

# 非线性科学理论在地质灾害评价预测中的应用 ——地质灾害系统分析原理

许 强, 黄润秋

(成都理工学院 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:** 将现代非线性科学理论与传统的地质灾害评价预测理论有机结合, 提出了 10 条地质灾害系统分析原理, 同时对地质灾害的评价及预测提出了一系列的新思想、新观点和新认识。

**关键词:** 地质灾害; 非线性科学; 系统分析

**中图分类号:** X43

**文献标识码:** A

我们将可能或已经发生地质灾害的地质体称为地质灾害系统, 大量的研究成果表明, 地质灾害系统是一个具有复杂结构和行为特征的开放系统和耗散体系, 其显著特征就是具有高度的复杂性、非线性和不可逆性。地质灾害系统的这些特性, 使得人们采用传统的理论、研究思路和方法手段来进行地质灾害的评价预测时遇到了较大的困难。近年来发展起来的非线性科学理论, 因其一系列的新思想、新观点和新方法, 已引起了世界各国的科技工作者和各学科领域的广泛关注, 自然也给地质灾害的研究注入了新的活力。本文主要阐述将非线性科学的基本原理与传统的地质灾害评价预测理论相结合, 用于指导地质灾害评价预测和防治的 10 条地质灾害系统分析原理。

## 1 地质灾害系统分析原理

### 1.1 动态地质历史过程分析原理

动态地质历史过程分析原理是指: 任何地质灾害系统都是一个复杂的动态地质体系, 与物质世界的其它系统(如生物物种、社会系统等)一样, 有其形成、演化、发展和消亡的动态历史过程。

以斜坡为例, 外营力导致河流及沟谷不断地侵蚀下切, 标志着斜坡的形成。在漫长的地质历史时期中, 斜坡本身的变形及各种外营力(包括人类工程活动)作用, 导致其以稳定性程度不断降低的方式演化发展, 最后以崩、滑破坏的形式结束其演化历史, 代之以起的是新一轮斜坡的形成, 新一轮斜坡的继续演化。因此, 以历史系统观研究斜坡崩滑地质灾害, 就要通过对其现象及赋存条件的研究, 从全过程、内部作用机理上掌握其变形破坏的演变规律。只有这样, 才能对其稳定性现状和今后的发展趋势作出科学合理的评价和预测。从原理上来说, 这是一个将今论古→以古推今→以今测未的动态地质历史分析法。

### 1.2 整体性和分解协调性原理

整体性原理是指: 各个要素一旦组成系统整体, 就具有孤立要素所不具有的性质和功能, 整体的性质和功能不等于各个要素的性质和功能的简单相加。

我们知道, 系统是由若干要素按照一定的结构所组成的具有一定新功能的有机整体。要素是系统的基础, 是构成系统的必要条件, 但如果要素不按一定的结构方式组合起来, 也不能构成有机的整体。并且, 相同的要素, 其组合方式不同, 所构成的整体(系统)性质可能大不一样。岩体是岩石和结构面的

收稿日期: 1999—05—05; 改回日期: 2000—05—10。

基金项目: 国家自然科学基金(项目号: 49702038)、国家杰出青年科学基金(项目号: 49525204)联合资助

作者简介: 许强(1968—), 男(汉族), 四川南江县人, 博士, 副教授, 主要从事地质灾害与环境保护方面的教学和科研工作。已在国内外公开学术刊物发表论文 30 余篇, 出版学术专著 3 部(与人合作), 主持开发商品化软件 2 套。

组合体,在同一种岩石中,若结构面发育程度、空间展布方式不同,可以组成不同的岩体结构。由同一种岩石所形成的不同结构的岩体,其力学性质可以有相当大的差别。

当然,在强调系统的整体性的同时,还要注意组成系统的要素及其结构形式,这就是分解协调原理。在分析和解决实际问题时,一般将两者结合起来使用,构成整体性和分解协调性原理。它主要说明系统不仅是各种要素组合的整体,另一方面系统的要素也是可以分解和协调的。由这一原理衍生出的方法论便是综合—分析—综合…。

### 1.3 层次原理

层次性原理是指,任何复杂的地质灾害系统或地质灾害问题都具有层次性。在分析地质灾害问题时,不但应分层次逐个进行,而且要注意各层次之间的联系。

层次性原理是地质灾害问题研究中使用非常广泛的一条系统科学原理,也是研究整体性和分解协调性的主要工具。很显然,任何一类地质灾害系统都是由不同的层次构成的。每一个层次都成为整体中的一个子系统或子子系统。在对问题进行分析研究时,首先要从错综复杂的现象中将问题分解出不同的层次,然后,针对不同层次的问题采用不同的研究方法和手段。例如,从广义的角度来讲,突发性地质灾害问题主要包括崩塌、滑坡、泥石流、地震、地面沉陷等,这就是问题不同层次的表现。在研究这些地质灾害问题时,首先必须查明地质体所处的工程地质环境条件。而工程地质环境条件又包括了岩性条件、岩体结构条件、地下水动力学条件、地应力条件等;其中的岩体结构条件又可进一步根据其性质、规模和工程地质意义划为不同的级别,如以断层为主的Ⅰ类结构面;以贯通性裂隙为主的Ⅱ类结构面;以断续延伸裂隙为主的Ⅲ类结构面。每类还可以继续再分为不同的级别。不同类型的结构面,其性质、规模不同,工程地质意义也不相同:Ⅰ类结构面可能控制区域及山体稳定性;Ⅱ类可能控制了局部岩体的稳定性,而Ⅲ类则主要破坏了岩体的完整性,降低了岩体的质量。如果一个地区不同层次的岩体结构都研究得非常清楚,这个地区的岩体结构模型就很自然地建立起来了。

层次性原理要求我们在解决地质灾害问题时要有层次观念,一方面既要把握各个层次之间的关系,从总体上加以考虑;另一方面又要根据所要解决的具体问题把研究的重点放在某一具体层次上,不能“眉毛胡子一把抓”。

### 1.4 自相似原理

自相似原理指的是:地质灾害系统的局部与整体的形态相似,或系统的各个层次具有相似的结构。

自相似在地质灾害系统中普遍存在。例如,假想我们用笔将一个区域性大断裂乃至板块间断裂描在一张图纸上,然后将这张图纸缩小到一个与显微镜下观测到的微裂纹可以相比较的尺寸,或进行相反的操作,将显微镜下观测到的微裂纹无限放大到与描绘大断裂图纸相近的尺寸,那么,将很难区分这两张图纸中哪一张是区域性大断裂图形,哪一张是微裂纹。这两个明显不同层次的“断裂”具有相似结构,又因它们属于同一系统(断裂系统)不同层次的要素,因此称为自相似。同理,一张遥感图片的“山山水水”与一张一般照片的地貌形态基本上没有什么分别,这也体现了自相似性。

### 1.5 开放性原理

开放性原理指的是,任何地质灾害系统都是一个开放体系,它随时随刻都与外界进行着物质和能量交换。地质体的开放性使得其演化过程具有高度的复杂性和自组织特性。

耗散结构理论告诉我们,系统可分为孤立系统、封闭系统和开放系统,而只有同时具有物质和能量交换的开放系统,才可能依靠物质流、能量流、信息流的方式引入负熵,使得系统向进化的方向发展演化。因此,系统开放是系统形成耗散结构的必要条件。

发生地质灾害的地质体(或环境)不仅是人类一切工程、生活活动的基本环境,同时也是人类工程活动的必然载体。也就是说,地质灾害系统不是孤立地存在于地圈的,它必须要与人类工程活动(人类圈)、岩石圈、生物圈、水圈、大气圈,乃至宇宙圈和地幔的软流圈产生复杂的相互联系和相互作用,使得工程地质体时时刻刻都在与这些相关圈层进行着物质、能量和信息的交换,同时也促使了地质灾害系统随时间的发展和演化。

1.6 突变性原理

地质灾害的发生主要是以突发的方式进行的, 但也不排除渐变形式的存在。地质灾害防治的一条重要途径就是变突变为渐变, 变灾难性事件为一般性事件。

在地质灾害问题中, 突变现象比比皆是。例如, 滑坡、崩滑、泥石流以及地震等地质灾害往往都是以突变的形式发生。也正因为它们在经历长时期孕育积累了大量的能量后以突然的方式释放能量, 其破坏程度将大大增强, 对人民生命财产造成较大的损失。同时, 灾害以突变的形式发生可以导致工程岩体变形过程的突然终止而“提前”失稳, 从而给灾害的预报及防治工作带来巨大的困难。

突变性原理还要求我们要以辩证的观点看待地质灾害系统的发展演化过程。在地质灾害系统的演化过程中, 要从一种稳定状态“进化”到更高层次的稳定状态, 可以采取两种方式予以实现, 这两种方式就是突变和渐变, 至于究竟采取哪种方式要看系统本身性质和演化路径, 这一点可以用图 1 尖点突变模型来形象地说明。图 1 表明, 若系统在其演化过程中控制变量  $u$  一直  $> 0$ , 即系统的状态位于奇点集(或分叉集)的另一侧或  $u$  虽  $< 0$  但系统沿  $ABC$  的路径演化, 不跨越分叉集, 则系统只能以渐变的方式进化。反之, 若按  $ABC$  的路径演化, 必定跨越分叉集, 在跨越分叉集的瞬间系统状态变量将产生一个突跳, 即突变。突变虽然是灾害(特别是大型地质灾害)发生的主要形式, 但渐变方式也同样普遍存在, 如大多数的土质滑坡或土壤表层以蠕滑方式出现的“土溜”等。如上所述, 突变是长期积累的能量的突然释放, 而渐变则是以缓慢的方式逐渐释放, 因此, 同种规模的岩体以突变方式破坏所造成的灾害损失往往要比渐变方式大得多。

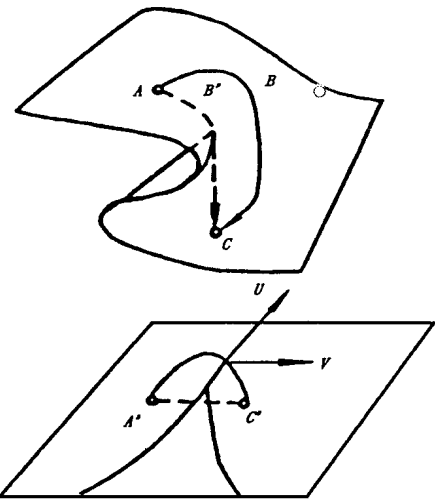


图 1 尖点突变模型

Fig. 1 The model of cusp catastrophe

突变性原理在地质灾害的防治方面有较强的实用价值, 这就是如何对突变实行控制。若想办法将本来要沿图中  $ABC$  的途径演化的地质灾害系统进行人为地控制, 使其沿  $ABC$  路径演化, 则岩体的突变失稳将转化为渐变失稳, 从而大大降低灾害的损失。

1.7 自组织原理

自组织原理指的是, 工程地质体的演化过程实质上就是组成工程地质体的各子系统之间通过不断地竞争和协同, 最后在一定的外界条件和系统内部非线性机制的作用下, 从无序到有序, 从低级到高级的自组织演化过程。

在地质学领域, 小到矿物结构的形成, 大到地壳的板块“漂移”, 自组织现象无处不在。王江海<sup>[3]</sup>等人认为, 矿物中的环带结构、结核体; 岩浆岩中的条带构造、柱状节理、球粒结构; 变质岩中的劈理、条带; 沉积岩中的韵律纹层、结核等等一系列的结构和构造都与自组织作用有关, 在此基础上, 他还对许多矿物岩石的结构构造成因作了动力学分析, 提出了许多新观点, 取得了一些有意义的成果。于学馥<sup>[3,4]</sup>等人认为, 自组织现象也广泛存在于地下开挖结构之中。例如, 地下巷道的自然垮落拱(即自然平衡拱)便是开挖结构自组织的表现。地层在开挖之前本处于一个动态平衡状态, 开挖过程打破了原来的平衡, 导致了能量的变化, 于是地层便本能地自我调节、自我组织, 通过应力和变形的调整(原岩应力自动地调整成围岩应力, 出现应力的重分布; 围岩变形也进行调整, 变形调整的最终结果便是形成自然平衡拱结构), 达到新的平衡。这种自组织过程在斜坡开挖过程中同样存在。事实上, 岩石受力后的累进性破坏过程、滑坡滑面的形成过程和崩滑地质灾害的演化过程都存在自组织作用, 有关内容将另文讨论, 其中一部分已在《山地学报》2000 年增刊上发表。

1.8 监控——反馈原理

监控——反馈原理告诉我们, 任何地质灾害系统都是一个黑箱和灰箱系统, 其中的很多信息仅利用一般的勘察手段是无从知道的, 只有从其外观表现(如演化过程的监测资料)来反推其内部结构和功能。

地质灾害防治的实质就是对地质体的演化行为和发展趋势进行控制, 而控制的最佳方式是反馈。反馈控制是指在对地质体实施控制的过程中, 随时根据地质体对控制的响应(即反馈输出)和控制的目标来决定下一步控制的行为特征。当地质体已处于所要求的状态时, 就力图保持其原状态稳定; 反之, 当地质体偏离所需要的状态时, 则引导系统由现有状态稳定地过渡到预期的状态。地下开挖中的新奥法和动态监控设计和施工便是监控——反馈原理在实际工作中的具体体现。

1.9 对称破缺原理

对称破缺原理是指: 在系统状态发生变化时, 系统从无序均匀分布状态变化为有序结构时, 系统的对称性要降低, 也即对称性发生了破缺。

对称破缺原理所指的对称性是广义的对称性, 它既指几何对称性(在某种对称操作下, 系统的形态保持不变), 也包含系统的功能状态的对称性。我们可以用对称性的高低来表示系统有序程度的大小, 用对称破缺来表示系统状态的突变。

在地质学领域, 对称破缺现象随处可见。例如, 大多断层是由“共轭剪切”机制( $\sigma_1$  剪节量)形成的, 因此, 从理论上讲断层均应成对出现, 但若纵观大地构造图或区域性断裂分布图, 成对出现的断层少之又少, 其原因何在? 作者认为这正是由于对称破缺造成的, 现对此作一简要地分析。图 2 为断层的形成模式图。图 2 表明, 在  $\sigma_1, \sigma_3$  的共同作用下在岩体内部要形成两个最大剪应力带(图中实线和虚线部位), 随着  $\sigma_1$  的增大或  $\sigma_3$  的减小, 两个剪应力带的剪应力也因应力集中而不断增加, 当剪应力达到一定的量值时, 两个最大剪应力带中某个薄弱环节可能首先发生破裂, 由于应力的集中和转移, 破坏将继续在该最大剪应力带中“扩散”, 最终导致沿某一剪应力带破坏, 形成断裂。在上述过程中, 可将岩体中的薄弱环节或外界随机因素引起的偏差看作是涨落, 涨落促使两个最大剪应力带来各占 50% 的破坏概率变成沿某一个剪应力带的破坏(破坏概率为 100%), 即原有的对称性发生了破缺。同理, 褶皱的形成也是由于岩层板梁在受到强大轴向力的情况下, 发生的弯曲现象, 但在某一具体地点究竟是向上隆起形成背斜还是向下凹陷形成向斜, 也可用对称破缺原理解释。

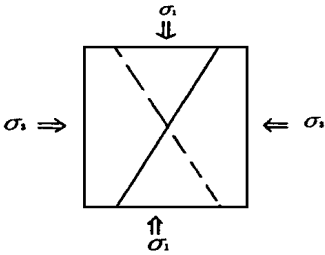


图 2 断层形成过程中的对称破缺  
Fig. 2 Symetric destroy in the course of fault formation

1.10 统一性原理

统一性原理也可称为普适性原理, 该原理认为, 世界上各种事物之间存在着普遍适用的规律, 也即世界是统一的。统一性原理具体可以表现在以下方面:

1. 演化途径的统一性

耗散结构理论、协同学和超循环理论从不同的角度采用不同的方法研究了热力学系统、动力学系统和生物学系统的演化规律, 得出的结论都是一致, 即无论是热力学系统, 还是动力学系统乃至生物学系统, 都遵循从无序→有序的演化规律, 并且在演化过程中都存在着自组织过程。上述演化规律同样适用于地质系统, 社会系统甚至思维系统。如前所述, 地质灾害系统的演化过程同样也是一个从无序到有序的自组织过程。

2 普适常数

在自然界中, 存在着一些普适性常数, 人们最熟悉的是自然指数  $e$ , 黄金分割数 0.618, 光速  $c$  以及普朗克常数  $h$ 。在混沌的研究中, Feigenbaum 又发现了两个常数, 即 Feigenbaum 第一常数和 Feigenbaum 第二常数。

3 同型性

任何动力系统, 都可用如下方程组加以描述:

$$\frac{dx_i}{dt}=f(\lambda, x_1, x_2, \cdots x_n)$$

式中  $\lambda$  为控制变量,  $x_i$  为状态变量。对上式作适当的限制和不同的假定, 可定量解释物质世界中的许多现象, 如生物的生长、竞争, 人口数量的演变、气候的变迁……等等。这就意味着各种不同的学科有着相似的定律, 本质不同的领域会出现结构同一的定律, 这就是同型性。例如, 在滑坡时间预报中, 灰色系统模型实际上就是马尔萨斯人口统计模型的变种; Verhulst 模型原本是生物生长模型, 但晏同珍等人将其用于滑坡预报, 而且取得了较好的效果。

4. 幂律规则

1987 年, Per Bak 等人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一维、二维沙堆模型进行数值模拟, 结果表明, 具自组织临界特性的系统, 在临界状态时规模与其分布函数满足如下关系式

$$D(V)=kV^{-a}$$

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。

随后的研究结果表明, 由于广延耗散动力学系统中, 大量组元(子系统)之间存在着强烈的相互作用, 无论在何种边界条件下, 系统都将自发地朝着临界状态演化。在临界状态时, 该类系统在时间上表现为  $1/f$  噪声效应, 在空间上具分形结构, 因此, 幂律规则是自组织临界状态系统的行为标志。由于自然界中大多系统都是开放的耗散结构系统, 所以幂律规则在自然界中广泛存在, 具有一定的普遍性。

表 1 列出了地质灾害研究领域中的一些幂律规则。从以上各种现象的发生都满足幂律规则这一点可以看出, 整个宇宙存在着和谐的统一性。不论崩塌、滑坡, 还是泥石流、地震, 其发生的时间, 规模乃至空间分布, 这些表面上看起来似乎毫无关联的“独立事件”, 实际上都在“暗中”遵从某种既定的规律, 好象有一支“无形的手”在操纵着这些事件的发生方式以及时间分布情况, 这就是世界的统一性和普适性。

表 1 地质灾害幂律规则实例  
Table 1 some examples for power law of geological hazards

地震数目 $N$ 与震级 $> m$ 的关系	$\lg N=a-bm$	Gutenberg-Richter
地震释放能量 $E$ 与震级 $m$ 的关系	$\lg E=c-dm$	Gutenberg-Richter
泥石流流量 $Y$ 与超过该流量泥石流发生概率 $P$ 的关系	$\lg Y=a-b\lg P$	P. A. Johnson 等 <sup>[8]</sup>
泥石流暴发频率 $N$ 与规模 $Q$ 的关系(东川泥石流)	$\lg N=8.6-1.05\lg Q$	罗德军 <sup>[7]</sup>
洪水发生频率 $N$ 与洪水大小 $S$ 的关系	$\lg N=a-bS$	前苏联学者
崩滑地质灾害发生频率 $N$ 与规模 $V$ 的关系 <sup>[9]</sup>	$\lg N=4.4-0.072V$	许强、黄润秋

2 结论

根据上述地质灾害系统分析原理, 我们可以看出地质灾害系统具有如下特点:

- 1. 发生地质灾害的地质体是一个具有复杂结构和行为特征的开放系统和耗散体系, 其演化过程具有不可逆性和自组织性, 促使这个系统演化的是该系统内部和外界环境中的能量流、物质流和信息流。
- 2. 地质灾害系统又是由大量子系统按一定的结构和方式组合起来的复杂体系, 该体系具有多重层次嵌套结构。在演化过程中, 这些不同层次的子系统既协同又制约, 促使系统由无序向有序的进化方向发展演化。
- 3. 大多地质灾害系统(如斜坡、洞室等)具有一定的可控性, 其主要控制方式是反馈。即通过正负反馈调整系统中信息的双向运动来实现系统的稳定性、平衡态的转变及系统的最优控制, 从而使系统朝着对人类工程或生活活动有利的方向发展。
- 4. 地质灾害的发生(地质灾害系统的“相变”)往往表现为突发性, 但也不排除其可能产生渐进破坏

行为(渐变性)。地质灾害防治的一条重要途径变突变为渐变, 变灾难性事件为一段性事件。

后记: 另有部分相关内容刊在本刊 2000 18(增刊)上。

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[ M]. 北京: 地质出版社, 1997.  
[2] 王江海. 地质过程中的非平衡自组织导论[ M]. 贵阳: 贵州出版社, 1993.  
[3] 于学馥, 于加, 徐峻. 岩石力学新概念与开挖结构优化设计[ M]. 北京: 科学出版社, 1994.  
[4] 于学馥. 岩石记忆与开挖理论[ M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993.  
[5] 黄润秋. 现代系统科学理论与工程地质系统观[ J]. 水文地质与工程地质, 1997.  
[6] 魏宏森. 开创复杂性研究新学科——系统科学纵览[ M]. 成都: 四川教育出版社, 1991.  
[7] 罗德军. 自组织临界状态及其在泥石流暴发中的运用[ D]. 四川大学硕士学位论文, 1994  
[8] Johnson P A. Magnitude and frequency of debris flow. J Hydro 1991, 123: 60—82  
[9] 许强, 黄润秋. 地质灾害发生频率的幂律规则. 成都理工学院学报, 1997, 24(增刊)

SYSTEMATIC ANALYSIS PRINCIPLES OF GEOLOGICAL HAZARDS

XU Qiang, HUANG Run-qiu

(National Laboratory of Geological Hazard Prevention and Geological Environment Protection  
Chengdu Institute of technology, Chengdu 610059 PRC)

**Abstract:** Ten systematic analysis principles of geological hazards combining modern nonlinear science theory with traditional evaluation and predicting theory of geological hazards, these are as follows;

(1)the analysis principle of process of dynamic geology; (2)the principle of integration and fragmentation; (3)the principle of hiberachy; (4)the principle of self-simiarity; (5)the principle of opening; (6)the principle of catastrophe; (7)the principle of self-organization; (8)the principle of monitoring-feedback; (9)the principle of destroying of symmetry; (10) the principle of universalit.

A series fo new thought and knowledge are proposed based on above mentioned principles.

**Key words:** geological hazards; nonlinear science; systematic analysis