

## 滑坡灾害复杂性特征研究

林孝松<sup>1,2</sup>, 许江<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044;

2. 重庆交通大学 水利水运工程重庆市重点实验室, 重庆 400074)

**摘要:**从系统论的角度出发,详细分析了滑坡灾害在存在意义和演化意义两个方面的复杂性特征。同时,从协同理论、分形分维、突变理论、人工神经网络与免疫系统以及空间信息技术综合集成等方面探讨了多学科在滑坡灾害复杂性方面的研究。滑坡灾害的复杂性研究可以在一定程度上促进人类对滑坡灾害整体行为和发展演化过程的研究与探索,同时也可以为滑坡灾害的防治评价和预测预报提供科学依据和辅助决策支持,在滑坡灾害及其相关地质灾害的防治中具有积极的作用,在滑坡灾害的防灾减灾中有着广泛的应用前景。

**关键词:**滑坡灾害;复杂性;系统论

**中图分类号:**P642.22

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2007)05-0359-05

## The Study of the Complexity of Landslide Hazard

LIN Xiao-song<sup>1,2</sup>, XU Jiang<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Exploitation of Southwestern Resources & Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Key Laboratory for Water Conservancy & Water Carriage Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** From the viewpoint of the theory of system, the authors discussed the complexity of landslide hazard in existence and evolution. A multi-subject study of the landslide hazard complexity is made in the respects of synergetic, fractional or dimension, catastrophe theory, artificial neural network, immunity system and the spatial information technology. The study of the complexity of landslide hazards can promote the process of investigation on the whole behavior of landslide hazards, also can provide help for the prevention and prediction of landslide hazards.

**Key words:** landslide hazard; complexity; the theory of system

### 1 引言

滑坡灾害是在地质营力作用下,自然环境恶化,造成人类生命财产损毁或人类赖以生存和发展的资源、环境发生严重破坏的现象或过程。从系统论角度看,滑坡灾害则可能发生或已经发生滑坡灾害的地质体或地质体的一部分及其周围环境构成的整体,具有时间与空间尺度上的不确定性,可能是单一灾害体,也可能是复合灾害体或整个灾害体系。

传统的滑坡灾害研究仅局限于定性或半定量描述,以传统的确定性研究方法为基础,运用一定的力学模型来实现滑坡灾害研究的定量化<sup>[1,2]</sup>。实际上由于滑坡灾害不断地与外界发生物质和能量的交换,具有非平衡性、非线性、多尺度性、突变性、自组织性、自相似性、有序性、随机性的属性,是一个复杂的开放系统和耗散体系,传统的研究方法难以满足滑坡灾害防治评价与预测预报的要求。因此,近年来随着科学与技术的不断发展,许多学者将处理复杂系统和探索复杂性的非线性理论方法先后引入滑坡灾害地质过程的演化研究,相继建立了一些初步描述斜坡演化非线性动力学方程,

提出了基于分形理论、协同学理论、混沌动力学和突变理论的预测模型,运用神经网络方法实现了对滑坡灾害的预测、评价。从系统论的角度来看,滑坡灾害是一个具有众多因素、规模巨大、多子系统、多层次、结构复杂、功能综合的巨系统<sup>[3,4]</sup>。主要包括自然环境和社会经济两个子系统,同时两者又各自包含多个相应的子系统,这些子系统又存在地质构造、地貌特征、地下水及洪水、降雨因子、人类工程活动、人口社会经济以及管理体制等多个要素。滑坡灾害系统不仅具有多层次、多子系统,而且各个子系统之间具有复杂的关联。这些关联不但表现在结构上,而且还表现在内容上,它们以物质流、能量流或信息流的方式进行关联,它们之间极其复杂的关联,导致滑坡灾害系统在存在和演化上的复杂性。

### 2 滑坡灾害存在上的复杂性特征

从存在意义上来看,滑坡灾害的复杂性是指滑坡灾害具有多层次结构、多重时间标度、多种控制参量和多样的作用过程。它不仅是一个动态发展的、非线性的、开放的灾害系统,也是具有不确定性和社会经济性等特征的复杂系统。

收稿日期:2006-09-26

基金项目:国家自然科学基金项目(50574108);水利水运工程重庆市重点实验室(重庆交通大学)开放基金项目(SLK2005B2)

作者简介:林孝松(1976:),男(苗族),湖南绥宁人,讲师,博士研究生,主要从事地质灾害与地理信息系统研究。

## 2.1 多层次与相互关联性

滑坡灾害是一个具有众多因素、规模巨大、多子系统、多层次、结构复杂、功能综合的系统,它主要包括自然环境和社会经济两个子系统,同时两者又各自包含多个相应的子系统,这些子系统又存在地质构造、地貌特征、地下水及洪水、降雨因子、人类工程活动、人口社会经济以及管理体制等多个要素。滑坡灾害不仅具有多层次、多子系统,而且各个子系统之间具有复杂的关联。这些关联不但表现在结构上,而且还表现在内容上,它们以物质流、能量流或信息流的方式进行关联。它们之间极其复杂的关联特性导致了滑坡灾害的在组成上的复杂性。

## 2.2 动态开放性

滑坡灾害系统是一个复杂的动态地质体系,它本身与物质世界的其他系统一样,有其产生、发展和消亡的历史演化过程。在这一变化过程中,滑坡系统内各个因素之间相互作用、相互制约,形成其内在的非线性自组织过程,同时外界因素(环境系统的各个要素)又作用于滑坡系统,从而达到相互作用、相互反馈,最终形成了滑坡系统与环境系统间物质、能量的交换。同时,由于各个子系统或内部的各要素及其环境随时间的推移会发生显著的变化,从而引起滑坡灾害系统的结构和功能发生变化,使滑坡灾害系统呈现出较为显著的动态性和不稳定的周期性。斜坡的演化遵循戴维斯的侵蚀循环理论,斜坡本身的变形及各种外营力作用,导致其以稳定性程度不断降低的方式演化发展,最后以崩塌、滑坡的形式结束其演化历史,代之而起的是新一轮斜坡的形成,新一轮的斜坡的继续演化发展,在这一演化过程中存在有不稳定的周期性。以历史动态的系统观研究滑坡灾害,就是要通过对其现象和赋存条件的研究,从演化发展的全过程、内部作用机理上掌握滑坡灾害的演变规律<sup>[5]</sup>,从而对其现状及其发展趋势做出科学合理的评价和预测。

滑坡灾害系统是自然环境巨系统中的一个子系统,它必然要与岩石圈、生物圈、水圈、大气圈甚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。王运生等<sup>[6]</sup>研究表明滑坡的发生与地球自转变化及日月引潮力变化具有较好的相关性。此外,滑坡灾害系统及其环境系统又是人类一切工程、生活活动的基本环境,同时也是人类工程活动的必然载体,因此,它又必然会与人类圈产生密切联系。这样,滑坡灾害系统会不断地与这些相关圈层进行物质、能量和信息的交换,具有广泛的开放性。滑坡灾害的开放性不仅促进了它随时间的发展与演化,同时也使得其演化过程具有高度的复杂性和自组织特性。

## 2.3 社会经济性

滑坡灾害系统具有社会经济性是因为社会经济是滑坡灾害系统中一个重要的子系统,它与滑坡灾害具有密切的相互作用机制:一方面,人类的各项活动直接或间接地影响了地质环境演化和滑坡灾害的形成与发展;另一方面,地质环境和滑坡灾害直接或间接地制约社会经济的发展。综观中国几十年来滑坡灾害的发育与发展情况,其范围、频度、强度和破坏程度等与我国人口和社会经济发展具有大致同步消

长的正相关关系<sup>[7]</sup>,我国几十年的滑坡灾害发展史实质上是地质自然历史与社会经济历史的综合反映。

## 2.4 非线性的叠加

滑坡灾害系统对环境输入的响应不具备线性叠加的性质,其整体功能大于或小于各子系统或因素功能的简单相加。对于一定水平下的某种输入,滑坡灾害系统不响应;对于一定水平上的某种输入,滑坡灾害系统突变为性质不同的灾害系统;对于一定水平之间的某种输入,滑坡灾害系统的响应能力与输出水平呈曲线相关。以累积降雨量为滑坡响应程度的输入值为例,降雨量为138.1 mm时滑坡开始发生,降雨量为265.9 mm时滑坡发生较多,降雨量为372.4 mm时滑坡大量发生(四川省南江县1983年资料<sup>[8]</sup>)。滑坡灾害发生的数量及造成的危害与降雨量也不是直线相关<sup>[9]</sup>。

从系统科学的角度来看,滑坡灾害是一个开放的复杂巨系统,对于这一系统的研究、控制、管理和利用等,采用传统的理论和技术均不能很好的解决问题。因此,需要不断地探索应用新的概念、方法、理论与技术来研究地质灾害的整体行为、演化规律及其调控机制。

## 3 滑坡灾害演化上的复杂性特征

从演化意义上来看,滑坡灾害系统复杂性是指当滑坡灾害系统远离平衡状态时,不可逆过程的非线性动力学机制所演化出的多样化“自组织”现象,如物质的分散与集中两种对立过程共同组成了滑坡灾害系统的动力机制;滑坡灾害系统的线性与非线性特征并存;有序性与无序性贯穿于滑坡灾害系统的整个发展演化过程中;模糊与精确两种数据并存于滑坡灾害系统中。

### 3.1 自组织特性

耗散结构理论认为:一个系统从初始的混沌状态出发,具有自催化能力的单元之间的竞争,能够通过一系列非平衡不稳定产生功能组织,而且系统在获得时间的、空间的或功能的结构的过程中没有外界特定的干预,我们便说系统是自组织的。当滑坡灾害系统遭到外部环境的干扰而破坏其有序状态时,它靠系统自身的能力有时能克服干扰的影响,进入新的有序状态,显示出自组织的特征。它可以根据内部和外部条件变化的信息来改善或发展某些功能,以调整系统的运作,克服不确定性或无序性,保持系统原来的或预定的功能。在斜坡演化初期,地面基本保持水平,由裂隙切割的各岩土体单元基本保持力学平衡,斜坡系统处于一种最无序的平衡态(斜坡演化平衡区);随着应力状态的变化和外界环境的影响,处于临空面附近的岩土体单元要求释放荷载使原有的平衡被打破,局部应力集中超过了该部位岩土体的容许强度,引起局部的剪切错动、拉裂并出现小位移,整个斜坡系统处于一种局域不平衡状态(斜坡演化非线性平衡区);随着斜坡变形的进一步发展以及外界物质和能量的不断交换,系统的开放程度越来越大,原有的破裂面不断扩大,破裂面附近的岩土体开始超过岩土体的临界强度发生累进性破坏,一旦破裂面相互贯通,便形成滑坡(新的斜坡演化平衡区)<sup>[2]</sup>。在此过程中,各个子系统(要素)之间以相关性的形式发生非线性作用,以协同的方式发生有序运动,从一种稳定平衡区

进入新的稳定平衡区,开始下一周期的演化,且存在着由倍周期分岔走向混沌的过程<sup>[10]</sup>。周萃英等<sup>[11]</sup>从系统论、耗散结构理论和协同学的观点出发,分别从统计物理模型和滑坡灾害发生的全过程讨论了滑坡灾害的自组织过程,研究表明滑坡灾害的发展过程是一个从最初的混沌状态出发逐渐向功能组织演化的过程,且滑坡的最终演化状态不是惟一的定态,滑坡产生的一个轮回对应着一次自组织过程。正是由于地质体结构和信息源的复杂性,再加上其内部机制和外部环境的影响与作用机制的模糊性以及内部与外部之间相互作用与耦合机制的错综复杂性,使得我们在目前水平下,难以通过建立模型的方法来精确分析和研究,只能通过系统的一些宏观控制参量的数值分析来了解该系统的复杂特性,并通过这些控制参量的时空演化来分析系统的自组织演化和发展过程的复杂行为,从而找到滑坡灾害系统自组织行为的共性,实现系统的时空预测。

### 3.2 分形分维特性

Higaki 等(1993)和 Ueno 等(1993)<sup>[12]</sup>指出,滑坡具有自相似性几何形状,并且这种自相似性可以用分维数来表示。随着现代非线性技术的发展,进一步研究表明在滑坡灾害系统中,不仅系统局部与整体的形态相似、各个子系统或各层次之间具有相似的结构,而且局部与局部、局部与整体之间在功能、信息、时间与空间等方面还具有统计意义上的相似性,从而提出了滑坡灾害系统具有时空结构的容量维和信息维特征。同时,不同滑坡数目与滑坡规模大小之间服从幂次律的关系,而且滑坡活动空间结构的分维值存在明显的变化阶段。分析滑坡灾害的分形分维性质可以为我们揭示滑坡系统内部滑坡活动时空结构的复杂程度和滑坡孕育、生长、成熟、衰退及消亡的动态演化特征。

### 3.3 突变特性

长期以来,滑坡体破坏的研究都是应用传统的固体力学方法,简单地引入安全因子作为坡体破坏的判别指标。实际上,滑坡的破坏过程比较复杂,一个可能发生滑坡的坡体究竟是高速滑坡还是低速滑坡,至今仍是一个争论中的问题。一般来说,滑坡被认为是一种突发性灾害,从力学角度看,它可分为两种类型即突发式破坏和渐变式破坏。突发式滑坡的特征是时间短,速度快,它可以是整个滑坡体一次性的迅速滑动,也可以是滑坡体分块多级滑动中某一次的迅速整体下滑。除此而外的滑坡方式可认为是渐变式。不管是哪一种方式,它们都不同程度的具有突变性质。从能量耗散角度来看,突发式滑坡在经历长时期孕育积累了大量的能量之后在短期内以突然的方式释放能量,其时间以秒(s)为基本单位,如新滩滑坡在1985年6月12日产生剧滑时,其最大滑速为40 m/s,整个突变过程只有几秒。渐变式滑坡的能量释放过程相对较长且不明显,但它在发展演化过程中存在一个质变的相对较短时期即突变过程。也正是由于同种规模的滑坡体之间能量释放的方式不同,使得以突发式破坏所造成的灾害损失往往要比渐变式破坏大很多。而滑坡灾害的突变特性在灾害防治方面的价值就是如何对突变实行人工地控制,使滑坡体的突变失稳转化为渐变失稳,从而降低灾

害的损失。此外,滑坡的突变特性也可以应用于滑坡灾害的时间预测预报方面,滑坡特征值的大小可以作为斜坡演化状态与临界失稳状态的距离。龙辉<sup>[13]</sup>等以黄茨及卧龙寺滑坡为例,根据监测资料进行了非线性动力学建模和突变分析,分析结果表明滑坡临滑前都有突变特征值D大幅下降至零的现象,D值可以作为一个斜坡进入敏感区的具有物理意义的前兆指标。

### 3.4 非确定性

滑坡灾害系统是非确定性的灾害系统。非确定性一方面是自然特征的表现,另一方面也是人类对滑坡灾害认识程度的反映。滑坡灾害系统的边界、结构和功能都具有模糊性,难以辨识,而且系统中各灾害的发生具有随机性,其成灾要素难以预测,甚至各灾害所造成的危害非常复杂,难以判断和衡量。具体到某一滑坡灾害体,它的长与宽是不明确的,其复杂结构和综合功能也经常是模糊不清,很难确定,而且灾害发生的征兆和后果都存在难以判别和评价的问题。正因为这些非确定性,给滑坡灾害系统的研究工作造成了很大的困难。不过,随着科学技术的发展,尤其是各学科各部门工作者的合作,使得人们能够在一定程度上辨识滑坡灾害系统本身所发出的模糊信息,了解灾害并能在一定范围内控制或防范滑坡灾害的发生。

## 4 滑坡灾害复杂性的多学科研究

### 4.1 “3S”技术系统集成研究

开展滑坡灾害复杂性方面的研究,其目的方面是使人类能更好地认识滑坡灾害的性质与特点、发生基础、时空分布规律及其发展变化趋势;另一方面要对滑坡灾害所产生的破坏进行科学研究,并最终为减灾、救灾的决策服务。因此,滑坡灾害的复杂性研究是一项依赖于多学科、多技术、多理论的综合研究,需要采用定性定量的综合集成方法。近几年来,以地理信息系统(GIS)为核心的“3S”技术在滑坡灾害研究中的应用引起广泛的关注,GIS强大的空间分析和空间数据库功能以及与专业模型结合决定了GIS能高效地解决滑坡灾害研究领域中的许多问题<sup>[14~18]</sup>。在滑坡灾害复杂性研究的“3S”技术系统集成方面,其研究和应用的发展趋势主要表现为:RS、GPS、GIS技术与计算机网络技术的系统集成应用;GIS用于滑坡灾害发生后可能灾害范围的确定;“3S”支持下的滑坡灾害时空综合预测、预警;“3S”与复杂斜坡稳定性确定性分析模型结合;3S技术的综合集成以及滑坡灾害信息控制系统的建立与开发等。从目前的发展趋势来看,“3S”技术系统集成研究已经由先前仅限于研究滑坡灾害存在的复杂性到目前逐步转向于存在与演化复杂性的研究。

### 4.2 滑坡灾害协同学研究

协同学是研究系统从原始的无序状况发展成为有序状态或从一种有序结构转变为另一种有序结构,同时也是研究多组分系统如何通过系统的协同行动而导致有序演化的自组织理论,主要用于研究滑坡灾害演化复杂的自组织特性。从系统论的角度来看,任何系统的子系统或要素都有两种运动趋向:一种是它自发的无规则运动,这种无规则运动的加剧,往往会瓦解系统的宏观结构,使之走向无序;另一种运动

是子系统或要素之间关联引起的协调运动,它是系统走向宏观有序的依据。子系统或要素之间不同形式的关联将造成不同的协同运动,在宏观上则表现为不同的组织结构。系统的状态由这两种运动趋向的关系来决定,哪种趋向在能量上占优势就表现为哪种运动。

协同学认为,具有复杂结构的非线性系统是一种进化的自组织系统,影响其演化的因素包括控制和状态两种变量。在系统演化过程中可用一组微分方程来表示状态变量的变化,而微分方程中状态变量的系数则代表控制变量。虽然任何系统都包含大量的子系统或变量要素,无法解出它们演化的微分方程组,但是,对于具体的实际系统的演化结果一般都存在确定的结构,其演化过程可以用少数几个量就可以描述。协同学的支配理论认为,系统的状态变量由快变量和慢变量构成,快变量数目巨大,但它对系统的演化作用不大,慢变量虽数目不多,却控制着系统的演化历程。黄润秋等<sup>[19]</sup>在探讨斜坡体系的演化过程时,由快变量(s)和慢变量(u)得到系统演化的朗之万方程,并以斜坡位移为慢变量,根据滑坡的位移时间序列资料,应用累加处理,用最小二乘法拟合出 a, b 的值,将变形速率最大点对应的时间作为滑坡的预报时间。协同学应用在滑坡灾害研究方面主要体现在:滑坡灾害系统功能的非线性特征研究;滑坡灾害系统外部控制参量研究;滑坡灾害涨落现象特征研究以及滑坡灾害系统介质非均匀特性研究等。

#### 4.3 分形分维研究

B. B. Mandelbrot 在 1982 年首先提出了在自然界和社会中,普遍存在着形态的“自相似性”特征,并提出了用“分形分维几何学”和“自然中的分形几何”来解决自然界、社会中复杂的几何形态问题<sup>[20]</sup>。易顺民等先后研究了滑坡滑动带土的分维特征、滑坡活动时空分布的容量特征,认为区域性滑坡活动空间结构的分维值存在明显的变化阶段,并对应着一个滑坡活动的高潮期。采用容量维和信息维计算出滑坡活动的时间和空间分维,指出滑坡分维值低,滑坡活动自组织程度低,分维值愈高,滑坡活动自组织程度也愈高,且滑坡大规模活动前具有明显的降维现象<sup>[21,22]</sup>,降维现象的存在,在滑坡的时间预测方面具有一定的指导意义。

滑坡灾害相似性与分形分维特性的存在,使得我们可根据系统“局部映射整体”的层次,选择具有代表性的局部进行研究,通过它去认识系统整体。我们可以通过研究滑坡体的分维值了解其复杂程度与演化过程。借助分形理论和方法,利用少量信息就可重现原来的研究对象,具有指定信息少,计算容易和重现精度高的特点<sup>[23]</sup>。它不但具有信息压缩的优点,而且可以借助计算机使研究对象可视化,促使研究更加直观和深入。

#### 4.4 突变理论研究

突变理论是法国数学家 Thom 首先提出来的,它是研究系统的状态随外界控制参量连续变化而发生不连续变化的理论。该理论认为,在条件的转折点或临界点附近,控制参量的任意一个微小变化都会引起系统发生突变。就滑坡灾害系统而言,其从一种稳定状态演变进化到更高层次的稳定

状态主要通过突变和缓变两种方式予以实现。系统采取哪种方式主要由系统本身性质和演化路径来决定,可用尖点模型来形象说明<sup>[24]</sup>。若系统在演化过程中控制参量一直为正,即系统总位于分叉集的一侧,不跨越分叉集,这样,系统就仅以缓变的方式演化;相反,若系统演化跨越分叉集,则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。

突变理论在滑坡灾害方面的研究重点体现在许多学者根据不同的研究对象建立了与之相适应的一系列突变模型<sup>[25~27]</sup>,分析滑坡过程从稳定态到蠕变态再到渐变破坏或突变破坏的规律及动力学过程,以便准确预报滑坡灾害的发生。当斜坡体进入极限平衡状态后就有可能发生滑坡,此时进入极限平衡状态的滑坡体行为比较复杂,其动力学行为具有多重性,即分叉行为,在数学上它用一个分叉集合来描述,在这个集合中的点为奇点,滑坡体的最终行为取决于奇点的性质。因此,滑坡体的破坏形式是由大量不同性质奇点所决定的。对滑坡灾害突变性的研究就是要通过对系统演化路径及奇点性质等的分析,以达到对灾害系统演化路径人为控制的目的,并使系统的突变转化为缓变,从而降低灾害的损失。最后值得一提的是应用单一的突变理论解决复杂的地质灾害问题存在有一定的局限性,应与其它学科、理论与技术相结合进行综合整体研究。

#### 4.5 人工神经网络与免疫系统研究

人工神经网络(ANN)是一门新兴的交叉科学,同时也是目前国际上研究异常活跃的前沿和热点领域之一,它是用工程技术手段模拟生物神经网络的结构特征和功能特征的一类人工系统,是一种自动识别模式。它以大规模并行处理、分布式存贮、自适应性、容错性等许多优良特性引起了众多领域科学家的广泛关注。神经网络是一种自适应的高度非线性动力系统,通过内部连接的自组织结构具有对数据的高度自适应能力,由计算机直接从实例中学习获取知识,探索解决问题的方法,自动建立复杂系统的控制规律及其认知模型。当遇到有未知样本输入时,可以直接调用网络中已有的规律对其进行预测判断。目前,人工神经网络主要应用在滑坡灾害的评价和时空预测预报等方面,如在滑坡稳定性评判方面,在滑坡变形迹象的基础上,采用反向传播神经网络(BP 网络)模型对岷江上游汶川一较场河段内 28 个典型滑坡的稳定性进行评判,得到的结果具有较高的置信度<sup>[28]</sup>;在边坡稳定性分析评价中,利用神经网络理论,提出圆弧式破坏边坡的边坡安全系数估计的新方法,通过对收集到的边坡稳定性实例进行学习和预测,评价边坡的稳定性<sup>[29]</sup>。

除了神经网络系统外,人类的第二信号系统就是免疫系统。免疫实质上是生物体对外来大分子特别是蛋白质和糖类的一种反应。生命有机体能够把外来原质同其自身的原质区别开来,进而对病原菌、毒素等有害的异物产生抗体和中和反应,这是有机体的普遍特性——免疫现象。它具有免疫记忆特性、抗体的自我识别能力和免疫的多样性等特点。从信息论的观点来看,免疫系统与神经网络在记忆与识别功能方面极其类似,而且就其结构的复杂程度和处理信号功能而言,免疫系统的信号识别记忆能力与适应环境的免疫

多样性均不亚于神经网络系统。复杂的自适应系统具有通常动力学系统所熟悉的性质,包括分层结构、多个吸引盘以及许多亚稳定图形之间的竞争,同时还拥有一种能应付并利用环境变化的能力。一个时间尺度描述真实动力学,另一个较慢的时间尺度考虑非线性方程本身的变化<sup>[30]</sup>。基于上述概念建立的人工免疫系统模型和自催化蛋白质网络模型可以用来研究滑坡灾害系统的自适应、识别、学习和演化的非线性动力学行为。

## 5 结 语

正因为滑坡灾害在存在和演化上的复杂性特征,才涌现了对其研究存在上述不同的学科理论和技术集成。总的来说,它们的应用在很大程度上对于滑坡灾害的复杂性研究有着重要的促进与开拓意义。当然,它们在滑坡灾害复杂性的研究中其应用程度有所不同。协同学、分形分维、突变理论、人工神经网络与免疫系统等学科理论由于理论与方法及技术操作上的一系列原因,它们在滑坡灾害复杂性方面的研究基本上还处于探索阶段,应用于广泛的实际还存在一段距离,但它们利用各自的优势在不同程度或不同方向上对滑坡灾害系统的复杂性进行着理论与方法上的有益探索,而且它们的研究结果在应用方面也得到了不同程度地证实或应用,同时也为“3S”技术系统集成研究提供了坚实的理论基础。目前,滑坡灾害复杂性研究的另一个热点是“3S”技术系统集成在其中的应用研究。“3S”技术在数据采集与更新、空间检索与查询、信息的时空分析与可视以及信息共享与输出等方面表现了其强大的应用优势,能够充分地解决滑坡灾害系统多层次性与相互关联性、动态开放性、社会经济性和非线性叠加等滑坡灾害存在意义上的复杂性特征问题,同时也为滑坡灾害演化复杂性问题的解决提供基础。此外,“3S”技术在滑坡灾害发生速率的动态模拟计算、灾害的风险评价、灾害的时空预警、灾害的辅助决策以及灾害的形态虚拟技术等方面应用研究的进展和突破,加上相关学科理论及技术的发展必将为滑坡灾害复杂性问题的解决提供良好的条件。

## 参考文献:

- [1] 文宝萍. 滑坡预测预报研究现状与发展趋势[J]. 地学前缘, 1996, 3(1): 86—92.
- [2] 汪华斌, 李江风, 吴树仁. 滑坡灾害系统非线性研究进展[J]. 地球科学进展, 2000, 15(3): 271—275.
- [3] 马建华, 管华. 系统科学及其在地理学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [4] 黄志全. 边坡演化的非线性机制及滑坡预测预报研究[D]. 北京: 中国科学院, 1999.
- [5] 许强, 黄润秋. 非线性科学理论在地质灾害评价预测中的应用[J]. 山地学报, 2000, 18(3): 272—277.
- [6] 王运生, 王士天. 地球自转、日月引潮力与滑坡灾害发育的相关性研究[J]. 大自然探索, 1997, 16(4): 55—58.
- [7] 张梁, 张业成, 罗元华, 等. 地质灾害灾情评估理论与实践[M]. 北京: 地质出版社, 1998.
- [8] 张先发, 李明华, 张小刚. 长江上游暴雨与滑坡崩塌关系[J]. 地理, 1995, 8(3): 102—106.
- [9] 林孝松, 郭跃. 滑坡与降雨的耦合关系研究[J]. 灾害学, 2001, 16(2): 87—92.
- [10] 许强, 黄润秋. 斜坡演化的自组织特征初探[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1997, 8(1): 7—11.
- [11] 周萃英, 汤连生, 晏同珍. 滑坡灾害系统的自组织[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 1996, 21(6): 604—607.
- [12] Yoshthiro Yokoi 等. 冯玉勇译. 滑坡的分形特征[J]. 地质科学译丛, 1995, (4): 72—75.
- [13] 龙辉, 秦四清, 朱世平, 等. 滑坡演化的非线性动力学与突变分析[J]. 工程地质学报, 2001, 9(3): 331—335.
- [14] 林孝松. 基于 GIS 的重庆市地质灾害信息管理系统[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2001, 12(2): 74—79.
- [15] 兰恒星, 王苓涓, 周成虎. 地理信息系统支持下的滑坡灾害分析模型研究[J]. 工程地质学报, 2002, 10(4): 421—427.
- [16] 欧敏, 张永兴, 胡居义, 等. 基于 GeoCA 和 GIS 的滑坡滑动面演化规律研究[J]. 水文地质工程地质, 2005, (1): 22—25.
- [17] 谢漠文, 江崎哲郎, 周国云. 基于边坡单元的三维滑坡灾害评价的 GIS 方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(6): 969—976.
- [18] 戴福初, 李军. 地理信息系统在滑坡灾害研究中的应用[J]. 地质科技情报, 2000, 19(1): 91—96.
- [19] 黄润秋, 许强. 斜坡失稳时间的协同预测模型[J]. 山地研究, 1997, 15(1): 7—12.
- [20] 承继成, 林琿, 周成虎, 等. 数字地球导论[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [21] 易顺民, 张首丽. 滑坡活动时空结构的信息维特征及其工程地质意义[J]. 水文地质工程地质, 1998, (5): 48—51.
- [22] 易顺民, 晏同征. 滑坡定量预测的非线性理论方法[J]. 地学前缘, 1996, 3(1): 77—85.
- [23] 赵锐, 赵宏, 何隆华, 等. 地理现象分形研究[J]. 地理科学, 1994, 14(1): 9—14.
- [24] 许强, 黄润秋. 非线性科学理论在地质灾害评价预测中的应用[J]. 山地学报, 2000, 18(3): 272—277.
- [25] 黄润秋, 许强. 突变理论在工程地质中的应用[J]. 工程地质学报, 1993, 1(1): 65—73.
- [26] 苗天德, 艾南山. 滑坡发育的突变模型[J]. 兰州大学学报, 1988, 24(4): 45—50.
- [27] 高鹏, 艾南山. 土质滑坡体破坏的突变模型[J]. 工程地质学报, 1994, 2(4): 67—75.
- [28] 蒋良文, 王士天. 岷江上游汶川—较场段滑坡稳定性的神经网络评判及其堵江可能性浅析[J]. 山地学报, 2000, 18(6): 547—553.
- [29] 马洪生, 胡卸文. 神经网络在边坡稳定性分析中的作用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1999, 10(1): 49—53.
- [30] 赵松年. 非线性科学—它的内容、方法和意义[M]. 北京: 科学出版社, 1994.