

大尺度散体组构分维和 SOC 判据研究

高召宁^{1,2}, 姚令侃¹, 苏凤环¹, 齐颖¹, 杨庆华¹

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 安徽理工大学 资源开发与管理工程系, 安徽 淮南 232001)

摘要: 介绍了 15 组散粒体自组织临界性与粒径的非均匀性有关的真实沙堆模型, 分析了实验表现出来的 3 种动力学行为: 即准周期分布、正态分布和负幂律分布; 进而研究了非均匀系数不能描述系统组构的自相似性和作为自组织临界性的判据。应用分形理论研究了沙堆组构的分形特征。研究表明, 非均匀系数为 1.53~5.0 时, 沙堆组构具有良好的分形特征, 分维数在非均匀系数 < 2.85 时增长较快, > 2.85 时增长较慢, 但分维数不超过 3.0。分析了沙堆组构的分形特征与自组织临界性的内在联系, 指出呈现出自组织临界性的系统具有稳健的分形结构, 并讨论了自组织临界性的判据。最后探讨了 SOC 理论在山地灾害预测预报和防治工程设计中的应用。

关键词: 大尺度; 组构分形; SOC; 判据; 山地灾害; 防治工程

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2007)01-0086-06

中图分类号: X43, O347.7

Configuration Fractal and SOC Criterion of Large Scale Granular Material and Their Application in Mountain Hazards

GAO Zhao-ning^{1,2}, YAO Ling-kan¹, SU Feng-huan¹, QI Ying¹, YANG Qing-hua¹

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China;

2. Department of Resource Management, Anhui University of Technology, Huai'nan, Anhui 232001, China)

Abstract: Fifteen groups of real sand-pile model are introduced, whose self-organized criticality in granular mixtures is strongly influenced by non-uniform degree of granular material. Three different dynamic behaviors showed in the experiment, such as quasi-period distribution, normal distribution and power law distribution, are analyzed. It is deduced that non-uniform degree is neither used to describe the self-comparability of system configuration nor used as the criterion of self-organized criticality (SOC). Fractal theory is applied to study fractal characteristics of sand-pile structure. It is showed that sand pile takes on a good fractal structure as non-uniform degree is between 1.53 and 5.0. Fractal dimension rises fast when non-uniform degree is less than 2.85, and rises slow when it is greater than 2.85 but does not exceed 3.0. Moreover, through the analysis of the intrinsic relation between fractal characteristics of sand-pile and SOC, the system presented SOC is found to have a steady fractal structure. The criterion for SOC is discussed and application of the SOC theory is prospected. Application of SOC theory in the forecast and prediction of mountain hazards and their control engineering design are discussed at length.

Keywords: large scale; configuration fractal; SOC; criterion; mountain hazard; prevention engineering

自组织临界态(SOC)理论是 Per Bak 等人为解释无序的、非线性复杂系统的行为特征提出的新概念。它指的是一类开放的、动力学、远离平衡态的、由多个单元组成的复杂系统能够通过一个漫长的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, 其效应可能会延伸到整个系统, 形成一个大的“雪崩”。临界态的特征为: 处于临界态的系统中会出现各种大小的“雪崩”事件, 并且雪崩的时间尺度和空间尺度均服从幂律(Power-law)分布。幂律分布是自组

织临界态的指纹^[1-5]。SOC 理论最具有物理意义的典范就是沙堆模型(SM)。Glenn. A. Held 等人用一套精密的装置进行沙堆模型实验, 实验选用粒径 1~1.25 mm 的均匀沙粒, 在直径 4 cm 的圆盘上以逐粒加沙方式建造沙堆。当沙堆的坡角达到临界角附近时, 加入的沙粒数量与落出圆盘边缘之外的沙粒数量在总体上达到平衡, 沙堆停止增长。此时对新添加的沙粒(可视为一种干扰)的响应是无法预测的, 沙粒可能固定在沙堆坡面上, 也可能引起小范围沙粒的滑动, 还可能导致更大规模的崩塌, 但崩塌规模与发生

频率符合负幂律分布(Power-law Distribution)。然而当他们用直径 8 cm 的圆盘进行实验, 使沙堆底部直径增加时, 发现沙堆只产生大规模的“雪崩”, 并没有出现负幂律分布, 沙堆不呈现自组织临界态。其原因至今尚未获得解释^[6-7]。

目前, 人们只能猜测具有 SOC 性质的系统是由系统的尺寸和系统的组织原则决定的, 关于后者的研究基本上空白的, 而且对于前者的认识大部分是来自实验室小型真实沙堆实验和元胞自动机的结论, 当我们将 SOC 理论引入到散粒体研究时, 在大尺度沙堆实验中发现了当非均匀系数 $\varphi \geq 2.85$ 时, 系统呈现 SOC 的性质, 因此, 我们曾引入了把非均匀系数作为 SOC 的判据^[8]。然而, 当我们继续采用非均匀系数 $\varphi > 5.0$ 实验时, 系统并没有呈现 SOC 的性质, 看来采用非均匀系数作为系统呈现 SOC 状态的判据存在一定的缺陷。我们发现呈现 SOC 性质的沙堆系

统都具有颗粒级配可以用分形来描述的特征, 据此我们提出了大尺度散粒体颗粒组构具有分形结构是系统呈现 SOC 性态的必要条件之一的假说。

1 散粒体动力学特性的实验研究

1.1 实验设计

实验是在长 \times 宽 \times 高 = 0.7 m \times 0.4 m \times 0.3 m 和 1.5 m \times 0.5 m \times 1.0 m^[8] 这 2 种尺寸的沙箱中进行的, 在沙箱上部建一与沙箱同宽的传送带作为加沙装置, 以坡顶加沙为扰动方式, 加沙位置靠近坡顶, 以减少加沙带来的动力冲击。根据非均匀系数(非均匀系数 $\varphi = \sqrt{d_{15}/d_{25}}$, 沙石颗粒级配如表 1 所示) 配制沙样; 然后在模型箱中堆积一个单面坡沙堆模型, 缓慢而均匀地添加与坡体相同的沙石扰动, 收集坍塌到平台上的沙粒, 并且称其重量, 测量沙堆的波动, 最后再统计坍塌的重量。

表 1 实验沙粒级配状况

组号	0.4	0.6	0.9	1.25	2	2.5	3	4	5	7	10	15	20	30	40	分维数	相关系数
I ₁							0.5~1.0										
I ₂							3.0										
I ₃							2.5~5.0										
I ₄							5.0~10.0										
I ($\varphi = 1.53$)	2	4	6	10	30	44	56	72	80	85	89	93	95	98	100	2.1617	0.8920
II ($\varphi = 2.15$)	4	8	16	23	37	46	52	62	70	80	85	91	94	97	100	2.3673	0.9078
III ($\varphi = 2.55$)	8	15	23	31	39	46	54	62	69	77	85	90	93	96	100	2.5039	0.9287
IV ($\varphi = 2.85$)	11	20	27	34	43	48	52	58	66	75	84	89	92	96	100	2.5696	0.9460
V ($\varphi = 3.50$)	11	22	30	35	44	49	51	60	65	71	79	90	96	99	100	2.5823	0.9449
VI ($\varphi = 4.00$)	11	22	31	39	46	48	51	55	60	66	73	81	88	97	100	2.6072	0.9359
VII ($\varphi = 4.50$)	11	23	32	40	46	48	52	55	58	64	70	78	85	96	100	2.6090	0.9236
VIII ($\varphi = 5.00$)	11	23	33	37	45	49	51	55	59	62	68	73	82	93	100	2.6216	0.9325
IX ($\varphi = 5.50$)	5	11	22	33	35	45	51	53	54	55	56	57	58	74	100	2.6033	0.7505
X ($\varphi = 6.00$)	6	12	25	34	45	49	51	52	53	54	55	56	57	71	100	2.6002	0.7262
XI ($\varphi = 6.50$)	6	15	29	39	45	48	51	52	53	54	55	56	57	74	100	2.5703	0.6944

1.2 实验结果统计分析

对 15 组实验结果进行了统计分析, 其统计特征值如表 2 所列。

从表 2 可以看出, 随着非均匀系数 φ 的增大, 各组散粒体沙石坡面的坍塌量均值 $E(X)$ 相对加沙量有减少趋势, 大于 $E(X)$ 的 X 所占比例呈现递增趋势, X 的离散性呈现递减趋势。在非均匀系数 $\varphi < 2.85$ 时系统产生实验现象 1, 即时间序列表现为准周期现象(图 1)。由表 2 的统计结果来看, 坍塌量 X 偏离平均值变化很大 ($2.46 \leq C_V \leq 4.60$), $E(X)$ 远大于加入系统中的加沙量 Y , 系统总是在远离临界态下完成各种动力学行为, 表现为坍塌量的非累计分布曲

线上出现单峰(图 2)。在最小区间(0~0.04)上频率达到 0.904, 在其它区间上累计频率仅为 0.096。由非均匀系数 $\varphi > 5.0$ 的沙堆系统产生现象 3, 即时间序列出现完全的随机性。坍塌量偏离平均值的变化不大 ($0.02 \leq C_V \leq 0.04$), 实验中出现大于 $E(X)$ 的坍塌量占实验总次数的百分数增加, $E(X)$ 几乎等于加入系统的加沙量, 从坍塌量的非累计分布曲线看(图 3), 各组实验的坍塌量服从正态分布, 中等规模的坍塌量出现的频率最大, 系统未演化到自组织临界态。非均匀系数为 $2.85 \leq \varphi \leq 5.0$ 时, 系统对外界扰动的响应呈现出上述 2 种情况的复杂运动形式, 表现为实验现象 2, 即时间序列处于确定性与随机性之

间。从表 2 的统计结果看, 虽然 $E(X)$ 几乎未偏离加入系统的加沙量, 但相对实验现象 3 坍塌量对均值的偏离有较大的变化, 大于 $E(X)$ 的 X 所占比例减小, 而相对实验现象 1, 其坍塌量偏离均值的变化较小, 大于 $E(X)$ 的 X 所占比例增大。假设检验结果表明, X 已不在服从正态分布, 同时 X 具有值越小出现频率越大, 在坍塌量的非累计曲线上出现了多峰, 并形成族群的特征, 显示了幂律分布的多级自相似结构

(图 4)。在双对数坐标图上坍塌量累计分布近似于一条直线(图 5)。即坍塌规模的统计规律服从负幂律分布, 即:

$$\ln N(X > x) = a - b \ln x \quad (1)$$

式中: x —— 坍塌规模(g); N —— 大于规模 x 的坍塌次数, $a = 2.10 \sim 4.94$; $b = 0.39 \sim 1.46$ 。

因为幂律是自组织临界性的证据, 从而证明了这类系统具有自组织临界性。

表 2 实验结果统计

组号	实验现象类别	非均匀系数 φ	样本容量 X / 次	加沙量 Y / g	样本均值 $E(X)$	标准差 $D(X)$	变异系数 $C_V = D(X) / E(X)$	样本大于均值出现次数占实验总次数的百分数 / %	用 χ^2 分布检验法在水平 0.05 下对样本分布检验结果
I_1	第一类	1.00	800	105	113.50	563.23	4.60	5.31	准周期分布 (如图 1, 2 所示)
I_2		1.00	800	105	119.10	452.34	3.80	7.79	
I_3		1.00	800	105	117.60	353.94	3.01	9.50	
I_4		1.00	800	305	347.94	857.44	2.46	12.70	
II	第二类	1.53	65	105	118.60	346.12	2.92	6.79	负幂律分布 (如图 4, 5 所示)
III		2.15	65	105	118.90	546.82	4.60	9.81	
IV		2.55	65	105	120.20	451.09	3.75	15.90	
V		2.85	65	105	105.70	53.31	0.50	25.20	
VI	第三类	3.50	65	105	106.10	71.39	0.67	25.79	正态分布 (如图 3 所示)
VII		4.00	65	105	104.70	91.11	0.87	27.13	
VIII		4.50	65	105	105.30	114.34	1.09	30.40	
IX	第三类	5.00	65	400	408.20	11.21	0.03	32.60	正态分布 (如图 3 所示)
X		5.50	65	400	407.10	7.34	0.02	49.80	
XI		6.00	65	400	404.20	20.90	0.05	51.80	
XII	6.50	65	400	399.20	16.27	0.04	50.20		

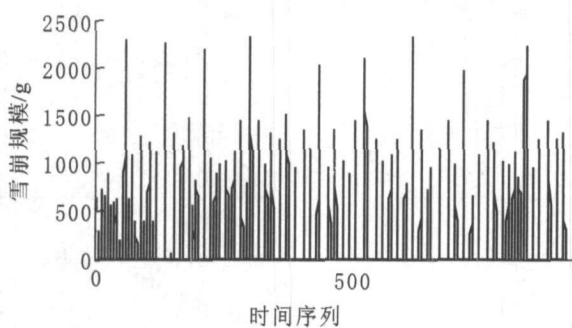


图 1 时间序列的准周期分布图

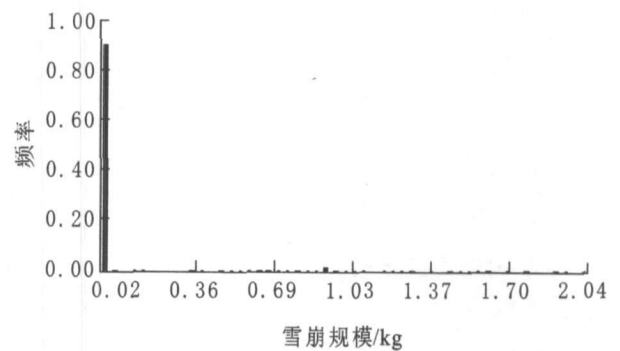


图 2 “雪崩”规模分布—非累计图解

对于均匀沙和非均匀系数 $\varphi < 2.85$ 的沙堆模型当沙堆较大时不再呈现 SOC 的原因, 我们同意 Carmen^[9] 提出的设想: 处于沙堆坡面上的每颗沙粒具有势能, 作为干扰的沙粒落到沙堆或某颗沙粒受到扰动而转移时, 势能开始逐步转化为动能。当颗粒细小的均匀沙堆的规模变得较大的时候, 对处于下面的部分而言, 由于来自上部下落的沙粒加速过程变长, 沙粒的动能增大, 沙粒在下落的过程中以较大的力作用于

它所经过之局域, 对于下部局域而言已不是微小的扰动, 带动原来静止沙粒使之下落的概率增加, 而对更下部的局域而言来自上部的干扰沙粒数和强度进一步递增, 整个过程像滚雪球一样越滚越大, 大部分势能转化为动能从系统中耗散掉, 大规模的雪崩不可避免。而大规模的雪崩后, 系统处于亚临界态, 只要长时的郁滞被突发的活动打破, 准周期现象就出现了。相应的当沙堆规模较小的时候, 这种加速过程的影响

较小, 各部分的干扰强度变化不大, 系统呈现 SOC 现象。非均匀系数 $\varphi > 5.0$ 后, 沙堆系统中缺少中间颗粒, 以小颗粒和大颗粒沙粒为主, 存在占主导地位的单元。于是小颗粒在下落过程中虽以较大的动能作用于局域, 但是在与大颗粒的碰撞过程中部分能量被消耗掉, 剩余的能量只是带动部分沙粒滚出系统, 故雪崩规模分布呈现出以中等规模为主的正态分布。

相应地对实验中沙堆模型在非均匀系数 $2.85 \leq \varphi \leq 5.0$ 时又能呈现 SOC 的现象, 当沙堆的规模较大时, 在沙堆系统以及每一个局域都有很好的自相似性, 当干扰沙粒作用于系统时, 沙堆系统表现出自组织能力, 以合作的效应制约干扰, 从而限制了系统某一部分活动性增强的趋势, 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它沙粒下滑(即活动性分叉)的选择, 则当各部分活动性消失与活动性分叉的概率在总体上平衡时, 那么系统由自组织过程引起的连锁反应维持着一种临界态, 这样大尺度的沙堆也会出现 SOC 现象。

因此, 沙堆系统对于干扰传播制约的能力是由其组构的自相似性所决定的系统自组织行为的合作效应来完成的, 所以沙堆实验中的 SOC 现象主要是由系统的组构特征确定的。

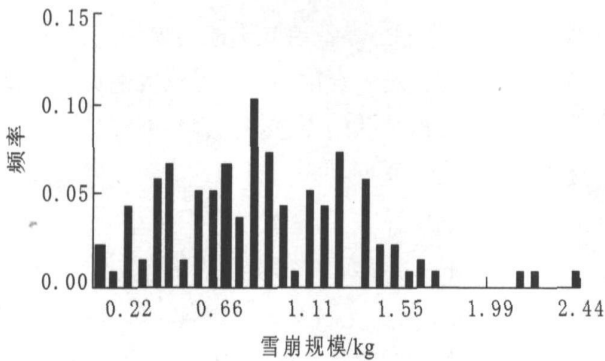


图 3 “雪崩” 规模分布—非累计图解

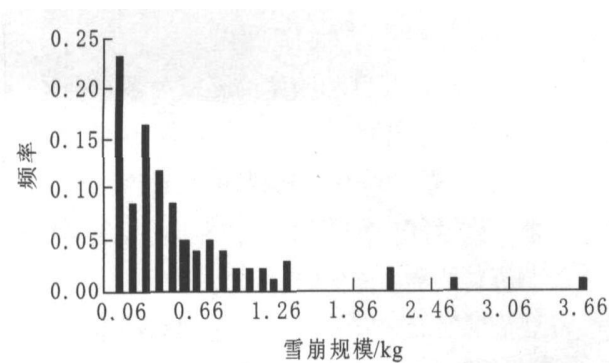


图 4 “雪崩” 规模分布—非累计图解

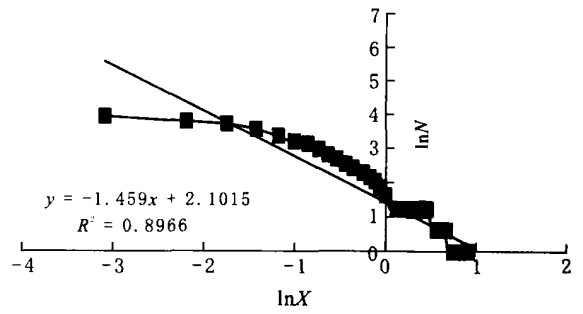


图 5 雪崩规模分布—累计双对数图解

2 沙堆组构的分形特性分析

在我们的实验中, 发现随着散粒体组构不同, 散粒体系统的动力学行为沿准周期 \rightarrow 负幂律 \rightarrow 正态分布方向进行演化。呈现 SOC 性质的系统其组构具有很好的自相似性, 如何定量描述这种自相似性, 从而有助于从本质上认识散粒体系统演化过程中的动力学行为, 分形方法为解决这一科学难题提供了一个全新的工具。

实际分形总有相应的尺寸范围, 即自相似成立的无标度区。若不考虑无标度区的大小, 我们仅按 Turcotte 提出的碎块大小的分形分布判定沙石的分形性^[10], 于是从粒径分布在 (a, b) ($a \ll b$) 范围上截取一段 (f, b) 考虑时, 分形关系成立, 但从其内部任取一段 (e, f) 部分考虑时, 由于

$$N_f(x) = C(x^{-D} - f^{-D}) \quad (e < x < f) \quad (2)$$

仅当 $f \gg e$, 或 f 充分接近 b 时才近似为分形, 分形维数 D 反映粒度分布。

对于 (a, b) 内的沙石, dx 段的颗粒数可表示为:

$$dN(x) = DCx^{-(D-1)}dx \quad (3)$$

引入颗粒形状与视比重常数 C' , dx 段的重量为:

$$dM = dN(x)x^3C' = DCC'x^{-(D+2)}dx \quad (4)$$

于是, 沙石总重量为

$$M_T = \int_a^b dM = \frac{DCC'}{3-D} [b^{(3-D)} - a^{(3-D)}] \quad (5)$$

x 粒径以下沙石的重量为

$$M_{\text{下}} = \int_a^x dM = \frac{DCC'}{3-D} [x^{(3-D)} - a^{(3-D)}] \quad (6)$$

当 $D < 3$ 时, 令 $a = 3 - D$ (7)

若 $a \ll x$, 则 $x^a - a^a \approx x^a$, 且 $M_T \approx DCC'b^a/\alpha$.

在式(7) 两边乘以 $1/M_T$, 并令 $C_1 = 1/b^a$, 即得筛下重量百分率分布形式为:

$$y_1 = C_1x^a \propto x^a \quad (8)$$

在上述实验资料的基础上,通过(8)式在双对数坐标中求出 $\ln y_1(x) \sim \ln x$ 的曲线斜率 α ,进而依据式(7)求出分维数 D 。图 6 给出了分维数和均匀系数 ϕ 的关系。

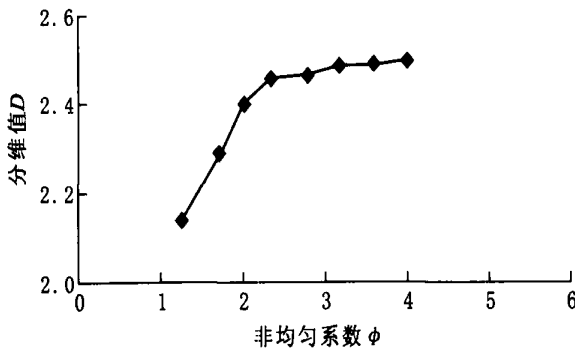


图 6 分维数 D 与非均匀系数 ϕ 关系曲线

在分形分析中 $\ln y_1$ 与 $\ln x$ 之间存在很好的线性关系,取回归相关系数 R 大于 $R_{0.05} = 0.8783$,所得分维值 D 和回归相关系数 R 详见表 1。

从表 1 可以看出,沙堆结构的分维值都在 2.1617 以上,说明沙堆结构符合分形分布,其粒度组成具有良好的分形结构,在统计意义上满足自相似律,同时也可以看出,所有样本的分维值都小于 3.0。

综上所述,在非均匀系数小于 5.0 时,分维数的大小反映了散粒体沙石的粒度分布。从图 6 可以看出,在非均匀系数 $\phi < 2.85$ 时,随非均匀系数的增大分维数增长较快。实验中雪崩的动力学行为呈现准周期分布;在非均匀系数 $2.85 \leq \phi \leq 5.0$ 时,分维数变化很小,在此范围内,“雪崩”的动力学行为符合负幂律分布;在非均匀系数 $\phi > 5.0$ 时,在 $R_{0.05}$ 检验水平上,散粒体沙石粒径分布已不符合分形,在此阶段,雪崩的动力学行为符合正态分布。

从均匀沙到非均匀沙对比实验中可见,沙堆结构对系统的动力学行为具有重要作用,分维值正好反映了系统结构的复杂性和自组织性。沙堆系统颗粒分布越均匀,其自组织程度越高,分维值越大;反之,沙堆系统颗粒分布越不均匀,其自组织程度越小,分维值越小。因此,分维给出了沙堆结构的定量描述。

3 SOC 在山地灾害中的应用探讨

3.1 自组织临界性判据探讨

对于第一类现象,在临界态外界干扰引起沙堆的响应对于沙堆各部分而言,由邻域传来的扰动强度总是超过其自稳能力,从而使沙堆各部分活动性分叉的概率大于活动性消失的概率,而第三类现象由于大颗粒的集聚产生了占主导作用的单元,系统的活动受个

体行为的支配,合作的精神减弱。第二类现象由于系统结构呈现分形结构,不出现优势自由度而使系统仅有几个集体自由度来表征系统的特征。在实验中发现,从均匀沙到非均匀沙沙堆系统表现出来的分维数不是无限增长的,存在一个分维门槛值 2.5696,超过这个值后,系统结构具有稳健的分形结构,并且表现出 SOC 的性质。

综合以上的分析,我们认为大尺度散粒体呈现 SOC 的必要条件包括如下 5 方面。

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

(2) 组元之间是一种最近邻位置的相互作用,但存在着长程相关关系。

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

(4) 系统内部具有稳健的分形结构。其结构的分形特征可以作为 SOC 的一个判据。

(5) 具有以上性质的系统,所有的时空关联函数都是幂次的。

3.2 SOC 理论在山地灾害中的应用

山地灾害过程是一种非常重要的动力学过程,如何认识山地灾害过程在坡面和流域演化过程中的作用始终是一个比较困难的问题。SOC 理论认为临界状态下,小事件能引发任何规模的连锁反应,包括灾难性的大事件。这一理论的启示是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规律。SOC 理论正好为我们研究这类山地灾害问题提供了一种新途径。

P. A. Johnson 等人^[11]研究了泥石流规模与频率之间的幂律关系。Hovius 等^[12]对新西兰 Southern Alps 研究结果表明此地的滑坡活动强度和频度呈明显的幂律关系,并由此计算出滑坡活动的侵蚀贡献为 $9 \pm 4 \text{ mm/a}$ 。Scheidegger^[13]在 1973 年就提出了岩崩中存在着和崩塌规模有关的幂律规律。

至于灾害活动强度和频度的幂律关系是否是一种普遍规律,这仍然是一个难以回答的问题。Vanstejin^[14]比较了欧洲一些山脉的泥石流强度和频度模式的差别,指出这些模式产生差别的原因难以用现有观测资料解释。

在我们的实验中有关 SOC 发生的系统结构分维判据,有可能为人们利用 SOC 理论研究这类山地灾害提供了新的思路。

3.3 基于SOC理论的灾害防治工程设计

山地灾害过程在时间和空间上都是一个离散的过程,所以必须研究其强度和频度的关系,才能对山地灾害过程的活动情况作出较准确的判断。处于SOC状态的山地灾害系统是在混沌的边缘发生演化,不确定性的增加遵循负幂律准则。而“频率—规模”关系是防治工程设计的重要依据。山地灾害的防治工程一般包括坡面防护工程与支挡工程等,传统的设计是采用安全系数法。对于呈现SOC现象的灾害系统,在防治工程参数设计时,从理论上说工程设计使用期内的最大荷载无法估计,不宜采用安全系数法。工程设计时应主要考虑风险性与经济性的综合平衡,宜采用可靠性设计方法。可靠性设计的技术关键是确定“破坏概率”,实用中一般采取将破坏概率定义为某一基准值被超过的概率的做法,这时频率—规模的幂律分布关系则为计算破坏概率提供了依据。根据SOC理论,大规模坍塌都是发生在临界状态并由链式反应所引起,在防治工程方案规划时,传统的削坡工程措施,是实现使系统偏离临界状态的直接手段。此外,既然“链式反应”导致大规模坍塌,那么设法切断这种“链式反应”也是值得贯彻的理念。如采用放平台或框架护坡等措施,有时可能会是阻止大规模灾害现象的更经济的方案。

[参 考 文 献]

- [1] Per Bak, Chao Tang, Kurt Wiesenfeld. Self-organized Criticality[J]. *Physical Review A*, 1988, 1(1): 364—374.
- [2] Per Bak, Chao Tang, Kurt Wiesenfeld. Self-Organized Criticality: An Explanation of 1/f Noise[J]. *Physical Review Letters*, 1987, 59(4): 381—384.
- [3] 蒋良淮,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.

- [4] 刘信安,周佩雯,陈双挺. 沙堆实验的自组织临界性与水华暴发行为的关系研究[J]. *自然科学进展*, 2006, 16(3): 338—343.
- [5] 于群,郭剑波. 中国电网停电事故统计与自组织临界性特征[J]. *电力系统自动化*, 2006, 30(2): 16—21.
- [6] Held G A, Solina II D H, Keane D T, et al. Experimental study of criticality mass fluctuation in an evolving sandpile[J]. *Physical Review Letters*, 1990, 65(9): 1120—1123.
- [7] 何越磊,姚令侃,苏凤环,等. 沙堆模型动力学特性与灾害系统演化预测研究[J]. *自然灾害学报*, 2005, 14(4): 44—50.
- [8] 李仕雄,姚令侃,蒋良淮. 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.
- [9] Carmen P C, Prado, Zee Ol mi. Inertia and break of self-organized criticality in sandpile cellular automata models[J]. *Physical Review A*, 1992, 45(2): 665—669.
- [10] Turcotte D L. Fractals and Fragmentation[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1986, 91(B2): 1921—1926.
- [11] Johnson P A, Richard H, Mauen, et al. Hromadlka, Magnitude and frequency of critical-mass fluctuations in an evolving sandpile. *Physical Review Letters*, 1990, 65: 1120.
- [12] Hovius N, Stark C P, Allen P A. Sediment flux from a mountain belt derived by landslide mapping[J]. *Geology*, 1997, 25(3): 231—234.
- [13] Scheidegger A E. On prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides[J]. *RockMechanics*, 1973, 5: 231—236.
- [14] Vansteijn H. Debris-flow magnitude-frequency relation Ships for central and north-west Europe[J]. *Geomorphology*, 1996, 15(3—4): 259—273.

(上接第57页)

[参 考 文 献]

- [1] 黄河水利委员会治黄研究组编, (日文) 芦田和男监修. 黄河治水与开发[M]. 东京: 古今书院, 1989. 42.
- [2] Ohmori H, Hirano M. Magnitude, frequency and geomorphological significance of rocky mud flows, landcreep and the collapse of steep slopes. *Z. Geomorph. N. F.*, 1988, Suppl. - Bd. 67: 55—65.
- [3] 平野昌繁,大森博雄. 在泥沙移动现象上的规模频度分布特性和其地貌学上的意义(日文). *地形*, 10(2): 95—111.
- [4] 中国水文地质工程地质勘察院主持. 中国环境地质图系[M]. 北京: 中国地图出版社, 1992.

- [5] 黄河水利委员会勘测规划设计院编. 中国黄土高原地貌图集[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984.
- [6] 中国科学院黄土高原综合科学考察队. 黄土高原地区土壤侵蚀区域特征及其治理途径[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1991. 98.
- [7] 国家计划委员会国土地区司, 地质矿产部地质环境管理司. 中国地质灾害[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993. 440—443.
- [8] 吉松弘行, 纲木亮介, 近藤观兹, 等. 中国滑坡——特别关于黄土地带滑坡(日文)[J]. *滑坡*, 28(4): 37—44.
- [9] 松永光平. 中国黄土高原侵蚀过程与其分布(日文)[J]. *物性研究*, 2004, 82(3): 468—477.