

文章编号 :1000-6788(2005)07-0125-06

强沙尘暴时序的标度不变性分析

何越磊^{1,2}, 姚令侃¹, 苏凤环¹

(1. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031, 2. 兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 强沙尘暴规模的时间序列具有复杂的波动性. 运用多重分形消除趋势波动分析法分析我国北方近 49 年来的强沙尘暴序列, 发现序列具有长程相关性, 并确认强沙尘暴是多重分形过程, 进而得出序列的多重分形谱. 在此基础上, 探讨了序列长程相关性和多重分形特征与强风、沙源和热力不稳定等我国北方强沙尘暴形成的主要因素之间的联系.

关键词: 强沙尘暴; 多重分形消除趋势波动分析; 长程相关; 多重分形

中图分类号: X43; O231

文献标识码: A

Scale Invariance Analysis of the Time Series of Severe Sand and Dust Storm

HE Yue-lei^{1,2}, YAO Ling-kan¹, SU Feng-huan¹

(1. School of Civil Eng, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031, China, 2. School of Civil Eng, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu 730070, China)

Abstract: The time series of severe sand and dust storm has complicated undulatory property. We analyze the time series of severe sand and dust storm occurred in the north of China in 49 years by the means of multifractal detrended fluctuation analysis (MF-DFA). It is found that the time series is long range correlation. We affirm the severe sand and dust storm is multifractal. The strange multifractal spectrum is educed. The strong breeze, sand origin and thermodynamic instability are the principal factors forming severe sand and dust storm of China. Base on above of all, we discuss the relationship of the long range correlation and multifractal with the principal factors.

Key words: severe sand and dust storm; MF-DFA; long range correlation; multifractal

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^[1]. 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^[2].

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

收稿日期: 2004-06-21

资助项目: 国家自然科学基金(50478085), 国家自然科学基金西部重大研究计划(90202007)

作者简介: 何越磊(1972-), 男, 满族, 辽宁锦州人, 讲师, 工学博士. 主要从事道路与铁路防灾减灾理论技术研究.

万方数据

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.为此本文介绍非平稳序列分析的一种方法.

1 多重分形消除趋势波动分析法

消除趋势波动分析法(Detrended Fluctuation Analysis,简称 DFA)是 Peng C K 等物理学家和生物学家于 1994 年探测 DNA(脱氧核糖核酸)内部分子链的相关可能性的程度时首先提出的^[3].近几年,该方法被发展并成功地应用于生命科学、地质学、气象学 and 经济学等领域,被证明是检测非平稳时间序列的长程相关的最重要、最可靠的工具之一^[4~7].从动力学角度讲,这种方法中变换的序列仍残留着原序列的痕迹,与原序列保持着相同的持久性(或反持久性);同时,变换可较好地“滤除”其自身演化的趋势成分,剩下的离差序列主要就是波动成分.因此在分析非平稳时间序列时,采用 DFA 法可以避免对相关性的错误判断.

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).MF-DFA 实际是 DFA 思想的进一步广义化,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^[8]:

a. 建立一新序列

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

\bar{x} 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, 其方法见文献 [8]。

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 [9]。我们可以用它来察看强沙尘暴序列波动背后隐藏的规律。

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 [10] 进行分析。

图 1 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) , 大范围影响出现得比之前更频繁、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 $y_k(i)$ 取 m 次多项式($m = 1, 2, \dots$) 时, m 与 $h(q)$ 的关系, 结果如图 2; 另一情况是 m 值不变时, q 与 $h(q)$ 的关系, 见图 3。

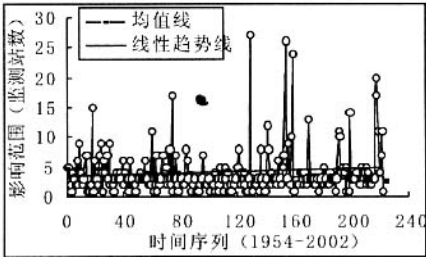


图 1 强沙尘暴时间序列

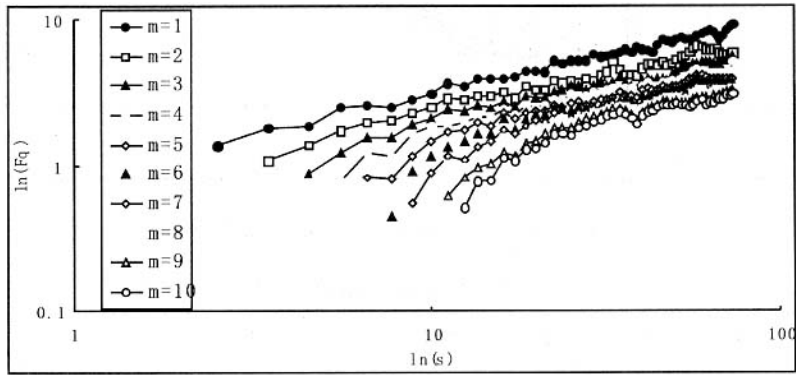


图 2 m 变化时的 $\ln(F_q(s)) \sim \ln(s)$ 关系曲线

上至下, m 值依次增大, 即 DFA1、DFA2、...、DFA10。为确保局部趋势函数 $y_k(i)$ 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 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。

从图 2 和表 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。

$m = 1$ 时, $\ln(F_q(s)) \sim \ln(s)$ 随 q 的不同取值而变化的关系示于图 3。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 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 取值为 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 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.

表 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

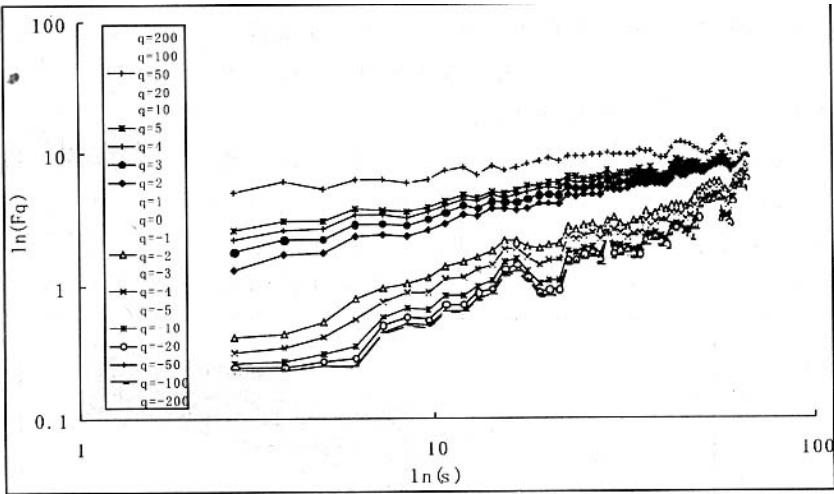


图 3 q 变化时的 $\ln(F_q(s)) \sim \ln(s)$ 关系曲线

表 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

从表 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.

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 5(具体过程略)).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.

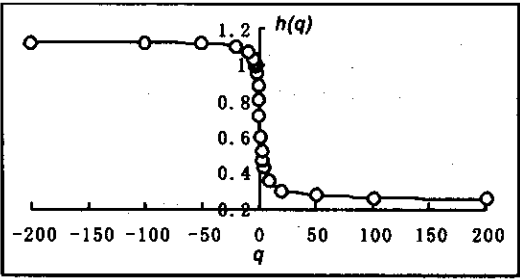


图 4 $h(q) \sim q$ 关系曲线

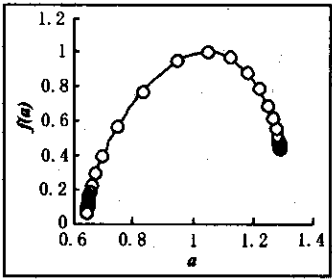


图 5 强沙尘暴的多重分形奇异谱 $f(a)$

3 强沙尘暴时序的分形行为探讨

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,及其与东南热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,才可能更好的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^[11].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 6;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^[12,13].处于自组织临界状态的系统包含着众多的发生短程相互作用的组元,并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.强沙尘暴的暴发过程具有上述特征,因此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.

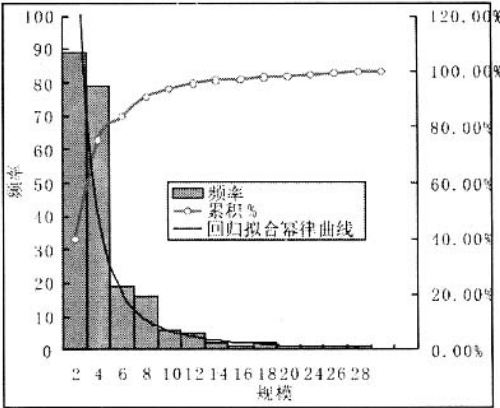


图 6 强沙尘暴的幂律分布直方图

4 结语

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.

参考文献:

[1] Xu Qiyun, Hu Jingsong. Spatiotemporal distribution characteristics of dust storm weather in northwest China[J]. Journal of Applied

Meteorology ,1996 ,1(4) :479 – 482.

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 ,1(4) :479 – 482.

- [2] Xiu Jianfeng ,Wu Zhiming ,Chen Weiming ,Wang Qiang ,Gao Fenrong. Study of sand and dust storm weather in northwest China on April 5 ,1994[J]. China Desert ,1996 ,1(3) :282 – 287.
- 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 ,1(3) :282 – 287.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Ivanova K , Ausloos M. Application of the detrended fluctuation analysis (DFA) method for describing cloud breaking[J]. Physica A ,1999 ,274 :349 – 354.
- [6] 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.
- [7] Zhuang Xintian ,Huang Xiaoyuan. Scale theory and empirical research in the securities market[J]. Systems Engineering – Theory and Practice Engineering 2003 ,23(3) :1 – 8.
- 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.
- [8] 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.
- [9] Ivanova K , Shirer H N ,Clothiaux E E , et al. A case study of stratus cloud base height multifractal fluctuations[J]. Physica A 2002 ,308 :518 – 532.
- [10] Zhou Zijiang ,Zhang Guocai. Typical dust storm in north China(1954 ~ 2002) [J]. Science Bulletin ,2003 ,48(6) :1224 – 1228.
- 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(6) :1224 – 1228.
- [11] Zhang Cunjie ,Ning Huifang. Spatial distribution of dust storm ,fly sand floating dust over last thirty years in Gansu province[J]. Weather 2001 ,28(3) :28 – 32.
- 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.
- [12] Per Bak , Kan Chen. Self-organized criticality[J]. Scientific American ,1991 ,264(1) :26 – 33.
- [13] 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 2003 ,46(1) :10 – 21.