

## 山地灾害演化特征和预测预报探讨<sup>\*</sup>

高召宁<sup>1,2</sup>, 姚令侃<sup>2</sup>

(1. 安徽理工大学 能源与安全学院, 安徽 淮南 232001; 2. 西南交通大学 土木工程学院 道路与铁道工程系, 成都 610031)

**摘 要:** 用 3 种粒径分布具有分形特征的沙堆作为山地灾害的概化模型, 通过实验研究其动力学行为, 结果均呈现自组织临界性。利用既有的地貌特征, 进一步分析了山地灾害的演化特征, 表明幂律特征和自组织临界性是许多山地灾害的共性。将改进的重标极差分析方法引入泥石流灾害前兆观测资料的处理和分析中, 以云南蒋家沟泥石流为例, 计算总径流量时间序列的赫斯特指数  $H$  值, 得出可以利用  $H$  值的异常变化特点预测预报大规模泥石流灾害的发生。

**关键词:** 沙堆模型; SOC; 山地灾害; 赫斯特指数; RSH 算法

**中图分类号:** P642.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2008)03-0146-04

## Discussion on Evolution Feature and Prediction of Mountain Hazards

GAO Zhao-ning<sup>1,2</sup>, YAO Ling-kan<sup>2</sup>

(1. Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China; 2. Civil Engineering College Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Three kinds of sandpiles with size distribution which professed fractal characters designed as the generalization models of the mountain disasters, their dynamics behavior are researched by experiment. The results showed self-organize criticality. According to the current geomorphology characteristics, the evolution characters of mountain hazards are analyzed further, all of them have the characteristics of power-law and self-organized criticality. The improved rescaled range analysis was introduced into the analysis and treatment on the precursor monitoring date of the debris flow disaster, Hurst exponent  $H$  is calculated, which could forecast the occurrence of great scale debris flow by abnormal change of value  $H$ . Jiangjiagou debris flow in Yunnan as example.

**Key words:** sandpiles model; self-organized criticality (SOC); mountain hazards; Hurst exponent; RSH algorithm

山地灾害是一种典型的斜坡失稳破坏现象。崩塌、滑坡和泥石流等是山地灾害的主要形式。中国是世界上山地灾害最严重的国家之一, 其分布主要集中在西南山区、黄土高原、秦巴山地以及青藏高原东南部地区。山地灾害严重危害国民经济的各个方面。因此, 山地灾害预测预报成为山区防灾减灾的主要任务之一<sup>[1-3]</sup>。

於崇文院士以完整和独立的命题提出了“固体地球系统的复杂性与自组织临界性”, 认为广义地质作用系统具有 SOC<sup>[4]</sup>。山地灾害是地质作用系统的子系统, 很可能表现出 SOC。为此进行概化模型实验和灾害实例的分析。

### 1 山地灾害的实验研究

1987 年巴克<sup>[5]</sup> (Bak) 等提出了“自组织临界态”(self-organized criticality, SOC) 理论, 用以解释广延耗散动力学系统的行为特征。这种耗散动力学系统中大量组元间存在作用, 使系统自然地朝着临界状态演化。在临界状态下, 小事件引起的连锁反应能对系统中的任一组元产生影响。宏观

表现上, 小事件发生的次数比大事件多, 但是大、小事件都起源于同一机理。闪烁噪声 ( $1/f$  噪声) 和分形结构分别是自组织临界态的时间和空间“指纹”。因此所有的时空关联函数都是幂次的, 幂律被认为是自组织临界性的证据。

沙堆模型是 SOC 的典型范例, 国内外许多学者采用真实的或计算机模拟的沙堆模型进行 SOC 研究。如美国国际商用机器公司 (IBM) 的技术人员设计了一个沙堆实验, 在半径为 4 cm 圆盘上逐粒加沙构造沙堆。当加入的沙粒数量与落在边缘之外的沙粒数量总体上达到平衡, 沙堆停止增长, 这时沙堆达到了临界态, 向处在临界态的沙堆加入一粒沙子时, 这粒沙子就有可能导致雪崩似的沙堆坍塌, 但坍塌规模与发生频率符合幂律分布<sup>[5]</sup>。山地灾害是一种系统组构具有散粒体性质的灾害类型, 而且它们都是以斜坡物质失稳下滑来实现能量的耗散, 彼此既具有特殊性, 也有共性及联系性。因此, 在 SOC 的概念框架下, 利用沙堆模型, 可以从整体理论上解释山地灾害的普适性动力学特性, 为预测预报山

\* 收稿日期: 2007-09-17

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50478085)

作者简介: 高召宁 (1971 - ), 男, 陕西蓝田人, 博士, 主要从事非线性科学在工程中的应用研究。E-mail: gaozn1207@sohu.com

地灾害提供新的思路。为此我们设计了斜坡物质失稳的概化模型——2 类 3 种沙堆模型的物理实验。

沙堆模型实验以都纹路沿线斜坡灾害现场实测资料为基础,根据相似法原理,制备了沙石粒径分布具有分形特点(沙石粒径满足式  $N(r) = cr^{-D}$ ,式中: $N(r)$ ——大于粒径  $r$  的沙石颗粒数; $c$ ——常数; $D$ ——分维数且约为 2.16 ~ 2.71)的室内散体试样,分别模拟了不同斜坡灾害。

1.1 水槽沙堆模型实验简况

该实验是以处于临界稳定的斜坡松散堆积物在水流扰动下失稳破坏为原型设计的。实验在宽 30 cm、槽坡设置为水平的玻璃水槽中进行。实验时先在水槽中放满深为 20 cm 的清水,然后在静水中通过漏斗缓慢地堆起一个高约 15 cm 的沙堆,为保证放水时沙堆在垂直于水流方向上能均匀受力,将沙堆最后构造成两端与槽壁相抵,顺水槽方向截面为等腰三角形(底角 等于泥沙水下休止角)的“沙坝”(图 1)。而后以固定的提升量打开尾门放水,通过调节尾门使水位最大下降速度控制在 0.90 cm/min 左右。放水过程中处于临界坡的沙堆在动水作用下将会坍塌,水槽中水放完后,通过称重确定坍塌体占该次实验用沙总量的比例<sup>[6]</sup>。

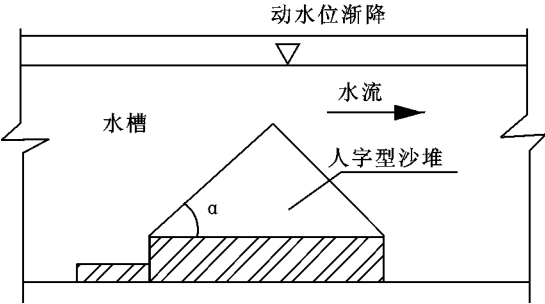


图 1 水槽沙堆模型实验示意图

1.2 倾斜平面下半无限沙堆坍塌实验

该实验是以常见的单面坡失稳坍塌为原型设计的,分有水和无水 2 种。

有水单面坡沙堆模型实验是模拟由于水的渗入破坏坡体内的应力平衡,导致坡体在重力作用下坍塌的现象。实验是在宽高各为 35 cm、长为 210 cm 的有机玻璃水箱中进行的,水箱的一端设一平台。实验时先在平台上用干燥沙石建造一单面坡(图 2),当沙堆的斜面角度 达到干沙的临界坡度时,在水箱的另一端开始用固定的速率缓慢注水,直至完全淹没沙堆为止。由于沙堆的水下休止角小于干燥沙堆的临界坡度,在此过程中会有沙粒坍塌至平台下的水箱底部,待沙堆恢复稳定后再用相同的速率放干水槽中的水,收集和测量坍塌体的重量,每次实验用沙量均在 20 kg 以上<sup>[6]</sup>。

无水单面坡实验(沙箱高 30 cm,宽 40 cm),沙堆建造方法相同,只是扰动方式采用向单面坡顶部添加沙粒进行的,该实验典型的原型是溜沙坡,特点是能量注入(风化沙石补给)是缓慢的、均匀的,能量的耗散相对于注入来说是瞬时的、雪崩式的<sup>[7]</sup>。

在上述 3 种实验中,实验均出现 SOC 现象<sup>[6]</sup>。实验中发现,沙堆坡面从局部到整体,非均匀沙石粒群的堆积形态、结构变化和运动形式等都与实际岩土体崩塌、落石、滑坡和

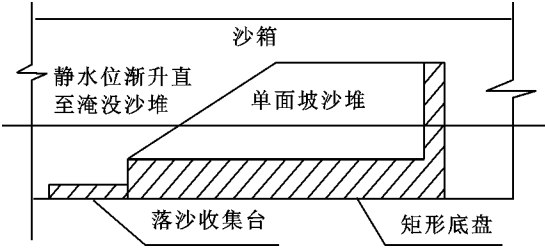


图 2 沙堆实验示意图

坡面泥石流等山地灾害演变运动过程有许多相似之处。而且实验表明,这些相似与扰动因素是坡顶沙源还是静水渗入的作用无关,而且都不影响 SOC 的呈现。

沙堆模型反映了一种在自组织作用下的斜坡物质能量耗散普适性过程。一个沙堆在受到扰动时,崩塌规模与发生频率的关系与幂律相符。此外,又通过计算机模拟证明<sup>[8]</sup>,沙堆大规模的崩塌为小概率事件,在有限的步时内,崩塌规模与发生频率的幂律关系不会被破坏,而在现实生活中,系统尺度和时间尺度要比实验室中大得多,因此,幂律规律很可能在山地灾害演化中相当一段时期都是存在的。据此可以认为,山地灾害过程所形成的堆积体单元之间应服从幂律关系,为了证实模型实验得出的结论,我们对真实山地灾害进行了分析。

2 山地灾害的自组织临界性

滑坡和崩塌堆积体通常是保存得较完整而且对其体积测量较容易的地貌。根据上述观点,在区域性自然条件相近的地带分布的滑坡,可以视为是一个 SOC 系统在较长时间内受到多次扰动后生成的堆积地貌。滑坡体可视为沙堆的坍塌量,滑坡体积与出现频率的关系应服从幂律。根据中国科学院东川泥石流观测研究站建立的中国泥石流、滑坡灾害事件数据库,对 1998 - 2003 年期间四川省境内共发生的 622 个滑坡体体积的统计,若令  $X$  为滑坡体积(万  $m^3$ ), $N$  为体积大于  $X$  的滑坡数目,利用最小二乘法通过回归分析,可得  $X$  与  $N$  之间的关系式如下:

$$N(X > x) \quad x^{-0.2982} \tag{1}$$

又据对黄土地区 244 个滑坡的统计<sup>[9]</sup>,同理有

$$N(X > x) \quad x^{-0.426} \tag{2}$$

川藏公路(国道 G318 线) K2821 - K2843 段沿折多河右岸行进。折多河是比大渡河发育晚的河流,自康定城东向东流至两河口纳入大渡河,横穿大渡河断裂和鲜水河断裂之间的断块。折多河河谷深切、谷坡陡峻、水流湍急、平均比降 4.7%。出露基岩以花岗岩为主,两岸多崩塌和泥石流,只有局部河段发育有小块的 I 级阶地。G318 段沿线以崩塌为主的崩坡积路段共计有 35 段,总长 7.137 km,占全路段的 30%。2006 年 10 月中旬对这一区域由崩塌形成的岩堆进行了现场测量,其测量结果列于表 1。

根据表 1,若令  $X$  为岩堆斜面积, $N$  为斜面积大于  $X$  的岩堆数目,利用最小二乘法通过回归分析,可得  $X$  与  $N$  之间的幂律关系为

$$N(X > x) \quad x^{-0.8316} \tag{3}$$

云南东川蒋家沟是我国较严重的泥石流沟之一。据中

表 1 G318 线 K2821 - K2843 段岩堆面积统计

序号	里程	面积/ m <sup>2</sup>	序号	里程	面积/ m <sup>2</sup>	序号	里程	面积/ m <sup>2</sup>
1	K2821 + 700	40950	24	K2834 + 550	1260	47	K2838 + 900 - K2839 + 600	32850
2	K2822 + 600	2700	25	K2834 + 600	2286	48	K2838 + 900 - K2839 + 600	10800
3	K2822 + 900	7650	26	K2834 + 800	4950	49	K2838 + 900 - K2839 + 600	4320
4	K2823 + 500	900	27	K2835 + 200	9720	50	K2839 + 900	29250
5	K2823 + 600	14400	28	K2835 + 350	5850	51	K2840 + 800	38250
6	K2823 + 850	3600	29	K2835 + 450	3420	52	K2841 + 100 - 600	12870
7	K2824 + 000	3600	30	K2835 + 530	2340	53	K2841 + 100 - 600	5850
8	K2824 + 100	2520	31	K2835 + 900	9000	54	K2841 + 100 - 600	8550
9	K2824 + 350	540	32	K2836 + 000 - 700	1620	55	K2841 + 100 - 600	9000
10	K2826 + 800	1890	33	K2836 + 000 - 700	3780	56	K2841 + 100 - 600	3780
11	K2828 + 100	23220	34	K2836 + 000 - 700	2880	57	K2841 + 100 - 600	3240
12	K2829 + 000	4050	35	K2836 + 000 - 700	10440	58	K2841 + 100 - 600	2160
13	K2830 + 100	47970	36	K2836 + 000 - 700	6120	59	K2841 + 100 - 600	2250
14	K2831 + 200	2160	37	K2836 + 000 - 700	11790	60	K2842 + 80 - K2842 + 300	20700
15	K2831 + 900	1125	38	K2836 + 000 - 700	4860	61	K2842 + 80 - K2842 + 300	16920
16	K2832 + 200	18000	39	K2836 + 700 - K2837 + 250	6030	62	K2842 + 80 - K2842 + 300	5400
17	K2832 + 500	900	40	K2836 + 700 - K2837 + 250	9450	63	K2842 + 80 - K2842 + 300	3960
18	K2833 + 000	4275	41	K2836 + 700 - K2837 + 250	47700	64	K2842 + 80 - K2842 + 300	6570
19	K2833 + 200	6750	42	K2836 + 700 - K2837 + 250	4590	65	K2842 + 80 - 2842 + 300	6840
20	K2833 + 400	9000	43	K2837 + 900	3510	66	K2842 + 300 - 400	4050
21	K2833 + 500	8550	44	K2838 + 400 - 900	21150	67	K2842 + 300 - 400	6300
22	K2833 + 990	4680	45	K2838 + 400 - 900	11340			
23	K2834 + 100	7200	46	K2838 + 400 - 900	66870			

科院山地所东川站的观测(1982 - 1985 年)记录,可以拟合得出蒋家沟泥石流爆发的径流量、一次输沙量、流动历时和阵次的频率都是负幂律函数<sup>[10]</sup>。

上述统计结果表明,在这 4 个区域中不同的山地灾害类型(滑坡、崩塌和泥石流)其灾害规模与出现频率的关系均服从幂律,此系惟一具有自相似特征的统计分布,若自然系统出现幂律式的标度依赖关系,则这个系统具有 SOC 的特征,因此,我们认为 SOC 是许多山地灾害的共性。

3 山地灾害的预测预报探讨

山地灾害是一种自组织临界现象,不能用经典的牛顿理论和预测混沌系统的方法对山地灾害进行预测预报。预测方法的确立必须包含 SOC 系统特有的特性,基于此,用改进的重标极差分析方法(R/S 方法)预测山地灾害的发生,这种方法不但可以揭示 SOC 整体系统在灾害发生前的相关关系,而且可以提高山地灾害发生的可预测程度。

3.1 R/S 方法

R/S 分析方法是英国水文学家赫斯特提出来的,其基本思想是,改变所研究对象的时间尺度的大小,研究其统计特性变化规律,从而可以将小尺度的规律用于大的时间尺度范围,或者将大的时间尺度得到的规律用于小尺度<sup>[11]</sup>。其主要原理如下。

已知一个时间序列{ (t) | t = 1, 2, ..., p }, 定义均值序列为

$$\langle \rangle = \frac{1}{p} \sum_{t=1}^p (t) \tag{4}$$

累积离差为

$$X(t, ) = \sum_{u=1}^t [ (u) - \langle \rangle ] \tag{5}$$

极差为

$$R( ) = \max_i X(t, ) - \min_i X(t, ) \tag{6}$$

标准差为

$$S( ) = \left[ \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p [ (t) - \langle \rangle ]^2 \right]^{\frac{1}{2}} \tag{7}$$

极差与标准差之比为 R( )/S( ), 下面简记为 R/S, 则存在下列关系:

$$R/S \sim ( / 2 )^H \tag{8}$$

式中 H 称为赫斯特指数。实际上, H 可以看作极差、标准差结构的分维。用这种方法来计算分维是较为简便的。对式(8)两边取对数,得到

$$\lg(R/S) = H \lg( / 2) \tag{9}$$

以 lg(R/S) 和 lg( / 2) 分别为纵、横坐标, 绘制 lg(R/S) - lg( / 2) 曲线, 则其斜率为赫斯特指数 H。

传统的计算赫斯特指数 H 的方法是将整个时间序列作为一个时间窗, 然后对此时间窗利用式(4) - (9) 计算 H, 这种方法只能判断时间序列的整体发展趋势, 不能对未来灾害作出具体的预测。该文基于 SOC 理论的思想, 定义了一个能反映时间序列整体性质, 包含序列历史和序列长时记忆信息的时间窗, 其特点是每一个数据可以属于若干个连续的时间滑动窗, 通过变化窗宽计算出每一个时间窗的 H, 然后, 利用 H 随时间的变化对灾害进行预测预报, 具体算法如下。

(1) 构造新时间序列{ (t) }。在原时间序列{ D(p), p = 1, 2, 3, ... } 上定义时间滑动窗, 即新时间序列{ (t) }, 设初始窗宽为 w, 滑动因子为 , 于是滑动窗为

$$\{ (t) \} = \{ D(t), t = 1, 2, \dots, p \}$$
$$p = w, w + , w + 2 \dots \tag{10}$$

(2) 计算 H 值。按式(4) - (9) 计算式(10) 中每一个时间滑动窗的 H, 得到一系列 H 值。

表 2 RSH 计算结果

序号	总径流量/ (m <sup>3</sup> ·次 <sup>-1</sup> )	R/S 计算结果		序号	总径流量/ (m <sup>3</sup> ·次 <sup>-1</sup> )	R/S 计算结果		序号	总径流量/ (m <sup>3</sup> ·次 <sup>-1</sup> )	R/S 计算结果	
		H	H			H	H			H	H
1	31500			14	70942	0.6754	- 1E - 04	27	32544	0.7236	- 0.0727
2	372540			15	81043	0.8153	0.1399	28	444884	0.603	- 0.1206
3	186880			16	128216	0.6279	- 0.1874	29	112200	0.5449	- 0.0581
4	99850			17	17960	0.5991	- 0.0288	30	355300	0.6166	0.0717
5	211212			18	102394	0.5854	- 0.0137	31	261800	0.4773	- 0.1393
6	163760			19	998157	0.7117	0.1263	32	215269	0.6235	0.1462
7	10800	0.6667		20	56078	0.7046	- 0.0071	33	120060	0.5176	- 0.1059
8	43348	0.5864	- 0.0803	21	198724	0.7635	0.0589	34	153093	0.3504	- 0.1672
9	6400	0.9679	0.3815	22	140195	0.6427	- 0.1208	35	77468	0.9921	0.6417
10	115700	1.0000	0.0321	23	190018	0.6187	- 0.024	36	561628	0.9073	- 0.0848
11	60000	0.847	- 0.153	24	291066	0.6279	0.0092	37	356840	0.7982	- 0.1091
12	57600	0.7839	- 0.0631	25	657700	0.8035	0.1756	38	64888	0.9906	0.1924
13	391000	0.6755	- 0.1084	26	30000	0.7963	- 0.0072				

(3)确定预报判据。将  $H$  值与灾害规模进行对比分析,确定预报判据。

3.2 实例分析

云南东川蒋家沟泥石流已被证明具有 SOC,而且目前也是我国观测资料最全的泥石流沟之一。实例分析中,以蒋家沟泥石流总径流量(灾害规模)为例<sup>[9]</sup>,取初始窗宽  $w = 7$ ,滑动因子  $\alpha = 1$ ,计算  $H_n$ 。计算结果如表 2 所示。

根据表 2 分析大规模泥石流灾害(当某次的泥石流总径流量大于泥石流总径流量的平均值与其标准差之和时,定义该次泥石流为大规模泥石流灾害)即第 19 次、25 次、28 次和 36 次发生前  $H$  值的变化。

为了提前预测大规模泥石流灾害的发生,考察大规模泥石流灾害发生时前三次的情况,发现有一个共同的现象,即大规模泥石流灾害发生前赫斯特指数  $H$  值常常存在一个先下降然后由低值向高值回升的过程,例如考察第 19 次的前 3 次,第 17 次的  $H$  值(0.599 1)比第 16 次的  $H$  值(0.627 9)减小,而第 18 次的  $H$  值(0.605 4)比第 17 次的  $H$  值(0.599 1)增大。虽然有一些非大规模泥石流灾害的前 3 次也出现类似的现象,并不多见。因此,从有备无患的角度出发,当发现某一次的  $H$  值比前一次的  $H$  值增大时,就应该警惕,下一次可能发生大规模的泥石流灾害。

4 结 语

(1)山地灾害过程是一个非连续过程,要研究其作用规模和频率的关系就必须取得足够长时间的观测资料,要想获取长时间的观测资料是比较困难的,尤其是在区域地貌类型复杂多样的情况下,几乎是不可能的,为解决这一问题,我们另辟途径,利用既有的地貌特征研究了山地灾害的 SOC,而且这种方法为山地灾害的研究提供了一种可能性。

(2)山地灾害系统和沙堆模型的共同特征是以斜坡物质失稳下滑来实现能量的耗散,在临界态,幂律特征和自组织临界性是山地灾害系统和沙堆模型的共性。从沙堆临界行为可以演推至实际灾害在临界状态下的行为。

(3)以云南东川蒋家沟泥石流总径流量时间序列为例,利用改进的重标极差分析方法计算了总径流量时间序列的  $H$ 。得出大规模泥石流灾害发生前  $H$  值常常存在一个先下降然后由低值向高值回升的过程,提出可以利用  $H$  值的异常现象作为大规模泥石流灾害发生的判据。

参考文献:

[1] 马东涛,崔鹏,祁龙,等.西部地区交通建设中的泥石流灾害与防治对策[J].工程地质学报,2003,11(2):180-185.

[2] 王士革,崔鹏,谢洪,等.山区铁路建设中的泥石流灾害与防治对策[J].工程地质学报,2000,8(4):400-403.

[3] 高召宁,姚令侃,徐光兴,等.基于图型动力学的滑面演化过程研究[J].岩土工程学报,2007,29(6):866-871.

[4] 於崇文.地质系统的复杂性[M].北京:地质出版社,2003.

[5] Bak P, Tang C, Wiesenfeld K. Self-organized Criticality[J]. Physical Review A, 1988,1:364-374.

[6] 高召宁,姚令侃,苏凤环,等.大尺度散体组构分维和 SOC 判据研究[J].水土保持通报,2007,27(1):86-91.

[7] 何越磊,姚令侃,苏凤环,等.斜坡灾害自组织临界性与极值分析[J].中国铁道科学,2005,26(2):15-19.

[8] 苏凤环,姚令侃,高召宁.分形元胞自动机在自组织临界性中的应用[J].西南交通大学学报,2006,41(6):675-679.

[9] 陈志新,倪万魁.延安滑坡及其灾害防治[M].西安:西安地图出版社,2002.

[10] 蒋忠信,姚令侃,艾南山,等.铁路泥石流非线性研究与防治新技术[M].成都:四川科学技术出版社,1999.

[11] WANG Biquan, HUANG Hanming, FAN Hongshun, et al. Research on nonlinear R/S method and its application in earthquake prediction[J]. Acta Seismologica Sinica, 1995,8(4):653-558.