分布特征；图 3.2 和图 3.3 从时间的角度将该系统“切片”，研究了该系统自组织临界性特征随时间的变化关系；图 3.4 和图 3.5 则比较了系统与其子系统之间的森林火灾自组织临界性特征，发现了整体与子系统之间存在的相似性，即森林火灾的空间分布具有分形自相似性，而且整体与子系统的临界指数是相同或相似的，在一定范围内不随森林的尺度改变，并且具有时间稳定性。

不仅日本的森林火灾系统“频率—面积”具有幂律关系，中国的森林火灾系统 (Song et al. 2001) 和美国的森林火灾系统 (Malamud et al. 1998) 同样也满足“频率—面积”幂律关系，具有自组织临界性特征。我们利用中国部分火灾数据和美国的森林火灾数据，同样得到了类似的结果，如图 3.6 所示为中国、美国 and 日本的森林火灾“频率—面积”分布。可以看出，三个国家的森林火灾“频率—面积”分布具有同样的规律，都满足幂律关系，其幂指数分别为：中国的 -1.31、美国的 -1.30 和日本的 -1.75。这种幂指数的不同，可能是由于不同国家森林环境和人类活动不同所造成的 (Malamud et al. 1998; Song et al. 2001)。以中国和日本的森林火灾为例，可以通过分形理论说明这种幂指数的变化。

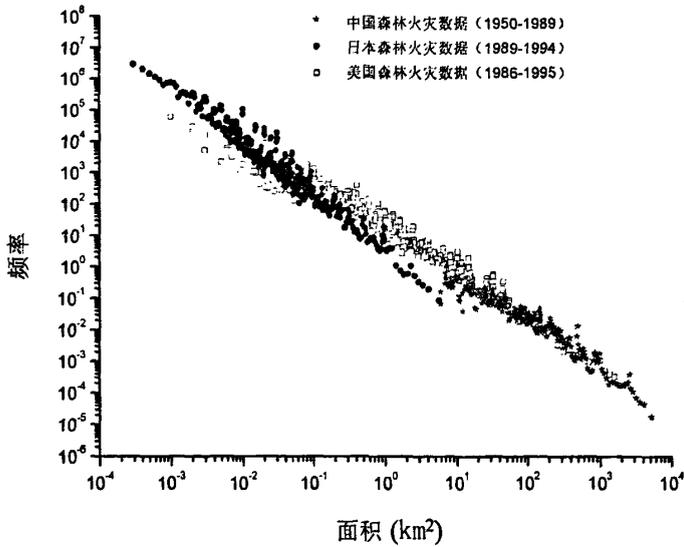


图 3.6 不同国家森林火灾的“频率—面积”分布。图中给出的中国、美国、日本三个国家的森林火灾“频率—面积”分布，均满足很好的幂律关系，幂指数分别为-1.31，-1.30 和-1.75。

分形理论是美籍法国数学家曼德尔布罗特 (Mandelbrot) 在 1975 年首先提出的，后被誉为大自然的几何学。分形是具有不同尺度下自相似性 (Mandelbrot 1982) 的几何对象，是指一类具有无穷嵌套自相似性的几何对象。它承认世界的局部可能在一定条件下或者过程中，在某一方面 (形态，结构，信息，功能，时间，能量等) 表现出与整体的相似性，它承认空间维数的变化既可以是离散的也可以是连续的。如果从整体中适当地取出其一部分，并加以放大，观察者看到的结果与整体对象完全相同。观察者无法判断自己正在什么尺度下观察。因此这类对象在标度变换下是不变的。

分维，又称分形维或分数维，作为分形的定量表征和基本参数，是分形理论的又一重要原则。对于一个几何体，其分形维定义为：

$$D = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\ln N(\delta)}{\ln 1/\delta} \quad (3.6)$$

其中 D 为分形维， δ 为观测尺寸， $N(\delta)$ 为以 δ 为观测尺度所得到的几何体尺寸。

有研究者利用自组织临界性解释了自然界中的分形现象，比如地震 (Ito 1995; Ito and Matsuzaki 1990; Bak and Tang 1989)、雪崩 (Noever 1993) 等等。Ricotta、Avena 和 Marchetti (1999) 使用沙堆模型来解释了森林火灾的自组织临界性，分析了森林火灾分布的分形特性，并用二维拓扑空间中分形维数的定

义式 (Mandelbrot 1982):

$$N_{(A' > A)} \propto A^{-D/2} \quad (3.7)$$

求得了森林火灾面积分布的分形维数。

根据 Mandelbrot (1982) 的分析可以得到:

$$\alpha = D/2 + 1 \quad (3.8)$$

其中 α 是“频率—损失”分布中拟合直线的斜率。

从本文第二章的结果我们知道, 森林火灾的发生概率与人口密度之间存在着幂律正相关的关系, 同时有研究表明, 人类活动同样也具有幂律分布和无标度性 (Brockmann et al. 2006; Barabasi 2005)。在日本, 由于其国土面积较小, 人口密度大, 因此人与森林之间的“关系”更加密切, 人类活动对森林火灾的影响更加明显, 其森林火灾也主要是人为因素引起, 占有森林火灾的 95% 以上。Malamud 等人 (2005) 对美国的林火进行了研究, 发现人为火灾相对于雷击火 (自然火灾) 有更大的分形指数, 也就是说人为火灾的分数维更高。通过公式 (3.8) 可以看到, 火灾的分形维数与“频率—损失”分布的幂指数是正相关的。因此日本的森林火灾“频率—损失”分布会有更大的幂指数。利用公式 (3.8) 我们可以得到日本的森林火灾分形维数 $D=1.50$ 。

综上所述, 日本森林火灾系统的“频率—面积”分布满足稳定的幂律关系, 其幂指数约为 -1.75, 并且这种幂律关系不随时间变化。同时, 不同空间尺度范围内的火灾分布具有相似分布规律, 满足自相似性。因此, 日本森林火灾系统具有自组织临界性特征, 并且其火灾分布具有分形特征。

3.3 城市火灾损失的幂律分布

火灾是城市的主要危害之一, 城市火灾动力学关系到人们的生命和财产安全。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这些外界因素的影响, 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”。

在过去的几十年中, 研究者们对于标度律 (Scaling Law) 展开了研究。一个耗散系统可以在很大的系统参数范围内表现出无标度行为和自相似性, 而与系统的初始条件无关。Bak 等人 (1987, 1988) 提出了自组织临界性的概念, 并用之描述这类系统的标度律和自相似性。他们认为系统具有自组织临界性的一个必要条件是系统要有数量很大的自由度, 这些自由度彼此之间存在非线性的相互作用 (Bak et al. 1988)。火灾系统, 包括森林火灾系统、城市火灾系统 (包括建筑火灾系统、工业火灾系统等) 等就是这样一类复杂系统。前面我们通过

对日本的森林火灾数据分析了其“频率—面积”分布，研究了森林火灾系统的自组织临界性特征。森林火灾系统是火灾系统中一个相对简单的系统，火灾的规模可以用火灾面积来衡量，对应于森林火灾模型中就是一次火灾烧掉的树的数量。而城市火灾系统相对于森林火灾系统而言则更为复杂，那么它是否有类似于森林火灾系统这种性质呢？

与森林火灾系统相比，由于建筑结构的遮挡、人为因素的干预以及城市结构的多样性，城市火灾系统要复杂得多。但是研究表明，城市火灾的分布仍然具有一定的规律性，较大尺度火灾的分布满足幂律关系 (Song et al. 2003)。那么，这种分布是否是一种普遍规律？不同尺度的城市火灾是怎样分布的，是否具有自相似性？不同地区的城市火灾之间有什么样的共同点和区别？针对这些问题，本节分为两个部分，分别利用日本和中国部分城市的火灾数据，分析城市火灾的“频率—损失”分布及其自相似性与时间稳定性。

3.3.1 研究方法

通过统计与火灾损失 L 对应的火灾发生频率 F (次/年)，进而分析火灾发生频率与火灾损失之间存在的幂律关系。数据处理方法如下面的公式 (3.9) 至 (3.13) 所示。火灾损失为 L 的火灾发生的频率 F ，即每年发生的次数：

$$F = n(L)/Y \quad (3.9)$$

其中 $n(L)$ 是在 Y 年内损失为 L 的火灾事件总次数。由于在 Y 年内损失大于 L 的火灾总次数又可以记为：

$$N_{(L>L)} = \sum_{L'=L}^{L_{\max}} n(L') \propto \int_L^{\infty} n(L') dL' \quad (3.10)$$

因此有：

$$n(L) = -dN_{(L>L)} / dL \quad (3.11)$$

利用公式 (3.9) 和公式 (3.11)，可得：

$$F(L) = -d\dot{N}_{(L>L)} / dL \quad (3.12)$$

其中的 $\dot{N}_{(L>L)} = N_{(L>L)} / Y$ 为损失大于 L 的火灾每年发生的次数。

如果火灾的“频率—损失”分布存在幂律关系，那么有：

$$F(L) \propto L^{-\alpha} \quad (3.13)$$

由于在统计火灾损失时，其损失的大小与当年的经济发展水平和物价有关，因此城市火灾系统中用火灾损失来衡量火灾的规模大小与森林火灾系统中用火灾面积来衡量火灾有重要的区别。主要原因在于，火灾面积不受经济系统影响，

它是不会贬值的，比如1990年的10公顷到2000年还是10公顷；而火灾损失的值则不同，随着时间的推移，由于物价指数的不同，同样损失的火灾其规模是不同的。例如，如果以商品的零售价格指数作为年度物价指数，那么，2000年的1万元相当于2006年的1.024万元（2000年和2006年的商品零售价格指数之比为100:102.4）。为此，在计算火灾的“频率—损失”分布之前，我们首先对中国的火灾损失数据进行了换算，这样不同年份的火灾损失就有了可比性。表3.1给出了2000年到2006年中国的物价指数（以商品零售价格指数记）。

表3.1 2000年至2006年中国物价指数

年份	商品零售价格指数 (以2000年为100)
2000	100.0
2001	99.2
2002	97.9
2003	97.8
2004	100.6
2005	101.4
2006	102.4

在本节中我们以2000年作为基年，令其物价指数为100，第 k 年的物价指数为 $I(k)$ ，令 $L'(k)$ 为第 k 年某次火灾按当年价格计算的损失。则这次火灾按可比价格计算的损失为：

$$L(k) = L'(k) * 100 / I(k) \quad (3.14)$$

这里的可比价格损失 $L(k)$ 相当于将第 k 年的火灾损失折算到了2000年。

幂律分布具有多种不同的表现形式，除了前面所述的“频率—规模”，还有Zipf律，Zipf图更加适合对排名靠前的事件进行研究，可以更加清楚地看到满足幂律分布的范围。

对于火灾系统，如果将火灾按损失由大到小排序，记录火灾损失 L 与排名 R 之间的关系，即可得到Zipf图（Zipf Plot）。排名 R 的计算方法如下：损失最多的火灾，其排名为1；然后依次按损失从大到小排序，排名依次为2、3……。在计算火灾的排名时，损失相同的火灾也需要记入名次。比如火灾A损失1万元，排名第 X ，同样损失1万元的还有 N 起火灾，那么它们的排名都是 X ；但是紧随它们之后的火灾排名不是 $X+1$ ，而是 $X+(N+1)$ 。

将所有火灾按损失由大到小排序，则损失为 L 的火灾的排名为：

$$R(L) = \sum_{L'=L}^{L_{\max}} n(L') = N_{(L>L)} \quad (3.15)$$

如果火灾的“频率—损失”分布满足幂律关系，即有公式(3.9)成立，那么：

$$R(L) = N_{(L>L)} \propto L^{-(\alpha-1)} \quad (3.16)$$

$$L \propto R(L)^{-\beta} \quad (3.17)$$

即火灾损失的 Zipf 图 (Zipf Plot) 满足幂律关系，或者说具有 Zipf 律 (Zipf Law)，其中：

$$\beta = \frac{1}{(\alpha-1)} \quad (3.18)$$

为 Zipf 律的指数。

本小节我们主要研究日本城市火灾的“频率—损失”分布规律，并与部分中国城市的火灾“频率—损失”分布的幂律关系进行对比。

3.3.2 日本城市火灾“频率—损失”分布

研究日本的城市火灾所用到的数据主要包括 1996 年至 1999 年日本全国的城市火灾。日本的火灾记录中将火灾分为六大类：建物火灾、林野火灾、车辆火灾、船舶火灾、航空机火灾和其他火灾。这里我们所使用的城市火灾数据是建物火灾。

对于日本的城市火灾数据，由于未得到其每年的商品零售价格指数，但是由于所统计数据的年度跨越不大，因此，在计算时使用各年的实际损失值对结果影响不大。计算结果如图 3.7 至 3.10 所示，图中损失的单位为十万日元。下面对结果进行分析。

图 3.7 是日本 1996 年至 1999 年全国的城市火灾数据，从图中可以看到，其“频率—损失”呈现两段分布，均满足很好的幂律关系。当火灾的损失大于 1300 万日元，得到拟合直线的斜率为 $-\alpha = -2.40 \pm 0.01$ ；而小规模火灾在双对数坐标中同样具有线性关系，其拟合直线斜率 $-\alpha = -0.99 \pm 0.003$ 。前面公式(3.15)至公式(3.18)表明，如果“频率—损失”分布满足幂律关系，则在 Zipf 图中也存在着幂律关系。图 3.8 给出了日本 1996 年至 1999 年全国城市火灾数据得到的 Zipf 图。可以看到，在火灾损失大于 1300 万日元时，Zipf 图中损失 L 与排名 R 之间满足很好的幂律关系，即图中的直线关系，其拟合直线的斜率为 $-\beta = -0.66 \pm 0.0003$ ，因此在大规模的火灾中，公式(3.18)是基本满足的。火灾规模较小时，Zipf 图中损失 L 与排名 R 不满足线性关系，不具有 Zipf 律。

图 3.9 给出了日本北海道 1996 年至 1999 年的火灾数据分析结果。结果显

示,北海道的城市火灾与日本全国的城市火灾具有相同的规律,具有“两段式”的幂律分布。在火灾损失较大的区域,拟合直线的斜率为 $-\alpha = -2.11 \pm 0.03$;火灾损失较小的区域,较小火灾区域拟合直线斜率为 $-\alpha = -0.89 \pm 0.01$ 。其损失的阈值位于800万日元左右。我们同样对其数据作了Zipf分布图(图3.10),可以看到,大规模的火灾满足很好的Zipf律,损失大于800万日元的火灾其拟合直线斜率为 $-\beta = -0.72 \pm 0.003$,图3.9得到的“频率—损失”分布拟合直线的斜率为-2.11,因此,基本满足公式(3.18)。图3.10中小规模火灾的Zipf曲线明显偏离了幂律分布。

由此我们可以看到,利用日本全国的火灾数据和其中一个地区的火灾数据,得到的“频率—损失”分布幂律关系是相似的。也就是说,日本整体城市火灾系统与其子系统—北海道城市火灾系统具有相似的幂律分布,它们的幂律分布不随我们观察的空间尺度不同而变化,具有尺度不变性,即整体与局部之间存在相似性,因此,日本的城市火灾系统具有空间分形特征。与森林火灾有所不同,它的幂律关系表现为“两段式”分布。

下面我们来看一下城市火灾幂律关系的时间稳定性。将日本的火灾数据分为两组,其中,1996年和1997年火灾数据作为一组,1998年和1999年火灾数据作为一组。图3.11给出了分别用两组不同时间范围内的火灾数据计算得到的结果。可以看出,两组不同时间内火灾的“频率—损失”分布基本上完全重合,而且在双对数坐标中也分为两段直线关系。1996至1997年火灾数据在损失较大时的拟合直线斜率为 $-\alpha = -2.39 \pm 0.01$,损失较小时的斜率为 $-\alpha = -0.98 \pm 0.003$;而1998至1999年火灾数据在较大损失范围内的拟合直线斜率为 $-\alpha = -2.45 \pm 0.01$,小火灾的拟合直线斜率为 $-\alpha = -0.96 \pm 0.004$ 。与图3.7的结果比较可以发现,日本城市火灾的“频率—损失”幂律关系不随时间变化,具有很好的时间稳定性。

图3.12中是这两组数据计算得到的Zipf图。可以看到,在Zipf图中,损失较大的火灾,其损失与排名之间满足很好的直线关系,拟合直线的斜率为-0.70,即满足Zipf律。对比图3.8和图3.12可以看出,日本城市火灾的Zipf律同样也具有很好的时间稳定性。

综上所述,日本的城市火灾“频率—损失”分布满足幂律关系,并且这种幂律关系具有空间尺度不变性(不随所观察的火灾系统的大小变化)和时间稳定性(不随所观察的时间不同而变化)。同时,城市火灾损失满足Zipf律,它与火灾损失的“频率—损失”分布相对应,其幂律关系也具有较好的尺度不变性和时间稳定性。与日本森林火灾系统一样,城市火灾系统同样也具有自组织临界性特征。但是,不同的火灾系统之间存在一定的差别,森林火灾系统在整

个尺度范围内满足统一的幂律关系，而城市火灾系统则具有“两段式”分布。

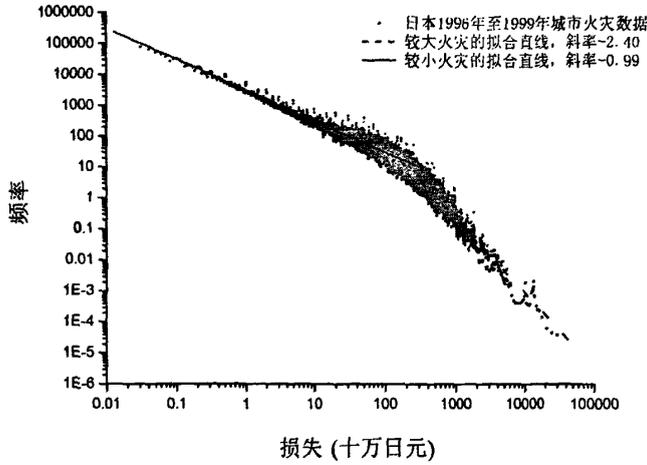


图 3.7 日本城市火灾数据“频率—损失”分布（使用当年实际价格损失）。可以看到，其分布明显分为两段。火灾规模较大的区域，拟合直线斜率 -2.40 ± 0.01 。在火灾规模较小时偏离大火灾的分布曲线，其拟合直线斜率为 -0.99 。

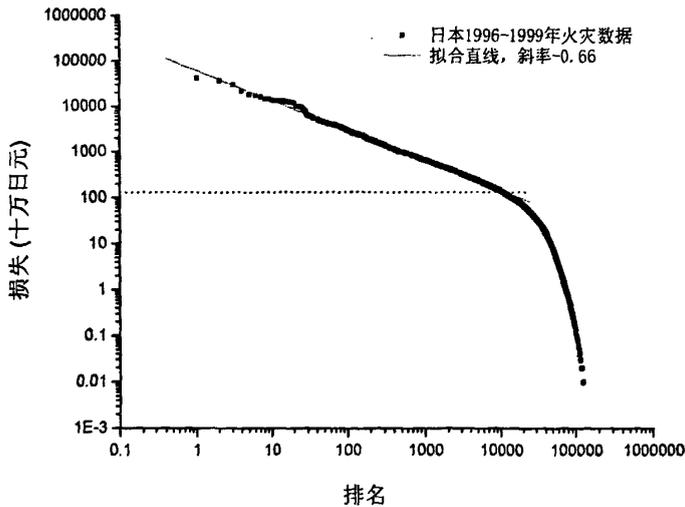


图 3.8 日本城市火灾 Zipf 分布图（使用当年实际价格损失）。可以看到，Zipf 曲线中排名比较靠前的火灾，即规模较大的火灾，满足很好的幂律关系，即图中的直线关系，拟合直线的斜率为 -0.66 ，而图中规模较小的火灾，其 Zipf 曲线明显偏离了大火灾的幂律分布曲线。

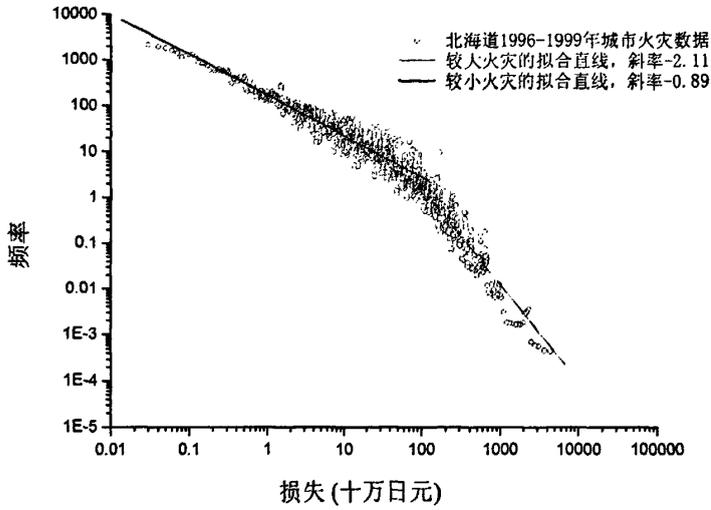


图 3.9 日本北海道火灾“频率—损失”分布（使用当年实际价格损失）。与图 3.7 比较发现，北海道的火灾与日本全国的火灾具有同样的分布规律，在双对数坐标中具有明显的两段幂律分布，大火灾满足幂律分布拟合直线斜率 -2.11 ± 0.03 ；较小的火灾偏离了大火灾的幂律分布，其拟合直线斜率为 -0.89 ± 0.01 。

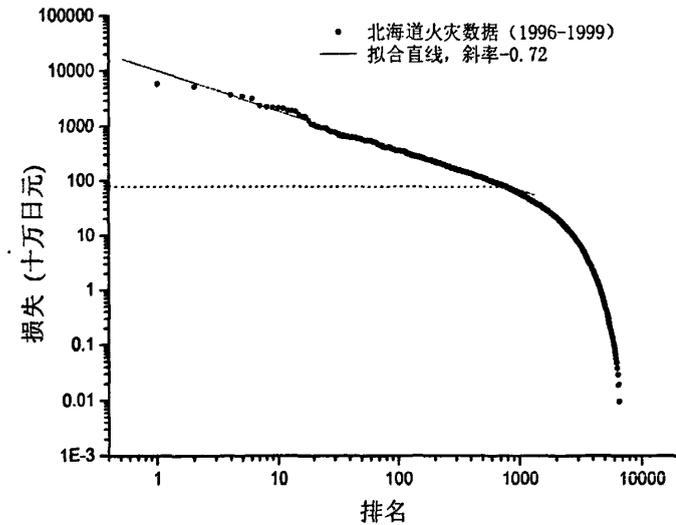


图 3.10 日本北海道火灾 Zipf 分布图（使用当年实际价格）。可以看到，损失较大的火灾其“损失—排名”分布满足很好的幂律关系，即满足 Zipf 律，拟合直线的斜率为 -0.72 ；较小损失的火灾其 Zipf 曲线则偏离了幂律分布。

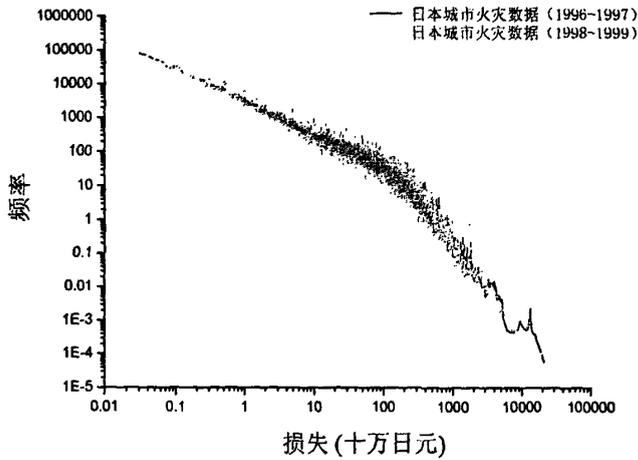


图 3.11 日本不同时期城市火灾“频率—损失”分布（使用当年实际价格损失）。两组不同时间的火灾数据基本上完全重合。在火灾规模较大时，1996 至 1997 年的数据拟合直线斜率为-2.39，1998 至 1999 年的数据拟合直线斜率为-2.45；当火灾规模较小时，1996 至 1997 年火灾数据拟合直线斜率为-0.98，1998 至 1999 年则为-0.96。

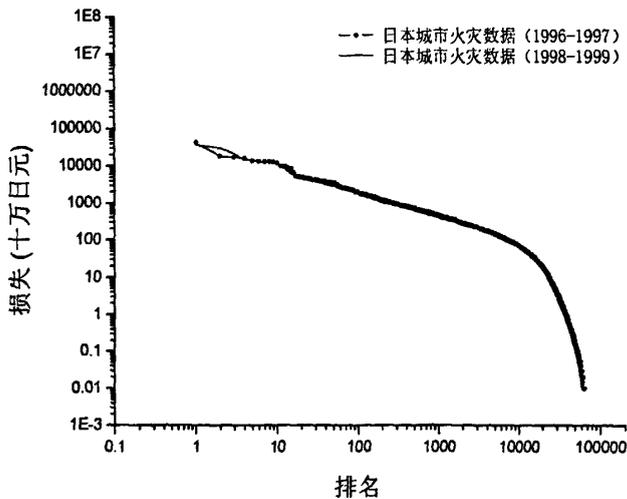


图 3.12 日本不同时期城市火灾的 Zipf 图（使用当年实际价格损失）。可以看到，两组数据基本上完全重合，与图 3.8 结果符合得非常好。损失大于 1300 万日元时，得到的拟合直线斜率均为-0.70。

3.3.3 中国城市火灾“频率—损失”分布

作为对比，我们研究了中国部分城市火灾的“频率—损失”分布。下面对结果进行分析。在研究中国城市火灾时，所用到的数据主要包括：

- (1) 辽宁省葫芦岛市 2000 年到 2006 年的城市火灾损失数据。
- (2) 甘肃省兰州市 2003 年至 2006 年的火灾数据；
- (3) 湖北省武汉市 2003 年至 2006 年的火灾数据；
- (4) 黑龙江省哈尔滨市 2000 年至 2006 年的火灾数据。

中国的城市火灾数据分别来自各市消防支队，选取上述几个城市作为研究对象，主要是因为这几个城市的地理位置分别位于东北、西北和中部，气候等方面比较有代表性。

我们首先对中国上述 4 个城市的火灾数据进行了处理，各个城市火灾的“频率—损失”分布分别在图 3.13 至图 3.16 中给出。图中均采用双对数坐标，图中所说的火灾损失均采用利用公式 (3.14) 和表 3.1 中所列的物价指数进行换算后得到的可比价格损失，损失的单位为万元。下面我们对结果进行分析和讨论。

图 3.13 和图 3.14 给出了葫芦岛和哈尔滨 2000 年至 2006 年的火灾“频率—损失”分布，图 3.15 和 3.16 是兰州和武汉 2003 年至 2006 年的火灾“频率—损失”分布。从图中结果可以看到，所选取的四个城市中，当火灾损失比较大时，其在双对数坐标中的“频率—损失”分布均满足很好的线性关系，并且至少跨越三个以上数量级，满足很好的幂律关系。

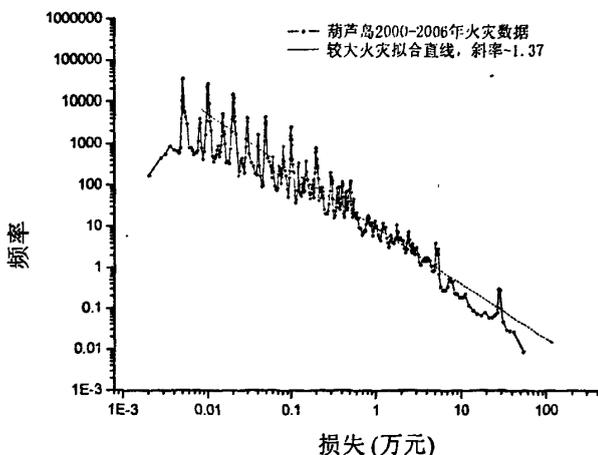


图 3.13 辽宁葫芦岛市火灾“频率—损失”分布图 (2000 年-2006 年)。可以看到，规模较大的火灾，其“频率—损失”分布满足很好的幂律关系，拟合直线的斜率为 -1.37 ± 0.03 。

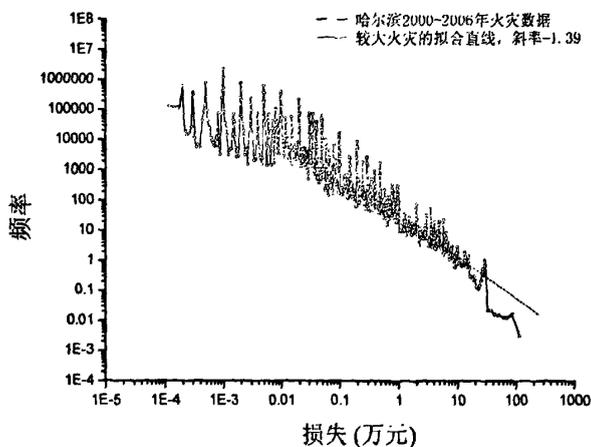


图 3.14 哈尔滨市火灾“频率—损失”分布图（2000 年-2006 年）。图中结果与图 3.13 类似，不难看出，当火灾的规模较大即火灾损失较大时，其“频率—损失”分布也满足很好的幂律关系，拟合直线的斜率为 -1.39 ± 0.02 。

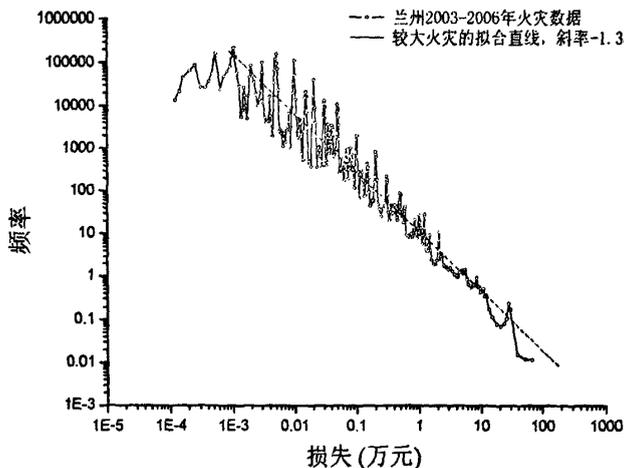


图 3.15 兰州市火灾“频率—损失”分布（2003 年-2006 年）。从图中可以看出，兰州市火灾“频率—损失”分布同样也满足幂律关系，拟合直线斜率 -1.38 ± 0.02 。

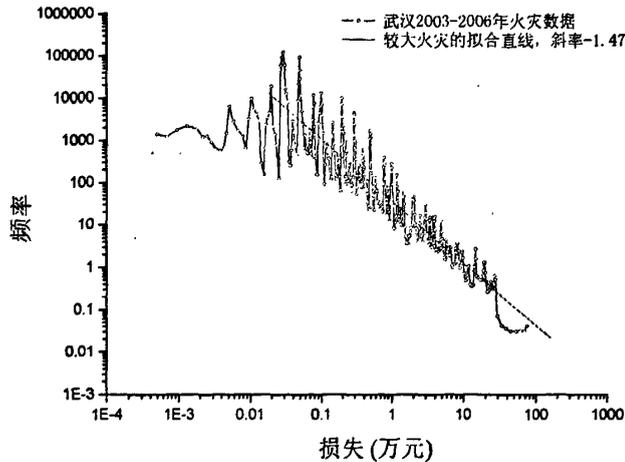


图 3.16 武汉市火灾“频率—损失”分布（2003 年-2006 年）。图中结果显示出武汉较大规模的火灾其“频率—损失”分布在双对数坐标中为线性关系，满足幂律分布，其拟合直线斜率为 -1.47 ± 0.03 。

在图 3.13 至图 3.16 中，我们可以看到，当火灾的损失较小时，火灾“频率—损失”分布会偏离幂律分布，并且这个损失阈值对于不同的城市也不相同。葫芦岛市火灾数据在大于 0.02 万元时即满足幂律分布，哈尔滨为 0.01 万元，武汉为 0.04 万元，而兰州则在损失大于 0.003 万元时即满足幂律分布。通过分析发现，出现这种现象的原因，可能在于不同的地区由于其经济发展水平以及城市规模、人口密度等不同，火灾的数量和规模也不同，各地相关部门对于火灾的记录情况也不尽相同。例如本文中所选取的 4 个城市中，相对来说兰州的火灾较少，而且其火灾规模一般较小，而东北地区由于其气候特点，一直都是火灾多发地区，武汉属于人口密集的大城市，人员活动密集繁多，火灾数量大，同时经济相对发达，火灾造成的损失也更大，因此兰州的小火灾记录会更加完善，因此，在计算“频率—损失”分布时，满足幂律分布的火灾损失阈值就会向较小的火灾损失偏移。如果对小火灾作线性回归拟合，其斜率在 0 附近浮动，即频率不随损失变化。Song 等人（2001）用中国和安徽省部分城市火灾数据发现中国较大损失的城市火灾具有幂律分布，斜率约为 -2.10 ，这与我们利用日本城市火灾得到的结果接近。同时，我们所得到的中国部分城市火灾的幂指数为 -1.37 至 -1.47 ，又与日本城市火灾中的小火灾部分比较接近。这种情况表明，城市火灾的小火灾部分具有与大火灾不同的幂律分布，城市火灾的“频率—损失”分布具有两段幂律关系。

中国城市火灾的“频率—损失”分布的幂律关系同样具有时间上的稳定性。

图 3.17 给出了葫芦岛市火灾“频率—损失”幂律关系的稳定性。可以看到，2000 年至 2003 年和 2004 年至 2006 年的火灾数据在损失较大时基本重合，也就是说 2000 年至 2006 年，葫芦岛的火灾损失分布规律基本不变，当火灾损失大于某一阈值时，其幂律分布具有稳定性。同样可以发现，武汉、兰州以及哈尔滨的城市火灾数据也存在着类似的性质，即幂律分布不随时间范围的不同而变化，其结果如图 3.18 至 3.20 所示。

从日本及部分中国城市火灾数据的分析可以看到，城市火灾的“频率—损失”分布具有明显的幂律关系，并且这种幂律关系都是稳定的，不随观测尺度变化，不随观测时间变化。这说明城市火灾系统都具有自组织临界性特征，而且可以看到，日本城市火灾系统具有分形特征。同时，日本的城市火灾具有明显的“两段式”幂律关系；通过与前人研究成果的对比发现，中国城市火灾系统也具有类似分布规律。“频率—损失”分布稳定的幂律关系对真实的火灾防治具有重要的意义。由于火灾系统满足“频率—损失”幂律关系，如果知道了火灾系统在过去几十年的火灾损失历史数据，我们就可以根据幂律关系预测出在以后十到几十年火灾发生的大致情况。在满足幂律关系的区间内，可以由中小火灾的发生频率来预测大规模火灾的发生频率。

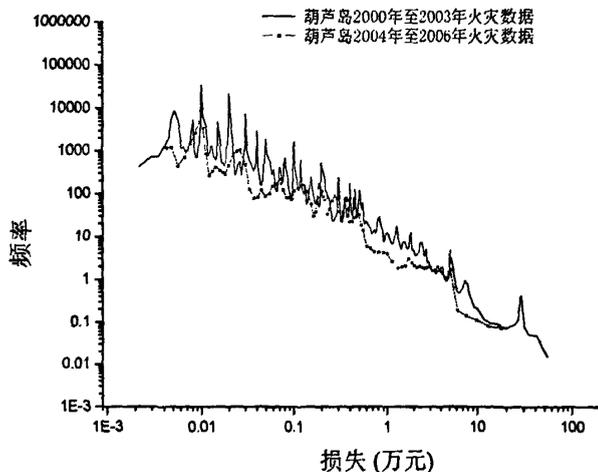


图 3.17 葫芦岛火灾“频率—损失”幂律关系的时间稳定性。由图中可以看到，两组数据基本重合，并且在较大规模火灾区域，两组不同时期火灾数据的“频率—损失”分布都满足幂律关系。

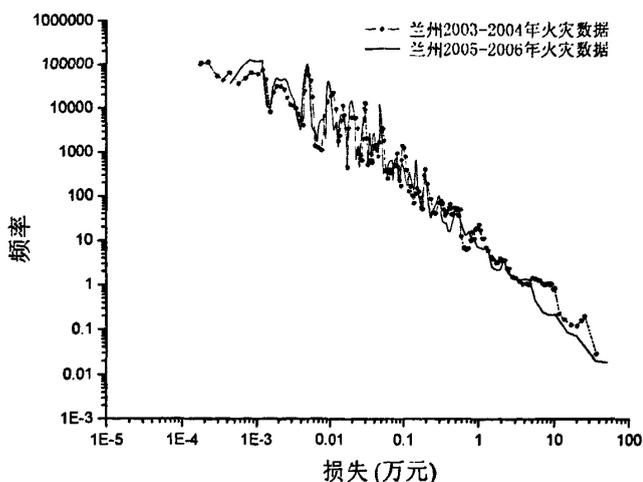


图 3.18 兰州火灾“频率—损失”幂律关系的时间稳定性。可以看到，图中两组数据基本上完全重合，在火灾规模较大的区域内，两组不同时期的火灾数据均满足“频率—损失”幂律关系；当火灾规模较小时，数据会偏离幂律分布曲线。

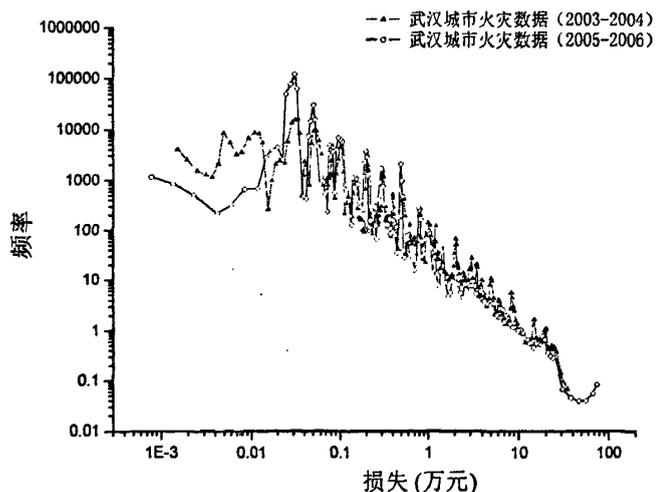


图 3.19 武汉火灾“频率—损失”分布幂律关系的时间稳定性。从图中可以看到，2003年至2004年和2005年至2006年两组火灾数据在火灾损失较大时，基本上完全重合，在双对数坐标中都呈现线性关系，具有幂律关系；火灾损失较小的区域，会偏离幂律关系。

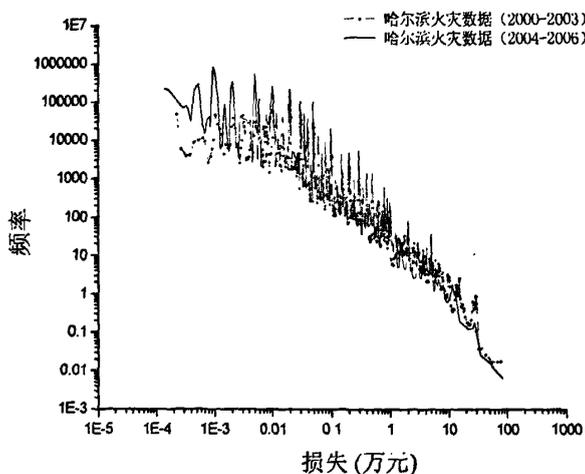


图 3.20 哈尔滨火灾“频率—损失”分布幂律关系的时间稳定性。结果表明，哈尔滨不同时期的两组火灾数据表现出相似的性质，较大的火灾损失在双对数坐标中均具有较好的线性关系，其“频率—损失”分布满足幂律关系。当火灾损失较小时，会偏离幂律曲线。

3.4 本章小结

本章通过对日本的森林火灾数据、城市火灾数据以及部分中国城市火灾数据的分析，我们可以得到以下结论：

- (1) 真实森林火灾系统具有自组织临界性特征，通过对日本 1989 年至 2000 年森林火灾数据的分析发现：日本森林火灾的“频率—面积”曲线满足幂律关系，相应的指数值约为-1.75。并且这种幂律关系具有很好的稳定性，不随时间以及观测空间尺度的改变而变化。稳定的“频率—面积”幂律关系在真实森林火灾防治中有重要的实际意义，利用中、小型火灾的发生情况，可以评估发生大规模火灾的概率。假如能得到某森林区域在过去几十年的森林火灾数据，则可以根据其“频率—面积”分布规律推断出该森林在以后几十年内森林火灾发生的大致情况。
- (2) 不同国家的森林火灾具有相同的规律：中国、日本以及美国的森林火灾均具有自组织临界性特征，由于不同系统内的影响因素不尽相同，其幂律指数不完全相同。森林火灾事件的分布具有分形自相似性，分形维数可以由“频率—面积”的幂律分布指数计算得到。
- (3) 城市火灾系统具有自组织临界性特征。利用日本 1996 年至 1999 年的城

市火灾数据分析得到：火灾的“频率—损失”幂律关系具有尺度不变性：不同大小的火灾系统（比如日本全国火灾系统和北海道火灾系统）具有相同的幂律关系。同时，火灾的“频率—损失”幂律关系具有稳定性：不同时期的“频率—损失”幂律关系是相同的。与森林火灾系统不同，其“频率—损失”具有“两段式”幂律关系。

- (4) 不同国家的城市火灾“频率—损失”分布具有相似性。通过日本城市火灾、中国部分城市火灾数据的计算和与 Song 等人（2001）所得到的结果的对比发现，较大规模火灾的“频率—损失”分布均具有幂律关系，小火灾具有与大火灾不同的幂律关系，不同国家的城市火灾具有相似分布规律。
- (5) 城市火灾损失事件满足 Zipf 律。我们将火灾按损失由大到小排序，研究了火灾的“损失—排名”分布，发现其满足幂律关系。与火灾的“频率—损失”幂律关系类似，火灾的 Zipf 律也具有尺度不变性和稳定性。在较小规模火灾区域，Zipf 律被破坏。

第4章 火灾系统的时间分布特征

- *****
- > 引言
- > 时间序列分析方法
- > 火灾系统的时间标度性
 - ✓ 森林火灾系统的时间标度性
 - ✓ 城市火灾系统的时间标度性
 - ✓ 相对湿度的时间特征
- > 本章小结
- *****

4.1 引言

研究森林火灾的分布特性是森林生态学中的难点问题之一，因为火灾的影响因素具有多样性和复杂性，并且大多数因素的定量作用是未知的。而比较火灾的时间和空间分布特性与幂律的关系是一种很好的研究方法，因为幂律分布对应着多种时间和空间分布特性，很多的系统都具有这样的性质。在第三章中，我们研究了日本森林火灾和城市火灾的空间分布特征，并与中国的火灾数据进行了对比分析，发现其“频率—面积”与“频率—损失”分布满足幂律关系，具有分形自相似特征。本章我们将研究火灾的时间分布特征。

Malamud 等人（2005）利用美国的高分辨率数据记录的野火数据，计算火灾时间间隔，发现大于等于某一面积的火灾的再现时间间隔，可以用来对野火区域的危险度估计进行分级。Ricotta 等人（2006）研究了意大利 Cilento 国家公园的野火时间序列的统计特性，分析了野火时间间隔规律，发现在给定时间间隔 t 时，时间间隔的累积分布 $N(t' > t)$ 满足幂律分布，幂指数大约为 0.62，说明野火序列中存在着尺度不变的丛集现象。同时还分析了火灾时间分形维数对于面积阈值的依赖性，发现随着给定面积阈值的增加，分形维数逐渐变小，说明大火灾的时间分布比整个火灾时间序列的分布更具有随机性。Telesca 等人（2006）利用意大利中部 1997 年到 2003 年的火灾数据，采用 Allan 因子统计，分析了火灾序列的时间分布，发现火灾时间序列存在着与气候周期性相关的现象，并且 Allan 因子的分布满足幂律关系，不同的时间范围内，其幂指数略有不同，这种时间标度行为表明火灾序列是一个具有高度丛集性的分形过程。

Corral 等人 (2008) 发现, 即使是在“频率—面积”不满足幂律的情况下, 意大利相邻两次火灾的时间间隔 (等待时间) 的分布满足标度律, 并且火灾发生时间和火灾面积之间的相互关联可能是造成标度律的原因, 这使得火灾发生具有这样的趋势: 一次大火之后的平均火灾时间间隔变小, 同时下一次火灾的平均面积变大, 这种相关性最多可以延伸至数百次相邻火灾。

在第三章中我们研究了真实火灾系统的空间分形特征, 从第一章引言中我们也看到, 很多系统比如降雨、地震等, 其事件的时间间隔具有幂律分布, 而且对意大利的森林火灾系统的研究中也发现了时间分形特征, 因此, 火灾系统包括森林火灾和城市火灾的时间分布特征是一个值得关注与研究的问题。它是否与火灾的空间分布一样, 具有分形特征? 森林火灾系统与城市火灾系统是否具有同样的时间分布规律?

从目前的研究来看, 对于火灾系统时间标度行为的研究很少, 而且对于城市火灾系统的研究还没有发现。因此本章将研究日本森林火灾及城市火灾系统的时间标度行为, 并与其影响因素—平均相对湿度进行对比分析。

4.2 时间序列分析方法

一系列火灾事件构成了一个按时间排序的事件序列, 该序列可以看作是一个随机点过程队列。随机点过程序列用来描述在某个任意位置按时间顺序发生的事件 (Cox and Isham 1980)。任何一个点序列都可以通过一些统计方法来研究其统计行为, 点序列中统计数据的标度行为标志着这个过程在一个相对较大的时间尺度范围内具有点聚类 (丛集性) 现象 (Lowen and Teich 1993, 1995; Teich et al. 1996)。研究时间序列丛集性 (集群化) 的常见标准方法是利用功率谱密度, 它表示了该序列中事件在各个频率段的聚集程度。通过对数据进行傅里叶变换即可得到功率谱密度, 该方法可以用来检测具有单周期、多周期或者无周期行为的事件。如果事件的时间序列具有标度行为, 则功率谱密度满足 $S(f) \propto f^{-\alpha}$, 其中 α 是分形指数, 用来度量聚类性强度。具有聚类性的点过程会在某些统计性质上表现出幂律分布 (分形), 因此可以用幂律分布来描述该过程的性质 (Thurner et al. 1997), 并且可以估算其分形指数 α (Lowen and Teich, 1995; Teich et al. 1996), α 的大小反应了该过程是否具有丛集性特征 (Lowen and Teich, 1993)。如果 $\alpha = 0$, 则各次事件的发生时间之间不存在相关性, 该过程为泊松过程; 如果 $\alpha \neq 0$, 则该事件为粉红噪音, 各次事件的时间之间具有相关性。因此, 对于火灾序列的分形指数 α 的估算在研究隐藏在火灾现象之下的机制的一般特性时具有重要的作用。

对火灾序列的时间特性的分析可以用来揭示其丛集性。由任意随机点过程得到一个不连续的时间点过程序列，一般有两种方法：(1) 事件时间间隔序列 (2) 区间计数值序列。第一种方法中，非连续时间序列以公式 (4.1) 产生：

$$\tau_i = t_{i+1} - t_i \quad (4.1)$$

其中 t_i 是第 i 次火灾事件的发生时间，其产生过程如图 4.1(b) 所示。第二种方法中，把所有的火灾事件按时间顺序排列，然后把时间轴以间隔 T 等距分割成很多连续的计数窗口，这样就可以产生一个计数序列 $\{N_k(T)\}$ ， $N_k(T)$ 为第 k 个窗口内的火灾次数，图 4.1(c) 给出了其生成示意图。本章将采用几种不同的手段分析火灾发生的时间特性。

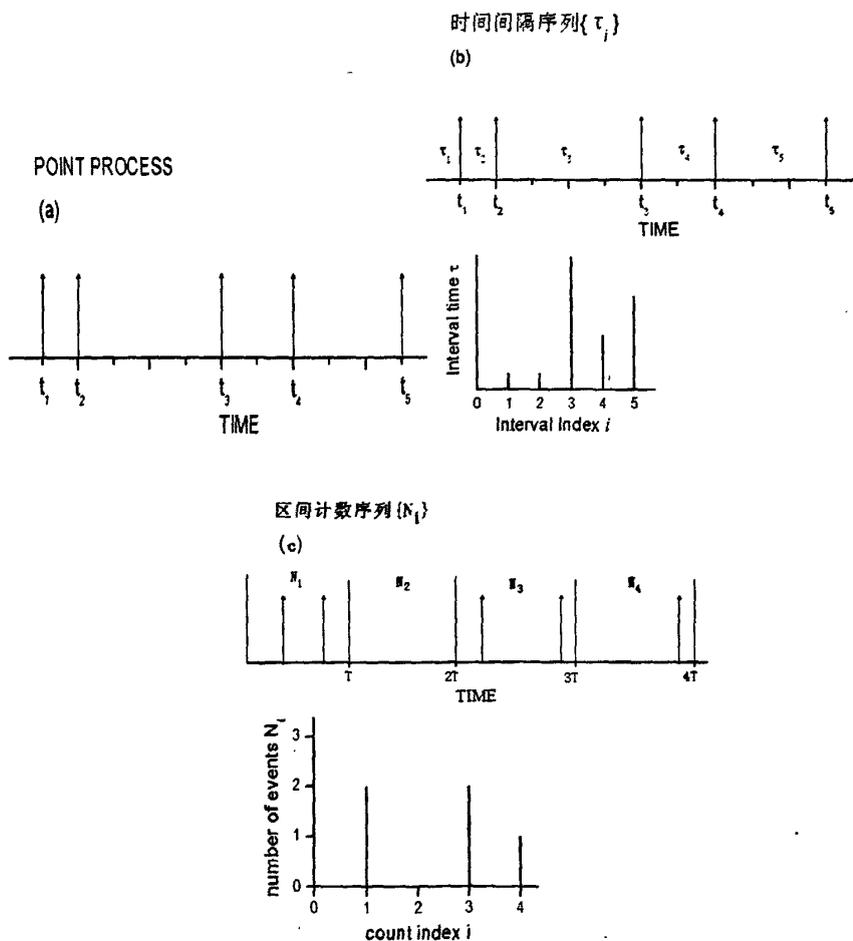


图 4.1 两种事件时间序列生成方法示意图。(a) 按时间排序的事件序列；(b) 时间间隔序列的生成方法，两次相邻事件的时间差即为时间间隔；(c) 区间计数序列的生成方法。

(1) 变异系数

变异系数是研究点过程丛集性特征的常用手段，定义如下：

$$C_v = \frac{\sigma_\tau}{\langle \tau \rangle} \quad (4.2)$$

其中 $\langle \tau \rangle$ 表示时间间隔的均值， σ_τ 是标准偏差。一般情况下泊松过程即完全随机过程的变异系数满足 $C_v=1$ ，事件发生时间之间相互独立；如果一个点过程具有丛集性分布，则有 $C_v>1$ ， C_v 越大，说明这种丛集性越明显。这种方法无法得到其聚类性的时间尺度范围，可结合其他统计方法对某点过程的分形特征进行研究。

(2) 频率—时间间隔（事件间隔直方图 IIH）

火灾数据按时间先后顺序排序，然后以公式 (4.1) 产生时间间隔序列 $\{\tau_i\}$ ，对得到的序列做如下计算：

$$F(\tau) = \text{IIH}(\tau) = -d \dot{N}_{(\tau>\tau)} / d\tau \quad (4.3)$$

其中 $\dot{N}_{(\tau>\tau)}$ 是两次事件发生时间之间的间隔大于 τ 的次数。由其计算公式可知， $F(\tau)$ 表示两次事件间隔为 τ 的出现频率，因此称为“频率—时间间隔”分布，其计算方法与森林火灾的“频率—面积”分布计算方法类似。这种方法又称为事件间隔直方图 (interevent-interval histogram, 即 IIH)，一般用来描述时间间隔之间相互独立并且均匀随机分布的变量，比如泊松分布 (Therner et al. 1997)。对于具有聚类性的分形过程，其 IIH 对时间间隔 τ 之间满足幂律关系 (Therner et al. 1997)。然而这种方法只能用来描述相邻事件之间的时间差的分布行为，无法用来揭示这些时间差之间所包含的信息，比如相邻时间差之间的相互关系，因此还需要其他的一些统计量来研究变量之间具有相关性的序列。Thurner 等人 (1997) 对分形进行研究时指出，当某些时间点序列的 IIH 不满足幂律关系，但是通过其他一些统计手段发现其满足标度律与自相似性时，这个序列实际上不是真正意义上的分形，属于分形—比率随机过程 (fractal-rate stochastic point process)。

上述两种研究手段所采用的序列均是通过公式 (4.1) 产生的，即使用事件时间间隔序列，主要用来判别时间序列的丛集性与分形。

(3) Fano 因子 (FF, 法诺因子)

对于任意一个事件序列，即使从表观上看不出任何的自相似性或者分形丛集性，我们也可以通过某些统计方法来分析其标度行为。其中的一种方法就是利用 Fano 因子进行研究。事件次数的方差与事件次数的平均值之比称为 Fano 因子 (FF)，它是时间窗口 T 的函数，可用公式 (4.4) 表示：

$$FF(T) = \frac{\text{var}[N_i(T)]}{\langle N_i(T) \rangle} \quad (4.4)$$

其中, $N_i(T)$ 表示以长度 T 为时间窗口对序列进行等分后第 i 个时间窗口内火灾出现的次数, $\text{var}[\dots]$ 表示方差, $\langle \dots \rangle$ 表示对其求均值。通过改变 T 的大小, 可得到一系列的 FF 值, 从而得到 $FF(T)$ 随 T 的变化关系。如果一个点序列具有分形特征, 则其点序列的 $FF \sim T$ 满足标度律, 即有:

$$FF(T) \propto T^\alpha \quad (4.5)$$

其中, $0 < \alpha \leq 1$ 称为标度律指数。如果 $\alpha \approx 0$, 则说明该火灾发生序列是泊松过程, 各次火灾时间之间没有相关性。

(4) Allan 因子 (AF , 阿伦因子)

Fano 因子虽然可以用来识别某序列是否存在分形自相似性, 但是, 由于其分形指数范围为 $0 < \alpha \leq 1$, 因此, 对于分形指数大于 1 的序列, 该方法即无法进行判别, 这时我们就可以用 Allan 因子 (AF) (Allan, 1966) 来研究。Allan 因子是另外一种研究点序列过程的手段, 可以用来研究分形指数最高为 3 的序列, 其计算公式如下式 (4.6):

$$AF(T) = \frac{\langle (N_{k+1}(T) - N_k(T))^2 \rangle}{2\langle N_k(T) \rangle} \quad (4.6)$$

与 FF 类似, 通过改变不同的时间窗口 T 可以得到一系列 AF 值, 进而得到 $AF(T)$ 对 T 的变化关系, 同样可以对一个序列中的标度行为进行度量。对于一个分形点过程序列, AF 满足幂律:

$$AF(T) \propto T^\beta \quad (4.7)$$

其中 $0 < \beta < 3$ 为标度律指数。若标度律指数为 0, 则该序列是泊松随机分布过程。由于其可用于研究分形指数大于 1 的系统, 因此相对于 Fano 因子而言, Allan 因子在研究点过程的时间特征中适用范围更广。

4.3 日本火灾系统的时间分布特征

为了研究火灾系统包括森林火灾与城市火灾系统的时间分布特征, 我们以日本的火灾数据为例, 分别以变异系数、“频率—时间间隔”、Fano 因子 (FF) 以及 Allan 因子 (AF) 分析了日本火灾的时间分布规律, 所使用的火灾数据包括日本 1996 年至 2000 年所有面积大于 100m^2 的森林火灾以及 1998 年至 1999 年城市火灾数据。下面对结果进行分析与讨论。

4.3.1 森林火灾系统的时间标度性

首先我们分别对森林火灾按照火灾发生时间的先后顺序进行排序, 得到森林火灾时间点过程序列 $\{t_i\}$ 。以1999年的森林火灾为例, 图4.2中给出了1999年每次火灾的面积与在该火灾序列中所处的位置, 其横轴 t 的取值以1996年1月1日零点作为原点。从图4.2可以看到, 森林火灾的发生具有有较为明显的聚集成堆的现象。我们对这种聚集现象进行了进一步的研究。

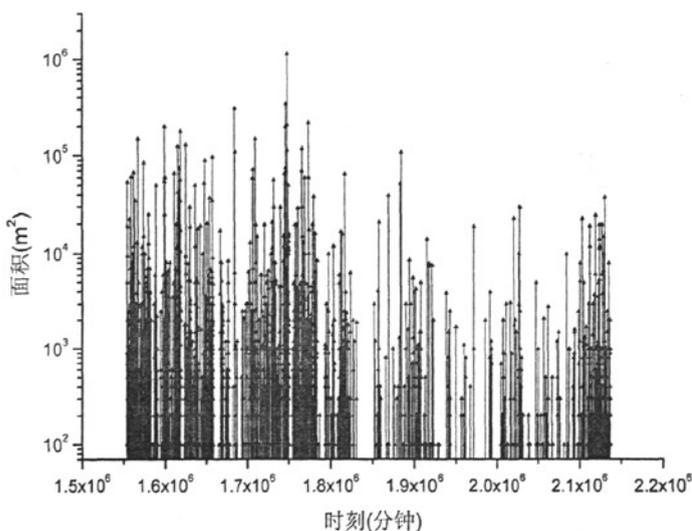


图4.2 由日本森林火灾所得到的点过程时间序列(1999年数据, 以1996年1月1日零点作为时间原点)

对森林火灾时间点序列 $\{t_i\}$ 使用公式(4.1)处理, 即可得到任意两次发生时间相邻的火灾之间的时间间隔, 从而生成时间间隔序列 $\{\tau_i\}$, 图4.3中给出了1996年的火灾时间间隔序列。由变异系数计算公式(4.2)可得, 1996年的森林火灾时间间隔的变异系数为 $C_V=3.08$, 1996年至2000年日本所有森林火灾的变异系数 $C_V=3.15$ 。可以看到, 不论是某一年的火灾数据, 或者是多年的火灾数据, 其变异系数都满足 $C_V>1$, 说明日本的森林火灾时间序列具有明显的丛集性分布特性。

图4.4中给出了日本1999年和2000年森林火灾的IIH即“频率—时间间隔”分布, 从图中可以看到, 在双对数坐标中, “频率—时间间隔”具有线性分布关系, 拟合直线的斜率为 -0.95 , 满足幂律关系, 而在对数—线性坐标中则表现出了非线性。从图4.4(b)对数—线性坐标中可以看到, “频率—时间间隔”分布具

有几个峰值点，图中箭头所指的位置，分别位于24小时，48小时和72小时附近，这对应着实际中的周期循环波动，说明了火灾时间有以一天为周期的特征。而且，图4.4(a)中1999年和2000年的火灾时间“频率—时间间隔”基本完全重合，表明其幂律分布具有很好的时间稳定性。

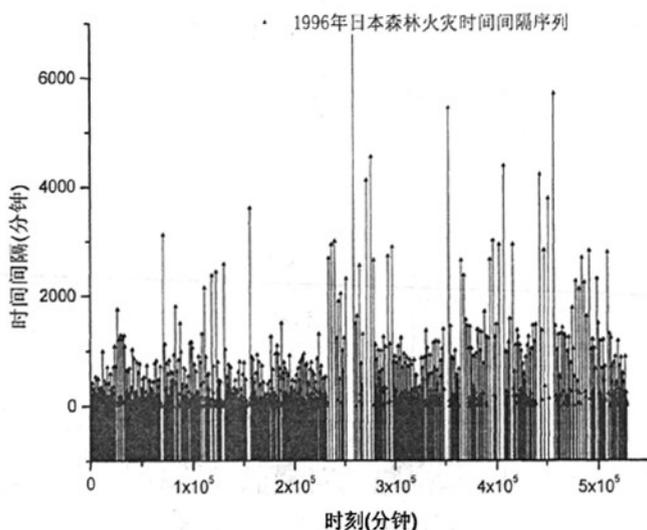
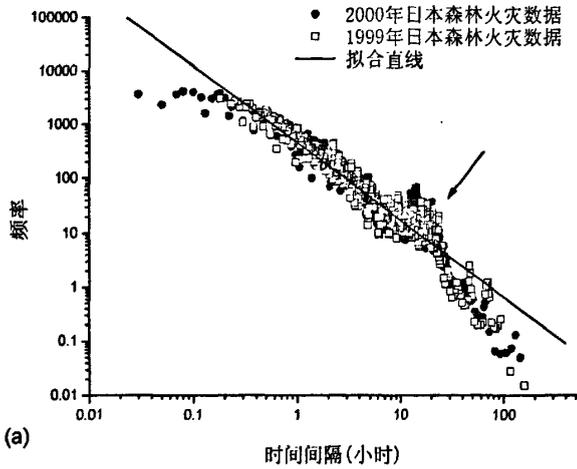


图4.3 1996年日本森林火灾时间间隔序列。若以1996年数据的时间序列计算，则可得到其变异系数 $C_V=3.08$ ，若以1996年至2000年所有森林火灾得到的时间间隔序列进行计算，可以得到其变异系数为 $C_V=3.15$ ，从而说明了日本森林火灾时间序列具有很强的丛集性分布。

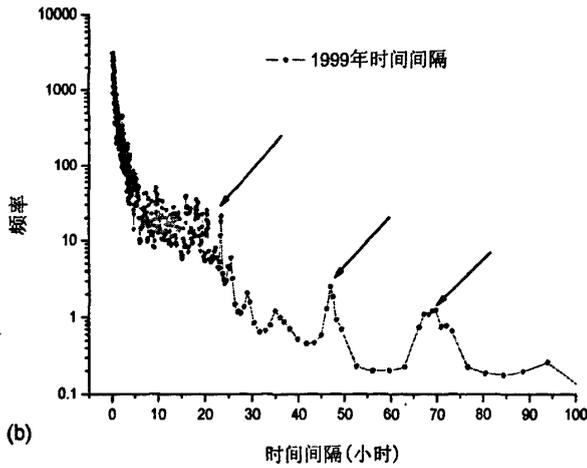
为了进一步研究日本森林火灾的时间分布特征，我们使用法诺因子 FF 和阿伦因子 AF 分析了日本1996年至2000年森林火灾数据，时间窗口 T 的取值范围从30分钟开始，每隔30分钟计算一次 FF 与 AF ，最大时间窗口为整个时间长度的 $1/10$ ，即为182天（1996年至2000年时间长度为1827天）。结果显示在图4.5和4.6中。

图4.5给出的是1996年至2000年日本森林火灾时间序列的法诺因子 FF 随时间尺度 T 的变化。不难发现，在时间窗口的尺度大于 $T=1440\text{min}$ （即24小时）时，其法诺因子 FF 与时间窗口尺度 T 之间具有很好的线性关系，其拟合直线的斜率为 $\alpha=0.685\pm 0.001$ ，相关系数0.988，即 $FF\sim T$ 之间满足很好的幂律关系， $\alpha>0$ 表明森林火灾事件的发生之间存在相关性。这里的时间窗口尺度范围 $T=1440\text{min}$ 与图4.4中得到的“频率—时间间隔”中的箭头所指示的24小时表现出了很好的一致性。当时间窗口尺度小于1440min时，随着时间窗口 $T\rightarrow 0$ ，

FF 值会趋向于 1, 即当时间窗口足够小时, 每个窗口内最多只有 1 次火灾事件, 从而构成一个由 0 和 1 组成的伯努利随机变量序列 (Teich et al. 1997)。



(a)



(b)

图 4.4 日本森林火灾“频率—时间间隔”分布 (1999 年和 2000 年)。可以看到, 在双对数坐标中, 真实森林火灾系统的“频率—时间间隔”具有线性分布, 拟合直线的斜率为 -0.95, 而在对数—线性坐标中, 则表现出非线性, 表现出了幂律分布关系, 并且两年的数据基本上完全重合, 表现出了很好的稳定性。从图(b)中可以看到, “频率—时间间隔”分布具有几个峰值点, 图中箭头所指的位置为 24 小时、48 小时和 72 小时处。

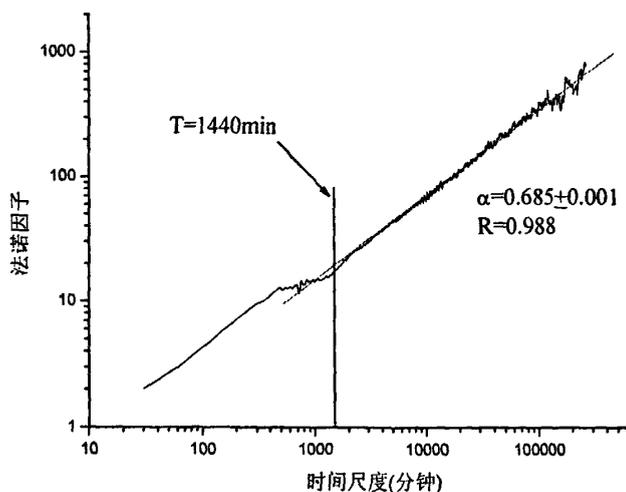


图 4.5 日本森林火灾时间序列的 Fano 因子 (1996 年至 2000 年)。从图中可以看到, 当时间尺度 $T > 1440\text{min}$ (即 24 小时) 时, 火灾时间序列的 Fano 因子在双对数坐标中在较大的时间尺度范围内都具有很好的线性关系, 即满足幂律分布, 其拟合直线的斜率为 $\alpha = 0.685 \pm 0.001$, 相关系数 0.988。

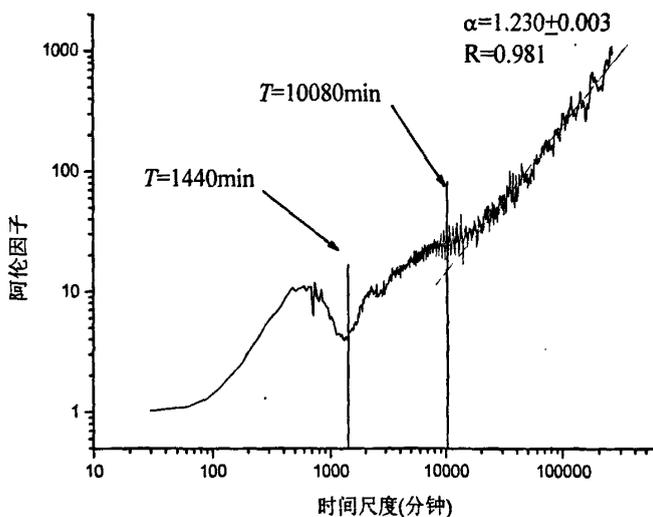


图 4.6 日本森林火灾时间序列的 Allan 因子 (1996 年至 2000 年)。从图中可以看到, 当时间尺度 $T > 10080\text{min}$ (即 7 天) 时, 火灾时间序列的 Allan 因子在双对数坐标中在较大的时间尺度范围内具有很好的线性关系, 即满足幂律分布, 其拟合直线的斜率为 $\alpha = 1.230 \pm 0.001$, 相关系数 0.981。

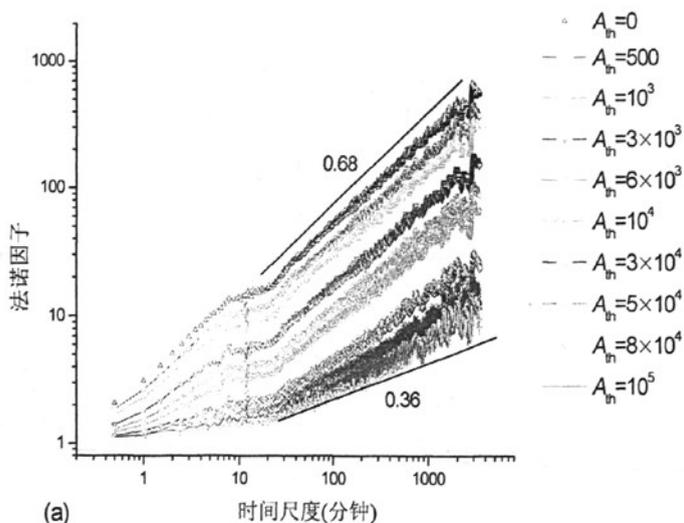
日本森林火灾时间序列的阿伦因子 AF 随时间窗口的变化显示在图 4.6 中。图中的结果显示出, 当时间尺度 $T > 10080\text{min}$ (即 7 天) 时, 火灾时间序列的 Allan 因子在双对数坐标中在较大的时间尺度范围内具有很好的线性关系, 即满足幂律分布, 其拟合直线的斜率为 $\alpha = 1.230 \pm 0.001$, 相关系数 0.981。同时, $T = 1440\text{min}$ 时的波谷也与图 4.6 中 FF 的标度律尺度范围相吻合。从图 4.6 的结果可知, 日本森林火灾的时间序列在时间尺度大于 7 天时, 具有分形无标度性。

图 4.4 至图 4.6 的结果说明, 真实森林火灾系统的时间序列具有分形特征, 该特征是系统事件内部的固有属性, 不会因选取的时间不同而变化。

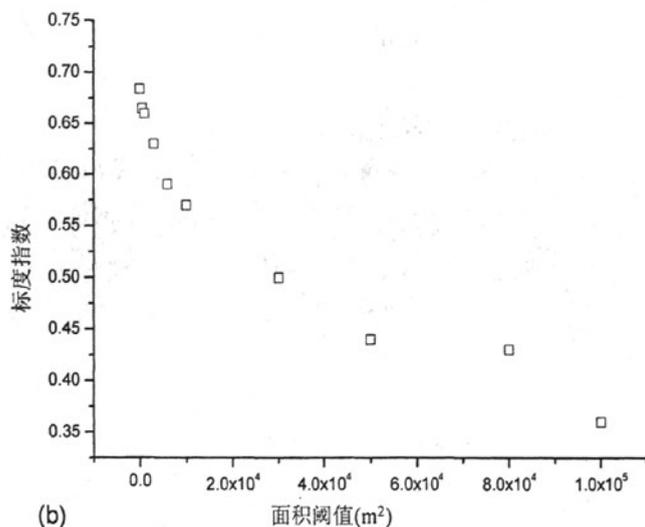
由于众所周知的原因, 火灾可能并不能被完全记录下来, 部分小火灾会被忽略不计, 而由于社会效应等原因, 规模相对较大的火灾则一般都有记录, 那么不同完备性的火灾记录中的火灾是否还具有分形特征? 不同规模的火灾其时间分布有什么不同? 因此, 我们设定了不同的面积阈值 A_{th} , 通过法诺因子 FF 和阿伦因子 AF 研究了火灾的时间分形对火灾面积的依赖性。我们选择了日本 1996 年至 1999 年的森林火灾作为研究对象, 面积阈值 A_{th} 依次取 0 (不取阈值), 500 m^2 , 1000 m^2 , 3000 m^2 , 6000 m^2 , 10^4 m^2 , $3 \times 10^4\text{ m}^2$, $5 \times 10^4\text{ m}^2$, $8 \times 10^4\text{ m}^2$ 以及 10^5 m^2 。由于面积大于 10^5 m^2 时火灾次数非常少, 因此, 我们不考虑阈值大于 10^5 的火灾序列。

图 4.7 (a) 给出了不同阈值下 FF 曲线随时间尺度 T 的变化。可以看到, 对不同的阈值 A_{th} , 当时间尺度 T 大于 24 小时时, 其 FF 曲线与时间尺度 T 之间在双对数坐标中具有非常好的线性关系, 满足很好的幂律关系。图 4.7 (b) 给出了 $FF \sim T$ 曲线所满足的标度律指数随阈值 A_{th} 的变化。从图中看到, 随着 A_{th} 从 0 递增至 10^5 , $FF \sim T$ 曲线的标度律指数 α_{FF} 从 0.684 递减到 0.36, 平均值为 0.553, 标准偏差为 0.114。

同样, 对取不同阈值时的 AF 值进行了计算, 其随时间尺度 T 的变化曲线显示在图 4.8 中。从图 4.8 (a) 中可以看到, 阈值不同时, 在时间尺度大于 168h 时, AF 曲线随时间尺度 T 依然满足较好的幂律关系; 而从图 4.8 (b) 中可知, 随着 A_{th} 阈值的增大, $AF \sim T$ 曲线的标度律指数逐渐递减, 从 1.13 降低至 0.56, 其指数平均值为 0.911, 标准误差为 0.197。图 4.7 和图 4.8 中标度律指数 α_{FF} 和 α_{AF} 随着面积阈值的增加都逐渐减小, 表明大规模面积的森林火灾的分形自相似性相对于小火灾而言较弱, 其发生时间具有更强的随机性。



(a) 时间尺度(分钟)



(b) 面积阈值(m²)

图 4.7 面积阈值 A_{th} 对 FF 曲线及火灾时间分布的影响 (1996 年—1999 年数据)。

(a) 取不同的面积阈值 A_{th} 时, FF 曲线随时间窗口 T 的变化, 图中曲线的阈值从上往下依次增加; 可以看到, 在双对数坐标中, 不同阈值的 FF 曲线在时间尺度 $T > 24h$ 时都具有明显的线性关系, 即 FF 与 T 之间满足幂律关系。(b) FF 曲线的标度律指数随阈值 A_{th} 的变化趋势。随着阈值从 0 增加到 $10^5 m^2$, FF 曲线的标度律指数逐渐递减, 平均值为 0.553 (± 0.114)。

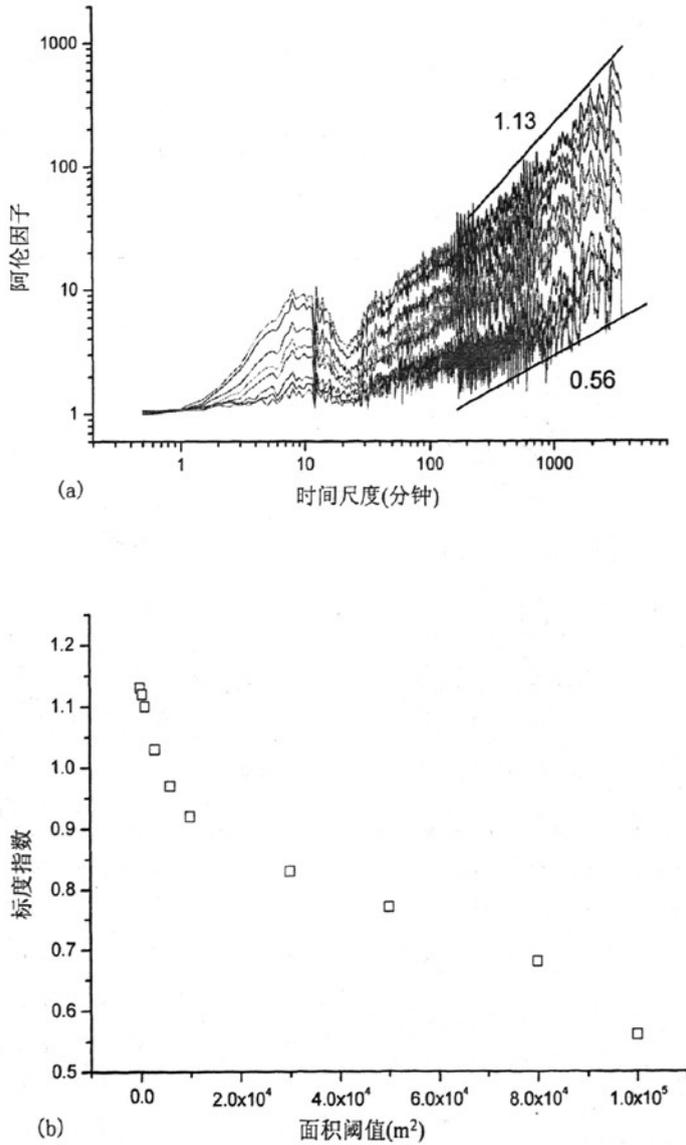


图 4.8 面积阈值 A_{th} 对 AF 曲线及火灾时间分布的影响 (1996 年—1999 年数据)。
 (a) 取不同阈值时, AF 曲线随时间尺度 T 的变化, 图中的曲线从上往下其阈值依次增加; 在双对数坐标中对时间尺度 $T > 168h$ 的 AF 曲线进行拟合, 可以得到很好的线性关系, 表明 $AF \sim T$ 之间满足幂律关系。(b) 面积阈值对 AF 拟合直线斜率即标度律指数的影响; 随着阈值的增加, AF 拟合直线的斜率从 1.13 递减至 0.56, 平均值为 0.911 (± 0.200)。

从图 4.5 至图 4.8 的结果中看到, 日本 1996 年至 2000 年的森林火灾与 1996

年至 1999 年的森林火灾的 FF 曲线拟合直线斜率为 0.685 和 0.684, AF 曲线拟合直线斜率为 1.23 和 1.13, 说明了森林火灾的时间幂律分布在整体与局部之间具有很好的稳定性, 这种幂律分布表征了火灾时间分布的分形自相似性, 与火灾的面积分布具有类似的结果。

综上所述, 森林火灾的发生时间具有丛集性分布的特点, 森林火灾时间序列在一个较大的尺度范围内具有分形特征以及标度律行为, 同时随着火灾规模的增加, 火灾时间分布可能会发生转变, 大规模的森林火灾的随机性会增强, 其分布逐渐趋向于泊松分布。

4.3.2 城市火灾系统的时间标度性

在第三章我们对日本的森林火灾和城市火灾的“频率—强度”的研究中发现, 森林火灾和城市火灾的“频率—强度”分布具有不同的幂律表现形式, 那么火灾的时间分布中有没有这种差异性? 城市火灾相对于森林火灾而言, 它的影响因素更加复杂, 那么城市火灾的时间分布是否具有分形特征? 下面我们针对日本的城市火灾数据进行分析。

首先我们对日本 1998 年至 1999 年的城市火灾发生时间序列, 由于火灾数量巨大, 共 65854 次火灾记录, 因此我们在图 4.9 中以日本 1998 年 1 月 1 日至 1 月 10 日的城市火灾时间序列作为示例, 横轴 t 以 1998 年 1 月 1 日零点作为原点。对得到的火灾时间序列以公式 (4.1) 计算可得到其时间间隔序列 $\{\tau_i\}$, 图 4.10 中显示了以图 4.9 中数据得到的时间间隔序列 (1998 年 1 月 1 日至 1 月 10 日)。利用公式 (4.2) 计算得到 1998 年至 1999 年所有城市火灾的变异系数值 $C_V=1.2$, 说明日本的城市火灾时间分布丛集性较弱。

图 4.11 给出了日本 1998 年和 1999 年城市火灾的“频率—时间间隔”分布图。可以看到, 在图 4.11 (a) 双对数坐标中, “频率—时间间隔”呈现非线性关系, 说明其不满足幂律分布关系, 而在对数—线性坐标图 4.11 (b) 中, $F \sim \tau$ 之间具有较好的线性关系。这个结果与图 4.4 中森林火灾的“频率—时间间隔”的结果具有明显的区别。这表明, 城市火灾的“频率—时间间隔”不具有幂律分布, 而是随时间间隔 τ 呈现指数衰减, 并且具有稳定性, 不随时间变化。而对于分形随机点过程, 其“频率—时间间隔”应满足幂律分布, 因此, 城市火灾的时间分布不是分形的。

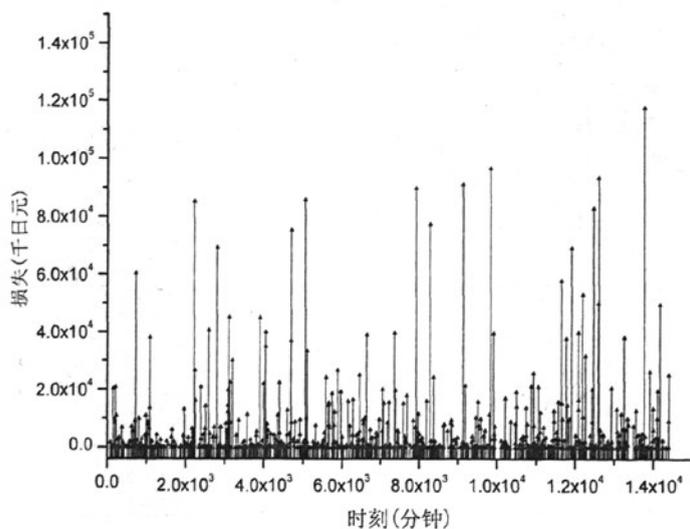


图 4.9 由日本城市火灾所得到的点过程时间序列 (1998 年 1 月 1 日至 1 月 10 日火灾数据)。

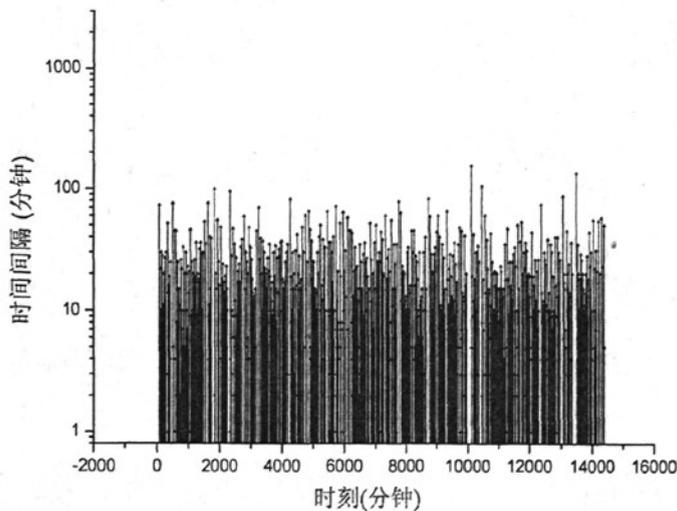


图 4.10 由图 4.9 得到的火灾时间间隔序列 (1998 年 1 月 1 日至 1998 年 1 月 10 日火灾数据)。对该数据计算其变异系数, 得到 $C_V=1.1$; 对 1998 年至 1999 年所有数据进行计算得到 $C_V=1.2$, 因此, 日本的城市火灾的时间分布具有弱丛集性特征。

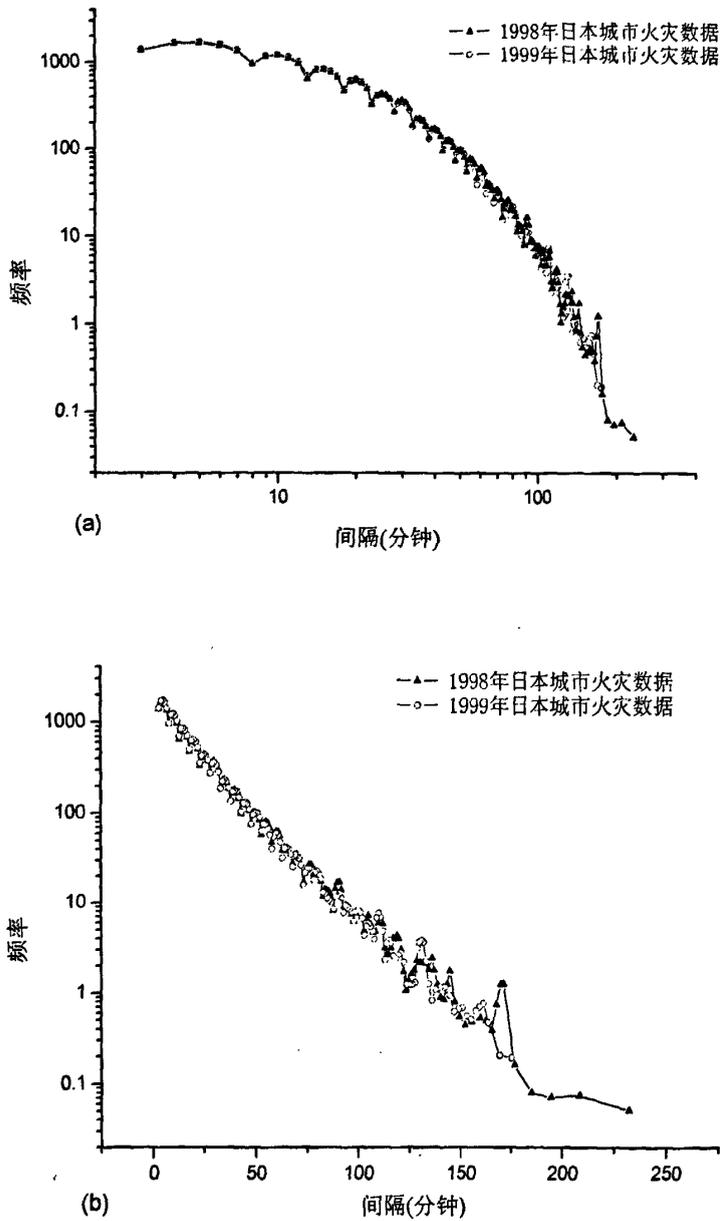


图 4.11 日本 1998 年和 1999 年城市火灾频率—时间间隔分布图。(a) 双对数坐标中的非线性关系, 说明“频率—时间间隔”不具有幂律关系; (b) 对数—线性坐标中, 具有较好的线性关系, 说明“频率—时间间隔”分布具有指数分布。

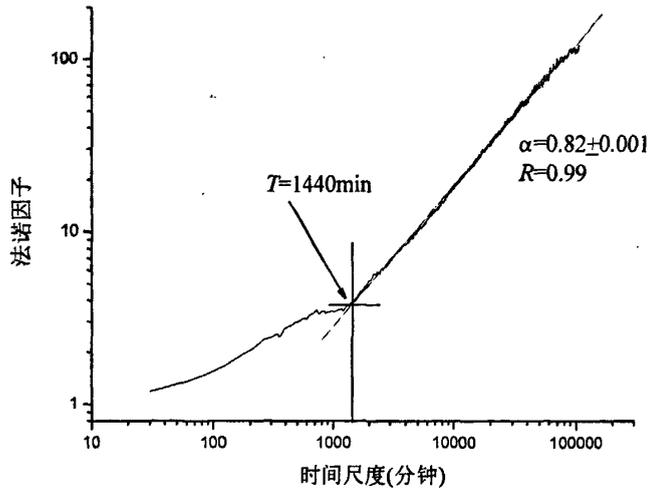


图 4.12 日本 1998 年至 1999 年城市火灾时间序列的 Fano 因子。可以看到，图中 FF 在时间尺度大于 1440min（即 24 小时）的区间表现出了很好的线性关系，即满足标度行为，拟合直线的斜率为 0.82 ± 0.001 ，拟合相关系数为 0.99。结果与图 4.5 中森林火灾时间序列的 $FF \sim T$ 类似。

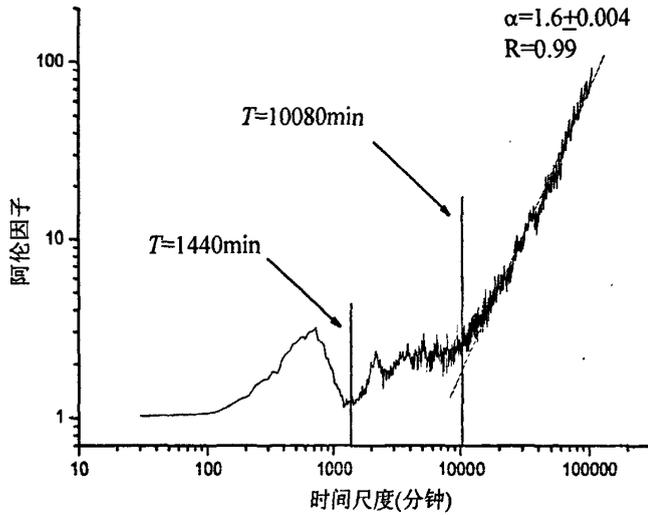


图 4.13 日本 1998 年至 1999 年城市火灾时间序列的 Allan 因子。图中结果显示，在时间尺度大于 10080min（即 7 天）的区间内， $AF \sim T$ 之间在双对数坐标中具有很好的线性关系，满足幂律分布，具有无标度性。其拟合直线的斜率为 1.6 ± 0.004 ，拟合相关系数为 0.99。结果与图 4.6 中森林火灾的 $AF \sim T$ 的变化类似。

我们对城市火灾时间序列的 FF 以及 AF 进行了计算, 图 4.12 给出的是日本 1998 年至 1999 年城市火灾时间序列的 Fano 因子随时间尺度 T 的变化, 可以看到, 在双对数坐标中, 在时间尺度大于 1440min 的区间内, $FF \sim T$ 之间具有很好的线性关系, 而图 4.13 中的 $AF \sim T$ 的变化曲线在时间尺度大于 10080min 时同样具有线性关系。 $FF \sim T$ 曲线的线性区间拟合直线的斜率为 0.82 ± 0.001 , $AF \sim T$ 曲线的线性区间拟合直线的斜率为 1.6 ± 0.004 , 它们的拟合相关系数均为 0.99。据此可以知道, 城市火灾的时间序列在时间尺度大于 10080min (7 天) 时, 其分布满足标度律, 具有自相似性。

综上所述, 通过对城市火灾时间序列的变异系数计算发现其时间分布丛集性非常弱, 其“频率—时间间隔”不满足幂律关系, 而利用统计变量 FF 及 AF 则发现其满足自相似性。因此, 城市火灾的时间序列是具有自相似性的非分形的, 或者称为“Fractal-rate”随机点过程 (Thurner 1997)。

在图 4.12 中可以看到, 城市火灾时间序列满足标度律的时间尺度为 1440min (1 天), 在图 4.13 中与 AF 曲线的第一个波谷相对应, 该转折点的出现与火灾以一天为最小周期密切相关, 揭示了火灾的周期波动特点。同时我们发现, 在森林火灾与城市火灾的 AF 曲线中, 都存在着 10080min (7 天) 的时间尺度, 在大于该尺度时, 火灾时间序列满足标度律。这一时间尺度与“周”周期非常“巧合”地重合, 预示着火灾的“周”周期波动。这个波动点的出现, 实际上并不是巧合。在日本, 其森林火灾的发生有 95% 以上是由人为因素引起, 也就是说森林火灾的发生与城市火灾一样, 与人类的活动密切相关。而人类活动则具有明显的周期性, 比如, 在周末, 更多的人会外出活动, 从而增加火灾隐患。香港政府的统计数据也表明, 周末和公共节假日的火灾数量会增加 50% (http://www.hko.gov.hk/publica/gen_pub/fdw_e.htm)。在图 4.5、图 4.6、图 4.12 和图 4.13 中, 城市火灾的 FF 标度指数与 AF 标度指数都大于森林火灾中的相应指数, 说明城市火灾比森林火灾具有更强的无标度性。其可能的原因在于尽管日本森林火灾受到人类活动的影响非常大, 但是城市火灾与人类活动的关系更为密切, 而有研究表明, 人类活动满足幂律分布和标度律 (Brockmann et al. 2006; Barabasi 2005), 因此城市火灾更大的标度律指数。

下面我们来看一下火灾记录的完备性对城市火灾时间分布自相似性的影响。以日本 1998 年至 1999 年两年的城市火灾数据, 分别以火灾损失 $L_{th}=0, 1$ 万, 10 万, 50 万, 100 万, 500 万, 800 万, 1000 万, 1500 万, 2000 万, 3000 万以及 4000 万日元为阈值, 计算其 FF 以及 AF , 然后得到其 FF 以及 AF 的拟合直线斜率随损失阈值 L_{th} 的变化, 如图 4.14 和图 4.15 所示。

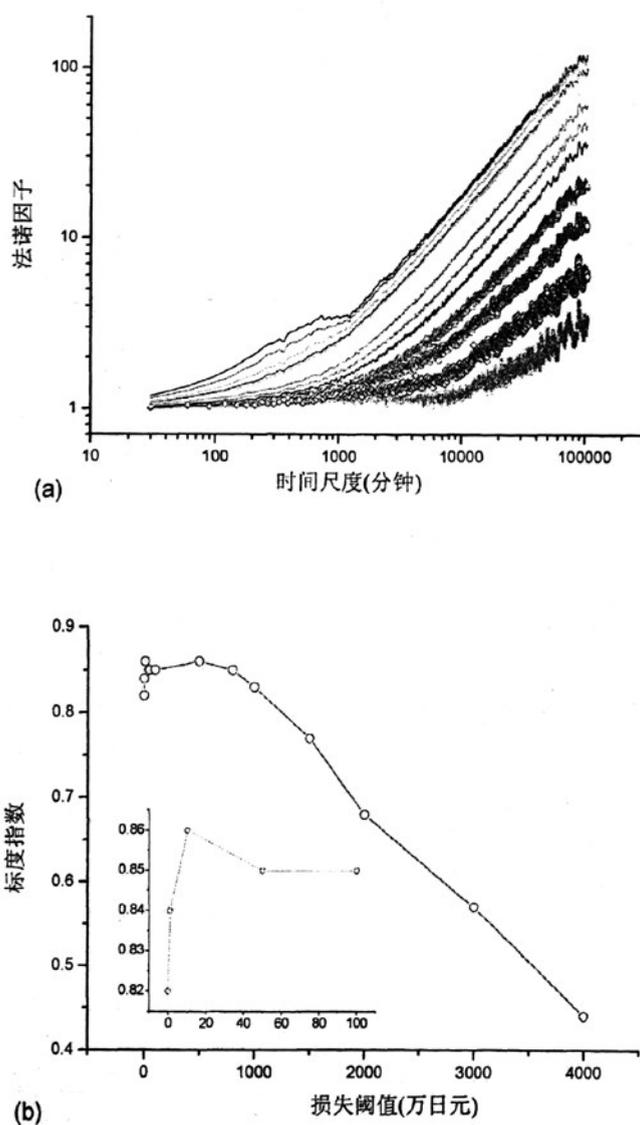


图 4.14 损失阈值 L_{th} 对 FF 曲线及火灾时间分布的影响 (1998 年—1999 年城市火灾数据)。(a) 取不同的阈值时, FF 曲线随时间窗口 T 的变化, 图中曲线从上到下其阈值依次递增; 可以看到, 在双对数坐标中, 不同阈值的 FF 曲线在一定的尺度范围内具有明显的线性关系, 即 $FF \sim T$ 之间满足幂律关系; 同时, 图中曲线满足线性关系的尺度范围从上到下逐渐变大。(b) FF 曲线的标度律指数随阈值 L_{th} 的变化趋势。随着阈值从 0 增加到 4000 万日元, FF 曲线的标度律指数从先增加, 后减小。

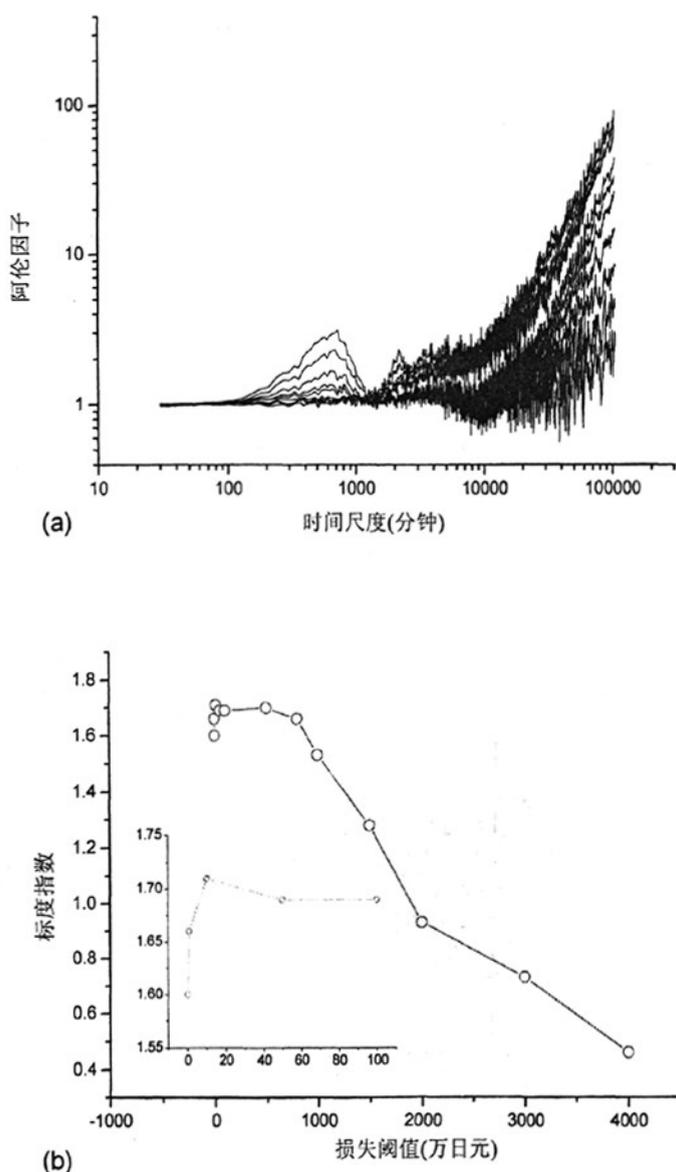


图 4.15 损失阈值 L_{th} 对 AF 曲线及火灾时间分布的影响 (1998 年—1999 年城市火灾数据)。(a) 取不同阈值时, AF 曲线随时间尺度 T 的变化; 在双对数坐标中对时间尺度 $T > 10080\text{min}$ 的 AF 曲线进行拟合, 可以得到很好的线性关系, 表明 $AF \sim T$ 之间满足幂律关系。(b) 损失阈值对 AF 拟合直线斜率即 AF 曲线标度律指数的影响; 随着阈值的增加, 随着阈值从 0 增加到 4000 万日元, AF 曲线的标度律指数从先增加, 后减小。

图 4.14 (a) 中给出的是不同损失阈值下的 FF 曲线变化。可以看到, 在双对数坐标中, 当 L_{th} 取不同的值时, 其 FF 曲线均在一定的时间尺度范围内均具有线性关系, 说明 $FF \sim T$ 满足幂律关系。同时, 随着阈值的增加, 其满足线性关系的范围起始点逐渐向坐标轴右侧偏移, 满足幂律关系的时间尺度逐渐增大。从图 4.14 (b) 损失阈值对 FF 曲线拟合直线斜率的影响中可以看到, 随着损失阈值 L_{th} 的增加, FF 曲线的拟合直线的斜率先增加, 中间保持一段平稳期, 然后逐渐减小。当阈值在 10 万至 800 万日元时, FF 曲线的标度指数 α_{FF} 基本稳定在 0.85, 从阈值 1000 万日元增加到 4000 万日元, FF 曲线的标度指数将逐渐减小。如果再继续增加阈值, FF 曲线的标度指数基本上为 0, 成为随机过程序列。

图 4.15 给出了不同的损失阈值对 AF 曲线以及 AF 曲线标度指数的影响。不难看到, 与对 FF 曲线的影响类似, 随着阈值的增加, AF 曲线的标度指数 α_{AF} 同样先增加, 然后是一段稳定区间, 随后在阈值超过 1000 万时, α_{AF} 开始逐渐减小。从 AF 曲线与 FF 曲线的变化可以知道, 当阈值达到一定值时, 火灾的发生时间自相似性减弱, 随机性增强, 特大火灾的发生时间将会偏离中小规模的火灾发生时间分布曲线。

4.3.3 相对湿度的时间特征

气象系统是森林火灾系统中一个重要的子系统, 影响着火灾的发生, 它的变化对火灾的发生具有重要的影响作用。在第二章的分析中知道, 森林火灾的发生随相对湿度的变化具有很好的单调性, 因此本小节我们以相对湿度为例, 分析其时间分布特征。

我们选取了日本宫崎县都城气象站($31^{\circ}43.8'N, 131^{\circ}4.8'E$)所记录下的 1998 年至 1999 年每个小时的相对湿度值 (图 4.16)。从第二章我们对森林火灾发生概率与平均相对湿度的关系的分析知道, 当平均相对湿度小于 60% 时火灾才具有相对较好的发生条件。因此, 我们以 60% 为阈值, 考虑这样一组由相对湿度所构成的事件序列: 序列中的元素为所有小于 60% 的平均相对湿度所对应的时间。图 4.17 给出了由图 4.16 中的部分数据所得到的时间序列 (1998 年 1 月 1 日至 1 月 20 日)。我们计算了该时间序列变异系数 $C_V=3.61$, 说明平均相对湿度具有强丛集性, 而且与森林火灾的变异系数非常接近, 也表明森林火灾的强丛集性很可能由相对湿度引起, 至少两者之间有着密切的联系。Fano 因子 FF 以及 Allan 因子 AF 的计算结果分别如图 4.18 和图 1.19 所示。从图中可以看到, 以此方法产生的事件时间序列具有与森林火灾时间序列相同的标度行为。正如第二章所述, 相对湿度在森林火灾发生的影响因素中具有非常重要的作用, 它们之间具有很强的关联性, 而且从相对湿度的标度行为与森林火灾的标度行为

的吻合来看, 火灾的周期变化很可能是因为相对湿度的周期变化。由于火灾还受到其他多种因素影响, 比如受人为因素影响强烈, 而人类活动满足标度律, 因此火灾的标度指数比相对湿度的标度律指数要大。

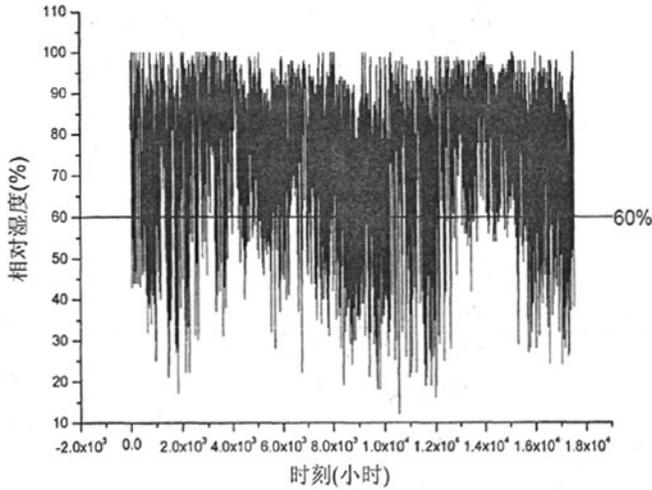


图 4.16 日本宫崎县都城 1998 年至 1999 年每小时平均相对湿度值

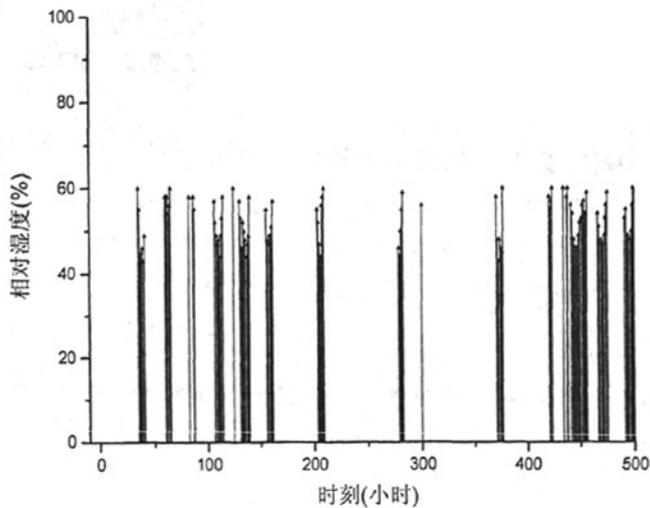


图 4.17 1998 年 1 月 1 日至 1 月 20 日平均相对湿度时间序列。其中的每次事件均代表湿度值小于 60%。我们对 1998 年至 1999 年所有数据得到的时间序列计算了其时间变异性系数 $C_V=3.61$ 。说明了平均相对湿度也具有丛集性分布。

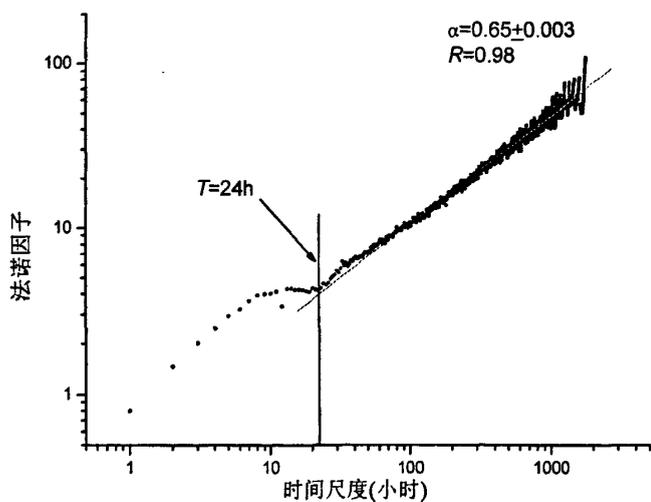


图 4.18 1998 年至 1999 年日本宫崎县都城平均相对湿度序列的 FF 因子。在双对数坐标中，当时间尺度大于 24 小时，具有很好的线性关系，满足幂律关系与标度律，幂指数为 0.65。

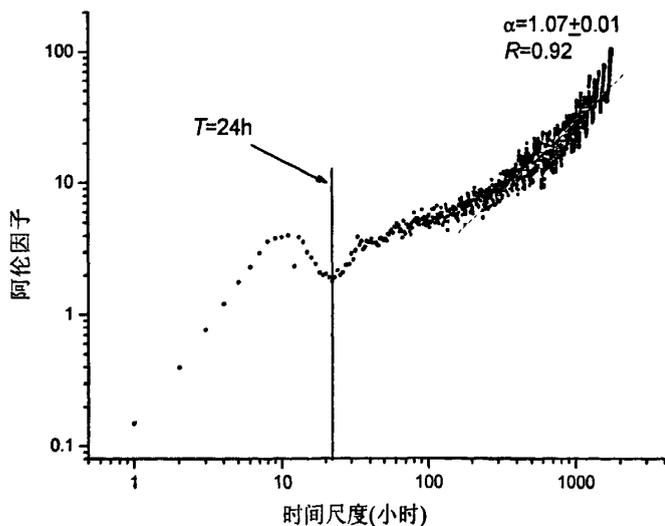


图 4.19 1998 年至 1999 年日本宫崎县都城平均相对湿度序列的 AF 因子。在双对数坐标中，当时间尺度大于 200 小时，具有较好的线性关系，满足标度律，标度指数为 1.07。

4.4 本章小结

本章我们利用日本的森林火灾数据、城市火灾数据以及日本宫崎县都城气象站气象数据,通过点序列过程分析方法,采用几种不同的时间序列分析参数,对火灾系统的时间分布特征进行了分析,得到以下结论:

- (1) 森林火灾时间序列具有明显的丛集性分布特性。利用变异系数分析法,发现日本森林火灾时间间隔序列的变异系数大于 1,并且具有时间稳定性,表明森林火灾时间序列具有强烈的簇分布特征。
- (2) 森林火灾时间序列在一个较大的尺度范围内具有分形特征及标度律行为。森林火灾“频率—时间间隔”满足幂律分布, Fano 因子以及 Allan 因子在较大的时间尺度内具有幂律关系,表明森林火灾时间序列具有分形自相似性和标度律。
- (3) 大规模森林火灾的发生的随机性较大。通过设置不同的火灾面积阈值,发现 Allan 因子与 Fano 因子的标度指数随着阈值的增加而逐渐减小,说明大火灾的标度性减弱,其时间分布随机性增加,特大火灾趋向于泊松分布。
- (4) 城市火灾时间分布具有标度性,丛集性较弱,并且不是分形的。通过对日本城市火灾的分析,发现日本城市火灾时间间隔序列变异系数略大于 1,丛集性较弱,而且其“频率—时间间隔”不具有幂律分布,表明其时间序列不是分形的。但是其时间序列的 Fano 因子和 Allan 因子与时间尺度之间具有很好的幂律关系,说明城市火灾的时间序列满足标度律,具有自相似性,并且其标度律指数比森林火灾更大。
- (5) 与火灾面积对森林火灾时间分布的影响类似,城市火灾规模对城市火灾的时间分布也具有相似的影响。当城市火灾损失达到一定规模以后,随着火灾损失的增加,火灾时间分布的标度性逐渐降低,特大火灾的时间分布偏向于随机分布。
- (6) 森林及城市火灾的分布都具有周期性。通过 Allan 因子的分析发现,日本森林及城市火灾都具有 7 天周期性分布规律,这正是由于日本森林火灾受到人类活动的强烈影响。
- (7) 通过对日本宫崎县都城相对湿度的研究,发现相对湿度具有周期波动自相似性分布特征和标度行为,这与森林火灾和城市火灾的发生时间吻合得相当好,说明气象参数的标度行为很可能是火灾系统的标度行为产生的原因之一。

第 5 章 结论与展望

- *****
- > 论文结论
- > 论文创新点
- > 进一步工作展望
- *****

5.1 论文结论

本论文研究了多种影响因素与火灾发生概率之间的关系以及不同火灾系统的空间、时间分布特征,得到了气象因素、人口密度对森林火灾发生概率的定量影响规律,森林、城市火灾系统的“频率—强度”分布、时间分形特征等性质。得到的主要结论如下:

- A. 利用 1996 年至 2000 年日本详细的森林火灾数据以及日本各地 834 个气象站每日气象数据,通过反距离加权插值法对几种气象参数进行空间离散化,定量分析了森林火灾发生概率与日平均相对湿度、日最小相对湿度、日平均温度、日最高温度、日平均风速、日最大风速、日平均降雨量以及日照时间等 8 种气象参数之间的一元相关性,得到了森林火灾发生概率随各种气象参数的变化曲线和它们之间的定量关系:
 - 1) 森林火灾发生概率受相对湿度影响明显,并且两者之间可用二次多项式拟合,随着相对湿度的增加森林火灾发生概率呈现单调减趋势,并逐渐趋于稳定。对于火险分析与预测,相对湿度是其中非常重要的一个参数。
 - 2) 降雨对森林火灾的发生具有很强的抑制作用,并且存在着 1mm “止火降水量”。当日平均降水量大于 1mm 时,火灾发生概率降急剧降低,继续增加降水量,火灾发生概率不再变化。因此,1mm 是森林火灾发生的“止火降水量”。
 - 3) 日照时间对森林火灾的发生具有促进作用,森林火灾发生概率与日照时间之间可用指数关系表示。
 - 4) 森林火灾发生概率随温度的升高不具有单调变化,呈现出“N”型分布。
 - 5) 风能促进森林火灾的发生,过大的风速可以抑制火灾发生,随着风速

的增加, 森林火灾发生概率先呈线性增大, 而后趋于稳定。

- B. 对日本人口密度数据与森林火灾的分析表明, 森林火灾发生概率与人口密度之间在一定范围内存在幂律正相关关系。随着人口密度的增加, 人类活动范围及强度增加, 使得森林火灾发生概率增大, 特别的: 当不考虑森林覆盖率的影响时, 两者满足幂律关系, 掩盖了其他因素的影响; 考虑森林覆盖率时, 两者之间存在具有边界效应的渐近幂律关系。当人口密度过大时, 由于人类对森林火灾发生的消极作用超过其积极作用, 森林火灾的发生会受到抑制, 从而偏离幂律分布。
- C. 通过对日本的森林火灾数据、中国和美国部分森林火灾数据的“频率—面积”分布的分析以及日本森林火灾时间序列分析, 得到以下结论:
- 6) 森林火灾系统具有自组织临界性特征。通过对日本 1989 年至 2000 年森林火灾数据的分析发现: 日本森林火灾的“频率—面积”曲线满足幂律关系, 相应的指数值约为-1.75。并且这种幂律关系具有很好的稳定性, 不随时间以及观测空间尺度的改变而变化。稳定的“频率—面积”幂律关系在真实森林火灾防治中有重要的实际意义, 利用中、小型火灾的发生情况, 可以评估大规模火灾的发生。
 - 7) 森林火灾的自组织临界性特征具有普遍性, 不同国家和地区的森林火灾具有相同的规律: 中国、日本以及美国的森林火灾均具有自组织临界性特征。并且森林火灾系统是一个分形体, 火灾面积的分布具有自相似性, 分形维数可以由“频率—面积”的幂律分布指数计算得到。由于不同系统内部构成和影响因素不尽相同, 其幂律指数不完全相同。
 - 8) 森林火灾时间序列在一个较大的尺度范围内具有分形特征, 并满足标度律行为。利用分形分析中几种常见分析方法, 对森林火灾事件构成的点过程序列进行分析, 发现森林火灾“频率—时间间隔”满足幂律分布, Fano 因子以及 Allan 因子在较大的时间尺度内具有幂律关系。
 - 9) 森林火灾时间序列具有明显的分形丛集性分布特征。森林火灾时间间隔序列的变异系数大于 1, 并且具有时间稳定性。
 - 10) 大规模森林火灾的发生随机性较大。通过改变火灾面积阈值对不同规模的森林火灾时间特征进行研究, 发现 Allan 因子与 Fano 因子的标度指数随着面积阈值的增加而逐渐减小, 这表明大火灾的时间标度性减弱, 其时间分布随机性增加, 特大火灾趋向于泊松分布。
 - 11) 森林火灾的时间分布具有周期性。通过 Allan 因子的分析发现, 日本

森林火灾具有1天与7天周期性分布规律,分析结果表明这可能正是由于森林火灾受到气象条件与人类活动的强烈影响所致。

D. 相对于森林火灾系统,城市火灾系统是复杂程度更高的火灾系统,它的发生同样受到气象条件的影响,本文对城市火灾与气象参数之间的关系进行了初步探索,研究工作主要通过对中国葫芦岛市城市火灾数据与平均相对湿度、风速以及平均温度等的分析展开,得到以下结论:

12) 气象参数对城市火灾的发生具有显著作用。城市火灾发生概率与相对湿度之间具有负相关性;在中国北方城市,城市火灾发生概率与温度之间具有负相关性;风速对城市火灾的发生概率影响不大。

E. 利用日本城市火灾数据与部分中国城市火灾数据对城市火灾系统的时空分布规律进行了研究,结论如下:

13) 城市火灾系统具有自组织临界性特征。研究发现,火灾的“频率—损失”分布具有幂律关系,并且具有尺度不变性:不同大小的火灾系统(比如日本全国火灾系统和北海道火灾系统)具有相同的幂律关系。同时,火灾的“频率—损失”幂律关系具有稳定性:不同时期的“频率—损失”幂律关系是相同的。与森林火灾系统不同,其“频率—损失”具有“两段式”幂律关系。

14) 城市火灾损失事件满足 Zipf 律。将火灾损失由大到小排名,火灾的“损失—排名”分布满足幂律关系。与火灾的“频率—损失”幂律关系相对应,火灾的 Zipf 律也具有尺度不变性和稳定性。在较小规模火灾区域,Zipf 律被破坏。

15) 不同国家的城市火灾“频率—损失”分布具有相似性。通过日本城市火灾、中国部分城市火灾数据的计算和与 Song 等人(2001)所得到的结果的对比可以得出,较大规模火灾的“频率—损失”分布均具有幂律关系,小火灾具有与大火灾不同的分布关系,不同国家的城市火灾具有相似分布规律。稳定的“频率—损失”幂律关系和火灾损失的 Zipf 律表明:如果获得足够多的火灾损失历史数据,可以预测未来若干年大体的火灾发生情况,可以由中小规模火灾的发生频率来评估大规模、较大危害性火灾的发生概率。尺度不变性可以使得在一个子系统中研究获得的临界指数应用于整个系统。

16) 城市火灾时间分布满足标度律,丛集性较弱,并且不是分形的,具有比森林火灾更大的标度指数。通过对日本城市火灾的分析,发现日本城市火灾时间间隔序列变异系数略大于1,丛集性较弱,而且其“频

率—时间间隔”不具有幂律分布，表明其时间序列不是分形的。但是其时间序列的 Fano 因子和 Allan 因子与时间尺度之间具有很好的幂律关系，说明城市火灾的时间序列满足标度律，具有自相似性。

- 17) 与火灾面积对森林火灾时间分布的影响类似，随着火灾损失的增加，火灾的时间分布标度律指数降低，特大火灾的时间分布趋向于随机分布。
- 18) 城市火灾的分布具有周期性。通过 Allan 因子的分析发现，城市火灾与森林火灾类似，具有 1 天与 7 天周期性分布规律。

F. 通过对日本宫崎县都城气象站相对湿度的研究，发现相对湿度具有周期波动自相似性分布特征和标度行为，这与森林火灾和城市火灾的发生时间吻合得相当好，说明火灾系统的标度行为很可能是由气象参数的标度行为引起，相对湿度的周期变化导致了火灾发生时间的周期性。

5.2 论文创新点

- 1) 利用森林火灾与 8 种气象参数数据，通过大量的统计数据，采用统计分析和一元相关性分析的方法研究了两者之间的定量关系。森林火灾的统计分析结果，可以为森林火险分析预测提供科学数据支持。Evet RR 等人在 SCI 林学类最具影响力的期刊之一 *Agricultural and Forest Meteorology* 上评价本工作“这项工作发现了日本森林火灾发生概率受到相对湿度强烈的影响作用，它们之间满足单调递减的二次多项式关系。”
- 2) 研究了森林火灾中的三种分布关系：“频率—面积”分布，“频率—时间间隔”分布以及“火灾发生概率—人口密度”分布，发现了森林火灾发生概率与人口密度之间的幂律关系，对量化人类活动对森林火灾概率的影响具有实际意义。国际期刊 *Ecological Modelling* 的审稿人对这项工作的评价为：“总体来说，这篇文章很好(nice)：利用一些有意义的数据进行了有意义的分析”“对人口密度与森林火灾发生之间的关系的工作是创新性的(innovative)，对火灾时间间隔的研究工作也是让人感兴趣的，这项工作本身对于研究林野火灾斑块的标度关系是值得关注的。” Evett RR 等人在 *Agricultural and Forest meteorology* 期刊发表论文引用本工作认为：“幂律是自然界的普遍现象，这项工作可以用来描述森林火灾斑块的几种分布特征。” Benavent-Corai J 等人在国际期刊 *Ecological Modelling* 的文章中评价：“这项工作揭示了在

日本低人口密度区火灾发生概率如何偏离幂律分布，同时，在高人口密度区火灾发生概率如何具有标度不变性。”

- 3) 首次通过变异系数、Allan 因子和 Fano 因子分析了城市火灾系统和相对湿度时间丛集性、时间标度行为，揭示了城市火灾系统的时间弱丛集性，并且满足自相似性和标度律。通过与森林火灾系统的比较，发现森林火灾的时间序列具有分形的特征，而城市火灾系统的时间序列则具有分形—比率随机过程特征，同时城市火灾系统具有更强的标度行为。国际期刊 *Ecological Modelling* 审稿人认为“此项工作将相对湿度与火灾时间标度性关联起来，探讨了本领域涉及的一个重要课题，是值得关注的”。
- 4) 通过对日本城市火灾系统的研究，发现了火灾“频率—损失”分布的“两段式”幂律关系。通过与中国城市火灾系统的比较，证实了城市火灾系统自组织临界性特征的普遍性。
- 5) 研究了火灾规模对火灾时间分布特征的影响，发现无论是城市火灾或者森林火灾，大规模火灾的时间分布都具有更大的随机性，特大火灾趋于泊松分布。

5.3 进一步工作展望

火灾系统是一个涉及到多种影响因素的复杂系统，特别是城市火灾系统，由于人类活动的影响，使得对火灾系统的研究工作变得非常复杂和困难。本文对部分国家和地区森林及城市火灾系统的空间、时间分布规律进行了分析，研究了火灾受几种气象因素的定量影响关系，但是，对于火灾系统的研究，还有很多工作要做：

- 1) 火灾受到多种因素的影响和制约，对于实际火灾的防治，是火灾科学研究中的一个重要方面。因此，还需要对各种影响因素对火灾系统的共同作用进行研究，通过多元分析以及其他方法，发展火险预测分析方法。
- 2) 火灾研究中一个重要方面是火险预测，本文虽然对火险预测所需要的部分基础数据进行了分析计算，但是仍有很多工作要做。通过更详细的火灾数据和森林树种类型数据，利用实际火灾统计数据，将能得到更好的结果；同时通过实验研究不同类型森林和混合林中的火灾蔓延行为，发展出更加符合实际情况的森林火灾蔓延模型，充分发挥计算机模拟在火灾防治中的作用。

- 3) 城市火灾系统中, 火灾原因多种多样, 对城市火灾的研究目前还非常少。在以后的工作中, 需要加大对城市火灾系统各个方面的科学研究工作, 比如目前已有一些计算机模型用来研究森林火灾, 那么是否可以建立一种模型, 以研究受人为因素更大、更加复杂的城市火灾系统呢?
- 4) 随着社会和经济的发展, 城市化进程的加快, 森林—城市交界域 (*Wildland-Urban Interface (WUI)*) 越来越多地出现, WUI 区域内火灾的发生具有什么样的规律? 火灾在 WUI 区域的传播又具有什么样的规律?

参考文献

- Adamic LA, Huberman BA. 2000. Power-law distribution of the world wide web [J]. *Science*, 287: 2115a.
- Albert R, Jeong H, Brabasi AL. 1999. Diameter of the world-wide web [J]. *Nature*, 401: 130-130.
- Allan DW. 1996. Statistics of atomic frequency standards [C]. *Proceedings of the IEEE*, 54:221-230.
- Amaral LAN, Cizeau P, Gopikrishnan P, et al. 1999. Econophysics: can statistical physics contribute to the science of economics? [J]. *Computer Physics Communications*, 121:145-152.
- Amatulli G, P'erez-Cabello F, de la Riva J. 2007. Mapping lightning/human-caused wildfires occurrence under ignition point location uncertainty. *Ecological Modelling*, 200:321-333.
- Bak P. 1996. *How nature works: the science of self-organized criticality* [J]. New York: Copernicus Press for Springer Verlag, 31-32.
- Bak P, Tang C, Wiesenfeld K. 1987. Self-organized criticality: An Explanation of $1/f$ Noise [J]. *Physic Review Letters*, 59: 381-384.
- Bak P, Tang C, Wiesenfeld K. 1988. Self-organized criticality [J]. *Physical Review A*, 38: 364-374.
- Barabasi AL, Albert R, Jeong H, et al. 2000. Power-law distribution of the world wide web (reply) [J]. *Science*, 287: 2115a.
- Barabasi AL, Albert R. 1999. Emergence of scaling in random networks [J]. *Science*, 286: 509-512.
- Bauer W, Pratt S. 1996. Word processors with line wrap: Cascading, self-organized criticality, random walks, diffusion, and predictability [J]. *Physical Review E*, 54(2): R1009-R1012.
- Benavent-Corai J, Rojo C, Suarez-Torres J, et al. 2007. Scaling properties in forest fire sequences: The human role in the order of nature. *Ecological Modelling*, 205(3-4):336-342.
- Blank A, Solomon S. 2000. Power laws in cities population, financial markets and internet sites (scaling in systems with a variable number of components) [J]. *Physica A*, 287: 279-288.
- Boffetta G, Carbone V, Giuliani P, et al. 1999. Power laws in solar flares: Self-organized criticality or turbulence?[J]. *Physical Review E*, 83(22):4662-4665.
- Bradstock RA, Gill AM, Kenny BJ, et al. 1998. Bushfire risk at the urban interface estimated from historical weather records: consequences for the use of prescribed fire in the Sydney region of south-eastern Australia [J]. *Journal of Environmental Management*, 52: 259-271.

- Carson M, Langer JS. 1989. Mechanical model of an earthquake fault [J]. *Physical Review A*, 40:6470-6484.
- Castro FX, Tudela A, Sebastia MT. 2003. Modeling moisture content in shrubs to predict fire risk in Catalonia (Spain) [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 116: 49-59.
- Chowell G. 2003. Scaling laws for the movement of people between locations in a large city [J]. *Physical Review E*, 68:066102.
- Christensen K, Danon L, Scanlon T, et al. 2002. Unified scaling law for earthquakes [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 99, Suppl. 1:2509-2513.
- Corral A, Telesca L, Lasaponara R. 2008. Scaling and correlations in the dynamics of forest-fire occurrence [J]. *Physical Review E*, 77: 016101.
- Cox DR, Isham V. 1980. *Point Processes* [M]. Chapman and Hall, London.
- Crawley MJ, Harral JE. 2001. Scale dependence in plant biodiversity [J]. *Science*, 291: 864-868.
- Cruz MG, Alexander ME, Wakimoto RH. 2003. Assessing the probability of crown fire initiation based on fire danger indices [J]. *Forestry Chronicle*, 79: 976-983.
- Deeming JE, Burgan RE, Cohen JE. 1977. *The National Fire Danger Rating System-1978* [A]. General Technical Report [R]. Intermountain Forest and Range Experiment Station, INTT- 39, USDA/FS.
- Doyle J, Carlson JM. 2000. Power laws, highly optimized tolerance, and generalized source coding [J]. *Physical Review Letters*, 84(4): 5656-5659.
- Drossel B, Schwabl F. 1992. Self-organized critical forest-fire model [J]. *Physical Review Letters*, 69(11):1629-1632.
- Drossel B, Schwabl F. 1995. Self-organized critical limit of autocatalytic surface-reactions [J]. *Applied Physics A-Materials Science & Processing*, 60(6): 597-600.
- Finney MA. 1998. *FARSITE: Fire Area Simulator-Model Development and Evaluation* [R]. Rocky Mountain Research Station, USDA/FS.
- Flannigan M, Campbell I, Wotton M, et al. 2001. Future fire in Canada's boreal forest: paleoecology results and general circulation model-regional climate model simulations [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 31: 854-864.
- Fukami T, Zimmermann CR, Russell GJ, et al. 1999. Self-organized criticality in ecology and evolution [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 14(8): 321-321.
- Goldenfeld N, Kadanoff LP. 1999. Simple Lessons from Complexity [J]. *Science*, 284: 87-89.
- Gopikrishnan P, Plerou V, Liu Y, et al. 2000. Scaling and correlation in financial time series [J]. *Physica A*, 287: 362-373.

- Grassberger P. 2002. Critical behaviour of the Drossel–Schwabl forest fire model [J]. *New Journal of Physics*, 4: 17.1-17.15.
- Haines DA. 1988. A lower atmosphere severity index for wildland fire [J]. *National Weather Digest*, 13(2):23-27.
- Haken H. 1987. *Advanced Synergetics*, 2nd. Corr. Berlin: Springer-Verlag.
- Hoffmann WA, Schroeder W, Jackson RB. 2002. Positive feedbacks of fire, climate, and vegetation and the conversion of tropical savanna [J]. *Geophysical Research Letters*, 29(22): Art. No. 2052.
- Hoffmann WA, Schroeder W, Jackson RB. 2003. Regional feedbacks among fire, climate, and tropical deforestation [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 108(D23): Art. No. 4721.
- Huberman BA, Adamic LA. 1999. Growth dynamics of the world-wide web. *Nature*, 401: 131-131.
- Johnson JB. 1925. The Schottky effect in low frequency circuits. *Physical Review*, 26, 71-85.
- Kaizoji T, Kaizoji M. 2004. Power law for the calm-time interval of price changes [J]. *Physica A*, 336: 563-570.
- Lasaponara R, Santulli A, Telesca L. 2005. Time-clustering analysis of forest-fire sequences in southern Italy [J]. *Chaos Solitons Fractals*, 24:139-149.
- Latham DL, Rothermel RC. 1993. Probability of fire-stopping precipitation events. USDA Forestry Services, Intermittent Research Station, Ogden, UT. Research Note INT-410. 8pp.
- Lawrence S, Giles CL. 1998. Searching the world wide web [J]. *Science*, 280: 98-100
- Lee BS, Alexander ME, Hawkes BC, et al. 2002. Information systems in support of wildland fire management decision making in Canada [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 37: 185-198.
- Lewin R. 1992. *Complexity: Life at the edge of chaos* [M]. Macmillan Publishing Company.
- Li BL, 2000. Fractal geometry applications in description and analysis of patch patterns and patch dynamics [J]. *Ecological Modelling*, 99: 137-150.
- Lowen SB, Teich MC. 1993. Estimating the dimension of a fractal point process [C]. *SPIE Chaos in Biology Medicine*, 2036:64-67.
- Lowen SB, Teich MC. 1995. Estimation and simulation of fractal stochastic point processes [J]. *Fractals*, 3:183-210.
- Malamud BD, Millington JDA, Perry GLW. 2005. Characterizing wildfire regimes in the United States [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102:4694-4699.

- Malamud BD, Morein G, Turcotte DL. 1998. Forest fires: An example of self-organized critical behavior [J]. *Science*, 281(5384): 1840-1842.
- Malamud BD, Turcotte DL. 1999. Self-organized criticality applied to natural hazards [J]. *Natural Hazards*, 20(2-3): 93-116.
- Mandelbrot BB. 1982. *The fractal geometry of Nature* [M]. Freeman, San Francisco
- Miyazima S, Lee Y, et al. 2000. Power-law distribution of family names in Japanese societies [J]. *Physica A*, 278: 282-288.
- Mollicone D, Eva HD, Achard F. 2006. Ecology: human role in Russian wild fires. *Nature*, 440(7083):436-437.
- Nagel K, Paczuski M. 1995. Emergent traffic jams [J]. *Physical Review E*, 51(4): 2909-2918.
- Nepstad D, Lefebvre P, Da Silva UL, et al. 2004. Amazon drought and its implications for forest flammability and tree growth: a basin-wide analysis [J]. *Global Change Biology*, 10(5): 704-717.
- Okuyama K, Takayasu M, Takayasu H. 1999. Zipf's law in income distribution of companies [J]. *Physica A*, 269: 125-131.
- Pareto V. 1896. *Cours d'Economie Politique* (Droz, Geneva).
- Parrish JK, Edelman-Keshet L. 1999. Complexity, pattern, and evolutionary trade-offs in animal aggregation [J]. *Science*, 284: 99-101.
- Peters O, Christophers H, Christensen K. 2002. A complexity view of rainfall. *Physical Review Letters*, 88, 018701
- Pinho STR, Andrade RFS. 1998. An Abelian model for rainfall [J]. *Physica A*, 255:483-495.
- Redner S. 1998. How popular is your paper? An empirical study of the citation distribution [J]. *The European Physical Journal B*, 4:131-134.
- Ricotta C, Avena G, Marchetti M. 1999. The flaming sandpile: self-organized criticality and wildfires [J]. *Ecological Modelling*, 119(1): 73-77.
- Ricotta C, Micozzi A, Bellelli M, et al. 2006. Characterizing self-similar temporal clustering of wildfires in the Cilento National Park (Southern Italy). *Ecological Modelling*, 197:512-515.
- Ring D. 1999. Complexity and Climate [J]. *Science*, 284: 105-107.
- Roberts DC, Turcotte DL. 1998. Fractality and self-organized criticality of wars [J]. *Fractals*, 6(4): 351-357.
- Rothermel RC. 1991. Predicting behavior of the 1988 Yellowstone fires: projections versus reality [J]. *International Journal of Wildland Fire*, 1(1):1-10.
- Rothermel RC. 1991. Predicting the behavior and size of crown fires in the Northern Rocky Mountains. USDA Forest Service Research Paper INT-438. 48p.

- Satoh K, Kitamura S, Komurasaki S, et al. 2002. A system to predict occurrence and development of forest fires,-computer simulation of forest fires based on weather data (in Japanese) [A]. TED Conference 2002-JSME [C]. Okinawa Japan, 457-458.
- Satoh K, Kitamura S, Kuwahara K, et al. 2003a. An analysis to predict forest fire danger and fire spread study to develop a fire danger rating and fire spread [A]. ASME Summer Heat Transfer Conference, Las Vegas, HT2003-47357. 1-8.
- Satoh K, Song WG, Yang KT. 2004. A study of forest fire danger prediction system in Japan [A]. International Conference of Database and Expert Systems Applications (DEXA'04) [C]. Zaragoza, Spain.
- Satoh K, Yang KT. 2003b. An intelligent system to predict forest fire danger and fire spread [A]. APSS 2003 Asia Pacific Symposium on Safety [C], Taipei, 287-290.
- Simard AJ, Eenigenburg JE. 1990. METAFIRE: a system to support high-level fire management decisions [J]. Fire Management Notes, 51(1):10-17.
- Sole RV, Manrubia SC, Benton MJ, et al. 1999a. Criticality and scaling in evolutionary ecology [J]. Trends in Ecology & Evolution, 14(4): 156-160.
- Sole RV, Manrubia SC, Benton MJ, et al. 1999b. Self-organized criticality in ecology and evolution-Reply [J], Trends in Ecology & Evolution, 14(8): 321-322.
- Song WG, Fan WC, Wang BH, et al. 2001. Self-organized criticality of forest fire in China [J]. Ecological Modelling, 145: 61-68.
- Song WG, Satoh K, Wang J. 2004. Distribution analysis of forest fire related data in Japan [J]. Fire Safety Science, 13: 180-185.
- Song WG, Zhang HP, Chen T, et al. 2003. Power-law distribution of city fires[J]. Fire Safety Journal, 38: 453-465.
- Sornette D. 2002. Predictability of catastrophic events: Material rupture, earthquakes, turbulence, financial crashes, and human birth [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, USA, 99(Suppl.1): 2522-2529.
- Steeb W. 1999. The nonlinear workbook (M). World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 122:125.
- Tainaka K, Itoh Y. 1996. Apparent self-organized criticality [J]. Physics Letters A, 220(1-3): 58-62.
- Teich MC, Heneghan C, Lowen SB, et al. 1996. Estimating the fractal exponent of point processes in biological systems using wavelet- and Fourier-transform methods [M]. In Wavelets in Biology and Medicine, Aldroubi A and Unser M, eds. Boca Raton: CRC Press, pp.383-412.
- Telesca L. 2007. Time-clustering of natural hazards [J]. Natural Hazards, 40(3): 593- 601.

- Telesca L, Amatulli G, Lasaponara R, et al. 2005b. Time-scaling properties in forest-fire sequences observed in the Gargano area (southern Italy) [J]. *Ecological Modelling*, 185:531-544.
- Telesca L, Amatulli G, Lasaponara R, et al. 2007. Identifying spatial clustering properties of the 1997-2003 Liguria (Northern Italy) forest-fire sequence. *Chaos Solitons & Fractals*, 32:1364-1370.
- Telesca L, Lapenna V, Summa D, et al. 2005a. Time-clustering analysis of rainfall fluctuations [J]. *Fluctuation and Noise Letters*, 5(1): L17-L25.
- Telesca L, Lasaponara R. 2006. Emergence of temporal regimes in fire sequences [J]. *Physica A*, 360:543-547.
- Thruner S, Lowen SB, Feurstein MC, et al. 1997. Analysis, synthesis, and estimation of fractal-rate stochastic point processes [J]. *Fractals*, 5:565-596.
- Turcotte DL, Malamud BD, Guzzetti F, et al. 2002. Self-organization, the cascade model, and natural hazards. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 99:2530-2537.
- Turcotte DL, Malamud BD. 2004. Landslides, forest fires, and earthquakes: examples of self-organized critical behaviour [J]. *Physica A*, 340(4): 580-589.
- Turcotte DL. 1989. A fractal approach to probabilistic seismic hazard assessment [J]. *Tectonophysics*, 167: 171-177.
- Turcotte DL. 1999. Applications of statistical mechanics to natural hazards and landforms [J]. *Physica A*, 274(1-2): 294-299.
- Viegas D.X. and Viegas M.T. 1994. A relationship between rainfall and burned area for Portugal [J]. *International Journal of Wildland Fire*, 4(1):11-16.
- Viegas DX, Pinol J, Viegas MT, et al. 2001. Estimating live fine fuels moisture content using meteorologically-based indices [J]. *International Journal of Wildland Fire*, 10: 223-240.
- Viegas DX, Viegas MT. 1994. A relationship between rainfall and burned area for Portugal [J]. *International Journal of Wildland Fire*, 4(1): 11-16.
- Werner BT. 1999. Complexity in natural landform patterns, *Science*, 284: 102-104.
- Werth P, Ochoa R. 1990. Evaluation of Idaho wildfire growth using the Haines Index and water vapor imagery [C]. 5th Conference on Mountain Meteorology, Boulder, Colorado.
- Williams AAJ, Karoly DJ, Tapper N. 2001. The sensitivity of Australian fire danger to climate change [J]. *Climatic Change*, 49: 171-191.
- Williams AAJ, Karoly DJ. 1999. Extreme fire weather in Australia and the impact of the El Nino Southern Oscillation [J]. *Australian Meteorological Magazine*, 48: 15-22.

- Zipf GK. 1949. Human behaviour and the principle of least effort (Addison-Wesley, Reading, MA).
- Nicolis G, Prigogine I. 1987. 探索复杂性 [M]. 成都: 四川教育出版社.
- Waldrop M. 1997. 复杂: 诞生于秩序与混沌边缘的科学 [M]. 北京三联书店.
- 崔博, 许学雷, 孙立勇. 1995. 城市火灾与气象因素的相关性分析研究[J]. 火灾科学, 9:61-64.
- 戴汝为. 1997. 复杂巨系统科学——一门 21 世纪的科学[J]. 自然杂志, 19(4):187-192.
- 苟学强, 张义军, 董万胜 等. 2006a. 雪崩、分形与雷暴放电中强闪的自组织演化[J]. 高原气象, 25(5):849-854.
- 苟学强, 张义军, 董万胜. 2006b. 基于小波的雷暴强放电前地面电场的多重分形分析[J]. 物理学报, 55(2):957-961.
- 国家统计局. 2007. 中国统计年鉴
- 林业部护林防火办公室, 1987. 森林火灾统计资料[Z].
- 罗灼礼, 孟国杰. 2002. 关于地震丛集特征成因及临界状态的讨论[J]. 地震, 22(3):1-14.
- 梅可玉. 2004. 论自组织临界性与复杂系统的演化行为[J]. 自然辩证法研究, 20(7):6-41.
- 钱学森, 于景元, 戴汝为. 1990. 一个科学新领域——开放复杂巨系统及其方法论[J]. 自然杂志, 13(1):3-10.
- 宋卫国, 汪秉宏, 舒立福等. 2002. 自组织临界性与大规模森林火灾的防治[J]. 自然科学进展, 12(3):1105-1108.
- 王寿云, 于景元, 戴汝为 等. 1996. 开放的复杂巨系统[M]. 浙江科学技术出版社.
- 杨美和, 张淑玉. 1997. 森林火灾中长期预测技术的研究[J]. 吉林林学院学报, 13(4):187-192.
- 张强, 陈正洪. 1996. 我国森林火灾的长期预报回顾与展望[J]. 气象科技, 3:23-25.
- 郑焕能. 1993. 中国林火[M]. 东北林业大学出版社.

致 谢

伴随着这篇论文的完成，我在科大五年的博士生活也即将结束。时光荏苒，转眼已在科大学习生活了九年，回想九年前，本科入学时的情景依然历历在目。毕业在即，回首这九年时间，科大“红专并进、理实交融”的校训、刻苦勤奋的学风让我受益匪浅，在这里的学习生活经历也奠定了我人生的基石。

在论文完成之际，首先要感谢我的导师范维澄院士。感谢他在我论文的撰写和修改中给予的指导和鼓励，他的高瞻远瞩、严谨的治学态度、开拓创新的精神和对火灾科学研究的执着，一直深深地影响和激励着我。

衷心感谢宋卫国副教授对我的培养，本文的完成得益于他精心细致的指导。在他实验室学习期间，我打下了扎实的理论功底，使课堂上学到的理论知识与科研工作有机结合起来。他引领我进入复杂性科学和非线性科学这一有趣的交叉学科研究领域，几年来一直不厌其烦地为我解答学习和研究工作中的各种问题，帮助我顺利完成了博士论文。他是一位非常优秀的科学工作者，从他身上，我学到了独立学习和思考的能力、独特的思维方法和严谨的学习工作态度，以及不断钻研锐意进取的实干精神，他一丝不苟的工作作风和勤奋的工作态度也将激励我以后努力学习、刻苦钻研。宋老师不仅是一位良师，更是一位益友，他为人和善、容易相处，多年来，一直如兄长般给予我学习和生活上的帮助，特别是在我找工作期间给我的建议和帮助，使我终生受益。

感谢实验室廖光焯教授、霍然教授、张和平教授、孙金华教授、陆守香教授、杨立中教授、刘乃安教授等老师，感谢肖琳老师、万玉田老师、方俊老师和祝玉泉老师，感谢他们在我这几年的学习、科研和生活上给予的无私的帮助，感谢马云老师和朱东杰老师，他们对学生、对工作的负责的态度，让我一生受用。感谢各位老师给我创造机会，让我在学习科研之外，领导、协作和实践能力得到很大的锻炼和提高。

感谢火灾科学国家重点实验室访问教授 Satoh 先生，本文中所使用的日本火灾数据主要是由他提供的。感谢 Satoh 教授在我的学习和科研工作中提供的建议。

在此我要对我的父母表示深深的感谢，为了我的成长他们含辛茹苦，二十多年来无时无刻不在为我操心，我的每一点进步和成功都浸透着他们的心血。他们对我无私的爱和默默无闻的支持，将是我一生受用不尽的财富。永远忘不

了他们对我的养育之恩!

感谢郑红阳同学, 在本论文的写作中给我提出了很好的建议。感谢胥旋、蔡昕、陈吕义、康泉胜等同学, 感谢他们在学习和生活中给我的鼓励和帮助。感谢实验室的师弟们, 忘不了和他们一起在实验室相互激励、共同奋斗的日子。

感谢所有关心、帮助和理解我的老师和朋友们, 是你们, 在我最需要帮助的时候给我支持, 让我度过每一个困难时刻, 谢谢你们!

本文得到了国家自然科学基金项目(30400344)、国家重点基础研究专项经费(973项目, 2001CB409600)、国家科技支撑项目(2006BAK01A02-06)的资助, 在此表示感谢!

王健

2009年5月于科大

在读期间发表的学术论文与取得的其他研究成果

学术著作

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. 2006年12月

已发表论文 (共 11 篇, 其中 SCI 论文 5 篇, 5 篇同时进入 EI 检索)

1. *Wang Jian*, Song Weiguo, Zheng Hongyang, Telesca Luciano. Temporal scaling behavior of human-caused fires and their connection to relative humidity of the atmosphere. *Ecological Modelling*. 2009 (Article in Press)
2. Zheng Hongyang, Song Weiguo, *Wang Jian*. Detrended fluctuation analysis of forest fires and related weather parameters. *Physica A*. 2008, 387(8-9): 2091-2099 (SCI IDS Number: 266XD, EI: 20080411054138)
3. Song Weiguo, Zheng Hongyang, *Wang Jian*, Ma Jian, Satoh Kohyu. Weather-driven model indicative of spatiotemporal power laws. *Physical Review E* 2007, 75, 016109(SCI IDS Number: 131TU; EI: 20070510405754)
4. Song Weiguo, *Wang Jian*, Satoh Kohyu, Fan Weicheng. Three types of power-law distribution of forest fire in Japan. *Ecological Modelling*. 2006, 196:527-532(SCI IDS Number: 063CY; EI: 2006269960990)
5. Song Weiguo, *Wang Jian*, Satoh Kohyu. Distribution and correlation analysis of wildfire and weather data in Japan. *Progress in Natural Science*. 2005, 15(4): 363-367 (SCI IDS Number: 930XI; EI: 2005189082172)
6. 宋卫国, 马剑, Satoh K. 王健. 森林火险与气象因素的多元相关性及其分析. *中国工程科学*. 2006, 8(2):61-66
7. Song Weiguo, *Wang Jian*, Satoh Kohyu. On the distribution and danger rating of city fires in Huludao city. 8th International Symposium on Fire Safety Science (Poster). 2005.9

8. 宋卫国, 王健, Satoh Kohyu, 范维澄. 人口密度对森林火灾发生频率的影响. 火灾科学. 2005,14(1): 1-5
9. 宋卫国, 王强, 王健, 张毛磊. 葫芦岛市城市火灾分布的特点及其对城市火险分析的启示. 科技导报. 2005, 23(8): 35-37
10. 宋卫国, 王健. 火灾系统的复杂性与可持续防治. 科技导报. 2004, 8: 15-18
11. Song Weiguo, Satoh K, *Wang Jian*. Distribution analysis of forest fire related data in Japan. Fire Safety Science. 2004, 13(3): 180-185

参与的科研项目

科技部林业公益性行业科研专项经费重点项目 森林雷击火发生发展规律和监测预报技术研究

国家科技支撑计划(十一五) “突发公共事件预测预警与智能决策技术研究”之子课题“森林与城市火灾综合风险评价与预测预警技术研究”

国家自然科学基金项目 基于自组织临界性的森林大火预测方法研究

973 项目 火灾动力学演化与防治基础—森林火灾的辨识、预测与火蔓延

攻读博士学位期间获得的奖励

- 2005 年度中国科学技术大学光华奖学金
- 2007 年度中国科学技术大学瑞恒达博士生奖学金

附录 A 已发表论文的审稿人意见

Temporal scaling behavior of human-caused fires and their connection to relative humidity of the atmosphere

From: "Ecological Modelling" <ecomod@elsevier.com>
Reply-To:
To: wgsong@ustc.edu.cn
Subject: ECOMOD2630
Date: 5 Dec 2008 09:57:20 +0000

Reviewer #1:

The paper deals with an important topic which fits the aims of the journal.

Reviewer #2:

The paper relates the temporal scaling of fires with the relative humidity. The authors conclude that the time scaling behaviour of fires and humidity are similar, therefore exists a link between both. *I consider that the paper is of interest for the Ecological Modelling journal, with relatively important changes.*

Three types of power-law distribution of forest fire in Japan

From: Ecological Modelling <ecomod@elsevier.com>
To: wgsong@ustc.edu.cn <wgsong@ustc.edu.cn>
Subject: ECOMOD566
Date: 2005-12-6 12:04:00

Reviewer #1:

On the whole, the article is nice: it presents clearly interesting analyses of interesting data.

Reviewer #2:

Your work relating population density with forest fire occurrence is innovative, and the work on fire return intervals is also interesting. This work is interesting in itself as an investigation of the scaling relationships of wildfire regimes.

附录 B 已发表论文引用情况

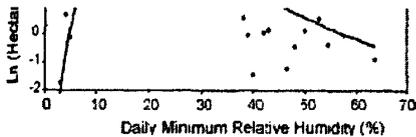
Song Weiguo, Wang Jian, Satoh Kohyu, Fan Weicheng. Three types of power-law distribution of forest fire in Japan. *Ecological Modelling*. 2006, 196:527-532

他引 3 次:

- [1] Evett RR, Mohrle CR, Hall BL, et al. 2008. The effect of monsoonal atmospheric moisture on lightning fire ignitions in southwestern North America. *Agricultural and Forest Meteorology*. 148(10):1478-1487
- [2] Boer MM, Sadler RJ, Bradstock RA, et al. 2008. Spatial scale invariance of southern Australian forest fires mirrors the scaling behaviour of fire-driving weather events. *Landscape Ecology*. 23(8):899-913
- [3] Benavent-Corai J, Rojo C, Suarez-Torres J, et al. 2007. Scaling properties in forest fire sequences: The human role in the order of nature. *Ecological Modelling*. 205: 336-342

具体引用情况:

在论文[1]中的引用为:



refer.

Orville, R.E., Huggins, C.R., Burrows, W.R., Holle, R.L., Cummins, K.L., 2002. The North American Lightning Detection Network (NALDN)—first results: 1998–2000. Monthly

region. Power law relationships are common in nature, and have been used to describe several characteristics of fire regimes, including frequency size and frequency interval relationships in many regions (Malamud et al., 2005; Song et al., 2006). While power law relationships are often indicative

Proc. Nat. Sci. 35, 293–297.

Song, W.G., Wang, J., Satoh, K., Fan, W.C., 2006. Three types of power-law distribution of forest fires in Japan. *Ecol. Modell.* 196, 527–532.

在论文[2]中的引用为:

Frequency-area distributions of forest fires commonly follow a scale-free power law of the type $N(>A) \propto A^{-\alpha}$ over several orders of magnitude (Cui and Perera 2008; Gill et al. 2003; Malamud et al. 1998; Malamud et al. 2005; Minnich 1983; Ricotta et al. 2001; Song et al. 2001; Song et al. 2006; Telesca et al. 2005), where $N(>A)$ is the number of fires greater than an area A , and α is a scaling exponent. Power law

local neighbourhood (Bak et al. 1987; Bak 1996; Jensen 1998). The complex system behaviour is characteristic of a critical state that can be described by general system properties such as scale invariant distributions (Pascual and Guichard 2005). Drossel and Schwabl's (1992) 'Forest Fire Model' has been highly influential in linking the scale invariance of forest fires to SOC (Malamud et al. 1998; Song et al.

Noble IR, Bary GAV, Gill AM (1980) McArthur's fire-danger meters expressed as equations. *Aust J Ecol* 5:201-203. doi:10.1111/j.1442-9993.1980.tb01243.x

Pascual M, Guichard F (2005) Criticality and disturbance in spatial ecological systems. *Trends Ecol Evol* 20:88-95.

145:61–68. doi:10.1016/S0304-3800(01)00383-0

Song W, Wang J, Satoh K, Fan W (2006) Three types of power-law distribution of forest fires in Japan. *Ecol Model* 196:527–532. doi:10.1016/j.ecolmodel.2006.02.033

Somette D (2002) Mechanism for powerlaws without self-

在论文[3]中的引用为:

cases, by rays thus implying bad weather conditions, making forest-fire fighting activities difficult. These little variations on the power-law parameters can explain the observed variation between spatial simulated models and real data. However, the human factor, as causing agent, does not seem to play a

forest-fire more scale-invariant. Recently, Weiguó et al. (2006) showed how fire probability deviates from the power-law with low human population densities in Japan and to the contrary, how forest-fire become more scale invariant with high human populations densities. Moreover, our results should

S., Vallejo, R., Vázquez, A., 2001 Self-organized criticality of wildfires ecologically revisited. *Ecol. Model.* 141, 307-311.

Weiguó, S., Jian, W., Kohyu, S., Weicheng, F., 2006. Three types of power-law distribution of forest fires in Japan. *Ecol. Model.* 196, 527-532.

Song Weiguó, Wang Jian, Satoh K. Distribution and correlation analysis of wildfire and weather data in Japan. *Progress in Natural Science.* 2005, 15(4): 363-367

他引 1 次:

Evelt RR, Mohrle CR, Hall BL, et al. 2008. The effect of monsoonal atmospheric moisture on lightning fire ignitions in southwestern North America. *Agricultural and Forest Meteorology.* 148(10):1478-1487

具体引用情况

fitting log-normal curves. Values at upper end of DMRH gradient are aggregated to ≥ 20 days/bin.

(2005), using fire and weather data from a km^2 -scale grid in Japan (but with no lightning flash data, making comparison with our ignition probability data impossible), found that the probability of an observed, all cause fire on a given cell ($\text{fires}/(\text{km}^2 \text{ h})$) was strongly related to hourly relative humidity with a monotonic decreasing curve approximated by a second-order polynomial. Song et al. (2007) used this probability

fluctuations in relative humidity may lead to self-organized behavior (Vattay and Harnos, 1994; Lin et al., 2007). Song et al. recorded at Guthrie, we used another measure to estimate the upper limit of mean precipitation as a function of relative humidity for the study area: an average restricted to the 493 days (out of 1059 days that an ignition was recorded in the study area) when precipitation was recorded at Guthrie. This measure showed that for $\text{DMRH} < 25\%$, precipitation for days recording rainfall averaged $< 4 \text{ mm/day}$, 55% of these days had

Mohrle, C.R., 2003 The Southwest monsoon and the relation to fire occurrence. Master's Thesis. University of Nevada, Reno.

Song, W.C., Wang, J., Satoh, K., 2005 Distribution and correlation analysis of wildfire and weather data in Japan. *Prog. Nat. Sci.* 15, 363-367.

Zheng Hongyang, Song Weiguó, Wang Jian. Detrended fluctuation analysis of forest fires and related weather parameters. *Physica A.* 2008, 387: 2091-2099

他引 1 次:

Luciano Rodrigues da Silva, Tatijana Stosic, Borko Stosic. 2008. Escalonamento, lei de potências e correlações de focos de queimadas no Brasil. 8o Encontro Regional de Matemática Aplicada e Computacional

具体引用情况:

florestais: onde, quando e por que ocorrem. Além das estatísticas tradicionais de ocorrências de incêndios, podem ser utilizados diversos métodos emergentes da física estatística, incluindo análise de dados e modelos computacionais, para providenciar as informações adicionais sobre a distribuição e agrupamento espaço-temporal dos incêndios, que podem ser úteis para planejamento e controle mais eficiente [1,2,3,4].

Quando existem dois regimes de comportamento de lei de potências, a curva que representa a função de sobrevivência na escala log-log pode ser bem representada por duas linhas retas, com inclinações diferentes.

Detrended Fluctuation Analysis

Para quantificar as correlações temporais, usamos o

[2] Zheng H., Song W., Wang J. Detrended fluctuation analysis of forest fires and related weather parameters. *Physica A*. 387 (2008) 2091-2099.

Song Weiguo, Zheng Hongyang, Wang Jian, Ma Jian, Satoh Kohyu. Weather-driven model indicative of spatiotemporal power laws. *Physical Review E* 2007, 75, 016109

他引 1 次:

[1] Evett RR, Mohrle CR, Hall BL, et al. 2008. The effect of monsoonal atmospheric moisture on lightning fire ignitions in southwestern North America. *Agricultural and Forest Meteorology*. 148(10):1478-1487

具体引用情况:

order polynomial. Song et al. (2007) used this probability function to build a weather driven cellular automata model that accurately reproduced the frequency-interval power law distribution for fires in Japan.

recording rainfall averaged <4 mm/day; 55% of these days had <2 mm/day, and there was no correlation between precipitation and number of fires on these days. We interpret this to mean that even if the analysis is restricted to days known to

Weather Rev. 130, 2098-2109.
Plucinski, M P., 2003. The investigation of factors governing ignition and development of fires in heathland vegetation.

Song, W.G., Zheng, H., Wang, J., Ma, J., Satoh, K., 2007. Weather-driven model indicative of spatiotemporal power laws. *Phys. Rev. E* 75, 1-5.