

# 基于功率谱分析的蒋家沟泥石流侵蚀输沙量准周期的探讨

田冰<sup>1,2</sup>, 王裕宜<sup>3</sup>

(1. 河北师范大学 资源与环境科学学院, 石家庄 050024; 2. 河北省环境演变与生态建设省级重点实验室, 石家庄 050024; 3. 中国科学院 山地灾害与地表过程重点实验室, 成都 610041)

**摘要:** 泥石流侵蚀输沙量不仅反映了泥石流形成区地理环境特征和泥石流搬运能力, 也反映了泥石流规模和泥石流搬运泥沙等固体物质在泥石流堆积区造成的严重程度。本文以泥石流灾害典型区长江上游蒋家沟流域 1965—2007 年的泥石流观测资料为基础, 利用功率谱方法分析了该流域泥石流侵蚀输沙量的周期变化, 发现其存在 5~7 a 的显著震荡周期, 这种周期的形成主要与该流域 5~6 a 的年降水量周期震荡以及受降水控制和影响的滑坡活动与坡面侵蚀影响相关。

**关键词:** 功率谱分析; 泥石流; 侵蚀输沙量; 准周期

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2012)04-0244-03

## Power Spectral Analysis on Periodicity of Sediment Transport in Debris Flow in Jiangjiagou Watershed

TIAN Bing<sup>1,2</sup>, WANG Yu-yi<sup>3</sup>

(1. College of Resources & Environment Science, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China;

2. Hebei Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction, Shijiazhuang 050024, China;

3. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Process, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** The sediment transport not only reflects the geography environment of the formative region of debris flow and the transport capacity but also indicates the accumulating extent of solid matter in accumulation zone of debris flow and the magnitude of debris flow scale. In this paper, based on the observation data for debris flow from 1965 to 2007 in Jiangjiagou watershed, Yunnan Province, the periodicity of transporting sediment in debris flow was analyzed by using the power spectral method. Results showed that transporting sediment of debris flow present the periodicity from 5 years to 7 years. The reason maybe lied in rainfall periodicity from 5 years to 6 years in this basin and the sloping erosion and landslide caused by rainfall.

**Key words:** power spectral analysis; debris flow; sediment transport; periodicity

泥石流是山坡松散物质在水力和重力条件下发生的地貌动力过程<sup>[1]</sup>, 能在极短的时间内把巨量泥沙输入河道, 导致河道急剧变化, 因而泥石流成为江河中上游最剧烈、最复杂、最严重的输沙方式之一。泥石流输沙量不仅反映了泥石流形成区地理环境特征和泥石流搬运能力, 也反映了泥石流规模和泥石流搬运泥沙等固体物质在泥石流堆积区造成的严重程度。

泥石流的发生需要松散的物质积累, 必要的地形条件和充分的水分条件<sup>[2]</sup>, 其中坡度条件相对稳定, 松散物质的积累是一个缓慢而平稳的过程, 而水源条件是激发暴雨型泥石流最活跃的因素, 受到气候活动

周期性的影响, 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, 其周期性常常不是(或不全是)具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)<sup>[3-4]</sup>。而从大量野外勘查记录也可看出, 泥石流暴发既不是周期性的, 也不是纯随机性事件, 而是具有准周期性<sup>[5]</sup>, 因此泥石流输沙量准周期性的研究对于山区防灾减灾、山区建设和土地规划、土地利用都有非常重要的意义。

本文采用功率谱的分析方法, 利用云南蒋家沟泥石流 1965—2007 年的输沙资料对泥石流侵蚀输沙量

进行准周期性分析,尝试寻找当地泥石流输沙的周期规律,以便为当地的生产实践活动提供理论指导和依据。

### 1 研究方法

功率谱是一种应用极为广泛的分析周期的方法,是以傅里叶变换为基础的频域分析方法,其意义是将时间序列的总能量分解到不同频率上的分量,根据不同频率的波的方差贡献诊断出序列的主要周期,从而确定出周期的主要频率,即序列隐含的显著周期。根据功率谱密度与自相关函数互为傅立叶变换的性质,可以通过自相关函数间接进行功率谱估计<sup>[6-7]</sup>。其计算方法为:

(1) 样本落后自相关系数:

$$r(j) = \frac{1}{n-j} \sum_{i=1}^{n-j} \left( \frac{x_i - \bar{x}}{s} \right) \left( \frac{x_{i+j} - \bar{x}}{s} \right) \quad (0 \leq j \leq m) \tag{1}$$

式中: $m$ ——最大滞后时间长度。

(2) 粗谱估计值:

$$\hat{s}_k = \frac{1}{m} \left[ r(0) + 2 \sum_{j=1}^{m-1} r(j) \cos \frac{k\pi j}{m} + r(m) \cos k\pi \right] \tag{2}$$

$(k=0, 1, 2, \dots, m)$

(3) 为了消除粗谱估计的抽样误差,采用 Haning 平滑系数对粗谱估计作平滑处理:

$$\begin{aligned} s_0 &= 0.5\hat{s}_0 + 0.5\hat{s}_1 \\ s_k &= 0.25\hat{s}_{k-1} + 0.5\hat{s}_k + 0.25\hat{s}_{k+1} \\ s_m &= 0.5\hat{s}_{m-1} + 0.5\hat{s}_m \end{aligned} \tag{3}$$

(4) 为确定谱值,再对谱进行显著性检验。为了确定谱值在哪一波段最突出,并了解该谱值的统计意义,给定一个标准过程谱进行比较。根据序列是否具有持续性,可采用红噪声标准谱和白噪声标准谱,在给定的显著性水平下进行显著性检验。

### 2 蒋家沟泥石流侵蚀输沙特征分析及输沙量准周期探讨

蒋家沟是我国西南山区一条典型的暴雨泥石流沟,流域面积 48.6 km<sup>2</sup>,主沟长 13.9 km,蒋家沟每年雨季(5—10 月)发生泥石流就有 10 余次,每一次泥石流又由几十阵至上百阵粘性泥石流阵性流组成,一次历时长达几小时,甚至数十小时,流量大,流体粘稠。

#### 2.1 蒋家沟泥石流侵蚀输沙基本特点

蒋家沟泥石流具有高强度的输沙能力,根据蒋家沟泥石流观测研究站 1965—2007 年的正常观测资料<sup>[8-9]</sup>,多年平均输沙量 211.34 万 m<sup>3</sup>,按密度 2.65 t/m<sup>3</sup> 计,平均每年通过观测站观测断面输入小江的

泥沙为 5.60×10<sup>6</sup> t,平均输沙模数 115 226 t/(km<sup>2</sup>·a)。据小江水文站资料,小江年输沙模数为 2 958 t/(km<sup>2</sup>·a),仅为蒋家沟输沙模数的 2.56%。另外其输沙还具有高集中性的特点,与一般水流显著不同,泥石流输沙通过雨季的几场或 10 多场泥石流就集中完成。

#### 2.2 蒋家沟泥石流侵蚀输沙年际变化特点

通过对蒋家沟泥石流观测站 1965—2007 年的输沙资料距平分析可知(图 1),蒋家沟流域泥石流输沙量在 1969—1972 年呈现减少的趋势,从 1973 年开始泥石流规模开始增大,1976 年有一个小的波峰,之后又有一个小的波动,1983—1985 年泥石流输沙量迅速增加,之后又缓慢回落,进入 90 年代后,输沙量一直处于增加态势,这种状态一直保持到 2001 年,之后该流域泥石流输沙量开始减少,从图 1 可以看出,该流域泥石流的侵蚀输沙量呈现出波动变化的趋势。

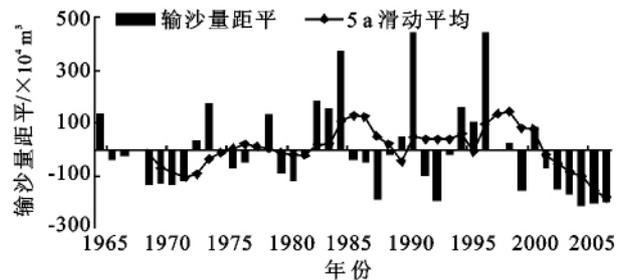


图 1 蒋家沟流域年侵蚀输沙量距平及 5 a 滑动变化

#### 2.3 蒋家沟泥石流侵蚀输沙量准周期探讨

将蒋家沟流域 1965—2007 年的输沙量资料代入程序,其样本容量  $n=43$ ,最大滞后长度  $m=11$  a,进行计算。然后将功率谱估计值和标准谱绘成曲线图,根据绘出的曲线确定序列的周期。比较分析功率谱估计曲线的峰点是否超过标准谱,若超过则说明峰点所对应的周期是显著的。

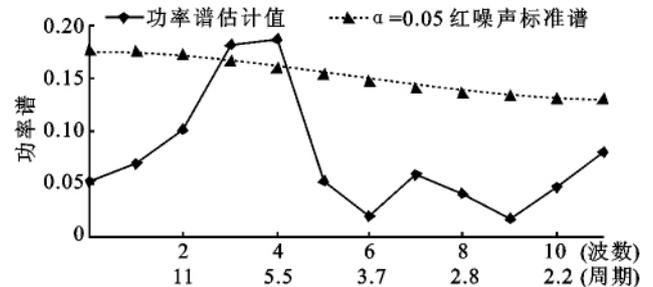


图 2 蒋家沟流域泥石流输沙量功率谱

(图中横坐标周期的单位为年)

图 2 是对蒋家沟流域 1965—2007 年逐年输沙量序列作的功率谱估计。在波数 3—4 附近(对应周期为 5.5~7.3 a)的功率谱估计值为一峰值且超过标准谱并通过  $\alpha=0.05$  的显著性检验(图 2),表明蒋家沟

流域泥石流存在 5~7 a 的显著周期震荡,与王裕宜等<sup>[3]</sup>的研究结果基本相似。

从蒋家沟泥石流年侵蚀输沙量变化图中(图 1),可以清晰地看出,1965—2007 年,存在 6 个明显的输沙高峰年:1974 年、1979 年、1985 年、1991 年、1997 年和 2001 年,6 个输沙低谷年:1971 年、1976 年、1981 年、1988 年、1993 年和 2000 年。而且自 1974 年后,波峰之间的间隔也大致相同,基本上是以 6 a 为一个周期,可见蒋家沟泥石流输沙量确实存在着 5~7 a 的准周期。6 个周期峰值年也与蒋家沟泥石流历史上发生堵江和泛滥造成严重灾害的记录吻合。

#### 2.4 蒋家沟流域降水量对泥石流输沙量周期性的影响分析

在松散的堆积物、陡峻地形和水等泥石流形成的主要条件中,水不仅是泥石流的重要组成部分,更是激发泥石流的直接条件,而对于蒋家沟暴雨泥石流来说,降水是其主要的水源条件。降水不仅触发泥石流,而且还控制着该地区滑坡地的活动土方量和坡面侵蚀量,这些又直接控制了泥石流流体的固体物质补给量,因此蒋家沟流域的降水量的准周期特性对泥石流输沙量的周期性有着重要影响。

蒋家沟流域位于云贵高原北部,乌蒙山脉西缘,属滇东北高山峡谷区。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。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 7 km 高度,它到来的早晚及强弱变化与本流域雨季开始的早晚及降雨量的变化有着非常密切的关系。由于还受到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<sup>[10]</sup>。

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也表现出一定的周期性。

进一步对蒋家沟流域 1982—2004 年降水资料进行功率谱分析,所选最大滞后长度  $m=8$  年,发现在波数等于 3 附近有一波谱曲线峰值(图 3),且谱值较为接近置信限,因此可以认为该流域降水存在 5~6 a

的周期震荡。这与泥石流输沙量的准周期性表现出一致性。

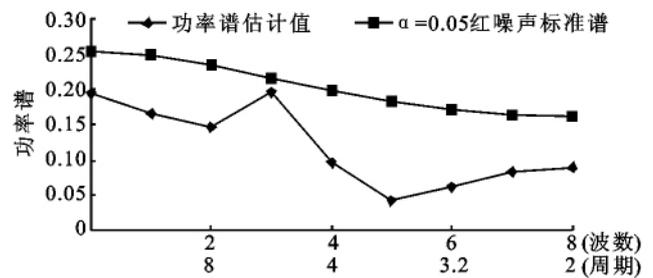


图 3 蒋家沟流域年降水功率谱

(图中横坐标周期的单位为年)

该流域的泥石流输沙量与降水量表现出很好的对应关系(图 4),从它们的分布趋势来看,蒋家沟年际降雨量变率序列变化的峰—谷与蒋家沟泥石流年际输沙量年际变率序列变化的峰—谷基本相对应。年降水量多的年份,输沙量相对也大,降水量少的年份输沙量也较少,例如丰水年(1985 年)的降雨量相当于枯水年(1988 年)的 2.57 倍,相对应的 1985 年泥石流输沙量是 1988 年的 20.2 倍。所以说,蒋家沟流域降水量以 5~6 a 的周期震荡以及受降水控制和影响的滑坡活动与坡面侵蚀影响,构成了蒋家沟流域暴雨泥石流输沙量 5~7 a 周期性。

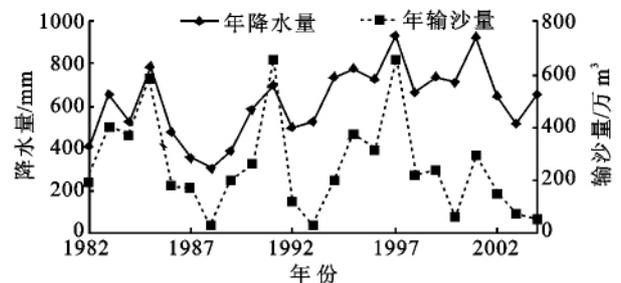


图 4 蒋家沟流域年降水量与泥石流输沙量的对应关系

### 3 结论

本文利用云南蒋家沟流域 1965—2007 年的泥石流观测数据,采用功率谱方法分析了该流域泥石流输沙量的准周期性并探讨了其影响因素,结果表明蒋家沟流域泥石流存在 5~7 a 的显著周期震荡,而该周期震荡的存在与流域内 5~6 a 的年降水量周期性及受降水控制和影响的滑坡活动与坡面侵蚀影响有关。

参考文献:

- [1] Beaty C B. Debris flow, alluvial fans and a revitalized catastrophism[J]. Z Geomorph N F, 1974, 21(S): 39-51.
- [2] 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.

(下转第 251 页)

(3) 7号、8号试验地水质分别属于Ⅳ、Ⅲ类水,都受到了不同程度的污染,他们的共同点是混交林种中都有五角枫,所以五角枫不适于改善密云库区的水质问题,且8号试验地的橡栎成活率极低,并非适地适树树种。

(4) 2号试验地的水质达到了Ⅰ类水,在所有试验地中改善水质的效果最好,且2号试验地的混交树种油松和黄栌平均成活率较高,均达到了90%以上。

本文以密云水库示范区内10个径流小区所采集的地表水为样本进行水质分析,找到了密云库区改善水质最佳的水源涵养林造林模式(油松+黄栌,混交比例6:4),为本地区的水质保护规划和控制措施实施提供了理论依据。据此建议密云太师屯镇政府可以以2号试验地的造林模式为样本进行大范围栽植,这对于保护密云水库流域水质、发展当地经济乃至改善北京饮用水水质都具有重要的现实意义和应用价值。

#### 参考文献:

- [1] 于志民,王礼先. 水源涵养林效益研究[M]. 北京:中国林业出版社,1999.
- [2] 韩光辉,王林弟. 新时期北京水资源问题研究[J]. 北京大学学报,2000,37(6):118-126.
- [3] 欧阳学军,周国逸. 鼎湖山森林地表水水质状况分析[J]. 生态学报,2002,22(9):1373-1379.
- [4] 仇雁翎,陈玲. 饮用水水质监测与分析[M]. 北京:化学工业出版社,2005.
- [5] 张旭臣. 水质分级评价的模糊数学方法研究[J]. 水文,1998(6):24-27.
- [6] 廖为权,姜齐. 水质评价的浓度级数法[J]. 水文,1992(3):25-32.
- [7] 方菊,湛贻胜,童祯恭. 综合指数法在饮用水水质评价中的应用[J]. 给水排水工程,2011,29(1):63-65.
- [8] 付雁鹏. 模糊数学在水质评价中的应用[M]. 武汉:华中工学院出版社,1987.
- [9] 马建华,季凡. 水质评价的模糊概率综合评价法[J]. 水文,1994(3):21-25.
- [10] 鄢贵权. 模糊矩阵复合运算法在水质评价中的应用[J]. 贵州工业大学学报,1992,21(2):30-36.
- [11] 邓聚龙. 灰色系统基本方法[M]. 武汉:华中工学院出版社,1987.
- [12] 沈珍瑶,谢彤芳. 一种改进的灰关联分析方法及其在水环境质量评价中的应用[J]. 水文,1997(3):13-15.
- [3] 王裕宜,李昌志,洪勇. 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] 程根伟. 暴雨泥石流暴发的准周期性探讨[J]. 自然灾害学报,2002,11(4):49-54.
- [5] Mann C J, Hunter R L. Probabilities of geologic events and processes in natural hazards[J]. Z Geomorph N F, 1988, 67(S):39-52.
- [6] 黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法[M]. 3版. 北京:气象出版社,2004:304-311.
- [7] 黄嘉佑. 气候状态变化的持续性和周期性分析[J]. 气象,1995,21(8):53-57.
- [8] 康志成,崔鹏,韦方强,等. 中国科学院东川泥石流观测研究站观测实验资料集(1961—1984)[M]. 北京:科学出版社,2006.
- [9] 康志成,崔鹏,韦方强,等. 中国科学院东川泥石流观测研究站观测实验资料集(1995—2000)[M]. 北京:科学出版社,2007.
- [10] 王瑞元,张根娟. 暴雨泥石流预报专家系统研究[M]//唐川. 云南省滑坡泥石流重点区域预测预报与评价方法研究. 昆明:云南科技出版社,1995:3-5.

(上接第246页)