DOI:10.16262/j.cnki.1000-8217.2000.05.004

·学科进展·

地质灾害系统演化特性的定量判定

黄润秋 许 强*

(成都理工学院地质灾害防治国家专业实验室,成都 610059)

[摘 要] 以地质灾害系统为研究对象,通过其相空间维数、Lyapunov 指数、BDS 统计分析以及R/S分析等一系列手段和方法的研究,认为对于绝大多数地质灾害系统而言,系统的演化规律主要受确定性规律所控制,但在演化过程中也会受到外界因素的干扰和系统本身内部涨落的影响。

[关键词] 地质灾害系统,相空间,lyapunov 指数,BDS 统计分析,R/S 分析

现阶段对地质灾害系统演化特性的研究基本停留于两个极端状态,一种情况是将地质灾害系统的演化过程用一个确定的、静态的模型加以描述(如刚体极限平衡理论;基于概率论的各种统计预报模型等);另一种情况则是过分夸大其演化过程中所表现的非线性特征,认为地质灾害系统的演化基本上是混沌的、无序的、随机的,不具有确定的规律,必须用非线性动力学模型才能描述。然而,从大量的已有研究成果中我们可以发现这样一个事实:确定性模型和非线性动力学模型都能对地质灾害系统的演化过程进行一定程度的描述,但都不能予以准确地描述,这就相应地导致了对地质灾害系统失稳预报的不准确性。究其原因,我们认为问题出在对地质灾害系统体系演化特性的认识上。

一个体系的特性主要由其开放程度和所处的演化阶段来决定。比如,一个成形的斜坡体系,由于它在不断地与外界进行物质和能量的交换,属于一个开放系统,但其开放程度又不算太高,在一定的演化阶段外界因素并不能轻易地改变地质灾害系统自身的演化规律。系统一方面沿着既定的、不可逆转的自身演化规律进行发展演化,另一方面因与外界进行着物质和能量的交换而受外界因素的影响,并且外界因素在一般情况下(临界失稳状态除外)只能通过"影响"(而不是控制)内在因素演化的方式对系统演化发生作用,这就是哲学上的"内因本质,外因通过内因起作用"。正因为如此,自然界中大多系统在演化过程中既表现出确定性、必然性的一面,同时又具有随机性、混沌性、无序性的一面。基于上述思想,在建立地质灾害系统的演化模型以及进行地质灾害系统的时空预报时,就应该重视对地质灾害系统演化过程中所显示出的确定性和非确定性信息进行提取,以期对地质灾害系统的演化本质进行更深入地认识,对地质灾害的发生时间进行更为准确地预报。

1 重建相空间及相空间维数

现有的地质灾害监测,大多是位移监测,故监测结果往往只能得到一单变量时间序列。因此,通常认为单变量时间序列仅能提供地质灾害系统演化十分有限的信息,甚至有人怀疑用单变量时间序列这种一维的观点来研究地质灾害系统这种复杂体系的有效性和可靠性。事实上,单变量时间序列原则上讲是复杂的地质灾害系统中各种要素相互作用的结果,它不但包括着地质灾害系统演化的综合信息,还蕴藏着参与地质灾害系统变形破坏整个过程其他变量的痕迹。因此,单变量时序列实际上可能包含着动力系统的大多重要信息。那么,如何利用信息有限的一维时间序列来尽可能多地提取地质灾害系统演化过程中众多的动力学信息呢?最常用的办法就是对一维时序的维数进行扩充和延拓,即所谓的重建相空间。

对一个维 n (含 n 个变量)的动力系统,可用 n 个一阶微分方程加以描述:

* 1995 年度国家杰出青年科学基金获得者.
本文于 2000 年 3 月 12 日收到.

$$\frac{dx_i}{dt} = f_i(x_1, x_2, \cdots, x_n) \quad i = 1,2,\cdots,n \quad (1)$$

也可将式(1)通过消元变换为一个 n 阶非线性微分方程：

$$x^{(n)} = f(x, x^{(1)}, x^{(2)}, \cdots, x^{(n-1)}) \quad (2)$$

此时状态空间的坐标就由 $(x, x^{(1)}, x^{(2)}, \cdots, x^{(n-1)})$ 来代替。式(2)描述了与式(1)同样的动力学，它在由坐标 $x(t)$ 加上其 $(n-1)$ 阶导数所构成的空间中演变，因此，这种代替并不损失该动力系统演化的任何信息。1981 年法国科学家 Ruelle 提出了用离散的时间序列 $x(t)$ 和它的 $(n-1)$ 时滞位移 $x(t+\tau), x(t+2\tau), \cdots, x(t+(n-1)\tau)$ 来代替式(2)中的 $x(t)$ 和它的导数，其中 τ 称为时滞参数。显然，这种延拓运算类似于连续变量的微分。重建相空间实质上是将一维时间序列(又称为状态空间)变成了一个具 N 个相点的 n 维相空间，这里的 n 为嵌入相空间维数。原来的状态空间就被嵌入相空间所代替，N 为相点个数，N 个相点便形成了该维嵌入空间的轨道(图 1)。

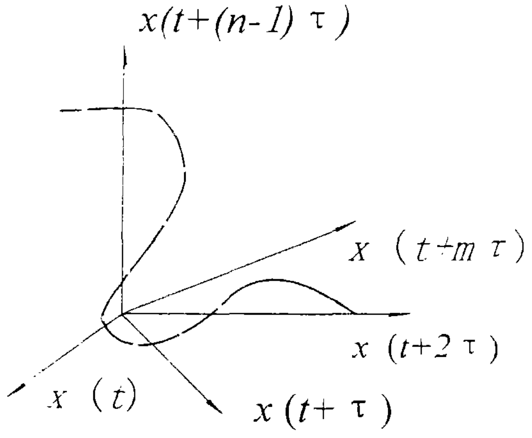

图 1 n 维嵌入相空间的轨道

重建后的相空间类似于一个广义的几何空间，因此，可以用该空间的维数来定量判断相空间的复杂程度。空间的维数(也即吸引子的维数)一般用关联维数来表示，而求关联维数的关键是求关联积分 $C(m,n,r)$。若将时间序列中两个长度为 n(即 n 维)的子序列用两个向量 $x_i^n = (x_{i1}, x_{i2}, \cdots, x_{in})$，$x_j^n = (x_{j1}, x_{j2}, \cdots, x_{jn})$ 表示，则关联积分 $C(m,n,r)$ 就是一个向量中的每一个分量在另一个向量对应分量的 r 邻域内的概率。限于篇幅，关联积分的具体计算方法请参见文献[1,3]。

作为代表，分别以卧龙寺新滑坡和新滩滑坡的监测时间序列作为研究对象(这两个滑坡的监测数据具体资料请参看文献[1])，重建这两个滑坡的相空间，并计算出相空间的维数 $D(m)$ 分别为 1.513 和 1.622。同时，计算结果表明，这两个滑坡都存在饱和嵌入维数 m_c，且两者的 m_c 都等于 3。而饱和嵌入维数是指当 $m \geq m_c$ 时，相空间维数 $D(m)$ 不再随 m 变化而变化时对应的 m 值(即 m_c)。

一个时间序列饱合嵌入维数 m_c 的存在与否反映了该序列的性质。如果 m_c 不存在，那么关联维数的估计值 $D(m)$ 将随 m 的增大而趋于无穷大，表示吸引子不存在，说明该时间序列为一随机序列。对于混沌系统、$D(m)$ 可达到饱和，即存在饱合嵌入维数 m_c。因此，卧龙寺新滑坡和新滩滑坡都是一个具混沌特性的动力学体系。

2 地质灾害系统演化混沌性程度的 Lyapunov 指数判定

从上一节的分析知，地质灾害系统大多属于混沌系统，混沌系统最显著的特点就是对初值的敏感性，存在所谓的“蝴蝶效应”。初值的敏感性预示着长期行为的不可预测性。如何度量系统对初值的敏感性程度呢？这就涉及到 Lyapunov 指数。

Lyapunov 指数是指相空间中邻近轨道发散或收敛的平均指数率，它反映了系统性态对初值的敏感程度。

考察一个一维映射：

$$x_{n+1} = f(x_n) \quad (3)$$

当初始条件 x_0 出现一偏差 δx_0，那么经过 n 次迭代后，就要发生指数分离，故 n 次迭代后的误差为：

$$\delta x_n = f^n(x_0 + \delta x_0) - f^n(x_0) = \frac{df^n(x_0)}{dx}\delta x_0 = e^{LE \cdot n}\delta x_0 \quad (4)$$

其中：

$$LE = \frac{1}{n}\ln\frac{\delta x_n}{\delta x_0} = \frac{1}{n}\left|\frac{df^n(x_n)}{dx}\right| \quad (5)$$

LE 就是 Lyapunov 指数(简称 L 指数)，它表征了相邻点之间距离的平均辐射率。上式是一维映射的 L 指数，对 n 维流形来讲，它有 n 个 L 指数 LE_i，$i = 1,2,\cdots,n$，其中最大的 L 指数称为最大 Lyapunov 指数 LE_1。对于一个混沌吸引子，$LE_1 > 0$，而对于平庸吸引子，$LE_1 \leqslant 0$，因而可利用 LE 的正负及大小来判断吸引子是否是混沌的以及混沌的程度。

同样，作为代表，我们计算了卧龙寺新滑坡和新滩滑坡的 LE_1 分别为 6.69×10^{-3} 和 6.16×10^{-2}，表明这两个滑坡体相空间中邻近轨道呈指数型发散

($LE_1>0$),预示着其在演化过程中存在着对初始条件的敏感性,外界随机因素对其演化历程存在着一定的影响,但 LE_1 又相对较小($LE_1<10^{-2}$),说明指数型发散不可能太强烈。因此,可以认为,一般的地质灾害系统的演化图像可描述为:地质灾害系统总体上按照自身内在的演化规律进行演化,但在演化过程中要受到外界因素的扰动。此种特性从其位移-时间关系图中可以明显地表现出来:位移随时间 t 总体上呈递增趋势(一般可用指数曲线拟合),但局部也会出现一些微小的波动。值得指出的是,监测时间序列中波动并非完全由外因造成,这一点我们将在本文第3节中予以详细地阐述。

3　地质灾害系统演化非线性特性的BDS统计分析

在本文的第2节中谈到,地质灾害系统演化时序中的波动并非完全由外界因素干扰造成,还可能由系统本身内在因素所致。通常情况下,波动是上述两种因素迭加的结果,并且这种波动往往并不是完全随机的,其中还包含着复杂的非线性结构。下面我们用BDS统计量对这一观点(假设)进行验证。

BDS统计是Brock,Dechert,Scheinkman在关联积分的基础上提出的用于检验iid(独立同分布)序列的一种统计量[2]。

$$BDS(m,n,r)=\sqrt{n}[C(m,n,r)-C(1,n,r)^n]/V(m,r) \tag{6}$$

其中:

$$V^2(m,r)=4[K^m+2\sum_{j=1}^{m-1}K^{m-j}C^{2j}+(m-1)^2C^{2m}-m^2KC^{2(m-1)}] \tag{7}$$

C、K 通常由下式估计[2]:

$$\hat{C}_n(r)=\frac{1}{n}\sum_{z=1}^{n}\sum_{l=1}^{n}H(r-|x_z-x_l|) \tag{8}$$

$$\hat{K}_n(r)=\frac{1}{n}\sum_{r=1}^{n}\sum_{z=1}^{n}\sum_{l=1}^{n}H(r-|x_r-x_z|)H(r-|x_z-x_l|) \tag{9}$$

若时间序列 $x_t(t=1,2,\cdots,n)$ 为iid序列,则 $BDS(m,n,r)$ 渐近收敛于标准正态分布;反之,若 BDS 统计量不收敛于正态分布 $N(0,1)$,则可拒绝原时间序列为iid的假设。

同样选取卧龙寺新滑坡的位移监测时序为研究对象。为了检验该时间序列的波动特性,先用指数函数对原时间序列进行拟合,得到原序列与指数函数之间的离差序列,将该离差序列作为真正的检验对象。大量实例已表明,地质灾害系统的演化(特别是进入加速变形阶段以后)一般都呈指数规律变化,因此,采用指数函数可较好地“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。卧龙寺新滑坡的位移监测时序拟合的指数函数为 $y=2.73556e^{0.0546367x}$。根据残差序列的计算结果见表1。表1表明,残差序列的BDS统计值拒绝iid假设,因此可以断定,地质灾害系统演化过程中所出现的变形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,这种非线性主要来自于组成地质灾害系统岩体的累进性破坏。也正因为存在着非线性,才使地质灾害系统的演化表现出混沌特性。

表1　卧龙寺新滑坡时序用指数函数拟合后残差序列的BDS统计量

m	$r=0.030$	$r=0.255$	$r=0.510$	$r=0.750$
1				
2	3.31×10^{-3}	1.03×10^{-3}	3.66×10^{-3}	2.43×10^{-2}
3	2.14×10^{-4}	2.13×10^{-6}	5.68×10^{-5}	3.75×10^{-4}
4	1.01×10^{-5}	4.86×10^{-7}	9.71×10^{-7}	5.04×10^{-6}
5	3.44×10^{-7}	1.697×10^{-8}	1.73×10^{-8}	8.25×10^{-8}
6	1.75×10^{-8}	3.33×10^{-10}	3.07×10^{-10}	1.35×10^{-9}

4　地质灾害系统演化趋势的R/S分析

R/S 分析是1965年首先由Hurst提出,以后被很多人用来进行分数布朗运动(FBM)及自仿射分形的研究。其主要用途是利用Hurst指数H预测时间序列的趋势特性。

对于一个时间序列 $\{x(t)\}$　$t=1,2,\cdots,n$,定义其均值序列为:

$$\langle x\rangle_\tau=\frac{1}{\tau}\sum_{t=1}^{\tau}x(t) \tag{10}$$

累积离差为:

$$m(t,\tau)=\sum_{u=1}^{t}(x(u)-\langle x\rangle_\tau)\quad 1<t\leq\tau \tag{11}$$

极差为:

$$R(\tau)=\max_{1\leq t\leq\tau}m(t,\tau)-\min_{1\leq t\leq\tau}m(t,\tau)\quad \tau=1,2,\cdots,n \tag{12}$$

标准差为:

$$S(\tau)=\left[\frac{1}{\tau}\sum_{t=1}^{\tau}(x(t)-\langle x\rangle_\tau)^2\right]^{1/2}\quad \tau=1,2,\cdots,n \tag{13}$$

以 R/S 表示 $R(\tau)/S(\tau)$，则具有如下统计式：

$$R/S \propto \left(\frac{\tau}{2}\right)^H \qquad (14)$$

上式中 H 称为 Hurst 指数，若 x(t) 为 iid 序列，则 H = 1/2。式(14)与分维的定义类似，故可定义 R/S 分维 $D_{R/S} = 2 - H$。对式(14)两边取对数，再用最小二乘法可计算得到 H，进而得到 $D_{R/S}$。当 $H > \frac{1}{2}$（即 $D_{R/S} < 1.5$）时，过去的增量与未来的增量呈正相关，用平均的观点看，过去的一个增长(减少)趋势意味着将来的一个增长(减少)趋势，即过程具有持久性；反之，当 $H < \frac{1}{2}$（即 $D_{R/S} > 1.5$）时，过去的增量与未来的增量呈负相关，用平均的观点看，过去的一个增长(减少)趋势意味着将来的一个减少(增长)趋势，即过程具有反持久性。

仍以卧龙寺新滑坡为例(具体监测数据请参看文献[1])，按照前述方法以其原始位移时序和经指数函数拟合后的离差序列为计算依据，为了"追踪"地质灾害系统各演化阶段的演化特性，将原时序分为 3 个阶段进行研究（$t = 1 \sim 20$，$t = 21 \sim 40$，$t = 41 \sim 52$）。其 H 指数和 $D_{R/S}$ 值计算结果见表 2。

表 2 卧龙寺新滑坡 R/S 分析结果

N	原始位移时序	离差序列
20	$H = 0.9682865$	$H = 0.9636832$
	$D = 1.031713$	$D = 1.036317$
40	$H = 0.9204209$	$H = 0.9584687$
	$D = 1.049579$	$D = 1.041532$
52	$H = 0.9496077$	$H = 0.9402243$
	$D = 1.050392$	$D = 1.059776$

从表 2 可以得到以下几点认识：

(1)总的看来，地质灾害系统演化各个阶段的 H > 0.5, D < 1.5，说明该时间序列具有持久性，也即演化基本上朝着一个方向(位移增大的方向)进行，这与地质灾害系统演化的实际情况是吻合的。

(2)让人感到意外的是，离差序列这一本身具波动特性的时序，各阶段的 H 值竟然也为 $H > 0.5$, $D < 1.5$，具持久性，并且与对应阶段原始位移时序相应的 H 值较接近，这反映了尽管离差序列是将原始序列滤掉其趋势成分后留下的带随机性的波动序列，但是从动力学角度讲它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)。

5 结 论

通过上述各种方法对地质灾害系统演化时序进行分析、研究，可初步得出以下几点结论：

(1)描述地质灾害系统演化的一维单变量时间序列是地质灾害系统体系自身的演化规律和外在因素两者叠加在一起的产物，它包含了地质灾害系统演化的综合信息，可利用重建相空间的办法来尽可能多地提取这些信息。

(2)在重建相空间的基础上，计算相空间吸引子的维数，可以定性地判定地质灾害系统体系演化的特性(混沌的还是随机的)。

(3)通过对地质灾害系统最大 Lyapunov 指数(LE1)的计算，可以定量地判定地质灾害系统体系的混沌程度(或对初值的敏感性程度)。

(4)通过 BDS 统计分析，可以进一步证明地质灾害系统演化具有混沌特性，当然，更重要的是使我们认识到：通常地质灾害系统的位移、地下水以及声发射等监测序列所呈现的上下波动并非完全由外界随机因素的干扰所致，实际上还有一部分是由系统本身的非线性特性(内在随机性)造成的。

(5)利用 R/S 分析方法对地质灾害系统演化时序进行分析，可以考察该时序的趋势特性(持久性或反持久性)，从而为预报提供参考。实例分析结果表明，地质灾害系统演化时序一般具持久性。

(6)利用上述分析方法对典型实例分析结果表明，地质灾害系统一般都是确定性、随机性和混沌性的统一体。因此，描述地质灾害系统的演化特性，既可用确定性的方法，也可用非线性动力学方法，但只有将二者有机地结合起来才能客观、真实地认识和描述地质灾害系统的演化特性。

参 考 文 献

[1] 黄润秋，许强．工程地质广义系统科学分析原理及应用．北京：地质出版社，1997．

[2] 黄登仕，李后强．非线性经济学的理论和方法．成都：四川大学出版社，1993．

[3] 林振山．长期预报的相空间理论和模式．北京：高等教育出版社，1989．

QUANTITATIVE ANALYSIS ABOUT EVOLUTIVE CHARACTERISTICS OF GEOLOGICAL HAZARD SYSTEMS

Huang Runqiu Xu Qiang
(*National Laboratory of Geological Hazard Prevention and Geological Environment Protection, Chengdu Institute of Technology, Chengdu* 610059)

Abstract In this paper, evolution process of geological hazard systems is studied based on some non-linear theory concepts including dimension of phase space, Lyapunov index, BDS and R/S quantities. Results show that the evolution characters of geo-hazards are strongly influenced by disturbances of external factors and their internal fluctuation. These systems are highly characterized by deterministic features, randomicity and chaos synchronously, which play a very important role in the prediction of geo-hazards and should not be neglected.

Key words geological hazard, phase space, lyapunov exponent, BDS statistical analysis, R/S analysis

·资料·信息·

“中国东部陆地农业生态系统与全球变化相互作用机理研究”取得重要进展

由彭少麟研究员、周晓峰教授主持,中国科学院华南植物研究所、北京师范大学、中国农业科学院气象研究所和东北林业大学等单位共同承担的国家自然科学基金“九五”重大项目——“中国东部陆地农业生态系统与全球变化相互作用机理研究”,经过近2年的研究,取得了一些重要进展。最近该项目被国际地圈生物圈计划(IGBP)之全球变化陆地生态计划(GCTE)列为核心研究项目,分类级为一等,开展该研究的中国东部南北样带被列为(IGBP)的第15条国际标准样带。

该项目采用梯度样带途径研究了中国东部农业生态系统结构、功能和过程机理,重点研究土壤中C、N循环、转化的过程、影响因素及时空分布规律;基本摸清了样带内森林、草地、农田生态系统能量环境、能量流动与生产力形成机制,发现了制约各主要农业生态系统类型生产力的部分关键因子,建立了斑块、景观和区域尺度的生态系统生产力模型;揭示我国主要农业生态系统对全球变化的可能反馈;揭示东部样带土地利用和土地覆盖格局的变化,尤其全球变化条件下农业区划、植被分布区划的变化,以及对自然生产力、自然环境和社会经济发展的影响。初步发现了农业生态系统土地利用和地表覆盖格局变化与全球变化相互作用影响的机理;初步阐明典型农业生态系统的特征参数,建立不同尺度(斑块、景观、区域)主要农业生态系统的生物地理模型和生物地球化学耦合模型及功能过程耦合的仿真模型;大尺度规律探索的MATA模型。收集并建立了100多个数据库,建成了我国主要农业生态类型资源信息系统。这些结果为探讨在全球变化条件下的我国农业生态系统持续发展的调控途径,为区域和政府职能机构决策提供科学依据打下了良好基础。

(生命科学部 杜生明 刘定震 供稿)