

# 论气象类滑坡灾害的预报原理和方法

姜海泉<sup>1</sup>, 黎祖贤<sup>2</sup>, 李细生<sup>1</sup>, 罗慧妮<sup>1</sup>

(1. 湖南省株洲市气象台, 湖南 株洲 412003; 2. 湖南省气象台, 长沙 410007)

**摘要:**从地质-气象耦合的角度进行分析,指出气象类滑坡灾害的产生机制主要是降水、温度以及大风等气象因素引起潜在滑坡灾害系统产生不可逆的自组织过程——形成“滑坡灾害系统”。这些气象因素参与地质过程,并成为这一自组织过程中十分活跃的关键因素;地质-气象耦合的自组织过程存在两个显著不同的阶段:自组织慢过程和自组织快过程,滑坡灾害主要产生于自组织快过程中。分析表明,不同的潜在滑坡灾害系统具有不同的自组织临界态,即使对于同一具体的潜在滑坡灾害系统,其自组织临界态所对应的气象要素临界值也不是一个固定不变的值,而是一个值域。总结了滑坡灾害气象预报的原理,论证了气象因素是滑坡灾害短期预报的关键问题,建立了具有鲜明物理意义的通用预报关系和模式;以澧水矿区为例,结合历史资料分析确定通用预报关系中的临界值,得到具体的滑坡灾害气象预报方法。

**关键词:**气象类滑坡灾害;潜在滑坡灾害系统;自组织临界性;预报;原理;方法

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2006)05-0020-03

## Discussion on the Prediction Theory and Method of Landslide Disaster Caused by Meteorological Change

JIANG Hai-quan<sup>1</sup>, LI Zu-xian<sup>2</sup>, LI Xi-sheng<sup>1</sup>, LUO Hui-ni<sup>1</sup>

(1. Hunan Zhuzhou Meteorological Observatory, Zhuzhou 412003, China;

2. Hunan Meteorological Observatory, Changsha 410007, China)

**Abstract:** To analyze the landslide disaster from the angle of geology-meteorology coupling, the authors pointed out that the mechanism of meteorological landslide is an inconvertible self-organization-forming landsilide disaster system that primarily caused by precipit ation, temperature and strong wind. These meteorological factors participate into geological process, and become active and major factors in the self-organization course. There are two different phases of self-organization, i. e. rapid course and slow course, landslide disasters mainly stem from the rapid one. The analysis indicates that different landslide latency system possess different self-organization state, even if tow ard identical and specific landslide calamity latency system, the corresponding critical value is not a invariable value, but a range. The prediction theory of meteorological landslide disaster is summarized. It is illustrated that weather factor is the key to forecasting landslide in a short time. The universal prediction model is set up. Take Lushui mining area as an example, the prediction method of landslide is obtained combined with historical dat a analysis to determine the critical value of universal prediction model.

**Key words:** meteorological landsilide disaster; latency landslide system; self-organization criticality; prediction; theory; means

### 1 引言

滑坡灾害预报仍然是一个国际难题<sup>[1]</sup>。其预报方法大致可分为三类:(1)内因分析法。通过工程地质调查和力学试验,建立地质模型及力学模型;通过力学计算确定潜在滑坡体的稳定性;建立相关监测系统监测。由于内部因素太多,非线性相互作用十分复杂,而且只考虑地质方面的因素而忽略了与环境场(如大气)的相互作用。(2)实时监测法:准确率高,但时效极短,需要高技术和高投入且难维护,很难大范围推广。(3)外因分析法:理论基础薄弱,有效方法少,而且预报精度低。

在滑坡灾害成因分析领域,涉及地质方面的研究较多<sup>[2-8]</sup>,而涉及气象方面的极少,能够同时兼顾地质与气象的理论、方法更少,本文则是在这方面的初步探索。

### 2 滑坡灾害的成因

#### 2.1 滑坡灾害与滑坡灾害系统

滑坡灾害是各类滑坡事件对人类生命财产造成的危害,

本文所论及的滑坡灾害特指由岩石圈、大气圈、生物圈、水圈和冰雪圈以及人类社会共同参与的,以降水、温度以及大风等气象要素为主要触发因素并对人类生命财产造成危害的滑坡事件,“简称气象类滑坡灾害”。

滑坡灾害系统指产生滑坡灾害的滑坡体及其相关环境构成的整体。

#### 2.2 潜在滑坡灾害系统

##### 2.2.1 自组织临界性

“自组织临界性”是指复杂动力学系统能够自发演化到“自组织临界态”,此时系统的行为不再具有特征时间和特征空间尺度,而表现出覆盖整个系统的满足幂率分布的时空关联,其特性主要表现为<sup>[9]</sup>:(1)长程时空关联与连通性及时空分形结构;(2)复杂系统自发地向自组织临界态演化。在这种临界态,一个小的事件会引发大小不等的一系列连锁反应,出现各种“大小”的“雪崩”事件。巴克(Bak Per)等人用沙堆模型给了形象的说明<sup>[9]</sup>:设想在一个平台上通过任意加沙子来堆

\* 收稿日期: 2006-01-02

作者简介:姜海泉(1962-),男,高工,主要从事天气预报以及地质灾害气象预警等相关领域的研究。

砌一个沙堆,一次加一粒,随着沙堆的升高,它的坡度逐渐增大,一旦沙堆坡度达到某个阈值,就会发生坍塌,处于此阈值的达到一个临界状态,整个沙堆恰好处在稳定的边缘上,此时每增加一粒沙子就产生具有各种时空尺度的坍塌,它们满足幂定律分布。此时沙堆所处的状态就是自组织临界态。

#### 2.2.2 潜在滑坡灾害系统的定义

滑坡灾害是由滑坡事件生成的,而滑坡事件是因斜坡系统在其进入自组织变化过程中的自组织临界态以后(即“超临界”)的阶段迅速形成的,因此滑坡灾害系统的寿命极短。对防灾减灾而言,仅仅关注滑坡灾害系统是不够的,还必须研究处于自组织临界态及亚临界态的“广义滑坡灾害系统”,为此,引入新的概念——潜在滑坡灾害系统。

“潜在滑坡灾害系统”指处于自组织临界态和亚临界态的广义滑坡灾害系统,是一类十分复杂的自组织系统,包括如下几个相互交织着的子系统:斜坡系统、大气系统、水分系统和生态系统。“潜在滑坡灾害系统”有可能发展成滑坡灾害系统,也有可能演变成非灾害系统,使可能出现的滑坡灾害得到化解,而这正是防灾减灾的可能途径和目的所在。

#### 2.2.3 潜在滑坡灾害系统的子系统特性

斜坡系统,包括基岩和土壤,由于重力的作用,斜坡上的物质同时存在平行于坡面向下的剪应力和物质本身的静摩擦力(即抗剪强度)。

大气系统,包括各种有关的大气物理过程,如风、雪、雹、气温剧变以及大气压力变化等,它们对斜坡系统产生影响,如:风化作用、气温和大气压力场的急剧变化对斜坡应力场影响,积雪、冰雹对斜坡产生的加载作用,冰雹破坏植被而对斜坡产生的影响等。

水分系统,包括水汽、降水、地表径流、地下径流、土壤水等。水汽和土壤水影响斜坡上植物的生长,土壤含水量直接影响斜坡上土壤的抗剪强度,地表径流和地下径流冲刷、侵蚀斜坡土壤。降水(包括固态的和液态的)几乎是所有水分的来源,特别是暴雨天气过程,降水对斜坡产生直接的冲击,使斜坡物质所受的剪应力猛然增大,同时由于雨水渗入土壤,降低了斜坡物质的抗剪强度,促使斜坡系统向剪应力临界状态演化。

生态系统,包括动物、植物和人。森林植物以其茂盛的枝叶和与林地地被物的综合作用,可以减缓或避免土壤溅蚀的发生,改善土壤理化性状,提高抗蚀能力;林木发达的根系网络结构固持土壤,可使斜坡土壤的抗剪强度增大,减轻沟岸重力侵蚀,防止沟道的形成和发展<sup>[10]</sup>;人类活动在潜在滑坡灾害系统中的作用成为关键性的因素之一。如,过度放牧破坏植被,使生态恶化,水土流失;乱采滥挖、各类工程产生大量的高陡边坡,增加了潜在滑坡灾害系统数量和强度。但人类通过治理斜坡,开展滑坡灾害预报预警工作,有效预防和减少滑坡灾害的发生。

#### 2.2.4 潜在滑坡灾害系统主变量分析

潜在滑坡灾害系统自组织演变过程中起主导作用的变量有:斜坡剪应力、斜坡抗剪强度、降水、生态和人类活动。

主变量之间的相互作用导致潜在滑坡灾害系统自组织地发展成为滑坡灾害系统。

开荒种地和过度放牧等人类活动,导致山地森林生态系统退化甚至恶化,导致斜坡剪应力增大,进而降低斜坡抗剪强度。兴修铁路、公路和水利水电工程等则产生大量人工斜坡系统,其中有多是高陡斜坡;开矿则产生大量弃渣、破坏基岩、破坏地表水系和地下水系,甚至对森林生态系统产生严重破坏。

生态系统的退化直接影响斜坡系统的应力平衡,使之朝不稳定方向演变。相反,生态系统的改善则有可能使得斜坡系统朝稳定方向发展。

降水的作用非常复杂,强度较小的间断性降水对生态系

统的演化非常有利,长期干旱可加速土壤的风化,增加斜坡松散物质,降低斜坡抗剪强度。强度较大且历时较长的降水过程对斜坡系统可产生不利影响,如增大地表径流和地下径流冲刷,侵蚀斜坡土壤,泥化或软化黏土、弱化岩体,使斜坡抗剪强度减小;斜坡土壤水分处于过饱和状态时则增大斜坡物质的容重,使斜坡剪应力增大。强度特大的暴雨过程对斜坡系统十分不利,一是极大地增强地表径流和地下径流的冲刷作用;二是因排水不及,巨大的冲击力对斜坡产生附加荷载,使斜坡剪应力突然显著增大。

#### 2.2.5 潜在滑坡灾害系统自组织机制

由于自然风化和降水侵蚀以及人为的作用,产生大量的斜坡松散物质,斜坡剪应力不断增大而抗剪强度不断减小。尽管这种应力的变化过程在宏观上很不显著,但随着斜坡演化,在某一时刻斜坡土体剪应力和抗剪强度相当,达到自组织临界态。这个过程一般需要几年甚至更长的时间,可视为自组织慢过程。

处于自组织临界态的潜在滑坡灾害系统,在下述因素诱发下可能进入“自组织超临界态”,从而形成滑坡灾害系统。

- (1) 地震以及其他内营力异常地质事件;
- (2) 强度较大且历时较长的降水过程;
- (3) 强度特大的暴雨过程。

## 3 气象类滑坡灾害预报原理

### 3.1 滑坡灾害的控制因素

由上述分析可知,滑坡灾害的控制因素主要有斜坡剪应力、斜坡抗剪强度、降水、生态和人类活动。

在滑坡灾害尚未发生时,对任意地区或地点,在短期内(如1d),生态和人类活动几乎无变化,真正有明显变化的是降水以及由降水引起的斜坡剪应力和抗剪强度的消长。

地质环境因素决定了滑坡灾害可能发生的地点。而降水等诱发因素通过与地质环境因素的非线性相互作用对处在自组织临界态及亚临界态的潜在滑坡灾害系统的演变决定着滑坡灾害可能发生的时间。

在滑坡灾害系统形成之前,对于24h以内的滑坡灾害预报预警,生态、人类活动和斜坡坡度、基岩和土壤的水文地质结构等慢变量的变化与强降水的变化相比,可以忽略不计。因此,对滑坡灾害的短期预报预警,主要地决定于对滑坡灾害可能发生点的降水预报。

### 3.2 降水临界值的确定

对于不同的潜在滑坡灾害系统,其所对应的降水临界值也不同。

如果能够根据潜在滑坡灾害系统的斜坡剪应力和抗剪强度的分布情况直接确定或计算出降水临界值,理论上精度高且物理意义明确,有利于研究工作的不断深入,是滑坡灾害研究的发展方向,但这一工作难度很大,暂时还不能达到实用的目标。目前,多采用定性的动力分析加统计的方法来间接确定降水临界值。

由于潜在滑坡灾害系统的自组织特性,其所对应的降水临界值随着慢变量的变化而有所变化,需设定降水临界值的值域来反映这种变化特征。

### 3.3 滑坡灾害通用预报关系(见图1)

## 4 实例

根据上述原理,本文以茶陵县潞水矿区为例,建立了初步的滑坡灾害气象预报方法,在近两年汛期的业务试报中取得了较好的成绩。

### 4.1 地质环境

潞水矿区地处北纬113.5°、东经26.9°附近,与茶陵县城的空中直线距离约20km,与攸县县城的空中直线距离约22

km, 滑坡结构复杂, 多 25° 以上的斜坡, 主要为板页岩和黄红壤, 小铁矿较多且弃渣多处可见。经过调查分析, 溺水矿区内某些斜坡系统已经处在自组织亚临界态, 开始出现不稳定态势, 因此存在潜在滑坡灾害系统。

4.2 预报预警

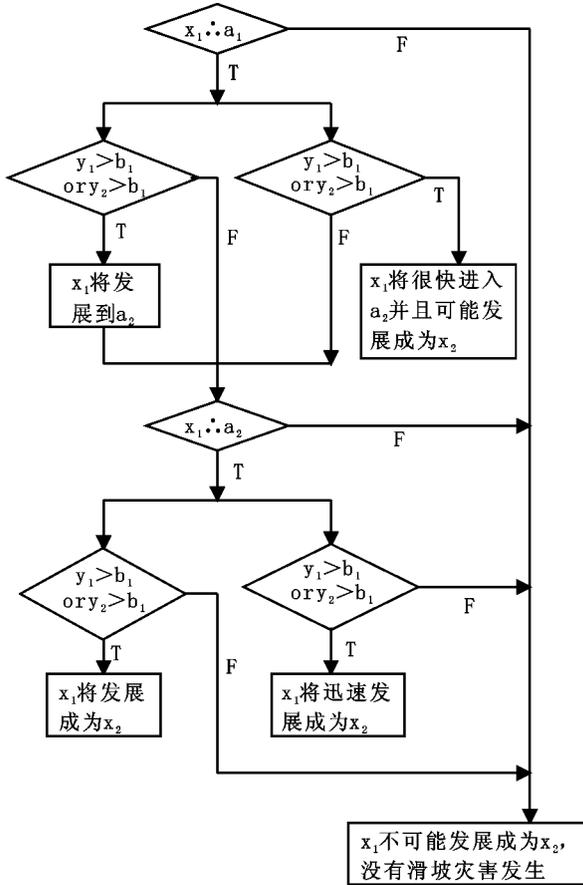


图 1 滑坡灾害通用预报关系示意图

$x_1$  = 潜在滑坡灾害系统;  $x_2$  = 滑坡灾害系统;  $y_1$  = 持续型降水;  
 $y_2$  = 突发性特大暴雨;  $a_1$  = 自组织亚临界态;  $a_2$  = 自组织临界态;  
 $b_1$  = 低临界值;  $b_2$  = 高临界值

4.2.1 预报模式(见 图 2)

4.2.2 暴雨精细预报

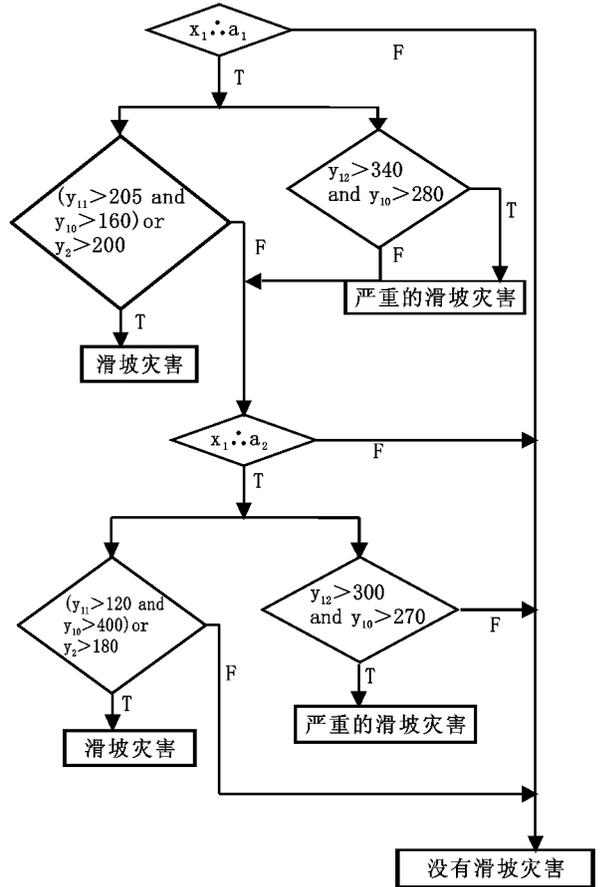
利用暴雨预报模式<sup>[11]</sup>, 作出暴雨的定性和区域预报, 结合卫星和多普勒雷达资料作暴雨的定点、定量和定时预报。

4.2.3 滑坡灾害时间预报

运用上述预报原理, 综合分析空间预报、降水资料及强降水的精细预报等信息, 套用上述时间预报模式最后作出滑坡灾害发生的时间预报。

参考文献:

[1] 杨志发, 等. 关于滑坡预测预报方法的思考[J]. 工程地质学报, 2004, 12(2): 118- 123.  
 [2] 王思敬. 地球内外动力偶合作用与重大滑坡灾害的成因初探[J]. 工程滑坡学报, 2002, 10(2): 115- 117.  
 [3] 成永刚. 近二十年国内滑坡研究的现状及动态[J]. 滑坡灾害与环境保护, 2003, 14(4): 1- 5.  
 [4] 许强, 等. 外界扰动诱发滑坡灾害的机理分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(2): 280- 284.  
 [5] 黄润秋, 等. 滑坡灾害系统演化特征的定量判定[J]. 中国科学基金, 2000, (5): 265- 269.  
 [6] 汤明高, 等. 对非线性科学在滑坡灾害领域的认识和展望[J]. 灾害学, 2003, 18(3): 72- 77.  
 [7] 朱晓华, 等. 滑坡灾害中的分形研究进展[J]. 中国滑坡灾害与防治学报, 2000, 11(1): 11- 14.  
 [8] 于远忠. 崩塌滑坡滑坡灾害宏观前兆机理研究[J]. 中国滑坡灾害与防治学报, 1996, 7(增): 27- 30.  
 [9] 梅可玉. 论自组织临界性与复杂系统的演化行为[J]. 系统辩证学学报, 2004, 12(4): 38- 41.  
 [10] 李文华, 等. 生态系统服务功能研究[M]. 北京: 气象出版社, 2002. 52- 54.  
 [11] 姜海泉. 短期暴雨的前期特征和预报实践[J]. 广东气象, 2001, (2): 1- 4.



$x_1$  = 潜在滑坡灾害系统;  $x_2$  = 滑坡灾害系统;  $y_{10}$  = 当天降水量;  
 $y_{11}$  = 持续型降水 5 d 累计;  $y_{12}$  = 持续型降水 20 d 累计;  
 $y_2$  = 突发性特大暴雨;  $a_1$  = 自组织亚临界态;  $a_2$  = 自组织临界态

图 2 茶陵溺水矿区滑坡灾害预报关系示意图

4.3 业务应用情况

上述方法在 2003 和 2004 年汛期试报, 只有 2003 年 5 月 16 日完全符合全部指标, 16 日上午在市防汛抗旱紧急会议上发布专题预报, 预报 17 日夜间将发生滑坡灾害, 实况与之相符, 凡通知到的地方, 均未造成人员伤亡。其余各日未出现空、漏报。

5 结 语

潜在滑坡灾害系统所对应的降水临界值存在值域。气象台作气象类滑坡灾害预报是可行的, 而且具有明显优势和潜力。掌握潜在滑坡灾害系统的自组织机制和预报特征是前提, 强降水过程的准确、精细预报是关键, 需要不断地深入研究。对潜在滑坡灾害系统进行完备的跟踪观测, 有利于提高对预报对象的直接感性认识, 提高对滑坡灾害发生部位和发生时间的预报时效和预报精度, 大大提高减灾效果。