

泥石流预报中前期降水量与始发日降水量的权重关系 ——以云南省蒋家沟为例

田冰^{1,2,3}, 王裕宜^{2,3}, 洪勇^{2,3}

(1. 河北师范大学 资源与环境科学学院, 河北 石家庄 050016; 2. 中国科学院 山地灾害与地表过程重点实验室, 中国科学院 东川泥石流观测研究站, 四川 成都 610041; 3. 中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041)

摘要: 利用云南省蒋家沟 1995—1997 年 43 场泥石流数据和降水资料, 详细分析了泥石流暴发的前期降水与始发日降水的权重关系。研究发现, 前期降水和始发日降水是泥石流启动的主要因素。依据它们之间不同的权重关系, 将蒋家沟泥石流分为前期降水型、强降水型和特殊型 3 种形式。不同权重降水下的泥石流输沙与降水量之间均呈现出较好的相关性。从泥石流出现的规模和数量看, 前期降水型泥石流是该地区的主要类型。

关键词: 泥石流; 前期降水与始发日降水; 权重关系; 输沙量

文献标识码: A

文章编号: 1000—288X(2008)02—0071—05

中图分类号: P642.23

Weighted Relation Between Antecedent Rainfall and Process Precipitation in Debris Flow Prediction

—A Case Study of Jiangjia Gully in Yunnan Province

TIAN Bing^{1,2,3}, WANG Yu-yi^{2,3}, HONG Yong^{2,3}

(1. College of Resources and Environment Science, Hebei Normal University, Shijiazhuang, Hebei 050016, China; 2. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Process, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China; 3. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: Based on the data observed for debris flow and precipitation from 1995 to 1997 in Jiangjia gully, Yunnan Province, different weighted relations between antecedent rainfall and process precipitation are analyzed. The analyses indicate that antecedent rainfall and process precipitation are the critical factors to trigger debris flow. Debris flow may be divided into three types based on different weighted relations between antecedent rainfall and process precipitation. Moreover, the relation between sediment yield of debris flow and rainfall under different rainfall conditions is discussed and a sound result is obtained.

Keywords: debris flow; antecedent rainfall and process precipitation; weighted relation; sediment yield

陡峻的地形,丰富的松散固体物质和充分的降水是泥石流发生的 3 大条件。在特定的区域内,形成泥石流的物质条件短期内不会发生大的变化,而降水就成为泥石流预报中的主要因素而被广泛应用。影响泥石流形成的降水因子主要包括前期降雨量、激发雨量、暴雨强度、当日降水量等。目前的泥石流预报模式中,多以暴雨强度作为主要预报指标^[1-9],尽管近期有些专家也开始考虑到前期降水和始发日降水在泥石流启动中的贡献^[10-12],但在泥石流预报中前期

降水和始发日降水权重关系,以及它们各自对泥石流暴发的作用和贡献还未见到有关报道。这种权重关系反映了降水与松散固体物质在泥石流形成中的耦合作用,应该如何界定其权重关系是泥石流暴雨预报模型参数中的一个难题,也是确定泥石流预报警戒值的一个重要参数。本文根据云南省蒋家沟流域 1995—1997 年 43 场泥石流的观测资料和泥石流启动的机理,对前期降水量和始发日降水量的不同权重关系对不同类型泥石流启动的影响以及它们与泥石

收稿日期:2007-08-01

修回日期:2007-11-15

资助项目:国家自然科学基金项目“泥石流土体启动的应力应变特征及其降雨警戒基准值的研究”(40671026)

作者简介:田冰(1973—),女(汉族),天津市人,博士研究生,主要从事泥石流的观测研究。E-mail:tbjyp@sina.com。

通讯作者:王裕宜(1944—),女(汉族),上海人,研究员,主要从事泥石流应力应变特性和泥石流预测预报的观测研究。E-mail:wyyzou@im.de.ac.cn。

流输沙的相关性进行了详细分析。这对于制定切实可行的不同降水权重条件下的泥石流预报,以及提高预报的精度和实现可操作性有着非常重要的意义。

1 数据来源及处理方法

本文所用分析数据均来自中国科学院蒋家沟泥石流观测站。其中降水数据来自蒋家沟流域的 6 个雨量观测站,这些雨量观测站分布在该流域的不同海拔处,其中有 4 个分布在海拔 2 200 m 以上,另外 2 个的高程较低,位于海拔 2 000 m 以下。

蒋家沟流域面积 48.6 km²^[13],流域内山高谷深,地质构造复杂,滑坡分布面积广,土质来源差异大,尽管山区雨量站的分布密度相对较多,但是由于泥石流观测点位于中下游,所以依然无法分清形成区的雨量与物质来源于何处,因此在数据处理过程中,我们采用了 6 站的平均值。本文的前期降水量采用陈景武^[5]提出的公式进行计算: $P_{n0} = P_1 K + P_2 K + \dots + P_n K$ 。其中, P_{n0} 是前期雨量, P_1, P_2, \dots, P_n 是前 1, 2, ..., n 日的降水量, n 取 20; K 为递减系数,取 0.8。

2 泥石流启动机理与降水主成分确定

2.1 泥石流启动的降水主成分确定

就一场泥石流而言,影响其形成的降水因素主要包括前期降水量、始发雨量和暴发雨强。前期降水量是指泥石流暴发日前 n 天降雨量, n 一般取 20。始发雨量是指从泥石流发生当次降雨开始到泥石流发生时刻为止的降水量。暴发雨强是激发泥石流启动的短历时强降雨,常选取 10 min 雨强。为了有效地判别泥石流启动中降水的主导因素,采用主成分分析方法进行数据处理。

表 1 特征值及主成分贡献率

| 主成分 | 特征值 | 贡献率 % | 累计贡献率 / % |
|-----|---------|-------|-----------|
| 1 | 2.329 3 | 77.6 | 77.6 |
| 2 | 0.664 5 | 22.2 | 99.8 |
| 3 | 0.006 2 | 0.2 | 100.0 |

主成分分析方法是把原来多个变量划为少数几个综合指标的一种统计分析方法,从数学角度看,这是一种降维处理技术^[14]。它是对一组相关的变量进行线性变换,得到一组维数不变,但彼此互不相关的变量,亦即一组主成分。由于各主成分是不相关的,因此可以认为它们是一组独立变量,按其所含信息量多少排序。一般前几个主成分即包含了总信息量的大部分。在实际问题的分析中,常挑选前几个最大的

主成分,既可以减少变量的数目,又可抓住主要矛盾。

表 2 主成分载荷

| 降雨指标 | 第 1 主成分 | 第 2 主成分 |
|-------|---------|---------|
| 始发雨量 | 0.959 | 0.278 |
| 暴发雨强 | 0.686 | 0.728 |
| 前期降水量 | 0.969 | 0.240 |

用于分析的原始数据来自研究区蒋家沟流域的级沟道,选择了始发雨量、暴发雨强和前期降水量这 3 组反映泥石流暴发的降水指标^[13],并对其进行了主成分分析(表 1—2)。

从主成分特征值分析可知,第 1 主成分和第 2 主成分的累计贡献率可达 99.8%。对泥石流预报来说,主要考虑这两个主成分就能达到目的。前期降水量与始发雨量与第 1 主成分呈较大的正相关,由此可以明确地判断出前期降水量与始发雨量对泥石流的形成贡献较大,可作为泥石流启动的主导因素。

上述结果从降雨渗透过程和泥石流土体侵蚀启动也可以得到很好的说明。一般而言,要产生泥石流,土体必须要达到一定的含水量。而前期降水正是通过使土体含水量增加,抗剪强度减小,使土体呈现为不稳定的状态,从而对泥石流启动起作用。而始发雨量起到了激发的作用,二者缺一不可。由于泥石流发生的山区,常常难以确定始发雨量,因而常用始发日雨量取代始发雨量进行分析。

2.2 前期降水量在泥石流启动中的机理分析

泥石流形成区斜坡土体的应力状态有两种情况:极限前应力状态和极限应力状态。极限应力状态是指应力达到某种临界组合,即此时只要作用力有微小增加就会导致土体失稳,引起滑动面的不可逆剪切运动。当土体在干燥状态下,角砾土的天然休止角接近或稍大于内摩擦角。蒋家沟角砾土的天然休止角(临界角)的实验表明^[15],当角砾土的含水量小于 8% 时,其临界角随着含水量的增加而增大,当含水量超过 8% 后,其临界角随着含水量的增加反而缓慢减少,此时,斜坡角砾土的启动能量也随之减小。

斜坡土体的抗剪强度是指土体自身具有的一定抵抗沿斜面下滑的能力,其大小为: $\tau = C + G \cos \alpha \tan \phi$ 。其中, C 为内聚力, G 为土体重量, α 为斜面坡度, ϕ 为内摩擦角。蒋家沟角砾土的抗剪强度试验表明,角砾土的抗剪强度随含水量增加的变化过程中,抗剪强度从递增到递减之间存在着一个最大值,这个最大值的临界含水量为 11.5%,即为该土的饱和含水量。当角砾土的含水量达到饱和时,该土体所产生的抗剪强度最大(临界值),当含水量过饱和时,

抗剪强度迅速下降。这些实验结果准确地解释了充分的前期降水量在泥石流启动中所起的作用。当前期降水量充沛的情况下,土体已达到极限应力状态,即抗剪强度已达到临界值。当该次降雨过程出现时,土体的含水量从饱和向过饱和过渡,抗剪强度急剧减小,土体则触变液化而引发泥石流。

2.3 强降水在泥石流启动中的机理分析

泥石流形成区的斜坡土体除受构造应力的侵蚀外,其稳定性还主要受土体的自重应力和抗剪强度的控制。在垂直应力下被土壤骨架支持的应力称为有效应力(σ'),被空隙水支持的应力称为空隙压力(P_{we}),总应力(σ_n)减去空隙压力等于有效应力。即: $\sigma' = \sigma_n - P_{we}$ 。暴雨来时,因排水不畅通,应排出的水不能排出,而水、气又都是不可压缩的,所以空隙水、气必然承受由于空隙度的减少而产生的挤压力。

同时原来的疏松颗粒,当大量水渗入后开始悬浮,以至骨架压力转化为剩余空隙压力。此时垂直于剪切面上的有效应力,由于受到这种空隙压力的增加而减小,当 $\sigma' = P_{we}$ 时,有效应力趋向于零,土体的抗剪强度接近于最小值,于是土体失稳,引起了斜坡滑动面的运动。当强降水过程出现时,来不及下渗的表面径流层形成盖层,盖层下的空隙水无法自由消散,产生的孔隙压力剧增,引起角砾土的触变液化,最终

导致了泥石流的暴发。

3 前期降水量与始发日降水量权重关系的界定

在同一条泥石流沟中,流域内的物质条件、沟床条件在一定时间内,可认为是相对稳定的,而降雨条件的时空变化却很大,就某场降雨而论,降水强度在空间的分布也是不均匀的。前期降水量、始发日降水量的大小以及它们的权重关系与泥石流何时暴发、成灾大小都有很大的关系。根据蒋家沟流域 30 多年来的观测资料,我们随机选择了 1995—1997 连续 3 a 暴发的 43 场泥石流的数据。经分析发现,在泥石流的启动中前期降水量与始发日降水量之间存在着不同的权重关系,而且这种权重关系又与泥石流的输沙量之间存在着一定的相关性。这可为不同降水权重条件下的泥石流预报,降水警戒基准值的确定以及提高预报的可操作性提供定量的分析成果。

一般而言,泥石流形成区的滑坡、崩塌和坡面坍塌是泥石流的重要物质来源,不同的前期降水可使一定数量的补给物质处于失稳状态,为后续降雨激发泥石流提供物质准备。因此在泥石流启动的水土耦合作用过程中,根据前期降水量与始发日降水量之间不同的权重关系,可将其分为 3 种类型(表 3)。

表 3 前期降水与当日降水不同权重下的泥石流概况

| 类别 | 样本数 | 权重 | 总输沙量/ 10^4 m^3 | 占总输沙 量比例 | 历时/ h | 单位产沙量/ $(10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$ |
|----|-----|------|-----------------------------|-------------|----------|--|
| A | 24 | 2.06 | 703.00 | 53.23 | 96.92 | 7.26 |
| B | 11 | 0.79 | 512.00 | 38.77 | 32.52 | 7.95 |
| C | 8 | 1.52 | 105.60 | 8.00 | 23.83 | 4.43 |

(1) 前期降水型(A型)泥石流。这类泥石流前期降水非常充分,其前期降水与始发日降水的权重为 2.06。它形成的主要作用是山坡上或沟谷内不稳定土体的液化作用。土体包括冰渍物、残积物、坡积物、洪积物、崩塌和滑坡堆积物以及人为堆积物等。这些堆积物均为泥石流的形成提供固体物质,降水量的多少,特别是前期降水量,决定了它们能否启动以及规模的大小。

(2) 强降水型(B型)泥石流。这类泥石流前期降水相对较少,它的发生主要取决于始发日降水量的大小。只有降水量足够大时,才能诱发泥石流。其前期降水与始发日降水的权重为 0.79。

(3) 特殊型(C型)泥石流。由于泥石流形成的要素非常复杂,不可能将所有的泥石流样本归纳入类。因此将这样一些泥石流样本作为特例来说明。

4 不同权重泥石流与降水的关系

4.1 前期降水型(A型)泥石流与降水量的相关分析

在所选择的 43 个样本中,有 24 场泥石流属于这种类型,前期降水与始发日降水的权重较大,最小值为 1.2,最大值为 4.0,均值为 2.06。也就是说,如果在泥石流暴发前,持续降雨,使土体充分浸润,当日降水量不一定很大,就可触发泥石流。例如 1997 年 7 月 29 日暴发的泥石流,前期一直阴雨不断,土体饱和,已达到失稳状态,当日降水量仅为 5.33 mm 就启动了泥石流。这种类型的泥石流的特点是前期降水量非常充分,使泥石流形成区的土体呈现出一种饱和状态。

泥石流的产生是特定区域内水土耦合作用的结果,在 A 型泥石流中,由于松散固体物质的补给程度不同,也呈现出 A_1 、 A_2 两种不同的情况(图 1)。

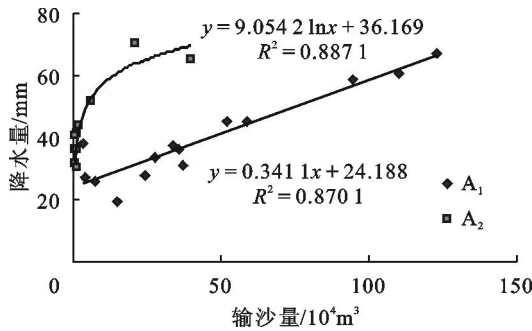


图 1 A 型输沙量与降水量的关系

A₁ 型的泥石流输沙量与降水量(前期降水与始发日降水之和)之间呈现出线性正相关关系,为显著正相关。输沙量随着降水的增加而呈直线增加。这种类型泥石流的暴发规模一般比较大,平均输沙量为 $9.01 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ 。A₁ 型泥石流的样本数为 14 个,占样本总数的 32.56%,其输沙总量为 $6.28 \times 10^6 \text{ m}^3$, 却占到这 3 a 总输沙量的 47.56%。

同 A₁ 相比,A₂ 在同等降水条件下,输沙量远远小于前者。它的输沙量与降水量之间表现为对数关系,相关系数为 0.8871。对样本数据分析可知,这种类型的泥石流在其发生前 5 d 内,90% 发生过泥石流,尽管前期降水充足,但固体物质供给不足,滑坡、崩塌等大量的固体物质加入的速度不够,所以其规模都不大,平均输沙量 $2.76 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ 。A₂ 的样本数为 10 个,占样本总数的 23.26%,其输沙总量为 $7.51 \times 10^5 \text{ m}^3$,占 3 a 总输沙量的 5.68%。

4.2 强降水型(B型)泥石流与降水量的相关分析

尽管前期降水很少,这时如有一一定量的强降水,就会引发泥石流。这种类型泥石流的前期降水量与始发日降水量的比值在 0.5 ~ 1.0 之间,平均值为 0.79。在 43 个样本中有 11 场泥石流属于这种情况,这种类型的泥石流的前期降水量与始发日降水量的权重关系见图 2,它们也呈现出一种线性关系。

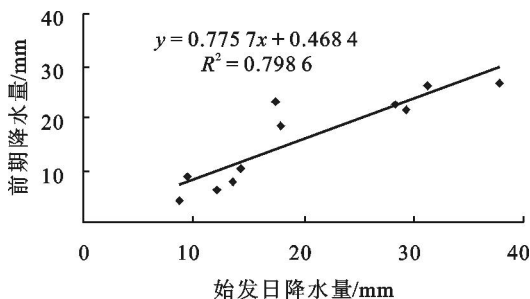


图 2 B 型始发日降水量与前期降水量的权重关系

B 型泥石流输沙量的大小与降水量(前期降水与始发日降水之和)之间呈现出对数关系(图 3),随着降水量的增加而增加。这种类型泥石流的平均输沙量为 $7.93 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$,样本数占样本总数的

23.26%,输沙总量为 $4.78 \times 10^6 \text{ m}^3$,占到这 3 a 总输沙量的 36.6%。从图中可以看出,在这种类型中主要分为两个系列(B₁ 和 B₂),皆为显著相关。

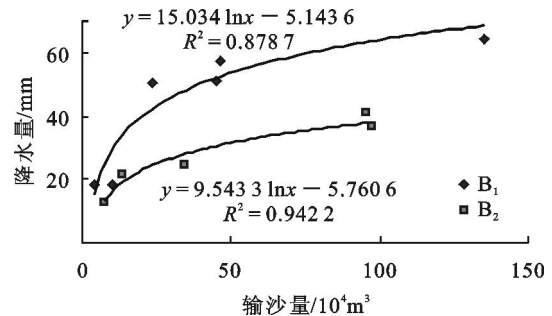


图 3 B 型输沙量与降水量的关系

在这两个系列的对比中,可以看出,在同等的降雨条件下,B₂ 的输沙量要大于 B₁。这是因为即便是在同一条泥石流沟内,不同支沟、不同形成段的固体物质,它们的渗透状况也不尽相同,所提供的固体物质数量也不相同。蒋家沟泥石流形成区的土壤主要为易侵蚀土壤^[16],这类土的 ESP 值(可代换性阳离子 Na⁺ 和 K⁺ 占阳离子代换总量的百分率)大于 15%,分散度大于 35%,它遇水极易受侵蚀而处于悬浮状态,易触变液化而被水带走。但是土体的浸泡需要一定的时间,在泥石流暴发前,B₁ 的前 5 d 降水量占到了前期降水量的 50% 以上,而 B₂ 的前 5 d 降水量则不足前期降水量的一半。B₁ 土体的浸泡时间要比 B₂ 的短,因此 B₂ 的固体物质供给量相对要大一些,同样在强降水的作用下,B₂ 的输沙量要比系列 1 大一些。当前期降水量与当日降水量的权重在 0.8 左右时,可根据前 5 d 降水占前期降水的比例,分别选择上述两种对数模型进行泥石流输沙规模的预测。

4.3 特殊型(C)泥石流与降水量的相关性分析

泥石流是 3 大要素(地形、固体物质和降水)综合作用的产物,其产生原因较为复杂。蒋家沟流域面积大,土源、水源的情况都十分复杂,泥石流的产生都有当时特定的条件,因此不可能将每一场都归入到特定的类别中。在随机抽取的这 43 场泥石流样本中,有 8 场泥石流属于这种类型。例如,在 1995 年 8 月 17 日暴发的两场泥石流中,其前期降水与当日降水的权重为 0.73,与 B 型泥石流的权重系数相似,但其单场输沙量要远远小于这种类型的泥石流。这主要是因为,在数据处理中难以区分降水在这两场泥石流中各自的贡献,无法判别前期降水与当日降水之间真正的权重。又如,在 1995 年暴发的另一场泥石流,其权重为 7.2,属于典型的前期降水型泥石流,但输沙量却小于这种类型的泥石流。主要因为我们资料分析过程中,采用的是 6 站降水量的平均值,而降水的空间

分布差异非常大,这种类型的前期降水与当日降水中心并不一致,因而造成暴发的规模不大。

有8个样本属于C型泥石流,其前期降水与始发日降水的权重相差很大,最大值为7.2,最小值为0.15。输沙量与降水量的关系并不十分明确。它们占样本总数的18.6%,平均输沙量为 $4.43 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$,输沙总量为 $1.06 \times 10^6 \text{ m}^3$,占3a输沙总量的7.99%。

5 结论

通过对蒋家沟1995—1997年暴发的43场泥石流资料以及降水对泥石流启动机理的分析,可以看出前期降水与始发日降水量的不同权重关系对不同类型泥石流的启动及其产沙输沙特性有着密切的关系。

(1) 前期降水型(A型)泥石流。前期降水与始发日降水权重为2.06。由于其主要作用是山坡上或沟谷内不稳定土体的液化作用,前期降水量的多少决定了其能否启动及其规模的大小。按照提供松散固体物质的程度,可以分为A₁型和A₂型两种。A₁型泥石流由于供给物质充足而比A₂型泥石流的产沙规模大。从泥石流出现的数量和规模来看,这类泥石流是该流域的主要泥石流类型。

(2) 强降水型(B型)泥石流。前期降水量与始发日降水量的权重值为0.79。前期降水相对较少时,强降水过程的出现引发了泥石流。B类的输沙量与降水量表现为对数关系,A型和B型泥石流规模都有随着降水量的增加呈现增加趋势。

(3) C型泥石流产生与当时特殊的土源条件、降水条件有关,其前期降水与始发日降水之间的权重值没有呈现出一定的规律性,且其输沙量与降水量之间关系也不明确。

由于降水空间分布差异很大,本文采用的全流域降水平均值进行计算的方式弱化了形成区降水对于泥石流产生的作用。如何精确界定形成区前期降水、始发日降水的权重关系,是今后需深入研究的课题。降水条件对泥石流的产生及其规模大小都有着重要的影响,对于泥石流产生的前期降水与该次过程降水权重的定量分析对于制订切实可行的不同区域不同

情况降雨特点的条件下泥石流预报模式和防灾对策具有重要的应用前景和现实意义。

[参 考 文 献]

- [1] 谭万沛,韩庆玉. 四川省泥石流预报的区域临界雨量指标研究[J]. 灾害学,1992,7(2):37—42.
- [2] 李德基,张德华. 四川省宁南县城后山泥石流激发雨强[J]. 山地研究,1994,12(1):15—19.
- [3] 谭万沛. 八步里沟降雨的垂直分布特征与泥石流预报的雨量指标[J]. 四川气象,1988,8(2):25—28.
- [4] 谭炳炎. 暴雨泥石流预报的研究[J]. 水土保持学报,1990,4(4):14—19.
- [5] 陈景武. 云南东川蒋家沟泥石流暴发与暴雨关系的初步分析[C]. 全国泥石流学术论文集,1980:93—99.
- [6] 魏永明,谢又予. 降雨型泥石流水石流预报模型研究[J]. 自然灾害学报,1997,6(4):48—53.
- [7] Bacchini M, Zannoni A. Relations between rainfall and triggering of debris-flow: case study of Cancia [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2003(3):71—79.
- [8] 濑尾克美. 土石流警戒 @ 避難基準としての降雨指標について[J]. 新砂防,1985,38:16—21.
- [9] 姚学祥,徐晶,薛建军,等. 基于降水量的全国地质灾害潜势预报模式[J]. 中国地质灾害与防治学报,2005,16(4):97—102.
- [10] 王裕宜,邹仁元,李昌志. 泥石流土体侵蚀与始发雨量的相关性研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1999,5(16):34—38.
- [11] 崔鹏,杨坤,陈杰. 前期降雨对泥石流形成的贡献:以蒋家沟泥石流形成为例[J]. 中国水土保持科学,2003,1(1):11—15.
- [12] 韦方强,胡凯衡,陈杰,等. 泥石流预报中前期有效降水量的确定[J]. 山地学报,2005,23(4):453—457.
- [13] 吴积善,康志成,田连全,等. 云南蒋家沟泥石流观测研究[M]. 北京:科学出版社,1990.
- [14] 张超,杨秉廉. 计量地理学基础(2版)[M]. 北京:高等教育出版社,2003.
- [15] 王裕宜,詹钱登,陈晓清,等. 泥石流流体的应力应变自组织临界特性[J]. 科学通报,2003,48(9):976—980.
- [16] 王裕宜,严璧玉. 泥石流碎屑岩粘泥粒特征的分析研究[A]//泥石流观测与研究[M]. 北京:科学出版社,1996:51—56.