

# 云南蒋家沟泥石流运动特征及其发展趋势

黄英, 丁明涛\*, 庙成, 王骏, 周鹏

(西南科技大学环境与资源学院, 四川 绵阳 621010)

**摘要:** 根据蒋家沟 1965~2005 年的泥石流运动观测资料与会泽气象站 1965~2005 年日降水资料, 应用 Hurst 指数分析泥石流的运动要素, 研究发现: 泥石流年输沙量的 Hurst 指数为 0.682 时, 年输沙量呈较强的正持续性, 未来呈增长趋势; 降雨量的 Hurst 指数 0.605 时, 降雨量呈较弱的正持续性, 未来呈较弱的增长趋势。同时, 运用小波分析方法, 发现泥石流输沙量具有多时间尺度周期的特征, 主要表现为: 第 8、14 和 24 年分别为其第 1、2 和 3 活动周期; 结合小波方差图分析可知: 在未来 15 a 以上, 年输沙量将呈减少趋势, 泥石流活跃程度弱; 而 15 a 以内, 未来将会保持较短时间的增加趋势, 泥石流活跃程度强。综合以上分析可知: 蒋家沟泥石流具有规模巨大, 作用强烈, 类型齐全等主要特征。

**关键词:** 蒋家沟; 泥石流; 运动特征; 发展趋势

中图分类号: X43 文献标识码: A 文章编号: 1004-8227(2015)08-1434-09

DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201508024

泥石流是一种发生在山区由泥砂、碎块等松散土体与水体所组成的混合流体, 在重力作用下, 沿坡面或溪沟迅速流动的一种自然地质现象, 是介于崩塌、滑坡等块体运动和高含砂水流运动之间的一系列流动过程<sup>[1]</sup>。泥石流分布遍及全球 50 多个国家, 其中造成损失比较严重的有秘鲁、中国、日本等国家<sup>[2]</sup>。蒋家沟是我国西南山区一条典型的泥石流沟。该区泥石流暴发频繁, 时刻危害着当地人民的生命财产安全。因此深入研究该流域泥石流的运动特征规律, 能为泥石流灾害的防治提供很好的指导, 进而减少人员的伤亡和财产的损失。

到目前为止, 诸多学者对蒋家沟泥石流运动要素进行了研究, 如王裕宜等<sup>[3]</sup>、李昌志等<sup>[4]</sup>、林伟等<sup>[5]</sup>分别对蒋家沟泥石流输沙量年际变率的回旋型性、预测模型及多时间尺度分析进行了研究; 刘希林<sup>[6]</sup>用灰色理论和回归分析方法对泥石流进行了预测; 倪化勇等<sup>[7]</sup>、刘晶晶等<sup>[8]</sup>对该区流量过程进行了分析并发现了相应规律; 研究者对泥石流的物理特性进行了分析, 建立了粘性<sup>[9~11]</sup>、稀性泥石流流速计算公式<sup>[9,10,12]</sup>及力学特性研究<sup>[13,14]</sup>。总结可知, 学者们主要对泥石流运动要素进行单一的研究, 对

于运动要素的综合性分析少。因此, 本文对流量、输沙量等运动要素进行了综合分析, 并利用 Hurst 指数分析年降雨量和年输沙量的趋势持续性, 进而应用小波分析<sup>[15~17]</sup>得出泥石流年输沙量的活动周期及泥石流未来的活跃程度。

## 1 研究区概况

蒋家沟流域位于云南省东北部(北纬 26°13'~26°17', 东经 103°6'~103°13'), 处于云贵高原北部, 乌蒙山脉西缘, 地貌上属滇东北高山峡谷类型。该流域面积 48.6 km<sup>2</sup>, 主沟 13.9 km, 支沟 200 多条, 其中切沟 154 条, 冲沟 46 条<sup>[18]</sup>。

蒋家沟流域山高坡陡(见图 1), 干湿季分明, 垂直气候带明显。雨季为 5~10 月, 旱季为 11 月~次年 4 月, 雨季多阵雨、暴雨<sup>[19]</sup>。据调查显示<sup>[20]</sup>, 该流域内林地面积 405 hm<sup>2</sup>, 森林覆盖率仅 4.2%, 加上灌木和林地, 其森林覆盖率不超过 5.3%, 山体裸露达 94.7%, 其中陡坡开荒占 27.7%, 其余大部分是碎山和冲沟。加上农耕、开办铜矿、修路、城镇建设等人类活动, 导致固体松

收稿日期: 2014-09-26; 修回日期: 2014-12-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371185; 41101164); 四川省科技厅项目(2013HH0057); 四川省教育厅重点项目(13ZA0160)

作者简介: 黄英(1990~), 女, 硕士研究生, 主要从事泥石流防灾减灾理论与技术方面的研究。E-mail: HuangYingazj@163.com

\* 通讯作者 E-mail: mingtaoding@163.com

散物增多,这为泥石流的发生创造了有利的条件。可见,流域内丰富的降水、陡峭的地形和丰富的固体松散物质,为蒋家沟泥石流的形成发展提供了有利的条件。

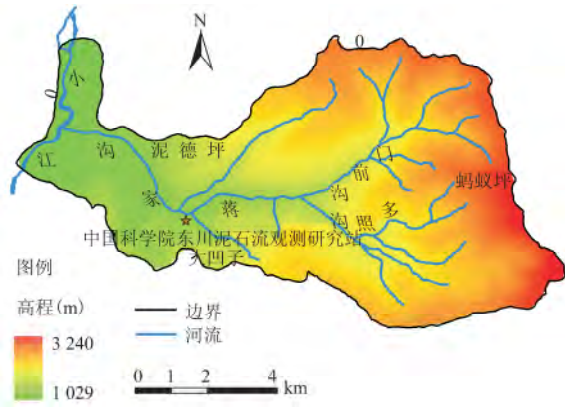


图 1 蒋家沟流域数字高程模型图  
Fig. 1 DEM Map of Jiangjia Gully Basin

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源

本文采用 1965~2005 年蒋家沟泥石流的运动要素(流量、输沙量、容重等)资料数据<sup>[21~23]</sup>,来自中国科学院东川蒋家沟泥石流观测试验研究站;采用来自国家气象局云南会泽站观测点的降雨资料。蒋家沟泥石流开始观测时,仅 3 个降水观测点,1997 年才设有 6 个降水观测点,2006 年后才发展到全年自动记录数据,因此各种原因造成了降雨量观测资料的缺失,缺乏降雨观测长时间时序的连续性,使用起来相对比较困难。但相关研究发现<sup>[24]</sup>,会泽县年降雨量与蒋家沟年降雨量具有 0.813 的高度相关性,因此,本文分析所涉及到的降雨量数据,均是会泽站观测点的降雨量。

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 Hurst 指数分析

基于 R/S(Rescaled Range Analysis,重新标度极差分析法)分析基础上的 Hurst 指数<sup>[25]</sup>是英国水文专家 Hurst 在 1951 年研究尼罗河水库水流量和储存能力的关系时,发现用分形布朗运动能够更好地描述水库的长期存储能力,并在此基础上提出了用重标极差分析方法来建立赫斯特指数。近年来 Hurst 指数在其他的领域也得到了很好的应用,并且经众多学者的补充完善,发展成一种广泛应用的趋势分析方法<sup>[26~30]</sup>,因此本文借用它来估算 Hurst

指数,提示要素的持续性。

假设时间序列为  $x_i(i = 1, 2, \dots, n)$ ,将时间序列  $x_i$  等分成长度  $N(N \geq 3)$ ,  $M$  个子序列。将每个子序列记为  $E_m(m = 1, 2, \dots, M)$ ,相应的元素记为  $X_{k,m}(1 \leq k \leq N)$ 。计算公式如下:

$$\text{均值: } \bar{x}_m = \sum_{k=1}^N x_{k,m} / N \quad (1)$$

$$\text{累计离差: } X_{k,m} = \sum_{k=1}^N (x_{k,m} - \bar{x}) \quad (2)$$

$$\text{极差: } R_M = \text{Max}(X_{k,m}) - \text{Min}(X_{k,m}) \quad (3)$$

$$\text{标准差: } S_m = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (x_{k,m} - \bar{x}_m)^2} \quad (4)$$

$$\text{重标极差: } (R/S)_m = R_m / S_m \quad (5)$$

$$\text{平均重标极差: } F_N = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (R/S)_m \quad (6)$$

Hurst 指数可以通过对式  $F_N = c \times N^a$  的两边取对数,在对数坐标系  $(\text{Log}N, \text{Log}F_N)$  下用最小二乘法回归求得  $H$  估算值。不同的  $H$  值,情况不同:若  $H=0.5$ ,表明时间序列可以用随机游走来描述;若  $0.5 < H < 1$ ,表明时间序列具有长期相关的特征,过去整体增加,预示将来趋势仍然是增加。 $H$  值越接近 1,持续性就越强;若  $0 < H < 0.5$ ,表明时间序列具有长期相关性。但将来的总体趋势与过去相反,整体增加趋势减少。 $H$  值越接近 0,反持续性越强。Hurst 指数能很好地揭示出序列中的趋势性成分,并且能由 Hurst 指数值的大小来判断趋势性成分的持续性或者反持续性强的程度<sup>[31]</sup>。

表 1 Hurst 指数分级表

Tab. 1 Classification of Hurst Indexes

Hurst 指数值域	持续性强度	Hurst 指数值域	反持续性强度
$0.5 < H \leq 0.55$	很弱	$0.45 \leq H < 0.50$	很弱
$0.55 < H \leq 0.65$	较弱	$0.35 \leq H < 0.45$	较弱
$0.65 < H \leq 0.75$	较强	$0.25 \leq H < 0.35$	较强
$0.75 < H \leq 0.80$	强	$0.20 \leq H < 0.25$	强
$0.80 < H \leq 1.00$	很强	$0.00 \leq H < 0.20$	很强

#### 2.2.2 小波分析

多时间尺度研究将为系统提供不同时间尺度下的演变规律及发展趋势,从而为系统中长期预测提供背景分析依据<sup>[32]</sup>。时间序列进行分析时会涉及到时域和频域两种基本形式<sup>[33]</sup>,即输沙量序列的不平稳性与时间变化性,这就需要一种可以同时满足时域分析和频域分析的函数,描述其变动信息。Morlet 提出的小波分析(Wavelet Analysis)满足这

一要求。

小波分析的基本思想是用一簇小波函数系来表示或逼近某一信号或函数<sup>[34]</sup>。表达式为：

$$\psi(t) \in L^2(R) \text{ 且满足: } \int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (7)$$

式中,  $\psi(t)$  为基小波函数, 它可通过尺度的伸缩和时间轴上的平移构成一簇函数系:

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \psi(\frac{t-b}{a}) \text{ 其中, } a, b \in R, a \neq 0 \quad (8)$$

式中,  $\psi_{a,b}(t)$  为子小波;  $a$  为尺度因子, 反映小波的周期长度;  $b$  为平移因子, 反映时间上的平移。对于给定的能量有限信号  $f(t) \in L^2(R)$ , (8) 式的连续小波变换为:

$$W_f(a,b) = |a|^{-1/2} \int_R f(t) \bar{\psi}(\frac{t-b}{a}) dt \quad (9)$$

式中,  $W_f(a,b)$  为小波变换系数;  $f_t$  为一个信号或平方可积函数,  $a$  为伸缩尺度;  $b$  为平移参数;  $\bar{\psi}(\frac{t-b}{a})$  为  $\psi(\frac{t-b}{a})$  的复共轭函数。地学中观测到的时间序列数据大多是离散的, 设函数  $f(k\Delta t)$ , ( $k = 1, 2, \dots, N$ );  $\Delta t$  为取样间隔), 则式(9)的离散小波变换形式为:

$$W_f(a,b) = |a|^{-1/2} \Delta t \sum_{k=1}^N f(k\Delta t) \bar{\psi}(\frac{k\Delta t - b}{a}) \quad (10)$$

由式(9)或(10)可知小波分析的基本原理, 即通过增加或减小伸缩尺度  $a$  来得到信号的低频或高频信息, 然后分析信号的概貌或细节, 实现对信号不同时间尺度和空间布局特征的分析<sup>[35]</sup>。将时间域上关于  $a$  的所有小波变换系数的平方进行积分, 即为小波方差:  $\text{Var}(a) = \int_{-\infty}^{+\infty} |W_f(a,b)|^2 db$ , 小波方差随尺度  $a$  的变化过程称小波方差图, 反映了波动的能量随尺度的分布。通过小波方差图, 可以确定一个序列中存在的主要时间尺度, 即主周期。

### 3 泥石流运动特征分析

本文针对蒋家沟泥石流的运动要素: 流量、容量、输沙量和泥深进行深入分析, 进一步得出蒋家沟泥石流所具有的运动特征。

#### 3.1 流量

流量是泥石流的重要参数之一, 而泥石流活动本身的表现特征中最显著的就是阵性和阵流序列, 因此, 研究泥石流的流量序列是非常必要的。从图

2 可知, 蒋家沟泥石流历年来的最大流量情况, 最大流量可达到 4 687. 5 m<sup>3</sup>/s(1983 年), 且大多数最大流量大于 1 000 m<sup>3</sup>/s。

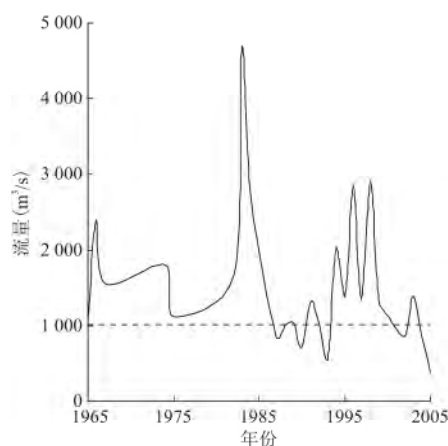


图 2 蒋家沟 1965~2005 年泥石流年最大流量曲线图  
Fig. 2 Annual Maximum Flow Graph of Jiangjia Gully Debris Flows from 1965 to 2005

蒋家沟泥石流含沙量高且流域内崩塌、滑坡面积超过 50%<sup>[36]</sup>, 加上充足的降雨, 因此蒋家沟泥石流属于土力型泥石流。一般泥石流启动时含有一定量的泥沙、块砾, 但由于蒋家沟流域的地貌原因, 泥石流启动时含有较多泥沙、块砾。随着泥石流的流动, 泥石流冲刷作用增强, 下切产生的固体物质和沟道中堆积的由于滑坡、崩塌所产生的松散物不断补充加入, 使沿程固体流量不断增加, 往往达到清水流量的数倍, 因此每次泥石流流量波动较大, 有时波动甚至有两三个数量级。如: 编号为 9403(1994 的第 3 场泥石流) 泥石流实测最大流量 2 027. 8 m<sup>3</sup>/s, 最小为 2. 3 m<sup>3</sup>/s, 相差近 900 倍, 均值为 459. 8 m<sup>3</sup>/s, 不及最大流量的 1/4(图 3(a)); 编号 9110 泥石流实测最大流量为 1 319. 4 m<sup>3</sup>/s, 最小为 2. 3 m<sup>3</sup>/s, 相差近 600 倍, 均值为 219. 25, 不足最大流量的 1/5(图 3(b)); 编号 8905 泥石流最大流量为 1 050 m<sup>3</sup>/s, 最小流量为 0. 5 m<sup>3</sup>/s, 甚至相差达两千倍, 均值为 205. 36 m<sup>3</sup>/s, 也不足最大流量的 1/5(图 3(c))。从图 3 中可知, 平均流量小于多数阵流流量, 清晰可见泥石流涨落情况。

选择 5 组(编号 8905、9118、9202、9403、9402) 泥石流, 探讨随泥石流阵次的增加, 流量序列均值的变化情况。从图 3(d) 的流量序列均值变化可知, 流量均值随泥石流阵次的增加而减小, 流量序列均值总体呈减少趋势; 流量峰值越大时, 其均值降落梯度越大。说明泥石流具有衰减过程。

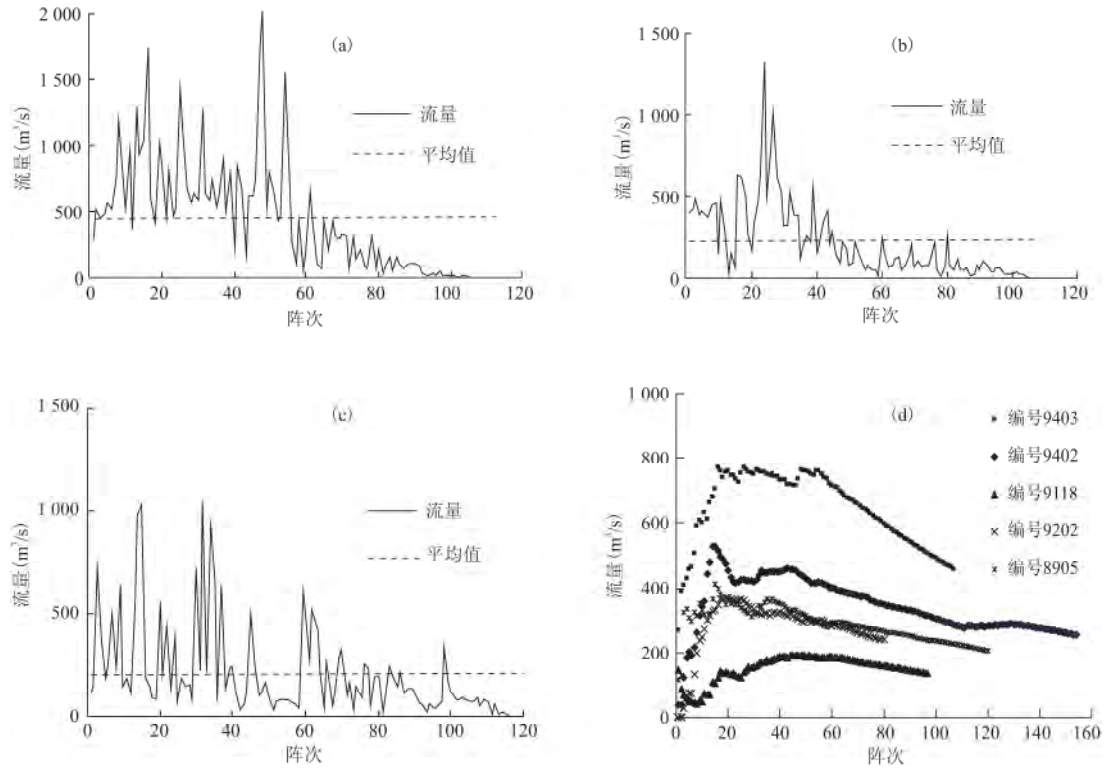


图 3 泥石流阵次与流量变化

Fig. 3 Change of Flow and Flow of Debris Flow

3.2 输沙量

从表 2 可知,蒋家沟每年暴发泥石流次数到数 10 次,自 1965~2005 年,共计暴发泥石流 440 次,

平均每年约 11 次,其中最少每年暴发 2 次,最多 28 次,年输沙量达数十到数百万立方米。

表 2 蒋家沟泥石流爆发次数及输沙量(10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>)

Tab. 2 Annual Frequency and Transported Sediment of Jiangjia Gully Debris Flows

年份	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	
暴发次数	28	17	15	14	6	6	5	6	
输沙量	353	180	195	199	85	92	82	99	
年份	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	
暴发次数	14	22	12	9	11	14	23	9	
输沙量	246	387	211	150	174*	221*	342*	126*	
年份	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	
暴发次数	11	6	15	7	14	5	7	4	
输沙量	99*	192	398	369	585	180*	171	29	
年份	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	
暴发次数	14	20	22	5	2	6	13	14	
输沙量	200	263	659	119	26	200	374	315	
年份	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
暴发次数	18	10	9	8	17	8	6	6	2
输沙量	657	215	234	61	288	149	69	20	5.207

注:“\*”是王裕宜<sup>[3]</sup>和李昌志等<sup>[4]</sup>采用分析测试中统计方法,用等插点方式补充的非实测数据。

输沙量的多少会影响小江河床的抬升或淤堵, 1919~1968 年,小江就已被堵 7 次<sup>[37]</sup>,且造成了不同程度的损失,输沙量的多少间接代表了泥石流规

模的大小。

3.3 泥深

泥石流的发生导致沟谷河床抬升,泥深可以反

应出河床的抬升程度。从图 4 中可知,1993 的最大泥深是最小的,为 1.58 m。而历年泥石流中最大泥深可达 6.49 m(1989 年),可见固体松散物质之多。在这 40 a 内每年的最大泥深之和就达到了 84.94 m,相当于一幢 20 多层高的建筑。加之平均每年暴发 11 次泥石流的泥深,河床的抬升状况可想而知。从这里可以间接地看出蒋家沟泥石流作用强烈,固体物质增多,从而导致河床的不断抬升。

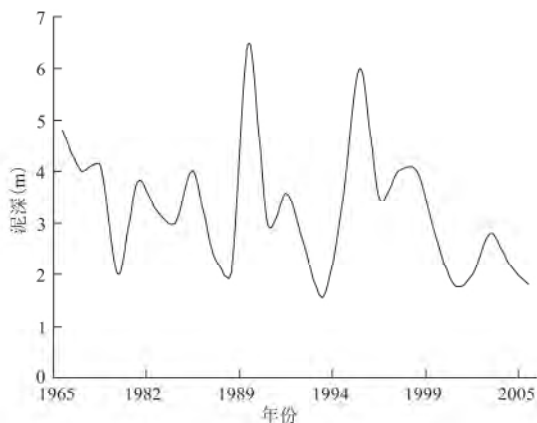


图 4 蒋家沟泥石流 1965~2005 年最大泥深曲线图

Fig. 4 Maximum Mud Depth of Jiangjia Gully Debris Flows from 1965 to 2005

### 3.4 容重

泥石流根据其容重大小可以分为粘性泥石流和稀性泥石流,其中稀性泥流体容重一般为 1.30~1.70 t/m<sup>3</sup>,粘性泥流体容重为 2.00~2.30 t/m<sup>3</sup>。从图 5 可知,蒋家沟是一条高容重的泥石流沟(实测最高容重为 2.39 t/m<sup>3</sup>)。从图 6 可知,该随机选取的泥石流平均容重大于 1.8 t/m<sup>3</sup>,为粘性泥石流,共 33 阵次,有几个阵次容重小于 1.8 t/m<sup>3</sup>,为稀性泥石流,其余大部分为粘性泥石流。表明蒋家沟泥石流类型较为齐全,主要以为粘性泥石流。

## 4 发展趋势

陡峻的地形、丰富的固体松散物质和一定强度

的降水量是形成泥石流的三大主要因素。但是在同一条泥石流沟中,陡峻的地形和丰富的固体松散物质在一定的尺度内可以被认为是保持不变的或相对变化较小。因此可以认为泥石流的发生和发展规模主要受降雨量的影响。表 3 中会泽降雨主要集中在夏季汛期,且降雨量所占比例是全年总降雨量的 80%以上。

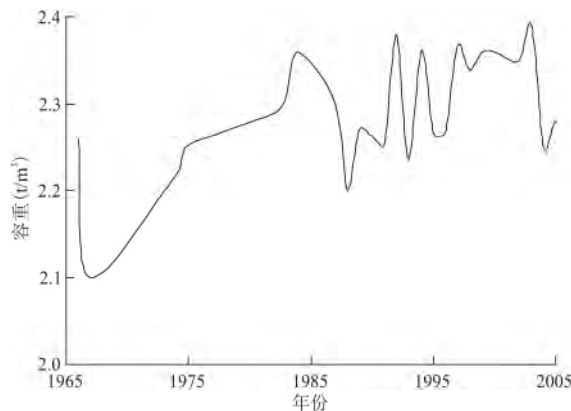


图 5 蒋家沟泥石流 1965~2005 年最大容重曲线图

Fig. 5 Maximum Bulk Density of Jiangjia Gully Debris Flows from 1965 to 2005

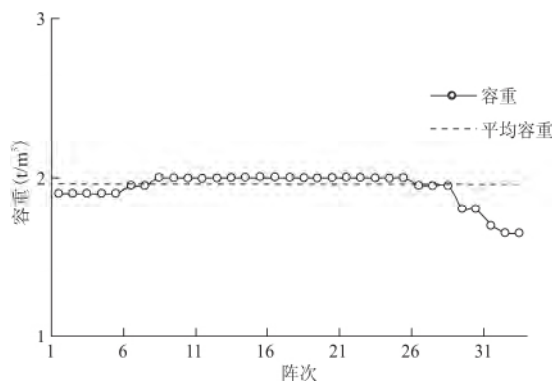


图 6 泥石流平均容重图

Fig. 6 Average Density of Debris Flow Chart

### 4.1 泥石流的趋势持续性及相关性

通过分析输沙量、降雨量的时间曲线,可知 40 多 a 来平均每年输沙量为 220.85 万 m<sup>3</sup>,平均每年

表 3 会泽县汛期降雨量

Tab. 3 Rainy Season Precipitation in Huize County

年份	总降雨量 (mm)	汛期降雨量 (mm)	降雨量 (%)	年份	总降雨量 (mm)	汛期降雨量 (mm)	降雨量 (%)
1967	811.1	721.7	89.0	1991	875.9	731.9	83.6
1970	773.5	660.7	85.4	1995	913.9	778.6	85.2
1975	549	445.4	81.1	2000	857.7	729.2	85.0
1980	744.8	672.1	90.2	2005	673.1	552.2	82.0



降雨量为 784.07 mm(图 7、图 8)。总的来说,40 多年来降雨量与年输沙量在不断的增加,输沙量以每年  $253 \text{ m}^3$  的速度在增加,降雨量以每年 1.05 mm 的速度在增加。

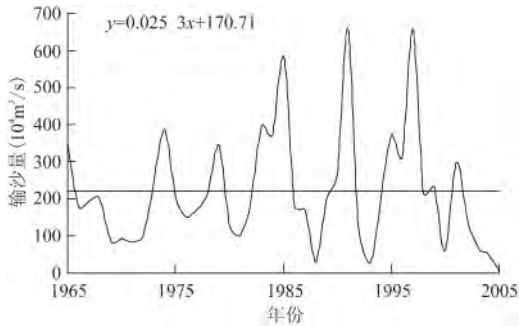


图 7 1965~2005 年年输沙量的时间变化曲线  
Fig. 7 Timely Varying Curves of Annual Sediment discharge from 1965 to 2005

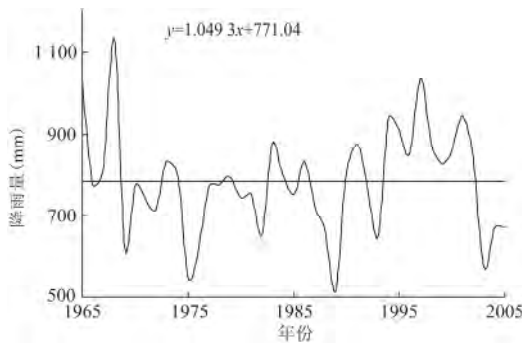


图 8 1965~2005 年降雨量的时间变化曲线  
Fig. 8 Timely Varying Curves of Rainfall from 1965 to 2005

结合 Hurst 指数计算结果分析:年输沙量时间序列的 Hurst 指数为 0.682,  $0.65 < H \leq 0.75$ ,表明年输沙量时间序列具有长期相关的特征,过程具有较强的正持续性,未来有进一步增加的趋势;降雨量时间序列的 Hurst 指数为 0.605,  $0.55 < H \leq 0.65$ ,表明降雨量时间序列具有长期相关的特征,过程具有较弱的正持续性,未来有增加的趋势(图 9、图 10)。降雨量与输沙量未来都是呈增长趋势,但增长幅度不同。

#### 4.2 输沙量的周期性

图 11 反映出流量序列的周期变化、突变点分布和位相结构特征。其中小波系数实部为正时,对应着该项指标的偏大时期,图中用实线绘制,而红色部分表示年输沙量增加得较多时期;小波系数实部为

负时,对应着该项指标偏少时期,图中用虚线绘制,而蓝色部分表示年输沙量较少时期。实线与虚线交汇的地方,即等值为 0 的地方是突变的时间点。等值线的疏密与指标的偏少和偏多时期是对应的。从图 11 可知,总体上,右边的等值线密度大于左边,这说明 40 多年来,年输沙量总体上一一直保持增加的趋势。与 4.1 得出结果相同。

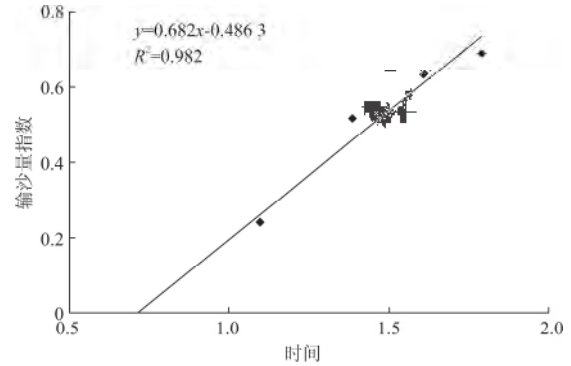


图 9 年输沙量的 R/S 分析结果  
Fig. 9 Annual Sediment Discharge of R/S Analysis Results

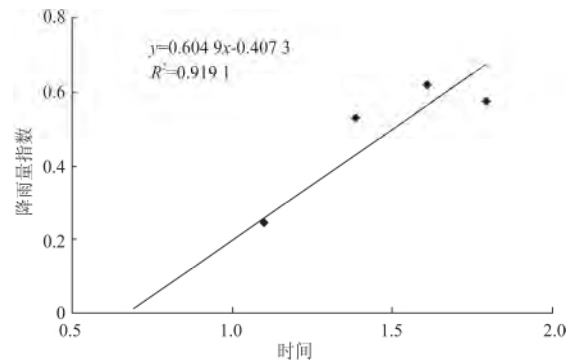


图 10 降雨量的 R/S 分析结果  
Fig. 10 Rainfall of R/S Analysis Results

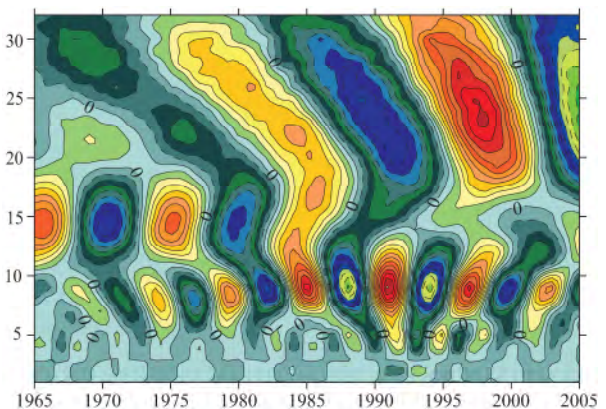


图 11 输沙量的小波系数实部等值线图  
Fig. 11 Sediment Discharge of the Wavelet Coefficient of Real Contour Map

由图 11 中可知能量中心的频域尺度主要集中在 6~10 a、12~17 a 和 20~27 a(在这 3 个区域内有规律地出现增减交替过程)。从尺度 6~10 a 来看,41 a 的年输沙量则存在着多、少、多、少、多、少、多、少、多的周期变化特征,且该尺度周期在 1970 年以后较为明显;12~17 a 则存在多、少、多、少、多、少、多的周期变化特征,并且该尺度周期在 1983 年以前较为明显;20~27 a 则存在少、多、少、多、少的周期变化特征,并且该尺度周期在 1983 年以后较为明显。可见,不同时间尺度所对应的增减变化是不同的,小尺度的增减变化嵌套在大尺度的增减结构中。结合图 12 可知,小波方差随时间尺度变化的过程有 3 个明显峰值,分别对应着 8 a、14 a 和 24 a,表明它们在相应尺度下信号震荡强烈,所以年输沙量在 8 a、14 a 和 24 a 上存在第 1、2 和 3 主周期。3 a、5 a 处也对应着峰值,但峰值较弱,可视为小波方差值波动小,予以忽略。结合图 11、12 分析,在未来 15 a 以上尺度,年输沙量呈减趋势少,泥石流活跃程度相对较弱;而 15 a 以下尺度,未来将会保持较短时间的增加趋势,泥石流活动程度强。

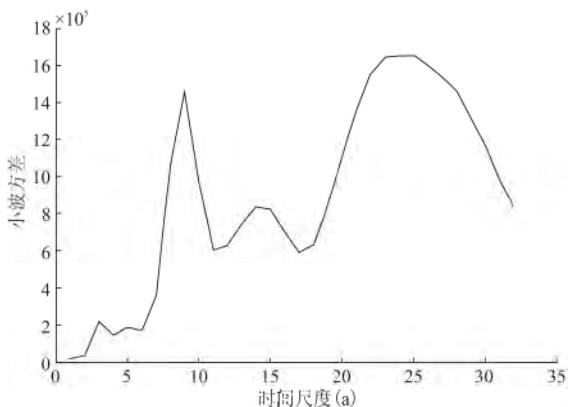


图 12 输沙量小波方差分布  
Fig. 12 Annual Sediment Discharge of Wavelet Variance Distribution

#### 4.3 模型检验:

根据预测结果来看,蒋家沟泥石流在 2006~2013 年的活跃程度较强,这与倪化勇<sup>[38]</sup>、杨坤<sup>[39]</sup>所预测的结果(2006~2012 年蒋家沟泥石流多暴发中等规模的泥石流,2011 年前后是泥石流暴发较为严重的时期)相吻合。但从图 13 可知,2005~2008 年输沙量呈增长的趋势,总体输沙量呈一定程度的减少,与预测不符。原因主要有以下两个方面:(1)由于各种原因导致 2009 年的运动要素记录不完整,仅记录了一部分输沙量数据,且缺失 11、12 年的输沙

量数据;(2)蒋家沟因 1966 年大地震造成大量固体松散物质,使地震以后的蒋家沟频繁暴发泥石流。从图 8 中可知,该区域在 90s 的降雨量充足,泥石流暴发产生的输沙量更是达到了高潮。但是 2001 年起蒋家沟泥石流的输沙量大幅度减少,一方面是因为大地震所产生的固体松散物质逐渐减少,另一方面是在 1999~2001 年蒋家沟流域被列为世行贷款水土保持综合治理小流域<sup>[40]</sup>,植树造林,多处修建沟头防护工程。由于综合治理速度慢,年均治理进度为 0.8%,因此泥石流输沙量逐年减少,总体来说抑制了蒋家沟泥石流的发展。

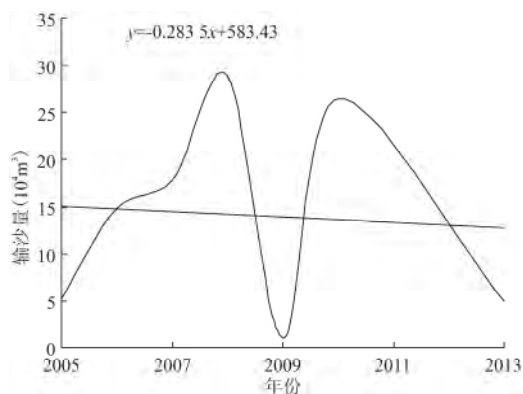


图 13 2005~2013 年年输沙量的时间变化曲线  
Fig. 13 Timely Varying Curves of Annual Sediment Discharge from 2005 to 2013

### 5 结论

根据对 1965~2005 年泥石流数据的分析可知:

(1)蒋家沟泥石流流量大,最大流量为 4 687.5 m<sup>3</sup>/s,平均每年输沙量为 220.85 万 m<sup>3</sup>,泥深大,多次堵江,可知该流域泥石流规模巨大,作用强烈。

(2)随泥石流阵次的增加,流量均值变化越明显,流量均值随着泥石流阵次的增加而减小,流量序列的均值总体呈减少趋势;流量峰值越大时,其均值的降落梯度越大。

(3)蒋家沟泥石流容重最大为 2.39 t/m<sup>3</sup>,是一条高容重泥石流沟。从图 7 可知,蒋家沟泥石流容重变化大,既有粘性泥石流,又有稀性泥石流,是一条多类型的泥石流沟。

(4)通过 Hurst 指数分析,可知年输沙量和降雨量的 Hurst 指数分别为 0.682、0.605,说明年输沙量具有较强的正持续性,未来有进一步增加的趋势,降雨量具有较弱的正持续性,未来有较弱的增加

趋势。

(5)泥石流的发生存在多时间尺度特征,不同时间尺度表现为不同的循环交替,大尺度周期变化嵌套着小尺度周期变化。小波分析发现,输沙量总体上呈持续增长趋势,在第 8、14 和 24 a 上分别存在第 1、2 和 3 主周期。而在未来 15 a 以上尺度,年输沙量呈减少趋势,泥石流活动程度较弱;而 15 a 以下尺度,年输沙量将会保持较短时间的增加趋势,泥石流活动程度较强。

## 参考文献:

- [1] 魏厚振. 蒋家沟泥石流砾石土力学性状与起动过程分析研究[D]. 武汉:中国科学院武汉岩土力学研究所博士学位论文, 2008.
- [2] 马晓航. 全球泥石流引发死亡人数远超预期[N]. 人民网, 2012-09-03.
- [3] 王裕宜, 洪 勇, 李昌志. 暴雨泥石流输沙年际变率的旋回性研究——以云南东川蒋家沟泥石流为例[J]. 自然灾害学报, 2000, 9(4): 99-104.
- [4] 李昌志, 曹叔尤, 彭清娥, 等. 蒋家沟流域输沙预测模型初探[J]. 泥沙研究, 2000, (4): 45-50.
- [5] 林 伟, 谢 洪, 张金山. 基于 EMD 的云南东川蒋家沟泥石流年输沙量多时间尺度分析[J]. 现代地质, 2013, (3): 733-737.
- [6] 刘希林. 灰色模型和回归分析在泥石流预测中的应用——以蒋家沟泥石流年输沙量预测[J]. 灾害学, 1989, 4(2): 26-30.
- [7] 倪化勇, 吕学军. 泥石流阵流及其活动规律[J]. 水土保持研究, 2005, 12(6): 242-244.
- [8] 刘晶晶, 李 泳, 程尊兰, 等. 阵性流泥石流的流量衰减特征[J]. 中国科学院研究生院学报, 2008, (2): 177-184.
- [9] 陈光曦, 王继康. 泥石流防治[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1983: 2-49.
- [10] 中国科学院兰州冰川冻土研究所, 甘肃省交通科学研究所. 泥石流地区公路工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 1981: 64-143.
- [11] 刘 江, 程尊兰. 云南盈江浑水沟泥石流流速计算[C]. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1981: 87-89.
- [12] TAMOTSU T. Debris flow on prismatic open channel[J]. Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of American Society of Civil Engineering, 1980, 106(HY3): 381-398.
- [13] YOU Y, LIU J F, OU G Q, et al. The hydraulic characteristics in compound channels of viscous debris flow; A case study on the Dabaini debris flow gully in Xiao j fang Basin of Yunnan province, China[J]. Geosciences and Remote Sensing Symposium, 2007: 4679-4682.
- [14] YOU Y, LIU J F, OU G Q. The hydraulic condition analysis and optimal cross-section design of the "rectangle-v" shaped drainage canal of debris flow[J]. Geosciences and Remote Sensing Symposium, 2007: 4715-4718.
- [15] 李志斌, 陈佑启. 建国以来黑龙江省粮食产量变化小波分析[J]. 干旱区资源与环境, 2008(2): 128-132.
- [16] 康 玲, 杨正祥. 基于 Morlet 小波的丹江口水库流量周期性分析[J]. 计算机与科学, 2009(11): 149-152.
- [17] 谢毅文, 李粤安. 基于小波变换的广东省年降水量序列多时间尺度分析[J]. 人民珠江, 2013, 34(3): 32-34.
- [18] 丁明涛, 韦方强. 云南蒋家沟泥石流成因及其防治措施探析[J]. 水土保持研究, 2008(1): 20-22.
- [19] 李志昌, 曹叔尤, 彭清娥, 等. 蒋家沟流域输沙预测模型初探[J]. 泥沙研究, 2000(4): 45-50.
- [20] 彭云山. 浅谈蒋家沟泥石流治理[J]. 中国林业, 2004, 3(1): 37-38.
- [21] 康志成, 崔 鹏, 韦方强, 等. 东川泥石流观测研究站观测实验资料集[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [22] 张 军, 熊 刚. 云南蒋家沟泥石流运动观测资料集[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [23] 康志成, 崔 鹏, 韦方强, 等. 东川泥石流观测研究站观测实验资料集[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [24] 田 冰. 气候变化下的泥石流输沙特征及其演变趋势分析——以长江上游小江流域蒋家沟泥石流为例[D]. 北京: 中国科学院研究生院博士学位论文, 2008.
- [25] 邱海军, 曹明明, 胡 胜, 等. 近 60 a 来中国洪涝灾情变化趋势持续性和周期性研究[J]. 地球与环境, 2014(1): 17-24.
- [26] 赵 晶. 近 50 年来兰州城市气候变化的 R/S 分析[J]. 干旱区地理, 2002, 25(1): 90-95.
- [27] MANDELBROT B B, WALLIS J R. Some long-run properties of geophysical record[J]. Water Resoursh, 1969, 5(2): 321-340.
- [28] MANDELBROT B B, WALLIS J R. Robustness of the rescaled ranged R/S in the measurement of monocyclic loner on statistical dependence[J]. Water Resources Research, 1969, 5(5): 967-988.
- [29] 时少英, 刘式达, 付遵涛, 等. 天气和气候的时间序列特征分析[J]. 地球物理学报, 2005, 48(2): 259-264.
- [30] 丑纪范. 大气科学中的非线性和复杂性[M]. 北京: 气象出版社, 2002: 152-162.
- [31] 冯新灵, 罗隆诚, 邱丽丽, 等. 青藏高原至中国东部年雨日变化趋势的分形研究[J]. 地理研究, 2007, 26(4): 835-843.
- [32] 王文圣, 丁 晶, 李跃清. 水文小波分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 152-162.
- [33] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术(第 2 版)[M]. 北京: 气象出版社, 2007: 106-114.
- [34] 熊 雷. 小波分析在流体方程中的应用研究[D]. 武汉: 武汉理工大学博士学位论文, 2007.
- [35] 唐启义, 冯明光. DPS 数据处理系统-实验设计、统计分析及模型优化[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 930-939.
- [36] 田连权. 蒋家沟流域的地貌与泥石流[J]. 山地研究, 1987(4): 203-212.
- [37] 吴积善, 康志成, 田连权, 等. 云南蒋家沟泥石流的观测研究[M]. 北京: 科学出版社, 1990: 26-28.
- [38] 倪化勇, 郑万模. 蒋家沟泥石流年输沙量的拓扑预测[J]. 泥沙研究, 2006(4): 39-42.
- [39] 杨 坤. 蒋家沟流域降水与泥石流活动的关系[D]. 北京: 中



国科学院研究生院硕士学位论文,2002.

利,2010(z1):195-196.

[40] 韩 平. 蒋家沟小流域综合治理现状调查及分析[J]. 陕西水

## CHARACTERISTICS AND EVOLUTION OF DEBRIS FLOW MOTION IN JIANGJIA GULLY IN YUNNAN PROVINCE

HUANG Ying, DING Ming-tao, MIAO Cheng, WANG Jun, ZHOU Peng

(School of Environment and Resources, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

**Abstract:** Based on the 1965—2005 observation data of Jiangjia Gully and the 1965—2005 daily precipitation data of Huize County in Yunnan Province, several movement elements of debris flow were detailed analyzed such as discharge, bulk density, sediment discharge and its development. Based on the Hurst index method, the Hurst index of debris flow sediment discharge was calculated to be 0.682, showing a strong positive sustainability and strong growth in future. The rainfall Hurst index was 0.605, showing a weaker growth trend in the future. At the same time, with the wavelet analysis method, annual sediment discharge was found to had several time dimensions of periods: 8 years, 14 years, and 24 years was the first three main cycles. Annual sediment discharge would decrease and the debris flow activity would be weaker in the coming 15 years. Within 15 years, the debris flow activity would have a shorter increase and the debris flow activity would be strong. Huge scale, strong hazard and different types of Jiangjia Gully debris flows were concluded in the research.

**Key words:** Jiangjia Gully; debris flow; motion characters; development