

文章编号: 1008—2786(2000)增—0112—06

地质灾害发生时间和空间的预测预报

许 强, 黄润秋, 向喜琼

(地质灾害防治与地质环境保护国家专业实验室, 四川 成都 610059)

摘 要: 运用非线性科学的理论和方法, 提出了一整套地质灾害预测预报的理论和方法, 包括探索地质灾害发生前兆的加卸载响应比方法、地质灾害发生时间预测的协同学模型以及地质灾害区域预测评价的神经网络方法, 并建立了基于 GIS 的地质灾害区域评价系统。同时, 通过对向家坝水电站库区的崩滑地质灾害的统计分折, 提出了地质灾害发生规模与发生频率间的幂律规则。

关键词: 地质灾害; 预测预报; 区域评价; 地理信息系统; 幂律规则

中图分类号: P62

文献标识码: A

研究地质灾害, 其中一个最重要的内容便是对可能发生地质灾害的时间及可能失稳破坏的空间范围进行预测预报。这也是目前地质灾害研究的一个热点。对于地质灾害发生时间和空间的预测预报, 目前国内外已提出了很多行之有效的模型和方法, 但这些方法的理论基础大多是常规的数理统计分析^[1, 2]的分析知道, 常规统计方法处理数据的能力是有限的, 并且往往还要受到很多条件的制约。因此, 大多数情况下上述模型的预测结果并不是太理想。本文在前人工作的基础上, 利用非线性科学的基本理论, 首先对地质灾害发生的前兆进行探索, 然后提出了几种地质灾害发生的时空预测预报的新理论和新方法。

1 用加卸载响应比理论探索斜坡失稳前兆

地震、滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害, 都属于非线性系统的失稳, 非线性系统失稳前都要向人类“展示”出大量的异常信息——失稳前兆。国内外已有研究结果表明(周萃英等, 1992; 秦四清等, 1993), 地质灾害在失稳前也将表现出明显的前兆异常(例如降维、减熵现象)。本文拟利用中国学者尹祥础^[3]提出的加卸载响应比理论探索斜坡失稳的前兆。

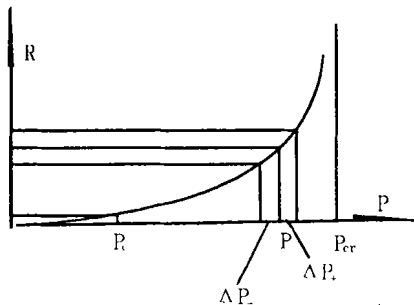


图 1 非线性系统的响应与
广义荷载间的关系(引自[3])

Fig. 1 Relationship between response and generalized
loads of nonlinear systems

非线性系统在广义载荷作用下, 要产生相应的响应(可以是位移、应变及与之相关的各种力学量或非力学量, 相当于“不可逆流”)。由文献^[1, 3]知, 广义载荷与系统响应之间具有如图 1 所示的关系。现在来分析图 1。设载荷增量为 ΔP 时, 所对应的响应增量为 ΔR , 定义响应率 X 为

$$X = \lim_{\Delta P \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta R}{\Delta P} \right) \quad (1)$$

当载荷很小时, 系统处于稳定状态, 这时 P 与 P_r 之间的

收稿日期: 1999—12—07

基金项目: 国家自然科学基金(项目号: 49702038)、地质灾害防治与地质环境保护国家专业实验室开放基金联合资助

作者简介: 许强(1968—), 男(汉族), 博士, 副教授, 地质工程专业, 出版专著 3 部(与人合著), 发表论文近 40 篇。

联系电话: 028—4079072, E-mail: xq@ditu.edu.cn

关系为线性关系或近似线性关系,在此阶段,加载时($\Delta P > 0$)的响应率 X_+ 与卸载时($\Delta P < 0$)的响应率 X_- 基本相等。如果载荷不断增大,逐渐接近临界值 P_σ 时,其响应率 $\Delta R / \Delta P$ 将随着载荷的不断增大而增大。当系统失稳时

$$X = \lim_{\Delta P \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta R}{\Delta P} \right) \rightarrow \infty \tag{2}$$

上式说明,在接近失稳时,对哪怕是极其微小的加载(系统扰动),都会导致系统巨大的响应。因此,对一个非线性系统进行加载,即使其载荷增量 ΔP 保持不变,但由于系统的稳定状态不同(即 P / P_σ 的大小不同),其响应率也不一样。 $\Delta R / \Delta P$ 愈大,系统愈接近失稳。为了找出更一般的规律,进一步引入一无量纲的量 加卸载响应比

$$Y = \left(\frac{\Delta R_+}{\Delta P_+} \right) / \left(\frac{\Delta R_-}{\Delta P_-} \right) = \frac{X_+}{X_-} \tag{3}$$

显然,岩体在弹性变形阶段(即非平衡线性区), $Y \approx 1$;当岩体进入非线性阶段(即非平衡非线性区)后 $Y > 1$ 。随着载荷的增加, Y 也逐渐增大,当系统失稳(即处于临界状态)时 Y 可趋近于 ∞ 。根据这一规律,可用加卸载响应比 Y 这一参量定量描述滑坡孕育区介质的稳定程度。

对一个滑坡体进行加载与卸载非现时人工力量所能实现的。斜坡岩体一般受自重应力(构造应力)和引潮力两种力的作用,前者虽然在数量上远大于后者,但前者在一定时间段内是基本上保持不变的,而后者则不断地呈周期性变化,所以可以采用固体潮来作为斜坡岩体加卸载手段,只要测出对应于加载与卸载时该地质体的某种响应 ΔR_+ 与 ΔR_- ,就可算出 Y 值来判断其发生失稳的危险性程度。

利用滑坡体变形对固体潮应变的响应^[4],我们定义其加卸载响应比为

$$Y = \frac{(\Delta h / \Delta \epsilon)_+}{(\Delta h / \Delta \epsilon)_-} \tag{4}$$

式中 Δh 为滑坡体上某监测点的变形增量, $\Delta \epsilon$ 为固体潮的应变理论值(具体计算方法请参看文献^[5]),角标“+”表示加载,“-”表示卸载。

作为实例,选取监测资料较齐全的乌江渡水电站大黄崖不稳定岩体作为实例进行研究。图2为根据大黄崖 L_2 裂缝的垂直和水平位移监测资料按(4)式算得的加卸载响应比随相对时间的变化曲线。

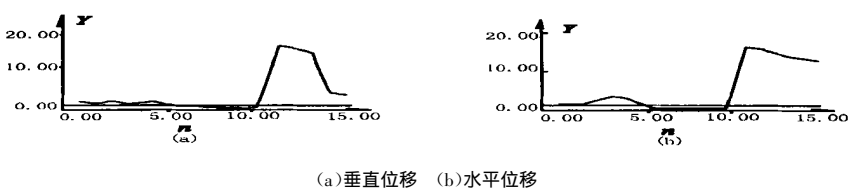


图2 大黄崖响应比 Y 随相对时间的变化
Fig. 2 Relationship ratio Y relative time curve of Da Huangya rockmass

图2表明,不论是垂直位移还是水平位移响应其响应比随时间变化的曲线都具有如下共同特点:不稳定岩体在变形初期加卸载响应比在1上下波动,当变形发展到一定阶段时响应比开始剧增,到岩体临界失稳时响应比又略呈下降趋势,表现出明显的“超前效应”。图2所表现的岩体失稳前响应比剧增的特点显示了斜坡岩体即将失稳的前兆,此失稳前兆无疑对斜坡稳定性的评价及预报有着十分重要的指导意义。根据响应比的变化特点,不仅可以定量判断斜坡所处的演化阶段(线性变形阶段、非线性变形阶段以及临界失稳阶段等),从而确定斜坡的稳定性状况,而且可以直接用加卸载响应比理论对斜坡失稳时间作中期预报。

2 地质灾害发生时间的协同预测模型^[6]

我们已经知道^[1],由于地质灾害系统存在自组织特性,使得地质灾害系统在整个演化过程中各子系

统之间的运动会表现出一种合作和协同效应,并遵从非线性系统的一般演化规律(如无序向有序的转化,远离平衡态的相变等)。近年发展起来的协同学理论正是以研究具复杂结构的非线性系统在演化过程中的协同效应为其主要目标的。因此,本文将协同学的研究方法和成果引入地质灾害系统演化规律的研究中,并据此提出了一种新的地质灾害发生时间预测模型——协同预测模型^[7]。

根据协同学理论^[9],可以推导出地质灾害系统的演化方程

$$y=ay-by^3 \tag{5}$$

式中 y 在协同学中被称为慢变量, a 、 b 为待定系数。若把其中的慢变量 y 用地质灾害系统演化过程中所出现的状态变量(如位移、声发射、速率等,即“不可逆流”)来代替,求解式(5),再根据地质灾害系统的状态变量——时间序列资料用最小二乘法拟合出 a 、 b 值,则可用于地质灾害发生时间的预测。由于在推导式(5)的过程中忽略了涨落项 $F(t)$,用式(5)表示实际地质灾害系统演化的历时曲线必然会在一定误差,减小该误差的补救措施是仿用灰色系统的方法对原始监测数据进行累加处理(AGO),以淡化随机因素(涨落项)对原始数据的影响。设 $y^{(0)}$ 为原始监测非负时间序列,一次累加生成后的生成序列为 $y^{(1)}$,则式(5)变为

$$\frac{dy^{(1)}}{dt}=ay^{(1)}-b[y^{(1)}]^3 \tag{6}$$

式(6)的解为

$$Y^{(1)}(t)=\frac{a}{\sqrt{\frac{1}{\frac{y(0)}{a-b(Y(0))^2}}+b}}e^{2at} \tag{7}$$

式中 $y(0)$ 为位移时序的初值。若取变形速率最大点所对应的时间作为地质灾害的预测时间(晏同珍等,1987,1988),则经过一定的数学推导得地质灾害发生的预报时间

$$t=\frac{1}{2a}\text{Ln}\left[\frac{a-by(0)^2}{2by(0)^2}\right]+t_0 \tag{8}$$

t_0 为时序号初始数(一般恒定为 1)。

利用黄龙西村滑坡和意大利 Vaiont 滑坡的资料对上述模型进行检验,前者的预测时间比实际滑坡时间仅落后 1 小时左右,后者比实际滑坡时间落后 3 日(监测时序时间间隔为 3 日),说明预测精度较高。

3 基于 GIS 的地质灾害区域评价预测系统

国内外很多研究者已提出了不少地质灾害发生区域的评价预测方法(即通常所说的空间预测)。如模糊综合评判、逻辑信息法、系统模型法、聚类分析法等,所有这些方法经过实践证明都具一定的实用性和可靠性,但总的说来其预测精度都不太高,对于较复杂的问题甚至不能预测。究其原因,促使地质灾害发生的各种因素间存在高度的非线性,而神经网络理论对处理数据间非线性关系恰好具有很强的功能^[3],因此,本文主要采用神经网络理论来进行地质灾害的区域评价和预测。同时,为了使此种方法得到推广应用,我们还开发了基于地理信息系统(GIS)的地质灾害区域评价预测系统。基于 GIS 的地质灾害区域评价(图 3)的主要步骤如下:

(1)首先需确定评价因素(相当于统计学中的自变量和神经网络理论中的输入层变量)。对于崩滑地质灾害的区域评价而言,可以选取岩性、地形地貌(如坡度、坡高等)、岩体结构(如结构面的发育状况、结构面的组合状况等)、岩土体质量等基本因素和一些诱发因素(如地震、降雨强度以及人类工程活动状况等)作为评价因素,然后将研究区的这些评价因素数字化。在数字化的过程中,对于诸如岩性、岩体结

构等定性因素,需按一定的规则或指标体系(常用方法是先按该因素对地质灾害的影响程度分级,再给出各级的权重)量化。

(2)为了获取大量的样本和提高评价预测精度,还需要对评价区域按照要求的精度进行网格化处理,然后根据评价因素的数字化成果,给研究区各个网格赋属性。

(3)将通过上述步骤获得的大量的样本资料存放在一个专门的数据库中,供地质灾害区域评价时调用。

(4)从上述数据库中调入一定的学习样本提供给神经网络区域评价主模块,对网络进行学习训练,当网络收敛后,便可以采用训练好的网络对其他未知样本进行预测评价。然后将预测评价结果用图形的方式显示出来,得到研究区的地质灾害区域评价图。

图4是利用上述系统对三峡工程库区某地段所进行的地质灾害区域评价结果图。在该图中,地质灾害危险性等级被分为好、较好、较差、差4个等级,该图可直接为减灾防灾和土地管理提供重要的依据和参考。

4 崩滑地质灾害发生规模与发生频率的幂律规则

1956年,Gutenberg和Richter发现地震震级 $>m$ 的地震数目 N 满足如下经验关系式

$$\text{Log}N=a-bm \tag{9}$$

后来人们通过大量统计表明,上述关系式不仅适用于区域地震活动,对全球范围的地震活动都适用。1987年,Per Bak,Chao和Kurt Wiesenfeld^[7]首次提出了自组织临界状态的概念。他们利用细胞自动机模拟手段,对沙堆模型进行了数值模拟。结果表明,具自组织临界状态特性的系统,在临界状态其发生规模与相应的分布函数满足如下关系式

$$D(V)=KV^{-a} \tag{10}$$

该式称为幂律(power law)。其中, $D(V)$ 为某事件的分布函数, V 为该事件的规模。在实际应用中, $D(V)$ 一般定义为规模 $>V$ 的事件出现的频率,规模 V 取尺寸量纲,如长度、体积、面积等。后来,经过大量的统计结果表明,幂律规则是一个普适性(universality)的规律,它广泛存在于自然界的各种现象中,如泥石流暴发规模与频率、岩土体颗粒的粒度分布、油气田规模与频率以及岩体累进性破坏过程等等。从类比分析和经验判断,崩滑地质灾害发生的规模与频率之间似乎也满足上述幂律规则。通过对向家坝水电站库区崩滑体资料进行统计,结果表明,在无标度区内,崩滑体的规模 V 与崩滑体发生频率 N 的对数间呈较好的线性关系,即它们之间满足如下关系式为: $\lg N=4-0.072V$,其相关系数达0.976,说明相关性较好。由此表明,某一地区其存在的崩滑体规模与频率之间确实满足幂律规则,说明各种事物

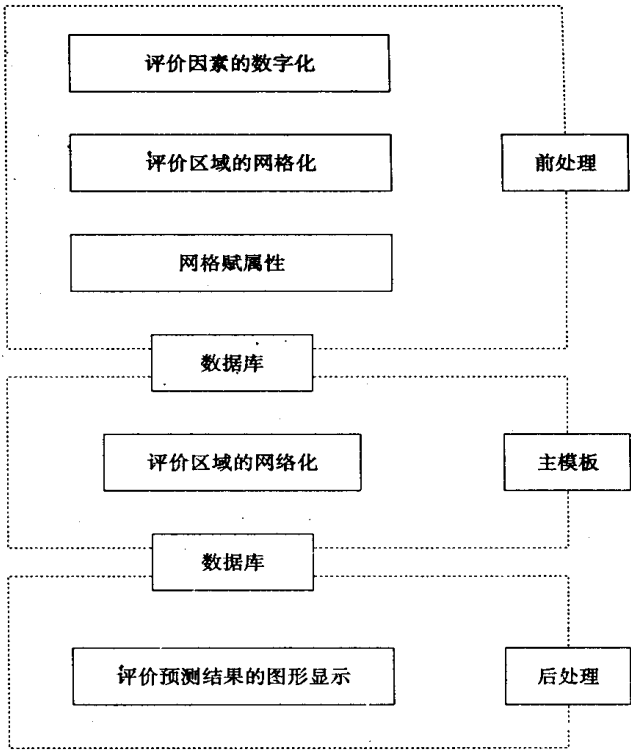


图3 基于GIS的地质灾害区域评价预测的实施步骤
Fig. 3 Steps of Geological hazards regional evaluating based on GIS

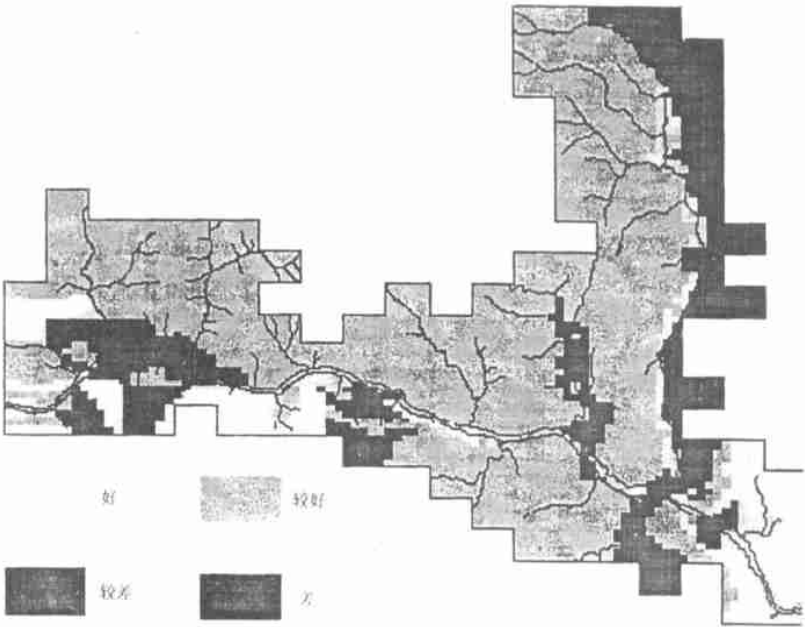


图 4 长江三峡库区某段的崩滑地质灾害区域评价结果
Fig. 4 A example map of regional evaluating results of Geological hazards based on GIS

间确实存在着一些普适性规律。

5 结 论

综合上述研究成果,可以得到如下认识:

- 1. 由于地质灾害系统属于一个典型的开放系统和非线性系统,而非线性系统在系统演化的临界状态往往要表现出明显的失稳前兆。理论分析和实例检验结果表明,可以加卸载响应比理论来探索崩塌地质灾害系统失稳前兆。
- 2. 地质灾害系统在演化过程中具有自组织特性,自组织特性的一个明显的标志就是系统在演化过程中组成系统的各个部分(或子系统)具有相互协调的能力,即协同功能。基于此,本文根据协同学理论,提出了地质灾害发生时间预测的协同模型。实例检验结果表明,协同预测模型具有较强的预测能力和较高的预测精度。
- 3. 本文提出了地质灾害区域评价预测的神经网络方法,并在此基础上建立了基于 GIS 的地质灾害区域评价系统,该系统可以作为地质灾害区域评价和预测的实用工具。
- 4. 和一般的非线性系统一样,崩塌地质灾害发生规模与发生频率间也满足幂律规则,这从另一角度说明了世界的统一性。

参考文献:

[1] 黄润秋,许强著.工程地质广义系统科学分析原理及应用[M].北京:地质出版社,1997
[2] 许强,黄润秋.地质灾害的非线性数据处理与建模技术[J].山地学报,2000(增刊)
[3] 尹祥础,尹灿.非线性系统失稳的前兆与地震预报[J].响应比理论及其应用.中国科学. B 辑,1991
[4] 骆鸣津等.固体潮应变理论值的计算[J].地球物理学报,1986,29(2)
[5] 魏宏森,宋永华等编著.开创复杂性研究的新学科——系统科学纵览[M].成都:四川教育出版社,1991.287~

344

- [6] 黄润秋, 许强. 斜坡失稳时间的协同预测模型[J]. 山地研究(现《山地学报》), 1997, 15(1)
- [7] Per Bak, Chao Tang and Kurt Wiesenfeld, Self-organized Criticality: An Explanation of 1/f Noise, Phys. Rev. Lett., Vol. 59, 381-384, 1987

TIME AND SPACIAL PREDICTING OF GEOLOGICAL HAZARDS OCCURRENCE

Xu Qiang, Huang Run-qiu, Xiang Xi-qiong

(National Laboratory of Geological Hazard Prevention, Chengdu 610059)

Abstract: A series of theories and methods for predicting and forecast of geological hazards occurrence are proposed according to nonlinear science in this paper. They include that method of the load-unload response ratio which can be used to study the precursor of geological hazards occurrence, synergetic prediction model of time of geological hazards occurrence, artificial neural network method of regional evaluation of geological hazards. And a software of regional evaluation of geological hazards is developed based on geography information system (abbr. GIS). Moreover, The power law in landslides and rock fall geological hazards is obtained by statistical analysis.

Key words: Geological hazards predicting and forecast regional evaluation geography information system power law