

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

林 伟¹, 谢 洪², 张金山²

(1. 西南电力设计院, 四川 成都 610021; 2. 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: 基于经验模态分解(EMD)方法,对云南东川蒋家沟泥石流1965年至2004年40年的年输沙量时间序列进行多时间尺度分析,该时间序列分解成3个本征模函数(IMF)分量和趋势项(Res)分量。分析表明:蒋家沟泥石流的年输沙量存在多尺度的周期性波动,分别是2~4 a、6~10 a和17~21 a的准周期。通过对各IMF分量和Res趋势项分析发现,自1985年之后,波动的振幅开始变大,表明蒋家沟泥石流的年输沙量变化很大。降雨对蒋家沟泥石流的年输沙量及周期性波动有一定程度的影响。人类活动改变环境的同时,也为蒋家沟泥石流提供固体物质来源,这使得蒋家沟泥石流的年输沙量周期性波动变得更加复杂。

关键词: 泥石流; 年输沙量; 经验模态分解(EMD); 本征模函数(IMF)

中图分类号: P642.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-8527(2013)03-0733-05

Multi-time Scale Analysis of Annual Sediment Yield of the Jiangjiagou Debris Flow in Dongchuan of Yunnan Based on Empirical Model Decomposition

LIN Wei¹, XIE Hong², ZHANG Jin-shan²

(1. Southwest Electric Power Design Institute, Chengdu, Sichuan 610021, China;

2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Conservancy, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: Empirical Model Decomposition (EMD) was used to study the multi-time scale analysis for the time series of the annual sediment yield of the Jiangjiagou debris flow between 1965 and 2004 in Dongchuan, Yunnan Province. The result shows that this annual sediment yield can be decomposed into three IMF components and one Res trend component. The analysis shows that the annual sediment yield of the Jiangjiagou debris flow reveals cyclical fluctuations, and there are fluctuations at 2-4 years, 6-10 years and 17-21 years time scale. Through the analysis of these components, we found that the amplitude of the fluctuations became larger after 1985, which indicated that the annual sediment yield of the Jiangjiagou debris flow varied greatly. And the rainfall affects the annual sediment yield of the Jiangjiagou debris flow and its cyclical fluctuations to some degree. The human activities have changed the local environment, providing the solid material for Jiangjiagou debris flow, thus make the cyclical fluctuations of the annual sediment discharge of debris flow in Jiangjiagou become more complex.

Key words: debris flow; annual sediment yield; empirical model decomposition(EMD); intrinsic mode function(IMF)

收稿日期: 2012-08-27; 改回日期: 2012-11-26; 责任编辑: 潘令枝。

基金项目: 国家自然科学基金项目(40971014)。

作者简介: 林 伟,男,硕士,1987年出生,水文地质工程地质专业,主要从事电力勘测设计工作。

Email: linwei0709@gmail.com。

通信作者: 谢 洪,男,研究员,1959年出生,水文地质工程地质专业,主要从事泥石流等山地灾害防治研究。

Email: xhong@imde.ac.cn。

0 引言

我国地形以山地为主,在山区泥石流广泛分布,每年都遭受严重的泥石流灾害。泥石流不仅是一种动力地貌过程,也是一种地质灾害。云南省昆明市东川区蒋家沟由于每年都会暴发十几次至几十次泥石流^[1],成为中国乃至全世界研究泥石流的一个良好平台。自从20世纪60年代对蒋家沟泥石流开展定位观测以来,学者们获取了大量的泥石流原型观测数据和资料^[2]。利用这些数据和资料,研究蒋家沟泥石流年输沙量的历史变化趋势,掌握其变化规律和主要影响因素,对预测和防治泥石流灾害具有实际意义。

到目前为止,已有众多学者对蒋家沟泥石流年输沙量的变化规律和预测进行过研究,如王裕宜、李昌志等人分别对蒋家沟泥石流输沙量年际变率的旋回性和预测模型进行了研究^[3-4],刘希林分别用灰色理论和回归分析方法对蒋家沟泥石流年输沙量进行了预测^[5]。他们的研究加深了人们对泥石流输沙特征的认识。但由于泥石流年输沙量受到多种因素的影响,因此它应该是一种多时间尺度、多层次的时间变化序列。

经验模态分解(Empirical Model Decomposition, EMD)方法是当前提取数据序列趋势的最好方法,它可以快速真实地提取一个数据系列的变化趋势^[6]。本文利用EMD对蒋家沟自1965年到2004年的泥石流年输沙量序列进行分析,对蒋家沟泥石流年输沙量的波动特征和变化趋势进行多尺度分析,期望通过这些分析能够了解蒋家沟泥石流输沙量变化的周期性,以便更深入掌握蒋家沟泥石流输沙量变化的规律和影响因素,为预测泥石流输沙量和掌握泥石流灾变规律提供一个有效的理论工具。

1 EMD 基本理论及方法

Huang 等人^[6]认为任何信号都是由若干本征模函数(Intrinsic Mode Function, IMF)组成,任何时候一个信号都可以包含若干个本征模函数,如果IMF之间相互重叠,便形成复合信号。EMD分解的目的就是为了获取IMF,每个IMF分量具有如下特征:(1)IMF函数在整个时间范围内,局部极值点和过零点的数目必须相等,或最多相差一个;(2)在任意时刻,局部最大值的包络(上包络线)和局部最小值的包络(下包络线)平均必须

为零。

EMD分解过程描述如下:

第1步,找出要分析的时间序列 $X(t)$ 所有局部极大值,并用3次样条插值函数连成上包络线 $a_1(t)$ 。同理,利用3次样条插值函数连接所有局部极小值构成下包络线 $a_2(t)$ 。

第2步,求出上、下包络线的平均值 m_{11} ,

$$m_{11} = \frac{a_1(t) + a_2(t)}{2} \quad (1)$$

令 $h_{11}(t) = X(t) - m_{11}$ 。

第3步,重复第1步和第2步,直到 $h_{1k}(t) = h_{1(k-1)}(t) - m_{1k}$ 满足停止准则。其中 k 指的是对数据进行第 k 次筛选。

第4步,令 $c_1(t) = h_{1k}(t)$,则 $c_1(t)$ 即为从 $X(t)$ 中获得的第1个IMF。

第5步,令 $r_1(t) = X(t) - c_1(t)$,对 $r_1(t)$ 重复以上几步,则有

$$r_2(t) = r_1(t) - c_2(t) \quad (2)$$

.....

$$r_n(t) = r_{n-1}(t) - c_n(t) \quad (3)$$

当余项 $r_n(t)$ 为一个单调函数或者为单个极值点函数时,分解过程结束。这样,时间序列被分解成几个IMF和称为余项或趋势项(Res)的 $r_n(t)$ 的组合,

$$X(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t) \quad (4)$$

对于第3步的停止准则,采用Rilling提出的停止准则。边界处理方法采用的是镜像对称延伸方法^[7],该方法比较好地解决了边界对于EMD分解过程中的上冲和下冲现象。

EMD分解过程就是得到各个IMF分量,这几个IMF分别是不同尺度的从原始时间序列分离出来而最后得到的趋势分量 $r_n(t)$ 。因此EMD分解实际上就将原始数据序列分解为各种不同特征波动的叠加。每一个IMF分量既可以是线性的也可以是非线性的,且每个IMF分量都有实际的物理背景相对应。

2 数据来源

蒋家沟泥石流观测站从1965年开始系统监测泥石流,到目前已有大量的数据记录^[2]。如表1所示,1965—1998年的蒋家沟泥石流年输沙量数据来自参考文献[3],1999—2004年的数据来自参考文献[8];表中加“*”的数据为缺乏观测资

料而通过插值获得的。

表 1 蒋家沟泥石流年输沙量(10^4m^3)

Table 1 The annual sediment yield of the Jiangjiagou debris flow(10^4m^3)

年份	输沙量	年份	输沙量	年份	输沙量	年份	输沙量
1965	353	1975	211	1985	585	1995	374
1966	180	1976	150	1986	180*	1996	315
1967	195	1977	174*	1987	171	1997	657
1968	199*	1978	221*	1988	29	1998	215
1969	85*	1979	342*	1989	200	1999	235
1970	92*	1980	126*	1990	263	2000	61
1971	82*	1981	99*	1991	659	2001	288
1972	99*	1982	192*	1992	119	2002	149
1973	246	1983	398*	1993	26	2003	69
1974	387	1984	369	1994	200	2004	50

注: * 数据为插值获得。

根据表 1 中数据绘制了蒋家沟泥石流年输沙量时间变化曲线,如图 1 所示。从图 1 可以看出,虽然从 1965 年至 2004 年每年的输沙量不同,且变化甚大,但是可以看出这种波动具有一定的周期性,在一定的时间范围内交替出现了明显的波峰和波谷。如 1985 年、1991 年和 1997 年的年输沙量都达到了历史峰值,分别为 $585 \times 10^4 \text{m}^3$ 、 $659 \times 10^4 \text{m}^3$ 和 $657 \times 10^4 \text{m}^3$ 。同样,1988 年和 1993 年的年输沙量则是历史上最小值,分别是 $29 \times 10^4 \text{m}^3$ 和 $26 \times 10^4 \text{m}^3$ 。可见,这种波动的幅度是非常大的。利用 EMD 分解可以很好地分析出该种变化存在一定的周期性,使我们能够掌握蒋家沟泥石流年输沙量的变化规律,可以进一步地分析和预测蒋家沟泥石流的暴发情况及强度。

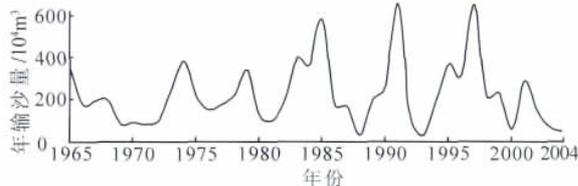


图 1 蒋家沟泥石流年输沙量时间变化曲线

Fig. 1 The time curve of the annual sediment yield of the Jiangjiagou debris flow

3 年输沙量的 EMD 分解

对 1965—2004 年的蒋家沟泥石流年输沙量进行 EMD 分解,得到如图 2 所示的各 IMF 分量及趋势分量 Res(图 2)。

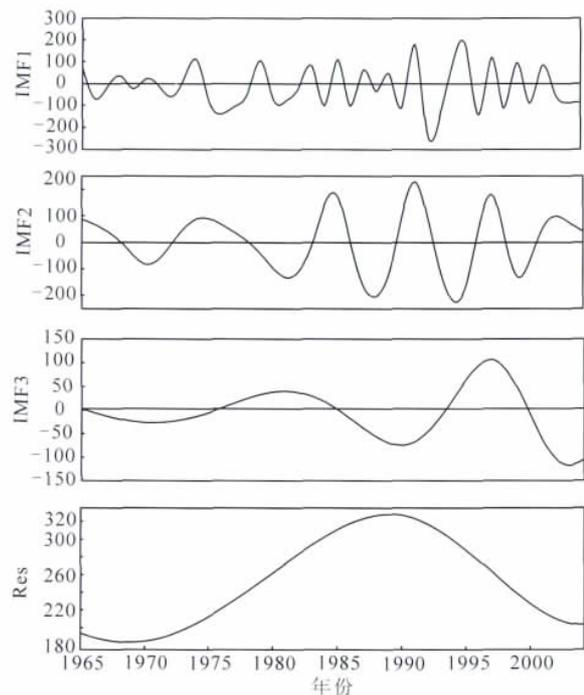


图 2 各 IMF 分量及 Res 趋势项

Fig. 2 IMF components and Res

从图 2 可以看出,蒋家沟泥石流年输沙量总共分解成了 3 个 IMF 分量和一个趋势分量 Res。其中 IMF1 分量是第一个本征模态函数,是一个准 2~4 a 的周期性波动,它的频率最高,波长最短。该分量反映了蒋家沟泥石流年输沙量在短时间尺度的变化情况。其他 IMF 分量依次分解下去,频率逐渐减小,波长逐渐增大。IMF2 是一个准 6~10 a 的周期性波动,1985 年以前主要是以准 10 a 的周期在波动,而 1985 年之后主要以准 6 a 的周期在波动,这与王裕宜认为蒋家沟高频率暴雨泥石流输沙量以 6 a 为周期波动的认识^[3]一致。IMF3 分量具有准 17~21 a 波动周期,该分量也反映了蒋家沟泥石流年输沙量的周期变化。从 1985 年以来,该分量的振幅明显呈增大趋势,波动较大,跟蒋家沟泥石流年输沙量时间序列的波动变化一致。趋势项 Res 最能代表蒋家沟年输沙量变化的总体趋势,对趋势项分析可以发现:1965—1975 年的年输沙量保持较平稳趋势,而 1975 年之后开始小幅增加,直到 1990 年左右开始小幅度减小。

通过 EMD 对蒋家沟泥石流年输沙量的分解,反映出其不同时间尺度下的波动规律。从上述分析可知,从 IMF1、IMF2 和 IMF3 波动图中都明显看出 1985 年是一个波动变化节点,1985 年之后

这3个分量的波动振幅开始都变大。

4 蒋家沟泥石流年输沙量影响因素分析

蒋家沟降雨量的观测资料受连续性、系统性不足等种种因素的影响,使用起来有些困难,但通过相关研究^[9]发现,蒋家沟附近的会泽县气象站的年降雨量与蒋家沟的年降雨量有很强的相关性,相关系数达0.813,为高度相关。因此,利用会泽县的降雨量分析降雨对蒋家沟泥石流的年输沙量影响。会泽县的年降雨量变化曲线见图3,1965年至2004年的年降雨量保持在800 mm的量值附近,但有波动,平均值为796 mm。通过对会泽县年降雨量与蒋家沟泥石流年输沙量及各IMF分量的相关性分析,得到其相关性系数,如表2所示。

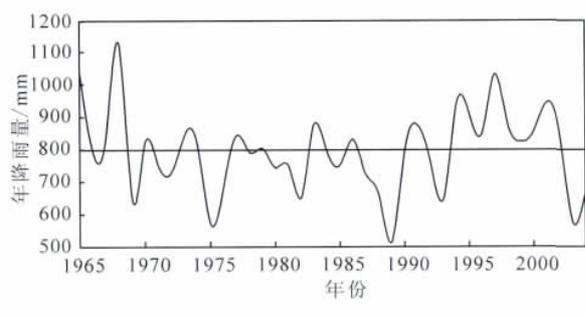


图3 会泽1965至2004年的年降雨量

Fig. 3 The annual rainfall in Huizhe from 1965 to 2004

表2 年降雨量与蒋家沟泥石流年输沙量及各IMF分量的相关性系数

Table 2 Correlation coefficient between the annual rainfall and the annual sediment yield of the Jiangjiagou debris flow and IMF components

因素	相关系数
年输沙量	0.464
IMF1	0.394
IMF2	0.214
IMF3	0.355

从表2可知,年降雨量与蒋家沟泥石流输沙量相关性系数达到0.464,具有相关性,因此降雨在一定程度上影响着蒋家沟泥石流年输沙量的波动变化;年降雨量与IMF1分量及IMF3分量的相关性系数分别为0.394和0.355,属于低度相关;而与IMF2的相关系数为0.214,属于极弱相关,即它们之间不具有相关性。因此,蒋家沟泥石流

作为一种降雨型泥石流,降雨对泥石流的启动及暴发起着决定性的作用,不但影响着泥石流输沙量的多少,而且对泥石流年输沙量的周期性波动也有一定的影响。

泥石流是水和松散固体物质混合形成的特殊流体,降雨是其主要的水源。泥石流的发生除受降雨因素的控制之外,流域的松散固体物质补给也是泥石流形成的一个重要条件。滑坡与水土流失产生的松散固体物质是泥石流的重要固体物质来源,蒋家沟流域内滑坡大量分布,其年补给泥石流的固体物质质量达 $153 \times 10^4 \text{ m}^3$,占蒋家沟年平均泥石流输沙量(约为 $240 \times 10^4 \text{ m}^3$)的64%^[10];因此,滑坡严重影响着蒋家沟泥石流的固体物质来源。由于蒋家沟内发育的滑坡受自身重力和水的作用,具有连续性、季节活动性和年际周期活动性的特征^[3],这也就决定了蒋家沟泥石流年输沙量在长时间尺度上的周期性波动。

同时,近几十年来当地居民大规模地开荒种地,也导致了水土流失加剧,并且随着当地人口的增加,生产和建设的不断发展,如筑路和开矿规模等人类活动不断加大,严重地破坏了山体边坡的稳定性^[11],在为泥石流的暴发提供大量的固体物质来源的同时,也使泥石流的暴发及泥石流输沙量波动变化变得更加复杂。

此外,泥石流暴发后,对泥石流沟的冲刷及淤积会导致沟道的变化,也会对泥石流的输沙造成一定的影响。

5 结论

利用EMD对蒋家沟泥石流年输沙量进行分析,得到了3个IMF分量和Res分量。从这些分量可以看出,蒋家沟泥石流的年输沙量存在多尺度的周期性波动,分别是2~4 a的准周期、6~10 a的准周期以及17~21 a的准周期。同时,可以明显地看出1985年是蒋家沟泥石流输沙量的一个时间节点。在1985年之后,不仅泥石流的年输沙量波动性增强,且幅度变化有着明显变大,最大值达到1991年的 $659 \times 10^4 \text{ m}^3$,而最小值则为1993年的 $26 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

泥石流的输沙量受各种因素的影响,流域内的地形、固体物质补给和降雨是泥石流形成的必要条件。根据会泽县的年降雨资料分析可知,降雨在一定程度上影响着蒋家沟泥石流的年输沙量,并影响着蒋家沟泥石流的周期性变化。同时,由

于当地的开荒种地、筑路以及开矿等, 严重地影响了山坡的稳定性, 为泥石流的暴发提供了大量的固体物质来源, 这也使泥石流的输沙量波动变得更加复杂。

对蒋家沟年输沙量的 EMD 分解可以获取 3 个 IMF 分量及 Res 趋势项, 这些分量很好地反映了各种因素对年输沙量影响, 同时 3 个 IMF 分量及 Res 趋势项的变化趋势表现出一定周期性, 可以据此预测未来的蒋家沟泥石流输沙量。但是, 由于对蒋家沟泥石流输沙量影响的因素众多, 单纯从理论上不能完全地掌握其变化规律, 因此需对其加强监测与观测。

致谢: 感谢中国科学院东川泥石流观测研究站的大力支持!

参考文献:

- [1] Cui P, Wei F Q, Li Y. Sediment transported by debris flow to the lower Jinsha River [J]. International Journal Research of Sediment, 1999, 14(4): 67-71.
- [2] 张军, 熊刚. 云南蒋家沟泥石流运动资料集 [M]. 北京: 科学出版社, 1998: 1-20.
- [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] 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为例 [J]. 灾害学, 1989, 4(2): 26-30.
- [6] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert Spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. Proceedings of the Royal Society A, 1998, 451: 903-995.
- [7] Zhao J P, Huang D J. Mirror extending and circular spline function for Empirical Mode Decomposition method [J]. Journal of Zhejiang University: Science, 2001(2): 247-252.
- [8] 刘希林, 倪化勇. 蒋家沟泥石流输沙年际变化及其灾变预测 [J]. 山地学报, 2006, 24(5): 550-554.
- [9] 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, 2008.
- [10] 胡发德, 田连权. 蒋家沟泥石流源地滑坡类型初探 [M] // 杜榕桓. 泥石流观测与研究. 北京: 科学出版社, 1996: 64-66.
- [11] 杜榕桓, 康志成, 陈循谦, 等. 云南小江泥石流综合考察与防治规划研究 [M]. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1987: 90-92.