

# 蒋家沟泥石流输沙年际变化及其灾变预测

刘希林, 倪化勇

(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:** 根据云南东川蒋家沟泥石流年输沙量的时序资料, 分析了蒋家沟泥石流输沙的年际变化特征, 发现历年输沙量变动幅度大, 波动明显且年际变化频繁, 用灰色系统理论的灾变预测方法, 建立泥石流年输沙量的等维新息灾变预测模型, 能够对未来可能出现的灾变年份进行较好的预测。在前期研究基础上, 补充最新观测资料, 建立了新的灾变时间序列和相应的等维新息灾变预测模型, 使蒋家沟泥石流的年输沙量灾变预测得以连续进行, 并对预测结果进行了检验, 效果较为理想。

**关键词:** 蒋家沟; 泥石流; 年输沙量; 等维新息灾变模型; 灾变预测

**中图分类号:** P642. 23

**文献标识码:** A

泥石流是山区常见的一种突发性自然灾害现象, 具有强大的搬运能力和破坏能力, 对山区人们的生命财产安全、经济发展和社会进步构成巨大威胁。对未来年际间泥石流灾害发生的概率和规模进行预测, 并做好防御工作, 是一条重要的减灾途径。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大小和泥石流搬运的泥沙等固体物质在泥石流堆积区造成危害的严重程度。因此, 泥石流输沙量的多少, 尤其是超过某一阈值的输沙量在泥石流防治工程的设计中具有重要的作用。许多学者曾对蒋家沟泥石流输沙特性及年际变化进行过很有价值的研究。本文第一作者早在 1989 和 1992 年用灰色理论和回归分析分别对云南东川蒋家沟泥石流年输沙量做出预测<sup>[1,2]</sup>, 王裕宜和李昌志等分别对蒋家沟泥石流年输沙量的变率和预测模型进行了探讨<sup>[3,4]</sup>。然而泥石流的输沙状况受到多种因素的影响, 既有地形地质因素也有气候因素, 对其精确预测还在探索之中。本文在前期提出的等维新息灾变预测模型的基础上, 根据蒋家沟泥石流年输沙量的最新实测资料, 进一步对模型进行验证并对蒋家沟泥石流年输沙量进行连续预测。

## 1 蒋家沟泥石流输沙的年际变化特征

### 1.1 蒋家沟流域概况

蒋家沟流域位于  $26^{\circ}13' \sim 17^{\circ}N$ ,  $103^{\circ}6' \sim 13^{\circ}E$ , 康滇地轴东缘的小江深大断裂带内, 岩层破碎, 新构造运动活跃, 地震活动强烈, 不良地质体和地质灾害分布广泛(图 1)。蒋家沟从而成为我国著名的暴雨泥石流沟, 其流域面积为  $47.1 \text{ km}^2$ , 主沟长度  $12.1 \text{ km}$ , 平均纵比降  $13.8\%$ , 沟内有松散固体物质  $12.3 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。流域处于丰雨带, 干湿分明, 垂直气候明显。雨季为 5 ~ 10 月, 降雨量占年降雨量的 85% 以上, 暴雨中心多出现于流域内  $2\ 500 \sim 3\ 000 \text{ m}$  的地带。

### 1.2 泥石流输沙的年际变化特征

蒋家沟流域内陡峻的地形、丰沛的降水和丰富的松散固体物质为泥石流的发生提供了极为有利的条件。蒋家沟每年暴发泥石流数次到数十次, 自 1965 年至 2003 年, 共计暴发泥石流 440 次, 平均每年暴发约 11 次, 其中最少一年暴发 2 次, 最多一年为 1965 年达 28 次, 蒋家沟泥石流年输沙量达数十到数百万立方米(表 1)。

收稿日期(Received date): 2006 - 06 - 25。

基金项目(Foundation item): 中国科学院成都山地灾害与环境研究所创新前沿项目。[Knowledge Innovation Project of Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences.]

作者简介(Biography): 男, 研究员, 博士, 主要从事泥石流灾害评价和预测预报研究。[Liu Xilin (1963 -), Professor, PhD, studies on debris flow assessment and prediction.]

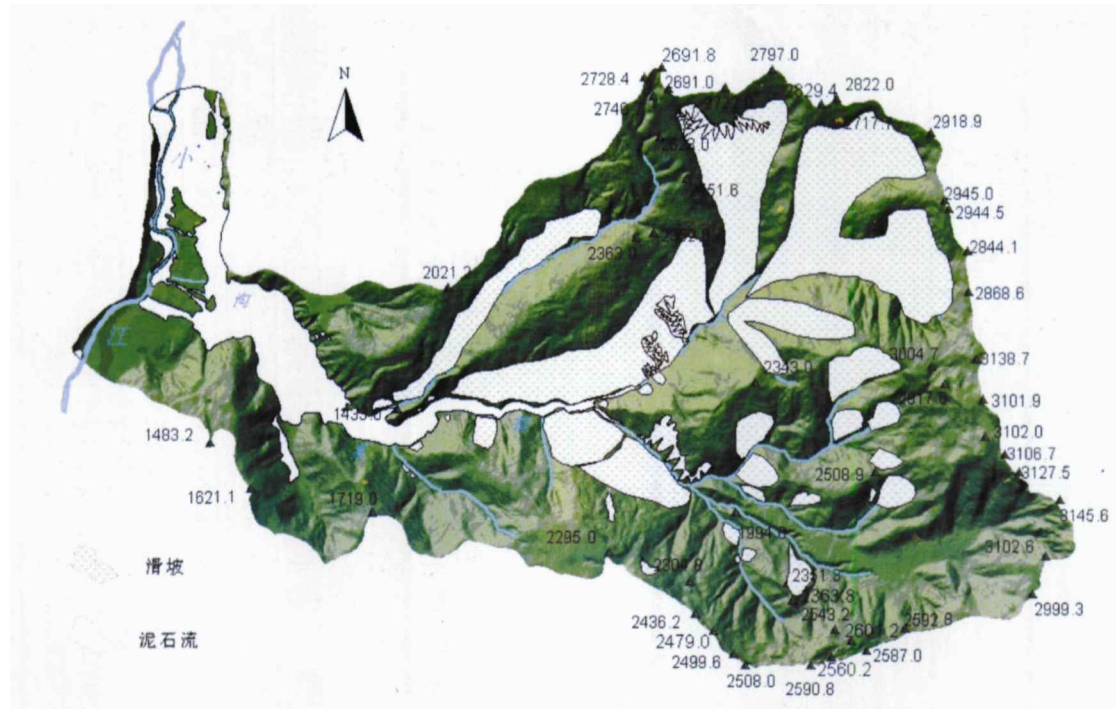


图 1 蒋家沟流域及不良地质体分布示意图(陈杰, 等作)  
Fig. 1 Jiangjia Ravine basin and the distribution of geological hazards

表 1 蒋家沟历年泥石流年输沙量(10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>)  
Table 1 Sediment yield of debris flows per year along Jiangjia Ravine (Unit:10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>)

年度	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974
输沙量	353	180	195	(199)	(85)	未观测	未观测	(99)	246	387
年度	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984
输沙量	211	150	(174)176 *	(221)227 *	(342)376 *	(126)150 *	(99)218 *	107	208	169
年度	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994
输沙量	315	(180)	171	29	200	263	659	119	26	200
年度	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002 *	2003	2004
输沙量	374	315	657	215	184	61	288	149	69	50

1987 年,康志成在“蒋家沟泥石流观测实验研究”一文中公布了 1965 ~ 1967 年、1973 ~ 1976 年和 1982 ~ 1985 年共 11 a 的实测泥石流年固体径流量数据<sup>[5]</sup>,1987 ~ 1994 年共 8 a 的实测泥石流年固体径流量数据来自于正式出版的《云南蒋家沟泥石流运动观测资料集》<sup>[6]</sup>,1995 ~ 1998 年共 4 a 的实测资料来源于参考文献[3]和[4],1999 ~ 2001 年共 3 a 的实测资料来自于中科院东川泥石流观测研究站上公布的数据(<http://nsl.imde.sc.cn>),2002 ~ 2004 年最近 3 a 的实测资料由中科院东川泥石流观测研究站提供。1970 ~ 1971 年未观测,1968 ~ 1969 年和 1972 年蒋家沟泥石流分别暴发 14、6 和 3 次<sup>[7]</sup>,但未有观测资料保存下来。1972 年蒋家沟泥石流暴发次数在参考文献[5]中为 6 次,两者有成倍的差

距。王裕宜和李昌志等采用分析测试中统计处理方法,用等差插点方式补充了表 1( ) 中的 1968 ~ 1969 年和 1972 年的非实测数据<sup>[3,4]</sup>。1977 年和 1978 年蒋家沟泥石流暴发次数在参考文献[5]中分别为 11 次和 14 次,在参考文献[7]中分别为 5 次和 9 次,两者亦有较大的差距,这两年也未见有实测资料保存下来。康志成给出了 1979 ~ 1981 年蒋家沟泥石流的暴发次数分别为 23 次、9 次和 11 次<sup>[5]</sup>,但没有输沙量资料。因此 1977 ~ 1981 年及 1986 年的输沙量均为非实测资料,表 1( ) 中的为参考文献[3]和[4]用等差插点处理的补充数据,带 \* 的为参考文献[1]和[2]根据泥石流暴发次数用灰色模型预测的数据。由表 1 可以看出,不同研究者用两种不同方法补充的数据在 1977 ~ 1980 年这 4 a 比较接近,因

而具有一定的可信度,但在 1981 年相差较大,可信度较差,且本文第一作者在 1989 年和 1992 年分别给出了 194 和 218 的不同数据<sup>[1,2]</sup>。实际上,在 1965~2004 年的 40 a 中,蒋家沟泥石流只有 29 a 的观测资料保存了下来,并且目前也只有 1982~1985 年和 1987~2004 年共 22 a 的观测资料整理了出来。

以年度为横坐标,泥石流年输沙量为纵坐标,绘制蒋家沟泥石流年输沙量的散点—曲线图(图 2)。从图中可以看出,蒋家沟历年泥石流年输沙量变动幅度大、波动明显且年际变化频繁。用常规统计方法来拟合年输沙量变化趋势并进行预测,效果不理想,检验结果  $R^2$  都很小(表 2)。

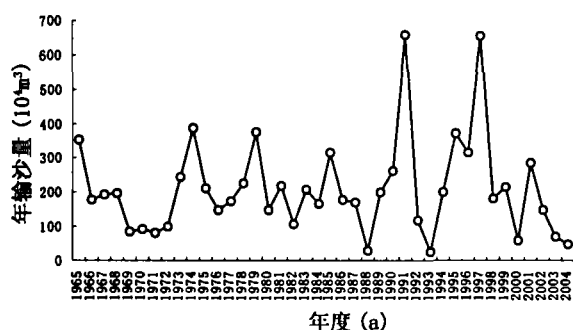


图 2 蒋家沟泥石流年输沙量图

Fig. 2 Sediment yield of debris flows per year along Jiangjia Ravine

表 2 蒋家沟历年泥石流年输沙量拟合结果

Table 2 Fitting results of annual sediment yield of debris flows along Jiangjia Ravine during the past years

拟合方法	线性拟合	对数拟合	多项式拟合 (阶数 3)	指数拟合
检验值 $R^2$	0.028	0.010	0.060	0.003

## 2 灰色灾变预测的理论基础及等维新息灾变模型

### 2.1 灰色灾变预测的理论基础<sup>[3]</sup>

灰色灾变预测是指某种灾害值在哪些年份将出现的预测。给定原始数列  $x^{(0)}$

$$x^{(0)} = [x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)] \quad (1)$$

式中  $x^{(0)}(i)$  是指第  $i$  年的数据。

令  $\xi$  为灾变阈值,如果  $x^{(0)}(i) \geq \xi$ ,则称此为上灾变。反之,如果  $x^{(0)}(i) \leq \xi$ ,则为下灾变。将  $x^{(0)}(i) \geq \xi$  或  $x^{(0)}(i) \leq \xi$  的灾变异常值重新组成新数列,即灾变数列  $x_{\xi}^{(0)}$

$$x_{\xi}^{(0)} = [x_{\xi}^{(0)}(1), x_{\xi}^{(0)}(2), \dots, x_{\xi}^{(0)}(n')] \quad n' < n \quad (2)$$

灾变预测不是预测数据本身的大小,而是预测异常值出现的时刻。从这一要求出发,在  $n'$  点以后的下一个时刻  $(n+1)'$  或再下一个时刻  $(n+2)'$ ,这个数越大,表明下次出现灾变值的时间越远,这个数越小,表明下次出现灾变值的时间越近。这个数代表  $x^{(0)}(i) \geq \xi$  (或  $x^{(0)}(i) \leq \xi$ ) 的灾变异常值出现的点,据此可得下述双数列

$$P = [ \begin{matrix} 1' & 2' & \dots & n' \\ x_{\xi}^{(0)}(1') & x_{\xi}^{(0)}(2') & \dots & x_{\xi}^{(0)}(n') \end{matrix} ] \quad (3)$$

因  $x_{\xi}^{(0)}(i')$  与  $x^{(0)}(i')$  之间有明确的一一对应关系,因此若将  $P$  中每一对数看作二维平面的一个点,则可规定一个水平投影算子  $p$ ,记垂直坐标符号为  $q$ ,这种映射记为  $p(i')$ ,且有  $p(i') = q$ ,则称

$$P = (p(1'), p(2'), \dots, p(n')) \quad (4)$$

为灾变日期集。据此,按照灰色理论中 GM(1,1) 模型建模步骤进行建模预测。

### 2.2 等维新息灾变模型

根据上述灾变日期集建立 GM(1,1) 模型进行灾变预测,存在随着时间的延长,预测结果可靠度变低的问题。为了解决灾变预测的连续性,本文第一作者在进行蒋家沟泥石流年输沙量的灾变预测中,根据邓聚龙关于等维新息模型具有较高精度的结论,采用了等维新息模型,即在增加一个新的信息的同时又去掉一个老信息,通过新的 GM(1,1) 模型预测下一次灾变年份,如此不断更新模型,预测一次,检验一次,再建立一个等维新息模型,以保持灾变年份的连续预测始终达到较高的精度。

## 3 蒋家沟泥石流年输沙量的等维新息灾变预测

1992 年,本文第一作者在对蒋家沟泥石流年输沙量进行的灾变预测中,确定以年输沙量大于或等于  $200 \times 10^4 \text{ m}^3$  为灾变阈值<sup>[2]</sup>,这一阈值的确定,主要是基于康志成所提供的 1965~1985 年间有实测资料的 11 a 的泥石流年输沙量<sup>[5]</sup>,其平均值为  $229 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。根据当时的最新资料,选取 1978 年、1979 年、1981 年、1983 年和 1985 年输沙量超过  $200 \times 10^4 \text{ m}^3$  的 5 个年份作为灾变年份,采用等维新息 GM(1,1) 模型对蒋家沟泥石流年输沙量进行了预测(表 3 中灾变模型 I),预测出 1990 年蒋家沟泥石流输沙量将会再次达到或超过  $200 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,后经检验,预

测结果准确,1990 年蒋家沟泥石流输沙量实测值为  $263 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。然后去掉 1978 年这一灾变年份,增加 1990 年这一新的灾变年份,重新建立等维新息 GM(1,1)预测模型进行预测(表 3 中灾变模型 II),预测出 1994 年或 1995 年为蒋家沟泥石流输沙量达到或超过  $200 \times 10^4 \text{ m}^3$  的灾变年份。随着新的观测资料的得出,再一次验证了预测结果的准确性,1994 年和 1995 年均出现  $\geq 200 \times 10^4 \text{ m}^3$  的输沙量,分别为  $200 \times 10^4 \text{ m}^3$  和  $374 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。为了进一步验证等维新息 GM(1,1)模型在泥石流输沙量预测中应用的

可行性,增加 1994 年,去掉 1979 年,本文再次建立了新的灾变预测模型(表 3 中灾变模型 III)。由模型 III 预测出在 2002 年或 2003 年将出现泥石流输沙量  $\geq 200 \times 10^4 \text{ m}^3$  的结果,实际情况蒋家沟在 2001 年提前达到灾变年,当年泥石流输沙量为  $288 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,预测结果基本准确。同理,增加 2001 年,去掉 1981 年,再次建立新的等维新息灾变预测模型(表 3 中灾变模型 IV),预测出蒋家沟泥石流输沙量将在 2013 年或 2014 年前后再次达到或超过  $200 \times 10^4 \text{ m}^3$ (表 4)。

表 3 蒋家沟泥石流年输沙量等维新息灾变预测模型

Table 3 The grey catastrophe model of the forecast on annual sediment yield of debris flows along Jiangjia Ravine

模型编号	建模灾变年份	等维新息数列	灾变预测模型
I	(1978,1979,1981,1983,1985)	(1,2,4,6,8)	$\dot{P}(t+1)=5.2814e^{0.3980t}-4.2814$
II	(1979,1981,1983,1985,1990)	(1,3,5,7,12)	$\dot{P}(t+1)=5.1411e^{0.4401t}-4.1411$
III	(1981,1983,1985,1990,1994)	(1,3,5,10,14)	$\dot{P}(t+1)=5.6053e^{0.4746t}-4.6053$
IV	(1983,1985,1990,1994,2001)	(1,3,8,12,19)	$\dot{P}(t+1)=6.8654e^{0.4915t}-5.8654$

表 4 蒋家沟泥石流年输沙量预测结果及检验

Table 4 The results of forecast on annual sediment yield and their tests

模型编号	模型计算结果	预测灾变年份	实际灾变年份
I	4.68	1989 或 1990	1989 和 1990
II	4.53	1994 或 1995	1994 和 1995
III	8.73	2002 或 2003	2001
IV	12.12	2013 或 2014	待检验

4 结论

在蒋家沟泥石流输沙量年际变化特征分析的基础上,运用灰色系统理论建立了泥石流年输沙量的等维新息灾变模型,通过增加一个新信息、同时去掉一个老信息的方法,在不需要更多信息量的情况下,不断建立起新的预测模型,通过连续三次实际检验,预测结果准确或基本准确,使得蒋家沟泥石流灾变年份的预测可以连续进行并达到了较好的预测结果。经预测,在 2013 年或 2014 年蒋家沟泥石流年输沙量将再次达到或超过  $200 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,是又一个泥石流暴发频繁和输沙量超大型的年份。

作为一般规律,随着泥石流的多次暴发,流域内松散固体物质将会逐渐减少,松散固体物质积累的时间会逐渐加长,暴发大规模泥石流和出现超大型泥石流年输沙量的灾变年份出现的间隔时间将会相

应延长,这同采用等维新息灾变预测模型得出的预测结果是一致的。然而,由于蒋家沟的特殊性,流域内具有大量足够的松散固体物质,按现在的平均年输沙量,泥石流仍可持续活动上百年乃至更长时间。因此,只要在降水条件充分满足的情况下,就会不断地暴发泥石流。采用等维新息灾变预测模型进行年输沙量预测,虽然间隔的时间在加长,漏掉了一些实际的灾变年份,但通过预测模型预测出的灾变年份是准确或基本准确的,说明该预测模型是有一定实用价值的。在其他松散固体物质积累速度相对较慢的泥石流流域,预测时可以根据具体情况,重新确定灾变阈值,建立等维新息灾变预测模型进行灾变预测。等维新息灾变预测模型对预测其他泥石流沟大规模高输沙泥石流灾变年份的出现同样具有应用价值。

参考文献(References)

[1] Liu Xilin. Application of grey model and regression analysis on prediction of debris flow——an example of annual sediment yield of debris flows along Jiangjia ravine [J]. *Journal of Catastrophology*. 1989,4(2): 26~30 [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]

[2] Liu Xilin. The application of grey catastrophe model to the forecast on annal sediment yield of debris flow along Jiangjia ravine [J]. *Mountain Research*. 1992,10(1):57~61[刘希林.灰色灾变模型

- 在蒋家沟泥石流年输沙量短期预测中的应用[J]. 山地研究(现山地学报), 1992, 10(1): 57 ~ 61]
- [3] Wang Yuyi, Li Changzhi, Hong Yong. Study on the cyclic property of the annual sediment discharge variation of debris flows at Jiangjia ravine, Yunnan, China[ J]. *Journal of Natural Disasters*. 2000, 9(4): 99 ~ 104 [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] Li Changzhi, Cao Shuyou, Pen Qinge, *et al.* An exploration on model for predicting sediment yielded by debris flow at Jiangjia gully [J]. *Journal of Sediment Research*. 2000, (2): 45 ~ 50 [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] Kang Zhicheng. Debris flow observation and study of Jiangjia ravine. [J]. *Water and Soil Conservation of China*, 1987, (6): 21 ~ 22 [康志成. 蒋家沟泥石流观测研究[J]. 中国水土保持, 1987, (6): 21 ~ 22]
- [6] Zhang Jun, Xiang Gang. Data Collection of Kinematic Observation of Debris Flows in Jiangjia Ravine, Dongchuan, Yunnan (1987 ~ 1994) [M]. Beijing: Science Press. 1997. 1 ~ 258 [张军, 熊刚. 云南蒋家沟泥石流运动要素观测资料集(1987 ~ 1994) [M]. 北京: 科学出版社, 1997. 1 ~ 258]
- [7] Li Jian, Chen Qingde, Kang Zhicheng. Preliminary analysis on the generation and development of debris flow in Jiangjia ravine, Dongchuan, Yunnan [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1979, 34(2): 156 ~ 167 [李健, 陈琴德, 康志成. 云南东川蒋家沟泥石流发生、发展过程的初步分析[J]. 地理学报, 1979, 34(2): 156 ~ 167]
- [8] Deng Julong. Basic Methods of Grey System [M]. Wuhan: Publishing House of Middle China University of Technology, 1987. 145 ~ 150 [邓聚龙. 灰色系统基本方法[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1987. 145 ~ 150]

## Variation Property of Annual Sediment Yield of Debris Flow along Jiangjia Ravine and Catastrophe Forecast

LIU Xilin, NI Huayong

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

**Abstract:** Annual sediment yield of debris flow is an important physical index that reflects both the forming condition, carrying ability and potential danger degree. Thus the sediment yield of debris flow is of great significance to the design of prevention and mitigation projects against debris flow hazard. Based on the sequential data of the annual sediment yield of debris flow along Jiangjia ravine, it can be found that the annual sediment yield has been changing year by year with large scope and high frequency. Several fitting methods such as linear fitting, logarithmic fitting, polynomial fitting and exponential fitting had been tried, but all the results were unsatisfied with  $R^2 < 0.1$ . In this paper, based on the sequential data of the annual sediment yield of debris flow along Jiangjia ravine, the variation property of the annual sediment yield was analyzed and then was forecasted according to the equal dimension-new information model of grey theory, which makes the short-term catastrophe forecast for the annual sediment yield of debris flow can be done continuously. This research provides some useful results for the forecast of occurrence year with large magnitude of debris flow in Jiangjia ravine.

**Key words:** Jiangjia ravine; debris flow; annual sediment yield; equal dimension-new information model; catastrophe forecast