

国内图书分类号: U416 0415 N93

国际图书分类号: 624.131

西南交通大学

研究生学位论文

沙堆模型复杂性现象及自组织临界性
系统研究

年 级 2002 级

姓 名 何越磊

申请学位级别 工学博士

专 业 道路与铁道工程

指导教师 姚令侃

二〇〇五年六月

摘 要

本文围绕着沙堆模型复杂性现象, 展开了以自组织临界性理论为主的复杂性理论及应用的研究。在已有成果的基础上, 具体工作如下:

1、我们先前的实验表明, 散粒体呈现自组织临界性与系统的组构特征和组织原则有关, 作为组织原则之一的颗粒非均匀性是影响因素。为进一步深入研究, 探讨其它组构特征和组织原则以及其它外界因素对散粒体自组织临界性的影响, 我们开展了如下实验:

(1) 人工碎石材料的均匀沙和非均匀沙单面坡沙堆实验。碎石材料的沙堆表现的规律属性与河沙材料的一致。散粒体颗粒的磨圆度虽然是散粒体的组构特征之一, 但不是影响散粒体自组织临界性的因素。

(2) 坡面插桩和增设坡脚平台的沙堆实验。这些人对沙堆系统施加影响的办法会影响沙堆落沙的量值, 但不能改变沙堆原有的规律属性。

(3) 多尺度的米堆单面坡模型实验。表明颗粒形状对散粒体自组织临界性的影响不显著。

2、在实验基础上, 开展沙堆模型复杂性理论专题研究:

(1) 在论述、分析自组织临界性理论特征和内涵的基础上, 结合散粒体实验, 探讨了沙堆模型的时空长程相关性, 采用 R/S 分析法确定非均匀沙堆具有正的长程相关性, 而均匀沙堆不具备。

(2) 引入多重分形理论和方法, 分析非均匀沙堆自组织临界状态的空间和时间上的多层次分形结构; 建立简化的多重分形动力模型, 分析了散粒体自组织临界状态的多重分形动力行为。进而, 确定了散粒体自组织临界性的多重分形特征。表明非均匀沙堆比均匀沙堆具有更高的复杂性。

3、采用复杂性研究方法分析几类自然灾害的规律属性, 探讨自组织临界性的普适性。

(1) 斜坡灾害是沙堆模型直观表象的自然现象。在对滑坡、崩塌和泥石流的空间分布和时间序列分析时, 证明这三种斜坡灾害幂率分布的共性和自组织临界性特征。

(2) 临界状态下, 许多差异很大的物理系统具有极大的相似性。基于此, 分析洪水和沙尘暴的实测资料:

a、介绍趋势消除波动分析法, 分析实测最大洪峰流量时间序列, 证明序列具有长程相关性。

b、研究多重分形消除趋势波动分析法,将其用于强沙尘暴序列分析,检测出长程相关性、确定其多重分形结构并得出多重分形奇异指数谱。

c、研究几种方法的数学原理,论证了不同分析方法的结果具有可比性。

分析发现,洪水、沙尘暴和斜坡灾害这三类物理性质和成因相差很大的灾害系统表现出相似的规律属性。

4、分析自组织临界性和准周期两种属性的灾害预测预报思路和方法;从可靠性设计角度考虑,研究了复杂性理论指导下的极值统计法的应用,推导出幂率特征的极值分布属于极值 I 型的渐进分布,并应用于实例的计算。

5、交通工程与环境的相互作用和协调性是交通选线设计的新课题。利用复杂性科学研究的重要手段之一——元胞自动机的自动演化原理,提出了广义导向线定线法和基于环境保护的定线元胞自动机模型的设想,进行道路选线设计的新方法研究。

6、散粒体即具有固体的属性,又表现出流体的性质。我们从这两方面分别探讨散粒体的复杂机制:

(1) 分析散粒体堆积结构、密度、应力分布等组构的复杂特征。通过大型沙石密度实验,表明非均匀沙堆在自然堆积过程中具有较大的随机性,导致微结构空间分布和密度的复杂性。进一步分析坡面散粒体的暴露度和颗粒间作用的复杂性。不管是堆体内部,还是临界坡面,非均匀沙堆都呈现出比均匀沙堆更大的复杂性。

(2) 借助流体力学的湍流与层流理论思想,提出散粒体临界流态属性的紊动层和层动层假说,并用于解释散粒体自组织临界性的复杂性行为机制和现象。

关键词: 沙堆模型; 复杂性; 自组织临界性; 方法论; 应用

Abstract

This paper focuses on complexity in sandpiles and studies the complexity theory and application of self-organized criticality. Base on the fruit had been taken the main work and conclusions are as follows:

1、By experiments we have discovered that self-organized criticality in granular mixtures is strongly influenced by the fabric characteristics and the organizing structure principle. The non-uniform degree of granular material, as an organizing structure principle, is a factor affecting SOC. For finding the other factor of the fabric characteristics and the organizing structure principle or others affecting SOC, we carried on the follow experiments:

(1)Uniform and non-uniform sandpiles of single slope experiments with the stuffs of artifical broken stone are done. The sandpiles of artifical broken stone have same law with the sandpiles of fluvial sand. The psephicity of granular is one of the fabric characteristics but is not a factor affecting SOC.

(2)The experiment of pitching of pile on the slope of the sandpiles and the experiment of mountting a platform at toe of slope of the sandpiles are done. The means such as pitching of pile on the slope of the sandpiles and mountting a platform at toe of slope of the sandpiles can affect the quantity of falling sandpiles but these do not change the law of sandpiles.

(3)Multi-scale single slope rice-piles experiments are done. The experiments indicate the effect to granular SOC of the shape is not marked.

2、Base on sandpiles experiments, we research granular complexity theory.

(1)Discussing the c haracteristic and meaning of self-organization criticality theory and analyzing granular experiments, we research long range spatial-temporal c orrelation o f s andpiles. W ith t he r escaled r ange analysis m ethod, w e ensure that non-uniform sandpiles has positive long range correlation but uniform sandpiles has not.

(2)Multi-fractal theory and method is introduced. Multiple course of fractal structure of sliding size serial and sliding interval time serial are analyzed. And simplified multi-fractal dynamic model is set up, with which dynamic action of granular SOC is researched. Multi-fractal feature indicates non-uniform sandpiles

is more complex than uniform.

3、The field data of some kinds of natural disaster are analyzed with different complexity analysis means. The universality of SOC is discussed.

(1) The slope disaster is natural phenomenon that it is presentational by the sandpiles. Spatial and temporal distribution series of landslide, avalanche and debris flow are researched. It is proved that the three slope disasters have common property such as power distribution and the other characteristic of SOC.

(2) In the critical state many very different physical systems are very similar. So we analyzed the field data of the flood and severe duststorm:

a、Detrended fluctuation analysis method is introduced and used to analyze maximum-recorded flood peak time series. It is proved that the series has long range correlation.

b、Multi-fractal detrended fluctuation analysis method is introduced and used to analyze severe duststorm series. It is showed that the series has long range correlation and multi-fractal structure. Multi-fractal singularity exponent spectrum of the series is educed.

c、The methods study demonstrates the results with three kinds of means are comparable.

Research discovers that flood, slope disaster and severe duststorm, which are three kinds of natural disaster systems of very different physical property and genesis, have some internal regularity.

4、Fresh thinking and means for two kinds of complex disaster forecast having the attribute of SOC or quasiperiod are presented. Considering the reliability design for engineering, applying statistics of extremes directed by complexity theory is researched, and extreme value distribution of power distribution is deduced to graduating distribution of extremum type I. And an example is given. Direction of complexity theory such as SOC theory can provide fresh thinking for disaster forecast, project planning and design.

5、Considering interaction and compatibility between communication engineering and environment is a new task for road location design. The cellular automata is one of primary means for complexity research. The paper assumes generalized leading line location means and the cellular automata model for road location. The idea is a new means for road location design for compatibility

between communication engineering and environment.

6、At critical state, granular has the property both solid and fluid. We research the complex mechanism of granular in the two respects:

(1)The paper researches the complex characteristics of granular including the cumulate texture, density and stress distribution. Moreover by means of the relative density of large-scale coarse grained soil test, we make know non-uniform sandpiles being banked has greater randomness, which makes for complexity of the structure space and the density. Researching exposure degree and intergranular acting at the slope of sandpiles, we conclude complexity of the fabric inside and surface of granular leads to complexity of critical activity. Non-uniform sandpiles is more complex than uniform inside and surface.

(2)Under the thought of turbulence and laminar flow theory, we put forward turbulent motion layer and laminar motion layer hypothesis for granular critical fluid state. The hypothesis is used to explain the complex behavior mechanism and phenomena of granular SOC.

Keyword: sandpiles; complexity ; self-organization criticality ; methodology; application

西南交通大学

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并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。本人授权西南交通大学可以将本学位论文的全部或部分内容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和汇编本学位论文。

本学位论文属于：

1. 保密，在 年解密后适用授权书

2. 不保密，适用本授权书

(请在以上方框内打“√”)

学位论文作者签名：

何越磊

日期：05年11月19日

指导教师签名：

姚李凯

日期：05年11月19日

西南交通大学学位论文创新声明

本人郑重声明：所提交的学位论文，是本人在导师的指导下独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他任何个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究作出贡献的个人和集体，均已在文中作了说明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

论文的创新点主要表现在以下几个方面：

1. 先前的实验表明，散粒体呈现自组织临界性与系统的组构特征和组织原则有关，作为组构特征之一的颗粒非均匀性是影响因素。本研究从散粒体的磨圆性和形状着手，采用不同的材料——人工碎石和大米，研究散粒体的临界演化行为；对沙堆进行特殊处理的模型实验（坡面插桩和增设坡脚平台），探讨系统环境因素的改变对沙堆的影响。结果表明，磨圆性、形状、坡面插桩和增设坡脚平台等沙堆的内外因素的改变对沙堆的临界行为影响不大，而且单面坡沙堆的宽度变化不影响沙堆的演化规律。沙堆的临界复杂性与其系统的某些组构特征和组织原则相关，这种规律属性是系统自身固有的，不易受外在因素的影响，具有鲁棒性。

2、在实验现象和数据分析中，对落沙间隔时间序列进行计算，证明非均匀沙堆的落沙间隔时间也同落沙规模序列一样，具有分形特征，而均匀沙堆的落沙间隔时间序列是准周期行为。证实了非均匀沙堆演化时间维上的分形特征。

3、在沙堆模型的复杂性理论研究中，引入多重分形理论和方法，分析非均匀沙堆自组织临界性的空间和时间上的多层次分形结构；建立简化的多重分形动力模型，并分析散粒体自组织临界状态的多重分形动力行为。进而，确定了散粒体自组织临界状态的多重分形特征。表明非均匀沙堆比均匀沙堆具有更高的复杂性。

4、采用复杂性研究方法分析斜坡灾害、洪水和沙尘暴的复杂属性，探讨自组织临界性在自然灾害中的普适性。在对滑坡、崩塌和泥石流的空间分布和时间序列分析时，证明这三种斜坡灾害幂率分布的共性、多重分形和自组织临界性特征；分析实测最大洪峰流量序列和强沙尘暴序列，证明序列都具有长程相关性。结果表明，洪水、沙尘暴和斜坡灾害这三类物理性质和成因

相差很大的灾害系统表现出相似的规律属性，均具有自组织临界性的特征。

5、结合沙堆模型的演化过程，给出了自组织临界性和准周期两种属性的灾害预测预报思路和方法。从可靠性设计角度考虑，在自组织临界性理论框架下，将极值统计法应用于灾害防治工程规划设计研究，推导出幂率特征的极值分布属于极值 I 型的渐进分布，并应用于实例的计算。

6、将自组织临界性研究的主要方法之一——元胞自动机用于交通选线设计，探索基于交通工程与环境协调思想的选线新方法，提出了广义导向线定线法和基于环境保护的定线元胞自动机模型的概念。

学位论文作者签名：何越磊

日期：2005年6月25日

第一章 绪论

量子力学的创始人、伟大的物理学家薛定谔说：“我们清楚地感到，要想把所有已知的知识综合成为一个统一体，现在还只是刚刚开始获得可靠的资料……除非我们中间有些人敢于去着手综合这些事实和理论，即使它们有的是第二手的和不完备的知识，而且还要敢于承担使我们成为蠢人的风险，除此之外，我看不到再有摆脱这种困境的其他办法了。否则，我们的真正目的将永远达不到”。

1.1 科学的体系

在科学不断分化的同时，科学的融合过程也在悄然兴起。同一科学部类内部的有关学科之间以及不同部类的有关学科之间都在相互交叉与渗透。由于科学与技术的紧密结合，使得许多学科实现了工程化。由于科学研究活动的群体化及社会化程度不断提高，以及数学模型及计算机的普遍应用，致使新的交叉学科产生并迅速发展。科学融合在工程技术中的体现也越来越显著，而各专业技术的交叉渗透也体现了基础科学的融合。在一项铁道工程项目中，从规划、设计到施工的整个过程中，已必须将土木工程、交通运输工程、环境工程、地质工程、水利工程、测绘技术、机械工程、材料工程、电气工程、电子技术、信息工程等工学技术融合在一起，其中的每一项工作都具有多种技术的交叉和渗透。这些都是以数学、物理、化学、地学和生物等科学为基础，并且表现了这些基础学科的交融。

实现科学融合的哲学基础是客观世界的整体性、系统性，即客观世界是一个由相互联系各部分所组成的、不断发展变化的系统。由于每一门学科的研究对象仅是这一系统中的一小部分，因此在研究过程中决不能忽视其研究对象与系统其它部分的联系。而只有将各门学科及各学科部类的研究成果综合集成起来，才能取得对客观世界的全面的认识。著名物理学家普朗克早就指出：“科学是内在的整体，它被分解为单独的整体不是取决于事物的本身，而是取决于人类认识能力的局限性”^[1-3]。

我国著名科学家钱学森先生认为，任何一门完善的科学都应该包括其哲学、基础（基础理论）科学、技术（应用理论）科学和工程技术（应用技术）四个层次^[4]。如图 1-1 所示的体系结构中各个层次特定的规定性是：工程技术层次：直接改造客观世界的知识；技术科学层：工程技术共用的各种理论；

基础科学层：认识客观世界的基本理论；通向哲学的桥梁，对应于该学科的哲学分论。

依此，可以得出自然科学的体系结构图，见图 1-2。从系统层次结构的观点看，全部自然科学知识明显地分属于三大层次(台阶)。最接近社会实践的层次是工程技术，诸如土木工程、水利工程、电气工程等等。在这一层次之上，对工程技术进行理论概括而产生的、作为这些工程技术直接的理论基础的是一系列技术科学，如建筑学、水力学、电工学等等。这些技术科学进一步概括，上升为更高层次的科学理论，就是自然科学的基础科学如物理学、化学、生物学等等。由这些基础科学通向人类知识最高概括的哲学需要一定的中介和桥梁，这就是辩证自然观或自然辩证法。

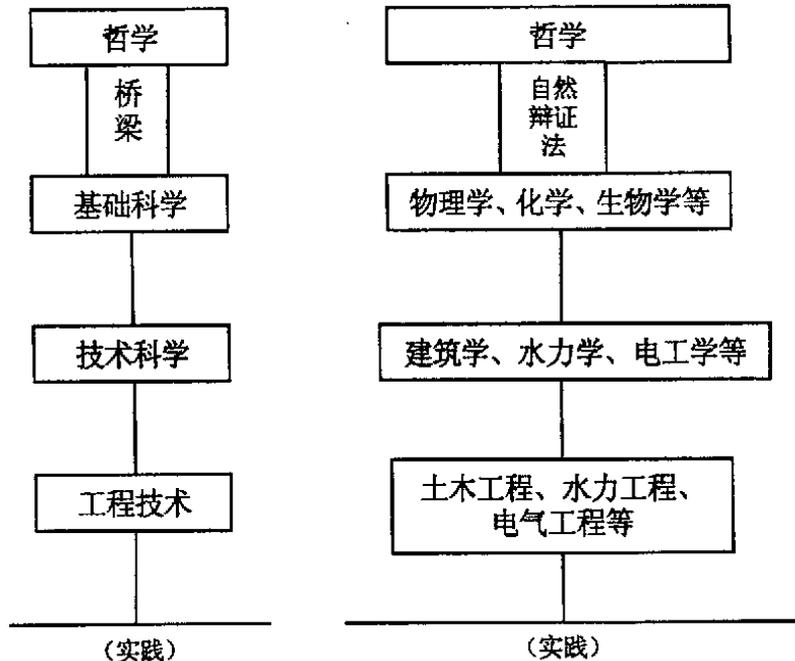


图 1-1 科学体系的一般结构

图 1-2 自然科学的体系结构

这样的体系框架下，在从事工程技术研究时，如果能够以哲学为指导思想，从基础科学和技术科学层次中深入挖掘，特别是对基础学科中新出现的交叉科学，会为工程技术研究找到新的基础支撑，取得更进一步的成果。本文就是以复杂性科学为基础，在研究沙堆模型复杂性现象和自组织临界性理论的同时，探讨其理论和研究方法在技术科学和工程技术层次中，特别是交通土建工程相关领域中的应用。

1.2 复杂性科学

自然界中普遍存在的是由不可计数的大量组元构成的复杂非线性系统。而且这些系统中许多都与人类的工程活动密切相关,如地理系统、生态系统、大气系统等等。研究这些复杂系统,必不可少地要采用复杂性观点,运用整体性的方法论直接或间接分析和指导。

复杂性科学并非自然科学中的一个新分支,而是整个科学作为演化系统的一种历史形态,一种代表未来的形态。凡能用数学描述的复杂性,必定是非线性的,非线性是产生复杂性的主要数学根源。目前,各个学科领域的发展,都有向复杂性现象研究的转向。在美国国会图书馆 1975 年至 1999 年 2 月 15 日的入藏书目中,标题里含复杂性(complexity)一词的就有 489 种^[5]。其中涉及算法复杂性、计算复杂性、生物复杂性、生态复杂性、演化复杂性、发育复杂性、语法复杂性,乃至经济复杂性、社会复杂性,等等。

物质世界是复杂的,自然界事物的发展及其相互间的关系是非线性的。因此,要从整体性考虑问题。正如非线性不满足整体是部分之和这一原理一样,复杂性科学也不是非线性数学、非线性物理和非线性力学等等分支学科的总和。在自然科学的各个不同的领域内,各种系统有着共同的概念。复杂性系统具有超越不同学科领域局限的共同性质。复杂性科学为各学科的融合提供了理论的平台。

系统的复杂性,可表示为尽管变化无常,但又捉摸不定的秩序,而且总是通过自组织与不断的适应,经过复杂过程和不同的变化阶段,向优化、更高级的秩序演进。复杂性研究就是研究系统在不同层次上的复杂组成;认识它们之间的相互作用、它们与环境的相互作用和由此而产生的它们构成的整体特征(结构、功能和行为、演化等);回答其发生、变化的规律、过程和原因;揭示整体的活动机理,以便于掌握、调节或控制。

复杂性的几个特点如下^[6-10]:

1. 复杂性体现整体性、系统性。整体大于各组成部分之和即每个组成不能代替整体,每个层次的局部不能说明整体,低层次的规律不能说明高层次的规律;
2. 多组成。即有多种多样的子系统和子子系统,每个子系统有相对独立的结构、功能与行为;
3. 复杂的多层次结构。反映在时间与空间尺度两个方面既是网络体系,又是不均一的;
4. 各组成之间、不同层次的组成之间相互关联、相互制约并有复杂的非线性相互作用,而且相互作用也是多种多样的,并且它们也是相互作用的;

5. 开放性。系统与外部是相互关联、相互作用的，系统与外部环境是统一的；

6. 高维的动力系统，而且导向有序化发展。系统随着时间而变化，经过系统内部和系统与环境的相互作用，不断适应、调节，通过自组织作用，经过不同阶段和不同的过程，向更高级的有序化发展，涌现独特的整体行为与特征。系统有自适应、自组织地趋向有序化的功能；

7. 系统的演化过程是阶段性的，有渐变与突变，整个过程是非线性的。渐变是突变的基础，而突变则是从低级到高级的变化原因。可以把突变作为一个系统由一种阶段、一种状态向另一种阶段、另一种状态演化的转折。

目前，许多系统的复杂性仍是难以探究清楚的。复杂性的研究仅仅是刚刚开始，许多问题都有待于进一步解决，包括复杂性的确切定义。但已经形成的一些重要的非线性系统理论，在许多领域发挥重要的作用。其中，分形和混沌理论对复杂性研究起到了不可估量的作用。而自组织临界性是一较新的复杂系统理论。它将时间分形和空间分形联系在一起，弥补了研究混沌之外的一些系统复杂性的指导性理论的空缺。同时，与分形和混沌有着不可分割的联系。

1.2.1 分形

分形 (fractal) 是复杂性研究中一种重要的数学分析方法。自从 1975 年曼德布罗特 (Mandelbrot) 提出这个概念^[11, 12]以来，人们发现，包括海岸线的形状、山形的起伏、地层、河网水系、湍流、凝聚体、相变、人体血管系统、肺膜结构，大至宇宙星云的分布，小到晶体结构，从地学、生物学、物理学、化学、甚至社会科学都普遍存在分形结构 (fractal organization)。分形指的是没有特征长度而同时又具有自相似性的一类形状和现象。

分形所研究的对象是在非线性系统中产生的不光滑和不可微的几何体 (分形体)，对应的参数是分维数。它的中心内容可以理解为：它是指不规则几何体在动力学演化过程中，在一定的标度尺度范围内，其相应的测度不随尺度变化而改变。一般的，分形包含以下要点^[13, 14]：

1、分形既可以是几何图形，也可以是“功能”或“信息”架起来的数理模型。

2、分形可以同时具有形态、功能和信息三方面的自相似性，也可以只具有其中某一方面的自相似性。

3、自相似性可以是严格的，也可以是统计性的，自然界的大多数分形都

是具有统计意义上的自相似性。

4、自相似性有层次结构上的差异，数学中的分形具有无限嵌套的层次结构，而自然界中的分形只具有有限嵌套，且要进入到一定的层次结构以后才有分形的规律（通常是幂律）。

5、相似形有级别（即使用生成元的次数或放大倍数）上的差异，级别最高的是整体，最低的称为 0 级生成元。级别越接近，则越相似，级别相差越大相似形差异越大，可用无标度区间或标度不变性范围来表示。

简单来讲，分形是大小碎片聚集的状态，是没有特征长度的图形和结构以及现象的总称；其组成部分和整体以某种方式相似，即具有自相似性。分形几何学研究的图形是不规则和不光滑的图形，已失去了通常的几何对称性，但在不同的尺度下进行观测时，分形的形态、复杂程度、不规则性等特性都具有尺度上的对称性，或称为标度不变性。自然界的分形只能在一定尺度范围内（即无标度区）成立。

分形体是具有扩展对称性（也称标度不变性）的自相似结构，具有自相似结构的物体在几何性质上具有的重要特征可以用一个连续变化的维数来表征，简称分数维。分数维是定量刻画分形特征的参数，是分形的数量表示，它不是通常的欧氏维数的简单扩充，它是分数值（多数分形是如此），也可以是整数值，并有多种定义和计算方法，常用的是 Hausdorff 测度和维数^[16, 16]：

如果 U 为 n 维欧氏空间 R^n 中任何非空子集， U 的直径定义为：

$$|U| = \sup\{|x-y|; x, y \in U\},$$

既 U 内任何两点距离的最大值，式中 \sup 表示上确界。如果 $\{U_i\}$ 为可数（或有限）个直径不超过 δ 的集构成的覆盖 F 的集类，且对每一个 i ，都有 $0 < |U_i| \leq \delta$ ，则称 $\{U_i\}$ 为 F 的一个 δ -覆盖。

设 F 为 R^n 中的任何子集， s 为一非负数，对任何 $\delta > 0$ ，定义

$$\rho_\delta^s(F) = \inf\left\{\sum_{i=1}^{\infty} |U_i|^s; \{U_i\} \text{ 为 } F \text{ 的 } \delta \text{ 覆盖}\right\}$$

式中 \inf 表示下确界。

于是考虑所有直径不超过 δ 的 F 的覆盖，并试图使这些直径的次幂和最小。当 δ 减少时，式中能覆盖 F 的集类是减少的，所以下确界随着 $\rho_\delta^s(F)$ 增加且当 $\delta \rightarrow 0$ 时趋于一极限（集合的上确界与下确界直观地被认为是集合地最大值与最小值）。

$$\text{记 } \rho^s(F) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \rho_\delta^s(F)$$

对 R^n 中的任何子集, 这个极限都存在, 但极限可以是 (并且通常是) 0 或 ∞ 。 $\rho^s(F)$ 就被称为 F 的 s 维 Hausdorff 测度。存在 s 的临界点使 $\rho^s(F)$ 从 ∞ “跳跃” 到 0。这个临界点为 D_H , $D_H = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\ln N(\delta)}{\ln(1/\delta)}$ 为 Hausdorff 维数, 即分维数。

分形理论揭示了非线性系统中有序和无序的统一, 确定性与随机性的统一。一般的, 分形由三个要素组成, 即形状、机遇和维数。在确定一个物体是否是分形时, 除了看维数外, 还必须看是否具有自相似性和标度不变性; 没有自相似性就没有分形。分形系统的最典型性质是缺少空间的特征尺度。这一性质可以有三种等价的表达方式: 拓扑自相似性、空间的幂函数律和标度不变性。类似地, 系统中不存在时间的特征尺度将导致时间的幂函数律, 如 $1/f$ 噪声。

1.2.2 混沌

早在 19 世纪末, 法国数学家庞加莱(Henri Poincare)就预言了混沌运动的可能性。1963 年美国气象学家洛伦兹(Lorenz)在分析天气预报模型时得出气象不可长期预测的结论, 发现了混沌的存在。郝柏林院士指出: 某些完全确定系统, 不外加任何随机因素就可能出现与布朗运动不能区分的行为; “失之毫厘, 差之千里” 的对初值细微变化的敏感依赖性, 使得确定论系统的长时间行为必须借助概率论方法描述。这就是混沌。^[17-21]

混沌是一种轨道不规则并且具有对初值的敏感性, 即不稳定性的运动现象。其不稳定性使运动的长期行为具有不可预测性, 所以混沌是一种貌似不规则的运动, 是确定性系统中出现的类似随机的过程。一个动力学系统呈现出混沌现象, 既不是因为系统中存在的随机力或受环境中外界噪声源的影响, 也不是由于无穷多自由度的相互作用, 更不是与量子力学的不确定性有关。决定论规律的非线性, 是混沌运动存在的必要条件。而非线性系统的内在对称性, 又赋予混沌行为以某种结构与秩序。混沌行为最本质的特点是非线性系统对于初始条件的极端敏感性。混沌的另一主要特征就是: 对于某些参量值, 在几乎所有的初始条件下, 都将产生非周期动力学过程。

混沌具有奇异吸引子, 其复杂的结构具有分数维, 即存在分形结构; 混沌存在正的李亚普诺夫特征指数 (用来刻画运动轨迹收敛或发散的速率); 混沌的拓扑熵为非负; 其运动的功率谱是连续的。这几条可以做为混沌的基本判断尺度。

例如: Lorenz 在著名论文《确定性的非周期流》中研究大气在温度梯度

作用下的自然对流系统,这是天气预报的一种极端简化模型,即著名的 Lorenz 方程:

$$\begin{cases} \dot{x} = -P_r(x - y) \\ \dot{y} = \rho x - y - xz \\ \dot{z} = -bz + xy \end{cases}$$

图 1-3 为 $P_r=10$, $b=8/3$ 时模型动力方程分别叠代 2000 次、10000 次和 20000 次的三维重构相图 (matlab6.5 环境编程绘图)。相图体现出 Lorenz 吸引子的奇异性和轨道不相交性,其李亚普诺夫特征指数分别为 (2.16; 0.00; -32.4)。因此,这是混沌的动力行为。

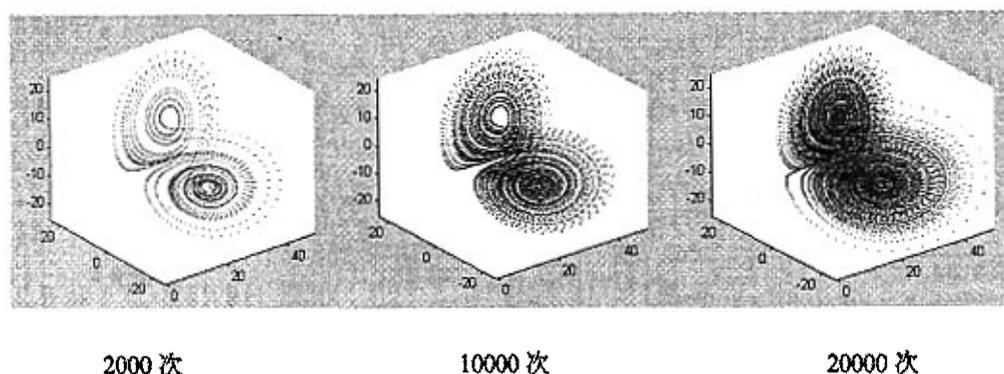


图 1-3 Lorenz 方程的三维重构相图

由于混沌中包含有许多自相似结构,可以用分维数描述其特征,即分形是混沌的数学描述方法之一。从本质上讲,混沌是一种关于过程的科学而不是一种关于状态的科学,是关于演化的科学而不是关于存在的科学。

混沌有强(或完全)混沌和弱混沌之分,一般所说的混沌往往是指完全混沌。Lorenz 方程演绎的就是强非线性混沌,即完全混沌。自然界和人类社会中还存在大量的弱混沌现象,如湍流。为解释分形和无特征尺度行为在非平衡系统中的广泛存在性,丹麦人帕巴克(Per Bak)和中国学者汤超(Chao Tang)等在 1987 年提出自组织临界性理论,它可以适用于许多自然系统和社会系统。弱混沌就是自组织临界性所致。

1.2.3 自组织临界性

自组织临界性(self-organized criticality, 简称 SOC)是由 Per Bak, Chao Tang 和 Kurt Wisenfeld 提出的关于具有时空自由度的复杂动力学系统的时空演化特性的一个概念^[22-24]。自组织临界性理论认为:存在众多组元构成的复

杂动力学系统，系统能够自发向一种临界状态演化。达到这样的状态以后，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，因而表现出覆盖整个系统的满足幂律分布的时空关联。尽管此类系统在物理、生物乃至经济与社会领域中广泛存在，人们对它们的时空演化性质依旧知之甚少。

通常情况，当地震发生时，地质学家理所当然的将其归因于地下断层的异常剧烈的不稳定性；当股票行情暴跌时，经济学家会怪罪计算机交易股票市场的破坏作用；当化石记录揭示了“寒武纪生命大爆发”时，达尔文的渐进进化论学者倾向于把它解释为化石记录不全；当癫痫病发作时，临床医生理所当然地把它归因于脑的海马功能失调。这些理论或许很正确，但是，按照自组织临界性的理论，像地壳、股票市场、金融危机、恐龙灭绝和人类大脑这样众多组元而且复杂的相互作用系统，会朝着一种临界状态不断地自组织，在这种临界状态下，小事件会导致一场大爆发。^[26]

为了表述自组织临界性概念，Per Bak 等人采用沙堆做为模型。自组织临界性的研究，是直接从沙堆开始的。沙堆可以看作一个带有局域相互作用和广延空间自由度的耗散动力系统。尽管选择了简单的情况，系统仍然相当复杂，一般具有许多亚稳态。数值模拟是一种重要的手段，特别是元胞自动机（Cellular Automata，简称 CA）模型，已经提供了现成的工具。当定义在空间点阵上的一个整数变量超过某一阈值时，从一个局域元胞发出到它的邻近元胞，这个元胞接受信号，而使其整型变量发生改变，如此往复。这个办法的潜在普遍性来自于非常简单的非线性扩散动力学，不仅在定性特征而且定量性质（如标度指数）上得到较好的结果^[26]。Per Bak 等人提出著名的 BTW 模型就是用 CA 模拟沙堆来解释自组织临界性的：设想在一个平台上通过任意加沙子来堆砌一个沙堆，一次加一粒，随着沙堆的升高，它的坡度逐渐增加，一旦沙堆相邻位置之间的坡度达到某个阈值，就会发生一次坍塌。最终系统将演化到一个临界状态，系统恰好处在稳定性的边缘上。此时每加一粒沙子，就会产生具有各种时间和空间尺度的坍塌，它们满足幂律分布。这个动力学吸引子就是所谓的自组织临界状态。

1 / f 噪声又称 1 / f 涨落(1 / fluctuation)，其功率谱 $S(f)$ 与频率 f 成反比。自 1925 年 Johnson 在热阴极的电流噪声中首次发现这一现象之后，人们不仅在真空管电流噪声、碳膜电阻、半导体和金属膜等固体导电中发现了 1 / f 涨落，而且发现在自然与社会现象中，从尼罗河水流量变化、健康个体的心率跳动、细脑膜电位、人类认知、优美的音乐旋律、DNA 序列，乃至高速公路的车流变化，竟也几乎无不打上 1 / f 的印记。人们常常慨叹：历史上常有

惊人的相似之处。这大概也是一种 $1/f$ 的印记。

长期以来,人们一直在寻找世态万象呈现 $1/f$ 涨落和分形结构的某种共同机制,然而数十年来众说纷坛。对此,自组织临界性给出了一个新颖的解释:许多大的相互作用的系统都自然地朝着一种临界状态演化,而 $1/f$ 涨落(动态系统产生所有各种尺度和各种持续时间的连锁反应时所展现信号叠加的结果)和分形结构(表现为内在的标度不变性)则分别是自组织临界状态系统在时间和空间尺度上的“指纹”。可将自组织临界性归纳为下面的图示^[27]:

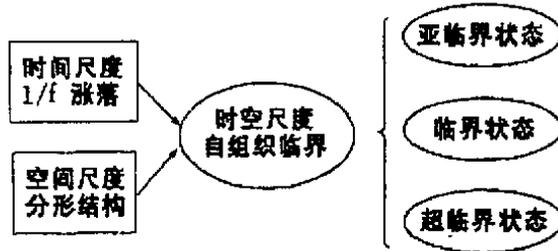


图 1-4 自组织临界性

SOC 被成功的用来解释包含千千万万个发生短程相互作用组元的时空复杂系统的行为特性。按照这一观点,许多复杂系统的行为特性可分为亚临界、临界和超临界三种状态,在正常情况下,这些系统都自然地朝着临界状态进化,然而一旦运行机制发生突变,系统可能进入超临界状态并持续爆发大规模的“雪崩”现象。令达尔文困惑的“寒武纪生命大爆发”,也许是自组织临界性的机制所导致的。它可能不仅是一次规模巨大的爆发式的演化事件,更为重要的是这一事件具有极明显的自发性进化行为,是生命进化过程中一个自组织事件。

混沌信号具有白噪声谱,但混沌相变发生的地方有类 $1/f$ 信号的复杂行为。复杂态位于可预测的周期行为和不可长期预测的混沌的分界面上。按照理论分析和计算机仿真,“自组织临界状态”和“混沌的边缘”二者是相通的,“此二者,同出而异名,共谓之玄”(《道德经》),处于自组织临界状态的系统刚好在混沌的边缘上,是弱混沌现象。

1.3 散粒体复杂性研究

一堆沙子是成千上万个沙粒作为组元构成的系统,盛放沙堆的平台和沙堆(包括孔隙)所占空间以外其它部分构成其系统环境。虽然沙粒没有一定的空间分布规律,但沙堆却具有一定的形状并占据一定的空间。一般来讲,沙堆被认为是无序的,但这种表面上的无秩序可能隐藏着复杂的秩序。

沙堆属于散粒体的一种类型。散粒体的共同特性为：临空面常常以边坡形式出现；颗粒具有部分流动性，只有在其自由斜面的角度不大于自然临界坡角（休止角）时，才能保持本身的形状，处于平衡状态；达到临界状态时，散粒体系统内各要素通过一系列非平衡不稳定产生空间、时间、功能和结构的自组织过程，导致开放系统远离平衡态的结果。

工程中接触到的具有上述共性的散粒体很多，主要包括碎石道床、路基填料、堆石坝、坡面松散堆积物、岩堆、矿渣、无粘性粗粒土、河流泥沙等人工或天然的多尺度散体类型。散粒体沙堆崩塌的机理，反映了在自组织和干扰作用下的岩体崩塌、边坡失稳、坡面泥石流等诸多自然现象的一种能量耗散普适性过程。诸如高速铁路列车震动引起的“飞渣”、道床边坡坍塌等工程问题也对散粒体这种临界现象动力学的研究提出了紧迫的要求。

散粒体问题的基本理论是松散介质力学。目前松散介质力学采用的计算简图主要是连续介质模型，即在连续性假定的条件下，利用整体介质作为实际颗粒体的计算模型，模型的性质用实验确定的常数来表征；另一种计算模型为粒状介质，其实质是认为颗粒的相互作用服从概率法则，从而进行从概率角度研究颗粒体力学性质的工作；此外，将颗粒体作为一种新的流动模型研究其流动输移的规律，即颗粒流模型，也正在形成热点。但从总体上看，关于散粒体的理论体系尚不很成熟，许多问题还没有得到经典科学的解决。特别聚焦于散粒体静平衡破坏的临界现象，从整体理论上解释散粒体系统普适性动力学特征的研究还处于起步阶段。

沙堆模型能很好地表征系统的非线性扩散动力学特征，特别是广延耗散动力系统因大量组元之间存在着强烈的非线性相互作用而自发地朝着自组织临界性演化的过程。直接用沙堆模型研究广义的散粒体动力学具有一定前瞻性意义。

对沙堆模型的研究可借用自组织临界性理论这一针对复杂性大系统研究提出的新概念、新方法。在自组织临界性理论的概念下探索散粒体系统的动态特性，有可能从整体理论上对散粒体系统的动力学特性提出新的解释，从而开辟散粒体研究体系新的分支，在新的认识指导下为散粒体输移、失稳等问题创建更为合理的理论模型。

散粒体的复杂性研究主要是 1987 年 Per Bak 等人设计了沙堆自动机模型来研究 SOC^[22] 开始的。此后，许多学者都研究了真实的或计算机模拟的沙堆、米堆、玻璃球堆等散粒体的各式实验。在 20 多年里，研究散粒体的复杂性机制时，所针对探讨的因素已经包括：沙堆的密度^[28]、层化现象^[29]、边界条件

[30, 31]、各向异性^[32]、颗粒大小差异^[33]、沙堆表面的光滑化^[34]、惯性^[35, 36]、沙粒和沙粒团的竞争作用^[37]、老化行为^[38]、温度^[39, 40]、摩擦力^[41]，以及沙堆表面波动^[42]等。

另外，Jaeger 研究发现沙堆斜率是按照 $\log(t)$ 衰减^[43]；Christensen 发现散粒体系统中的平均传播速度随着系统的规模增加而减小^[44]；Dhar 计算了沙堆模型中任意格子的熵^[45]；Priezzhev 研究了二维沙堆模型的结构^[46]；Lam 对模式耦合理论进行了研究^[47]；一些学者对沙堆模型相关函数及其运算法则也进行了研究^[48~51]；Montakhab 得到表现出自组织临界性的沙堆模型族中的局部均衡的数值证据^[52]；Ktitarev 比较了雪崩分成跌落丛和跌落波的两种不同的分解方式的统计特征^[53]；Manna 进行了沙堆模型中雪崩丛规模分布的大尺度模拟^[54]；Shnirman 发现沙堆模型中 SOC 的一种新类型^[55]；Bagnoli 提出了一个让模型的所有控制参数平行演化的方法^[56]；Jensen 从理论上分析得到了一维和二维沙堆模型具有 $1/t^2$ 的功率谱特征，并区分了发生在坡面上的雪崩和滑出系统边界之外的雪崩，后者的行为具有 Jaeger 测量到的真实沙堆输移的类似行为^[57]；Frette 研究认为来源于固定演化规则的驰豫是介质各向异性的一种结果^[58]。

自组织临界性与沙堆的规模有关的原因是由于真实沙堆中所呈现的惯性和能量耗散。真实沙堆是被重力所驱动，在雪崩发展的过程中，潜在的能量转化成动能，移动的沙粒获得了动量，整个移动的沙粒体得以加速，如果这个过程持续时间足够长的话，由于惯性，巨大的雪崩只能够在系统的边界之外才能停止下来，这样一来雪崩使得沙堆相当大的一部分沙粒发生移动，沙堆实验所表现出来的特征可以理解为在巨大的雪崩中能量聚集的影响^[35, 36]。

Luis 和 Bengrine 都进行了米堆数值模拟^[59, 60]。Bengrine 发现，对于一个足够大的系统，在一维 BTW 模型中，通常的临界行为与自组织临界性行为之间存在一个急剧的转变。

对临界指数和普适性进行了研究^[61~81]。Díaz-Guilera 发现不同的自组织临界性模型会导致相同的指数，但是普适类型却对无序性是敏感的^[82]。

为了确定 SOC 的临界指数，除了利用数值模拟外，均衡场理论和重正化群方法都取得了一定的进展。Tang 第一个提出沙堆的均衡场理论^[83]；Christensen 和 Flyvbjerg 也进行了研究^[84, 85]；Zapperi 指出沙堆模型的均衡场行为可以描述为临界的自组织分岔过程^[86]；以前的均衡场理论处理的是系统的短期行为，Katori 提出的一种新的近似均衡场理论处理的是系统的长期行为，并将两者结合起来^[87]；Vergeles 获得了模型的主方程并绘制分岔过程的

图像^[89]。

对标度关系进行的研究^[89-98]中; Rosendahl 发现在沙堆大小变化中的标度变化依赖于沙堆大小与沙粒直径的比率^[10]; Pinho 认为, 标度变换可能不是一维沙堆模型中复杂行为的表现, 在一维局部限制性沙堆模型中所观察到的多重标度的统计特征和内在的长度标度反映了复杂性水平^[99]; Leo 发现, 在一维情形下, 多重分形分析比基于简单有限尺度的标度分析更好, 在二维情形下, 简单的有限尺度标度效果很好, 并且分布函数通过简单的幂律关系适用的范围很大, 多重分形效果也很好^[100]; Menech 发现稀有事件修改绝大多数的标度形态^[101]。

对闪烁噪声的研究取得了一些进展。Díaz-Guilera 发现不同的闪烁噪声之间的相互关系会导致不同的临界行为^[82]; Christensen 研究认为一般的、确定性的、显示出自组织临界性的非保守模型表现出闪烁噪声行为, 功率谱指数依赖于保守程度^[102]; 对闪烁噪声的出现给出了一个相当一般性的解释: 闪烁噪声是具有各种尺度和各种持续时间的信号的叠加, 闪烁噪声的强度可以通过脉冲后继传播的时间间隔和特征函数进行表达^[94, 103, 104]。

对自组织临界性产生的机制也进行了研究, Grinstein 认为自组织临界性与空间各向异性有关^[105]; Skokov 研究认为自组织临界性和闪烁噪声与非平衡相转变的交点和相互作用有关^[106]; Flyvbjerg 也做了同样的研究^[107]; Stølum 提出任何一个动力系统中出现 SOC 必须的三个条件^[108]; Wiesenfeld 发现元胞自动机中存在许多共存的周期吸引子, 周期不依赖初始条件, 把临界状态想象为许多这样共存的中性的稳定轨道的统一体^[109]; Middleton 发现在周期边界非保守模型中, 具有一系列中性的稳定的周期性状态, 不均匀性破坏了这些稳定状态, 并导致了相位同步, 自组织临界性是由于同步或者相位同步^[110]。

许多自然现象断断续续地进行演化, 这种行为叫点断平衡。Bak 认为点断平衡反映了动力学系统向临界状态演化的趋势, 点断平衡对于复杂性现象的出现是非常重要的^[111]; Bak 研究了生态演化模型中的点断平衡与临界性, 发现协同演化比非协同情形要快得多^[112]; Emma 研究了点断平衡的自组织临界性生态演化模型中边界的时空相关性, 揭示出无论耗散存在与否, 边界雪崩与主体中的雪崩一样具有相同的时空分形维数, 它们的分布指数遵循基本的标度规则^[113]。Adami 研究了生态系统的自组织临界性, 在临界状态下, 波动以及相转变之间的等待时间服从 $1/f^{\alpha}$ 的幂律分布, 这种分布能够支持演化的点断平衡^[114]。

Katori 发现在滑落过程中一些沙粒被取消的速率为正的时候, 非保守的

Abelian 沙堆模型的自组织临界性中断^[115]。Bak 研究了非保守模型的自组织临界性^[116]。Ghaffari 发现在随机驱动的非保守模型中, 不存在临界性。当接近保守的情形下截止点发生分岔^[117]。

还提出了其他一些模型来研究自组织临界性: 反串联模型^[118]、外部增加的耦合噪声模型^[119]、等量增加荷载的纤维束模型^[120]、一维随机元胞自动机模型^[121]、动态运输模型^[122]、一维连续能量模型^[123]、集成火警震荡器格子气模型^[124]、矢量自动机模型^[125]、二维滚筒模型^[126]等等; Miranda 研究了无序程度不同的沙堆模型, 模型显示出自组织临界性, 特征指数并不随无序程度的变化而变化^[127]; 传统的沙堆模型是使用的局部稳定规则建立起来的, 而 Malthe-Sørenssen 引入的是一个基于单颗沙粒的运动和它与沙堆的相互作用的自组织临界性沙堆模型^[128]。

将渗流理论也引入到自组织临界性的研究中, Maslov 研究了动态运输模型, 当空间维数大于 2, 模型与 $D+1$ 维定向渗流是相关的^[122]; Ceva 认为, 从自组织临界性到第一有序类行为是渗流转换的一种新类型^[129]; Alencar 通过控制结点的数量, 系统自动地演化到渗流阈值的临界状态, 这种自我谐调行为是自组织临界性行为, 建议将这种方法推广到别的演化机制, 用来解释在一些无序系统中出现的渗流结构现象^[130]; Christensen 认为, 在确定维数下, FFM 的均衡场模型是一个渗流模型, 并且随着维数 d 的增加, FFM 变得越来越像渗流模型^[131]。

Vanderzanden 将耗散的 Abelian 沙堆模型和随机行走模型联系起来进行研究^[132]; Hopcraft 认为简单的元胞自动机模型掩盖了决定复杂系统的合作行为的作用, 提出沙粒的时间和空间行为可以用随机的行走模型从微观转变和宏观变化两个方面对沙堆进行了研究, 这样做有助于在更深的层次上对 SOC 行为的动态特性进行理解^[133]。

Bonabeau 研究了随机线图上的沙堆动力学行为^[134]; Shcherbakov 研究了自组织的 Eulerian 行走模型的临界动力学行为^[135]。VilelaMendes 利用一套遍历性不变量来表征自组织和共同演化的动力学过程^[136]; Paczuski 提出了雪崩动力行为的一个广泛理论, 在这个理论中, 雪崩动力行为可以描述为一个 d 维空间分形加一个时间维, 复杂状态可以通过调谐参数或者自组织达到, 这个理论可以用于 SOC 和非 SOC 系统发生的雪崩^[97]。

此外, Blanter 研究了简单的等级系统: 稳定性、自组织临界性以及灾难性行为^[137]; Rosendahl 认为利用小雪崩原则上可以预测巨大雪崩的出现^[138]; Bántay 提出了几个将离散的元胞自动机模型与传播过程联系起来的建议, 揭

示出如何将这个模型的动力学行为解释为离散的不规则传播过程^[139]；Socolar 发现模型显示出微观周期振动的证据，认为这种振动可能提供了在非保守系统中的标度变换结构一般性的机制，特别是它们构成了在具有开放边界条件的 SSM 模型中观察到的临界性基础^[140]；Vandewalle 研究认为，相互作用的范围是有限的，自组织临界性也会出现^[141]；Pietronero 发现临界现象有一个共同的特征：相关长度在临界状态是发散的，这对于阐明长程相关是如何出现的具有积极意义^[142]；Maslov 建立了空间分形行为与自组织（非自组织）临界现象的长程时间关联之间的关系^[143]；Corral 模拟了自组织临界性的随机不同等式的对称性和固定点的稳定性^[144]；Carlson 研究了自组织临界性与奇异性传播，提出因为在临界点系统连续传播的界限在传播的连续性上具有奇异性，一些开放的驱动系统自组织到临界点，一些指数和雪崩事件的分布仅仅与传播奇异性的序列有关^[145]。Obukhov 还提出了多体简并态 Goldstone 模型的非线性相互作用导致 SOC 的新观点^[146]。

计算机沙堆模拟实验必须以真实沙堆实验为原形，在真实的沙堆实验中，沙堆规模、落沙高度、惯性，动能和摩擦耗能、沙粒运动等不确定性共同起作用。因此，在我们的模拟实验中将这六个因素作为实验参数，进行了六因素综合的沙堆计算机模拟实验^[147]。

这些研究使对散粒体的复杂性有了一些认识。但工作远没有完成。因此，我们以土木工程为背景，进一步开展了散粒体复杂性的研究。本文就是以物理实验为基础，对散粒体复杂性的理论、研究方法和应用进行探索。

1.4 本文研究的思路方法和主要内容

本文的研究是在复杂性科学的哲学思想指导下，在已有研究工作的基础上，分别对沙堆模型复杂性进行实验、理论和机制的探讨；并针对复杂性科学的一个分支——自组织临界性在沙堆模型临界演化中的显现和普适性，结合复杂性科学的方法论进行应用的研究。

主要工作可以分为如下几大部分：

1、沙堆模型实验及复杂现象分析

在已有的沙堆实验研究基础上，深化沙堆模型临界演化实验，分析其呈现出不同复杂特征的影响因素。

2、沙堆模型复杂性的理论专题研究

在实验分析的基础上，开展了自组织临界性的长程相关特征和散粒体多重分形特征的研究。

3、自组织临界性研究方法和理论框架下的应用研究

结合对边坡地质灾害、水害和气象灾害系统实测资料的分析,探讨自组织临界性在自然灾害中的普适性;分析自组织临界性理论框架下的灾害防治技术,特别是与极值分析方法的结合应用;将自组织临界性研究的主要手段之一——元胞自动机方法应用于基于可持续发展和环境保护思想,实现线路工程建设与环境相协调为目的的交通选线设计,提出了广义导向线法和选线元胞自动机模型。

4、散粒体复杂性的机制探讨

针对散粒体结构的复杂性和临界状态动力机制进行探讨,并从散粒体流态属性角度提出紊动层和层动层的假说。

具体技术路线和主要内容见图 1-5 所示。图中,每一虚线框内为一个研究专题。具体到文中,第二章为沙堆模型实验及分析;第三章是沙堆模型复杂性理论专题研究;第四、五、六章是自组织临界性的普适性分析和复杂性理论方法的应用研究;第七章是散粒体复杂性的机制探讨。复杂性科学方法论的研究运用融于各章内。

本文研究得到下列科研课题资助:

“大尺度散粒体系统自组织临界性机制与判据”

——国家自然科学基金项目 No. 50478085;

“西部山区重大道路工程与环境相互作用机制”

——国家自然科学基金西部重大研究计划 No.90202007;

“大尺度散粒体自组织临界性研究”

——国家自然科学基金项目 No.50278080;

“散粒体自组织临界性研究”

——高等学校博士点专项科研基金项目 No.200061307。

沙堆模型实验是在铁道部重点开放实验室——西南交通大学道路与铁道工程实验室进行。

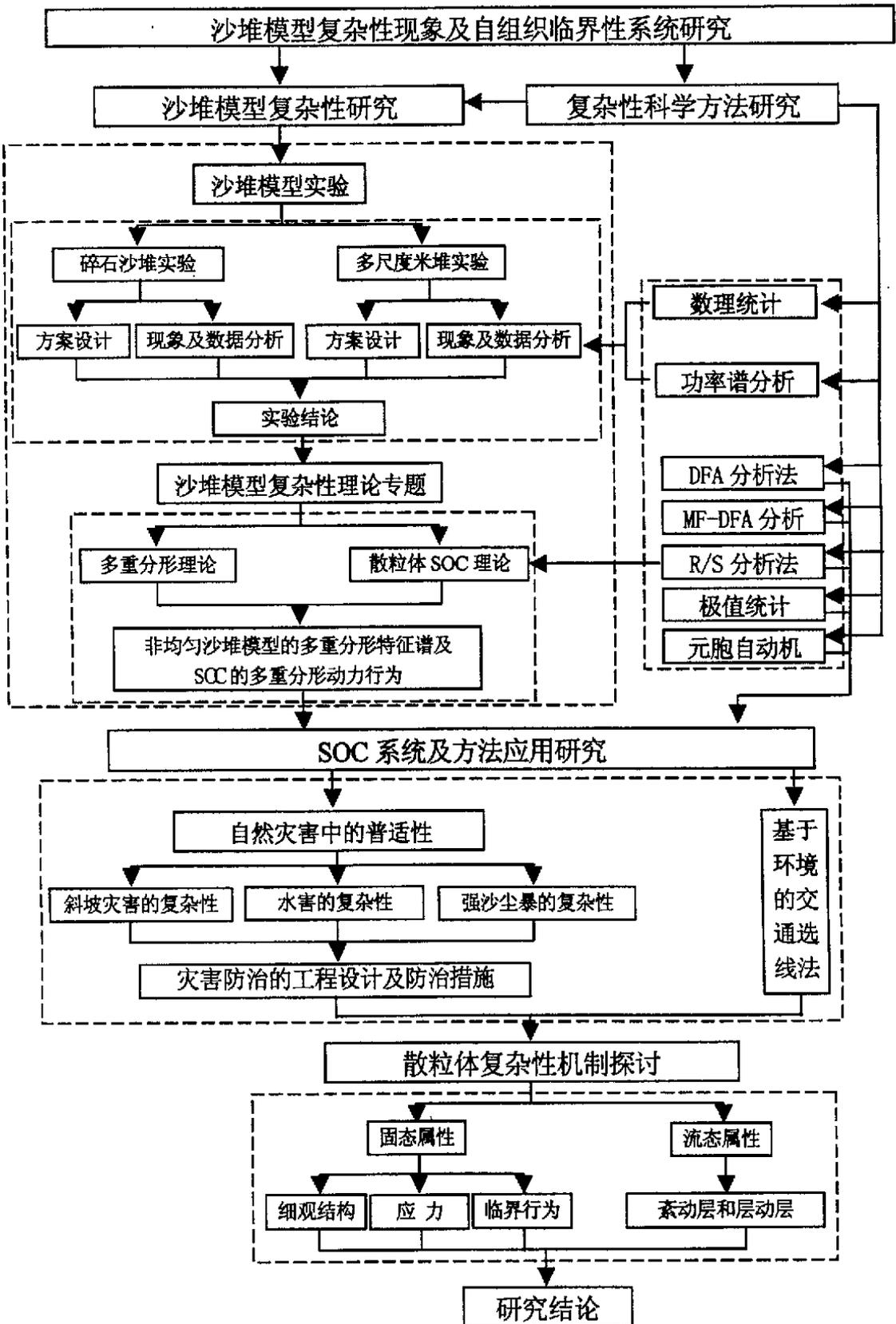


图 1-5 本文技术路线和主要研究内容

第二章 沙堆模型实验及分析

自组织临界性等复杂性理论的研究,不能使用还原论从部分认识整体的方法,也不能用约化自由度的方法进行研究。这样,不得不求助于一些能抓住真实系统基本特征的简单模型。

沙堆等散粒体往往被看作比较典型的简单系统。但是这类系统并非真的那么简单,它会在一定的条件下表现出复杂的动力行为。自组织临界性理论的简单理想化模型就是“沙堆模型”(一般,散粒体模型都统称为“沙堆模型”)。自组织临界性理论对沙堆做出了一个简单的预言:当一粒沙子落在处于临界状态的沙堆上时,它通常引起几粒沙子下落,但偶尔将引发一次大规模的、涉及整个坡面的“雪崩”。

沙堆可以看作一个带有局域相互作用和广延空间自由度的耗散动力系统,沙堆模型主要研究沙堆生长与坍塌过程的动力学行为。通过对沙堆模型的研究可以了解自组织临界性的产生条件及内在原因,从而在一定程度上了解复杂系统的时-空演化及其特征的形成过程。

2.1 散粒体 SOC 物理实验研究的现状

自组织临界性研究中,散粒体的物理实验非常重要。这方面,国内的研究较少,而国外一些学者研究了不同材料和形式的散粒体实验。

1989年,IBM公司沃森研究中心的 Glenn A. Held 及其同事设计了一套精巧的沙堆模型物理实验装置,采用粒径 1~1.25 mm 的均匀沙粒在直径 4 cm 的圆盘上进行实验,观察到了各种规模的崩塌,其规模服从负幂率分布;而采用直径 8 cm 的圆盘进行实验时,发现沙堆只产生大规模的雪崩(落沙量大约 4 g),不呈现自组织临界状态^[148]。

H.M. Jeager 作了缓慢转动半圆筒的均匀沙卸沙实验。沙粒粒径 0.54 mm,空心半圆筒轴长 8 cm,半径 5 cm,但结果未发现负幂率分布^[43]。

Frette 进行了米堆实验,发现颗粒较长的米粒组成的米堆出现自组织临界性,而颗粒较短的米粒组成的米堆没有出现自组织临界性;实验结果表明,自组织临界性并不是完全普适的,相反依赖于能量耗散的详细机制^[149]。

Bretz 进行了旋转装有分子筛球的玻璃树脂盘实验,发现每隔 10-13 分钟发生一次大规模的雪崩,然后又向休止角演化,在相邻的两次大雪崩之间的小雪崩服从幂律分布^[150]。

Evesque 进行了旋转玻璃球筒实验, 发现雪崩的统计特征值 (例如说雪崩的规模和雪崩持续的时间) 是转速、沙粒直径、筒的长度的函数, 没有发现周期性的现象和 $1/f$ 噪声^[28]。

Morales-Gamboa 也进行了旋转玻璃球筒实验, 发现倾角的变化是一个随机的马尔科夫过程^[151]。

Rosendahl 重复了 Held 的实验, 发现较大尺度沙堆情况下, 小规模崩塌虽大量存在, 但被“淹没”在大规模雪崩之中, 认为自组织临界性可能是一个有限规模的效应^[152]。

为何沙堆规模一旦超过某一数量级, 负幂率分布就不存在, 其原因至今未完全获得解释。有观点认为, 真实沙堆自组织临界现象的发生由系统规模 (尺寸) 与系统的组织原则决定^[36]。

总体来看, 在国内外文献中, 有关散粒体颗粒组成对自组织临界性机制影响的报道很少, 大多局限于沙堆模型的数值模拟, 颗粒组成的影响作用更无从表现。因此, 采用实验手段, 直接从沙堆 (同时也是一种松散堆积体边坡形式) 入手, 既丰富了散粒体边坡演化研究的新模式, 也可以对自组织临界性在沙堆模型中的具体表现与产生机制进行深入探讨。

我们曾经做了大尺寸、动水作用扰动下的水槽沙堆模型实验^[153, 154], 水槽宽 30 cm, 人字形沙堆高 15 cm, 装置如图 2-1。当采用非均匀沙石且其非均匀度较大时, 落沙量的负幂率分布可以产生; 而采用均匀沙, 则落沙规模服从正态分布。

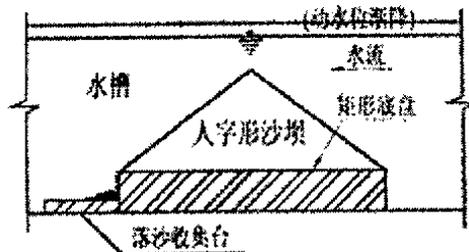


图 2-1 水槽沙堆模型动水扰动实验体系示意

进而, 我们还做了大尺寸的倾斜平面下半无限松散沙堆边坡坍塌水箱实验^[155], 非均匀沙石单面坡宽 35 cm, 高 20 余 cm, 装置如图 2-2。其结果与水槽沙堆模型实验基本一致, 较大尺度的沙堆在非均匀度较大时仍能呈现自组织临界性现象。

从而证实, 水下真实沙堆自组织临界现象的发生确实部分决定于系统的组织原则。

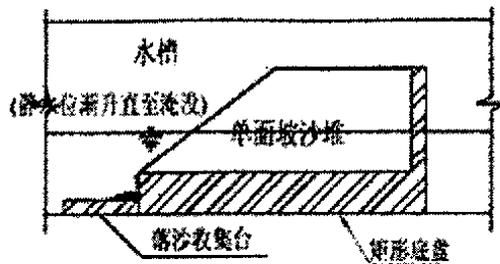


图 2-2 倾斜平面半无限松散沙堆边坡坍塌水箱实验体系示意

在此基础上，课题组以干燥河沙为材料，采用坡顶加沙扰动的形式，对不同沙石颗粒粒径的多组级配组成的沙堆散粒体系统进行研究。在实验中，我们发现均匀度不同时，结果会有很大的差别^[156-161]。颗粒较为均匀，落沙序列为准周期态；颗粒不均匀，且非均匀系数超过一定的值时，落沙规模呈负幂率分布。

准周期分布情况下，微小规模的崩塌很多，大规模雪崩少，但中等规模崩塌却没有，呈现出台阶状，而负幂率分布的规模—频率的双对数呈现负值斜率的直线关系。

以粒径 2.5-5 mm 的沙堆和 $\phi=2.85$ 的干燥河沙沙堆实验为例。

2.5-5 mm 沙堆，每隔几次到十几次发生一次大的雪崩，雪崩规模几百到几千克，大规模的雪崩呈现准周期分布；一次大规模的雪崩之后，沙堆的坡度降低 $2\sim 5^\circ$ ；两次大规模的雪崩之间出现的是小规模雪崩（图 2-3）。将各次雪崩规模按由大到小重新排序后，在双对数坐标图上不是直线（图 2-4），雪崩的规模不服从幂律分布，而是正态分布，没有出现自组织临界性。

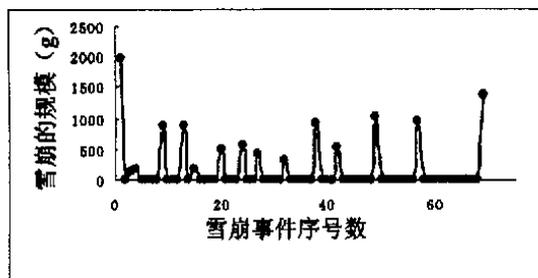


图 2-3 粒径 2.5-5 mm 沙堆的雪崩序列

$\phi=2.85$ 的沙堆在整个实验的过程中，沙堆的坡度没有显著的变化，即使是遍及整个坡面的最大规模雪崩，沙堆的坡度变化也小于 1° （图 2-5）。雪崩规模的双对数坐标图近似于一条直线（图 2-6）。雪崩的规模服从幂律分布： $\lg N=4.94-0.48\lg X$ （在 $\alpha=0.01$ 水平上显著）， X 为雪崩规模（单位 g）， N 为大于某一规模的雪崩出现的次数。

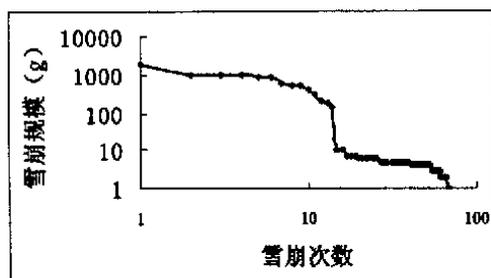
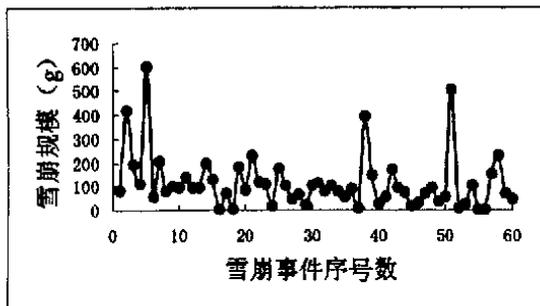
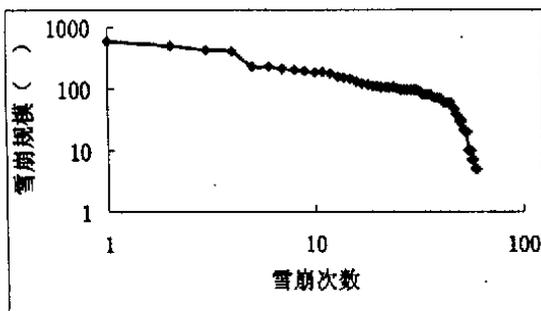


图 2-4 均匀沙堆雪崩规模的双对数曲线

图 2-5 $\phi=2.85$ 的沙堆的雪崩序列图 2-6 $\phi=2.85$ 的沙堆雪崩规模的双对数曲线

实验表明, 2.5—5 的均匀沙堆的落沙时序为准周期, 落沙量呈正态分布, 不具有 SOC 性质; 而非均匀系数为 2.85 的非均匀沙堆的落沙量呈幂律分布, 具有 SOC 性质。即颗粒的非均匀性可以影响其自组织临界性。干燥状态下, 散粒体沙堆的自组织临界性与颗粒级配的非均匀性仍然有关。结合先前的水下沙堆动水扰动和静水扰动实验的结果, 我们得出结论: 散粒体呈现 SOC 是与其组织原则有关。散粒体颗粒级配的非均匀度是其固有属性, 就是其组织原则之一。

2.2 单面坡沙堆实验

沙堆模型反映了一种在自组织作用下的散粒体物质能量耗散普适性过

程。我们的前期工作已表明，沙堆模型系统具有敏感性和鲁棒性^[162]。临界状态下，由于敏感性，小事件能引发任何规模的连锁反应，包括灾难性的大事件。若系统具有的组构特征能对干扰传播形成足够的制约，限制系统各部分敏感性递增的趋势，从而维持系统整体的鲁棒性时，系统能呈现 SOC 现象^[163]。

进一步的工作就是用一系列有控制的实验去证明这一论断；同时，为深入研究散粒体的组构特征和组织原则与系统具有 SOC 的复杂属性之间的关系。我们从散粒体的磨圆性和形状着手，采用不同的材料——人工碎石和小米，研究散粒体的临界演化行为。另外，还进行了对沙堆施以人为影响的多种形式沙堆实验，来探讨系统环境因素的改变是否会影响沙堆的鲁棒性。

2.2.1 碎石沙堆实验设计

实验设备是如图 2-7 所示的一端开口的箕状沙箱。并且前后、左右和上下三个方向均可以调整大小。加沙传送带稍高于箱体，并单独有支架固定，转动时不会扰动箱体。箕状沙箱最大尺寸为 $38 \times 30 \times 70$ (高度 \times 宽度 \times 长度, cm^3)。

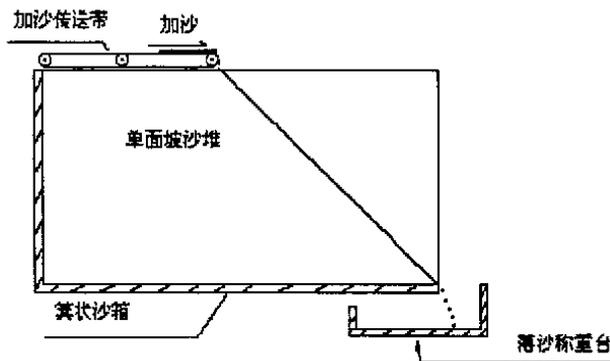


图 2-7 单面坡沙堆实验装置立面图

每组实验步骤如下：

- 1、先在箱内堆成如图 2-7 所示的单面坡沙堆台体，坡面靠沙粒下滑自然形成，使坡脚达到开口端边缘，并且使坡角达到沙堆的天然休止角；
- 2、采用传送带在坡顶处连续加沙，并保证在沙堆宽度范围内缓慢而均匀落下。按指定加沙量加入后，称量从坡脚处落入称重台的沙粒数量，为一次；
- 3、重复步骤 2，连续实验均不少于 60 次。

实验材料为多种粒径的人工碎石。先前采用的干燥河沙基本没有棱角，多近于椭球状，有些偏长些，有些偏扁些，但磨圆度都较高。人工碎石是经过机器加工粉碎大块岩石和卵石而形成的，具有较多的棱角，未经磨圆，

多个破裂面明显。从个体来看，两种材料的形态具有显著的差别。

实验中，我们采用了多种粒径混合而成的两组级配非均匀沙石，和 2.5-5 mm 一组粒径的均匀沙石，级配见表 2-1。

表 2-1 人工碎石单面坡沙堆实验沙石级配表

| 非均匀系数 ϕ | 粒径级 | | | | | | | | | | |
|--------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
| | 0.25 | 0.5 | 1 | 1.25 | 2.5 | 5 | 10 | 15 | 20 | 30 | 40 |
| 1 | 100 | | | | | | | | | | |
| 2.69 | 1.79 | 4.75 | 31.01 | 43.79 | 45.54 | 54.69 | 82.83 | 95.79 | 97.66 | 99.39 | 100 |
| 2.85 | 2.32 | 5.36 | 32.10 | 44.84 | 46.25 | 54.62 | 82.74 | 96.31 | 98.36 | 99.13 | 100 |

表中 ϕ 为沙堆颗粒的非均匀系数， $\phi = \sqrt{d_{75}/d_{25}}$ ，其中 d_{75} 、 d_{25} 分别为双对数级配曲线的纵坐标上等于 75%、25% 时对应的粒径。

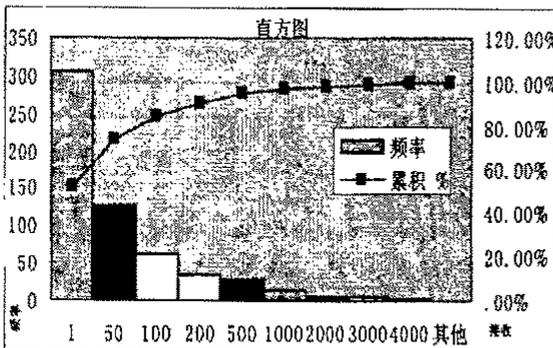
2.2.2 实验现象描述及数据分析

在实验中，我们采用了碎石沙粒材料，采用了与河沙相同的粒径级配，结果见表 2-2。具体分析如下。

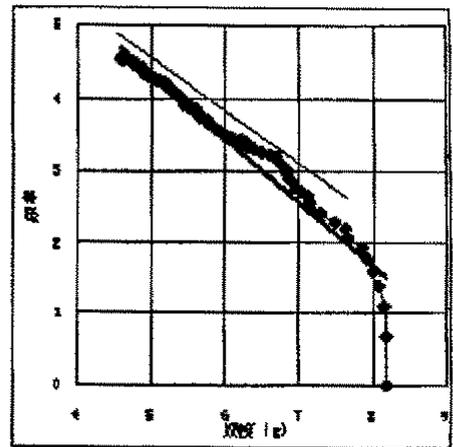
表 2-2 实验结果统计表

| 粒径组 | 加沙量(g) | 样本数 | 雪崩规模的分布类型 |
|---------------|--------|-----|-------------|
| 2.5-5 | 105 | 80 | 大规模雪崩呈准周期分布 |
| $\phi = 2.69$ | 105 | 472 | 负幂律分布 |
| $\phi = 2.85$ | 105 | 584 | 负幂律分布 |

1、统计分析



a、统计直方图



b、落沙频率-规模的双对数坐标图

图 2-8 $\phi = 2.85$ 碎石沙堆实验结果

$\phi = 2.85$ 的非均匀沙实验数据的统计分析如图 2-8。从 a 图可以看出落沙规模的分布情况, 规模小的出现的频率多, 随着规模的增大, 出现的机会也就越来越少。而且小规模所占有的比例要大得多, 从累积百分比来看, 落沙量不大于 100g 的事件发生次数超过了 80%。b 图中粗实线为数据拟合线, 方程为 $y = -0.885x + 8.755$ (相关系数 $R^2 = 0.9423$); 细实线为幂次趋向线, 幂律为 -0.7609。因此, 其落沙规模分布服从负幂率分布。

均匀碎石沙堆实验的结果与干燥河沙的也是基本相同, 落沙时序为准周期, 落沙量呈正态分布, 不具有 SOC 性质。

2、功率谱分析

根据傅立叶变换, 由落沙序列可以求导出扰动引起沙堆质量变化序列的功率谱。谱分析也能够表明均匀沙石组和非均匀沙石组的区别, 见图 2-9。图中, f 为频率, $S(f)$ 是其功率谱。功率谱表明了沙堆的能量变化在频率域中的分布具有低频高能和高频低能的特点。但是, 均匀沙石组的高频区波动较大, 虽有线性趋势但拟合离差较大, 说明其线性关系不明显。而非均匀沙石组在高频区表现出较小的波动性, 线性关系显著, 表明呈负幂律分布。这种自相似分形结构表现出了自组织临界性的特征。

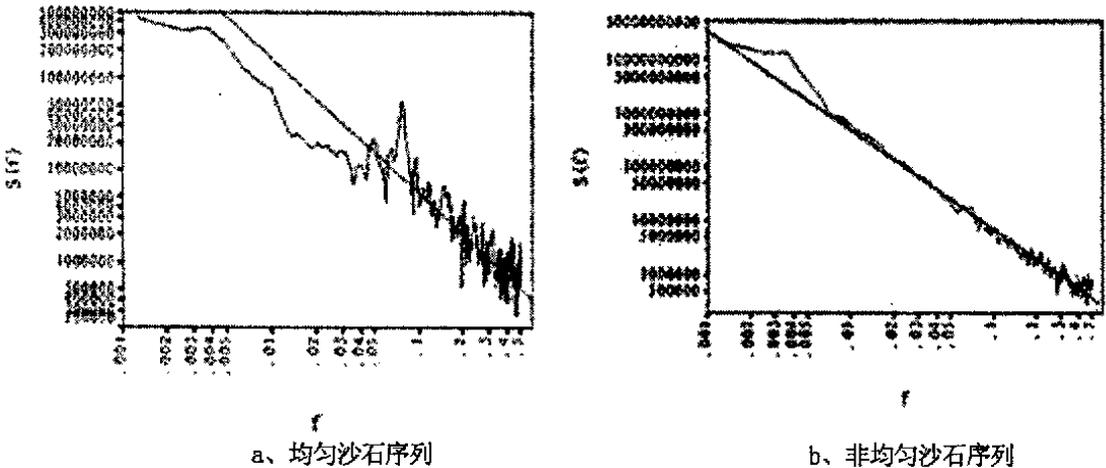


图 2-9 沙堆质量变化的功率谱

3、落沙间隔时间分析

沙堆的复杂性变化不仅体现在落沙规模上, 在时间维上也有所表现, 即沙堆系统随时间变化的规律属性。散粒体的 SOC 具有空间和时间两大类分形结构。我们假设落沙量不小于扰动量 (实验中为 105g) 的实验次序的间隔为静止期 (或郁滞期), 间隔次数即为间隔时间或静止时间。

通过对间隔时间序列的分析发现：颗粒均匀沙坡的“雪崩”，同时也呈现时间上的准周期分布，其落沙间隔时间，即静止期形成的台阶平缓，每级台阶均较长，图 2-10.a 为其局部放大形式。整体明显地反映了物质和能量的累积——释放过程。非均匀沙堆落沙间隔时间台阶都呈现出高度变化，无明显规律，平台长短不一，且静止期的长短服从一种负幂律分布。图 2-10.b 为其局部放大图，表现为具有分形特征的“魔鬼台阶”的形式。

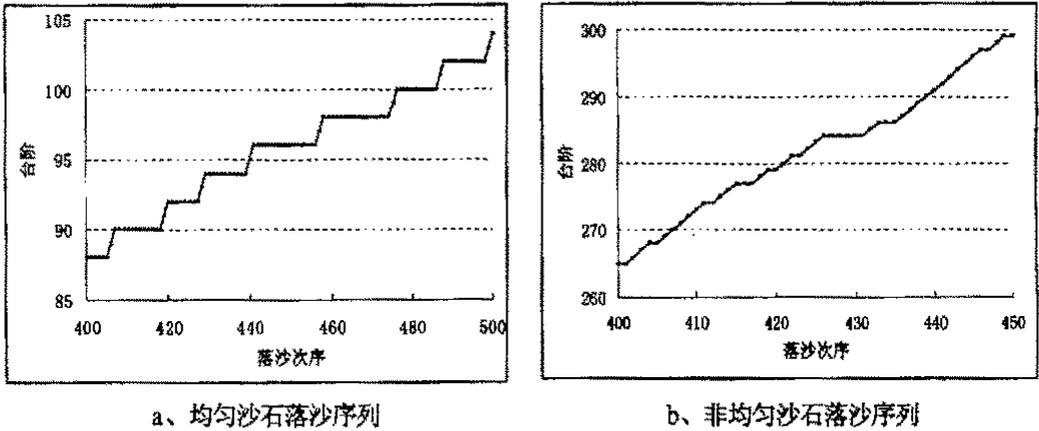


图 2-10 落沙间隔时间台阶局部放大图

所谓“魔鬼台阶”是指在表示阵发(崩塌)活动回返特定位置的累计活动总数对时间 s 的函数图解中，变化的图形呈现“间断平衡”，其间保持长期的相对静止，被间歇性的阵发所间断。静止期的长短具有 $\sim s^{-d}$ 的幂律分布^[164, 165]。阵发的回返时间具有无标度性，其分布服从另一种幂律。

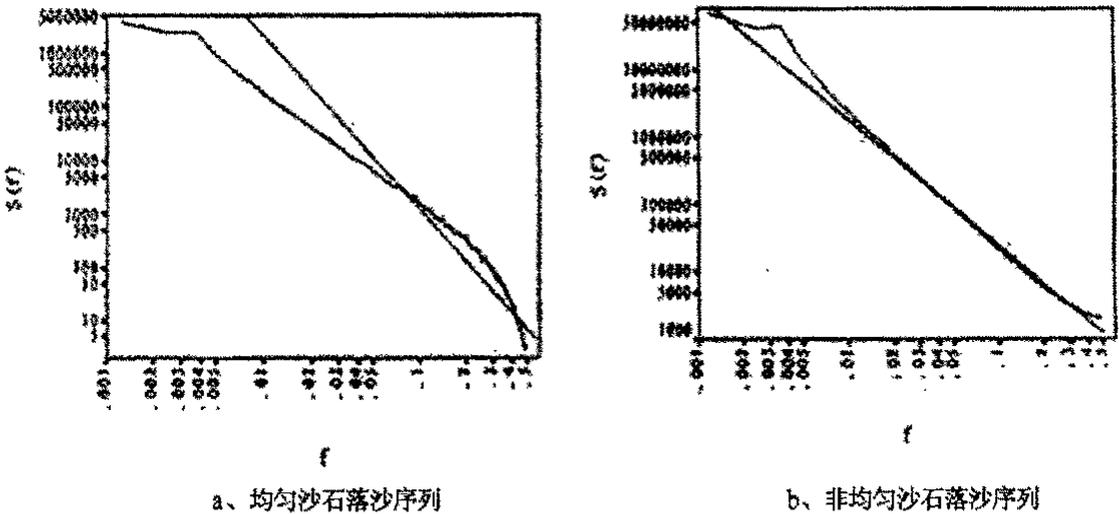


图 2-11 落沙间隔时间的功率谱

图 2-11 是两组实验的落沙间隔时间的功率谱，从图中可以看出，在数据

点密集的高频区, 均匀沙石组是明显的曲线变化趋势, 拟合线偏差较大; 而非均匀沙石组是线性变化, 说明其服从一种负幂律分布, 这是时间标度不变性在系统能量耗散上的表现, 可以体现出闪烁噪声的特征。

闪烁噪声和分形结构分别是自组织临界性的时间和空间“指纹”。非均匀沙石构成的沙堆系统在时空中的这种变化规律正是其自组织临界性的表现。而均匀沙堆呈现准周期变化规律。

总之, 均匀沙石的坍滑落沙序列明显呈准周期, 落沙重量呈现出大小分界现象: 微小规模的坍滑很多, 大规模的“雪崩”(avalanche)少, 然而中等规模的坍滑却基本没有。“雪崩”与微小规模坍滑具有巨大数值差异, 可以非常容易地区分为两类。非均匀沙石序列中各种规模事件均有发生, 大规模事件发生次数少, 小规模事件发生次数多, 各种规模的坍滑混杂而不易归类, 坍滑的无标度自相似分形特征突出, 总体呈负幂律分布。得出与河沙实验相同的结果。

实验表明, 采用棱角多、磨圆度低的人工碎石沙时, 非均匀沙堆系统在时空中变化均呈现的分形结构正是其自组织临界性的表现特征; 均匀沙堆时空变化都表现为物质和能量的累积——释放的准周期过程, 复杂性较小, 不具有自组织临界性。结果与干燥河沙的实验相同。

碎石沙堆实验结果进一步说明: 散粒体是否呈现 SOC 是与作为系统组织原则之一的散粒体颗粒级配的非均匀性有关。即颗粒的大小比例搭配影响 SOC 的呈现。沙石的磨圆度是其细观特征属性即组构特征之一, 它会影响到散粒体运动时, 颗粒之间的作用力, 一般来讲, 棱角多、磨圆度小会使颗粒之间的咬合和摩擦力增大。但这一组构特征并没有增强沙堆的鲁棒性, 对系统整体呈现 SOC 与否没有影响。

2.2.3 坡面处理和落沙收集方式的影响

在前述的实验中, 研究的都是散粒体系统内部的因素对 SOC 的影响, 包括组构特征和组织原则等。为进一步探查影响散粒体呈现 SOC 的其它因素, 我们尝试对单面坡沙堆施以人为影响的多种形式实验, 看是否会改变沙堆的临界属性, 并探讨系统环境因素的改变对沙堆的影响, 分析沙堆的鲁棒性。

1、坡面处理

坡面处理的办法是针对前述的单面坡沙堆模型, 在落沙实验前, 用宽 1 cm 的刚性铁条作为桩子, 垂直插入坡面约 10 cm。分别采用五、七、九三种不

同数量的布桩方式,如图 2-12 所示,各桩均等间距布置。实验采用非连续加沙,即每次加沙落沙后,都要将沙堆抄掉,重新堆建沙堆形成临界坡面,其它操作方法同前。

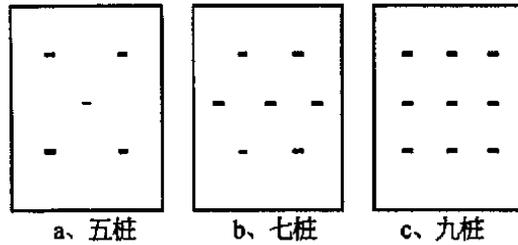


图 2-12 坡面布桩阵图

在堆建沙堆到临界态时,会发现,与没有加桩的沙堆模型相比,坡面的平均临界角度明显大一些。加桩使系统临界角变大,即原来未加桩时的临界坡位置,在加桩后,变为了亚临界或是更稳定的位置。

实验过程中,每次加沙后,沿坡向下运动过程中,如果遇到桩子的阻挡,多数沙粒会停下来,只有少数颗粒可能由于惯性较大而改变方向,绕过桩子继续下落。因此,如果没有发生大规模的崩塌,就会发现,坡面上,每个桩子周围堆积的沙粒较多,形成较凸出的颗粒团;如果产生了大规模的崩塌,特别是全局性的雪崩,静止之后的坡面上明显呈现出左右相邻桩子间的凹槽,以及以每个桩子为中心的凸起。可见,桩子对坡面松散的沙粒能起到一定的稳定作用,但只限于邻近的沙粒。

而实验结果表明,坡面布桩并没有改变前述未加桩沙堆实验时的规律,即均匀沙堆只产生大规模落沙,没有表现出自组织临界性;而非均匀系数 $\phi = 2.85$ 沙堆产生了符合幂律分布的各种规模的落沙,呈现出自组织临界性。但是,这种设桩处理改变了落沙的量值,而且不同数量的布桩的影响程度是不同的。以粒径 2.5~5 均匀沙堆实验为例,其分析结果如表 2-3 所示,与未加桩的实验相比,坡面设桩既减小大规模落沙出现的几率,又减小了其规模的大小。但是值得注意的是,根据实验结果,并不是布设的桩子越多,效果越好,而是与桩子的阵式(或者密度)有关。实验中布设了七根桩的阵式(如图 2-13 中 b 图)的抗滑防落效果最好。

每一加桩在其周围一定范围内起到阻止沙石下滑,稳定局部坡面的作用。合理地阵式(或密度)布桩就会对整个坡面起到稳定作用。从另一个角度来看,布桩一定程度地加强了坡面表层与内层的联系,使坡体的临界坡角变大,原未布桩的临界坡面变成了亚临界、甚至更稳定的坡面。但是,加桩不会改变沙堆系统整体的规律性。

表 2-3 粒径 2.5~5 散粒体坡面设置防护实验结果资料

| 实验增设 落沙统计量 | 无 | 5 桩 | 7 桩 | 9 桩 | 坡脚平台 |
|----------------|----------|----------|-------|-------|----------|
| 最大值 (克) | 2620 | 2075 | 1585 | 1960 | 1848 |
| 平均值 (克) | 2491.143 | 1950.625 | 1430 | 1820 | 1666.143 |
| 大规模落沙的概率 (%) | 53.85 | 33.33 | 16 | 25 | 36.84 |
| 大规模落沙占总量比例 (%) | 99.96 | 99.83 | 99.15 | 99.66 | 99.35 |

2、落沙收集方式的改变

本实验是在原实验体系中，在坡脚处增设一足够长的水平平台，使落沙离开坡面后不直接落入称重台，而停留在平台上。待坡面上塌滑的沙粒完全静止、坡体已经暂时稳定后，用直尺将平台上落沙缓慢拨下，落入称重台。此时，会影响到坡面上的一些沙粒和沙粒团失稳而坍塌下落，可能还会造成连锁反应，其结果是又有一部分落沙停留在平台上。我们重复前面的步骤，直到再无沙石从坡面滑到平台上为止。而后称重，完成一次实验。

每次当加沙扰动引起较大规模的坡面沙石坍塌时，先落下的沙石大部分停留在坡角处延长的平台上。一方面，使系统的坡脚向前延伸，减小了坡面的平均角度；另一方面，延长平台上的落沙起到了“重力式挡墙”的作用，阻止后滑下沙石的进一步下落，如图 2-13。当“挡墙”被清除后，“墙”后沙石才会继续下滑，又一部分沙石脱离原坡体。但是，由于多次形成“挡墙”的间断稳定作用，相对原实验，减小了下滑沙石的速度和惯性，一定程度地阻止了坡面的“链式反应”，而在“链式反应”过程中插入了多个稳定阶段，连续的一个过程被分为是多段组合的。

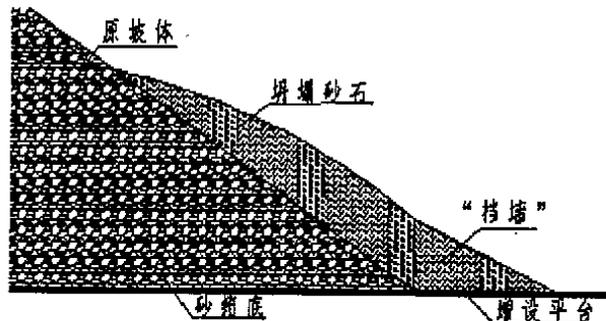


图 2-13 增设平台后的“挡墙”效果

结果表明，同加桩实验相似，坡脚增设平台也没有改变原实验的规律，即均匀沙堆没有表现出 SOC，非均匀系数 $\phi=2.85$ 的沙堆仍呈现出 SOC，只

是相对减少了大规模落沙的量值,见表 2-3 中有无增设平台两栏的结果比较。链式反应的截断使沙堆系统自身也有了更多时间调整坡面微观结构以减小扰动的影响。因此,增设平台后,大规模落沙的统计量值相对减小了。但这种链式反应的截断不能决定系统呈现 SOC 与否。

两组实验说明,通过一定的方式可以减缓或阻断落沙过程中的“连锁反应”,可以影响落沙规模的大小,改变沙堆一些性态,但不会改变其整体的鲁棒性和敏感性。这些外部施加的、一定程度改变其系统环境的因素影响与沙堆是否呈现 SOC 无关。SOC 的属性在某种程度上是系统固有的,只会受到一些来自系统内部的、诸如组构特征和组织原则的影响。从某种角度来看,这也是 SOC 系统具有鲁棒性特征的表现。

2.2.4 多尺度米堆实验

米堆是一种特殊材质和形状的散粒体构成的“沙堆”。相对沙粒来看,米粒有较大的长短轴比例。这种具有方向性的形状作为组构特征或许会影响某些规律属性;同时,在实验中可能会呈现出沙堆不易察觉的现象。国外已有一些学者通过米堆实验来研究散粒体 SOC。如 Frette 做过距离较近的两玻璃板间的米堆实验^[149],实验装置如图 2-14。Frette 发现米粒长短轴比为 3.8 的米堆呈现出自组织临界性。



图 2-14 Frette 米堆实验装置

对米堆进行实验研究也可以从另一角度分析沙堆演化的性质,有助于分析 SOC 呈现的机制。因此,我们进行了多尺度的米堆实验。

2.2.4.1 多尺度米堆实验设计

我们的实验是采用长轴为 7.2 mm,短轴最大截面为 2.8 mm× 2 mm 的大米为原料。米粒长短轴比约为 3。

实验装置和方法与前述沙堆实验相同。

实验分组主要按米堆模型的坡体尺寸大小和每次用于扰动的加米量(每克米约 46 粒), 具体见表 2-4; 表中尺寸为坡体的高度×宽度; 单面坡坡面的大小如表 2-5。

表 2-4 实验分组

| 组次 | 尺寸(高×宽) | 加米量 | 实验次数 | 组次 | 尺寸(高×宽) | 加米量 | 实验次数 |
|-----|------------|------|------|------|-------------|-----|------|
| I | 3cm×12cm | 50 粒 | 134 | VI | 10 cm×24 cm | 10g | 85 |
| II | 5 cm×12 cm | 2.5g | 74 | VII | 15 cm×24 cm | 10g | 86 |
| III | 5 cm×12 cm | 5g | 70 | VIII | 15 cm×24 cm | 20g | 70 |
| IV | 5 cm×24 cm | 5g | 65 | IX | 30 cm×38 cm | 50g | 65 |
| V | 5 cm×24 cm | 10g | 180 | X | 30 cm×38 cm | 80g | 184 |

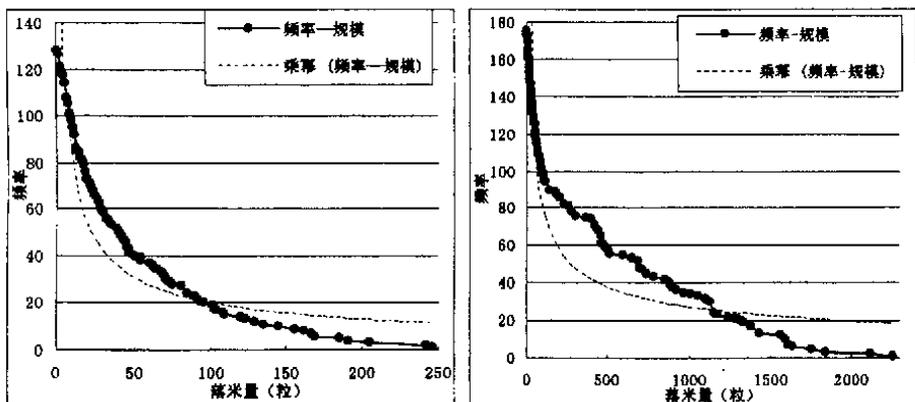
表 2-5 坡面尺寸

| 组次 | 长×宽 | 组次 | 长×宽 | 组次 | 长×宽 | 组次 | 长×宽 | 组次 | 长×宽 |
|----|--------|-----|--------|----|--------|------|---------|----|-------|
| I | 5.7×12 | III | 9.5×12 | V | 9.5×24 | VII | 28.5×24 | IX | 57×38 |
| II | 9.5×12 | IV | 9.5×24 | VI | 19×24 | VIII | 28.5×24 | X | 57×38 |

2.2.4.2 实验数据和现象分析

1. 高度变化的影响

在坡体高度为 3cm 和 5cm 的 I—V 组实验中, 大中小规模的崩塌均有发生, 图 2-15 和图 2-16 的 a、b 示出其中两种。



a、第 I 组

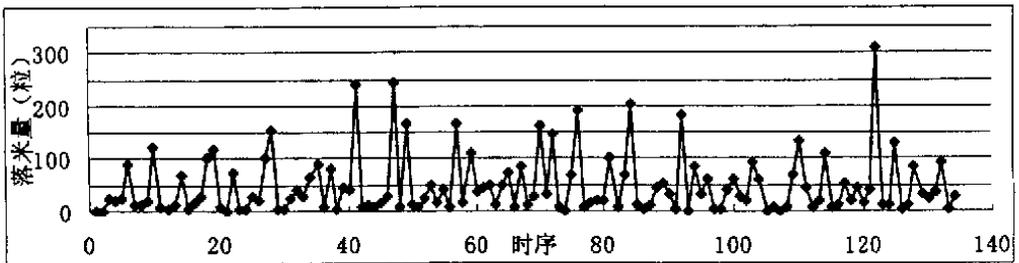
按幂律拟合 $y = 336.2x^{-0.6113}$,
相关系数为 $r^2 = 0.7437$

b、第 V 组

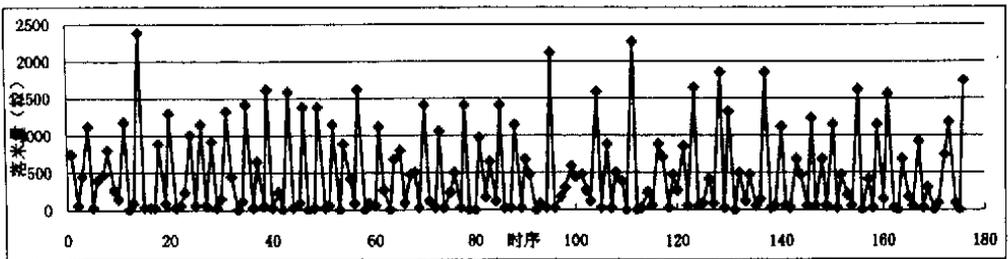
按幂律拟合 $y = 684.07x^{-0.4662}$,
相关系数为 $r^2 = 0.7016$

图 2-15 单面坡米堆频率—规模统计图

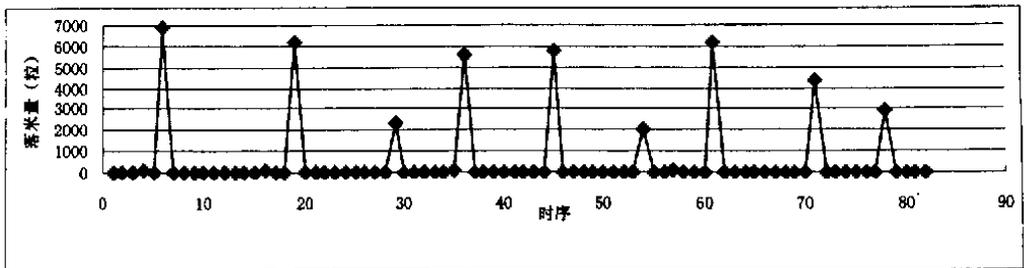
实验过程中观察到每次作为扰动的米粒由传送带均匀缓慢地落到米堆单面坡坡顶处时，有部分米粒停留在坡顶处，另一部分向下滑动，可能滑到某一稳定位置时停止，也可能碰到处于极不稳定状态的单个米粒或米粒群而一起继续下滑。这一过程在所有活动米粒都停止或者滑出坡脚时才结束。总之，扰动的米粒可能不会引起任何规模的雪崩，也可能引起不同规模的雪崩，甚至出现遍及整个坡面的大雪崩。在出现雪崩的事件中，小规模的多，随着规模的增大，其发生的次数递减。其现象与 SOC 状态的沙堆相符，经统计得出其服从幂率分布，如图 2-15。



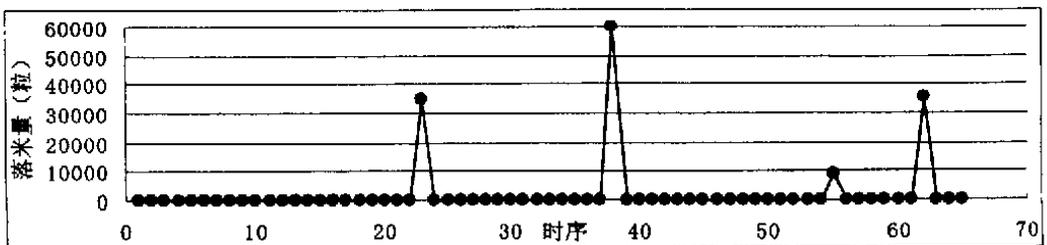
a、第 I 组



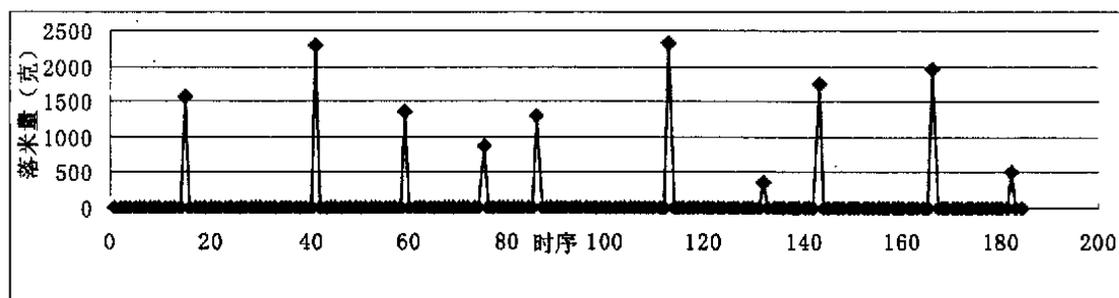
b、第 V 组



c、第 VI 组



d、第 IX 组



e、第X组

图 2-16 多尺度米堆模型落米规模序列图

在坡体高度大于等于 10cm 的 VI—X 组实验数据中，明显缺少中等规模的崩塌，多数是无滑出坡脚的滑移或小规模的崩塌，大规模的呈准周期期间断发生，如图 2-16c、d、e。观察也发现，特别是第 IX 和 X 组（坡体高度为 30 cm），下滑的米粒多数情况都能停留到某一稳定位置，直到发生一次全局性的大规模崩塌滑出坡脚。局部性的崩塌很少发生。

由各种实验数据显示，随着米堆坡体高度（或坡面长度）的增大，中等规模的崩塌逐渐减小，小规模崩塌也相对减小，而代替的是无任何规模崩塌发生次数的逐渐增加。

实验中，模型高度从 3 cm 到 30 cm，I—V 的所有 3 cm 和 5 cm 高的模型均表现出 SOC 特征，而 VI—X 的 10 cm、15 cm 和 30 cm 高的模型都不具有 SOC 特征，而是表现为准周期的规律。实验结果表明均匀颗粒的散粒体单面坡的落沙规律与 held 等人的圆盘锥体均匀沙堆实验的结果相似，即真实的均匀散粒体模型的 SOC 实验表现出规模（或尺寸）效应。

2. 坡体宽度变化的影响

宽度变化的影响主要表现在，对于坡面长宽比小于 0.5 的 I、IV、V 组中出现崩塌在横向上左、中、右交替出现，但无严格次序和界限。可见，相对宽度小的模型，米粒间的纵向关联性没有什么变化，但横向的米粒间的关联性相对纵向的较差，但是仍能产生全局性的崩塌。

III 和 V 两组实验的唯一区别是模型坡面宽度不同，分别为 12 cm 和 24 cm。实验时考虑宽度相差一倍，每次扰动的加米量也相应加大一倍，以保证单位宽度内的加米量相同。两组实验都表明米堆模型具有 SOC，这说明相对散粒体颗粒来讲，较大的尺度范围内，模型的坡面宽度大小基本不影响 SOC 的呈现与否。

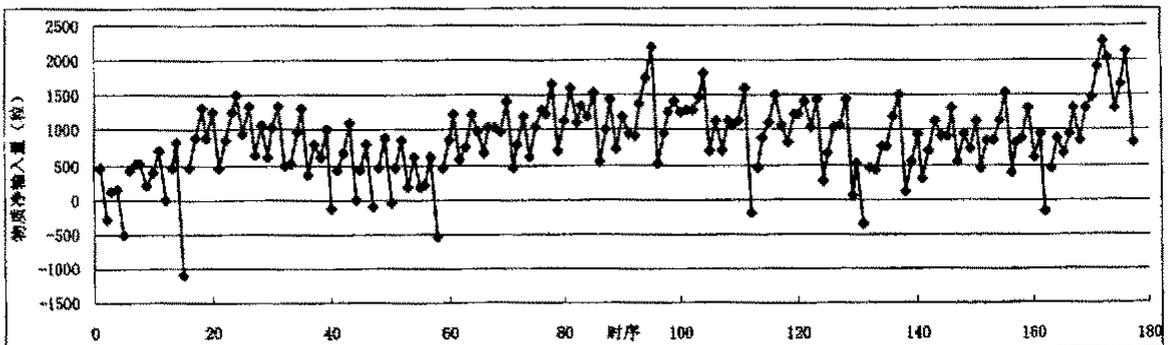
单面坡沙堆系统规模的大小受到横向（坡宽）和纵向（坡长）两个尺寸

决定。在组元颗粒大小、级配和数量都完全相同时，所谓的规模（或尺寸）效应主要是指纵向的影响。纵向尺寸大的时候，由于上部下落沙粒的可能加速行程变长、动能增大，沙粒在下落的过程中以逐步放大的干扰作用于所经过的局域，由于惯性作用，大规模的雪崩不可避免。在实验中观察到，纵向尺寸大的米堆同均匀沙一样，坡面较为平整，坡面达到失稳临界角时，各区域基本上均已达到失稳临界状态，体系没有抗扰耗能储备。这样在沙粒加速下滑的放大的扰动下，坡面所有区域均超过稳定极限。此时系统的鲁棒性消失或减弱，敏感性占优势，因此不具备 SOC。相应的当沙堆纵向尺寸较小的时候，粒子滑动的可能行程短，这种加速效应不明显，系统呈现 SOC 现象。因此，“规模效应”主要是颗粒行程长短所决定的重量惯性力影响的结果。

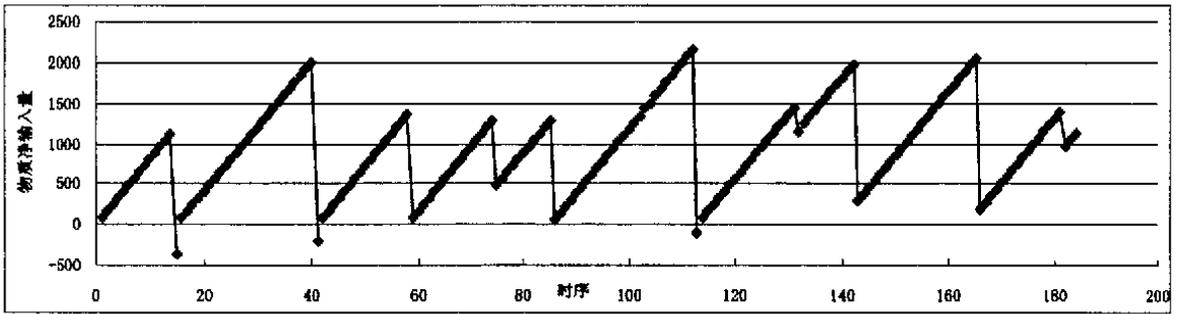
3. 坡面系统的质量变化

实验中，对处于临界状态下的米堆坡面，采取在固定位置（坡顶）连续加米的方式，每组中作为扰动的米量相对米堆系统来讲都是微小的，但每次仍都会使系统的总物质质量发生变化，将其相对前一次的变化量称为系统的物质净增量；把相对实验初始状态的变化量称为系统的物质累积净增量。我们按时序对每组数据以系统的物质累积净增量为负（即相对初始系统，物质变化量减小）作为分段点（分段点之后的第一个数据按相对初始系统计算，而不是累积的），考察系统物质净输入输出规律。

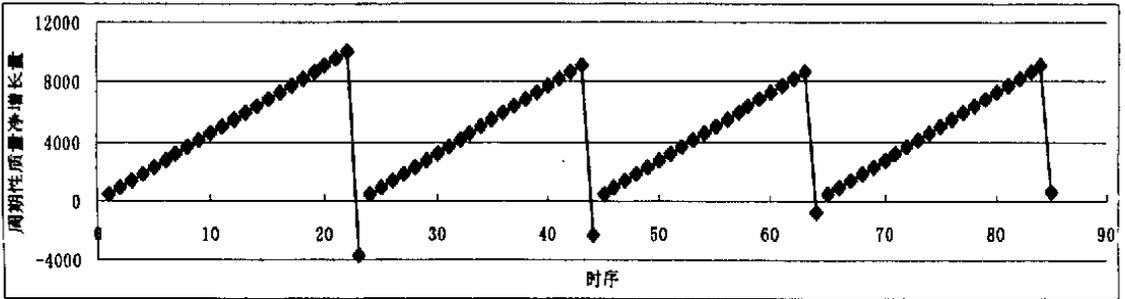
如图 2-17 所示，坡面系统在每当有物质净输出之前，坡高为 3 cm 和 5 cm 的 I—V 组中物质累积净增量变化无规律性，时增时减；而坡高大于 5 cm 的后 5 组相对有很强的准周期性规律，并且图中线性变化区段明显变长，表明大尺度模型中物质累积量按线性比例增长。由此可见，随着米堆系统尺度的增大，系统动力表现出以线性行为为主的准周期变化，也说明系统的复杂性相对降低。



a、第V组



b、第VII组

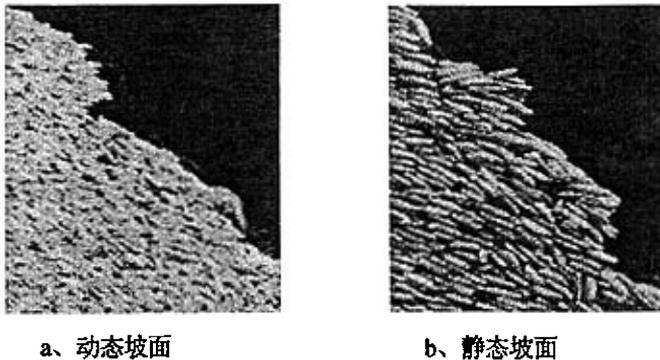


c、第X组

图 2-17 质量累积净增量周期变化图

4. 米堆坡面现象

米堆坡面完全是由众多米粒向下滑动或停止在某位置而自然形成。各组实验中，初始坡面都是凹凸不平的。每次从加米到坡面完全静止，无论是否有米从坡脚下落，都是坡面局部或全局性重整过程，经重整之后的坡面仍保持着整体上的凹凸不平，但相对该次加米之前，总有局部甚至是全局的变化。实验过程中的坡面形态如图 2-18。



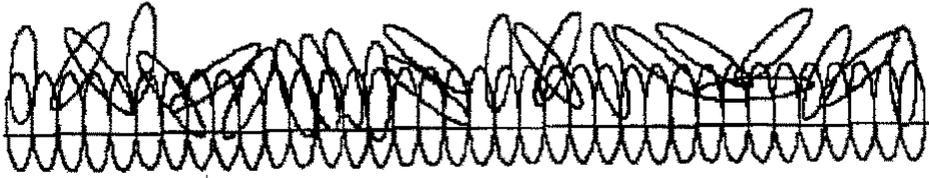
a、动态坡面

b、静态坡面

图 2-18 米堆实验过程中的局部坡面形态

实验过程中，I—V组模型坡面上各米粒长轴的指向杂乱无章，无规律

性,而且有个别处形成由几个米粒构架成约 10 mm 大小且有一定稳定性的空洞。而 VI—X 组米堆坡面上,米粒长轴指向多数是顺着坡道方向,而且随着坡高的增大,这种指向的同向性越加显著。特别是在坡高 30 cm 的 IX 和 X 组米堆坡脚处,各米粒纵向并列排开,长轴指向坡外,靠坡上米粒部分压住,半悬于箱体底边缘处,如图 2-19 所示,非常有序。只有当大规模崩塌后,可能造成个别米粒被带出坡面后而未能有滑下米粒补位,造成有些位置空缺,但在紧接着几次落米后会重新形成。坡脚米粒阵列半悬是大尺度米堆自组织的结果,为增大系统承载力,增强抗扰力,系统具有增大自身规模的“意识”。



图中直线表示箱体底边缘,上侧为坡面

图 2-19 大尺度米堆坡脚阵列俯视效果示意图

可见,随着米堆尺度增大,系统内米粒间的组织结构发生变化,有序性增强,致使整体上崩塌规律也发生变化。因此,从某种意义上讲,规模效应对自组织临界性的影响,也是由于系统结构特征的变化造成的。

2.2.4.3 米堆机制探讨

由实验观察和数据分析可知,多尺度米堆单面坡模型的坡面崩塌的各种形式和规模发生的概率在各种尺度下是不同的,出现了两大类崩塌规律,即准周期分布和幂率分布。

米堆模型中,作为组元的各个米粒的特性:形状、大小、光滑度和承载力等都是相同的,即每个组元在整体里的表现是相同的。但小尺度米堆系统的整体组织力度较大尺度的要小。在整体组织力度较弱的情况下,其组元的特性突显出来,则表现为总体上组分的各向异性(如米粒长轴指向杂乱无章),不受系统整体的役使,存在区域间不均衡,致使系统无序性强,复杂度高。随着系统尺度增大,相对组元的特性表现,系统的组织力度增大,并达到能够役使各个组元按整体的需要协同工作时,被役使的组元就表现出同向性(如米粒长轴指向相同),系统内的有序性增大,复杂度降低。微观的有序性产生宏观的力量^[166]。宏观力量增大可使系统承载定量扰动的累积。当累积的扰动超过其承载力时,才会产生大规模的崩塌。因此,大尺度实验中,中小规

模的崩塌都减少, 而不产生崩塌的次数增多。

不同尺度下, 由于组元的特性表现与整体组织力的竞争, 致使米堆系统内部的组织结构不同, 系统承载力和抗扰力有很大差异而导致不同的坡面临界现象。可见, 大量散粒体个体组织起来, 形成一个动态的、易变的、自适应的系统。该系统的演化主要依照其组元间的相互作用产生的复杂内部结构进行的^[167], 即由组构特征和组织原则决定。仅仅是尺度大小不同的复杂系统, 其组元间的相互作用及形成的结构是不同的。大尺度的散粒体系统不是小尺度系统简单的“放大”版本, 它们的结构不仅定量不同, 而且定性不同, 因此是不同类型的系统。也就是说, 所谓的规模效应, 其实质是系统的固有属性特征发生了变化, 尺寸的大与小只是给人最直观的表面现象。

如果系统尺度增大的同时, 将其组分的特征及个性表现力也改变, 则可能会表现出与小系统相同的行为, 即可以看作是同一类型的系统。我们的沙堆实验中, 非均匀系数较大的大尺度沙堆也能呈现 SOC 就是实验的证明。

米堆半无限体单面坡临界态模型是一复杂系统, 但随着模型尺度的变化, 其复杂程度是有所区别的。依据对实验数据和现象的分析, 小尺度的米堆临界状态的复杂度高于大尺度的。任意尺度的米堆均具有动静(类似固液)两相的临界状态。但由于不同尺度下, 系统采取不同的组织形式, 形成系统临界结构的差异而表现出不同的现象。

相互作用导致有序和组织, 热运动引起无序和混乱。这两种矛盾的倾向在平衡态物理系统发生相变时, 其临界现象表现为一种倾向盖过另一种倾向时发生突变^[168]。作为非平衡的开放系统, 实验中各尺度的米堆系统的表现与之有较大差异, 其米粒的运动和各米粒间的相互作用交融在一起, 更为复杂。相对来讲, 小尺度米堆的复杂度较高, 其临界态下的崩塌机制也更复杂。

总之, 实验表明, 长短轴比为 3 的米粒组成的单面坡体在小尺度下崩塌规模成幂律分布, 呈现 SOC; 大尺度下出现崩塌规模的中断和形式的简单化, 即“级联式雪崩”, 呈现准周期状态。相对均匀沙来看, 长短轴比为 3 的形状影响并不大。但是, 具有明显的长短轴差别的可以清楚地表明组构特征的不同是“规模效应”的实质; 系统组构特征及个性表现力的不同, 也可以使系统表现出不同的临界行为。

2.3 小结

我们先前就研究了沙堆模型临界演化行为的复杂性, 发现主要有两种类型, 一种表现为自组织临界性; 另一类表现为序列的准周期行为和规模的正

态分布。并得出结论,非均匀性作为一种组织原则影响着沙堆模型呈现 SOC。在此基础上,为探讨其它因素变化是否影响散粒体呈现 SOC,我们通过多种形式的大尺度单面坡沙堆实验和多尺度的米堆实验研究,经分析得出如下结论:

1、在大尺度下,颗粒均匀的沙堆和米堆表现为序列的准周期行为和规模的正态分布。非均匀沙堆呈现出 SOC 特征。表明散粒体 SOC 与颗粒的非均匀性有关。

2、采用人工碎石材料的沙堆表现的规律属性与河沙材料的基本一致,即非均匀沙堆呈现 SOC,而均匀沙堆表现为准周期行为。说明散粒体颗粒的磨圆度的改变,没能影响系统的鲁棒性;磨圆度虽然是散粒体的组构特征之一,但对散粒体 SOC 的影响不显著。

3、坡面插桩和增设坡脚平台等人为改变沙堆系统环境的办法对沙堆有一定的影响,但不能改变沙堆原来的规律属性。说明沙堆的临界复杂性与其系统内在的组构特征相关,是由系统的固有属性决定的。换句话说,这种规律属性是系统自身固有的,不易受环境改变,具有鲁棒性。

4、多尺度米堆实验证实了散粒体 SOC 的呈现与否具有“规模效应”。实验表明这种“规模效应”受系统宽度影响不大,而与颗粒被加速的行程距离(与坡长相关)所决定的重量惯性力的大小有关。所谓“规模效应”的实质是系统组构特征发生了变化。

综上所述,实验表明散粒体 SOC 与颗粒的非均匀性有关;系统尺度大小只是相对组元的结构特征而言的,散粒体系统呈现 SOC 或是其它某种临界属性,主要与那些整体性的组构特征及系统的组织原则有关,而颗粒个体的特征属性影响不显著。这是系统固有的复杂属性,也不易受外界因素影响,具有鲁棒性。

第三章 沙堆模型复杂性理论专题研究

真正的、客观的复杂性应具备自身特有的规定性。研究不同的复杂系统的内在规定性，就会有不同的复杂性理论方法。复杂性理论必须提供关于复杂性的定义，并找到一套工具来分析该定义。据劳埃德 (S.Lloyd) 统计，西方学者已提出 45 种复杂性定义^[169]，如香农信息、玻尔兹曼熵、分形、自组织临界性、算法复杂性、随机复杂性、复杂适应性、混沌边缘等等。

自组织临界性不是复杂性的全部，但它或许打开了通向复杂性的一扇大门^[170]。一个关于复杂性的理论可以被视为关于模型研究的理论^[171]。自组织临界性就是关于沙堆模型研究的复杂性理论。

本章结合沙堆模型实验，主要探讨散粒体的自组织临界性理论及其主要特征——时空长程相关性。进一步，将分形理论的一个分枝——多重分形理论引入散粒体自组织临界性的研究。

3.1 沙堆模型自组织临界性

动力学研究指出，系统的动力学行为受外部参量的控制，当外部控制参量逐步增大并超过临界阈值时，系统将相继经历不动点（非平衡动态）、极限环（周期性振荡）而达到混沌这样一系列由简单到复杂的吸引子过程。在周期区与混沌区之间存在一个极窄的区，由于从有序向混沌的转换与相变类似，因此此区域正位于有序与混沌之间的转变点（或临界点）上。为此，Langton 称该转变点为“混沌的发生”（Onset of Chaos）^[172]，Packard 和 Kauffman 称之为“混沌的边缘”（Edge of Chaos）^[173-176]，而 Per Bak 则称之为“弱混沌”（Weak Chaos）并认为它是自组织临界性所致。远离平衡的延展耗散动力系统自我调谐、自发地通过自组织过程演化而最终均衡且归宿于混沌的边缘，并涌现出自组织临界性。此时，系统具有最大的复杂性、最大的演化性和最大的创新性。

3.1.1 自组织临界性理论

自组织临界性是解释无序的、非线性复杂系统的行为特征的新概念。自组织临界性理论指出，自然界中很多开放、远离平衡、相互作用的巨大耗散动力学系统，这类系统包含着众多的发生短程相互作用的组元，通过自组织过程，

自发地向着一种临界状态进化且能维持在临界状态。在临界状态下小事件引起的连锁反应能对系统中大量数目的组元发生影响，从而导致大规模事件的发生。虽然这类系统发生的小事件比大事件多，但是遍及所有规模的连锁反应是动态特性的一个必不可少的部分。

自组织临界性具有敏感性、鲁棒性和时空长程相关性，并且在空间上和时间内展示幂律的标度行为。所有的时空关联函数都是幂次（Power-law）的，幂律可以作为自组织临界性的证据。

自然界和人类活动中的许多动力学过程具有三大特点：

- (1)过程的不可逆性（演化和历史）及其多重时间标度；
- (2)动力学行为的自相似性和分形性（即标度不变性）；
- (3)以不同规模的阵发、崩塌方式进行的间歇性。

研究表明，各种动力学行为和现象的分形性来源于自组织过程，并通过崩塌动力学，驱动开放、远离平衡、时空延展的巨大耗散系统，使之自发地向临界态演化。临界态是嵌入在 d 维空间加一维时间中的 D 维(分数维)分形动力学吸引子。它由崩塌动力学与瞬态弛豫结合而成。临界态的长程时空关联与时空分形结构是分形动力学吸引子中的截断。因此，演化过程是自组织临界过程，而自组织临界性的实质则是崩塌动力学的分形动力学吸引子。

自组织临界性具有鲁棒性（稳健性）。在二维或三维空间中时空延展的高自由度下，巨大相互作用系统不必设定特殊的初始条件、不须重新设置和微调，就会通过自组织而演化到临界状态。这种临界态无论对于外部控制参量的改变或者随机性的存在都是稳健的。在非均匀沙堆实验中，沙堆达到临界状态后，微扰下，即使发生全局性大规模雪崩，也不会严重偏离临界态，坡角不会有大的改变；当采用坡面加桩和延长坡脚平台等办法改变了沙堆的系统环境因素后，沙堆仍呈现自组织临界性。这些都是系统自身的鲁棒性所致。

幂律是自组织临界性的证据。空间上的幂律分布具有标度不变性，形成空间分形结构。它是自组织临界性的空间指纹。空间上的幂律分布和标度不变性直接导致时间上的幂律分布和标度不变性。时间上的标度行为表现为 $1/f$ 噪声。它是生存时间的幂律分布，形成时间分形结构。它是自组织临界性的时间指纹。生存时间的幂律分布导致功率频谱的幂律分布，二者是等价的。功率频谱的幂律分布是时间标度不变性在系统能量耗散上的表现。它同样形成时间分形结构。

理解自组织临界性概念时，有两个关键方面要考虑：首先，这种临界性根本不同于平衡态统计力学中所指的平衡相变的临界性。平衡系统的相变是通过

调节系统的某个参数而达到的, 比如系统温度。然而自组织临界性的产生不需要调节系统的任何参数, 它是通过系统内部的组元之间的复杂的相互作用而产生的, 不依赖于任何参数, 纯粹是系统自身的一种动力学。因而这种临界性被称为自组织的, 不是依靠外部因素来干扰或驱使系统演化到临界状态。其次, 临界性体现了由短程的局域相互作用导致系统组元间的一种长程的时空关联, 这种关联的最终结果体现为雪崩事件的“标度无关性”, 由幂次规律所表征。

沙堆模型是典型开放的、动力学的、远离平衡态的、由众多单元组成的一个带有局域相互作用和广延空间自由度的耗散动力系统。我们的实验已经证明, 具有自组织临界性的沙堆模型系统通过自组织过程演化到一个临界态, 处于临界态的一个微小的局域扰动可能会通过类似“多米诺效应”的机制被放大, 系统中会出现各种大小的雪崩, 甚至其效应可能会扩展到整个系统, 形成一个大的雪崩。并且, 雪崩的大小, 包括时间尺度和空间尺度, 均服从幂率分布。沙堆模型的生长与坡面坍塌过程的动力学行为, 是自组织临界性的范例。

3.1.2 沙堆模型的时空长程相关性

系统演化到临界点附近, 不同空间点上的微小涨落突然扩大而导致空间上的关联, 其平均长度称为“关联长度”(Correlation Length)。同样, 在临界点附近, 不同时间上的微小涨落也突然扩大而导致时间上的“关联时间”。逼近临界点时, 时间上和空间上的关联时间和关联长度突然发生一定程度的发散从而出现“长程时空关联”(Long Range Spatial-Temporal Correlation), 也称长程相关性^[77]。正是临界点附近这种关联时间和关联长度的发散使复杂系统发生自组织而呈现有序的时空结构。换句话说, 系统的长程相关性应包括空间结构分布的长程相关和随时间演变过程的长程相关两层含义。

3.1.2.1 沙堆模型空间长程相关性

我们在实验中观察到, 作为散粒体, 不论是均匀沙还是非均匀沙构成临界状态下的沙堆, 向其上加入一粒沙子, 这粒沙子可能会引起任何规模的崩塌, 包括“灾难性”的事件——遍及整个坡面的雪崩。在崩塌开始时, 由于沙堆表面存在某种不稳定性, 一粒沙子沿斜坡下滑。只有当这粒沙子滑到一个稳定的位置上时, 它才能停住, 否则就继续下滑。如果这粒沙子碰到那些极为不稳定状态的沙粒, 就会使这些沙粒下滑。随着这一过程的继续, 每一个运动着的沙粒都可能停止或继续下滑, 并可能带动其它的沙粒下滑。当所有的活动沙粒已经停住或者落在沙堆之外时, 这一过程才停止。此过程的物

质运输就表现在所有产生过位移的沙粒或运动或静止的状态变换过程中。沙粒起动就会使其原位置处的局域结构破缺；其运动过程中，还可能与接触的粒子作用而改变行经区域的结构；当其静止下来时，又使所在区域增加了组元而变换结构。每个产生位移的沙粒都有这样的过程，造成被扰动区域结构的不断变化。因此，运输的过程也是沙堆系统组织结构不断改变的过程。整个过程表明了沙堆临界坡面系统的空间结构的长程相关性。均匀沙与非均匀沙系统，都具有组元之间是一种最近邻位置的相互作用、存在着由链式反应体现的空间结构的长程相关性。但实验中发现均匀沙不能维持在临界状态，而出现到达临界坡后即发生大规模崩塌而严重偏离临界态的行为。

3.1.2.2 沙堆模型时间长程相关性

从对事件的预测角度来讲，系统时间演变过程的长程相关性具有更重要的意义。为分析沙堆系统随时间演变过程的长程相关性，我们采用了 R/S 分析(the rescaled range analysis, 重标极差分析法)^[178-180]。该法最初是由水文专家赫斯特 (H.E.Hurst) 在 1951 年提出来的，并由分形理论的创始人 B.M. Mandelbrot (1960, 1971) 进一步发展。R/S 分析是侦测长程相关性方面的有力工具。在 R/S 分析中，对于一个特定的时间序列，Hurst 指数(H)能刻画序列长期的非时间依赖性，并能用来估计序列的这种依赖性将平均持续多长时间。对于一个由 n 个观测值构成的时间序列 $\{X_i\}$ ，R/S 分析将首先估计对于整数 k ($k \leq n$) 的极差 $R(n)$ 与序列标准差 $s(n)$ ：

$$R(n) = \text{Max}_{1 \leq k \leq n} \sum_{j=1}^k (X_j - \bar{X}) - \text{Min}_{1 \leq k \leq n} \sum_{j=1}^k (X_j - \bar{X})$$

$$s(n) = \left[\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (X_j - \bar{X})^2 \right]^{1/2}$$

于是可以计算统计量：
$$\tilde{Q}_n = \frac{R(n)}{s(n)}$$

当 n 无限增大时，存在如下关系：

$$\tilde{Q}_n = a n^H \text{ 或者 } \ln(R(n)/s(n)) = \ln(a) + H \ln(n)$$

其中 a 是常数， H 即 Hurst 指数。根据统计学知识， H 总是大于 0，其取值存在以下四种情况：当 $0 < H < 0.5$ 时，原序列过程存在反持久性，具有负相关性；当 $0.5 < H < 1$ 时，意味着原序列存在持久性，即具有长程相关性；当 $H = 0.5$ 时，该过程为白噪声，即过去与将来不存在相关性，时间序列为完全独立过程；当 $H = 1$ 时，该过程具有无限方差，是非平稳的。

利用该方法对两组实验的时间序列进行计算可以得到其 $\ln(R/s)_n \sim \ln(n)$ 关

系, 如图 3-1 所示。

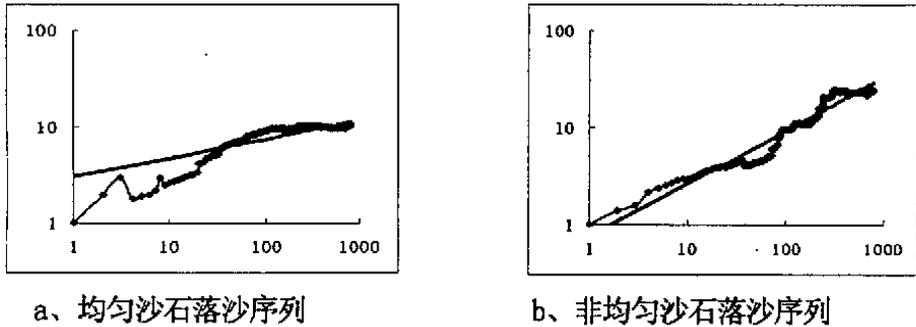


图 3-1 落沙 $\ln(R/s)_n - \ln(n)$ 关系图

对图 3-1 中的数据通过最小二乘法拟合, 回归计算可分别得出其 Hurst 指数如表 3-1 所示。

从表上可以看出, 均匀沙石组 $0 < H < 0.5$, 非均匀沙石组 $0.5 < H < 1$, 也就是说均匀沙石组的时间序列具有负相关性, 而呈现出 SOC 的非均匀沙石组的时间序列具有正相关性。并且可得出非均匀沙石组的时间轨迹分形维数 $D = 2 - H$ 为 1.353。

表 3-1 Hurst 指数的最小二乘法回归计算结果

| | 均匀沙石 | 非均匀沙石 |
|--------------|-------|-------|
| Hurst 指数 H | 0.197 | 0.647 |
| 回归系数 a | 3.021 | 0.756 |
| 相关系数 r | 0.831 | 0.906 |

总之, 均匀沙堆和非均匀沙堆在临界态下都具有长程相关性, 但均匀沙堆随时间的演变过程表现为较强的负相关性, 即过去的减少趋势使未来可能出现增加趋势。这正是时间序列周期变化的规律所致。呈现 SOC 的非均匀沙堆在临界态下的时空分布均表现出正的长程相关性, 即序列具有长期记忆性, 如果过去有一个增加, 那么在平均意义上, 将来也将有一个增加。从非均匀沙堆模型实验中也发现, 一次大规模落沙之后, 可能还有更大规模的落沙。统计出的样本最大值只是有限次数中的, 如果继续实验, 就会出现更大的极值。

正的长程相关性表明作用在所有标度上的机理是一样的, 是自组织临界性的突出特点。

这种正的长程相关性在自然界中大量存在。国内外许多学者发现地震、降雨、树木年轮、温度变化、洪水泻流、泥浆沉降、小麦价格等等现象都具

有这一特征。尽管大的事件以一定的概率出现,但这并不意味着这个现象是周期性的。长时间没有发生地震这个事实并不意味着将有地震发生;一次大地震之后也可能还会有更大的地震暴发^[181]。在灾害预测中,这种长程相关性是很有价值的。

3.2 多重分形理论

作为复杂性理论的一个重要分支,分形是具有自相似特征的结构,其根本特征是无标度性。分形可分为两大类:一类是具有无限尺度范围下的严格几何自相似性的单分形;另一类是多重分形。单分形可以简单地用一个分数维作为描述分形特征的数量指标;而多重分形的结构却要用一系列的分数维所组成的分形谱来描述,它所讨论的主要是某个参量的几率分布,可以用来进一步了解在分形体形成过程中局域条件的作用。

实际上,多重分形是许多个单一分形在空间的相互缠结、镶嵌,是单一分形的推广,主要运用于定义在几何体上(包括分形几何体)具有自相似或统计自相似性的某种度量或者场^[182, 183]。自然界中的分形大多是具有统计自相似性的集合,其特点是具有统计意义上的自相似而非严格的几何自相似,且无标度律仅在一定的尺度范围内有效。

多重分形被用来表示仅用一个取决于整体的特征标度指数(即分形维数)所不能完全描述的奇异几率分布的形式,或者说用一个谱函数来描述分形体不同层次的特征,从系统的局部出发来研究其最终的整体特征^[184]。具体方法如下:

多重分形描述的是分形结构中不同层次和特征。把所研究的对象分为 N 个小区域,设第 i 个小区域线度大小为 ε ,为了定量描述其不均匀性,定义第 i 区域的质量分布函数 P_i 为:

$$P_i(\varepsilon) = \varepsilon^\alpha \quad i=1, 2, 3, \dots, N;$$

指数 α 是表征分形体内各个小区间的奇异程度的局部分维;若线度 ε 的大小趋于零,则上式可写成

$$\alpha = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln P}{\ln \varepsilon}$$

ε 也就是小区间相对整体的大小。 α 的数值必然与所在的位置有关。多重分形用 α 表示分形体小区间的分维,由于小区域数目很大,可得一个由不同 α 所组成的无穷序列构成的谱,并用 $f(\alpha)$ 表示。如果在分形体中具有相同 α 值的小区间数为 N_α 个,那么我们把 N_α 写成为:

$$N_\alpha(\varepsilon) = \varepsilon^{-f(\alpha)}$$

指数 $f(\alpha)$ 被称为奇异指数谱, 表示具有相同 α 值的子集的分形维数。 $f(\alpha)$ 和 α 是描述多重分形的一套参量。

为确定 $f(\alpha) \sim \alpha$ 关系, 我们可以从信息论的角度选择另一套描述多重分形的参量。并引入统计物理中的配分函数 $\chi_q(\varepsilon)$, 对概率 $P(\varepsilon)$ 用 q 次方求和:

$$\chi_q(\varepsilon) \equiv \sum P(\varepsilon)^q = \varepsilon^{\tau(q)}$$

如果上式后面的等式成立, 即配分函数和 ε 有幂函数关系, 则可以从 $\ln \chi_q \sim \ln \varepsilon$ 曲线的斜率得到:

$$\tau(q) = \frac{\ln \chi_q(\varepsilon)}{\ln \varepsilon}$$

$\tau(q)$ 被称为质量指数。

如果 $q \gg 1$ 时, 在 $\sum P_i^q$ 的求和中大概率子集将起主要作用; $q \ll -1$ 时, $\sum P_i^q$ 求和中小概率子集将起到主要作用。所以通过加权处理, 可以对一个分形集内部的结构进行精细研究。

由 $\tau(q)$ 可以推出 α 和 $f(\alpha)$, 二者都是与 $\tau(q)$ 和 q 有关的参量:

$$\alpha = \frac{d\tau(q)}{dq}; \quad f(\alpha) = \alpha q - \tau(q);$$

另外, 还得出广义分维数 (q 次信息维) D_q :

$$D_q = \frac{\tau(q)}{q-1} = \frac{\ln \chi_q(\varepsilon)}{(q-1) \ln \varepsilon} = \frac{1}{q-1} [q\alpha - f(\alpha)]$$

它随不同的 q 值而有不同意义的分形维数。

当 $q=0$ 时, $D_0 = -\tau(0) = D$, 是普通的豪斯道夫维数;

当 $q=1$ 时, D_1 是信息维数; 由于 $D_1 = 0/0$, 先进行数学变换, 再利用洛必达法则得到确定的结果:

$$D_1 = \frac{\sum p_i \ln p_i}{\ln \varepsilon}$$

依据这些公式就可求得 $f(\alpha)$ 、 D_q 等系列图谱, 以便于更直接分析。

多重分形的应用是十分广泛的, 它不仅能刻划诸如紊流、布朗运动、扩散限定聚集等奇异性物理过程, 而且还能用来研究和解释许多统计分布的疑难问题和其它复杂性问题。近年来, 许多学者对多重分形进行了深入的研究, 取得了显著的成效。

在自组织临界性研究领域, 国外的 Leo P. Kadannoff 等人分析自组织临界过程的雪崩分布时, 用单分形和多重分形方法进行了比较分析^[185]; Victor. B. Sapozhnikov 和 Ignacio Rodriguez-iturbe 等人在探讨地貌和水系的演化是否为

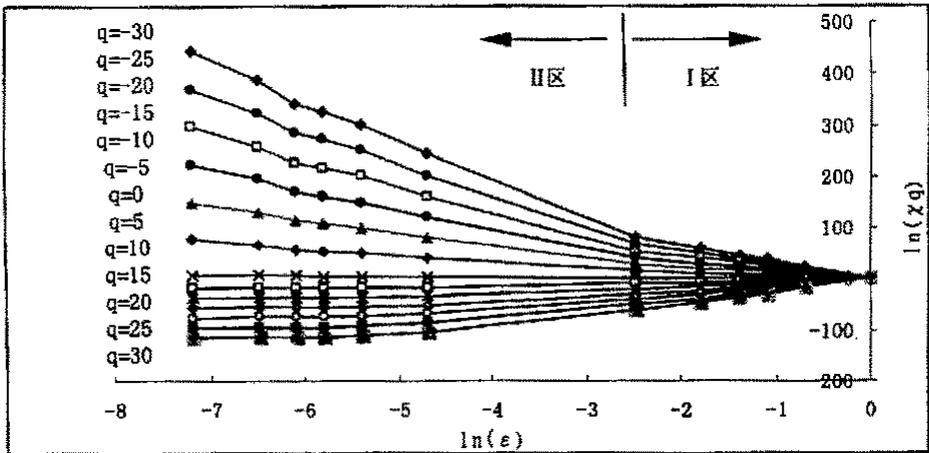
自组织临界过程时，也都采用多重分形方法分析^[186,187]。我们将这一方法更系统地用于沙堆模型自组织临界行为的研究。

3.3 非均匀沙堆模型的多重分形谱

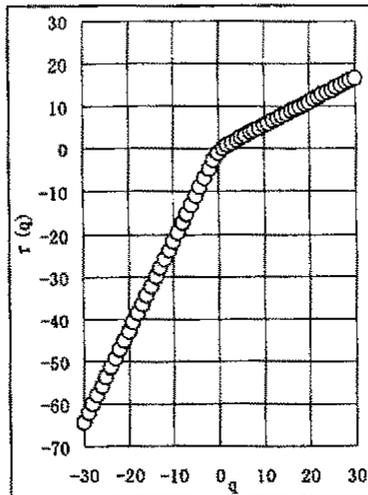
负幂律分布表明临界坡面落沙的统计分形结构，只用这样一个取决于整体的特征标度指数——分形维数不能完全描述奇异几率分布的形式，因此有必要采用多重分形来描述分形体不同层次的特征，从系统的局部出发研究其最终的整体特征。

3.3.1 落沙规模序列的多重分形谱

采用前述多重分形谱分析方法，我们计算了实验落沙规模序列，为便于分析，绘得相关系列图谱，如图 3-2。



a. $\chi_q(\epsilon) \sim \epsilon$ 双对数坐标图



b. $\tau(q) \sim q$ 曲线

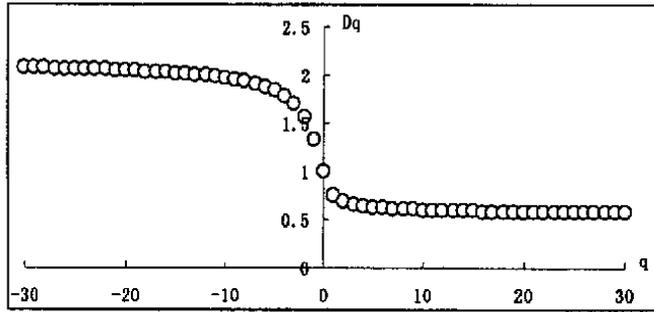
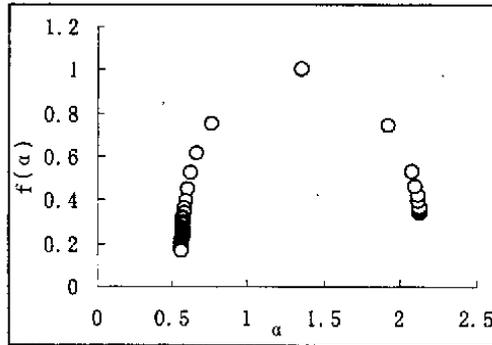
c. $D_q \sim q$ 关系图d. $f(\alpha) \sim \alpha$ 关系图

图 3-2 落沙规模序列的多重分形系列谱图

图 3-2-a 是配分函数 $\chi_q(\varepsilon)$ 与 ε 的双对数坐标图, q 值取 $[-30, 30]$ 区间整数。该图主要可以判断序列是否具有多重分形。

理论上每一 q 值所对应的 $\ln \chi_q \sim \ln \varepsilon$ 都为一直线, 说明在所有 ε 范围内都满足标度不变性。而实际事物的多重分形多具有一定的范围。图中 $q \geq -1$ 时, $\ln \chi_q \sim \ln \varepsilon$ 基本上保持直线; 而 $q < -1$ 时的曲线可分为两段, ε 大的区域 (I 区) 斜率绝对值小, ε 小的区域 (II 区) 斜率绝对值大。即 I 区满足标度不变性, 也就是说非均匀沙堆落沙序列在一定范围内具有多重分形。II 区斜率绝对值增大, 是由于小规模次数过多但大规模落沙量占优, 致使 $P(\varepsilon)$ 随 ε 下降而较慢地减小造成。而小规模事件的多发是 SOC 现象的表征之一, 这也是 $\ln \chi_q \sim \ln \varepsilon$ 图中的体现。另外, $\ln \chi_q \sim \ln \varepsilon$ 的线性关系也表明了序列中存在有多层次的长程关联, 即落沙时空结构的长程相关性。

图 3-2-b 是由图 3-2-a 中各 q 值对应的 $\ln \chi_q \sim \ln \varepsilon$ 回归拟合的直线 (相关系数均大于 0.90) 斜率、即质量指数 $\tau(q)$ 和 q 的关系曲线。实际上, 图中 $q \in [-30, 0]$ 和 $q \in [2, 30]$ 两区段的点完全落在斜率为 2.127 和 0.5657 的两条直线上, 即

满足 $q \ll 1$ 和 $q \gg 1$ 时, $dt(q)/dq$ 是定值。在 $q=1$ 处出现不连续性, 是一突变点, 这是落沙序列的多重分形一级相变点。多重分形相变特征在其它图示中都有反映。

图 3-2-c 是广义分形维数 D_q 的图谱。 D_q 也称 q 次信息维数, 可以用来描述奇异吸引子的几何和几率特征。从图中可见, 整体来看 q 越大 D_q 越小, 在 $q \gg 1$ 时其变率非常小, 说明非均匀沙堆 SOC 的临界吸引子的变化空间圆滑扭曲得不太剧烈。 $q \ll 1$ 时, D_q 反应的是分布中发生概率小的大规模落沙区域的性质, 其分形维数较大, 而且还有增大的趋势, 说明不连续性较大; $q \gg 1$ 时, D_q 反应的是分布中发生概率大的小规模落沙区域的性质, 其分形维数较小, 而且已经稳定, 说明连续性好。图中的形式正好是沙堆模型 SOC 的表象, 即小规模落沙频率高, 大规模落沙的次数少。另外, 还可以从图中直接得出容量维数 $D_0=1$; 信息维数 $D_1=0.7526$; 关联维数 $D_2=0.6917$ 等值。

图 3-2-d 是多重分形奇异谱 $f(\alpha) \sim \alpha$ 。奇异谱一般是一凸曲线, 有钟罩型和钩型。本图是一向右的钩型图, 其宽度为 $\Delta\alpha = \alpha_{max} - \alpha_{min} = 1.573$, 它可以定量地表征落沙序列起伏程度的大小。一般来讲, 谱越窄, 其起伏越小, 即落沙量大小规模的差值越小, 则如图较宽的谱表明大小落沙量相差较大。 $f(\alpha_{min})=0.162$, $f(\alpha_{max})=0.341$, 两者之差为 $\Delta f = -0.179$, 为负值, 表明频繁发生的小规模落沙占主要地位, 即发生的概率大。该序列的 $f_{max}(\alpha)=1$ 对应其容量维数; $f(\alpha)=\alpha=0.7526$ 对应其信息维数。

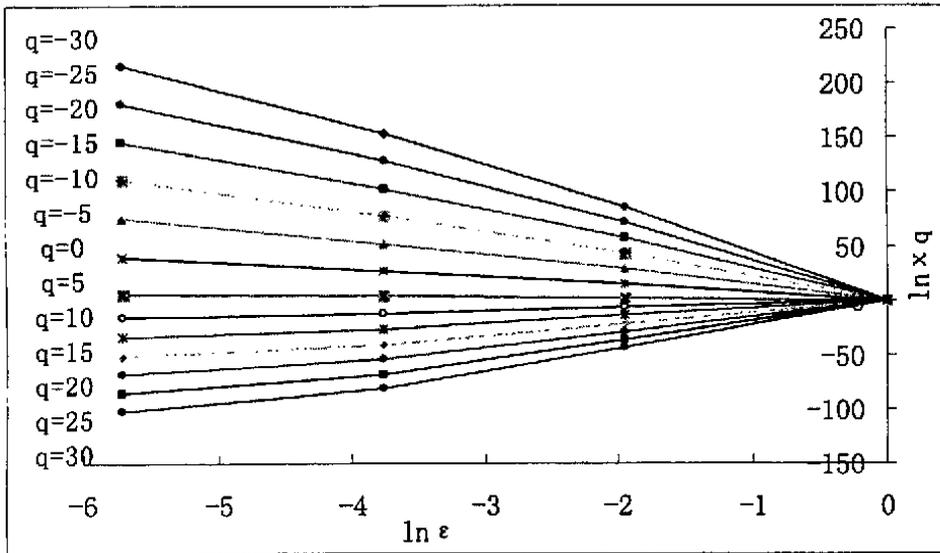
3.3.2 落沙间隔时间序列的多重分形谱

事件发生间隔时间与事件的持续时间一样, 都是能体现其规律属性的重要指标。非均匀沙堆模型实验中, 落沙间隔时间序列也是很有必要分析的资料。多数情况下, 一次大规模落沙距之前的大规模往往会有长时间的间隔; 如果是连续的几次大规模落沙, 其距之前的大规模会有更长的间隔时间。据实验分析, 非均匀沙堆落沙间隔时间也是幂率分布, 体现了时间分布的分形结构。

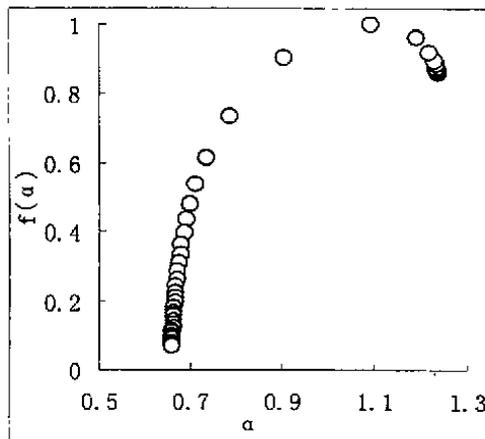
通过采用前述多重分形谱分析方法计算得出, 落沙间隔时间序列的 $\chi_q(\varepsilon)$ 与 ε 的双对数坐标图具有较好的线性关系, 如图 3-3-a, 表明其在较大范围内都具有标度不变性, 即其多重分形的层次较多。同时表明落沙时间序列也具有长程相关性。其质量指数 $\tau(q)$ 图和广义分形维数 D_q 图 (略) 都与落沙规模序列的图形相似, 只是具体数值的差异。多重分形谱 $f(\alpha)$ 同样是向右的钩型图 (图 3-3-b), 但其 $\Delta\alpha=0.576$ 较小, 而 $\Delta f=-0.791$ 的绝对值较大。这

说明落沙间隔时间的长短变化幅度相对落沙规模的较小，同时间间隔的短时间占主要地位，而且优势较大。这就保证了其谱图形式的稳定性，而非落沙规模序列的那样易变。

总体来看，间隔时间序列的一系列图谱与规模序列的基本形式一致。奇异谱 $f(\alpha)$ 的差异性也不违背沙堆具有的 SOC 属性规律。落沙间隔时间序列也具有多重分形特征。



a. $\chi_q(\varepsilon) \sim \varepsilon$ 双对数坐标图



b. $f(\alpha) \sim \alpha$ 关系图

图 3-3 落沙间隔时间序列的多重分形谱图

实验中呈现了 SOC 的沙堆系统的多重分形谱图表明了系统在时间上是阵发的，每次的规模大小不同，间隔时间也不等，并且都具有多层次的无标

度性。

3.3.3 沙堆系统的多重分形动力分析

在临界态，沙堆遵从开放系统的整体动力学规则。位于沙堆中的一粒沙就代表了单位势能，而势能的大小通过沙粒离台面的高度来测量。当沙粒倒塌时，势能就转化成了动能。当倒塌的沙粒逐渐静止下来时，这个动能的一部分就耗散掉了，也就是转化为了热能，而另一部分可能转换成可储存在组织结构中的内能或传递给了其它沙粒。因此整个系统中就存在能量流动。流动的能量沿着坡面的下坡方向在系统组元之间多层次地传递。

依据这一过程原理，我们可以建立坡面沙粒间作用和能量流动的简化模型：假设临界坡面上沙粒均匀且规则分布，每一粒沙周围相邻有 8 粒沙；而且一粒沙只可能以某种概率作用并将能量传递给位于其下坡方向上且与之相邻的三粒沙。假设能量传递的概率为 $(0.2, 0.6, 0.2)$ ，即传递给位于其正下方沙粒的概率为 0.6，而传递给左下方和右下方的为等概率 0.2；忽略边界条件和其它复杂约束。

这样，简化的临界沙堆坡面上沙粒相互作用和能量传递的模型，实际上就是一多重分形动力模型。模型相当于一质量分布不均匀的康托儿三分集^[188]，如图 3-4。经计算，得出该模型的多重分形谱 $f(\alpha)$ ，如图 3-5 所示，也是向右的钩型，与真实沙堆实验分析的结果是同一类型的奇异谱。由此可见，其多层次的无标度分形结构一定程度地体现出处于自组织临界状态的沙堆系统的动力行为。

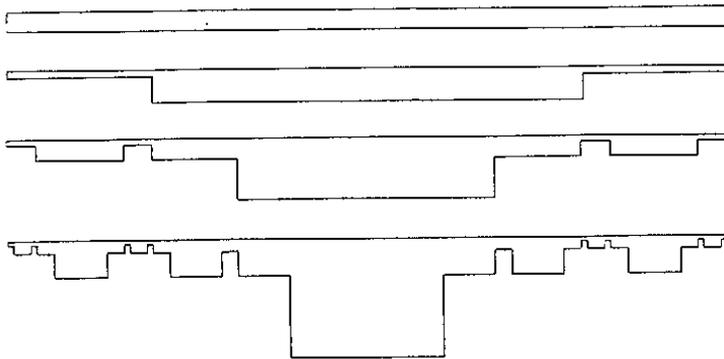


图 3-4. 不均匀的三分集演化图

郝柏林院士曾指出，重复使用简单的规则，是形成极为复杂的行为和图形的原因之一^[189]，这样基本的规则也是研究复杂性的一些有效的途径。这一

动力模型就是最基本、最简单的多重分形动力学概化, 虽然没有完全反映出真实散粒体的临界行为, 但已表现出自组织临界状态下散粒体的一些性质。

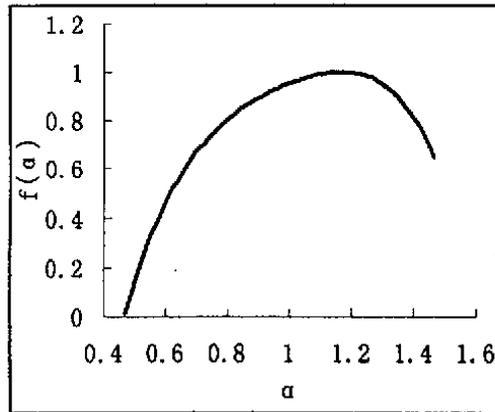


图 3-5 多重分形动力模型的 $f(\alpha) \sim \alpha$ 曲线图

3.3.4 多重分形分析的意义

依据沙堆模型多重分形图谱的特征含义和非均匀沙堆 SOC 的规律属性, 可以确定, 呈现 SOC 的沙堆实验的落沙规模序列和落沙间隔时间序列的多重分形奇异指数谱均是向右的钩形图。可以说, 这种向右的钩形图是沙堆模型 SOC 的多重分形特征。沙堆模型 SOC 的广义分形维数图谱也都具有相同趋势, 即 $q \gg 1$ 时, 曲线变率非常小趋于平稳; $q \ll 1$ 时, 曲线随 q 减小有增大的趋势。另外, 广义分形维数图谱中含有多种能够表征序列特征的分形维数值, 在具有更多组实验资料的基础上, 我们也会发现具有 SOC 沙堆模型的某些分形指数的普适特征。

处于 SOC 状态中的系统的演化过程是复杂的。演化过程中即使是很小的局部变化, 其多重分形特征谱也会随之变动而体现出来, 除其容量维数始终保持不变, 其它各值均可能随之而变。据此, 我们可以深入研究沙堆模型系统演化过程中不同时段的多重分形特征谱来探寻复杂过程中的规律。

非均匀沙堆的落沙规模和落沙间隔时间的序列均具有多重分形特征, 不仅表现出了时空的分形结构, 而且分形结构是多层次的自相似, 进一步表明比均匀沙堆具有更大的复杂性。

研究还发现, 沙堆模型 SOC 中有多重分形一级相变行为的存在, 这种相变不同于热力学中的相变, 这或许是其处于临界状态的特征。但必须注意相变发生时, 系统的性质是否发生完全突变, 是否偏离临界态而不能回复, 这既是 SOC 深入研究的问题, 也是应用中必须考虑的。如果无视这一性质, 将

会造成重大失误,从而严重影响研究结果的可靠性。

多重分形理论和方法与 SOC 理论的结合,可以为沙堆模型复杂性的研究开辟新的途径。

沙堆模型 SOC 的多重分形研究为 SOC 的应用也提供了更好地保证。多重分形谱图中蕴含大量有价值的信息,而且已被应用于地震与滑坡的预报、矿产探测、金融市场预测和生态监控等许多领域^[190~194]。根据普适性原理,我们可以利用各式各样普适性的经验,将其用于散粒体 SOC 应用研究中。如可以依据奇异指数谱的异常变化进行 SOC 系统的演变预测;借助广义维数的高次分维数,详细区分相似集合类或系统相似行为的不同之处所在等等。另外,复杂系统演化过程中即使是很小的局部变化,其多重分形特征谱也会随之变动而体现出来,这种反应的高度灵敏性,在 SOC 理论的研究与应用中会有更高的价值。

3.4 小结

本章结合沙堆实验,探讨了沙堆模型自组织临界性的主要理论思想。分析了其主要属性——时空长程相关性。并采用 R/S 分析法证明了呈现 SOC 的非均匀沙堆具有正的时间长程相关性,而不呈现 SOC 的均匀沙堆没有。

另外,还介绍了复杂性科学的另一研究方法——多重分形理论,将其引入沙堆模型自组织临界性的研究。

采用多重分形方法,分析沙堆模型自组织临界状态的空间和时间上的多层次分形结构,得出广义维数和奇异指数等指标特征谱。并进一步分析了非均匀沙堆 SOC 状态的多重分形动力行为。依据多重分形数值结果和谱图特征,可以更深入地理解沙堆模型 SOC 的深层次统计特征和属性,是自组织临界系统演化规律和动力机制研究的有效途径。将多重分形理论结合到自组织临界性理论的研究中,会更有利于实践和应用。

第四章 自然灾害中的 SOC 特征

自然灾害主要包括气象灾害、洪涝灾害、海洋灾害、地震灾害、地质灾害、农业灾害、森林灾害等七大类,及人为自然灾害^[196]。由于中国处于环太平洋构造带与欧亚构造带的交汇部位和大陆气候与海洋气候交界地带,地壳活动性强,地形地貌复杂,气候多变,再加上人类社会活动的影响,使中国成为世界上自然灾害最严重的国家之一。

各类自然灾害所表现出的不均匀性、多样性、差异性、随机性、突发性、迟缓性、重现性以及无序性等复杂性的特点,使得自然灾害的复杂性研究成为趋势,而多种自然灾害中存在的普适规律研究更受到许多专家学者的重视。

4.1 自然灾害与散粒体 SOC

从演化意义上来讲,灾害的复杂性是一种开放系统远离平衡状态时,不可逆过程的非线性动力学机制所演化出的多样化“自组织”现象^[196]。散粒体的复杂性与自然灾害的复杂性有许多相似之处。

斜坡灾害是地质灾害的一种。沙堆模型直观反映了自组织作用下的斜坡物质能量耗散普适性过程,是斜坡灾害的直观模型。许多学者已经发现,沙堆模型也表现出诸如地震、降雨等其它灾害的特征属性。

地震灾害中, *Gutenberg* 和 *Richter* 观察到地震的出现频率 N , 在震级为 M 时, 由关系式 $\log_{10}N = a - bM$ 给出, a 、 b 都是常数。另外, 其规模大小是以地震释放的地震波的能量 E 来衡量的。 E 与 M 存在如下关系(E 以尔格计): $\log_{10}E = 11.8 + 1.5M$; 由这两个关系式可知, *Gutenberg-Richter* 定律实际上就是地震频度和能量之间的幂律关系。此外, 世界各地的研究人员已经用 SOC 理论去解释地震中的空间分布、大地震之间的时间间隔以及余震的衰减规律等对地震长期预报具有重要意义^[197]的规律。

Peters、*hertlein* 和 *Christensen* 分析了沿波罗的海海岸线发生的阵雨的雷达数据, 发现以阵雨的降雨量及其发生频率为坐标轴绘制的曲线, 遵循与控制地震相似的幂定律。他们认为这种与地震的数学相似性显示了一种物理相似性。当储存在一部分地壳中的机械能超过某个临界值时就会触发地震。即这种状况发生时, 在那一点的张力克服了摩擦力, 能量就以地震的形式释放出来。与此类似, 在大气中, 太阳能以蒸发水的形式储存, 当云变得饱和后, 就释放出来^[198]。由此推断, 降雨也存在着 SOC 的特征。

可见,在临界点附近,许多物理性质和成因等差异极大的自然系统往往具有惊人的相似性。沙堆坍塌的机理,不仅直观上反映了山体崩塌、坡体失稳、坡面泥石流、溜沙等诸多边坡灾害的一种能量耗散和物质运输的普适性过程,而且也反映了地震、降雨和森林火灾等不同类别灾害的演化规律。因此,我们希望在 SOC 的概念框架下利用沙堆模型从整体理论上解释多类灾害的普适性动力学特征。

为了在这方面作深入研究,探寻散粒体 SOC 的更广泛的普适性,我们研究斜坡、洪水和沙尘暴等灾害。

4.2 斜坡灾害中的幂率分析

斜坡灾害是指斜坡物质主要在重力作用下失稳的诸多自然现象,尤其是山体崩塌、自然或人工开挖的边坡失稳、坡面泥石流、大型弃渣堆、岩堆、溜砂坡、雪崩等系统的组元都具有散粒体性质的灾害类型。它们的共同特征是能量的耗散是以斜坡物质失稳下滑实现的。这些系统都是具有散粒体性质的灾害类型,彼此既具有特殊性,也有共性和联系性。另外,大多数斜坡灾害个体的数据资料都是有限的,依据统计确定其分布函数而为防治工程的可靠性设计提供依据就很困难。为了认识其共性和联系,同时从整体上了解与其分布有关的规律性信息,有必要采用复杂性科学的理论方法对斜坡灾害的演化机理问题进行探讨。

滑坡、崩塌和泥石流具有突发性强、分布范围广和一定的隐蔽性等特点,是斜坡灾害的主要灾种。我们对 1993 年前的近十年和 1999 年的滑坡、崩塌和泥石流在中国大陆各地区(1993 年 30 个省区直辖市,1999 年新增了重庆市为 31 个)的分布情况进行统计分析。(资料来源于国家统计局^[199, 200]。)结果发现在不同时间段,各地发生滑、崩、流的频率分布都是负幂律关系。图 4-1 所示为 1999 年发生滑坡、崩塌和泥石流的频率—分布量的双对数坐标图。从图中可见三种类型斜坡灾害的负幂律关系均成立,都具有 SOC 的特征。并且滑坡、崩塌和泥石流的分维数值分别为 0.35、0.40、0.44,相差不大,可以认为具有相近的分形结构。

依据从 1949 年前到 1996 年的中国铁路重大滑坡、崩塌灾害的资料^[201]统计,铁路重大滑坡和崩塌的暴发频率与规模(万 m^3)间的关系也服从负幂律分布,如图 4-2。另外,据易顺民等人研究 1985~1991 年间实测资料计算得出的西藏自治区聂拉木县滑坡区樟木——友谊桥段各年的滑坡活动的分维数^[202, 203],我们发现其平均时间分维数和空间分维数分别为 0.98 和 0.84。

也就是说,按行业划分的和局部区域的滑坡也都表现出 SOC 的时间和空间“指纹”特征。

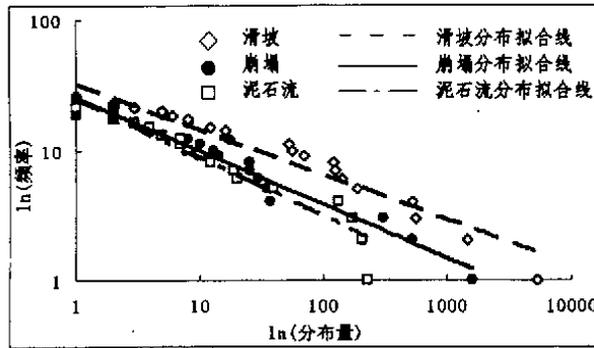


图 4-1 1999 年滑坡、崩塌和泥石流各地分布频率的双对数图

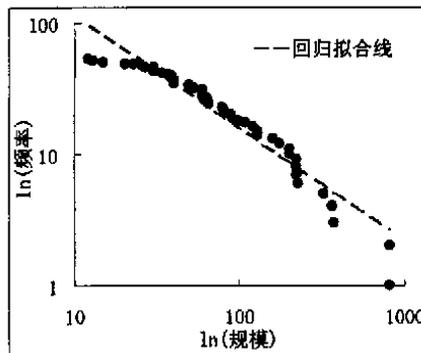


图 4-2 铁路重大滑坡、崩塌暴发规模的频率双对数图

云南东川蒋家沟是我国最严重的泥石流沟之一。据中科院山地所东川站的观测(1982~1985年)记录^[204],可以拟合得出蒋家沟泥石流暴发的径流量、一次输沙量、流动历时和阵次的频率都是其负幂律函数。图 4-3 是泥石流暴发频率与径流量(规模)间的双对数坐标图,服从斜率为-1.05 的直线关系(在 0.01 水平上显著)^[205],该斜率即是负幂律。而且,泥石流流动历时的频率是约为-1 的负幂律,为闪烁噪声。同时,我们采用 R/S 法分析,结果如图 4-4,其中拟合直线(相关系数 $r^2=0.842$)斜率为 $0.610>0.5$,表明径流量具有正的长程相关性。因此,泥石流的暴发过程也表现出 SOC。另外,王裕宜等学者还发现泥石流体的应力应变也具有 SOC^[206]。

以上实例表明,从全国整体分布,到按行业划分区域的分布和更小范围的局部地域性的灾害活动,以及某一特定斜坡灾害的发生,都可以表现出不同尺度范围的无标度自相似性,具有显著的多重分形属性特征。而且这些时空分形结构的负幂律特征和长程相关性都说明了其演化发展过程中的 SOC。因此,我们认为 SOC 是许多斜坡灾害的共性。借用 SOC 这一复杂性科学理论,可以在新的认识指导下更为合理地解释其动力学机制,为灾害防治提供

新思路。

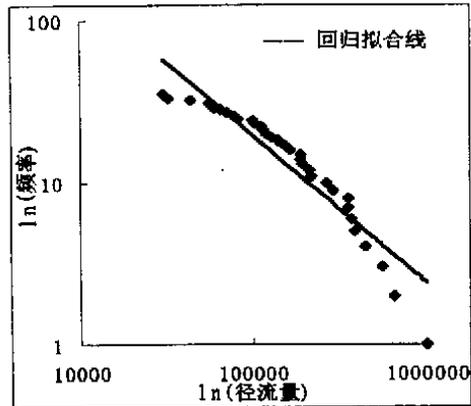


图 4-3. 蒋家沟泥石流暴发规模的频率双对数图

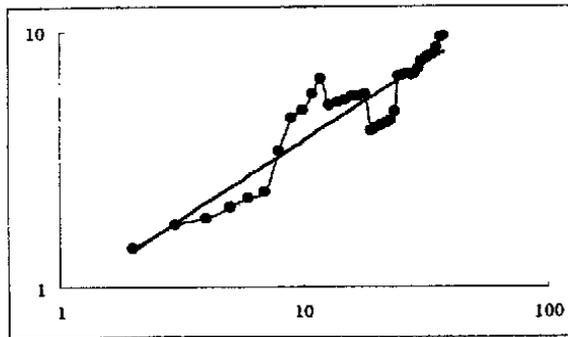


图 4-4 蒋家沟泥石流暴发规模的 $\ln(R/s)$ — $-\ln(n)$ 关系图

4.3 水系的复杂性分析

洪涝灾害是一种突发性、经济损失最严重的自然灾害。据统计 1951—1990 年间，我国平均洪涝灾害面积为 $842.5 \text{ 万 km}^2 / \text{a}$ ，所导致的经济损失占各种自然灾害总损失的 40%。

作为洪涝发生的物质基础，水系是水流的通道，但一旦单位时间内水流量超过某一临界值时，就会因为水流通道的拥塞而产生洪涝灾害。所以不同流域水系密度、结构组成等方面的差异对于导致洪涝的发生必然有着不同程度的作用。

对水系河网结构和流域演化的复杂性研究可以追溯到 1932 年 Horton 对河网级次的研究。他提出著名的 Horton 定律表明流域的河网是一个自相似的分形集。近几十年来，大批学者运用分形理论对流域河网结构进行研究^[207-210]。

水系结构具有分形特征，这是水流的长期动力过程的复杂作用结果。因此，对水系流量的研究也是必要的。我们分析了 1950~1990 年间，长江与黄河两水系各河流的实测最大洪峰流量 ($\text{m}^3/\text{年}$) 资料。采用趋势消除波动分析

法探讨其时间序列复杂性中的规律性。

4.3.1 趋势消除波动分析法

趋势消除波动分析法 (Detrended fluctuation analysis, 简称 DFA) 是 Pengetal 在探测 DNA 时间序列的长程相关时首先提出来的方法^[211, 212]。趋势消除波动分析法类似于(但优于)R/S 分析方法, 它提供了一种测量非平稳时间序列长期相关强度指数的方法(类似于 Hurst 指数)。与 R/S 分析等非趋势消除方法相比, 其优势在于它消除了局部趋势, 避免了将时间序列的短程相关、非平稳性虚假地检测为长程相关性^[213-215]。DFA 被证明是检测非平稳时间序列长程相关性的最重要、最可靠的工具之一。已成功地应用于许多领域, 如: DNA 序列、心率动力学、云层结构、地质学和经济时间序列等方面。

DFA 方法可简单地表述如下: 对时间序列 $\{r_i\}$, $i=1, 2, \dots, N$;

1) 首先对原序列进行变换, 生成累积和序列

$$Y(i) \equiv \sum_{k=1}^i [x_k - \langle x \rangle], i=1, 2, \dots, N \quad (1)$$

$\langle x \rangle$ 为原序列 $\{x_k\}$ 的均值;

2) 将新序列 $Y(i)$ 划分为长度为 s 的 $N_s \equiv \text{int}(N/s)$ 个不相交的等长子区间 (即 N_s 为序列 $Y(i)$ 的区间数, s 为区间长度)。因序列长度 N 不一定被 s 整除, 为保证序列信息不丢失, 可以从序列末端开始反向前再划分一次, 这样共得到 $2N_s$ 个等长子区间;

3) 对每个子区间 $v(v=1, 2, \dots, 2N_s)$ 的数据进行多项式回归拟合 (采用最小二乘法估计多项式的拟合系数), 得到局部趋势函数 $y_v(i)$, $y_v(i)$ 可以是一次、二次或更高次多项式 (一般分别记为 DFA1, DFA2, ...)。然后, 消除各子区间内趋势, 计算其方差均值:

$$F^2(v, s) \equiv \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \{Y[(v-1)s+i] - y_v(i)\}^2, i=1, 2, \dots, N_s \quad (2)$$

$$F^2(v, s) \equiv \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \{Y[N-(v-N_s)s+i] - y_v(i)\}^2, i=N_s+1, \dots, 2N_s \quad (3)$$

4) 对给定的子区间长度 s , 计算均方根波动函数

$$F(s) = \sqrt{\frac{1}{2N_s} \sum_{v=1}^{2N_s} F^2(v, s)}$$

5) 对不同的 $s([N/4] > s \geq v+2)$, 重复第(4)步, 计算相应的 $F(s)$ 。若 $F(s)$ 与 s 的双对数坐标图存在线性关系(或近似线性关系), 则存在一个幂函数形式的波动 $F(s) \propto s^\alpha$ (或 $F(s) \sim s^\alpha$), 即 $F(s) = Cs^\alpha$ (或 $F(s) \approx Cs^\alpha$)。两边取对数, 得

$$\log(F(s)) = \log(C) + \alpha \log(s),$$

对上式采用最小二乘法线性回归求出直线的斜率 α ，即得测量相关性强度的 DFA 指数。

DFA 指数 $\alpha = 0.5$ 意味着在时间序列中不存在任何相关（或短程相关），即时序是随机的，意味着现在不会影响未来； $\alpha \neq 0.5$ 意味着在时间序列中存在长程相关，时间序列的观测值之间不是独立的，每一个观测值都带着在它之前所发生的所有事件的“记忆”。 $0 < \alpha < 0.5$ 意味着时间序列具有反持久性的长程幂律相关，是负的长程相关，即如果一个时序在前一个期间存在一个向上(下)趋势，则它在后一个期间很可能存在向下(上)的趋势，这种反持久性的行为的强度随 α 的减少而增强； $0.5 < \alpha < 1$ 意味着时间序列具有持久性的长程幂律相关。如果一个时序在前一个期间存在一个向上(下)的趋势，则它在后一个期间很可能继续保持向上(下)的趋势，这种持久性的行为随 α 的增加而增强； $\alpha = 1$ ，序列的相关性与 $1/f$ 噪声相似； $\alpha > 1$ 意味着时间序列具有持久性的长程相关，但不是幂律相关；当 $\alpha = 1.5$ 时，序列的相关性与布朗噪声相似。

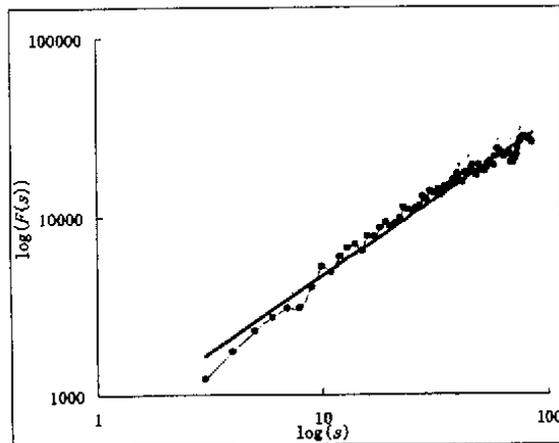
4.3.2 最大洪峰流量的 DFA 分析

据 1950~1990 年间，长江与黄河两水系各河流的实测最大洪峰流量 ($\text{m}^3/\text{年}$) 资料，我们采用前述 DFA 方法计算，得到 $\log(F(s)) \sim \log(s)$ 的关系图，并采用最小二乘法拟合直线结果如图 4—5 所示。结果如下：

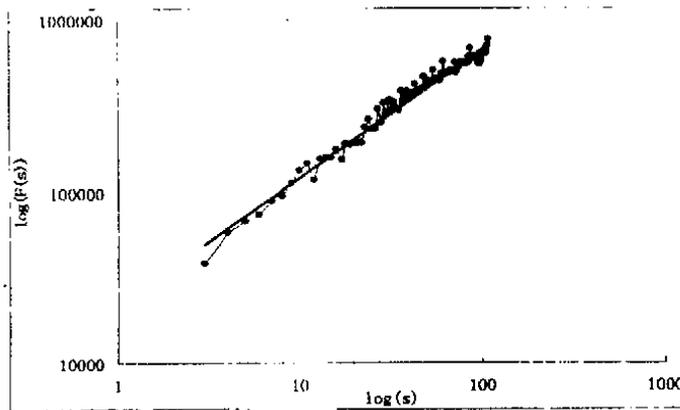
黄河水系： $\alpha = 0.8579$ ，拟合相关系数 $r^2 = 0.9793$ ；

长江水系： $\alpha = 0.7412$ ，拟合相关系数 $r^2 = 0.9786$ ；

两大水系的 DFA 指数 α 都大于 0.5，小于 1。



a、黄河水系



b、长江水系

图 4-5 $F(s) \sim s$ 双对数坐标图

可见，时间序列的实测值之间不是独立的，每一次流量实测值都带着在它之前所发生的所有流量大小的“记忆”。并且，是具有正的长程相关性，即持久性。总体来看，在这几十年里，最大洪峰流量的变化趋势是一致的，而且此后还可能继续保持这种趋势。黄河水系的 α 值大于长江水系的，说明这种持久性相对更强，这种趋势持续的时间会更长；从图中可以看出，不论是长江还是黄河，局部来讲，这种持久性都并不是始终保持着。一些短期内明显是反持久性的（负长程相关性），当然这些只是暂时的小波动，不具有长期性。正是这两方面性质的交织显现，才使序列更为复杂化。

Rodriguez-Iturbe 等人基于流域的分形特征，针对河网的演变过程的研究，根据能量最小原理，通过极小化流域系统整体和部分的能量消耗率得到模拟水系称为最优河道网络（Optimal channel network, OCN）。把 OCN 与天然流域的 DEM 进行了对比研究，通过模拟唯象地说明 OCN 将自动地从任意初始条件演化到具有分形特征的网络，这表明 SOC 可能刻画了天然河网形成的动力学^[187]。

朱晓华等人利用地图，采用盒维数法计算水系的分维数^[216]，探讨了其存在意义上的复杂性，表明了水系分布的幂率特征。我们采用趋势消除波动法分析水系的实测最大洪峰流量是研究水系演化意义上的复杂性。两大水系的洪峰流量序列具有长程相关性，表明水系变化的动力过程都具有长程相关性。在灾害预测中，长程相关是一很有价值的系统性质。统计出的样本最大值只是有限次数中的，如果继续实测，就可能会出现更大的极值。这也说明，黄河和长江水系都表现出 SOC 的特征。

因此，水系河网的演变是 SOC 过程，这可能不仅仅只是类似于

Rodriguez-Iturbe 等人模拟实验的结论。

4.4 我国强沙尘暴中的标度不变性

气象灾害是影响面最广的自然灾害。沙尘暴是近几十年来,影响越来越广的气象灾害之一。

沙尘暴是在天气系统的影响下,地面大风在富含沙粒的地区卷起大量沙尘,使能见度小于 1km 的灾害性天气现象。作为一种突发性高强度的自然灾害,沙尘暴是干旱和半干旱地区的一种风蚀现象,是沙漠化的主要过程之一,是重要的环境问题,其频频发生是生态恶化的标志之一。按强度和危害程度,沙尘暴天气可分为一般沙尘暴、强沙尘暴和特强沙尘暴^[217]。强沙尘暴是指风速大于 20m/s 的强大风力将地表大面积裸露的沙尘吹向高空的天气过程,一般水平能见度小于 200m。特强沙尘暴是指风速大于 25m/s 的特强风力将地表大面积地区的沙尘吹向高空的天气过程,空气水平能见度小于 20m。

沙尘暴致使农田、渠道、村舍、公路、铁路、草场被流沙大量掩埋,对交通运输造成严重威胁。直接危及了农作物、人民生活,污染了大气环境、影响了交通运输。与一般的沙尘天气相比,强沙尘暴由于风力大、能见度低和含尘量高,更具有危害性,能在很短时间内给生态环境和人类社会造成严重损失。例如,1996 年 4 月 5 日,兰州、敦煌民航机场受沙尘暴影响,分别关闭 2 天和 7 天,兰新铁路线的部分路段沙埋深度达 2m^[218]。

有关研究表明,强风、沙源和热力不稳定是形成强沙尘暴的三大因子。因而它的形成与地球温室效应、厄尔尼诺现象、森林锐减、植被破坏、物种灭绝、气候异常等因素有着不可分割的关系。其中,人口膨胀导致的过度开发自然资源、过量砍伐森林、过度开垦土地是沙尘暴频发的主要原因。可见,强沙尘暴是受自然和人类社会因素共同影响的复杂系统,其发生在时间序列分布上呈现出很大的随机性和不确定性。近 50 年来,沙尘暴暴发年日数的总体趋势是下降的,但是强和特强沙尘暴的发生频数呈上升趋势。基于上述原因,我们主要探讨强沙尘暴的非线性变化规律。为此本文先介绍非平稳序列分析的一种新方法。

4.4.1 多重分形消除趋势波动分析法

前面我们介绍并应用了消除趋势波动分析法 (Detrended Fluctuation Analysis, DFA)。在 DFA 的基础上, Kantelhardt J W 等人 (2002 年) 又进一步提出非稳定有限序列的多重分形消除趋势波动分析法 (Multifractal

Detrended Fluctuation Analysis, 简称 MF-DFA)。^[219]MF-DFA 实际是 DFA 思想的进一步广义化。它涵盖了 DFA 方法, 具有更强的功能。不仅可以检测长程相关性、确定其标度不变性, 即分形结构特征, 还能判定序列是否具有多重分形属性并确定多重分形特征。

对长度为 N 的序列 $\{x_k\}$ (k 为序号, $k=1,2,\dots,N$), MF-DFA 的具体方法如下:

a、建立一新序列

$$Y(i) \equiv \sum_{k=1}^i [x_k - \langle x \rangle], i=1,2,\dots,N \quad (1)$$

$\langle x \rangle$ 为原序列 $\{x_k\}$ 的均值;

b、将新序列 $Y(i)$ 划分为长度为 s 的 $N_s \equiv \text{int}(N/s)$ 个不相交的等长子区间 (即 N_s 为序列 $Y(i)$ 的区间数, s 为区间长度)。因序列长度 N 不一定被 s 整除, 为保证序列信息不丢失, 可以从序列末端开始反向前再划分一次, 这样共得到 $2N_s$ 个等长子区间;

c、对每个子区间 v ($v=1, 2, \dots, 2N_s$) 的数据进行多项式回归拟合, 得到局部趋势函数 $y_v(i)$, $y_v(i)$ 可以是一次、二次或更高次多项式 (一般分别记为 DFA1, DFA2, ...)。然后, 消除各子区间内趋势, 计算其方差均值:

$$F^2(v,s) \equiv \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \{Y[(v-1)s+i] - y_v(i)\}^2, i=1,2,\dots,N_s \quad (2)$$

$$F^2(v,s) \equiv \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \{Y[N-(v-N_s)s+i] - y_v(i)\}^2, i=N_s+1,\dots,2N_s \quad (3)$$

d、确定全序列的 q 阶波动函数:

$$F_q(s) \equiv \left\{ \frac{1}{2N_s} \sum_{v=1}^{2N_s} [F^2(v,s)]^{q/2} \right\}^{1/q} \quad (4)$$

其中 q 可以取非零的任意实数; $q=0$ 时, 按下式计算:

$$F_0(s) \equiv \exp \left\{ \frac{1}{4N_s} \sum_{v=1}^{2N_s} \ln [F^2(v,s)] \right\} \quad (5)$$

当 $q=2$ 时, 式 (4) 其实就是 DFA 公式。

e、对每一 q 值, 通过双对数坐标图分析 $F_q(s)$ 与 s 的关系, 可以确定波动函数的标度指数 $h(q)$, 即存在幂律关系:

$$F_q(s) \sim s^{h(q)} \quad (6)$$

当 $q=2$ 时, 对于平稳时间序列, $h(2)$ 就是赫斯特指数 H , 因此 $h(q)$ 被称

为广义赫斯特指数。对于非平稳时间序列, $h(2)$ 可能不等于 H , 但也能体现序列的相关特性。当 $h(2)=0.5$, 意味着该序列是一独立过程; 当 $0.5 < h(2) \leq 1$, 说明序列存在长程相关性, 即具有持久性; $h(2) < 0.5$, 表明序列是负的长程相关, 即反持久性。

当广义赫斯特指数 $h(q)$ 的数值大小与阶数 q 无关时, 则序列 $\{x_k\}$ 是一个单分形过程; 当 $h(q)$ 的数值大小随阶数 q 变化时, 则序列 $\{x_k\}$ 是一个多重分形过程。

对于多重分形谱特征的求算, 可以推导出配分函数与波动函数的关系而进一步确定。

MF-DFA 方法已被应用于分析气象序列, 被证明是探测序列的长程相关性和多重分形特征的有效方法^[20]。我们可以用它来察看强沙尘暴序列波动背后隐藏的规律。

4.4.2 强沙尘暴时序的 MF-DFA 分析

我们取用 1954~2002 年监测到的近 49 年来我国北方典型强沙尘暴资料^[21]进行分析。

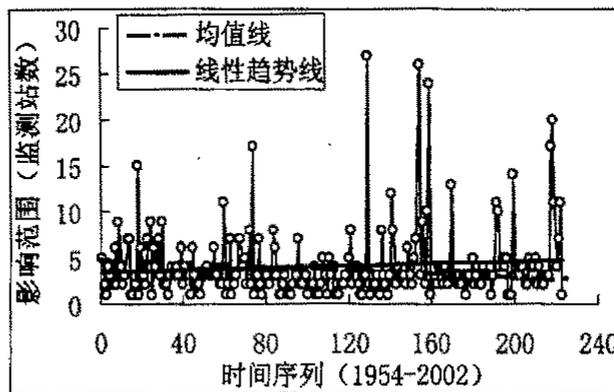


图 4-6. 强沙尘暴时间序列

图 4-6 是这近 49 年内每次强沙尘暴被监测到的站数 (可以认为是其影响范围或规模) 的时序图。序列整体趋势略有上升, 而且前端低于平均线, 后端抬高大于均值。可以看出, 1979 年以来 (图中第 126 个点以后), 大范围影响出现的比之前更频繁、规模也更大。

采用 MF-DFA 法进行计算分析, 分为两部分讨论: 一是 q 值不变时, 局部趋势函数 $y_n(i)$ 取 m 次多项式 ($m=1, 2, \dots$) 时, m 与 $h(q)$ 的关系, 结果如图 4-7; 另一情况是 m 值不变时, q 与 $h(q)$ 的关系, 见图 4-8。

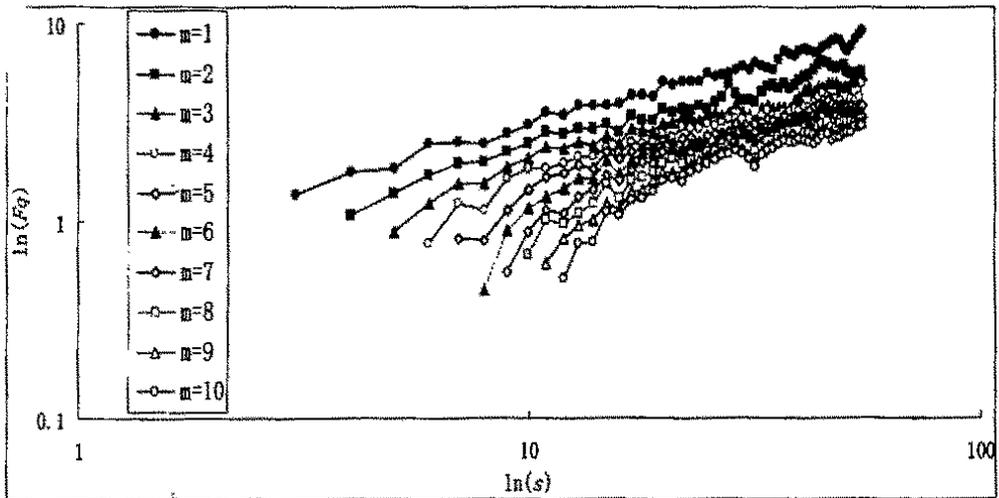
图 4-7. m 变化时的 $\ln(F_q(s)) \sim \ln(s)$ 关系曲线

图 4-7 是 $q=2$ 时 $\ln(F_q(s)) \sim \ln(s)$ 随 m 的变化关系。图中曲线由上至下, m 值依次增大, 即 DFA1、DFA2、...、DFA10。为确保局部趋势函数 $y_{\nu}(i)$ 的有效性, 要求 $s \geq m+2$; m 每增加 1, 子区间长度 s 可取值的数量就减少一个。当 m 增大时, 曲线 $F_q(s) \sim s$ 的波动性有逐渐增大的趋势。每条 $\ln(F_q(s)) \sim \ln(s)$ 曲线拟合直线的斜率就是广义赫斯特指数 $h(q)$, 采用最小二乘法进行线性回归拟合的结果 (见表 4-1) 显示, 各拟合直线均满足统计检验, 相关系数 r^2 最小的为 0.866, 表明不论局域趋势函数取为线性的还是高次多项式, $\ln(F_q(s)) \sim \ln(s)$ 都具有较好的线性关系。经计算, q 为其它值时, 这种关系也成立。因此, 存在幂律关系: $F_q(s) \sim s^{h(q)}$, 即我国北方强沙尘暴时序中存在标度不变性, 或者说具有分形特征。

表 4-1 广义赫斯特指数 $h(2)$ 的回归拟合结果

| | DFA1 | DFA2 | DFA3 | DFA4 | DFA5 | DFA6 | DFA7 | DFA8 | DFA9 | DFA10 |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| m | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| $h(2)$ | 0.605 | 0.594 | 0.606 | 0.623 | 0.669 | 0.735 | 0.750 | 0.752 | 0.820 | 0.883 |
| r^2 | 0.987 | 0.964 | 0.950 | 0.933 | 0.927 | 0.866 | 0.895 | 0.924 | 0.911 | 0.888 |

从图 4-7 和表 4-1 中可以看出, $h(q)$ 变化趋势是随 m 的增大而变大, 所有的 $h(2)$ 都大于 0.5 (笔者对 m 进一步增大也做了计算, 仍保持这一规律); $m=1$ 时, 其线性关系最好, 相关系数 $r^2=0.987$, $h(2)=0.605$ 。因此强沙尘暴的时间序列具有长程相关性, 即序列具有长期记忆性, 如果过去有一个增加, 那么在平均意义上, 将来也将有一个增加。这一性质表明: 我国北方每

次暴发的强沙尘暴并不是孤立的事件，始终存在一定的内在因素致使历次值之间具有一定的关联，而且这种关联是持久的。

另外，根据上述分析， $m=1$ 时相关系数最大，局域的趋势变化以线性为主，因此仅取用 $m=1$ 时的结果进一步分析即可。

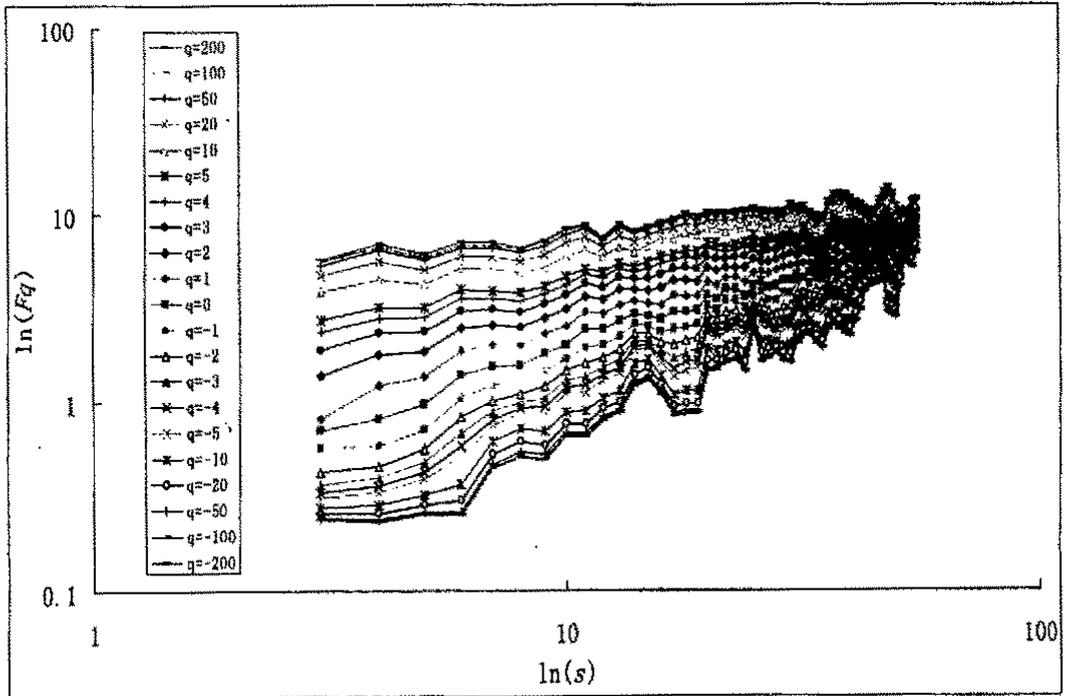


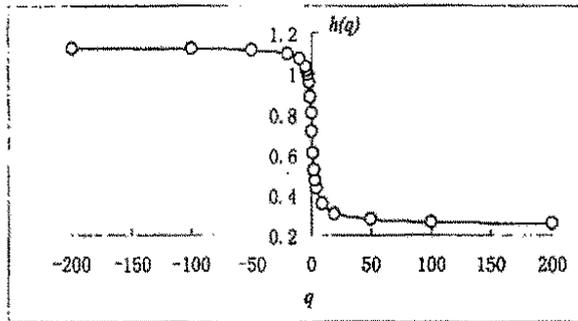
图 4-8. q 变化时的 $\ln(F_q(s)) \sim \ln(s)$ 关系曲线

$m=1$ 时， $\ln(F_q(s)) \sim \ln(s)$ 随 q 的不同取值而变化的关系示于图 4-8。图中各曲线的线性回归拟合得到的直线斜率，即广义赫斯特指数 $h(q)$ ，列于表 4-2。图中，各曲线由上至下， q 值依次减小，对应的 $h(q)$ 逐渐增大。 q 取值 200 ~ -200 的范围内， $h(q)$ 值在 0.261 ~ 1.125 之间递变。随着 q 的等差变化，相邻曲线的间距先是由小变大； $q < 0$ 后，又由大变小，即中间大，两端小，使谱线呈现中间较稀疏，上下两端紧密的形式。 $h(q)$ 的变化也体现了这一特征。如图 4-9，在 $q > 50$ 和 $q < -50$ 范围内， $h(q)$ 变化非常小。图中两端趋势渐近于水平线。可以认为， q 值在有意义的范围内变化时， $h(q)$ 值的大小是有限值。

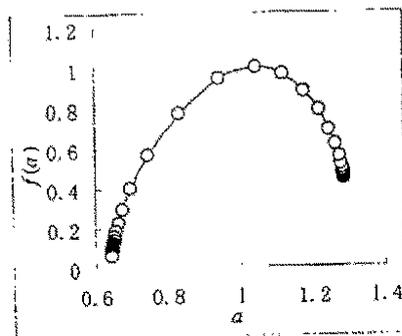
从表 4-2 中可以看出，各线回归拟合的结果均满足统计检验，相关系数都较大，最小为 0.844。但是， $q=2$ 对应的回归拟合的相关系数 r^2 最大，为 0.987；随着 q 的增大或减小， r^2 逐渐减小。总体来讲， $h(q)$ 随 q 的变化而变，不是定值。因此强沙尘暴时间序列不仅具有标度不变性，而且是多重分形过程。

表 4-2. 广义赫斯特指数 $h(q)$ 的回归拟合结果

| | | | | | | | | | | | |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| q | 200 | 100 | 50 | 20 | 10 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | |
| $h(q)$ | 0.261 | 0.266 | 0.276 | 0.306 | 0.352 | 0.434 | 0.471 | 0.525 | 0.605 | 0.719 | |
| r^2 | 0.844 | 0.849 | 0.86 | 0.89 | 0.926 | 0.963 | 0.972 | 0.981 | 0.987 | 0.985 | |
| q | 0 | -1 | -2 | -3 | -4 | -5 | -10 | -20 | -50 | -100 | -200 |
| $h(q)$ | 0.808 | 0.887 | 0.953 | 0.992 | 1.016 | 1.033 | 1.074 | 1.099 | 1.117 | 1.122 | 1.125 |
| r^2 | 0.986 | 0.981 | 0.975 | 0.969 | 0.963 | 0.958 | 0.946 | 0.941 | 0.94 | 0.94 | 0.94 |

图 4-9 $h(q) \sim q$ 关系曲线

进而, 可以推求出强沙尘暴时间序列的多重分形奇异特征谱, 见图 4-10。该谱是向右钩状凸曲线。当 $q \geq 4$ 时, $h(q) < 0.5$, 序列中大的波动起主导作用, 表现为图中右半部分曲线; $h(q) > 0.5$ 时, 序列中小的波动影响会被放大, 表现为图中左半部分曲线。图谱的向右钩状表明: 小的波动影响在全序列中占优。这也是序列具有长程相关性的原因之一。另外, $h(q)$ 的平均值为 0.735, 也说明序列中长程相关性占主导地位。

图 4-10 强沙尘暴的多重分形奇异谱 $f(a)$

4.4.3 强沙尘暴时序的分形行为探究

在具有分形特征的强沙尘暴时间序列中, 强沙尘暴影响范围的波动是不

连续的。这种非线性变化呈现出的随机性和不确定性的背后却有内在的相关性。这种内在的长程相关性表明，其影响范围随时间的波动并非仅简单地由外界随机因素的扰动所造成，其本身还存在着复杂的非线性相关关系，这种关系可能主要来自于形成强沙尘暴的累进性过程。如我国北方和西、北向相邻国家长期存在的、固定的地理分布、甚至有扩大趋势的沙漠和沙地作为沙源；北部和西北部强冷空气主要的、不变的路径；及其与东南暖气流的连年季节性作用引起的热力不稳定等等。这些强沙尘暴形成要素的持久存在可能起着主导作用。

强沙尘暴时序是一种多重分形过程，仅简单地用单分形的一个标度指数描述，不能完全揭示其复杂性。这就需从系统的局部出发，分析其不同层次的特征来研究其最终的整体，才可能更好地认识其复杂程度和不规则程度。我国北方的干旱半干旱区地域广阔，新疆地区、西北东部的陕、甘、宁及内蒙西部等地区和华北的京、冀及内蒙中部等地区广泛分布有强沙尘暴。但由于地理位置、地质环境、沙源和强冷空气的路径等要素的差异，各区域的强沙尘暴的特性存在一定程度的区别，其分形标度指标也不会完全相同。再进一步划分，如甘肃省的河西走廊地区和中东部地区，由于地理位置和地势的差异也存在不同，强沙尘暴的特性仍有差异^[222]。因此就需要分区域分层次地分析，再来看我国北方整体沙尘暴的特征。

另外，强沙尘暴是小范围影响和大范围影响均有发生，呈负幂率分布，见图 4-11；小范围影响出现比大范围多，但是都起源于同一机制；表现出长程相关性等等。这些都是自组织临界性的特征。因此，强沙尘暴的暴发过程可能是一种自组织临界现象。如果能够证实，将会为其研究提供新的思路。

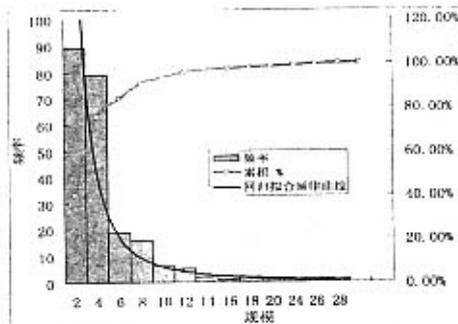


图 4-11 强沙尘暴的幂律分布直方图

强沙尘暴灾害系统是由承灾体、致灾因子、孕灾环境以及灾情等子系统组成的，受自然和人类社会因素共同影响的复杂系统，但它并不是完全随机的。经过对强沙尘暴规模的时间序列波动性的分析，证明其具有内在的长程

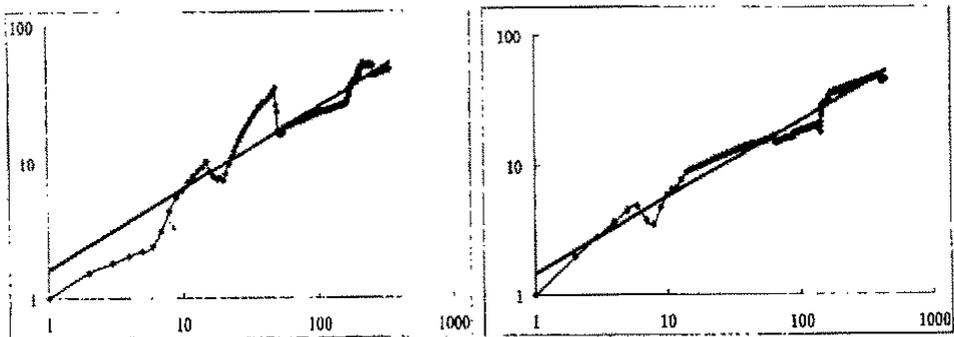
相关性和多重分形特征,而且这些性质与强风、沙源和热力不稳定等要素之间存在联系。

采用 MF-DFA 方法分析其长程相关性和多重分形特征;以分形理论为指导,研究沙尘暴发生发展的规律性,可以为强沙尘暴的预测预报、监控及防治提供有力的支持。

4.5 几种分析方法的比较

本着复杂性分析的方法论研究考虑,我们在前面运用了 R/S 分析法、DFA 方法和 MF-DFA 方法等多种方法计算分析复杂序列的长程相关性。R/S 分析法是应用较广泛的一种方法。DFA 方法和 MF-DFA 方法是较新的方法。DFA 方法已经被许多专业的学者论证并采用。在针对非平稳序列分析时,是较 R/S 分析法更好的方法。

为与 R/S 分析法比较,同时验证 DFA 分析法结论的可靠性,我们又采用 R/S 分析法计算了黄河水系和长江水系的资料,得到 $\ln(R/s)_n \sim \ln(n)$ 的关系图,同样采用最小二乘法拟合直线结果如图 4—12 所示。两种方法的结果见表 4-3。



a、黄河水系

b、长江水系

图 4-12 R/S 分析的 $\ln(R/s)_n - \ln(n)$ 关系图

表 4-3 DFA 法与 R/S 法的计算结果

| 拟合直线指标 | 黄河 | | 长江 | |
|--------|-------------|------------|-------------|------------|
| | 斜率 α | 相关系数 r^2 | 斜率 α | 相关系数 r^2 |
| DFA 法 | 0.8579 | 0.9793 | 0.7412 | 0.9786 |
| R/S 法 | 0.6013 | 0.8799 | 0.5909 | 0.9536 |

可见,不论是黄河水系,还是长江水系,两种方法计算结果拟合线的斜率都介于 0.5~1 之间。因此,可以得出结论,两水系的实测最大洪峰流量都具有长程相关性。由图可见,DFA 方法和 R/S 方法的结果具有基本相同的变

化趋势,只是局部的、个别处的差异。两种方法计算结果的数值的不同,是它们的原理差别所致。当然,两种方法存在一定的差异。相关系数表明,R/S法的计算结果相对拟合直线有较大的离散性,这也正是有学者认为此法用于非平稳序列分析时的偏差较大的原因。而 DFA 法的结果的离散性明显较小。DFA 法消除了局部趋势,避免了将时间序列的短程相关、非平稳性虚假地检测为长程相关性,针对非平稳序列的分析更适用。

MF-DFA 方法是 DFA 方法的广义化方法,二者的长程相关性分析的计算没有区别。反过来说,DFA 方法的分析过程是 MF-DFA 方法中的一部分,是特例。因此,DFA 和 MF-DFA 两种方法在分析复杂序列的长程相关性时的结果是相同的。MF-DFA 方法对复杂序列分析,可以得出更多的结果,如多重分形的特征指标等。

因此,前面采用三种不同的分析方法得出的结论是具有可比性的。斜坡灾害、洪水和强沙尘暴中发现的序列长程相关性虽是用不同的方法分析出的结果,但具有一致性。

4.6 小结

复杂性理论与方法的诞生,为深入开展自然灾害的复杂性研究提供了崭新的方法论,并极大地促进了人们对自然灾害整体行为的探索,揭示其复杂行为的规律、本质及调控机制,从而更加有效地处理经济、社会发展以及人类目前所面临的严峻的自然灾害问题。

本章采用幂率分布计算、R/S 分析法、DFA 分析法和 MF-DFA 分析法等方法,分别针对斜坡灾害的分布和暴发、水系的最大洪峰流量以及强沙尘暴的规模和分布等三大类自然灾害相关资料进行研究。结果表明,这些复杂的自然灾害没有物理关联,却都存在一定内在的规律性。从全国整体分布,到区域的分布和更小范围的局部地域性的灾害活动,以及某一灾害的发生过程,都表现出不同尺度范围的无标度自相似性,说明多种灾害的分布具有多重分形特征;时空结构的幂率分布、长程相关性等属性的存在或许可以不同程度地说明自组织临界动力学的普适性。

将散粒体复杂性理论方法应用到自然灾害的研究中,探索自然灾害的内在的和普适规律性,以便为灾害研究提供新的理论指导。

第五章 SOC 概念框架下灾害防治的探讨

在前一章,我们探讨了几类灾害的 SOC 特征属性。研究灾害的 SOC, 目的就是为从整体上更深刻地认识它,了解它,甚至于希望能够控制它。然而,自然灾害结构和演化的复杂性,使得“简单”的理论和手段已不适用于伴随着人类经济活动的开展而日趋复杂化的自然灾害系统的研究。

自然灾害系统是一个开放的动态复杂大系统,表现出了高维性、复杂性、开放性、动态性及其非线性的特点。针对这一系统的控制与管理,无论采用经典的理论,还是传统的技术,都遇到了困难。因此,必须借助新的概念和方法来研究自然灾害的整体行为和演化规律及其调控机制,并从中探寻有效的防治方法。

根据散粒体实验和前面章节的分析,借用沙堆模型的动力学特性及其普适类性质,可以在新的认识指导下更为合理地解释其动力学机制,为灾害问题的研究开辟新途径。

5.1 沙堆的动态演化与灾害的可预测性

预测问题是灾害研究中的根本问题之一,也是世界性的难题。因为灾害分布具有时空两大特征,要想准确地预测其发生的时间和地点是非常困难的。目前,尚没有一套较成熟的理论和方法用于预测研究,国内外寥若晨星的成功地预测预报灾害事件的实例是基于对其发展演化过程的自始至终的长期的、全面的监测。因而,人们更深刻地认识到建立灾害预测理论的紧迫性和重要性。几十年来,灾害研究特点已由过去的单个单项灾害现象的描述、分类治理,发展到现在以定性描述为基础的定量预测预报研究。

在大尺度散粒体实验中,出现了两种规律:一种是非均匀沙堆的演化,具有 SOC 动力属性;另一种是均匀沙堆的演化,落沙规模服从准周期分布规律。根据两种类型的规律性质特征,我们探讨两类灾害系统的可预测性。

5.1.1 SOC 系统演化的预测方法探讨

当灾难降临时,分析者通常的思路是归因于某种罕见的环境,或怪罪于某些强有力的机制的综合作用。而 SOC 理论认为许多由大量组元构成的复合系统自然地朝着一种临界状态进化,在临界状态下,由于具有敏感性,小事

件能引发任何规模的连锁反应，包括灾难性的大事件。这一理论的启示是小事件和大事件可能有相同的起因，也就是说巨大的灾难性事件和不为人们所重视的小事件都遵从同样的动力学。这为灾害的触发因素提供了新的解释，也直接为我们研究灾害提供了方法论。

自然界中的许多灾害如森林火灾、地震、滑坡和泥石流等地质灾害被许多学者确认表现出 SOC。另外，如崩塌、洪水等发育分布也满足幂律规则^[223]，而幂律可以作为 SOC 的证据。那么基于 SOC 的灾害预测方法就会有非常大的适用范围。具体方法可以从以下几方面考虑：

1、SOC 系统属于弱混沌系统。弱混沌与完全混沌的行为特征有显著区别。完全混沌系统由于初始条件的不确定性将依照指数规律增长，长期预测是不可能的，而 SOC 系统属于弱混沌系统，弱混沌系统初始条件的不确定性依照幂律增长，因而有可能依此进行长期预测。

2、SOC 系统具有的断续平衡特点结合了稳定有序系统和混沌无序系统的性质。系统长时期的郁滞保留有稳定系统的行为特征。这让我们在分析一处灾害的暴发时，可以追溯历史的事件，也可以求助远地的资料，这些对该处灾害的研究无疑是特别有意义。同时，系统具有的混沌系统的行为特征，也就可以借鉴针对混沌系统的短期预测方法做一定的工作。如最大 Lyapunov 指数法和神经网络法等^[224]。

3、系统的时空长程相关性也表明时间上的记忆能力和空间的长距离相关。特别是时间演变过程表现出正的长程相关性，表明序列具有长期记忆性，如果过去有一个增加，那么在平均意义上，将来也将有一个增加。从非均匀沙堆实验中也发现，一次大规模落沙之后，可能还有更大规模的落沙。统计出的样本最大值只是有限次数中的，如果继续实验，就会出现更大的极值。

正的长程相关性在自然界中大量存在。国内外许多学者发现地震、降雨、树木年轮、温度变化、洪水泻流、泥浆沉降等现象都具有这一特征。尽管大的事件以一定的概率出现，但这并不意味着这个现象是周期性的。长时间没有发生地震这个事实并不意味着将有地震发生；一次大地震之后也可能还会有更大的地震暴发。当然，这一性质给系统预测带来了较大的难度，但也表明系统的可测性，在一定的时空环境条件下，频繁发生灾害的地区今后可能还会暴发；而一直未发生灾害的地区可能仍然长期不会出现。

4、频率与规模的幂次定律描述的是某种量级灾害发生的数目，即灾强和灾数的关系。这种灾害演变规律可以运用在灾势分析、风险评估和危险度区划中。概率统计方法既用来表达可信度，又用来检验我们的预报能力，

是灾害预测预报中不可忽视的手段。而规模与频率的幂率关系就做为已知的统计分布特征起到非常重要的作用。具体可采用极值统计等方法。

5.1.2 准周期系统演化的预测方法

相对来讲,大尺度均匀沙堆呈现的准周期性是较为稳定有序系统的行为规律。准周期随时间的演变过程表现为较强的负相关性,即过去的减少趋势使未来可能出现增加趋势。这正是时间序列准周期变化的规律性所致。

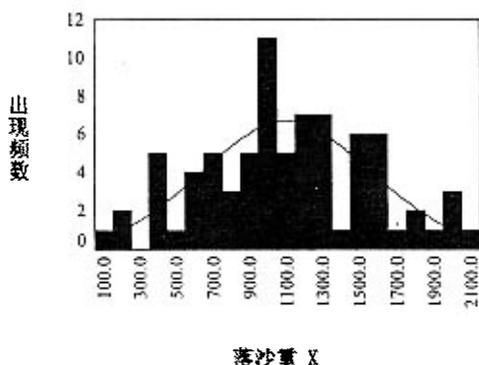


图5-1 均匀沙石落沙重量的频率分布

对这类系统,可依据过去较长时间序列资料的规律性实现预测。由于大规模的暴发在时间上服从准周期分布,可以利用其主周期和平均周期进行时间上的预测^[225];同时,所有大规模崩塌统计上呈正态分布(如图5-1),就可以依此进行灾害暴发规模的预测。另外,实验中发现非均匀沙堆能维持在临界态,而均匀沙堆不能维持在临界态,到达临界坡后即发生大规模崩塌而严重偏离临界态的行为。这一现象表明,一次大规模灾害暴发后如果系统严重偏离临界态,就可以保证其后的一定时期不会产生大规模的灾害。

总之,这类灾害的预测预报技术较为成熟,采用周期数学知识就可以实现对其预测,如时序分析和马尔可夫过程等方法。

5.2 灾害防治工程设计中的极值分析

在许多防治工程应用中,那些得自观察数据的极值非常重要。例如,在考虑结构的安全度时,高的荷载值和低的结构抗力值都是保证结构的安全性或可靠性的极为关键的数值。因此,在处理有极值条件的问题中,来自观察数据组中的最大值或最小值是唯一有关的数据(灾害预测中一般多指最大值)。所以,与这类极值有关的统计值或概率,都是特别重要的信息。而且在工程规划与设计,常常需要有对未来情况的预测,包括对最大值(或最小

值)的预计。在已知统计分布函数情况下,我们可以采用极值统计法。该法对沙堆模型表现的两类系统均可适用。只不过一类借助正态分布函数,另一类借助幂律分布的统计规律。

作为防治工程设计的依据,在工程设计基准期内会出现的外荷载效应的最大值是必须考虑的。这种由自然现象所产生的随机荷载的极限值是人们往往无法准确预计的,但其最大值仍具有某种规律可寻,例如某灾害百年一遇的最大量值总是比十年一遇的大。根据概率与数理统计理论,从工程可靠性角度出发,对于荷载取用的设计基准期内最大值的确定,就可以采用极值分析方法。

5.2.1 极值统计方法

极值统计学是统计学的一个分支,主要是处理一定样本容量的最大值和最小值。可能的最大与最小值将组成它们各自的母体,因此这些值可用具有各自概率分布的随机变量来模拟。令 X 为初始的随机变量,并有已知的初始分布函数 $F_X(x)$; 这里我们主要探讨样本量 n 的随机变量 (X_1, X_2, \dots, X_n) 的最大值,即随机变量: $Y_n = \max(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 。为了数学上的简化及与随机抽样理论一致,假设 X_1, X_2, \dots, X_n 均为相互统计独立并与初始随机变量 X 有相同的分布函数。据此, Y_n 的分布函数为:

$$F_{Y_n}(y) = P(Y_n \leq y) = P(X_1 \leq y, X_2 \leq y, \dots, X_n \leq y) = [F_X(y)]^n \quad (1)$$

对于方程(1),当 n 变得很大或 $n \rightarrow \infty$ 时, $F_{Y_n}(y)$ 是否具有极限的或渐近的形式,这一问题曾经是早期的统计学者所探讨的课题,并已成为人所共知的统计极值的渐近理论,它使得极值统计学的用途大为增强。当 n 很大时,极值的渐近分布趋向收敛于几种极限形式,耿贝尔把它们划分为 I、II、III 型的渐近形式^[226]: 来自带有指数型衰减尾部的初始分布的极值将渐近地收敛于 I 型极限形式; 而对于具有二项式衰减尾部的初始分布,它的极值将收敛于 II 型渐近形式; 对于有界的极值,其相应的极值分布将收敛于 III 型渐近形式。

描述极值统计的两个基本要素是耿贝尔渐近分布形式与极值参数。在实际应用中,当判断初始随机变量的确切分布比较困难时,初始随机变量的尾部情况不够明确,必然会带来如何确定其极值分布的极限形式问题,以便确定极值风险的均值和方差。为此,可利用万米色斯(Von Mises)准则,对于极大值的分布准则为:

准则 I: 收敛于 I 型渐进分布:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{d}{dx} \left[\frac{1}{h_n(x)} \right] = 0 \quad ;$$

准则 II: 收敛于 II 型渐进分布:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} x h_n(x) = k, k > 0 \text{ 为常数};$$

准则 III: 收敛于 III 型渐进分布:

$$F_X(\omega) = 1, \omega \text{ 为上限};$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} (x - \omega) h_n(x) = k, k > 0 \text{ 为常数};$$

其中, $h_n(x)$ 是指可靠度理论中, 在时间 $(0, t)$ 内无失效的情况下, 在 $(t, t + dt)$ 内失效的条件概率将涉及的危害函数。对于最大值, X 的危害函数为:

$$h_n(x) = \frac{f_X(x)}{1 - F_X(x)} \quad \circ$$

在灾害防治工程设计中, 运用极值统计方法就要求确定灾害的某些统计分布函数及其特征, 而规模与频率的幂率关系就作为已知的分布规律起到非常重要的作用。在这样的情况下, 根据分布的信息可以更精确地确定所需的超越概率和设计极值等量。

5.2.2 幂律特征下的极值分布

我们通过实验和分析已经得出非均匀散粒体边坡在临界状态下表现出 SOC 的结论。并且已经实例证实滑坡、崩塌和泥石流等灾害发育演化具有 SOC 的特征——满足负幂律规则。负幂律分布作为自组织临界性的证据, 也为防治工程可靠性设计提供了依据和条件。

在呈现 SOC 的灾害中, 依据频率 N 与规模 Q 之间的幂律关系为:

$N = aQ^{-b}$; 为了表示简洁易用, 我们先做适当变换。

假设已知统计资料中, 规模的最大值和最小值为 Q_{max} 和 Q_{min} ; 设 $X = \ln(Q)$; 则 $N = ae^{-bX}$, 其中 $X \geq X_{min}$, $X_{min} = \ln(Q_{min})$, X_{min} 一般可以为 0, 再由频率代替概率的思想, 得出 M 的分布函数为:

$$\begin{aligned} F(x) &= P(X \leq x) \\ &\approx \frac{\text{规模对数} \leq x \text{ 累积发生次数}}{\text{所有规模对数发生总次数}} = \frac{\int_{x_{min}}^x ae^{-bX} dX}{\int_{x_{min}}^{\infty} ae^{-bX} dX} = 1 - e^{-b(x - X_{min})} \end{aligned} \quad (2)$$

概率密度函数:

$$f_X(x) = F'_X(x) = be^{-b(x - X_{min})} \quad (3)$$

由公式 (2) 和 (3) 可以求得灾害函数 $h_n(x)$ 。将其带入万米色斯准则公式, 满足准则 I。因此确定出其极值分布的极限形式为收敛于 I 型的渐进分布。进而, 就可以确定极大值的极限分布为:

$$F_{Y_n}(x) = \exp(-\exp(-b(x - X_{\min} - \ln(n)/b))) \quad (4)$$

设 n 个样本量的最大值为:

$$y_n = \max(x_1, x_2, \dots, x_n) = \ln(Q_{\max}) ,$$

则在未来 $n1$ 次观察中的最大值分布为:

$$F_{Y_{n1}}(x) = \exp(-\exp(-b(x - y_n - \ln(n1/n)/b))) \quad (5)$$

进而, 在未来 $n1$ 次观察中的最大值将超过以前 n 个样值中的最大值 y_n 的概率 $p1$ 为:

$$p1 = P(Y_{n1} \geq y_n) = 1 - \exp(-\exp(-b(y_n - y_n - \ln(n1/n)/b))) = 1 - e^{-n1/n} \quad (6)$$

另外, 按已规定的超越概率 p , 可以求得设计最大值:

$$y_{n1}(p) = y_n + \frac{1}{b} (\ln(n1/n) - \ln(\ln \frac{1}{1-p})) \quad (7)$$

取指数得规模的设计最大值为:

$$Q_{n1} = e^{y_{n1}(p)} \quad (8)$$

5.2.3 实例计算

云南东川蒋家沟泥石流已被证明具有自组织临界性, 并得到暴发频率 N 与规模 (次总径流量) Q 的之间关系为 $\log N = 8.6 - 1.05 \log Q$ 。^[202] 根据蒋家沟泥石流 (1982~1985) 记录 (见表 5-1), 我们采用前面推导出的公式(4)~(8)可计算得出结果, 见表 5-2。算例的结论只用于计算示范。

表 5-1 蒋家沟泥石流的实测资料 (1982~1985)

| | | | | | | | | | | |
|--------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|
| 时序 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 次总径流量(万 m ³) | 3.15 | 37.25 | 18.69 | 9.99 | 21.121 | 16.38 | 1.08 | 4.335 | 0.64 | 11.57 |
| 时序 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| 次总径流量(万 m ³) | 6 | 5.76 | 39.1 | 7.094 | 8.104 | 12.822 | 1.80 | 10.239 | 99.816 | 5.608 |
| 时序 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |
| 次总径流量(万 m ³) | 19.372 | 14.02 | 19.002 | 29.107 | 65.77 | 3 | 3.254 | 44.488 | 11.22 | 35.53 |
| 时序 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | | |
| 次总径流量(万 m ³) | 26.18 | 21.527 | 12.01 | 15.309 | 7.747 | 56.163 | 35.68 | 6.489 | | |

由结果可知：未来将要暴发的 30 次中，出现大于历史最大规模（前 38 次实测资料中的最大值）泥石流的概率为 54.6%，而随着暴发次数的累增，这一概率会越来越大。另外，对于防治工程结构设计，需要确定一定超越概率下的设计最大值，表中计算出了拟定超越率分别为 0.1，0.2 和 0.3 时的该值。

表 5-2 蒋家沟泥石流的极值分析结果

| 前 n 次中的最大值 $y_n=99.8157$ 万 m^3 | | $nl=30$ | $nl=50$ | $nl=100$ |
|--|---------|----------|-----------|-----------|
| 未来 $n1$ 次的超越概率 $p1$ | | 0.546 | 0.732 | 0.928 |
| 规定超越率 p 时的设计最大值 $Q_n(\text{万 } m^3/\text{次})$ | $p=0.1$ | 679.7564 | 1105.7013 | 2139.6022 |
| | $p=0.2$ | 332.6336 | 541.0666 | 1046.9982 |
| | $p=0.3$ | 212.8028 | 346.1480 | 669.8185 |

在应用中，将规模 Q 取对数也有其实际意义。我们在推演公式的前提中所设的 $X=\ln(Q)$ ，可以理解为类似于震级^[206]的某个指标量。如设 $X=c+d\ln(Q)$ ， c 、 d 为常数，不会改变其极值分布形式和特征。在研究边坡灾害时，可以用 X 来表示和划分灾害的破坏强度类别，其中 c 、 d 据具体某一种灾害的破坏强度与规模的统计关系取定。在进行可靠性设计时，可以将此指标用于灾害的危险性分析。

规模与频率的幂次定律描述的是某种量级灾害发生的数目，即灾强和灾数的关系。另外，灾害暴发的频率——时间的规律也具有同样的价值。这些灾害演变规律还可以运用在灾势分析、风险评估和危险度区划等工程系统可靠性设计中。

5.3 小结

这一章结合前面关于实验分析、理论研究和灾害规律探讨，对自然灾害的预测、SOC 理论指导下的极值统计法的应用等问题进行分析。

在传统的灾害预测预报、防治工程的规划与设计中，尽管方法多样，但总体来看，采用的指导理论多是对复杂现象的简单处理方法，将许多不确定、非线性的因素认为是确定的和线性变化的。虽然在具体的工程实例中也起到了一定的作用，然而，暴露出来的缺点也毋庸置疑。

我们认为，沙堆坍塌的机理，不仅直观上反映了山体崩塌、坡体失稳、坡面泥石流、溜砂等诸多边坡灾害的一种能量耗散和物质输运的普适性过程，而且也反映了地震、森林火灾等多种类灾害的演化规律。依据沙堆复杂性规

律，以自组织临界性等复杂性理论为指导，将散粒体实验与实际灾害的资料分析结合在一起，为灾害预测预报、防治工程规划和设计提供新思路。

第六章 交通环境选线的复杂性方法探索

在复杂性科学理论研究的同时,一定要注意相应的方法论的建立和应用。如果我们只是将复杂性科学、非线性科学、系统科学等有关概念和名词引入专业学科进来,而忽视利用复杂系统研究方法进行的科学建模工作,那么,复杂性科学的理论和方法的运用也只会停留在表面和外围,而不会触动研究专业学科的核心。本章将从复杂性科学研究使用的方法着手,探索其应用于工程技术的途径。

交通工程中的许多问题关系到复杂的自然界和人类社会的许多领域,而且这些问题交织在一起,致使工程实践中许多问题都没有得到最好的解决。其中交通流问题已经纳入了复杂性科学的研究课题之一^[229-232]。我们在理论研究的基础上,利用复杂性研究的一种有效方法——元胞自动机进行交通线路选线设计的新方法研究。

6.1 元胞自动机

元胞自动机(Cellular Automata,简称CA,也有人译为细胞自动机、点格自动机或分子自动机)是20世纪40年代末期由世界第一台数字计算机的设计者之一的物理学家冯·诺伊曼(J.Von Neumann)最早提出的,用于模拟生命系统具有的自复制功能。沃尔夫勒姆等人将动力系统方法和计算理论及形式语言方法用于元胞自动机的研究中,促进其广泛应用。^[232,234]

6.1.1 定义

元胞自动机是定义在一个由具有离散、有限状态的元胞组成的元胞空间上,并按照一定局部规则,在离散的时间维上演化的动力学系统,即是时间、空间和状态都离散的动力学系统。这是元胞自动机的物理定义。

散布在规则格网中的每一元胞取有限的离散状态,遵循同样的作用规则,依据确定的局部规则作同步更新。大量元胞通过简单的相互作用而构成动态系统的演化。不同于一般的动力学模型,元胞自动机不是由严格定义的物理方程或函数确定,而是用一系列模型构造的规则构成。凡是满足这些规则的模型都可以算是元胞自动机模型。因此,元胞自动机是一类模型的总称,或者说是一个方法框架。其特点是时间、空间、状态都是离散,每个变量只取

有限多个状态，且其状态改变的规则在时间和空间上都是局部的。

元胞自动机更严格的定义应是基于数学集合论的描述。一般地，元胞自动机要求^[236]：

(1) 规整的元胞网格覆盖 d 维空间的一部分；

(2) 归属于网格的每个格位 r 的一组布尔变量 $\Phi(r, t) = \{\Phi_1(r, t), \Phi_2(r, t), \dots, \Phi_m(r, t)\}$ 给出每个元胞在时间 $t=0, 1, 2, \dots$ 的局部状态；

(3) 演化规则 $R = \{R_1, R_2, \dots, R_m\}$ 按下列方式指定状态 $\Phi(r, t)$ 的时间演化过程：

$$\Phi(r, t+1) = R_j[\Phi(r, t), \Phi(r+\delta_1, t), \Phi(r+\delta_2, t), \dots, \Phi(r+\delta_q, t)]$$

式中 $r+\delta_k$ 指定从属于元胞 r 的给定邻居元胞。

按上述定义，演化规则 R 对所有格位都是同一的，且同时应用于它们中的每个元胞，由此得到同步动力学。时间 $t+1$ 的状态只随时间 t 的状态而变化。有时必须进行长期记忆，并引入对时间 $t-1, t-2, \dots, t-k$ 等的状态的相依性。

6.1.2 构成

元胞自动机将模型空间以某种网格形式划分为许许多多单元，这些单元称为元胞。一个元胞自动机即由元胞格点网和一组规则构成。每一个元胞被赋予某个初始数，一组规则确定每一时步中这些数如何更新。元胞自动机是由元胞、邻居、元胞空间和规则四部分构成。

元胞是元胞自动机最基本的组成，又可称为单元、基元或格点座。元胞的状态可以是 $\{0, 1\}$ 的二进制形式，或是 $\{s_0, s_1, s_2, s_3, \dots, s_j, \dots, s_k\}$ 整数形式的离散集。严格意义上，元胞自动机的元胞只能有一个状态变量，但在实际应用中，往往将其进行扩展，如每个元胞可以拥有多个状态变量。

元胞空间就是元胞所分布的空间网点集合。从元胞空间的几何划分来看，一维元胞自动机的元胞空间的划分只有一种；高维的元胞自动机，元胞空间的几何划分则可能有多种形式。对于最常见的二维元胞自动机，元胞空间通常可按三角、四方或六边形三种网格排列。理论上，元胞空间是无限延展的，但实际应用中，我们需定义不同的边界条件。边界条件主要有四种类型：周期型、反射型、定值型和随机型。

按定义，元胞自动机演化规则是局部的，对指定元胞的状态进行更新，只需要知道其邻近元胞的状态。某元胞需在其内搜索的空间域叫做邻居。实际应用中，往往只由邻接的元胞构成邻居。通常，二维元胞自动机考虑两种

邻居：一是 Von-Neumann 邻居，由一个中心元胞（要演化的元胞）和 4 个位于其邻近东南西北方位的元胞组成；另一是 Moore 邻居，它另包括四角位置的 4 个元胞。如图 6-1 所示。



a、Von Neumann 邻居

b、Moore 邻居

图 6-1 两种标准邻居

规则是根据元胞当前状态及其邻居状况确定下一时刻该元胞状态的动力学函数，简单讲，就是一个状态转移函数。这个函数构造了一种简单的、离散的空间和时间范围的局部物理成分。在要修改的范围里采用这个局部物理成分对其结构的元胞重复修改。

6.1.3 特征及分类

从元胞自动机的构成及其规则上分析，标准的元胞自动机应具有以下几个特征：

1、同质性、齐性：同质性反映在每个元胞的变化都服从相同的规律，即同一规则；齐性是指元胞的分布方式相同，大小、形状相同，空间分布规则整齐。

2、空间离散：元胞分布在按照一定规则划分的离散的元胞空间上；

3、时间离散：系统的演化是按照等间隔时间分步进行的，时间变量只能取等步长的时刻点；

4、状态离散有限：状态只能取有限个离散值；

5、同步计算（并行性）：元胞自动机的处理是同步进行的，特别适合于并行计算；

6、时空局部性：每一元胞的下一时刻的状态取决于其周围的邻域中的元胞的当前状态，即时间和空间的局部性；

7、维数高：在动力系统中一般将变量的个数称为维数。任何完备的元胞自动机的元胞空间都是定义在一维、二维或多维空间上的无限集，每个元胞的状态便是这个动力学系统的状态。因此说其维数高是一特点。

上述中，同质性、并行性和局部性是元胞自动机的核心特征。

元胞自动机按动力学行为分为平稳型、周期型、混沌型和复杂型；按元

胞空间的维数分为：一维的、二维的、三维的和高维的。

6.1.4 元胞自动机与复杂性

元胞自动机是可以模拟复杂结构和过程的模型，已成功地被用来模拟自然界中各种真实物理系统中的发生过程。大型并行计算的第一个适用模型就是根据元胞自动机思想建立。

元胞自动机，尤其是按动力学行为划分的第四类——复杂型元胞自动机是最具创造性动态系统——复杂状态，它恰恰介于秩序和混沌之间，被称为“混沌的边缘”。处于“混沌的边缘”的系统具有自组织临界性的内禀属性。在自组织临界性理论的提出和研究中，采用元胞自动机建立多种维数的沙堆模型进行数学实验起到了非常重要作用。

另外，在复杂性理论的应用研究中，元胞自动机在地理学、地貌学、森林火灾、城市土地利用变化和交通流等的模拟研究中也已经取得了重大的成功，是重要的方法和模拟手段^[236-242]。

选线设计时，针对所要考虑的线路可能行经区域的地形、地质和地貌等复杂地理现象和特点，采用类似于地理元胞自动机的扩展元胞自动机模型思想会更适用。

6.2 环境选线理念

实现工程建设与环境保护相协调，是交通与环境科学的一项十分紧迫的任务。铁道与道路的选线设计工作在交通建设中起着举足轻重作用，它不仅决定了工程造价的大小，运营条件的好坏，为线路建成后的经济效益提供有力的保证，而且选线设计的结果很大程度决定了交通建筑系统与环境的长期相互作用和发展。在满足经济的飞速发展对交通提出的速度、安全、舒适、经济等等更高要求的同时，必须保证环境的可持续发展。

6.2.1 道路选线的发展

七十年代以前，我国的铁路与道路的选线，由于受施工技术能力的限制，对于长隧道、高桥梁的建设尚缺乏经验，一般都采用加大限制坡度、增大展线系数的办法，大都偏重于地形选线。

八十年代，新技术开始在长隧道、高桥梁中得到应用。在正确处理有关的深路堑与短隧道、高路堤与栈桥、长隧道与短隧道群、沿河陡坡路堤与跨河方案等方面积累了宝贵的经验。地质因素已经普遍得到了线路专家的高度

重视,提出了规范化的地质选线的技术原则^[243]。

九十年代以后,选线已由地形选线为主变为地形控制与工程地质选线并重的综合选线。针对地形、地质都比较复杂的情况,选线时要坚持系统分析原则、综合选线原则、整体最优原则等地质选线原则,尽可能地绕避地质不良地段。另外,地质选线要重视施工地质和运营地质,用动态观点研究处理地质问题。

近十几年来,全球定位系统(GPS)、地理信息系统(GIS)、遥感(RS)以及综合物探等多种现代化勘测设计手段得到普遍的应用。随着勘测技术和计算机技术的发展,勘测设计一体化、智能化已经成为可能。与此同时,随着人们对节约耕地、保护环境的要求越来越强烈,交通建设部门在进行选线时越来越需要考虑交通建设用地以及交通建设对环境的影响等问题。交通线路与环境的可持续发展都是选线时就应考虑的因素。

6.2.2 选线中考虑的环境影响因子

选线中应考虑的环境影响可以分为三大类:自然环境、社会环境和经济环境。

自然环境主要包括大气质量、水资源、土壤和地质、生态资源、植被等;社会文化环境主要包括土地使用、房屋拆迁、对已有线路及建筑物的影响、噪声与振动、学校、教堂、公园等公共设施、历史文化古迹、国防设施、人文景观等。

经济环境主要包括沿线经济发展、就业和居民收入、商业、公用事业、工程造价及运营费等。

6.2.3 考虑环境因素的选线

一些学者研究交通项目建设时,提出在规划、设计、施工和运营的各个阶段进行相应的环境影响评价。这些工作是必要的,但环境影响评价是独立的工作,可以参与决策,但并没有真正在选线设计时全面考虑环境因素。周华国从铁路对环境的影响出发,提出了铁路绿色设计的思想^[244];郑顺义提出基于土地适宜性的选线思想^[245]。他们的工作实质都是考虑环境因素的影响而进行选线的理念。

考虑交通建设与自然环境的相互作用与协调问题,在选线设计中就要注意研究道路走向与环境相互作用关系、道路建设中工程结构类型与环境间的动态响应、道路运营与环境的相互作用关系等,综合确定使道路与环境相协

调的线路位置。

保证二者的协调性,把选线与环境保护紧密结合起来,就要在选线时将环境因子作为重要的指标和约束条件加以考虑,而且必须注意要将当前、施工阶段和运营以后的多个时期可能的环境演变状况全面纳入分析。如大量的开挖取土,破坏土体原有自然结构,相应的生物链随之改变,也就改变了动植物的生存环境而对生态环境的影响;边坡中深挖路堑、高填路堤,引起塌方、滑坡、泥石流等现象,造成地质条件的不稳定而对水土环境的影响,等等。

选线设计中需考虑的线路系统和自然环境与社会环境中的众多因素具有矛盾性、不确定性和随机性等特点,这些特点造成的复杂性给设计带来更大的难度。改变传统选线的理念和方法,用新的思维方式处理复杂问题是实现现代化设计的有效方法。

6.3 基于环境因素的元胞自动机选线的设想

6.3.1 广义导向线定线法

新线铁路选线设计时,按传统手工定线方法,设计者依地面平均自然坡度与规定的最大坡度的大小关系,把地形分为紧坡地段和缓坡地段。定线时按此划分采用不同的方法。缓坡地段由于地形平缓,较易处理。紧坡地段地面坡较陡、起伏大,定线时还要考虑地质、水文、生态、和人文等环境及工程量大小和运营条件的好坏等错综复杂的因素,一般可以结合实际经验,采用导向法定线^[246]。导向法定线法实际是以地形为主要考虑因素,应用时有很大局限性。我们改进传统导向线,提出广义导向线定线法,并依据其思想,建立定线元胞自动机模型,以此实现基于环境考虑的自动化定线。

传统的导向法定线法是以地形为主要考虑因素,每前进一步都尽量保证既用足最大坡度,又尽可能小的工程量,同时兼顾对某些障碍的绕避和创造较好的运营条件。这仅仅是地形和地质选线的思想,很多复杂因素未考虑进去。

广义导向法定线法是从环境可持续发展的角度考虑,使导向线不只起到经济选线的导向作用,还具有交通建设系统环境的保护导向目的。

土地是交通基础设施的载体,与线路相关的环境因素都离不开土地。土地适宜修建交通建设工程的程度评价,称为土地的交通建设适宜性评价。依据土地的交通建设适宜性评价思想,设一适合定线地块的综合评定指标,既

包括地形、地质、水文等自然障碍和既有道路、村镇等社会障碍因素，又包括人文、生态、矿产和水土保持等环保价值和社会价值因素。

为方便实用，可不作精确计算，能够定性地分出等级即可。一般，地块的环保价值和社会价值越高，相对定线的适宜程度就越低。将价值分为高、中、低和无四个等级，相对的定线适宜度分别为-1、0、1和2；对于障碍因素，可以将其要求线路绕避的相对强烈程度分为强、一般、弱和无四个等级，对应地块对定线的适宜度分别为-1、0、1和2。这样，取适宜定线的地块综合评定指标为所有因素的定线适宜度之和；特殊的，对于含有某因素的适宜度为-1的地块，其综合评定指标直接取为-1，即要求线路必须绕避。对线路将行经区域按综合指标进行评价，综合评定指标值越大的地块越适合定线。根据评价结果划分不同适宜定线程度等级的地块，依此决定线路的位置。具体方法可以结合元胞自动机的特点，建立模型执行。

广义导向线与传统导向线有着本质区别。传统的导向线是每段等长，转点落在等高线上，纵断面坡度为定值的等坡度折线；而且只能用于紧坡地段定线。它仅考虑了地形因素，按定线坡度选取合适位置作为导向点。广义导向线的各段可以不等长，转点不一定落在等高线上，而且坡度大小不同，但都是在满足定线坡度限制前提下，较理想的前进方向，能起到更好的导向作用；并且对紧坡地段和缓坡地段均适用，即不必按地形分类而采用不同的原则和方法。

6.3.2 定线自动机模型构成

1、元胞和元胞空间

取元胞为平面区域中的地块，设为 $50\text{m} \times 50\text{m}$ 的正方形单元（此大小的取用主要考虑满足一般线路的横向限界要求，应用中可以根据需要人为设定）。元胞空间就是此单元构成的地理空间的离散网格。设为正方形网格可以很自然地与地理空间的笛卡尔坐标体系吻合。已知网格原点的平面坐标，就可方便获取网格中任意处的地理空间数据资料，例如：与数字地形模型相配合后，可以取得各元胞中心的高程资料等。

2、元胞状态

元胞状态表示地表相应单元所处的状态。将其设成多元变量，其中主变量表示导向状态，设每个元胞可有3种状态：“0”代表元胞是线路中线经过的不理想地块；“1”代表元胞是线路中线经过的可行地块；“2”代表元胞是线路中线经过的理想地块。

除主变量外, 还需扩展多个变量, 包括: 地块中心高程 H 、地块地质状况 S (定为三值: “2” 代表无病害; “1” 代表有轻微病害, 易整治; “0” 代表一般病害, 可整治, 但有较大投入; “-1” 代表病害严重, 不易整治, 对应元胞状态应取 “0”)、地块水文特征 $W1$ (“0” 代表无; “1” 代表沟谷、溪水; “2” 代表河流) 和 $W2$ (“0” 代表无; “1-4” 代表走向)、地块的公路特征 R (“0” 代表无, “1-4” 代表走向, “A~D” 代表等级)、地块的环保价值和社会价值 C (“2” 代表基本没价值; “1” 代表低价值; “0” 代表中等价值; “-1” 代表高价值) 等等。

其中环保和社会价值的等级是由生态、高等级耕地、文化古迹、自然景观、大气、矿藏资源、水土保持和噪声、振动、电磁污染防治等多种指标确定后, 进行综合取得。

元胞空间的边界状态采用定值型, 界外元胞均取状态值为 0。

3、邻居定义

采用标准的 Moore 邻居类型, 以八个相邻元胞为邻居, 如图 6-1(b) 所示。这样, 模型可以较全面地反映出多方向性。

4、转换规则

转换规则也叫演化规则, 它决定了元胞自动机的动态演化过程。此规则是地理特征和定线原则在局部和细观上的体现。本模型的转换规则实质就是线路导向线的延伸规则。

在选线设计所需地理信息已经获取的前提下, 先确定线路的大致走向, 规划出线路必须行经的控制位置, 得到航空折线。在此基础上, 建立广义导向线生成过程的元胞自动机模型的转换规则如下:

- 1) 初始状态: 控制位置 (即航空折线转点) 所在的元胞状态为 “2”, 即其余元胞状态均为 “0”;
- 2) 如元胞在某一时刻的状态值等于 2, 则此后各时刻的状态不变, 即 $n_{ij}(t) = 2$, 则 $n_{ij}(t+1) = 2$; $n_{ij}(t)$ 表示第 i 行 j 列的元胞在时刻 t 的状态;
- 3) 设第 p 行 q 列的元胞为第 i 行 j 列元胞的某一邻居, 即 $p=i$ 或 $i \pm 1$; $q=j$ 或 $j \pm 1$ 且 $p=i$ 时 $q \neq j$ 。当 $n_{ij}(t) = 2$ 时, 如 $n_{pq}(t) \neq 2$, 则计算或评定该邻居元胞的各项变量指标, 包括: 其中心与 i 行 j 列元胞中心之间的地面平均自然坡度 I 、中心距离前方控制点的距离 D_{pq} 及地质状况值、水文特征值和环保价值等级等扩展变量。对 $n_{ij}(t) = 2$ 的元胞不做计算。

坡度 $I = (H_{pq} - H_{ij}) / d_{pq-ij}$; H_{pq} 为第 p 行 q 列的元胞中心点地面高程; H_{ij} 为第 i 行 j 列元胞中心点地面高程; d_{pq-ij} 为二元胞中心距离, 如图 6-2 所示

$d_1 \sim d_7$ 。一个元胞到各邻居的坡度 I 可以比较大小和上下坡方向, I 的绝对值可以与规定定线坡度 I_d 比较大小。这样, 可以将 7 个邻居 (另一邻居元胞状态已为 2, 不再考虑) 按地形坡度大小和方向的理想程度比较并排序。图 6-2 中, 1~7 为参与比较的邻居元胞, 将 $I_1 \sim I_7$ 分别与 $I_d = (H_{ij} - H_8) / d_{ij-8}$ 的大小和正负号 (正号表示前进方向为上坡, 负号表示下坡) 比较; 取 $I_1 \sim I_7$ 的绝对值与定线坡度 I_d 比较, 看是否超限。其中:

$$I_d = i_{\max} - \Delta i_p;$$

i_{\max} —— 主要技术标准取定的最大坡度;

Δi_p —— 考虑平面曲线和长大隧道等地段坡度平均折减值。

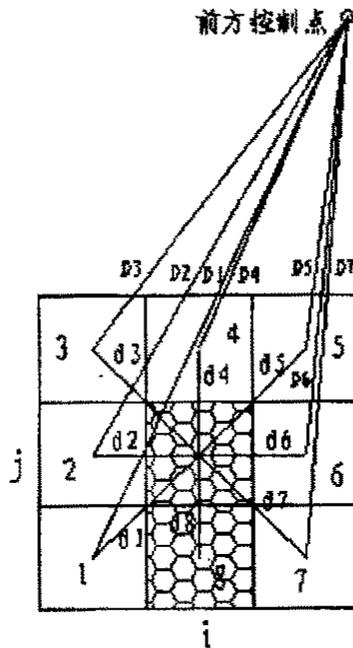


图 6-2 地形和方向指标示意

D_{pq} 可以用于判断参与比较的邻居元胞趋向前方控制点的程度好坏。如图 6-2 中 $D_1 \sim D_7$ 所示: D_5 、 D_4 、 D_3 较好, D_1 和 D_7 最差。

对于有走向特征的指标, 如公路、水文等, 要根据走向判断比较各邻居跨越或绕避该类障碍的方向优劣。其余的由扩展变量决定的各项指标确定后, 对七个邻居元胞进行多目标综合评价。由评价结果得出邻居地块对定线适宜度的排序, 取最理想的邻居一个, 状态值为 2; 其它依据综合评价指标值的离散情况分为两类, 即状态值为 1 或 0。

6.3.3 应用定线元胞自动机模型定线步骤

- 1、依勘测调查取得的资料，确定各障碍因素和价值因素的指标值，并在地图上确定出相应区域。
- 2、确定线路行经的主要控制点。
- 3、在各相邻控制点间，依照元胞自动机的转换规则，得到连通二相邻控制点的状态值等于 2 的元胞连成的折线带，就是理论上理想线路区域，如图 6-3 所示。
- 4、取所有状态值等于 2 的元胞中心点，顺次连成一折线，即广义导向线，如图 6-3 所示。

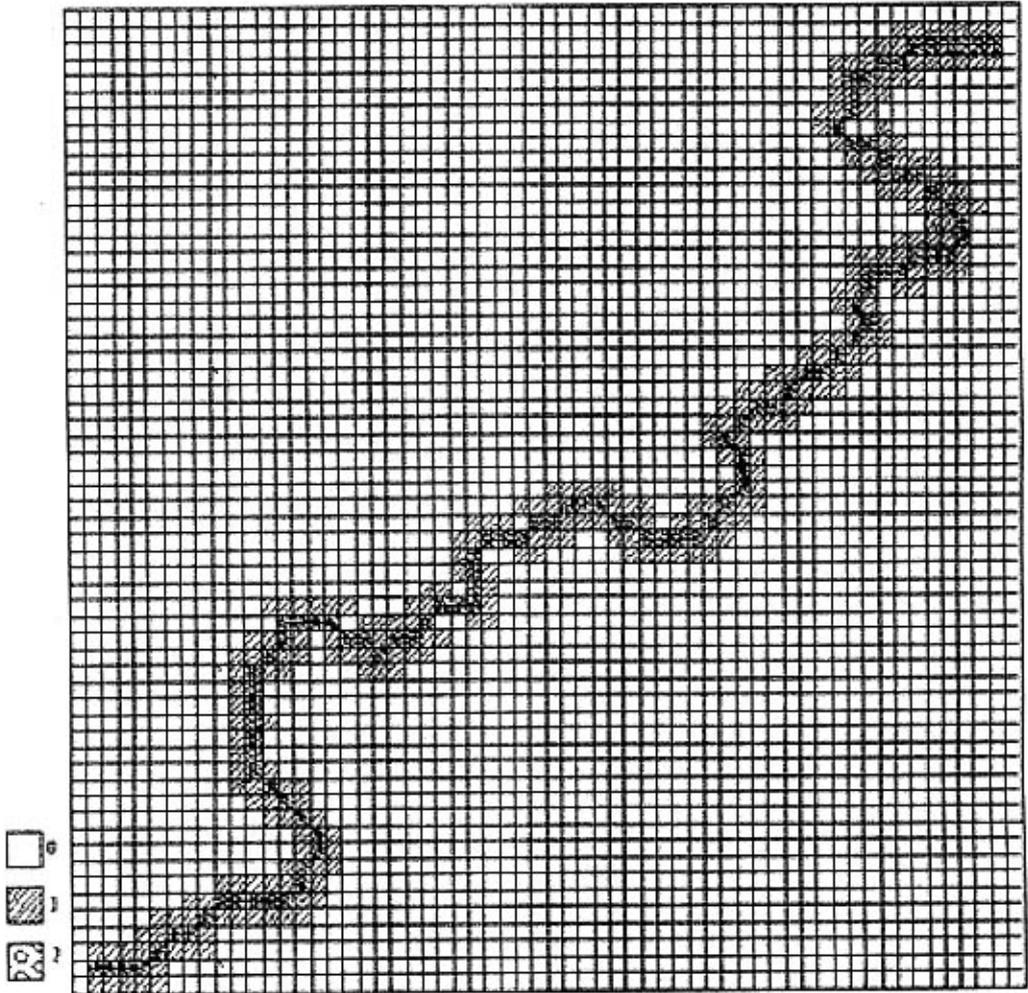


图 6-3 定线元胞自动机模型

5、广义导向线是链式折线线路。可以采用屋顶函数进行圆顺，并拟定满足规范要求的平面线路^[247]。应保证线路中心线完全落在状态值等于 2 和 1 的

元胞组成的带状区域内。

定线元胞自动机中的每个元胞都含有地面标高、地质水文特征及考虑线路系统及其环境可持续发展的综合指标。将确定合理线路位置的原则作为转换规则，借助元胞自动机的离散动力演化功能，实现自动定线。

元胞自动机具有离散动力演化的优点，可以将多目标综合考虑，具有整体离散优化思想。另外，还具有很强的灵活性和适用性，可以依据设计中各方面不同程度的要求，调整或增加其扩展变量和转换规则。

定线元胞自动机模型既适合编程开发独立的选线设计软件，又可以集成到地理信息系统中，借助地理信息系统的环境，实现更强大、完善的设计、查询等功能。采用元胞自动机模型定线不仅实现了平面选线的部分自动化过程，而且该模型中含有对纵断面和横断面的合理位置的考虑，是平面、纵断面和横断面综合定线的方法。因此，定线元胞自动机模型可以直接融于勘测设计一体化、自动化的思想中，为平纵横综合自动选线提供了新思路。

6.4 小结

元胞自动机模型是复杂性科学一个重要研究领域，是复杂系统研究方法之一。在沙堆复杂性模拟和自组织临界性机制和理论研究中，元胞自动机起到了举足轻重的作用。元胞自动机“自下而上”的研究思路、强大的复杂计算功能、固有的并行计算能力和时空动态特征，使它在模拟空间复杂系统的动态演变方面具有合理性和可行性。它的这些功能和特点使其应用的范围可以更加广泛。

交通线路工程关系到复杂的自然界和人类社会的许多领域，而且这些问题纷繁复杂地交织在一起，致使工程实践中许多问题都没有得到最好的解决。随着经济的发展又出现许多新的问题，构成了一个复杂的动态大系统。其中，道路与铁路的选线设计从一开始的单一只考虑适应地形，减小工程造价，发展为地形条件和地质因素相结合的选线理论。近年来，自然环境保护和可持续发展问题已经成为全球性问题，选线设计也要从以前仅单纯地为降低工程造价的思维方式，转变成使交通建设与环境保护全面协调的全新思维方式，即从经济选线发展到从可持续发展的角度进行环境选线。这样，选线的复杂程度就更高，设计难度更大，要求有可以兼顾更多影响因素的、全新的方法。定线元胞自动机模型正是适应这一要求提出的。将元胞自动机思想与选线设计方法相结合，进而可以考虑多种环境因素对线路位置的约束，达到交通线路与环境保护相互协调的目的。

定线元胞自动机模型是依据综合指标评价结果确定的线路位置。因此，不仅满足地形和地质选线的要求，又保证了交通建设和环境的可持续发展，是选线设计工程新理论新方法的实践。

第七章 散粒体复杂性的机制探讨

在理论和应用研究的同时,散粒体复杂性的机理也需要进一步探讨。

散粒体与固体不同的是颗粒具有流动性。因此散粒体临界状态下,既具有固体的属性,又表现出流体的性质。这是复杂系统的临界属性的体现。因此,我们分别从固体和流体两种形态进行探讨。

7.1 散粒体结构及作用机制复杂性分析

从整体来看,散粒体具有无序结构。但整体的无序并不意味着局部的无序。不管是具有幂率分布的自组织临界性还是具有正态分布的准周期行为,这些系统整体的复杂性行为都与其局部和整体的结构有关。

一般而言,当系统具有一定的结构时,便对外界的作用表现出一定的特性和能力,这时系统就具备了某种功能。结构是系统产生功能的基础,功能是结构的外在表现。因此,我们有必要认识散粒体堆的细观结构,并由此入手,进一步研究其复杂性差异的内在机制。

7.1.1 散粒体的细观结构分析

7.1.1.1 等径硬球体堆积的基本结构

从细观结构来看,理想的等径球状无粘性散粒体堆内部的堆积结构有两种最基本的结构形式:密实堆积结构和松散堆积结构,最典型的就四面体结构和六面体结构^[248]。

1、四面体结构

对于二维密排问题,设想一个无限大的平面用一系列圆盘排列的情况,规则的六角排列是最密的排列(图 7—1)。其堆积系数(packing fraction)可以用圆盘的面积与圆盘所占的面积之比来表示。二维堆积系数相当大,为 0.9069。

1611 年,开普勒首先提出了球体的三维密堆,即球体的密排面的密堆。这种球体密堆有两种基本堆法(见图 7—1)。图中每一层小球都是二维密堆,第二层的最密堆垛是它的球落在第一层球之间的空隙上。从图可以看到,如第一层处于 A 位置,第二层可堆在 B 或 C 处,即第一层的空隙 b 或 c 上。第二层位置的符号要等放上第三层后才确定下来(图中取为 B),第三层则堆在 B 层的空隙之上。这样任何更多的堆垛可以用 A、B 和 C 的序列表示,密堆系数为 0.74048。密排面堆垛的层序如按 ABABAB.....排列,则形成六角

密堆结构，如按 ABCABC...堆垛，则为面心立方结构(见图 7—2)。这两种结构都属于四面体结构。

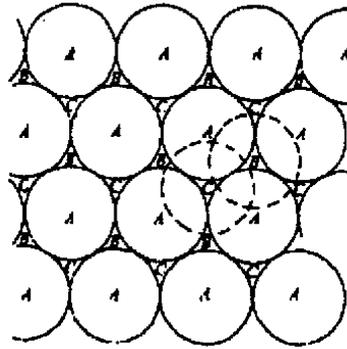


图 7-1 刚球密排面的堆积

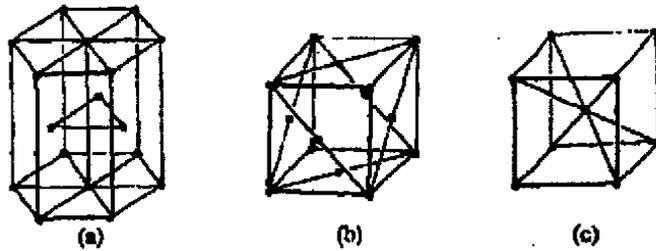


图 7-2 三种典型的堆积结构

(a)六角密堆 (b)面心立方 (c)体心立方

在最密堆垛球之间有两种空隙。在最密排列的颗粒层上堆第二层时，一种情况是下层的空隙上堆一个第二层颗粒，即空隙周围有 4 个球，它们的中心形成四面体。这就是四面体间隙如图 7-3(c)。第二种类型是空隙上下各有三个球，形成八面体间隙如图 7-3(b)。在所有三维密堆垛中四面体间隙的数目是颗粒的 2 倍。八面体的结构实际上就是体心立方结构，如图 7-2 (c)，其间隙数等于颗粒数。如球半径为 R ，空隙中可以填充更小的球。在四面体间隙中小球的半径是 $0.225R$ ，八面体中为 $0.415R$ 。

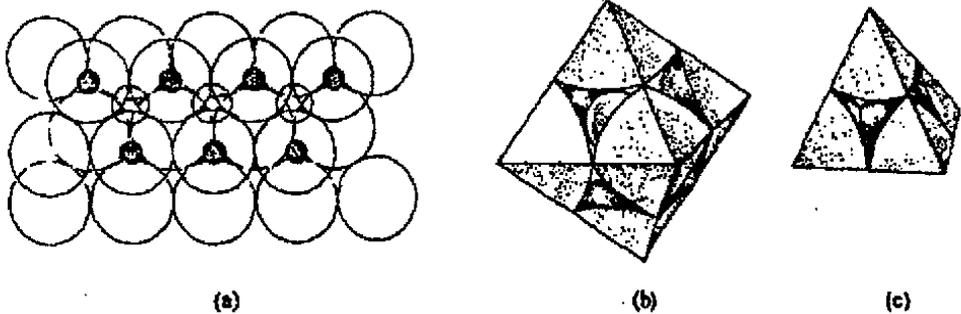


图 7-3 密堆结构中的间隙空间

(a)显示两类间隙位置；(b)八面体间隙；(c)四面体间隙

数学家曾经证明过，理论上三维结构中开普勒最密堆垛是等径球体空间

占有率的最高极限，即 0.7404，孔隙率为 0.2596，孔隙比 0.351，无从突破。由于四面体间隙体积小，如果完全按四面体方式堆积起来，空间占有率还可能进一步提高，但纯四面体间隙式的堆积是理想化的，只有插入一定数目的八面体间隙才能形成真正的堆体。

2、六面体结构

等径散粒体松散堆积的基本结构形式是六面体结构，如图 7-4 所示。该结构中，每个球都放在立方体的角上，并与其它 6 个球接触，每 4 个位于同一平面内。这种结构的等径球体空间占有率为 0.524，孔隙率为 0.476，孔隙比 0.923。六面体的孔隙周围有八个球，可以填充的小球最大半径为 0.732R。

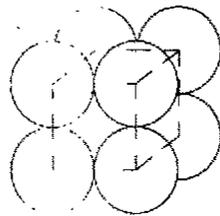


图 7-4 松散堆积的六面体结构

这种松散结构是非常理想化的。它稳定性很差，如果没有其它稳定结构的约束支撑，就很难保持。不可能在实际堆积体中独立的存在。

对于理想的等径粒子，位于散粒体堆内的每一个，所必需的最少联系数量等于 6；最多可能的联系数是 12 个。

7.1.1.2 真实沙堆的结构

实际堆积体中应是上述基本结构的交错混合形式，随堆积方式和环境压力的不同而有所区别，其密度和空隙率均介于二基本结构之间。

前苏联科学家已通过实验证实：当沙子以“下雨”的方式撒落，并始终保持沙面近乎水平面时，可以达到相对密实的结构。为了使达到极限密实状态，需把沙子装在上小下大的圆锥形容器内，用敲打法使之密实。当沙子从移动漏斗中从最小高度漏下时，得到的沙子结构较松散。为了使达到极松散的状态，沙子需要经漏斗填入圆筒形的容器中。在采用圆粒或半圆粒的不均匀级配的中沙，依此方法实验时，得到干沙的孔隙比极限值为：最大为 1.012；最小为 0.415。^[249]可见，真实沙堆的结构与理想化的等径散粒体结构存在很大差异。

真实沙堆的可能最小孔隙比 0.415 大于等径粒子的四面体结构的 0.351。非均匀沙是由粒径不等的多组粒子组成的，小的粒子可以填充在大粒子之间的孔隙中。因此中值粒径相等的非均匀沙与均匀沙相比，最小孔隙比会更小，

但其值仍大于理想化的紧密堆积。可见，真实沙堆不可能达到完全的紧密堆积。其内部存在许多前述堆积结构的不完整形式——破缺结构，造成较大的孔隙。大量粒子的实际联系数都是小于 12 个。

真实沙堆的可能最大孔隙比为 1.012，比等径粒子的六面体结构的 0.923 还要大。这一方面是非均匀沙的多种粒径造成的，另一方面，说明真实沙堆中可以存在很多比六面体结构还不稳定的多种破缺结构。这种破缺结构应该是前述各种结构可能的不完整形态的无规律组合，而且使结构中存在比六面体的孔隙更大的孔洞。这样的孔洞周围的粒子联系数可能会小于 6。

破缺结构是真实沙堆中大量存在的。仅以六面体来看，其可能的破缺结构就有多种，图 7-5 所示是其中几个基本的。如果考虑每个粒子的位置和结构的倾斜角度变化，就会有更多种形式。

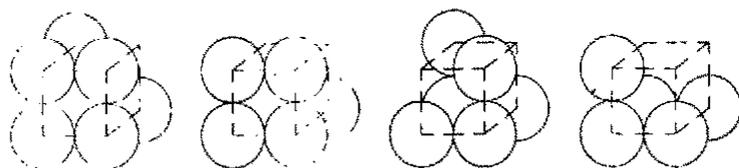


图 7-5 六面体的基本破缺结构

沙子以不同的方式下落，得到的堆体的孔隙比不同。这说明，散粒体的堆积结构与其形成的历史过程有关，即受其动态的演化过程的影响较大。

散粒体堆的多体性决定了其结构的多样性和堆体的固流两态性。多样性是不可计数的，而且既是空间的，又是时间的。这正是散粒体堆体结构复杂性的表现。

可见，真实散粒体的堆积结构的可变化范围大、随机性强，这也正是导致结构复杂性的原因之一。对于非球状和不均匀粒径的散粒体，其基本结构的变化形式相对均匀的更是复杂多样、数不胜数。

非均匀沙堆的孔隙比的取值范围较均匀沙的要大，其结构形式也就多。一般来讲，在一定的范围内，非均匀度越大，结构也就越复杂。结构的复杂性会影响到临界状态的动力过程的复杂性。这或许也是大尺度的非均匀沙堆具有 SOC 的原因。

7.1.1.3 沙石密度实验

为证实前述散粒体的结构特征，课题组对沙石材料的密度进行了实验研究。

实验在大型粗颗粒实验系统的相对密度仪上进行，设备简图见图 7-6。试样筒直径 30 cm，净深 34 cm。由变频电机带动两个对向偏心齿轮转动产生

垂直激振力，调整电机转速可改变激振力，进而改变振幅，振幅用检振表监控。试样上方加重盘重力作用的静压强 14 kPa。套筒提供加重物的导向功能。

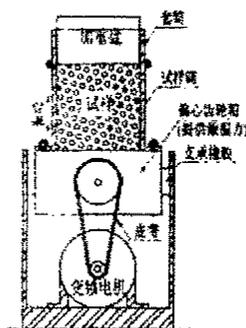


图 7-6 大型相对密度仪振动实验示意

该设备的特点是将振动力和静压力联合作用于无粘性的沙石料上，振动力使试样颗粒处于运动状态，颗粒间摩阻力减小以致消失；静压力在试样内产生压应力和剪应力，也克服颗粒间的摩阻力。在振动力和静压力共同作用下，大小颗粒相互充填和挤紧，达到试样的最大密度^[250]。

沙石材料土工性质测试沙石级配与沙堆实验用料相同，示于表 7-1，中值粒径为 2.75 mm。实验选用大型相对密度仪的允许最大粒径均达到 60 mm，大于沙堆实验用料的粒径，符合足尺度原型实验的要求。

表 7-1 土工实验沙石级配

| 非均匀沙石 累积粒配(%) | 0.4 mm | 0.7 mm | 1.2 mm | 2.3 mm | 3 mm | 3.7 mm | 4.5 mm | 5.1 mm | 5.8 mm | 8.5 mm | 10.8 mm | 17.4 mm | 20 mm | 30 mm | 40 mm |
|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|----------|----------|----------|
| ($\phi=1.53$) | 0.49 | 3.11 | 9.29 | 38.82 | 56.00 | 68.32 | 76.67 | 80.55 | 83.73 | 91.89 | 95.81 | 98.99 | 100 | - | - |
| ($\phi=2.15$) | 4.00 | 12.01 | 22.08 | 42.77 | 52.00 | 59.15 | 66.38 | 70.63 | 74.42 | 85.84 | 92.50 | 98.59 | 100 | - | - |
| ($\phi=2.55$) | 7.70 | 19.47 | 29.99 | 42.65 | 53.90 | 59.45 | 65.69 | 69.87 | 73.03 | 80.70 | 86.25 | 96.42 | 100 | - | - |
| ($\phi=2.96$) | 11.00 | 23.85 | 33.14 | 46.08 | 52.00 | 56.14 | 61.85 | 66.68 | 70.46 | 78.89 | 86.87 | 98.78 | 100 | - | - |
| ($\phi=3.50$) | 9.00 | 26.92 | 34.37 | 47.57 | 51.00 | 57.10 | 62.92 | 65.38 | 67.88 | 76.69 | 83.91 | 93.96 | 96.00 | 98.50 | 100 |
| ($\phi=5.00$) | 10.00 | 28.02 | 34.26 | 47.73 | 51.00 | 53.62 | 57.77 | 60.32 | 61.92 | 66.79 | 71.01 | 78.54 | 100 | - | - |

实验步骤参照水利部 1999 年《土工实验规程》粗颗粒土相对密度实验 (SL237-054-1999)^[251]：

1. 将沙石按实验要求的级配称量并混合均匀，每一次备料不少于 50 kg。
2. 用大漏斗将试样徐徐灌注入试样筒，松填到高出筒顶 3 cm 左右，用钢直刀轻刮整平。计算此时的干密度，为最小干密度。
3. 将试样筒、套筒、加重盘顺序安装，并紧固于振动台上，开动电机振动。观察检振表，调整电机转速，控制振幅在 0.64 mm 左右，振动 8 min，

停机。

4. 测量加重盘下沉量，计算此时的干密度，为最大干密度。

5. 重复步骤 1~4，同一级配实验重复进行 4 次。

实验采用漏斗松填法得到最小干密度。相对密度仪将振动力和静压力联合作用于沙石料上，使大小颗粒相互充填和挤紧，可得到试样的最大干密度。对该指标的测试，可以得到不同级配沙石堆积体的颗粒构架，结果分析取最小干密度、最大干密度以及加重盘下沉量数据，经对应换算即最大孔隙率、最小孔隙率与受扰压缩量。其中，取沙石混合体的颗粒比重为 2.70。由于每个粗颗粒均代替同重量的、个数多的细颗粒造成单位体积重量增加，如果仍利用沙石的经验颗粒比重，直接用干密度换算孔隙率，则势必造成孔隙率的变化值有误差。此处，因为级配的中值粒径相同，则误差较小，不影响数据的趋势性。

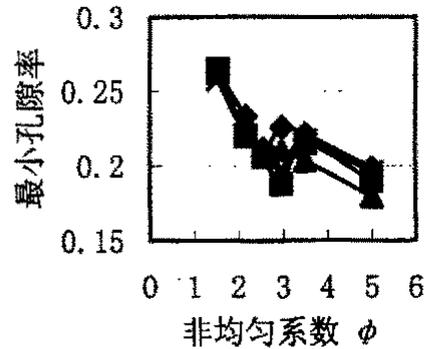
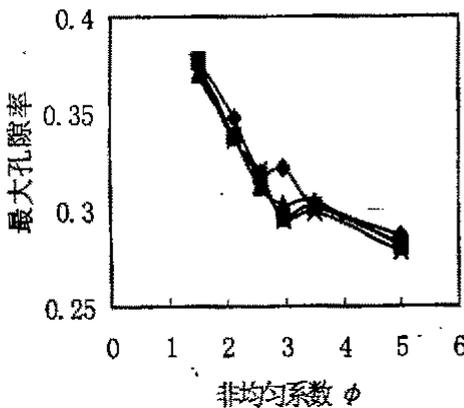


图 7-7 不同非均匀度沙石的最大孔隙率

图 7-8 不同非均匀度沙石的最小孔隙率

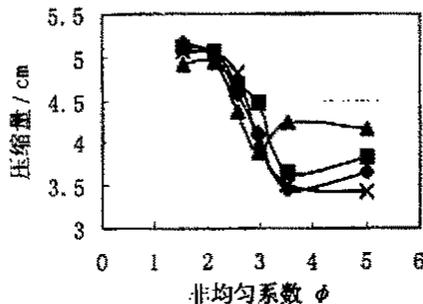


图 7-9 不同非均匀度沙石的压缩下沉量

结果如图 7-7、7-8、7-9。实验表明，随着沙石非均匀系数 ϕ 的增大，经漏斗松填的最大孔隙率、振实后的最小孔隙率及可压实空隙量（加重盘压缩下沉量，即对应着孔隙率的变化率）均减小，内摩擦角的峰、残值也增大。

在沙石非均匀度增大从而呈现自组织临界性的分界点附近 ($\phi=2.15-2.55$)，上述三个指标都有一些较大变化或转折。可以认为，这是由于较大颗粒的骨架作用已部分形成，可压实性陡然减小。

可见，非均匀度较大的沙石大小颗粒相互填充较好，咬合能力强，体系抗外界扰动能力增强。大颗粒增多达到颗粒发生局部直接接触，形成的颗粒骨架效应也起到了抗扰作用。

对比一种沙样中四次相对密度的实验结果，可看出同一组均匀沙石，每次实验的最疏松或最密实状态都几乎相同，加重盘下沉量也差不多；而同一组的非均匀度大的沙石，在初始孔隙率大致相同的情况下，最小孔隙率及孔隙率的变化率数据则相当离散，尤其可压实空隙量数值变化甚剧。这表明非均匀沙堆在自然堆积过程中具有较大的随机性，导致微结构空间分布的复杂性，宏观上体现为密度的差异性。

7.1.2 散粒体的应力分析

散粒体的变形分为两种基本形态：结构变形和弹性变形。

颗粒或象单个固体一样的团粒的位移产生结构变形。这时，堆体好象是一个由各构件所组成的联系数量不够或者是有的联系被破坏时的系统。在加荷或其它形式的外界作用下，要么散粒体颗粒转移到新的更加稳定的相对平衡位置，要么联系断破而发生破坏。结构变形是不可恢复的（不可逆），并带有断裂性质，即不是坐标的连续函数。体积改变与否都可能发生结构变形。

弹性变形是由颗粒本身的可恢复和不可恢复的变形引起的。变形在每个颗粒所占据的体积范围内是连续的，非线性的。

各种变形值之间的关系决定于颗粒的材料、形状及密实程度。我们研究的散粒体主要是无粘性、具有刚性的颗粒，其结构变形通常具有最大的数值。结构变形的主导地位决定了堆体的应力大小和分布。散粒体颗粒彼此的接触不是沿着它们的整个表面，而是在单个的接触点。研究表明，其上的实际应力超过以连续介质模型（在研究应力状态时，用沿着散粒体任意断面连续分布的想象的力代替作用在散粒体单个颗粒接触点上的实际的力）为基础、计算得到的平均应力的好多倍^[252]。

散粒体堆内的微观应力分布是不同寻常的。测量散粒体堆底部的应力分布提供了探索堆体应力分布及其形成历史的有效方法。在研究散粒体堆底部的应力分布中，Edwards 和 Oakeshott 提出了散粒体中有拱结构形成的概念，即堆体中的应力以拱的方式传播^[253]。他们认为堆的负荷不是垂直，而是沿斜

线向下传递到底面的一点，并且该点的压力比例于通过它的斜线长度。由于最长的斜线不在中间，因此底部压力并非中心处最大。这与实验测得的结果相符，如图 7-10。图中，堆底 E、G、M 点的压力分别比例于斜线 EF、GL、MN 的长度，因此最大压力出现在 G 点，而不是中心。

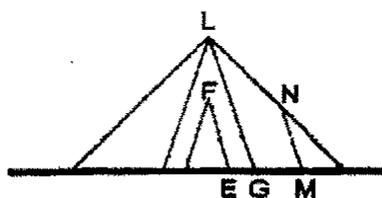


图 7-10 “拱”概念示意

“拱”假设在理论分析和数值计算散粒体应力分布和大小时，起到了重要作用，而且基本可以得到满意的结果。但真实沙堆的应力并不是如此简单的线性传递。Loic Vanel 等人采用粒径为 0.74 和 0.9 cm 的沙粒做了精密的实验，并采用交叉偏振光镜成像技术，得出二维沙堆的应力分布图，见图 7-11^[251]。它呈现出很大的空间不均匀的链状结构（应力链），整个堆体的某一小部分承担着大部分的力。大量的仿真和实验证明，这些链的结构和性质在散粒体系统里的动力学和静力学中起着特殊而明显的作用。

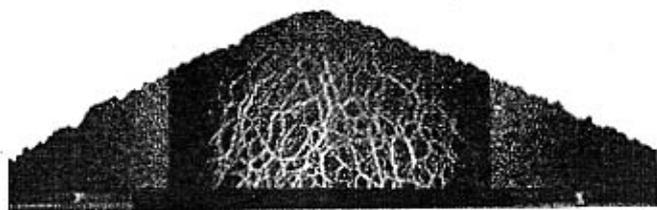


图 7-11 二维均匀颗粒散粒体的应力链

散粒体的应力链形成与其结构形态有着密不可分的关系。结构是应力传递的骨架，结构的复杂性决定了应力分布的复杂性。

另外，沙堆中应力分布的链状结构很可能具有无标度的分形结构。如果能够被证实，应力的分形生长可能将是散粒体临界演化过程中空间分形结构的又一证据，同时也可能是临界演化复杂性的根源之一。

7.1.3 散粒体临界坡面复杂性分析

由于存在临空面，并且临空面具有倾斜的角度，处于堆体表层的散粒体颗粒的结构形式相对堆体内部的就更加多样化。当散粒体演化到临界状态时，其表层非常不稳定，介于静态和动态之间，多样的结构又处于极易变化的状

态。这时，结构的复杂性不仅表现在空间上，还具有时间性，是动态的。

堆体表层的粒子应力很小，但是它们处于散粒体应力链的上部末端。当处于临界状态的粒子受扰动时，不管它是否离开原来的位置，由于它的受力变化，都会影响到整个应力链。散粒体内大量不稳定结构的存在，致使这种影响可能是微弱的，也可能产生巨大的、能够改变应力链形式的连锁反应。应力链改变时，又会影响到表层的结构和应力。但是，由于表层粒子间的联系较弱，具有不连续性。当其处于临界状态时，内部应力链的微小变化也能致使其运动，并与其它粒子作用。这样，内部与表层的粒子同时都在相互作用、变化结构。这是系统整体的动态过程。粒子的不完全连续性与(结构)变形的不可逆性的相互作用产生了一系列新的动力学现象。目前还无法确定这种复杂的应力与变形关系。

7.1.3.1 坡面颗粒暴露度分析

所谓暴露度是学者们在泥沙输移研究中，认为颗粒相对于平均床面的露出程度。许多研究者建议用暴露度来表示颗粒在床面上所处的位置。^[255]这里，笔者在研究散粒体临界坡面时，引入这一概念来分析坡面粒子的起动和相互作用。

20 世纪 50 年代，爱因斯坦在研究均匀沙和非均匀沙推移质输沙率时引入了相对暴露度系数 f ，以反应被其它颗粒环绕的颗粒的起动能力。国内外关于沙粒暴露度进行了大量的研究^[236, 237]。在国内主要有两种方法，一是以统计理论得到的暴露度公式^[258]；另一种以实验资料为基础，通过分析得到暴露度的计算公式^[259]。

依据统计理论，任意一颗沙粒在坡面的位置是随机的，可能被其它颗粒所掩盖而不能起动，这种情况称为完全遮蔽。也有可能位于前后沙粒的顶部，很容易启动，这种情况称为完全暴露。一般沙粒的位置介于这两种情况之间。用坡面所研究颗粒 d_i 的沿坡面方向的最低点到该颗粒与其下游相邻颗粒 d_j 沿坡面方向的最高点之间的坡面法向距离 Δ (见图 7-12) 来表征沙粒在坡面上所处的位置，并且定义 $\Delta = \xi d_i$ 为颗粒处于坡面的绝对暴露度。 ξ 为暴露度系数。当颗粒的具体位置确定后， ξ 值便可确定下来。若 ξ 取 0~1，表示颗粒 d_i 位于坡面表层，若 ξ 取 1~2，表示颗粒 d_i 位于坡面次表层。

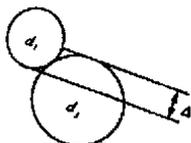


图 7-12 暴露度示意图

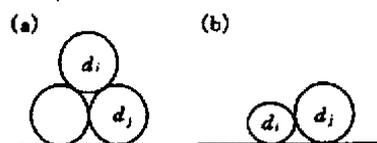


图 7-13 颗粒在坡面的相对位置示意图

对于坡面表层的颗粒,如图 7-13 示,研究颗粒位于(a)种位置,即所研究颗粒的最低点与下坡向相邻颗粒的最高点位于同一水平面时,其暴露度系数 ξ 趋于 0,对均匀沙最小为 0.134;在(b)种位置,即所研究颗粒的最低点与下坡向相邻颗粒的最低点位于同一平行于坡面的平面上时,取为 1;当所研究颗粒的最低点与下坡向相邻颗粒的球心位于同一平行于坡面的平面上时取为 0.5;从 0 到 1 中间为线性过渡。

沙粒在坡面起动具有必然性,也有偶然性。 ξ 越小,颗粒越不稳定,越容易起动。对于处于临界状态的散粒体坡面,所谓临界是就整体的平均意义而言。在临界坡面上,一些颗粒的 ξ 达到了其静止状态时的最小值,颗粒也获得了其起动所需的最小力或力矩。这些颗粒开始向下坡滑动或滚动。这些颗粒的运动,一方面作用于下方的颗粒上,为其提供动力;另一方面使其上坡向相邻的颗粒完全或部分失去支撑,同时,可以使其 ξ 值变化。这样,造成的连锁反应可能会引起坡面上发生各种规模的雪崩。此时,涉及的颗粒就可能不仅仅是 ξ 值变小的颗粒,也会引起较大 ξ 值颗粒与之形成一整体的坡面流,即大规模的雪崩。

颗粒在坡面的位置是随机的,暴露度的分布也是随机的,其准确的分布规律很难确定。一般计算时,可以将不均匀颗粒坡面的暴露度假定为均匀分布,而均匀颗粒坡面的暴露度分布可以视为常量。可见,不均匀颗粒坡面的暴露度的分布比均匀颗粒的更复杂。因此,当坡面处于临界状态时,非均匀颗粒的坡面动力行为比均匀颗粒的也要复杂。

7.1.3.2 临界坡面颗粒运动行为分析

散粒体颗粒的运动,既是物质运输的过程又是能量运输的过程,是耗散性和非线性的机制造成的复杂过程。

在临界态,沙堆遵从开放系统的整体动力学规则。位于沙堆中的一粒沙就代表了单位势能,而势能的大小通过沙粒离台面的高度来测量。当沙粒倒塌时,势能就转化成了动能。当倒塌的沙粒逐渐静止下来时,这个动能的一部分就耗散掉了,也就是转化为了热能,而另一部分可能转换成可储存在组织结构中的内能或传递给了其它沙粒。因此整个系统中就存在能量流动。流动的能量分为两部分,一部分在运输过程中被耗散掉,另一部分做为运输的对象组成,沿着坡面的下坡方向在系统组元之间传递。

颗粒在运动过程中,与其接触的颗粒有两种关系:摩擦和碰撞。摩擦包括滑动摩擦和滚动摩擦,临界态下,大、中等规模的崩塌是以滑动摩擦为主。摩擦作用对坡面扰动相对碰撞的作用较小,但仍可以使坡面颗粒结构重组。

碰撞是坡面产生连锁反应的主要导火索，是下落颗粒冲量和动能瞬时改变的主要作用方式。

每个沙粒沿坡面滑落时，其冲量和动能如果能被所触到的坡面单个静止颗粒或颗粒团克制和吸收，就会停留在坡面的某个位置上，否则就会滑出坡面。如被碰撞颗粒本身惯性能较大或背后有颗粒团支撑，即沿碰撞方向上会有较大稳定性，就仍然保持原位不动，同时还会吸收掉扰动沙粒的部分或全部能量；如果本身不稳定，碰撞后就会离开原来位置，产生滚动或滑动。这样坡面该处结构被改变，甚至会产生连锁反应，扩大结构改变的范围，乃至破坏。局部来看，只有几种可能现象；但从坡面整体来看，其组合的随机现象就难以计数。

颗粒或颗粒团的位移像是一个由各构件所组成的联系数量不够，或者是有的联系被破坏时系统的结构变形。坡面结构变形是不可恢复的，即不可逆的。有时大的变形带有断裂性质，即不是坐标的连续函数，而且会明显改变坡面层的体积。当然，对整个坡体来讲，应是很小的变化。

物质的运输就表现在所有产生过位移的沙粒或运动或静止的状态变换过程中。沙粒起动就会使其原位置处的局域结构破缺；其运动过程中，还可能与接触的粒子作用而改变行经区域的结构；当其静止下来时，又使所在区域增加了组元而变换结构。每个产生位移的沙粒都有这样的过程，造成被扰动区域结构的不断变化。因此，运输的过程也是沙堆系统组织结构不断改变的过程。对于扰动沙来说，它下滑的过程中可能触及的结构更是无法预测的。

结构的复杂性导致了系统行为的复杂性；而复杂的动力行为又造就新的复杂结构。

均匀散粒体的坡面上，每次大雪崩之前的几次扰动中，总会出现坡面整体向下压缩变形的现象，形成一定宽度的错台，但落沙没有或很少。这是坡面全局重新整合结构的现象，使坡面密度增大，是以自组织方式增强整体稳定性和抗干扰能力。坡面颗粒的稳定性是有方向的，而且大小不同。大规模雪崩形成之前，每次落沙扰动会将所遇的沿下坡方向最不稳定的颗粒或颗粒团扰离原位(当然也可能引起局部的崩塌)，而形成区域稳定状态，即以颗粒群化后的局部稳定情况为主，进而改善坡面整体的稳定性。因此，其物质运输表现出周期性，间歇以全局大规模雪崩的形式出现，而缺少中间规模的雪崩形式。

非均匀散粒体的物质运输过程以各种规模的雪崩形式出现。在微扰下，临界坡面上的单个颗粒离开原位下滑的同时，推动一个或多个颗粒从而导致

它们下滑，下滑的颗粒又轮流地以链式反应的方式和其它颗粒相作用，这种多米诺效应造成“雪崩”的形成。但是每次“雪崩”的规模是不同的，而且服从负幂律分布。也就是说每次产生输运量的大小都不相同，而且呈现出无标度性。具有间断平衡的阵发性、前后事件的长程相关性以及时空结构的分形特征表现出自组织临界性的特征。其复杂性明显高于均匀散粒体。

7.2 散粒体临界坡紊动层和层动层假说

固体力学模型与流体力学模型很可能共同适用于分析散粒体临界坡面的组元间关系和复杂性机制。已有对散粒体临界复杂性的研究基本上多是从固态角度进行分析。这里，我们从流态属性角度做一些探索和尝试，来解释散粒体的临界复杂性行为。

7.2.1 流体中的湍流与层流

流体有层流和湍流两种截然不同的流动形态。层流是无涡旋的、平滑的不相混合的分层流动，各部分流体之间，除交换分子外，无宏观混合流动；湍流是充满了大大小小的涡旋，各部分流体在沿一定方向进行主要流动的同时，进行着宏观的混合运动。若流动是定常的，层流中引入染色剂所观察到的染色图象是规则的，而湍流则是杂乱无章的。总之，层流是一种有序的运动；湍流却具有高度的复杂性。

流体运动中，湍流占有主导地位，由于受到流速、流体粘性、密度等内部的环境干扰等外部的各种复杂的因素综合影响，虽然整体上保持着一定的流动方向，但内部分子的运动却显得紊乱无序，复杂多变，具有不规则性和随机性。湍流可以分化为许多旋转和运动方向不同的流体微团，而这些微团也在时刻变化。PerBak 研究认为湍流是一种弱混沌，具有 SOC 的特征属性^[25, 181]。自然界中，湍流的存在具有普遍性。大气、河流、海洋等宏观流态物质和等离子体等微观粒子的整体运动都具有湍流属性。

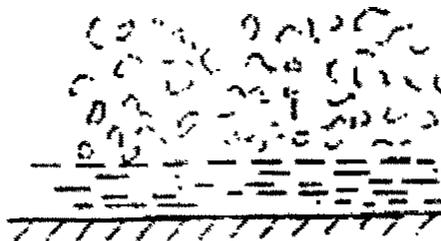


图 7-14 边界层双层模型

在流体力学中, 考虑到湍流中层流的影响, 有一普朗特——泰勒假说。这一假说基于两层模型的假设, 即湍流流动主体和层流内层组成^[260], 如图 7-14 所示。

边界都具有一定摩擦阻力和对流体分子的粘滞作用。由于边界的这些约束比湍流主体受到其它复杂因素作用强得多, 贴近边界的流体平滑地、不相混合地层流运动。并且由于流体分子间的粘滞, 使其可以保持一定的厚度。大于这一厚度, 边界的约束作用消失, 湍流的流体微团达到层流内层的边缘。河水的流动就是典型的这种形式。在河底泥沙基床就相当于河水的下侧边界, 贴近基床的水流受其粘滞和摩阻作用的影响大, 保持层流状态。随着向上距离的加大, 这种作用对水流的影响越来越小, 此时环境扰动等其它复杂因素的影响力显著表现出来, 使水流整体呈现湍流状态。

7.2.2 散粒体临界流态属性的紊动层和层动层假说

处于散粒体临界坡面上的每个沙粒的临空自由面的大小是不同的, 表现出的性质和行为也就不完全相同。我们将临界坡面类比于流体力学的普朗特——泰勒假设的边界层双层模型, 即湍流流动由湍流流动主体和层流内层组成。将临界的坡面层分为两部分——紊动层和层动层, 如图 7-15。

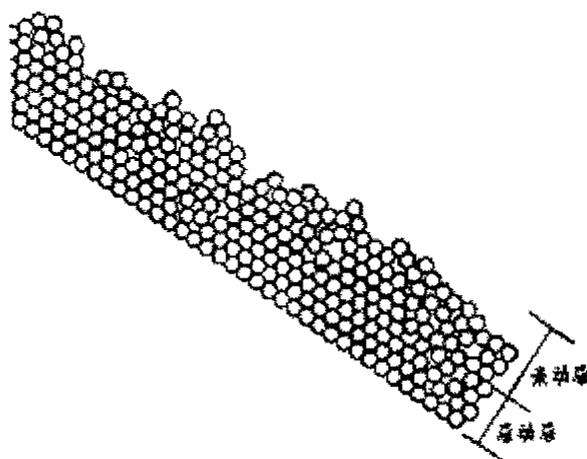


图 7-15 临界坡面结构示意图

紊动层是指临界坡面上的具有较大暴露度和临空自由面的、位于最表层的散粒结构。该层面的厚度不均, 起伏较大; 相对沙堆内部那种粒体间的紧密结构来讲, 存在严重的结构破缺, 极易受扰动而改变粒间结构, 产生塌滑。处于紊动层的颗粒运动时, 会以滑动、滚动或者跳跃等多种形式出现。该层受坡体的约束作用小, 动态的形式和静态的结构, 都是紊乱无序, 复杂多变,

具有较大的不规则性和随机性，类似于湍流的性质。

层动层一般位于紊动层的下面，相对紊动层，颗粒的临空自由面较小。该层的厚度较均匀，起伏不大；其组元间的结构形式介于散粒体内部和紊动层之间，存在一定的结构破缺，但较紊动层稳定得多。处于层动层的颗粒承受着紊动层的压力和下部不动层的支撑。由于受下部不动层的摩擦和颗粒的咬合作用，同时受到上部紊动层颗粒的压缩和摩擦作用，整体运动主要以滑动的形式为主。类似于流体贴近边界的层流层。

两层的组织结构都具有一定的结构强度，但是抵抗扰动的能力大小不同，层动层的结构强度大于紊动层。紊动层和层动层并不是固定不变的，受扰动的连锁作用可能会相互转化但以层动层向紊动层转化为主。

7.2.3 散粒体临界流态属性的机制分析

坡顶加沙的微扰直接作用于处于坡面上端的紊动层，破坏了其中极不稳定的粒间结构，并使其沿坡面向下运动，进而引起沙粒间的链式反应，使系统产生物质和能量的运输。

在链式反应的过程中，每个环节中运动起来的沙粒，都是下一个环节中的扰动源。最初的一些环节，扰动强度逐级放大，主要发生在紊动层，可能会一定程度地改变层动层的局部组元结构；中间各环节的扰动强度的大小变化具有随机性；而处于最后一些环节扰动强度的变化一般有两种可能：逐级递减或者逐级放大。逐级递减表明运动的沙粒都停止在坡面的某个位置，或仅有少量的沙粒离开坡体而终止了“雪崩”。此过程的运输主要产生在紊动层，仅有小部分的层动层参与。逐级放大则表明此时发生了遍及整个坡面的大规模“雪崩”，并有大量的落沙产生。此过程中紊动层和层动层都产生大量运输，而且层动层的运输量会占有相当的比例。整个链式反应过程中，沙粒间的摩擦和碰撞始终在耗散运动颗粒的能量。

处于坡面表层的紊动层在外界扰动下总会产生或大或小的运输。而层动层主要在链式反应逐级放大、扰动强度达到并超过层动层的整体稳定强度时，才会有大量的运输。此时才会有遍及整个坡面的大“雪崩”，以及大规模的落沙。

据此，我们认为落沙规模序列能否服从负幂律分布，与紊动层和层动层的厚度有关，特别是紊动层厚度的影响。紊动层厚度较大时，可以产生各种规模的落沙，而且小规模出现频率高，大规模的频率低，呈负幂律分布，表现出 SOC 的特征；其中，中小规模落沙都发生在紊动层。只有大规模落沙才

涉及层动层。当紊动层厚度较小时,如果落沙不涉及层动层,只有小规模,而大规模落沙主要是由于涉及层动层。因此,系统仅产生小规模和大规模落沙,缺少中等规模的。大规模落沙时,由于牵动了较厚的层动层使系统偏离了临界态,因此不表现 SOC。

每一种组织结构都蕴含一定的能量,结构不同,其中储备的能量大小也就不一样。换句话说,系统规模相当,在组元相同情况下,如具备的能量大小不同,则其内部的组织结构也就存在差异,石墨与金刚石的差别就是很好的例证。紊动层和层动层的组织结构是不同的,所以两层储备能量的能力是不同的。因此,能量输运和耗散的同时,保持自身结构适应所需储备的能量大小的变化的要求,是不同的散粒体临界状态时具有不同厚度的紊动层和层动层的主要原因。或许这是散粒体系统临界状态输运的组织原则之一。

7.2.4 散粒体临界流态假说对实验现象的解释

用粒径相同的均匀沙构造的小尺度临界沙堆中,紊动层相对于层动层的厚度比值较大,能够表现 SOC。当系统尺度增大后,沙堆高度增大、组元数量增多,潜在的能量较大,相对小尺度沙堆,系统的组织结构发生了变化(多尺度米堆实验表明,大小米堆坡面米粒间的结构存在较大的差异)。其中,较为关键的就是紊动层相对于层动层的厚度比值减小。达到临界后,沙堆中潜在的势能可能转变成动能和粒子崩塌动力,成团的沙粒被加速。由于上部下落的沙粒的加速过程变长,动能增大,沙粒在下落的过程中以较大的作用力作用于所经过之层动层,大规模的雪崩不可避免。我们在大尺度的均匀沙堆实验中观察到,均匀沙坡面较为平整,表明紊动层厚度较薄。坡面达到失稳临界角时,各区域实际上均已达到失稳临界状态,体系没有抗扰耗能的储备。这样,在沙粒加速下滑的放大的扰动下,坡面所有区域均超过稳定极限。此时,系统的鲁棒性消失或减弱,敏感性占优势,所以不具备 SOC。

当采用由多级粒径组成、非均匀系数较大的沙石构造大尺度临界沙堆时,其材料几何的特点和大小颗粒搭配相间的组织形式决定了整体是微结构空间分布差异很大的堆积体。在坡面宏观上处于失稳临界角时,表层的各局域坡度并不一致,结构的稳定程度也大不相同,表明具有较厚的紊动层。图 7-16 展示出实验过程中坡面的局部结构照片。局部亚临界区的存在,材料内摩擦角的增大,都限制了系统各部分敏感性递增的趋势,因此不易大范围地扰动到层动层。使得对于沙堆各部分而言,由邻域传来的扰动强度不至于总是超过其自稳能力,该部分仍面临邻域下滑的沙粒停止在该域(即活动性消失),

以及沙粒继续下滑或带动该部分其他沙粒下滑（即活动性分叉）的选择，则当各部分活动性消失与活动性分岔的概率在总体上平衡时，动力学稳定性仍具有鲁棒性，这样大尺度的沙堆也会出现 SOC 现象。

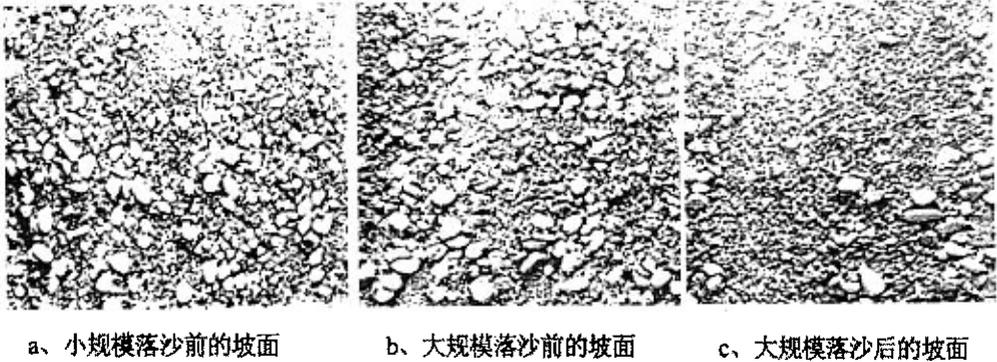


图 7-16 实验不同时期的临界坡面形态放大照片

图 7-16 展示了大尺度非均匀沙堆落沙实验中几个不同时期的坡面结构形态放大照片。在每次产生落沙前，坡面的平整度都较差（如 a、b 图），存在局部的超临界态区域，结构形态表现出具有一定厚度的紊动层的特征。在大规模落沙之前，坡面上超临界态的区域明显增多，并有连接成整片大区域的趋势（b 图）。此时，在上端的微扰作用下，发生遍及整个坡面的大“雪崩”，产生大规模落沙。而“雪崩”结束后，坡面结构形态发生了较大的变化。整体的平整度较高，仅存在极少数的小范围超临界态区域（c 图）。原有的紊动层基本都不存在了，层层层中未脱离沙堆的部分沙粒间结构发生改变，转化成新的紊动层。

沙堆坡面表层的沙粒骨架结构相对沙堆内部存在一定的破缺，致使其密度较内部小。而表层内的紊动层相对层层层结构破缺得更严重，因此紊动层密度最小，其次是层层层，层层层以内的密实度较大。正是沙堆由外到里的密度不规则梯度变化，使其系统处于临界状态时各部分的应力大小不同。如图 7-11 所示，应力网沿坡面法线方向，由里向外，逐渐稀疏。

散粒体临界坡面紊动层和层层层的假说，可以较好地解释小规模均匀散粒体和大规模非均匀散粒体能够表现出 SOC，而大规模均匀散粒体不能呈现出 SOC 的原因。依此假说，临界态下，沙堆坡面紊动层和层层层的结构特点是能否呈现 SOC 的组构特征之一。

具有 SOC 的系统刚好处于混沌的边缘上，是阵发混沌。阵发（Intermittency）是耗散系统由周期运动向混沌运动转变的一种普遍方式。阵发混沌的主要特征是在它发生的参数临界点附近的混沌时间序列中存在类似原来周期

运动的、与标志混沌运动的“湍流相”无规则交替出现的“层流相”^[261]。因此我们经常称在阵发混沌出现后已经消失的周期运动的“鬼魂”仍旧存在。紊动层和层动层假说对散粒体临界坡面呈现 SOC 的解释也正表明了两相共同作用的特点。

在自然界中，有许多散粒体输运现象表现出如上机理。最典型的就是天然河道宽级配床沙的输移和坡面侵蚀产沙过程。这些现象中非均匀散粒体的分布及其输移特点与我们在实验中观察到的非均匀沙堆坡面输运过程具有很大的相似性，紊动层和层动层的划分及输运机制也均有表现。依据现场观察和实验，它们的输运规律具有自组织临界性^[153, 154, 225]。这些也正是非均匀沙石特有的组构特征和组织原则所决定的。

7.3 小结

散粒体临界状态下，既具有固体的属性，又表现出流体的性质。本章从这两方面探讨了散粒体的复杂机制。

分析散粒体多种多样的细观结构形式，探讨了结构的复杂性；进一步研究其内部应力分布的复杂应力网形式。并通过大型相对密度实验结果，分析表明非均匀沙堆在自然堆积过程中具有较大的随机性，导致微结构空间分布的复杂性，宏观上体现为密度的差异性。

在细观结构和内部应力分析基础上，深入研究了散粒体临界坡面颗粒的暴露度分布和作用机制的复杂性。临界态下的颗粒的运动行为直接影响结构的形式变化，与系统的能量和物质输运密切相关。

散粒体组构的复杂性决定了应力分布的复杂性，进而也决定了临界坡面颗粒形态和运动的复杂性。不管是堆体内部，还是坡面，非均匀沙堆都呈现出比均匀沙堆更大的复杂性。

从散粒体临界状态的流态属性角度考虑，我们提出散粒体临界坡面紊动层和层动层的假说，并依此探讨散粒体临界坡面的复杂作用机制，分析了 SOC 能否呈现的原因。假说表明了散粒体临界态的固流两种属性的同时存在的相容之处。

SOC 现象是发生在临界状态的行为，系统能够维持在临界状态还必须同时具备两种动力学特征，其一敏感性，系统处于临界状态，微小的扰动也可能产生遍及全局的连锁反应；其二鲁棒性（robust），即相对环境或系统本身条件变化的系统的演化过程仍能保持整体不受破坏。工程领域的散粒体系统组构特征包括沙堆颗粒本身的物理特性和颗粒在空间的分布堆积方式等。组

构特征在微观上决定了颗粒间相互扰动与相互制约的方式与强度，当大量颗粒相互作用效应满足同时具备这两种动力学特征的条件时，系统动力学行为在宏观上表现出 SOC。从这种意义上讲沙堆的动力学行为取决于系统的组构特征而非尺度效应。大尺度沙堆实验的结果证实了这点。也正是基于这些原则，我们得出前面的结论。

关于散粒体的理论体系尚不很成熟，主要还停留在静力学阶段。大尺度沙堆模型实验及对散粒体输运性质的探讨，有助于开展进一步的动力学研究。

结 论

沙堆等散粒体是由大量组元构成的、带有局域相互作用和广延空间自由度的耗散动力系统。这类系统具有广泛的代表性,诸如粉尘、沙石材料、山体边坡等,都是常见的、需要有针对性地具体研究的对象。作为控制大量广延耗散动力系统的普遍组织原则, SOC 可能成为对自然界中一大类空间一时间域中的演化过程进行解释的一个全新理论。沙堆模型就是描述 SOC 的最简单范例。沙堆系统具有共同的整体属性——复杂性。正是复杂性所致,与之相关的许多问题都还没有被清楚地认识和彻底解决。

本文围绕沙堆模型的复杂现象,开展从实验现象分析到专题理论的研究;进一步研究 SOC 理论在自然灾害中的普适性;并且探索在 SOC 研究方法和理论框架下的工程技术应用;最后,探讨了散粒体复杂性的机制。

围绕上述内容和技术路线,主要工作及结论如下:

1、通过多种形式的大尺度单面坡沙堆实验和多尺度单面坡米堆实验,分析沙堆模型临界演化行为的复杂性。

沙堆模型的 SOC 具有空间和时间两大类分形结构。在研究中,本文首次对落沙间隔时间序列进行分析,证明非均匀沙堆的落沙间隔时间同落沙规模序列一样,具有分形特征,而均匀沙堆的落沙间隔时间序列是准周期行为。

实验表明,沙堆颗粒的磨圆度和形状虽是沙堆的组构特征,但对沙堆模型 SOC 的影响不显著;米堆实验还表明“规模效应”的实质是系统组构特征的改变,致使系统本质发生变化造成的;坡面插桩和增设坡脚平台等人为措施影响沙堆落沙量值,但不能改变沙堆原来的规律属性,即非均匀沙堆表现为 SOC,均匀沙堆表现为序列的准周期行为和规模的正态分布。

沙堆的临界复杂性与其系统的某些组构特征和组织原则相关,这种规律属性是系统自身固有的,不易受外在因素的影响,具有鲁棒性。进一步证实,颗粒非均匀性作为系统组织原则是影响 SOC 的因素之一。

2、在实验基础上,借助复杂性分析方法,进行散粒体复杂性理论的专题研究。

结合沙堆模型实验分析的结论,探讨了沙堆模型的时空长程相关性。采用 R/S 分析法证明了呈现 SOC 的非均匀沙堆具有时间长程相关性,而不呈现 SOC 的均匀沙堆没有。

引入多重分形理论和方法,分析沙堆模型 SOC 的空间和时间上的多层次

分形结构, 得出落沙规模序列和落沙间隔时间序列的广义维数和奇异指数等指标特征谱。建立简化的多重分形动力模型, 分析了沙堆模型 SOC 的多重分形动力行为。进而, 确定了沙堆模型 SOC 的多重分形特征, 表明非均匀沙堆比均匀沙堆具有更高的复杂性。依据多重分形的数值和谱图特征, 更深入地理解沙堆模型 SOC 的深层次统计特征和属性, 是 SOC 系统演化规律和动力机制研究的有效途径。

3、采用多种方法分析自然灾害的规律属性, 探讨 SOC 理论在自然灾害中的普适性。

斜坡灾害是沙堆模型直观表象的自然现象。在对滑坡、崩塌和泥石流的空间分布和暴发时间序列分析时, 证明了这三种斜坡灾害幂率分布的共性和 SOC 特征。

考虑到临界状态下, 许多差异很大的物理系统具有极大的相似性, 分析洪水和沙尘暴的实测资料。研究 DFA 分析法, 分析水系的实测最大洪峰流量时间序列, 证明序列具有长程相关性; 进一步介绍 DFA 分析法的广义化方法——MF-DFA 分析法, 将其用于强沙尘暴序列分析, 检测出长程相关性、确定其多重分形结构并得出多重分形奇异指数谱。

从方法研究的角度考虑, 采用 R/S 分析法计算、比较, 论证了几种方法的相同作用, 证明分析结果具有可比性。结果表明, 洪水、沙尘暴和斜坡灾害这三类物理性质和成因相差很大的灾害系统, 表现出相似的规律属性。时空结构的幂率分布、长程相关性等属性的存在或许可以一定程度地说明自组织临界动力学的普适性。

4、在自然灾害的复杂性和内在规律性分析的基础上, 结合沙堆模型的演化过程, 给出了 SOC 和准周期两种属性的灾害预测预报思路和方法; 从可靠性设计角度考虑, 研究了复杂性理论指导下的极值统计法的应用, 推导出幂率特征的极值分布属于极值 I 型的渐进分布, 并应用于实例的计算。以 SOC 等复杂性理论为指导, 可以为灾害预测预报、防治工程规划和设计提供新思路。

5、在进行道路选线设计中考虑交通工程与环境的相互作用和协调性是选线工程的新课题。交通工程与环境构成了典型的复杂系统。元胞自动机是复杂性科学研究的重要而有效的手段之一。本文提出了广义导向线定线法和基于环境的定线元胞自动机模型的设想。该方法是以实现线路工程建设与环境保护相协调为目的, 利用元胞自动机自动演化的原理, 进行道路选线设计的新理念新方法研究。

6、散粒体临界状态下,既具有固体的属性,又表现出流体的性质。固体力学模型与流体力学模型很可能共同适用于分析散粒体临界坡面的组元间关系和复杂性机制。我们从这两方面分别探讨散粒体的复杂机制。

分析散粒体堆积结构、密度、应力分布等组构的复杂特征,并通过大型沙石密度实验,表明非均匀沙堆在自然堆积过程中具有较大的随机性,导致微结构空间分布和密度的复杂性。进一步分析了坡面散粒体的暴露度和颗粒间作用的复杂性。不管是堆体内部,还是临界坡面,非均匀沙堆都呈现出比均匀沙堆更大的复杂性。散粒体内部和表层的组织结构的复杂性决定了其临界演化的复杂性。

从流态属性角度做探索性分析。借助流体力学的湍流与层流理论思想,提出散粒体临界流态属性的紊动层和层动层假说,并用于解释散粒体 SOC 的复杂性行为机制和现象。将临界沙堆坡面划分为紊动层和层动层,具有较厚的紊动层是沙堆系统呈现 SOC 的组构特征之一。

本文的创新性体现在实验设计与分析、理论研究和应用研究几方面:

1、先前的实验表明,散粒体呈现 SOC 与系统的组构特征和组织原则有关,作为组织原则之一的颗粒非均匀性是影响因素。从散粒体的磨圆性和形状着手,采用不同的材料——人工碎石和大米,研究散粒体的临界演化行为;对沙堆施以人为影响的多种形式(坡面插桩和增设坡脚平台)沙堆实验,探讨环境因素的改变对沙堆的影响。分析中,首次对落沙间隔时间序列进行分析,证明非均匀沙堆的落沙间隔时间也同落沙规模序列一样,具有分形特征,而均匀沙堆的落沙间隔时间序列是准周期行为。

2、引入多重分形理论和方法,分析非均匀沙堆 SOC 的空间和时间上的多层次分形结构;建立简化的多重分形动力模型,并分析散粒体自组织临界状态的多重分形动力行为。

3、在国内外已有的 SOC 应用研究基础上,进行如下工作:

(1) 分析斜坡灾害、洪水和沙尘暴的复杂属性,探讨 SOC 在自然灾害中的普适性;

(2) 在 SOC 理论框架下,将极值统计法应用于灾害防治的研究;

(3) 将 SOC 研究的主要方法——元胞自动机用于交通选线设计,探索基于交通工程与环境协调思想的选线新方法。

复杂性科学已经引起了众多学者的极大关注与兴趣。它是对自然界中一大类空间-时间域中的过程进行解释的全新理论,已为大多数物理学家及地理、生物、经济等各个领域的专家学者所接受。

本文是在这种大的学术氛围下，进行以散粒体自组织临界性为主的基础理论研究的同时，拓展本学科专业相关的基础内容和与其它学科的交叉研究。这方面课题的研究才刚刚起步，尚须进一步深入，工程应用上也仅为初步探索，二者的结合更是长期而艰巨的任务。总之，在许多方面还需继续深入和完善。

“科学不是而且永远不会是一本写完了的书，每个重大的进展都带来了新问题，每一次发展总要揭露出新的更深的困难。”

——爱因斯坦

致 谢

本文的研究工作是在我的导师姚令侃教授的精心指导下完成的。在论文的选题、研究、撰写与定稿等各个阶段，导师都付出了大量的精力，给予了具体的指导。在攻读博士学位期间，导师对作者的学习、生活和工作都给予了亲切关怀、热情帮助和谆谆教诲。导师严谨、博学、求实的治学态度，将使我受益终生。一日为师，终生为师，这是我的荣幸。在此，谨向导师表示最诚挚的敬意和衷心的感谢！

在学习和实验方案设计和实施过程中，笔者得到了西南交通大学土木工程学院蔡英教授、蒋关鲁教授、陆阳教授、罗强教授，廖敬梅等老师的帮助及西南交通大学道路与铁道工程铁道部开放实验室的大力支持，表示深深的谢意！

在西南交通大学学习、生活和研究工作的三年中，与杨明、李世雄、苏凤环、姚裕春、杨庆华、高召宁、陈春光、汤家法、王沁、蒋良滩、王元勋、周志林和王广军等师兄弟共同探讨学术、研究问题、做实验，一起玩耍、摆龙门阵……。这些乐趣都仿佛昨日，令人难忘。师兄弟们为我的学习和论文写作提供了很多帮助，一并表示感谢。

感谢我的工作单位兰州交通大学给了我这么好的学习机会，感谢兰州交通大学土木工程学院领导、老师和同事对我的关心、支持和帮助。

感谢我的妻子钱意女士，没有她的关心、支持和理解，并做为我生活上的坚强后盾，我的学业将难于完成。

感谢我的父母和岳父母对我的关心和支持。

2005 年于成都西南交通大学

参考文献

- [1]曾广荣,易可军, 欧阳旭清等. 系统论 控制论 信息论与哲学[M]. 中南工业大学出版社. 1988, 1.
- [2]王雨田. 控制论 信息论 系统科学与哲学(第二版)[M]. 中国人民大学出版社,1988,3.
- [3]张道民. 软科学基础[M]. 青岛海洋大学出版社. 1992, 9.
- [4]苗东升. 系统科学原理[M]. 中国人民大学出版社. 1990, 5.
- [5](美)米歇尔·沃尔德罗普著, 陈玲译. 复杂——诞生于秩序与混沌边缘的科学[M]. 三联书店. 1997,8
- [6]中国科学院《复杂性研究》编委会. 复杂性研究(论文集). 科学出版社. 1993, 7.
- [7]王寿云, 于景元, 戴汝为等. 开放的复杂巨系统 浙江科学技术出版社. 1996, 12.
- [8]魏宏森, 宋永华等. 开创复杂性研究的新学科——系统科学纵览[M]. 四川教育出版社. 1991, 12.
- [9]钱学森,于景元,戴汝为. 一个新的学科领域——开放的复杂巨系统及其方法论[J]. 自然杂志. 1990,1
- [10]成思危. 复杂性科学探索(论文集)[M]. 民主与建设出版社. 1999,8
- [11]Mandelbrot B.B. The Fractal Geometry of Nature[M]. Freeman, California, 1982.
- [12](法)曼德尔布洛特. 分形对象——形、机遇和维数[M]. 世界图书出版公司北京公司: 1999, 12.
- [13]李后强、汪富泉著. 分形理论及其在分子科学中的应用[M]. 科学出版社,1993
- [14]赵年松. 非线性科学——它的内容、方法和意义[M]. 科学出版社. 1994, 2.
- [15]谢和平. 分形—岩石力学导论[M]. 北京:科学出版社,1996
- [16]张济中. 分形[M]. 清华大学出版社, 1995, 8
- [17]普里戈金,斯唐热. 从混沌到有序——人与自然的新对话[M]. 上海译文出版社,1987.
- [18]郝柏林. 从抛物线谈起——混沌动力学引论[M]. 上海:上海科技教育出版社,1995.
- [19]吴祥兴,陈忠. 混沌学导论[M]. 上海:上海科学技术文献出版社,1996.
- [20]仪垂祥. 非线性科学及其在地学中的应用[M]. 北京气象出版社, 1995.
- [21]尼科里斯,普里高津著. 探索复杂性[M]. 成都:四川教育出版社,1986
- [22]Per Bak, Chao Tang, Kurt Wiesenfeld. Self-organized Criticality: an explanation of $1/f$ noise [J]. Phys Rev Lett, 1987, 59 (4) : 381-384
- [23]Per Bak, Chao Tang, Kurt Wiesenfeld. Self-organized criticality[J]. Physical Review A, 1988, 38(1): 364-374.

- [24]冯端, 金国钧, 凝聚态物理学新论[M].上海:上海科学技术出版社,1992:354-398
- [25]Bak P and Chen K. Self-organized criticality[J], *Sci. American*. 1991.264 (1) : 26-33
- [26]谷超豪. 别有洞天——非线性科学[M]. 湖南科学技术出版社. 2001: 114-145.
- [27]郭爱克,孙海坚.生命与思维——在混沌的边缘演化[J].科技导报,1998,1:13-17
- [28] P.Evesque, D.Fargeix, P.Habib, M.P.Luong and P.Porion. Pile density is a control parameter of sand avalanches. *Physical Review E*.1993,7(4): 2326-2332
- [29]Hernán A.Makse, Shlomo Havlin, Peter R.King & H.Eugene Stanley. Spontaneous stratification in granular mixtures.*Nature*.1997, 386(27): 379-382
- [30]Hendrik J.Blok and Birger Bergersen. Effect of boundary conditions on scaling in the “game of Life”. *Physical Review E*.1997, 55(5): 6249-6252
- [31]J.M.Carlson, J.T.Chayes, E.R.Grannan and G.H.Swindle. Self-organized criticality in sandpiles: nature of critical phenomenon. *Physical Review A*.1990,42(4):2467-2470
- [32]Imre M.Jánosi.Effect of anisotropy on the self-organized critical state. *Physical Review A*. 1990,42(2):769-774
- [33]Brigita Urbanc and Luis Cruz.Order parameter and segregated phases in a sandpile model with two partical sizes.*Physical Review E*, 1997, 56(2):1571-1579.
- [34]Parthapratim Biswas and Arnad Majumdar.Smoothing of sandpile surfaces after intermittent and continuous avalanches:Three models in search of an experiment.*Physical Review E*.1998,58(2):1266-1285
- [35]Carmen P.C.Prado and Zee Olami.Inertia and break of self-organized criticality in sandpile cellular-automata models.*Physical Review A*,1992,45(2):665-669
- [36]D.A.Head and G.J.Rodgers. Crossover to self-organized criticality in an inertial sandpile model. *Physical Review E*.1997,55(3):2573-2579
- [37]Anita Mehta, G.C.Barker.J.M.Luck, R.J.Needs. The dynamics of sandpiles: The competing roles of grains and clusters. *Physical A*.1996,224:48-67
- [38]Stefan Boettcher. Aging exponents ini self-organized criticality. *Physical Review E*, 1997, 56(6): 6466-6474
- [39]Maxim Vergeles.Self-organization at nonzero temperatures. *Physical Review Letters*.1995, 75(10):1969-1972
- [40]Maxim Vergeles. Mean-field theory of hot sandpiles. *Physical Review E*.1997, 55(5): 6264- 6265
- [41]Luis A.Nunes Amaral and Kent Bækgaard Lauritsen. Self-organized criticality in a rice-pile model. *Physical Review E*.1996,54(5): R4512-R4515

-
- [42]J.Krug,J.E.S.Socolar,and G.Grinstein.Surface fluctuations and criticality in a class of one-dimensional sandpile models.Physical Review A,1992,46(8):R4479-R4482
- [43]H. M. Jaeger, Chu-heng Liu, and Sidney R.Nagel. Relaxation at the angle of repose. Physical Review Letters.1989, 62(1):40-42
- [44]Kim Christensen,Álvaro Corral,Vidar Frette,Jens Feder,and Torstein Jøssang. Tracer dispersion in a self-organized critical system.Physical Review Letters. 1996, 77(1): 107-110
- [45]Deepak Dhar.Self-organized critical state of sandpile automaton models.Physical Review Letters.1990,64(14):1613-1616
- [46]V.B.Priezzhev. Structure of two-dimensional sandpile. I .Height Probabilities.Journal of Statistical Physics.1994,74(5/6):955-979
- [47]Pui-Man Lam and Fereydoon Family.Mode-coupling theory and simulation results for the "running-sandpile "model of self-organized criticality. Physical Review E.1993,47(3): 1570-1576
- [48]Antal Károlyi and János Kertész.Lattice-gase model of avalanches in a granular pile. Physical Review E.1997,57(1):852-856
- [49]H.F.Chau.Abelian sandpile model.Physical Review E.1993,47(6):R3815-3817
- [50]T.Elperin and A.Vikhansky.Numerical solutions of the variations equations for sandpile dynamics. Physical Review E.1997,55(5):5785-5791
- [51]M.V.Medvedev and P.H.Diamond.Self-organized states in cellular automata:Exact solution. Physical Review E.1998,58(5):6824-6827
- [52]Afshin Montakhab and J.M.Carlson.Avalanches,transport,and local equilibrium in self-organized criticality.Physical Review E.1998,58(5):5608-5619
- [53]D.V.Kitarev and V.B.Priezzhev.Expansion and contraction of avalanches in the two-dimensional Abelian sandpile.Physical Review E,1998,58(3):2883-2888
- [54]S.S.Manna.Large-sccale simulation of avalanche cluster distribution in sand pile model. Journal of Statistical Physics.1990,59(1/2):509-521
- [55]M.G.Shnirman and Y.A.Tyurina.Generalized hierarchical model of defect development and self-organized criticality.Physical Review E.1998,57(4):3804-3813
- [56]F.Bagnoli,P.Palmerini,and R.Rechtman.Algorithmic mapping from criticality to self-organized criticality. Physical Review E.1997, 55(4): 3970-3976
- [57]Henrik Jeldtoft Jensen,Kim Christensen and Hans C.Fogedby.1/f noise,distribution of lifetime,and a pile of sand. Physical Review B.1989,40(10):7425-7427
- [58]Vidar Frette.Sandpile models with dynamically varying critical slopes. Physical Review
-

- Letters.1993,70(18):2762-2765
- [59]Luís A.Nunes Amaral,Kent Bækgaard Lauritsen.Energy avalanches in a rice-pile model. *Physica A*. 1996,231:608-614
- [60]M.Bengrime,A.Benyoussef,F.Mhirech,S.D.Zhang.Disorder-induced phase transition in a one-dimensional model of rice pile. *Physica A*.1999, 272:1-11
- [61]S.Lübeck and K.D.Usadel.Numeric determination of the avalanche exponents of the Bak-Tang-Wiesenfeld-model.*Physical Review E*.1997,55(4):4095-4099
- [62]Shu-Dong Zhang.On the universality of a one-dimensional model of rice pile.*Physics Letter A*.1997,233:317-322
- [63]S.S.Manna.Critical exponents of the sand pile models in two dimensions. *Physica A*.1991, 179: 249-268
- [64]L.Pietronero,A.Vespignani,and S.Zapperi.Renormalization scheme for self-organized criticality in sandpile models. *Physical Review Letters*.1994,72(11):1690-1693
- [65]Chao Tang and Per Bak.Critical exponents and scaling relations for self-organized critical phenomena. *Physical Review Letters*. 1988, 60(23):2347-2350
- [66]Yi-Cheng Zhang. Scaling theory of self-organized criticality. *Physical Review Letters*. 1989,63(5):470-473
- [67]Asa Ben-Hur and Ofer Biham.Universality in sandpile models.*Physical Review E*.1996,53 (2): R1317-R1320
- [68]Alessandro Vespignani,Stefano Zapperi,and Luciano Pietronero. Renormalization approach to the self-organized critical behavior of sandpile models.*Physical Review E*.1995, 51 (3): 1711-1724
- [69] Sergei Maslov and Maya Paczuski.Scaling theory of depinning in the Sneppen model. *Physical Review E*.1994,50(2):R643-R646
- [70]S.D.Edney,P.A.Robinson,and D.Chisholm.Scaling exponents of sandpile- type models of self-organized criticality.*Physical Review E*.1998, 58(5): 5395-5402
- [71]Luís A.Nunes and Kent Bækgaard Lauritsen.Universality classes for rice-pile models. *Physical Review E*.1997,56(1):231-234
- [72]Maria de Sousa Vieira.Simple deterministic self-organized critical system. *Physical Review E*. 2000,61(6):R6056-R6059
- [73]Mária Markošoyá.Universality classes for the ricepile model with absorbing properties. *Physical Review E*.2000,61(1):253-260
- [74]Stefan Hergarten and Horst J.Neugebauer. Self-organized criticality in two-variable models.

- Physical Review E,2000,61(3):2382-2385
- [75]S.N.Dorogovtsev,J.F.F.Mendes,and Yu.g.Pogorelov.Bak-Sneppen model near zero dimension. Physical Review E,2000,62(1):295-298
- [76]Terence Hwa and Mehran Kardar.Dissipative transport in open system:an investigation of self-organized criticality. Physical Review Letters,1989,62(16):1813-1816
- [77]Alexei Vázquez and Oscar Sotolongo-Costa.Universality classes in the random-storage sandpile model. Physical Review E,2000,61(1): 944-947
- [78]S. Lübeck.Large-scale simulations of the Zhang sandpile model. Physical Review E,1997, 56 (2): 1590-1594
- [79]Hiizu Nakanishi and Kim Sneppen.Universal versus drive-dependent exponents for sandpile models. Physical Review E,1997,55(4):4012-4016
- [80]S.S.Manna.Critical exponents of the sand pile models in two dimensions. Physica A,1991, 179: 249-268
- [81]Stefano Lise and Maya Paczuski.Self-organized criticality and universality in a nonconservative earthquake model. Physical Review E,2001,63(3):036111-036115
- [82]Albert Díaz-Gullera.Noise and dynamics of self-organized criticality phenomena. Physical Review A, 1992,45(12):8551-8558
- [83]Chao Tang and Per Bak.Mean-field theory of self-organized critical phenomena. Journal of Statistical Physics.1988,51(5/6):797-802
- [84]Kim Christensen,Zeev Olami.Sandpile models with and without an underlying spatial structure. Physical Review E.1993,48(5):3361-3372
- [85]Henrik Flyvbjerg,Kim Sneppen and Per Bak.Mean field theory for a simple model of evolution. Physical Review Letters.1993,71(24):4087-4090
- [86]Stefano Zapperi,Kent Bakgaard Lauritsen,and Eugene Stanley.Self-organized branching processes:mean-field theory for avalanches. Physical Review Letters.1995,75(22):4071-4074
- [87]Makoto Katori,Hirotsugu Kobayashi.Mean-field theory of avalanches in self-organized critical states.Physica A.1996,229:461-477
- [88]Maxim Vergeles,Amos Maritan,and Jayanth R.Banavar.Mean-field theory of sandpile. Physical Review E.1997,55(2):1998-2000
- [89]Terence Hwa and Erwin Frey.Exact scaling function of interface growth dynamics. Physical Review A.1991,44(12):R7873-7876
- [90]Ashvin B.Chhabra,Mitchell J.Feigenbaum,Leo P.Kadanoff,Amy J.Kolan and Itamar Procaccia.Sandpiles,avalanches,and the statistical mechanics of nonequilibrium stationary

- states. *Physical Review E*.1993,47(5):3099-3121
- [91]V.B.Priezzhev and K.Sneppen.Multiple scaling in a one-dimensional sandpile. *Physical Review E*.1998,58(6):6959-6963
- [92]Romualdo Pastor-Satorras and Alessandro Vespignani.Corrections to scaling in the forest-fire model. *Physical Review E*.2000,61(5):4854-4859
- [93]Terence Hwa and Mehran Kardar. Avalanches, Hydrodynamics, and discharge events in models of sandpiles. *Physical Review A*. 1992,45(10):7002-7023
- [94]Per Bak,Kan Chen.A forest-fire model and some thoughts on turbulence. *Physics Letter A*.1990, 147(5.6):297-300
- [95]Barbara Drossel.Scaling behavior of the Abelian sandpile model. *Physical Review E*.2000, 61(3): R2168-R2171
- [96]L.Pietronero and W.R.Schneider.Fixed scale transformation approach to the nature of the relaxation clusters in self-organized criticality. *Physical Review Letters*.1991,66(13): 2336-2339
- [97]Maya Paczuski,Sergei Maslov,and Per Bak.Avalanche dynamics in evolution,growth,and depinning models.*Physical Review E*.1996,53(1): 414-443
- [98]Stefano Lise and Maya Paczuski.Scaling in a nonconservative earthquake model of self-organized criticality.*Physical Review E*.2001,64(4):046111-046115
- [99]S.T.R.Pinho,C.P.C.Prado,and S.R.Salinas.Complex behavior in one-dimensional sandpile models. *Physical Review E*.1997,55(3):2159-2165
- [100]Leo P.Kadanoff,Sidney R.Nagel,Lei Wu,and Su-min Zhou.Scaling and universality in avalanches. *Physical Review A*.1989,39(12):6524-6537
- [101] M.De Menech,A.L.Stella,and C.Tebaldi.Rare events and breakdown of simple scaling in the Abelian sandpile model.*Physical Review E*.1998,58(3):R2677-R2680
- [102]Kim Christensen,Zeev Olami,and Per Bak.Deterministic $1/f$ noise in nonconservative models of self-organized criticality.*Physical Review Letters*.1992,68(16):2417-2420
- [103]Henrik Jeldtoft Jensen.Lattice gas as a model of $1/f$ noise.*Physical Review Letters*.1990,64(26):3103-3106
- [104]B.Kaulakys and T.Meškauskas.Modeling $1/f$ noise. *Physical Review E*.1998,58(6): 7013-7019
- [105]G.Grinstein and D.-H.Lee,Subir Sachdev.Conservation laws, Anisotropy, and "self-organized criticality" in noisy nonequilibrium systems. *Physical Review Letters*.1990, 64 (16): 1927-1930

-
- [106]V.N.Skokov,A.V.Reshetnikov,V.P.Koverda,A.V.Vinogradov.Self-organized criticality and $1/f$ -noise at interacting nonequilibrium phase transitions. *Physica A*.2000,293:1-12
- [107]Henrik Flyvbjerg.Simplest possible self-organized critical system. *Physical Review Letters*. 1996,76(6):940-943
- [108]Hans-Henrik Stølum.Fluctuations at the self-organized critical states. *Physical Review E*. 1997,56(6):6710-6718
- [109]Kurt Wiesenfeld,James Theiler and Bruce McNamara.Self-organized criticality in a deterministic automaton. *Physical Review Letters*. 1990,65(8):949-952
- [110]A.Alan Middleton and Chao Tang.Self-organized criticality in nonconserved systems. *Physical Review Letters*.1995,74(5):742-745
- [111]Per Bak,Stefan Boettcher.Self-organized criticality and Punctuated equilibria.*Physica D*,1997,107:143-150
- [112]Per Bak and Kim Sneppen.Punctuated equilibrium and criticality in a simple model of evolution.*Physical Review Letters*,1993,71(24):4083-4086
- [113]Emma Montecocchi and Attilio L.Stella. Boundary spatiotemporal correlations in a self-organized critical model of punctuated equilibrium. *Physical Review E*.2000,61(1): 293-297
- [114]C.Adami.Self-organized criticality in living systems. *Physics Letters A*.1995,203:29-32
- [115]Tomoko Tsuchiya and Makoto Katori. Proof of breaking of self-organized criticality in a nonconservative Abelian sandpile model. *Physical Review E*.2000,61(2):1183-1188
- [116]Per Bak.Self-organized criticality in non-conservative models. *Physica A*,1992,191:41-46
- [117]Peyman Ghaffari,Stefano Lise, and Henrik Jeldtoft Jensen. Nonconservative sandpile models. *Physical Review E*.1997,56(6):6702-6709
- [118]D.L.Turcotte, B.D.Malamud, G.Morein, W.I.Newman. An inverse-cascade model for self-organized critical behavior.*Physica A*.1999,268:629-643
- [119]M.E.J.Newman and Kim Sneppen.Avalanches,scaling,and coherent noise. *Physical Review E*.1996,54(6):6226-6231
- [120]Y.Moreno,J.B.Gómez,A.F.Pacheco. Self-organized criticality in a fibre-bundle-type model. *Physica A*.1999,274:400-409
- [121]Pratip Bhattacharyya. Critical phenomena in an one-dimensional probabilistic cellular automaton. *Physica A*.1996,234:427-434
- [122]Sergei Maslov,Yi-Cheng Zhang. Self-organized critical directed percolation. *Physica A*. 1996, 223:1-6
-

-
- [123] Zoltán Fodor and Imre M. Jánosi. Results on the continuous-energy self-organized critical model in one dimension. *Physical Review A*. 1991, 44(2): 1386-1389
- [124] Álvaro Corral, Conrad J. Pérez, Albert Díaz-Guilera, and Alex Arenas. Self-organized criticality and synchronization in lattice model of integrate-and-fire oscillators. *Physical Review Letters*. 1995, 74(1): 118-121
- [125] Gongwen Peng. Self-organized criticality in vector-state automata. *Physica A*. 1993, 201: 573-580
- [126] Gerald Baumann and Dietrich E. Wolf. Self-organized criticality in a two-dimensional rotating drum model. *Physical Review E*. 1996, 54(5): R4504-4511
- [127] E. N. Miranda and H. J. Herrmann. Self-organized criticality with disorder and frustration. *Physica A*. 1991, 175: 339-344
- [128] A. Malthe-Sørensen. Kinetic grain model for sandpiles. *Physical Review E*. 1996, 54(3): 2261-2265
- [129] Horacio Ceva and Roberto P. J. Perazzo. From self-organized criticality to first-order-like behavior: A new type of percolation transition. *Physical Review E*. 1993, 48(1): 157-160
- [130] A. M. Alencar, J. S. Andrade, and L. S. Lucena. Self-organized percolation. *Physical Review E*. 1997, 56(3): R2379-R2382
- [131] Kim Christensen, Henrik Flyvbjerg and Zeev Olami. Self-organized critical forest-fire model: mean-field theory and simulation results in 1 to 6 dimensions. *Physical Review Letters*. 1993, 71(17): 2737-2740
- [132] C. Vanderzande and F. Daerden. Dissipative Abelian sandpiles and random walks. *Physical Review E*. 2001, 63(3): 030301-030304
- [133] K. L. Hopcraft, E. Jakeman, and R. M. Tanner. Characterization of structural reorganization in rice piles. *Physical Review E*. 2001, 64(1): 016116-016125
- [134] Eric Bonabeau, *Journal of the Physical Society of Japan*. 64(1): 327-328
- [135] R. R. Shcherbakov, V. I. V. Papoyan, and A. M. Povolotsky. Critical dynamics of self-organizing Eulerian walkers. *Physical Review E*. 1997, 55(3): 3686-3688
- [136] R. Vilela Mendes. Characterizing self-organization and coevolution by ergodic invariants. *Physica A*. 2000, 276: 550-571
- [137] E. M. Blanter and M. G. Shnirman. Simple hierarchical systems; Stability, self-organized criticality, and catastrophic behavior. *Physical Review E*. 1997, 55(6): 6397-6403
- [138] J. Rosendahl, M. Vekić, and J. E. Rutledge. Predictability of large avalanches on a sandpile. *Physical Review Letters*. 1994, 73(4): 537-540
-

- [139]Péter Bántay and Imre M.Jánosi. Avalanche Dynamics from anomalous diffusion. *Physical Review Letters*.1992,68(13):2058-2061
- [140]J.E.S.Socolar and G.Grinstein. On self-organized criticality in nonconserving systems. *Physical Review E*.1993,47(4):2366-2376
- [141]N.Vandewalle,H.Puyvelde,and M.Ausloos. Self-organized criticality can emerge even if the range of interactions is infinite. *Physical Review E*.1998,57(1):1167-1170
- [142]L.Pietronero,P.Tartaglia and Y.-C.Zhang.Theoretical studies of self-organized criticality.*Physical A*.1991,173:22-44
- [143]Sergei Maslov,Maya Paczuski,and Per Bak. Avalanches and $1/f$ noise in evolution and growth models. *Physical Review Letters*. 1994, 73(16):2162-2165
- [144]Álvaro Corral and Albert Díaz-Guilera. Symmetries and fixed point stability of stochastic differential equations modeling self-organized self-organized criticality. *Physical Review E*. 1997, 55(3):2434-2445
- [145]J.M.Carlson,J.T.Chayes,E.R.Grannan,and G.H.Swindle.Self-organized criticality and singular diffusion. *Physical Review Letters*.1990, 65(20): 2547-2550
- [146]S.P.Obukhov.Self-organized criticality:goldstone modes and their interactions.*Physical Review Letters*.1990,65(12):1395-1398
- [147]李仕雄. 沙堆演化动态特性及自组织临界现象研究[L]. 西南交通大学博士研究生学位论文, 2004, 12
- [148]Held G A , Solina II D H, Keane D T et al. Experimental study of critical-mass fluctuation in an evolving sandpile[J]. *Phys.Rev.Lett* ,1990;65(9):1120-1123.
- [149]Frette V, Malthe-Sørensen K C A. Jøssang J F T et al. Avalanche dynamics in a pile of rice [J]. *Nature*, 1996,379(27): 49-52.
- [150]Bretz M,Cunningham J B,Kurczvnski P L,etal. Imaging of avalanches in Granular materials [J]. *Physical Review Letters*.1992,69(16):2431- 2434.
- [151]E.Morales-Gamboa, J.Lomnitz-adler and V.Romero-Rochín, R.Chicharro-Serra and R.Peralta-Fabi. Two-dimensional avalanches as stochastic Markov processes[J]. *Physical Review E*.1993,47(4): 2229-2232
- [152]J.Rosendahl,M.Vekić,and J.Kelley. Persistent self-organization of sandpiles[J]. *Physical Review E*.1993.47(2):1401-1404
- [153]YAO Lingkan , FANG Duo. On the Self-organized criticality of non-uniform sands[J]. *International Journal of Sediment Research* , 1998,13(3): 19-24
- [154]姚令侃,方铎.非均匀沙自组织临界性及其应用研究[J].*水利学报*,1997,(3):26-32

- [155]李远富, 姚令侃, 邓域才. 单面坡沙堆模型自组织临界性实验研究[J]. 西南交通大学学报, 2000, 35 (2): 121-125.
- [156]蒋良滩, 姚令侃, 李仕雄. 非均匀散粒体自组织临界性机制初探[J]. 岩石力学与工程学报. 2004,23 (18) :3178-3184.
- [157]李仕雄, 姚令侃, 蒋良滩. 影响沙堆自组织临界性的内因与外因[J]. 科技通报, 2003, 19 (4): 278-281
- [158]李仕雄、姚令侃、蒋良滩. 灾害研究中的自组织临界性与判据[J]. 自然灾害学报, 2003, 12(4): 82-87
- [159]李仕雄,姚令侃,蒋良滩. 松散边坡演化特征及其应用[J]. 四川大学学报(工程科学版) 2004,2:7-11
- [160]蒋良滩, 姚令侃, 李仕雄. 溜砂坡防治工程安全系数实验探索[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004,15(2).74-77
- [161]李仕雄、姚令侃、蒋良滩. 临界状态下沙堆大规模坍塌机制分析[J]. 西南交通大学学报, 2004,39 (3): 366-370
- [162]姚令侃,李仕雄,蒋良滩. 自组织临界性及其在散粒体研究中的应用[J]. 四川大学学报, 2003,35 (1): 8-14
- [163]Yao Lingkan, Huang Yuan, Lu Yang. Self-organized criticality and its application in the slope disasters under gravity[J]. Science in China Ser.E Technological Sciences, 2004, vol46 (1): 10-21.
- [164]於崇文. 地质作用的自组织临界过程动力学[J]. 地学前缘, 2000;7 (1): 13-42
- [165]於崇文. 地质作用的自组织临界过程动力学(下)[J]. 地学前缘, 2000,7 (2): 555-585
- [166]赫尔曼·哈肯. 协同学——大自然构成的奥秘[M]. 上海世纪出版集团, 2001, 10
- [167][美]欧阳莹之. 复杂系统理论基础[M]. 上海科技教育出版社 2002, 10
- [168]于渌, 郝柏林. 相变和临界现象[M]. 科学出版社 1986
- [169] (美) 霍根 J. 科学的终结. 孙雍君等译. 呼和浩特远方出版社, 1997.
- [170]Leo P, Kadannoff, Sidey R. Nagel, Lei Wu and Su-min Zhou. P.R.A39, 12, 1989, PP6524
- [171]R. Badii. "Complexity and Unpredictable Scaling of Hierarchical Structures", In Chaotic Dynamics, Theory and Practice, edited by T. Bountis (Plenum, New York)
- [172]Langton CG. Studying artificial life with cellular automata[J]. Physica, 1986, 22D: 120-149.
- [173]Packard N. Adaptation toward the edge of chaos[A]. In: Technical Report, Center for Complex Systems Research[R]. Illinois: University of Illinois, CCSR-85-5. 1988.
- [174]Kauffman SA. Antichaos and adaptation[J]. Sci Am, 1991, 8: 64-70.
- [175]Kauffman SA. Origins of Order: Self Organization and Selection in Evolution[M]. Oxford:

- Oxford University Press,1993:1-709
- [176]Kauffman SA. At Home in the Universe[M]. (The Search for Laws of Self Organization and Complexity).Oxford: Oxford University Press, 1995, 1-321.
- [177]於崇文.固体地球系统的复杂性与自组织临界性[J].地学前缘,1998;5 (3) :159-182, 347-368
- [178]姜振寰.软科学方法[M].黑龙江教育出版社.1994, 12
- [179]黄登仕,李后强.分形几何学、R / S 分析与分式布朗运动[J].自然杂志. 1990, 13(8): 477-482.
- [180][美]埃德加·E·彼得斯.分形市场分析——将混沌理论应用到投资与经济理论上[J].经济科学出版社.2002,7.
- [181]Per Bak[著].李炜,蔡勖[译].大自然如何工作[M].华中师范大学出版社.2001, 6.
- [182]LovejoyS, Schertzer D.Multifractals, universality classes, and satellite and radar measurements of cloud and rain fields[J].Jour Geophys Res,1990,95(D3):2021-2034.
- [183]Stanley HE, Meakin P. Multifractal phenomena in physics and chemistry [J]. Nature, 1998, 335(6189):405-409.
- [184]李后强,汪富泉.多重分形:热力学类比、相变和子波变换[J].大自然探索. Vol. 10(36) 1991, 2:55-58
- [185]Leo P.Kadanoff,Sidney R.Nagel,Lei Wu,and Su-min Zhou. Scaling and universality in avalanches. Physical Review A.1989,39(12):6524-6537
- [186]Victor.B.Sapozhnikov and Efi.Foufoula-Georgiou. Experimental evidence of dynamic scaling and indications of self-organized criticality in braided rivers. Water Resource Research. 1996, 33(8):1983-1991
- [187]Ignacio Rodriguez-iturbe,Marco Marani,Riccardo Rigon and Rinaldo. Self-organized river basin landscapes:fractal and multifractall characteristics. Water Resource Research.1996, 30(12):3531-3539
- [188]孙霞,吴自勤,黄昀.分形及其应用[M].中国科技大学出版社.2003, 10: 54-74
- [189]郝柏林.复杂性的刻画与“复杂性科学”[J].科学. 1999, (51) 3: 3-8
- [190]陈时军,David Harte,王丽风,马丽.广义地震应变能释放的多重分形特征[J].地震学报.2003,25(2):182-190
- [191]谢嘉琼,易顺民.滑坡活动空间分布的多重分形特征及其预测意义[J].四川大学学报(工程科学版).2000,32(6):4-6
- [192]Qiuming Cheng. Multifractality and spatial statistics[J]. Computers & Geosciences. 1999, 25:949-961

- [193]何建敏,常松.中国股票市场多重分形游走及其预测[J].中国管理科学.2002,10(3): 11-17
- [194]D.I.Iudin, D.B.Gelashvily. Multifractality in ecological monitoring[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A,2003,502 :799-801
- [195][美]William J.Petak, Arthur A. Atkisson.自然灾害风险评价与减灾政策[M].地震出版社,1993,2.
- [196]魏一鸣.自然灾害复杂性研究[J].地理科学.1998,1:25-29.
- [197]D.L.特克特(著).陈颢,郑捷,季颖(译).分形与混沌——在地质学和地球物理学中的应用[M].地震出版社1993,4:193-203
- [198]Ole Peters, Christop Herhertlein, Kim Christensen. A complexity view of rain fall[J]. Phys. Rev.Lett, 2002,88(5):054303
- [199]国家统计局《'93 中国环境统计》编委组. '93 中国环境统计[M].1994,8
- [200]国家统计局《'99 中国环境统计》编委组. '99 中国环境统计[M].2000,8
- [201]中国灾害防御协会铁道分会. 中国铁路自然灾害及其防治[M]. 中国铁道出版社. 2000, 7: 418-422
- [202]易顺民,晏同珍.滑坡定量预测的非线性理论方法[J].地学前缘.1996,3: 77-85
- [203]易顺民,唐辉明.滑坡分维特征及其预测意义[J].工程地质学报.1994,2: 48-53
- [204]吴积善等.云南蒋家沟泥石流观测研究[M].北京科学出版社,1990.2: 120-146
- [205]蒋忠信,姚令侃,艾南山,崔之久.铁路泥石流非线性研究与防治新技术[M].四川科学技术出版社.1999,9: 176-184
- [206]王裕宜,詹钱登,陈晓清,韩文亮. 泥石流体的应力应变自组织临界特性[J]. 科学通报. 2003, 5: 976-980
- [207]金德生,陈浩,郭庆伍.河道纵剖面分形-非线性形态特征[J]. 地理学报,1997,52(2): 154-160
- [208]梁虹,卢娟.喀斯特流域水系分形、熵及地貌意义[J].地理科学,1997,17(4):310-315
- [209]汪富泉,曹叔尤,丁晶.河流网络的分形与自组织及其物理机制[J].水科学进展,2002,13 (2): 367-375
- [210]Victor B.Sapozhnikov and Efi Foufoula-Georgiou.Do the current landscape evolution models show self-organized criticality?Water Resource Research. 1996,32(4):1109-1112
- [211]Peng C K, Buldyrev S V,Havlin S,Simons M,Stanley H E,Goldberger A L.Mosaic organization of DNA nucleotides[J].Phys.Rev.E,1994,49: 1685-1689.
- [212]Peng C K, Havlin S, Stanley H E, et al. Quantification of scaling exponents and crossover phenomena in nonstationary heartbeat time series[J]. Chaos, 1995, 5(1): 82-87.

- [213]K. Ivanova, M. Ausloos. Application of the detrended fluctuation analysis (DFA) method for describing cloud breaking[J]. *Physica A* 274 (1999) 349-354.
- [214]Luciano Telesca, Maria Macchiato. Time-scaling properties of the Umbria-Marche 1997-1998 seismic crisis investigated by the detrended fluctuation analysis of interevent time series [J]. *Chaos, Solitons and Fractals*,2004,19: 377-385.
- [215]庄新田,黄小原.证券市场的标度理论及实证研究[J].*系统工程理论与实践*, 2003,23(3): 1-8.
- [216]朱晓华,蔡运龙.中国水系的盒维数及其关系[J].*水科学进展*.2003,14(6):731-735
- [217]徐启运, 胡敬松. 我国西北地区沙尘暴天气时空分布特征[J]. *应用气象学报*.1996, 7(4): 479-482.
- [218]徐建芬,牛志敏,陈伟民,王强,高凤荣. 我国西北地区 4-5 沙尘暴天气研究[J]. *中国沙漠*. 1996,9: 282-287.
- [219]Kantelhardt J W, Zschiegner S A, Koscielny—Bunde E, et al. Multifractal detrended fluctuation analysis of nonstationary time series[J]. *Physica A*, 2002, 316: 87-114.
- [220]K. Ivanova, H.N. Shirer, E.E. Clothiaux, N. Kitovab,M.A. Mikhalev, T.P. Ackerman, M. Ausloos. A case study of stratus cloud base height multifractal fluctuations[J]. *Physica A* 308 (2002) 518-532.
- [221]周自江,章国材. 中国北方的典型沙尘暴事件(1954~2002)[J]. *科学通报*,2003, 48.11 (6):1224-1228.
- [222]张存杰,宁惠芳.甘肃省近 30 年沙尘暴、扬沙、浮尘天气空间分布特征[J]. *气象*. 2001, 28 (3): 28-32.
- [223]许强,黄润秋.地质灾害发生频率的幂律规则[J].*成都理工学院学报*.1997, 24(增): 91-96
- [224]吕金虎,陆君安,陈士华. 混沌时间序列分析及其应用[M]. 武汉大学出版社. 2002, 1: 93-109
- [225]蒋良滩,姚令侃,蒋忠信,李仕雄. 溜砂坡动力学特性实验及防治初探[J].*山地学报*. 2004, 1: 97-103
- [226]AHS, TngWH *Probability Concepts in Engineering Planning and Design*[M] Volume II. John Wiley and Sons, New York, 1984:284-341
- [227]孙遇祺等.铁路公路灾害防治[M]. 中国铁道出版社, 俄罗斯运输出版社.1998, 12.
- [228]阳友奎.崩塌落石的 SNS 柔性拦石网系统[J]. *中国地质灾害与防治学报* 1998,11,9 增刊:313-321.
- [229]Franz-Josef Elmer. Self-organized criticality with complex scaling exponents in the train

- models[J].Physical Review E.1997,56(6):R6225-R6228
- [230]Takashi Nagatani. Self-organized criticality and Scaling in lifetime of traffic james[J].Journal of the Physical Society of Japan. 1995,61(1):31-34
- [231]Takashi Nagatani.Self-organized criticality in 1D traffic flow model with inflow or outflow[J].Journal of Physics A-Mathematical & General. 1995,28(40): L119-L124
- [232]汪秉宏,毛丹,王雷,许伯铭.交通流中的自组织临界性研究[J].广西师范大学学报, 2002, 20 (1) : 15-21
- [233]A.W.Burks.Von Neumann's self-reproducing automata.In A.W.Burks, editor, Essays on Cellular Automata[D]. University of Illinois Press, 1970:pp.3-64.
- [234]U.Pesavento. An implementation of von Neumann's self-reproducing machine. Artificial Life,1995,2:337-354.
- [235]Bastien Chopard,Michel Droz. Cellular Automata Modeling of Physical Systems[M].Cambridge University Press,1998.
- [236]周成虎等. 地理元胞自动机研究[M]. 科学出版社. 2001:26-74
- [237] B.Drossel and F.Schwabl. Self-Organized Critical Forest-Fire Model. Physical Review Letters.1992, 69 (11) : 1629-1992
- [238]S.Clar,K.Schenk,and F.Schwabl. Phase transitions in a forest-fire model. Physical Review E.1997,55(3):2174-2183
- [239]Hans-Martin Bröker and Peter Grassberger. Anomalous scaling in the Bak-Chen-Tang forest fire model. Physical Review E.1997,56(5):R4918-4921
- [240]Bruce D,Malamud,Gleb Morein, Donald,Turcotte.Forest Fire: An Example of Self-organized Critical Behavior.Science.1998, 281: 1840-1841
- [241]宋卫国,范维澄,汪秉宏.中国森林火灾的自组织临界性.科学通报.2001, 46 (6) : 521-525
- [242]Song W,Fan W,Wang B.Self-Organized Criticality and Wildfires. Ecological Modeling. 2001, 145: (1) 61-68
- [243]何振宁.论铁路地质选线[J].成都理工学院学报.2001,28:293-295.
- [244]周国华,曾学贵,张耀平.铁路选线设计中的环境考虑[C].中国交通研究与探讨. 1997: 421- 423
- [245]郑顺义,曾学贵.交通建设中的土地适宜性评价[J].中国公路学报.2001.10: 96-99
- [246]郝瀛.铁路选线设计[M].中国铁道出版社.1990.
- [247]易思蓉,张家铃,邓域才.生成线路初始平面的自动优化方法[J].西南交通大学学报. 2002,2: 1-5

-
- [248]冯端,师吕绪,刘治国. 材料科学导论——融贯的论述[M]. 化学工业出版社材料科学与工程出版中心.2002,5
- [249]Г.К.克列因著.陈万佳译.散粒体结构力学[M].中国铁道出版社, 1983
- [250]郭庆国. 粗粒土的工程特性及应用[M]. 黄河水利出版社, 1998: 11-16
- [251]中华人民共和国行业标准. 土工试验规程(SL237-1999)[M]. 中国水利水电出版社, 1999: 418-423, 447-453
- [252]吴爱祥, 孙业志, 刘湘平.散体动力学理论及其应用[M].冶金工业出版社,2000.
- [253]S.F.Ewards and R.B.Oakeshott 1989 *physica d* 38 88.
- [254]Loic Vanel, Daniel Howell, D. Clark, R. P. Behringer, and Eric Clement. Memories in sand: Experimental tests of construction history on stress distributions under Sandpiles[J]. *PHYSICAL REVIEW E* NOVEMBER, 1999,60(5): R5040-R5043
- [255]何文社, 杨具瑞, 方铎, 曹叔尤.泥沙颗粒暴露度与等效粒径研究[J].水利学报.2002, 11: 44-48.
- [256]Yalin, M. S, *Mechanics of Sediment Transport*, 2nd Edi. Pergamon Press, 1977, P. 290.
- [257]孙志林,谢鉴衡,段文忠等.非均匀沙分级起动规律研究[J].水利学报,1997,10: 25-32.
- [258]韩其为,何明民.泥沙起动标准的研究[J].武汉水利电力大学学报.1996,29(4):1-5
- [259]刘兴年. 非均匀沙推移质输沙率及其粗化[D]. 成都科技大学, 1986
- [260]曲祖元. 工程研究基础[M].武汉理工大学出版社. 2002,12:1-86.
- [261]陈式刚. 映象与混沌[M].国防工业出版社. 1995,6
-

攻读学位期间发表的论文及科研工作

1. 攻读博士学位期间参加的科研工作

- (1) 国家自然科学基金“大尺度散粒体自组织临界性研究”（编号：50278080）；
- (2) 博士点基金项目“散粒体自组织临界性研究”（编号 2000061307）；
- (3) 国家自然科学基金“大尺度散粒体自组织临界性的机制与判据大尺度散粒体自组织临界性研究”（编号：50478085）；
- (4) 国家自然科学基金西部重大研究计划项目“西部地区重大道路工程与环境相互作用机制”（项目编号 90202007）。

2. 攻读博士学位期间发表的论文

- 1、何越磊, 姚令侃, 苏凤环. 斜坡灾害自组织临界性及极值分析, 中国铁道科学 2005, 2 (EI)
- 2、何越磊, 姚令侃, 苏凤环. 强沙尘暴时序的标度不变性分析, 系统工程理论与实践 2005, 7
- 3、何越磊, 姚令侃, 苏凤环. 沙堆模型动力学特性与灾害系统演化预测研究, 自然灾害学报 2005, 4
- 4、何越磊, 姚令侃. 铁路选线中的元胞自动机模型, 兰州交通大学学报 2004, 1
- 5、何越磊, 姚令侃, 苏凤环. 散粒体自组织临界性的多重分形分析, 科技通报 2006, 2
- 6、何越磊, 姚令侃, 苏凤环. 松散体边坡灾害的自组织临界性及工程应用研究, 中国地质灾害与防治学报 2005, 2
- 7、苏凤环, 姚令侃, 何越磊. 散粒体的自组织临界性与非均匀介质的元胞自动机模型, 岩石力学与工程学报 2005, 23
- 8、姚裕春, 姚令侃, 杨明, 苏凤环, 何越磊. 施工时序对边坡影响离心模型试验及数值分析, 岩石力学与工程学报 2006, 3