

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

王裕宜¹, 李昌志², 洪勇¹

(1. 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 中国科学院东川泥石流观测研究站, 四川 成都 610041;

2. 四川大学高速水力学国家重点实验室, 四川 成都 610041)

摘要: 应用云南东川蒋家沟泥石流输沙时序资料, 重构了高频率暴雨泥石流输沙年际变率的旋回现象, 即周期性, 并分析了其周期性变化的成因, 为暴雨泥石流灾害的预测研究探索了一条新路。

关键词: 泥石流; 输沙量; 年际变率; 旋回性

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

Study on the cyclic property of the annual sediment discharge variation of debris flows at Jiangjia Ravine, Yunnan, China

WANG Yu-yi¹, LI Chang-zhi², HONG Yong¹

(1. Chengdu Institute of Mountain Hazards & Environment, Dongchuan Debris Flow Observation and Research

Station, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2. State Key Hydraulics Laboratory of

High Speed Flow, Sichuan University, Chengdu 610064)

Abstract: This paper introduced the cyclic property of the annual sediment variation by rainstorm debris flows from the sequential data at Jiangjia Ravine, Yunnan, China and has analyzed the formation of the periodical variation. A new thinking to predict rainstorm debris flow hazards is provided.

Key words: debris flow; sediment discharge; annual variation; periodicity

泥石流是山区常见的自然灾害之一。我国是一个多山的国家, 泥石流分布广泛, 活动强烈, 危害严重, 尤其是随着山区经济的日益发展, 人类活动的日趋频繁, 泥石流灾害也在不断加剧。为了使泥石流灾害所造成的损失减轻到最小, 如能对未来作出年际间泥石流灾害发生概率的准确预测, 提前做好年际间的防御工作, 这也是一种重要的防灾减灾途径。泥石流灾害是主要受控于地质—地理环境的地球表面的一种突发性演变过程, 某些控制因素(如气候, 降水等)所具有的周期性^[1]必然会对泥石流灾害产生周期性影响。泥石流灾害与其它地质灾害一样^[2], 其周期性常常不是(或不全是)有严格数学函数关系的周期变化, 而是一种统计意义上的周期变化(或称“准周期性”)^[3]。本

收稿日期: 2000-04-03

基金项目: 中国科学院特别基金资助项目(99302); 国家自然科学基金资助项目(4971008)

作者简介: 王裕宜(1944-), 上海人, 研究员, 主要从事泥石流静力学、流变学和泥石流预测、预报研究。

文应用云南东川蒋家沟高频率暴雨泥石流输沙的时序(34年)资料,重构了该沟泥石流输沙年际变率的旋回现象(周期性),并分析其周期变化的成因,为揭示暴雨泥石流灾害活动周期性变化的基本规律,为暴雨泥石流中、短时间尺度的预测研究探索一条新路^[4,5]。

1 一维时间序列分析的基本原理

如果将蒋家沟泥石流从1965年到1998年的输沙量作为按时间顺序排列的离散的有序数列 $x(t_1), x(t_2), \dots, x(t_n)$, 并视该序列为平稳随机时间序列, 则可通过平稳时间序列的数学分析, 识别和提取其主要周期及其变化规律, 探求该时间序列的周期性和趋势性。一个平稳随机过程可用自相关函数和等权重滑动平均法进行分析和描述, 它可以从不同方面(域)说明同一个随机过程的统计性质^[6]。泥石流输沙时间序列可分解为两个部分, 即周期性和趋势性。

1.1 周期性

自相关函数可以用作识别时间序列可能存在隐含周期的方法之一。相关分析主要用来确定数字时间序列内部的线性相依性, 给出线性相依强弱的一个定量测度^[6]。其计算公式如下:

平均值

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N X_t \tag{1}$$

协方差函数

$$C_k = \frac{1}{N-K} \sum_{t=1}^{N-K} (X_t - \bar{X})(X_{t+k} - \bar{X}) \tag{2}$$

方差

$$S^2 = C_0 \tag{3}$$

自相关函数

$$\gamma_k = C_k / C_0 \tag{4}$$

式中, $K=0, 1, 2, \dots, m$, m 为最大相关延迟, 且 $m < N$, 本文取 $m = \frac{N}{2}$, 是为了估计完全谱密度。

1.2 趋势性

对于一个特定的时间序列而言, 趋势所反映的是从原序列中去除了随机性成分后的较长周期的变化, 一般表现为较平缓的曲线。在等时间间隔的情况下, 分离趋势最简单而又实用的方法是滑动平均法。本文采用等权重滑动平均:

$$x'_i = (x_{i-m} + \dots + x_{i-1} + x_i + x_{i+1} + \dots + x_{i+m}) / (2m + 1) \tag{5}$$

式中, x_i 为计算点(中心项), x'_i 为平滑后的值, $x_{i-m}, \dots, x_{i+1}, \dots, x_{i+m}$, 分别为距中心项前后 1, 2, \dots, m 点的值, m 为距中心项的最大项(点)数。

2 蒋家沟泥石流年际输沙的旋回性特征

自60年代中期对蒋家沟泥石流开展定位观测以来, 先后有东川矿务局、中科院兰州冰川冻土与沙漠所、中科院成都地理所和中科院东川泥石流观测研究站等单位在此进行长期连续观测, 获得了大量的数据和资料^[7]。表1列出了历年泥石流输沙量数据(没有注上“*”号的数据为正常的观测计算数据, 注上“*”号的数据为等差插点补充数据)^[8]。从图1可以清晰地看出, 蒋家沟泥石流年际输沙变率曲线出现了6个波峰、5个波谷, 且第6个波谷也正在形成之中的旋回特征。而且从1974

年起, 波峰之间的间隔也大致相同, 基本上以 6 a 为 1 个周期, 即 1974 ~ 1979 年、1980 ~ 1985 年、1986-1991 年、1992-1997 年。从 1965 年至 1998 年的 6 个峰值中, 还呈现出一个阶梯性的递增趋势, 即从 1965, 1974, 1979 年的 360 万 m^3 递增到 1985, 1991, 1997 年的 600 万 m^3 左右。

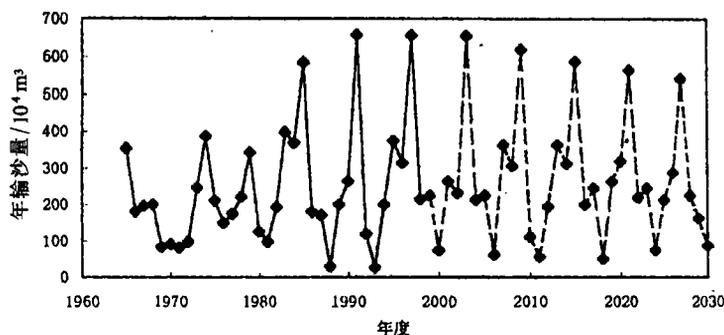


图 1 蒋家沟泥石流流年际输沙变化曲线

Fig.1 The annual transported sediment of debris flows at Jiangjia Ravine

表 1 蒋家沟泥石流流年输沙量

Table 1 The annual transported sediment of debris flows at Jiangjia Ravine

年度	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972
输沙量/ $10^4 m^3$	353	180	195	199*	85*	92*	82*	99*
年度	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980
输沙量/ $10^4 m^3$	246	387	211	150	174*	221*	342*	126*
年度	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988
输沙量/ $10^4 m^3$	99	192	398	369	585	180*	171	29
年度	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996
输沙量/ $10^4 m^3$	200	263	659	119	26	200	374	315
年度	1997	1998						
输沙量/ $10^4 m^3$	657	215						

2.1 时间周期性分析

利用蒋家沟泥石流流年输沙序列进行了自相关函数分析, 表 2 和图 2 分别给出了计算结果和散点图。从散点图上可以明显地看出, 自相关函数拟合曲线在 3, 9 时达到波谷, 在 6, 12 时达到波峰, 周期为 6。因此, 自相关函数的分析揭示了蒋家沟泥石流流年输沙量的时间序列有着 6a 为一周期的时空旋回特征。在图 1 中实线表示 6 个周期峰值年也与蒋家沟泥石流历史上发生堵江(1954, 1968 年)^[9] 和

表 2 自相关函数计算

Table 2 The calculation of self-correlative function

K	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00
r_K	0.19	-0.08	-0.40	-0.13	0.02	0.51	-0.02	-0.11
K	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	
r_K	-0.24	0.01	0.14	0.32	-0.02	-0.12	0.22	

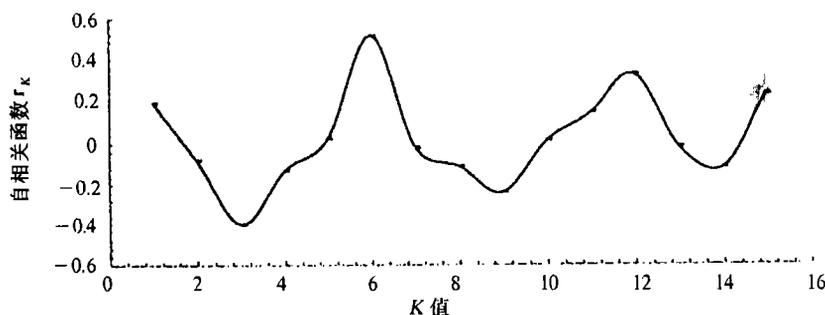


图 2 自相关函数散点图

Fig.2 The discrete points of auto-corrdation function

泛滥(1985, 1991, 1997)年造成严重危害的记录吻合。

2.2 滑动趋势分析

利用蒋家泥石流历年输沙序列, 分别进行了4点、6点、8点和10点等权重滑动平均的散点图及其拟合曲线的分析。由于原始数据中含有短周期和随机扰动的影响, 这些影响的存在对主周期的识别和判定有很强的干扰作用, 因此原始数列须经平滑(滤波)后才能使用^[6]。另一方面, 滑动平均项数 m 大小的选取要适当, 取得太大, 既会造成过平滑, 又会造成信息损失。经过以上各点平滑曲线的比较分析, 以6 a为周期的6点平滑曲线的趋势较为明显。图1中, 用虚线表示的变化趋势, 可以用来预测未来以6 a为周期的时间序列中蒋家沟泥石流输沙的概况。根据该虚线的变化趋势, 1999年5月预测1999年蒋家沟泥石流的输沙量为225万 m^3 左右(暴发次数为8~9次)。通过对1999年6~9月(泥石流暴发期)的实际观测资料进行汇总后, 得出当年泥石流的输沙量为234.51万 m^3 (共暴发9次泥石流), 预测的相对误差仅为3.84%。

3 蒋家沟泥石流输沙年际变率旋回的成因

陡峻的地形、丰富的松散固体物质和一定强度的降雨量是形成暴雨泥石流的三大必要条件。但在同一条泥石流沟中, 陡峻的地形和松散的固体物质来源在一定的尺度内, 可以认为是相对不变的(或者说变化极小), 这种情况下, 泥石流发生、发展的规模和频率主要受降雨的周期性^[1]、季节性^[10]和突发性等因素的制约。

3.1 蒋家沟流域降雨年际变率的特征

蒋家沟流域高频率暴雨泥石流形成的降雨条件主要受西南夏季风吹来的水汽流, 以及西南低涡、高原切变线和低槽等天气系统的控制和影响。而这些天气系统年际变率的准周期振荡, 通过地理位置和地形的调节以及大地形热力学和动力学效应的综合作用, 使得蒋家沟流域的降雨量表现出以6 a为周期的年际变率特征(图3)。

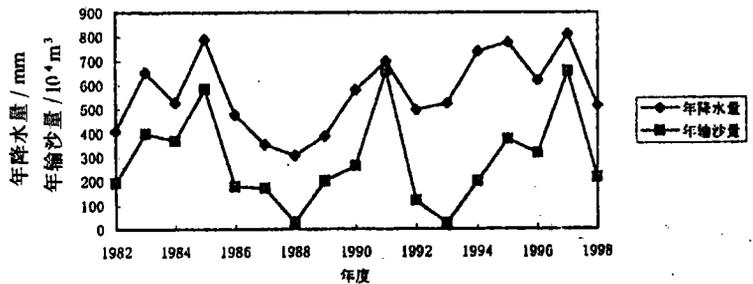


图3 蒋家沟泥石流历年年降水量和输沙量相关图

Fig.3 Relationship between sediment and rainfall for years at Jiangjia Ravine

蒋家沟流域(26°13'~26°17'N, 103°6'~103°13'E)位于云贵高原北部、乌蒙山脉西缘, 属滇东北高山峡谷区。鉴于其特殊的地理位置, 形成了本流域独具特色的气候条件。在雨季(5~10月), 本流域对流层上空受热带东风带、副热带西风带和西南季风影响^[10]。特别是西南季风, 影响十分强烈, 西南季风一直向北推进到35°N左右, 其厚度达7km高度。它到来的早晚及强弱变化, 对本流域雨季开始的早迟及降雨量的变化有着非常密切的关系。由于受青藏高原大地形的影响, 一支从孟加拉湾上高原来的西南季风气流, 与高原北侧的偏北气流形成了一条横贯青藏高原的切变线, 当遇到北方冷高压南移, 切变线推移到川滇交界处(蒋家沟流域在川滇交界处附近), 其附近会产生强对流降水天气。据从6~8月历年静止卫星云图(GMS)分析, 在25~30°N, 100~105°E范围内, 夏季常常会产生中尺度对流云团, 这些云团生命史很短, 但会产生局地强对流降水天气^[10]。本流域不仅处于乌蒙山西坡, 而且呈东西走向, 东高(最高点为3269m)西低(最低点为1042m), 正对着印度洋夏季风的前进方向, 为迎风多雨区。同时, 对本流域影响较大的夏季天气系统有西南低涡、高原切变线和低槽等, 这些天气系统出现的强弱程度、叠加效应和时间差异所产生的准周期性振荡, 控制和影响本流域降雨量的年际变率。

本流域气候上的特点是干、湿季分明, 垂直分带明显。雨季降水量约占全年总降水量的85%以上, 且雨季多暴雨和阵雨, 暴雨和阵雨约占全年总降水量的一半以上^[11]。蒋家沟流域的暴雨中心出

现在 2500mm 至 3000mm 地带, 与泥石流形成区同位。据统计, 蒋家沟因雷阵雨激发的泥石流暴发次数约占泥石流暴发总次数的 60% 以上^[1]。而丰水年(1997 年)的降雨量相当于枯水年(1988 年)降雨量的 2.64 倍, 相对应的 1997 年泥石流输沙量是 1988 年的 22.6 倍。

从图 3 曲线的分布趋势来看, 蒋家沟年际降雨量 6 点等权重滑动平均所得的年际变率序列, 与蒋家沟泥石流年际输沙量 6 点等权重滑动平均所得年际变率序列基本相似, 成对应关系。这说明蒋家沟流域降雨量的年际变率直接制约和控制了该沟泥石流输沙量的年际变率。图 3 中, 1989~1988 年降雨资料为该流域内 6 个雨量点资料的平均值, 1982~1988 年的降雨资料为 3 个雨量点资料的平均值(其中缺失部分用等差插点补充)。

3.2 蒋家沟流域滑坡活动和坡面侵蚀对泥石流输沙年际变率的影响

蒋家沟流域滑坡成群、成片地分布于干、支沟两岸与分水岭地带, 滑坡临空面高, 地下水充足, 活动性强, 成为蒋家沟泥石流补给的主要源地之一(约占泥石流土源面积的 62%)^[2]。滑坡体年均位移量可达 11.6m, 年补给泥石流的土体量为 153 万 m³, 占蒋家沟泥石流年均输沙量(240 万 m³)的 64%^[2]。由于滑坡活动受自重应力和水动力的控制, 因此它具有连续性、季节活动性和年际周期活动性的特征^①。其连续性是受自重应力的影响, 而季节活动性和年际周期活动性与水动力条件有关。表 3 是选取 5 个典型滑坡样本从 1983 年 5 月到 1985 年 4 月的观测资料^②, 分别将 5 个典型滑坡在雨季和旱季的活动土方量对应于同时期的降雨量进行相关回归分析。其结果表明, 这 5 组滑坡活动土方量与降雨量之间有着较好的对应相关特性, 相关系数都大于 85.52%, 最佳相关系数高达 97.54%; 说明蒋家沟流域滑坡的活动随降雨量的变更而变化。以莽蓬子滑坡为例, 1983 年 5 月~1984 年 4 月, 该滑坡补给泥石流的总土方量为 19.87 万 m³, 平均每月为 1.7 万 m³; 而 1983 年 5 月至 10 月的雨季, 该滑坡补给泥石流的土方量(15.4 万 m³)是旱季土方量(4.47 万 m³)的 3.45 倍。

蒋家沟流域年坡面侵蚀量为 66.4 万 m³, 占蒋家沟泥石流年输沙量的 27.7%。根据本流域坡面迳流量观测, 旱季(当年 11 月至来年 4 月)坡面无迳流^③。而在雨季观测中, 7~8 月的坡面迳流量占全年坡面迳流量的 64.78%, 其中裸露地、坡耕地、坡林地和坡牧地的坡面迳流量分别占全年迳流量的 71.4%, 19.3%, 0.6% 和 8.7%。可见下垫面的状况对坡面迳流影响极大, 裸露地迳流量是坡林地的 119 倍。而且降水强度与土壤侵蚀量成正比, 裸地的侵蚀斜率是草灌地的 23 倍(式(6)和式(7)对比)。

$$\text{裸地: } G = 13.7 + 346.67\bar{R}_i \quad (6)$$

$$\text{草灌地: } G = -0.25 + 15\bar{R}_i \quad (7)$$

式中, G 为土壤侵蚀量 kg/100m², \bar{R}_i 为平均降雨强度(mm/min)(该观测资料由东川水保站提供)。

简言之, 蒋家沟流域的降雨量控制了滑坡的活动土方量和坡面的侵蚀量, 而滑坡的活动土方量和坡面侵蚀量又直接控制了泥石流体的固体物质补给量(蒋家沟流域滑坡年均活动土方量和坡面年均侵蚀量约占该沟泥石流年均输沙量的 90% 以上)。

表 3 蒋家沟滑坡补给泥石流土方量随季节变化观测资料

Table 3 The Observational data of debris flow material supplied by landslides with season change at Jiangjia Ravine

降水量/mm					总土方量 /m ³	回归相关系数		相关系数 Y
	522.2	130.6	422.8	105.7		A	B	
样本	雨季'	旱季'	雨季"	旱季"				
1 莽蓬子	153991.1	44694.1	86393.2	13372	298450.4	-6768.07	275.65	0.9467
2 银代坪	27346.6	13092.6	14992.1	2279.7	57711	1951.36	42.25	0.8588
3 大转(左)	92331	27414.9	43318.8	15613.7	178678.4	1795.56	145.18	0.8966
4 包谷地	131454.3	58037.7	98218.7	51372.9	339083.6	32757.1	176.12	0.9754
5 大转(右)	55170.9	22166.3	26009.1	11289.6	114635.9	5994.57	76.74	0.8552

注: 雨季': 83 年 5 月~10 月, 旱季': 83 年 11 月~84 年 4 月, 雨季": 84 年 5 月~10 月, 旱季": 84 年 11 月~85 年 4 月。

① 胡发德. 蒋家沟流域源地滑坡活动特征. 中科院东川泥石流观测研究站 1990 年年报, 46-49.

4 结论

综上所述,本流域降雨量以6a为周期的年际变率旋回性特征,以及受降水控制和影响的滑坡活动与坡面侵蚀年际振荡的叠加,构成了蒋家沟高频率暴雨泥石流输沙量也以6a为周期的年际变率旋回特征。这种年际变率的旋回性特征为暴雨泥石流灾害的预测研究开辟了一条新路。

致谢: 本文所用34年来泥石流的观测资料,来源于同仁们两代人在野外长期艰苦的定位观测,保证了资料的连续性和精度,在此一并表示感谢。

参考文献:

- [1] 秦剑. 云南农业气象灾害分析[J]. 自然灾害学报, 1998, 7(3):139-145.
- [2] 获尹靖. 地质灾害的中短期旋回性研究[J]. 云南滑坡泥石流防治研究, 1994, 8:62-82.
- [3] Benda L E, Predicating depositing of debris flow in mountain channels[J]. J. of Can Geotech, 1990, 27(4):409-415.
- [4] Brand E M. Landslide in Hong Kong caused by the severe rainfall event of 8 May 1992[J]. J. of Land-slide News, 1993, (7): 9-11.
- [5] Hiraho M. Prediction of debris flow for warning and evaluation[A]. Inter. Workshop on Debris flow[C]. Kagoshima, Japan, 1993, 1-10.
- [6] 中国科学院计算中心概率统计组. 概率统计计算[M]. 北京: 科学出版社, 1997. 5-75.
- [7] 张军, 熊刚, 等. 云南蒋家沟泥石流运动资料集[M]. 成都: 科学出版社, 1998.
- [8] 邓勃. 分析测试数据的统计处理方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995. 26-28.
- [9] 吴积善, 康志成, 等. 云南蒋家沟泥石流的观测研究. 北京: 科学出版社, 1990. 4-51.
- [10] 王瑞元, 张根娟, 等. 暴雨泥石流预报专家系统研究[A]. 云南省滑坡泥石流重点区域预测预报与评价方法[C]. 昆明: 云南科技出版社, 1995. 3-5.
- [11] 陈景武, 汪凯等. 长江上游降雨特征与泥石流[A]. 泥石流观测与研究 (1)[C]. 成都: 科学出版社, 1996. 116-119.
- [12] 胡发德, 田连权. 蒋家沟泥石流源地滑坡类型初探[A]. 泥石流观测与研究 (1)[C]. 成都: 科学出版社, 1996. 64-66.