

文章编号: 1008—2786—(2008)5—590—07

长江上游蒋家沟泥石流输沙年际变化与降水旋回特征关系

王裕宜^{1,2}, 詹钱登³, 田冰^{2,4,5}, 洪勇^{1,2}, 邹仁元²

(1. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 中国科学院东川泥石流观测研究站, 四川 成都 610044;

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 610044; 3. 台湾成功大学水利及海洋工程系, 台湾 台南 70104;

4. 河北师范大学资源与环境科学学院, 河北 石家庄 050016; 5. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 根据小江流域 1956~2002 年的降水资料, 运用 Mann—Kendall(M—K)非参数检验法和自相关函数, 发现 1990 年代降水呈现显著增加的趋势, 其降水年均值比前期年均值增加 96.5 mm(16.2%)。并结合 37 a 气候变化下的蒋家沟高频率暴雨泥石流输沙量时序观测资料, 分析了降雨变化与泥石流输沙量的关系, 结果显示 1990 年代泥石流输沙量有显著增加的趋势, 1990 年代的年均输沙量比前期(1965~1989 年)的年均输沙量多 $91\times 10^4\text{ m}^3/\text{a}$ 。反映了暴雨泥石流输沙年际变率对降水年际变化的回应关系。本文已经初步揭示暴雨泥石流灾害活动年际变化的基本规律, 并且为未来暴雨泥石流中、短期时间尺度的预测研究提供一条新路。

关键词: 暴雨泥石流; 降雨的年际变化; 输沙年际变率; 短尺度的预测

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)已经发表了第四部气候变化评估报告, 其中气候变化 2007: 影响、适应性和脆弱性的内容梗概已在 2007—04 比利时布鲁塞尔发表。在北京召开的有关 IPCC 以及 2007—06—04 我国正式发布第一部《中国应对气候变化国家方案》体现了当前对气候变化影响、自然和管理系统的适应能力及其脆弱性的科学认知水平^[1]。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时间尺度内, 可以认为是相对不变的(或者说变化极小), 则该沟泥石流发生、发展的规模和频率主要受某些控制因素(如降水等)所具有的“准周期性”^[2,3]等因素的控制和制约。泥石流灾害暴发频率的周期性反映了它对降雨年际变化的响应过程。本文根据所收集到的长江上游金沙江下游右岸的小江流域 1956~2002 年的降水资料, 分析研究了小江流域和蒋家沟降水量

在 1950~1990 年代呈现明显的 N 阶次曲线波动年际变化(准周期性)特征和 1990 年代降水显著增加的趋势。这对于了解全球气候变化下的小江流域的降水历史演变和年际变化的特征, 揭示暴雨泥石流灾害活动周期性变化的基本规律, 并为暴雨泥石流的 中、短期时间尺度预测研究, 探索了一条新路^[4,5]。同时对于防止和应对山地生态环境的退化, 进行生态安全策略的构建, 以及实现山地生态环境优化和社会经济可持续发展等, 也都具有重要意义。

1 资料和分析方法

研究区是长江上游金沙江下游右岸小江流域的昆明市东川区, 是我国泥石流灾害发育的典型区域。该区位于康滇古陆与滇黔川鄂台坳相接的部位, 属

收稿日期(Received date): 2007—12—28; 改回日期(Accepted): 2008—06—30.

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金资助(40671026)[Funded by NSFC(40671026)]

作者简介(Biography): 王裕宜(1944)女, 研究员, 从事于泥石流应力应变特性和泥石流预测预报的观测研究。[Wang Yuyi(1944—), Researcher(Prof.), Specialized in observational research on the logical characters and forecast prediction of debris flow.] E-mail: wyyyz@imde.ac.cn

滇东沉降带中段西侧小江深大断裂带。区内地质构造复杂、新构造运动强烈、断层密布、岩石破碎,又属强地震区。东川区山地自然环境脆弱性的本质特征,是组成生态环境物质与能量基础处于接近失衡的临界状态,具有孕育着泥石流形成发展的基础。从古泥石流遗迹判断,早在第四纪的中更新世小江两岸的一些沟谷就出现了泥石流,反映了东川区泥石流的形成演化对山地生态环境的脆弱性的响应过程。蒋家沟位于小江流域下游的右岸,是一条典型的暴雨型泥石流沟,该沟的泥石流规模巨大、暴发频繁、危害严重,为世界著名的泥石流沟。

研究区降水资料

东川区雨量资料, 1956 ~ 1979 年的雨量资料来自参考文献 [6], 1980 ~ 2002 年的雨量资料来自东川 (新村站) 区气象年鉴有关资料。小江流域位于滇东北高原山区, 气候上受大气环流形势和地形的影响制约。除具备较大流域 (小江流域面积 3 045. 35 km²) 的降水资料以外, 还增加了小流域蒋家沟 (流域面积 48. 6 km²) 的降雨资料作为补充分析: 蒋家沟的 1989 ~ 1998 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) [7]。蒋家沟地理位置为 26°13' ~ 26°17'N, 103°06' ~ 103°13'E 沟内 3 个雨量点为蚂蚁坪 (H=2 765 m)、陈家梁子 (H=2 311 m) 和观测站 (H=1 371 m), 1989 年又增加补充的雨量点为弯房子 (H=2 241 m)、上凹子 (H=1 560 m) 和阴家凹 (H=2 338 m)。区域分析对照降雨的资料为昆明站降雨资料, 昆明雨量点地理位置为 25°02'N ~ 102°68'E, H=1 891. 4 m。

1. 2 M—K法^[8]

是用来评估气候要素时间序列趋势的常用的检验方法之一, 以适用范围广、人为性少、定量化程度高而著称。其检验公式的 sign() 为符号函数, 当 $x_t - x_j$ 小于、等于或大于零时, sign ($x_t - x_j$) 分别为 -1、0 或者 1; M—K 统计量公式在 x_t 小于、等于或大

于零时 为

$$S_n = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{n-1} \text{sign}(\frac{x_i - x_j}{i - j}) \tag{1}$$

$$Z_n = \begin{cases} (S_n - 1) / \sqrt{n(n-1)(2n+5)/18} & S_n > 0 \\ 0 & S_n = 0 \\ (S_n + 1) / \sqrt{n(n-1)(2n+5)/18} & S_n < 0 \end{cases} \tag{2}$$

式中 S_n 值为正值表示增加趋势, 负值表示为减少趋势。 Z_n 值在大于、等于 |1. 28|、|1. 64|、|2. 32| 时分别表示通过了 90%、95%、99% 置信度显著性检验。M—K 法来检验突变时, 当 UF 与 UB 曲线的交点为位于信度线之间, 则此交点可能为突变点的开始。然后再配以滑动 Z_n 检验来检验序列存在的显著性差异。

一维时间序列分析的基本原理

如果将蒋家沟泥石流从 1965 ~ 2004 年的输沙量作为按时间顺序排列的离散的有序数列 $x(t)$ 、 $x(\frac{t}{2})$ 、...、 $x(\frac{t}{k})$, 并视这序列为平稳随机时间序列, 通过平稳时间序列的数学分析, 识别和提取主要周期及其变化规律, 探求这时间序列的周期性和趋势性。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来反映周期性和趋势性。

阶次曲线模拟方程的波动性

由于大多数观测记录长度资料十分有限, 所以采用已有的云南省昆明、东川区 (新村站) 和蒋家沟的年降雨量以及泥石流输沙量时间序列资料, 建立一元或者 N 阶次曲线模拟方程。该模拟曲线不仅可以来分析降雨量和泥石流输沙量其时间序列的变化特征, 还可以模拟分析降雨量和泥石流输沙量波动的趋势性和周期性 (准周期性)。

2 小江流域降雨的旋回变化特征

小江流域年际降水量变化的演化趋势

20 世纪 90 年代小江 (新村站) 流域降水量年际变化呈现的增加趋势, M—K 检验表现为显著增加趋势 (95% 的置信度)。

表 1 1956 ~ 1999 年小江流域多年平均降水量比较表
Table 1 Average annual precipitation from 1956 to 1999 in Xijiang River

年代	1956 ~ 1959	1960 ~ 1969	1970 ~ 1979	1980 ~ 1989	1990 ~ 1999
平均降水量 (mm)	700. 38	687. 49	689. 92	702. 87	825. 23
σ_{n-1} (变异系数)	56. 98	134. 32	85. 9	132. 36	166. 78
1990 年代与其他年代对比	15. 13%	16. 69%	15. 55%	14. 83%	
> 800 mm 出现的频率	0	30%	10%	20%	60%

1. 表 1 显示了小江流域 1956 ~ 1999 年各年代的平均降水量, 1950 ~ 1980 年代的年降水量均值为 691.56 mm。1990 年代的降水均值与前几年代均值的比较都为正值。该特征表明, 1990 年代的降水均值比 1950 年代、1960 年代、1970 年代、1980 年代的降水均值都大, 增加的百分率分别为: 15.13%、16.19%、15.55%、14.38%。

2. 从表 1 可知, 1990 年代降水均值最高, 1960 年代最底。1950 ~ 1960 年代的降水均值呈现了微弱的下降趋势 (1.84%)。1960 ~ 1970 年代的降水均值增加速度为 9.43 mm/(10 a); 1970 ~ 1980 年代增加速度为 5.95 mm/(10 a)。1980 ~ 1990 年代上升趋势最为迅速, 1990 年代比 1980 年代上升 14.38%, 增加速度为 122.36 mm/(10 a)。该结论与文献^[9]中的有关分析: “自 1960 年以来我国平均的年降水量存在明显增加趋势, 这可能主要是由长江以南地区降水的正趋势造成的”, 基本一致。

3. 从表 1 还可知, 各年代中间的最大年降水量值从 1950 年代至 1990 年代也呈现出上升趋势, 其中 1995 年的降水值为 44 年的最大值 974 mm。而且在各年代之间年降水量大于 800 mm 的年份占本年代的频率, 1990 年代为 60%, 1960 年代为 30%, 1980 年代为 20%, 1970 年代为 10%。

4. 1990 年代降水量的演化趋势, M-K 检验表现为显著增加趋势 (95% 的置信度)。尽管各年度之间年降水量的波动比较大, 但从图 1 中的趋势拟合曲线可以知道小江流域年降水量具有显著增加趋势。该降水趋势线性拟合曲线的拟合率为 0.988 9, 值检验为 $11.549 > t_{0.01} = 9.9257$ 达到极显著性差异, 95% 的置信区间为 $0.8989 < R < 0.9988$ 。该分析与有关的结论 “1990 年以来, 多数年份全国年降水量均高于常年^[9]” 和 “就年降水变化的空间

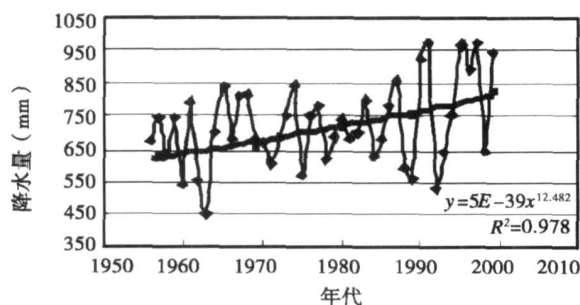


图 1 1956 ~ 1999 年小江流域降水量变化曲线

Fig 1 Chang'ng curves of rain from 1956 to 1999 in Xiaojiang River

分布而言, 长江源区及金沙江流域年降水增加趋势最为显著, 增加速度为 32.2 mm/(10 a), 增加趋势通过 99% 置信度检验。^[10]的基本一致。

小江流域雨季降水量的变化趋势

总观该区的气候有二大特点: 垂直气候明显和干湿季节分明。雨季 (5 ~ 10 月) 降水量占年总降水量的 85%, 降水量如此高度集中, 致使泥石流暴发的前期降水量的条件较为充分。小江流域东川区 1990 年代雨季平均降水量为 706.6 mm 为各年代 (同前) 的最高值。1950 年代、1960 年代、1970 年代、1980 年代雨季平均降水量分别为 603.6 mm、630.4 mm、589.4 mm 和 616.8 mm。1990 年代雨季的平均降水量占全年降水量的 85.63%, 1950 年代 ~ 1980 年代的多年雨季的平均降水量占全年降水量的 88.18%, 但 1990 年代雨季绝对降水值确呈明显的增加趋势, 比 1950 年代 ~ 1980 年代的平均值多达 96.5 mm。

小江流域东川区雨季降水量 M-K 检验表明, 自 1990 年代以来雨季呈现出明显的增加趋势, 与上面分析基本一致。洪水季节的降水增加趋势呈现出显著趋势, 置信度也达到 95%。

区域年际降水量变化趋势

20 世纪 80 ~ 90 年代的滇东北雨区无论是昆明、东川区 (新村站), 还是蒋家沟的年际降水量, 尽管各年度之间年降水量的波动比较大, 但演化趋势都基本一致。图 2 中的无论是昆明的一次阶年际滑动趋势拟合曲线, 还是东川区 (新村站), 以及一阶次年际滑动趋势拟合曲线, 其区域年降水量都呈现出相似的显著增加趋势。并从南向北 (昆明—东川 (新村站)—蒋家沟), 其一阶次年际趋势拟合曲线

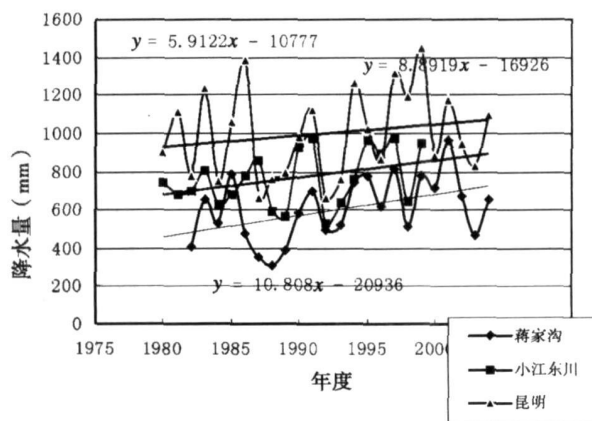


图 2 昆明、小江东川与蒋家沟年降水量对比图

Fig 2 To contrast annual precipitation in Xiaojiang River with one in Jiangjiagou and Kunming city

的斜率变化呈现出递增的情况,即从 5.91→8.89→10.81 这表明蒋家沟流域的年降水量增加趋势则更为显著。

蒋家沟流域年降水量的变化趋势

蒋家沟流域气候具有干、湿季分明,垂直分带明显的特点。雨季降水量占全年总降水量的 85%以上,且雨季多暴雨和阵雨,暴雨和阵雨雨量占全年总降水量的一半以上。同时又因为蒋家沟流域内山高谷深,地形十分复杂,垂直高差达 2 200 m 以上,致使垂直气候十分明显。从图 3 的不同高度的雨量点的年度观测资料可知,蚂蚁坪 (H=2 756 m)、陈家梁子 (H=2 311 m) 和弯房子 (H=2 241 m) 的年度雨量变化,比观测站 (H=1 371 m) 和上凹子 (H=1 560 m) 雨量点的年度雨量变化波动大。图 3 中的粗连线和粗虚线分别为蚂蚁坪和弯房子的 1997~2004 年的观测资料,其 N 阶次曲线模拟方程分别

表达在图的右上方。图 3 中的细连线为观测站的 1997~2004 年的观测资料,其 N 阶次曲线模拟方程表达在图的右下方。从 N 阶次曲线模拟方程的 X^6 、 X^5 、 X^4 、 X^3 、 X^2 、 X 阶次的系数可知,蚂蚁坪和弯房子的阶次系数都比观测站的阶次系数大。如前者的 X^6 阶次系数为 10.31 和 7.02 后者的系数为 4.67。

这不仅表明降水量随高度增加,而且雨量点年度波动变化波动也具有随高度增加而加大的特点。并且因为蒋家沟流域的暴雨中心都出现在 2 500~3 000 m 正好与泥石流形成区同位,所以蒋家沟因雷阵雨激发的泥石流次数约占泥石流暴发总次数的 60% 以上。蒋家沟流域降雨量的年际变率直接制约了该沟泥石流输沙量的年际变率,如丰雨年 1997 年的降雨量相当于枯水年 1988 年降雨量的 2.64 倍,则相对应的 1997 年泥石流侵蚀输沙量是 1988 年的 22.6 倍。

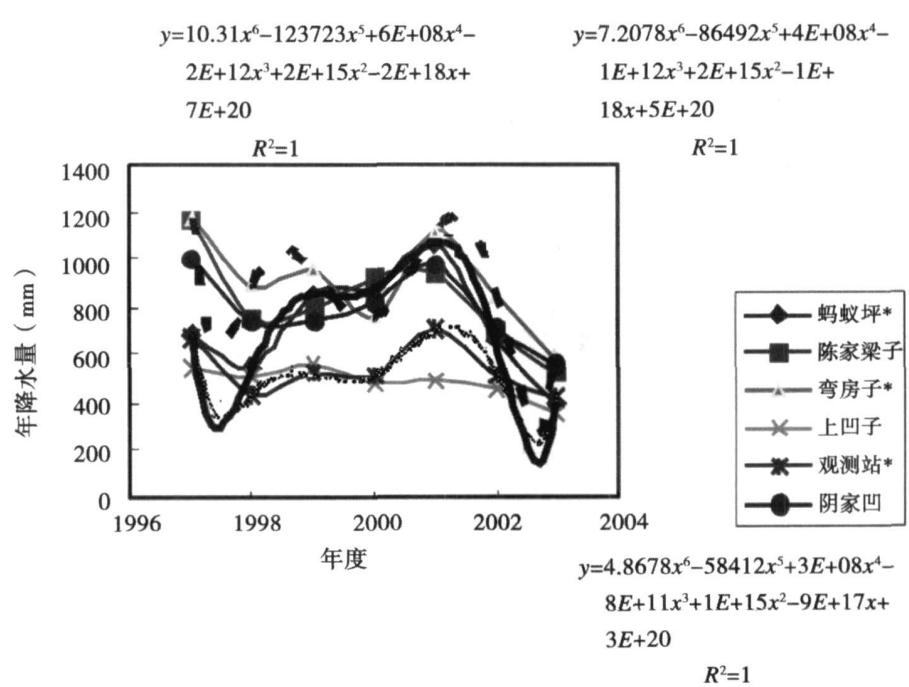


图 3 蒋家沟流域各雨量点的年度变化观测资料
Fig 3 Observation information of annual rain at Jiangjia Ravine

3 蒋家沟泥石流输沙年际变率的旋回性

蒋家沟泥石流的观测资料同时也清楚地表明 (图 4) 蒋家沟泥石流年际输沙变率曲线出现了 7 个波峰、7 个波谷年际旋回特征。在 1965~1989 年期间,年泥石流侵蚀输沙量的范围为 100~300×

10⁴ m³, 年均泥石流输沙量为 215×10⁴ m³/a, 丰水年 (峰值年) 达到 360×10⁴ m³/a, 而在 1990 年代泥石流侵蚀输沙量为 306×10⁴ m³/a, 丰水年 (峰值年) 平均高达 658×10⁴ m³/a, 平均每年泥石流要多侵蚀输沙 91×10⁴ m³。由于蒋家沟暴雨泥石流的形成与前期降水量和始发降水量都有相当大的关系, 所以对于上述 1990 年代以来出现的泥石流侵蚀输沙量

的显著增加情况,与年降水量、年极端强降水量、夏季降水量和夏季极端强降水量显著增加趋势都有相当紧密的关系。从图 5 可知,蒋家沟泥石流侵蚀输沙量谷峰与小江年降水量的谷峰相对应。而自 2001 年以来,随着降水量的逐年减少,泥石流侵蚀输沙量也相应减少趋势,蒋家沟泥石流输沙量年际变化与小江年降水旋回特征变化又进入另外一个轮回特点。

西藏波密地区古乡沟泥石流发育特征的分析结果也表明,该沟自 1953 年以来,泥石流的活动呈波浪型发展,表现出相对活动和相对平静的轮回性。

以上分析仅仅是以 50^a 为观测时序的小尺度轮回性分析,根据自早更新世中期出现泥石流活动以来,在新构造运动间隔性抬升的影响中,“小江流域第四纪泥石流的活动具有 10⁴^a 时间尺度的活动期的基本特征外,还存在着受降雨充沛的暖湿气候引起的具有 10³^a 时间尺度的泥石流高潮期和由强

地震引发的具有 10²^a 时间尺度的泥石流高峰期活动特性”^[12]。

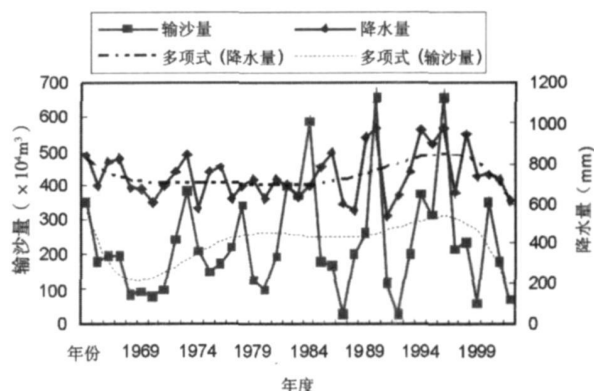


图 4 蒋家沟泥石流输沙量年际变化与小江年降水旋回特征变化曲线

Fig 4 The change curves of annual sediment of debris flow at Jiangjia Ravine and variation character of rainfall at Xiaojiang River

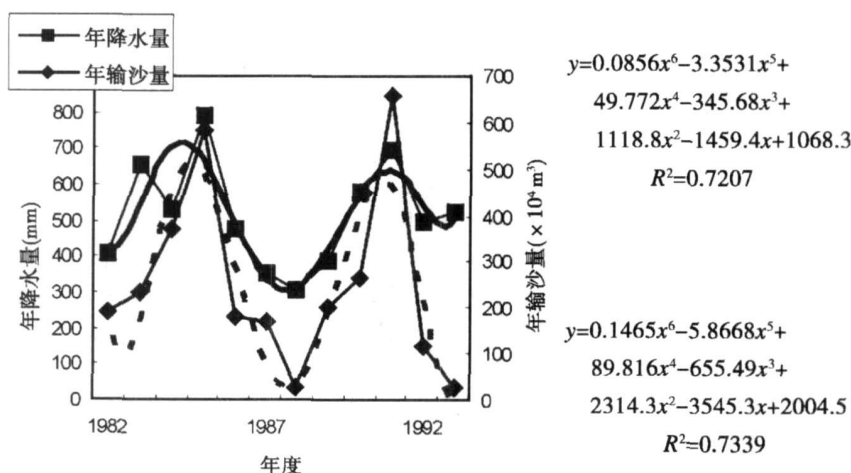


图 5 蒋家沟 1982 ~ 1993 年年降水量与年输沙量相关图

Fig 5 Relationship between the annual rain and the annual sediment of debris flows from 1982 to 1993 at Jiangjia Ravine

在图 4 中 2001 年前表示的 6 个周期峰值年也与蒋家沟泥石流历史上发生堵江 (1954 年、1968 年和泛滥 (1985 年、1991 年、1997 年) 造成严重危害的记录吻合。2001—05 曾预测 2001 年蒋家沟泥石流的输沙量为 $265 \times 10^4 \text{ m}^3$ 左右 (暴发次数为 15 ~ 16 次)。经 2001—06 ~ 09 (泥石流暴发期) 的实际观测资料汇总后, 得出当年泥石流的输沙量为 $287.9 \times 10^4 \text{ m}^3$ (共暴发 17 次泥石流), 预测的相对误差为 0.079。

4 蒋家沟泥石流输沙年际变率对降水量旋回变化的响应

蒋家沟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

的年际变率特征基本一致^[13]。

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。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^[14]。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, 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。还由于受青藏高原大地形的影响, 一支从孟加拉湾印度洋上来的西南季风气流, 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^[15]。

本流域不仅处于乌蒙山西坡, 而且呈东西走向, 东高(最高点 3 269 m)西低(最低点 1 042 m), 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, 叠加和时间的差异, 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。

$$Y_1 = 2E-06x^6 - 0.0006x^5 + 0.046x^4 - 1.5453x^3 + 23.964x^2 - 1.5255x + 456.1 \quad (3)$$

$$Y_2 = 1E-06x^6 - 0.0004x^5 + 0.275x^4 - 0.8032x^3 + 11.111x^2 - 72.316x + 881.14 \quad (4)$$

图 4 中的细趋势虚线粗连线为小江新村站年降雨量 1965~2002 年的观测资料, 其 6 阶次曲线方程为式(3)。图 4 中的粗趋势虚线为蒋家沟泥石流输沙量 1965~2002 年的观测资料, 其 6 阶次曲线方程为式(4)。从图 4 的曲线分布趋势来看, 小江年际降雨量旋回特点峰谷变化(即 N 阶次系数的正负变化)与蒋家沟泥石流输沙量年际峰谷变化基本相对应, 与图 5 显示的特点也相一致。小江年降雨量变化趋势方程(3)的 N 阶次系数与蒋家沟泥石流输沙量变化趋势方程(4)的 N 阶次系数成很好的 2 阶次方程对应关系, 相关系数为 0.999 7。这说明在一定时段长度范围内, 降雨量的旋回特征直接制约和控制了该沟泥石流输沙量的年际变率(图 6)。

综上所述, 蒋家沟暴雨泥石流输沙年际变率与

降水年际变化特征的成为很好的响应关系, 这对于分析了解全球气候变化下, 本区域降水呈显著增加趋势的这种年际变率的旋回性特征, 能为暴雨泥石流灾害的年际暴发频率和应对措施的预测研究开辟了一条新路。

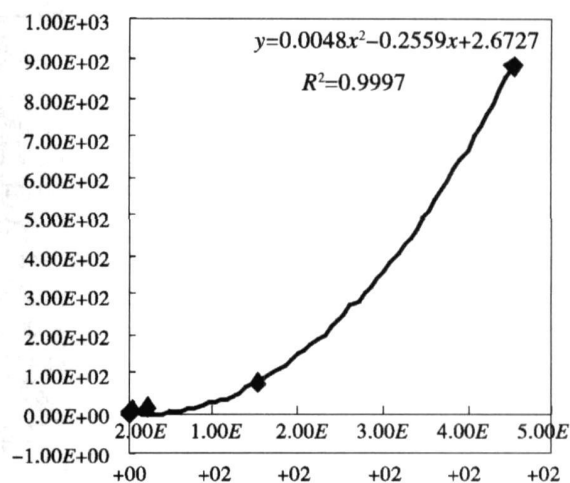


图 6 蒋家沟泥石流输沙量年际变率与小江年降水量旋回特点 N 阶次方程系数对应关系

Fig 6 The relationship between the coefficient Eq. of annual rain and the annual sediment of debris flow from 1965 to 2002

参考文献 (References)

- [1] Qin dahe, Chen Zhenlin, Luo Yong et al. Updated understanding of Climate Change Sciences [J]. Advance Climate Change Research, 2007, 3(2): 63~72 [秦大河, 陈振林, 罗勇, 等. 气候变化科学的最新认知 [J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(2): 63~72]
- [2] Wang Yuyi, Li Zhichang, Hong Yong. A study to the property of the annual sediment transformation of rainstorm debris flows at Jiangjia Ravine, Yunnan, China [J]. Journal of Natural Disasters, 2000, 9(4): 36~41 [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 [J]. 自然灾害学报, 2000, 9(4): 36~41]
- [3] Benda L. E. Predictating 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 Landslide News, 1993, (7): 9~11]
- [5] Hishio M. Prediction of debris flow forwarding and evaluation Inter [R]. Workshop on Debris Flow Kagoshima, Japan, 1993, 1~10]
- [6] Du Ronghuan, Kang Zhicheng, Chen Shengxian et al. A Comprehensive Investigation and Control Planning For Debris Flow in the Xiaojia River Basin of Yunnan Province [M]. Chongqing Branch Zongqin of Publishing Company of Science Technology Literature, 1987, 9: 33~50 [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, 9: 33~50]

- [7] Probability Statistical Group in Account Center CAS. Probability Statistical Calculation [M]. Beijing: Publishing Company of Science, 1997: 5~75 [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]
- [8] Claudia I. Iseller. A program of multivariate and partial Mann—Kendall test [EB/OL]. www.maj.liu.se 2002
- [9] Ren Guoyu, Wu Hong, Chen Zhengshong. Spatial Patterns of Change Trends in rainfall of China [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 2000, 11(3): 322~329 [任国玉, 吴虹, 陈正洪. 我国降水变化趋势的空间特征 [J]. 应用气象学报, 2000, 11(3): 322~329]
- [10] Ding Yihui, Ren Gouyu, Shi Guangyu, et al. National Assessment Report of Climate Change (I). Climate change in China and its future trend [J]. Advance Climate Change Research, 2007, 3(2): 63~72 [丁一汇, 任国玉, 石广玉, 等. 气候变化国家评估报告: 中国气候变化的历史和未来趋势 [J]. 气候变化研究进展, 2006, 2(1): 9~13]
- [11] Wang Yanjun, Jiang Tong, Shi Yafeng. Changing trends of climate and runoff over the upper reaches of the Yangtze river in 1961—2000 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(5): 709~714 [王艳君, 姜彤, 任国玉. 长江上游流域 1961—2000 年气候变化及径流变化趋势 [J]. 冰川冻土, 2005, 27(5): 709~714]
- [12] Du Ronghong, Kuang Mingsheng. Sedimentary Facies Character and Paleo-environment Meaning of Late Cenozoic Group in the Xijiao River Basin [A]. In: Observation and Research of Debris Flow [C]. Beijing: Publishing Company of Science, 1996: 86~95 [杜榕桓, 况明生. 云南小江流域第四纪泥石流形成和发展时空过程的形成 [A]. 见: 泥石流观测与研究 [C]. 北京: 科学出版社, 1996: 86~95]
- [13] Wang Yuyi, Li Changzhi, Hong Yong. A study to the property of the annual sediment Transformation of rainstorm debris flows at Jiangjia Ravine, Yunnan, China [J]. J. of Nature Disaster, 2000, 9(4): 36~41 [王裕宜, 李昌志, 洪勇. 暴雨泥石流输沙年际变率旋回性研究 [J]. 自然灾害学报, 2000, 9(4): 36~41]
- [14] Chen Jingyu, Wang Kai. The relationship between rainfall and debris flow in upper reaches of Changjiang River [A]. In: Observation and Research of Debris Flow [C]. Beijing: Publishing Company of Science, 1996: 119~125 [陈景武, 汪凯. 长江上游降雨特征与泥石流 [A]. 见: 泥石流观测与研究 [C]. 北京: 科学出版社, 1996: 119~125]
- [15] Wang Ruiyuan, Zhang Gengjuan. A study of experts system in rainstorm debris flow forecast [A]. In: Forecast Prediction and Estimate Methods in Key Stone Region of Slide Slope and Debris Flow [C]. Kunming: Publishing Company of Science and Technology, 1995: 3~5 [王瑞元, 张根娟. 暴雨泥石流预报专家系统研究 [A]. 见: 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]

The Relationship between the Variation of Annual Rainfall and the Variation of Sediment Transport by Debris Flows at Jiangjia Gully in the Upper Reach of Yangtze River

WANG Yuyi², JIAN Chiyandeng², TIAN Bing^{4,5}, HONG Yong², ZOU Renyuan²

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

2. Chengdu Institute of Mountain Hazards & Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China

3. Dept. Of Hydraulics & Ocean Engineering, Cheng Kung University, Tainan, Taiwan 70101, China

4. College of Resources & Environment Science, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050061, China

5. Graduated School of Chinese Academy of Sciences Beijing 100049, China

Abstract: The result also showed that the average annual rainfall in 1990 s was about 96.5 mm (16.2%) larger than that in 1956~1989. The variation of annual rainfall and the variation of sediment transport by debris flows at Jiangjia Gully were studied based on 37 years observation data in order to investigate the impact of climate change on annual sediment transport by debris flows. The result showed that there was significant increase of annual sediment transport in 1990 s. Comparison with the annual sediment transport in the period of 1965 to 1989, the increase of average annual sediment transport in 1990 s was about 910 000 m³/yr. This showed that the increase of rainfall resulted in the increase of debris flow sediment transport. This study has revealed the preliminary trends of debris flow annual sediment transport and its relation with the annual rainfall variation at Jiangjia Gully.

Key words: rainfall induced debris flow; debris flow sediment transport; annual change of sediment transport; rainfall change prediction in short time scale