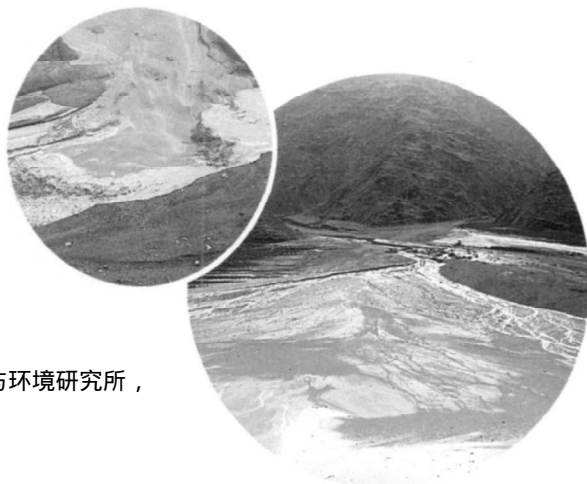


文章编号: 1673-1719 (2011) 05-0342-07

中国云南小江流域泥石流暴发 与 ENSO 的关联性

崔 鹏¹, 汶林科¹, 向灵芝^{1,2}

(1 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室 / 成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 2 中国科学院研究生院, 北京 100049)



摘 要: 选取典型泥石流发育区云南小江流域为研究对象, 利用典型泥石流沟滇北小江流域蒋家沟的长期观测资料, 分析了小江流域泥石流暴发与该流域邻近的沾益及会泽常规气象站夏季(6—8月)降水的关系, 以及小江流域及其周边地区夏季降水与 ENSO 的关系。结果表明, 蒋家沟泥石流暴发的次数与夏季降水量有显著的正相关关系, 而夏季降水和前期的 Nino3 区海表温度(SST)呈显著的负相关; 每年泥石流发生的次数与首场泥石流发生的早晚关系密切, 而激发首场泥石流的降水量与冬春 Nino3 区 SST 呈负相关; 泥石流暴发次数与大雨日数关系密切, 而大雨日数与 Nino3 区 SST 具有较好的对应关系。这说明冬春季 Nino3 区 SST 对小江流域泥石流的暴发次数有显著的影响, 形成了 ENSO 与小江流域及蒋家沟泥石流发生的关联性。分析结果亦表明, Nino3 区 1 月 SST 与当年蒋家沟泥石流次数具有显著的负相关关系, El Niño 位相年泥石流少发而 La Niña 位相年泥石流多发。Nino3 区 SST 变化最少要超前泥石流暴发 4 个月, 因而 ENSO 可以为云南北部泥石流的预测预报提供一种指标信息, 从而有可能利用 ENSO 冬季信息来预测小江流域及其周边地区(滇北)当年夏季泥石流活动。

关键词: ENSO; 降水; 泥石流; 灾害预测**中图分类号:** P426.616**文献标识码:** A

引 言

降水是降雨型泥石流的主要激发因素。因此, 研究泥石流形成与降水的关系对于泥石流预测预报具有重要意义。

ENSO 对全球气候的影响是当前气候研究中十分关注的问题。越来越多的证据表明, 全球和局地气候异常与 ENSO 有密切关系。ENSO 的出现往往造成异常洪涝, 引发地质灾害, 造成巨大损失。大气环流异常导致的降水增加会引发滑坡泥石流灾害。Coe 等^[1]研究证明了大气的低频振荡, 如 1982/1983 年和 1997/1998 年的强 El Niño 对加利福尼亚和

中美洲地区产生强烈影响。特别在 1997/1998 年, 接近于历史记录的高强度降水(相当于夏季降水量均值的 2.4 倍)所激发的滑坡、泥石流给旧金山湾的 10 个县造成了近 1.5 亿美元的财产损失^[2]; 1997/1998 年 El Niño 造成的滑坡、泥石流灾害损坏了肯尼亚的农业、公路、桥梁、通信以及电力设施, 并造成了人员伤亡^[3]。北大西洋涛动(NAO)同样对欧洲的滑坡、泥石流有强烈的影响, Trigo 等^[4]的研究表明, 里斯本周边的大型滑坡与低 NAO 年的持续强降水有密切联系。

云南地处典型的季风气候区, 受东亚季风和印度季风的共同影响, 水汽来源较为复杂。同时, 由

收稿日期: 2011-04-27; 修回日期: 2011-05-26

资助项目: 国家 973 计划项目“中国西部特大山洪泥石流灾害形成机理与风险分析”(2011CB409902)

第一作者: 崔鹏(1957—), 男, 研究员, 主要从事山地灾害与水土保持研究。E-mail: pengcui@imde.ac.cn

于云南地形高差悬殊,往往会在有利的大气环流下产生局地强降水,发生局地洪涝并激发滑坡、泥石流灾害。云南省也是我国遭受滑坡、泥石流灾害最严重的省份之一,近年来,滑坡、泥石流平均每年造成约 200 人死亡和巨大的财产损失。据建华等^[5]、张小玲等^[6]研究了 ENSO 对云南降水的影响,发现其最主要的特征是在 El Niño 年云南初夏降水较少,雨季延迟,秋季降水较多,但二者相关性只在一定时段显著。

局地性暴雨和区域性大雨(本文指>25 mm 降水)是降雨型泥石流暴发的主要激发因素,对于区域泥石流预报而言,区域性大雨及其相关信息是泥石流预报的重要依据。本文选取典型泥石流发育区云南小江流域(被称为泥石流天然博物馆)作为研究对象,利用典型泥石流沟——蒋家沟的长期观测资料,分析泥石流暴发与降水的关系以及 ENSO 对小江流域及其周边地区降水的影响,试图找出 ENSO 与小江流域泥石流暴发的联系。希望这种联系可以作为预测该区域泥石流活动的依据,为区域泥石流减灾提供服务。

1 研究区域与典型流域蒋家沟概况

小江流域位于康滇地轴东缘的小江深大断裂带,岩层破碎,新构造运动活跃,地震活动频发(每年观测到的 3 级以上地震超过 30 次),侵蚀作用强烈,滑坡崩塌发育,泥石流活动频繁,仅小江干流就有 117 条泥石流沟(图 1),其中大白泥沟、小白泥沟、蒋家沟等十余条流域为典型的高频泥石流沟。在大气环流引起的区域降水影响下,小江流域泥石流(特别是高频泥石流)具有群发性特点,常常堵断江流,冲毁道路,淤埋农田,造成巨大损失。蒋家沟是最为典型的高频泥石流沟,暴发频繁,历时长,成为泥石流观测得天独厚的原型,并于 1961 年设站进行原型观测。蒋家沟流域面积 47.1 km²,主沟长 12.1 km,沟床平均纵比降为 138‰,沟内有松散固体物质约 12.3×10^8 m³。由于坡度大、固体物质充足,降

水是泥石流形成的主导因素。根据多年的观测和考察,蒋家沟由区域降水引发的泥石流与小江流域群发性泥石流具有同步性。因此,可以把蒋家沟在区域降水作用下形成的泥石流作为小江流域泥石流活动的代表,利用蒋家沟泥石流的长期观测资料分析泥石流暴发与区域大雨以及导致区域降水的 ENSO 的关系。

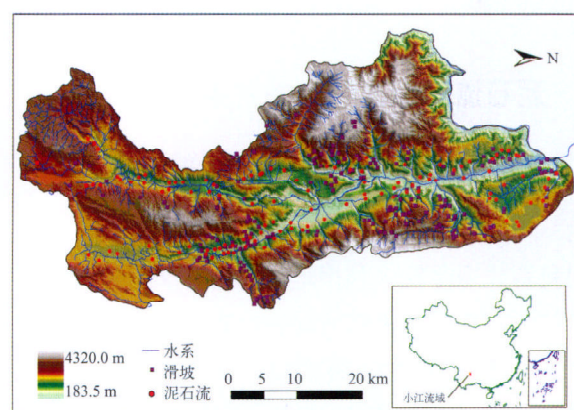


图 1 小江流域地形与泥石流分布

Fig. 1 Distribution of debris flows in Xiaojiang River basin

2 资料

研究中使用了以下 4 类资料:

(1) 蒋家沟年泥石流暴发次数资料以及暴发的时间。泥石流观测站建站以前以及建站初期的泥石流观测不连续(1970—1973 年,1979—1981 年,1986—1987 年无观测资料),连续的观测开始于 1987 年。为了延长时间序列,我们将 1965—1987 年不连续的泥石流观测资料也纳入分析(图 2)。

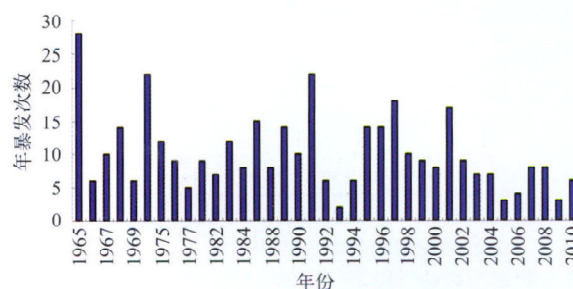


图 2 1965 年以来蒋家沟年泥石流暴发次数

Fig. 2 The debris flow number time series of Jiangjiaguo ravine since 1965

河段水面沿河流方向的高程差与相应的河流长度之比被称为纵比降。

(2) 2005年6-7月蒋家沟自动气象站每10 min的降水资料。

(3) 中国气象局 (<http://cdc.cma.gov.cn/>) 公布的滇北、川南、黔东的月和日降水资料(1951—2009年), 日降水时段为前日20:00到当日20:00。

(4) 赤道东太平洋 Nino3 区海表温度 (SST) 资料引自 <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climate-indices/list/>。

3 泥石流暴发与降水的关系

蒋家沟泥石流站于2004年秋季安装自动气象站, 降水观测的时间序列较短。为了和泥石流长序列观测数据比较, 利用距离小江流域最近的会泽和沾益两个常规气象站的观测数据来延长序列。这两个气象站中, 会泽与蒋家沟的距离大约30 km, 但会泽处于蒋家沟的背风坡; 沾益虽然距离蒋家沟较远, 但两者水汽来源方向一致。将蒋家沟2005年6月7日—7月17日每10 min降水资料换算成前日20:00到次日20:00的日降水, 以达到与中国气象局的日降水资料一致。比较蒋家沟的日降水与会泽、沾益站的日降水(图3), 发现蒋家沟与沾益、会泽站日降水的相关系数分别为0.781和0.641, 与沾益的相关好于会泽, 两站与蒋家沟的相关关系均通过了0.01

的显著性水平。为了利用更长的时间序列, 本文主要利用与蒋家沟泥石流观测站降水相关较好的沾益气象站的降水来分析泥石流暴发与降水的关系, 同时利用会泽站的降水进行对照。

蒋家沟泥石流暴发次数平均每年有10次左右, 最高可达28次(1965年), 最少的也有2次(2005年)。数据分析表明, 6、7、8月泥石流暴发的次数与相应月的降水量呈显著的正相关。泥石流主要发生在6—8月, 占泥石流总次数的近95%, 5、9月仅占5%。本文选择6、7、8月这3个月的泥石流发生频次分析泥石流暴发与相应月沾益站、会泽站降水量的关系。图4表明, 沾益站和会泽站6、7、8月降水量都与蒋家沟相应月份泥石流发生的累计频次有较好的关系。其中7、8月的相关较好, 相关系数分别达到0.598和0.681, 达到了0.01的显著性水平; 6月的降水量和相应月泥石流发生次数的关系不如7、8月。这是由于小江流域干湿季分明, 5月下旬到6月中旬土壤干燥, 6月的降水大部分被土体吸收, 增加土体含水量, 直接用于形成泥石流的雨量较少, 泥石流规模一般较小; 况且5—6月的泥石流需要消耗一部分物质在沟道铺床上, 相当一部分泥石流停积于监测断面以前, 观测记录不能反映这部分泥石流的发生状况。6月份泥石流观测站断面上能观测到的泥石流大多是由较强降水引发的泥石流。因而

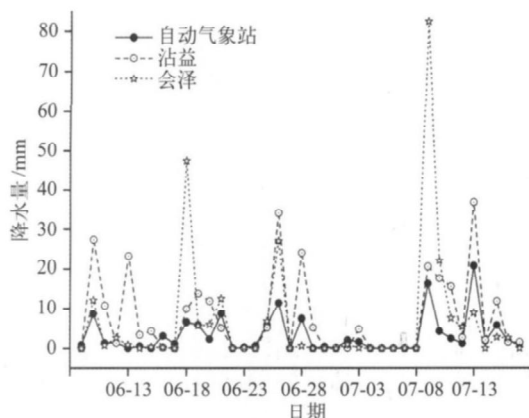


图3 蒋家沟自动气象站与会泽、沾益常规气象站逐日降水比较(2005-06-07—2005-07-17)

Fig. 3 Comparison of daily rainfall of Jiangjiagou automatic meteorological station with Huize and Zhanyi conventional meteorological stations in June and July of 2005

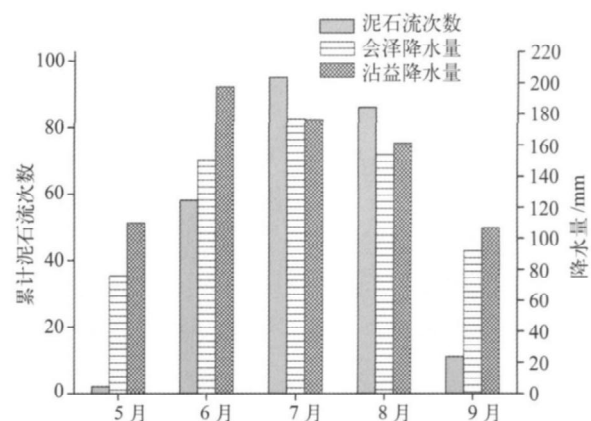


图4 蒋家沟泥石流累计发生次数与沾益站和会泽站多年平均月降水量的关系(1965—2005年)

Fig. 4 Relationship between accumulated monthly frequency of debris flow in Jiangjiagou ravine and average monthly rainfall at Zhanyi and Huize meteorological stations in the period 1965–2005

在同样降水条件下,与土体内部水分较充分的7、8月相比,6月份的泥石流发生频次较少。

对蒋家沟泥石流暴发次数和暴发时间的观测记录进行分析,发现当年泥石流暴发次数与首场泥石流暴发时间的早晚具有较好的反相关关系,即首场泥石流出现时间越早,当年泥石流暴发的总次数越多,其回归关系为

$$Y = -0.168X + 189.97,$$

式中, Y 是泥石流暴发的次数, X 是首场泥石流发生日的序号。二者相关系数绝对值在0.5以上。这说明,每年大雨出现的早晚和当年6—8月降水量和大雨日数有较好的对应关系。分析发现,滇北首场大雨发生早晚与当年总雨量和大雨日数均显著相关,通过了0.05的显著性检验。且其与泥石流的发生频次具有很好的对应关系。

大雨是泥石流发生的主要原因,本文选择大雨日数作为每年6—8月的极端降水指数,分析沾益气象站大雨与蒋家沟泥石流暴发频次的关系(图5),发现泥石流暴发与大雨日数有较好的对应关系,相关系数在0.5以上,通过了0.01的显著性检验。

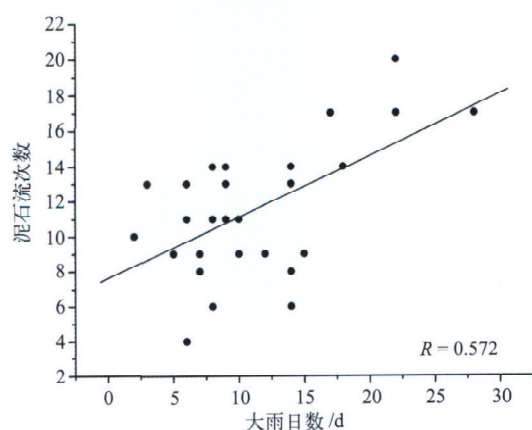


图5 蒋家沟泥石流暴发次数与沾益大雨日数的关系 (1965—2010年)

Fig. 5 JJA frequency of debris flow in Jiangjiagou ravine versus JJA days of daily precipitation > 25 mm at Zhanyi station in the period 1965–2010

4 ENSO 对云南北部降水的影响

据建华等^[9]指出,云南地区5—6月份降水与前

期Nino3区SST呈负相关,ENSO对云南降水的影响主要表现为云南雨季起讫的早晚。蒋家沟及小江流域首场泥石流暴发也与5—6月的降水有密切关系。本文重点分析ENSO与滇北以及小江流域5—6月降水的关系。

选取小江流域周边的12个常规气象站(沾益、丽江、泸西、玉溪、会泽、昆明、会理、元谋、楚雄、华坪、四川的盐源和贵州的盘县),分析5—6月降水和1月Nino3区SST的关系,发现二者呈显著的负相关关系,其中大多数站点的相关均通过了0.05的显著性检验(图6)。就小江流域相邻的两个常规观测点而言,会泽和沾益的5—6月及6、7、8月的降水都和前期Nino3区1、2、3、4月的SST呈显著的负相关关系,均通过了0.05的显著性检验(图略)。

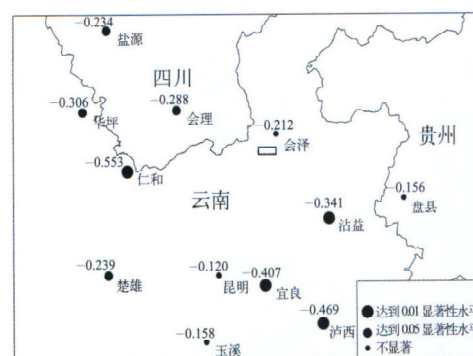


图6 小江流域周边5—6月降水与1月Nino3区SST的关系
Fig. 6 Correlation coefficients of May–June rainfall at single station around Xiaojiang River basin with January Nino3 SST in the period 1951–2010

为了进一步验证Nino3区SST与小江流域6—8月降水的对应关系,本文选取了1951年以来Nino3区1月海温距平($SSTA > 0.3s$ (s 为标准差)的15年和 $< -0.3s$ 的18年进行分析(表1),发现在Nino3区1月海温距平 $> 0.3s$ 的15年里,沾益有13年出现降水负距平,2年为正距平,少雨年占86.7%,说明在El Niño位相年降水明显偏少;而在Nino3区1月海温距平 $< -0.3s$ 的18年里,沾益有10年为降水正距平,8年为负距平,说明在La Niña位相年,降水的差异并不明显。上述分析说明,ENSO对小江流域降水的影响主要体现为El Niño位相年降水明显偏少。

表1 1月Nino3区SSTA>0.3s和<-0.3s时沾益6—8月的降水距平分布(1951—2010年)

Table 1 JJA precipitation anomaly percentage of Zhanyi station when January Nino3 SSTA > 0.3s and < -0.3s in the period 1951-2010

年份	SSTA<-0.3s	降水距平百分率/%	年份	SSTA>0.3s	降水距平百分率/%
1968	-1.37	37.41	1998	2.65	-6.48
1971	-1.33	13.03	1983	2.64	-14.70
2008	-1.23	-6.09	1992	1.39	-64.43
1974	-1.12	33.92	1987	1.14	-7.19
1985	-1.09	21.95	1973	1.11	0.67
2000	-0.97	-7.49	1958	1.09	1.90
1976	-0.89	38.01	2010	0.84	-7.02
1999	-0.71	1.75	1966	0.60	24.90
1981	-0.68	-16.69	1995	0.59	-6.11
1989	-0.67	-32.13	1977	0.54	-1.81
1996	-0.56	-25.17	1953	0.53	-29.05
1975	-0.55	-21.53	1969	0.46	-7.69
1997	-0.53	44.12	2003	0.42	-30.43
1963	-0.47	15.05	1952	0.41	-13.01
1986	-0.47	11.28	1993	0.33	-16.23
2009	-0.43	-3.75			
1960	-0.36	-11.19			
1956	-0.34	-14.43			

就大雨而言,沾益大雨日数均与Nino3区海温距平有较好的负相关关系(图7),且通过了0.05的显著性检验。从而说明Nino3区SST与激发泥石流的大雨日数具有一定的相关性,有可能利用前期冬春季的Nino3区海温距平预测当年夏季小江流域的大雨趋势。

Nino3区SST影响滇北降水的机制是:当位于太平洋东部的冬春季Nino3区SST处于正距平时,位于太平洋西部暖池区海温变冷,太平洋赤道区的信风变弱,Walker环流相应也较弱,孟加拉湾和南海的对流及低值系统也会受到抑制;而南海对流系统作为季风环流和Walker环流的共同上升支,其强度的减弱将会影响到孟加拉湾水汽向云南的输送,造成滇北5、6月份少雨以及夏季风建立的延迟。董海萍等^[7-8]认为,云南夏季风建立的早晚与云南夏季降水的多寡有很好的对应关系,夏季风建立早的年份,雨季开始较早,降水较多。

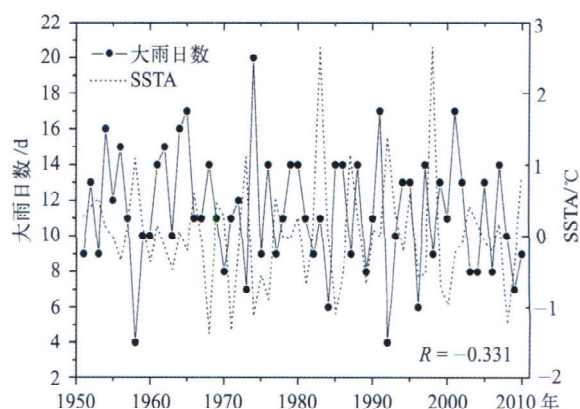


图7 沾益大雨日数与前期1月Nino3区SSTA的对应关系
Fig. 7 Relationship between JJA days of daily precipitation > 25 mm at Zhanyi station and January Nino3 SSTA in the period 1951-2010

5 小江流域泥石流暴发与 ENSO 的联系

依据上述分析,小江流域周边6—8月降水与蒋家沟泥石流暴发关系密切,从而可以寻找ENSO与

小江流域泥石流暴发之间的联系。

利用小江流域蒋家沟泥石流观测站的泥石流观测资料, 分析了 1965 年以来近 37 年泥石流发生次数与 Nino3 区 1 月海温距平的关系 (图 8), 结果显示泥石流发生次数与 Nino3 区 SST 有显著的反相关关系, 且通过了 0.05 的显著性检验。Nino3 区 1 月海温的负位相年共有 19 年, 其年均泥石流暴发 12.3 次 (平均距平为 2.1 次), 而正位相年有 18 年, 其年均泥石流为 7.9 次 (平均距平为 -2.3 次)。

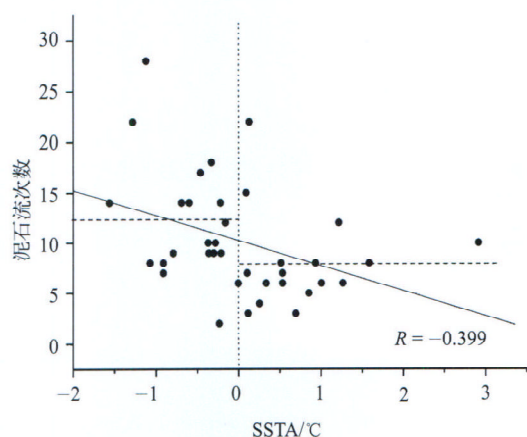


图 8 蒋家沟泥石流暴发次数与 Nino3 区 1 月 SSTA 的关系
Fig. 8 Yearly number of debris flows in Jiangjiagou ravine versus January Nino3 SSTA in the period 1965–2010

自 1965 年以来的近 37 年中蒋家沟观测到的泥石流暴发总次数为 376 次, 平均每年暴发 10.2 次。定义年泥石流暴发次数 ≥ 10 次的为泥石流多发年, 而 9 次以下者为少发年。分别对 Nino3 区 1 月海温距平 > 0 和 < 0 的泥石流多发年和少发年进行统计, 可以发现在 Nino3 区 1 月海温距平 < 0 的年份 (La Niña 位相年) 泥石流的多发和少发分别为 11 年和 8 年, 多发年略占优势; 而在海温距平 > 0 (El Niño 位相年) 的 18 年中, 有 14 年泥石流是少发的, 只有 4 年泥石流多发。这也和前文分析的 ENSO 对 6—8 月降水的影响是一致的, 即在 El Niño 位相年, 蒋家沟泥石流暴发次数显著偏少, 而在 La Niña 位相年, 蒋家沟泥石流暴发次数略偏多。

由此可见, 把冬春季 Nino3 区海温距平作为预测泥石流活动趋势的间接指标, 具有一定的可行性。

6 结论与讨论

本文通过分析小江流域泥石流暴发次数与降水以及 ENSO 的关系, 得到以下结论:

(1) 云南小江流域蒋家沟的泥石流主要在 6、7、8 月暴发, 泥石流暴发的次数与 6、7、8 月降水量呈显著的正相关, 特别是泥石流暴发次数与大雨日数关系密切。

(2) 蒋家沟泥石流发生的次数与当年首场泥石流发生的早晚关系密切, 而激发首场泥石流的降水量与前期冬春季 Nino3 区海温呈负相关。大雨日数与 1 月 Nino 3 区海温具有较好的对应关系。

(3) ENSO 可以通过影响降水而对泥石流暴发产生影响。ENSO 对小江流域降水的影响主要体现为 El Niño 位相年降水明显偏少, 少雨年占 86.7%; 前期的 Nino3 区 SST 与滇北 6—8 月降水呈显著的负相关关系; 进而发现 1 月 Nino3 区 SST 对小江流域泥石流的暴发次数有显著的影响, El Niño 位相年泥石流少发而 La Niña 位相年泥石流多发, 这种差异在 El Niño 位相年表现得尤为明显。这说明有可能利用前期冬春季 Nino3 区海温距平来预测滇北夏季泥石流的活动趋势。

ENSO 与滇北降水以及小江流域泥石流暴发频次之间呈现显著的负相关关系, 因此 ENSO (Nino3 区 SST) 的超前信息和良好的持续性为云南北部泥石流的预测预报提供了一种指标, 从而有可能利用 ENSO 冬季信息来预测小江流域及其周边地区 (滇北) 当年夏季泥石流活动趋势, 使得泥石流预测时间提前 4 个月左右, 有利于提前应对可能出现的大范围、群发性泥石流灾害。但是, Nino3 区 SST 和泥石流发生次数的相关性是一种遥相关, 泥石流发生的样本还很有限, 如果要建立具有预测价值的 Nino3 区 SST 和泥石流发生次数的定量关系, 相对准确地预测 6—8 月泥石流暴发情况, 还需要补充区域性泥石流活动信息, 进一步开展系统深入的研究。

致谢: 王绍武教授审阅了本文并提出指导意见, 中国科学院东川泥石流观测研究站提供泥石流观测资料, 谨致谢忱。

参考文献

- [1] Coe J A, Godt J W, Wilson R C. Distribution of debris flows in Alameda County, California triggered by 1998 El Niño rainstorms: a repeat of January 1982 [J]. EOS, 1998, 79 (45): 266
- [2] Godt W. Maps showing locations of damaging landslides caused by El Niño rainstorms, winter season 1997 - 98, San Francisco Bay region, California [R]. USGS, 1999
- [3] Ngecu W M, Mathu E M. The El Niño triggered landslides and their socioeconomic impact in Kenya [J]. Environ Geol, 1999, 38: 277 - 284
- [4] Trigo R M, Zezere J L, Rodrigues M L, *et al.* The influence of the North Atlantic Oscillation on rainfall triggering of landslides near Lisbon [J]. Natural Hazards, 2005, 36 (3): 331 - 354
- [5] 据建华, 陈琳玲. ENSO 对云南地区降水影响的年代际变化 [J]. 热带气象学报, 2003, 19 (2): 191 - 196
- [6] 张小玲, 据建华, 王三杉. El Niño 对云南初夏降水的影响 [J]. 热带气象学报, 1999, 15 (2): 168 - 176
- [7] 董海萍, 赵思雄, 曾庆存. 我国低纬高原地区初夏强降水天气研究 I. 2001 年 5 月印缅槽维持期间云南暴雨及其中尺度特征 [J]. 气候与环境研究, 2005, 10 (3): 443 - 459
- [8] 董海萍, 赵思雄, 曾庆存. 我国低纬高原地区初夏强降水天气研究 II. 2005 与 2001 年 5 月云南旱涝成因的对比分析 [J]. 气候与环境研究, 2005, 10 (3): 460 - 473

ENSO Impacts on Debris Flows in Xiaojiang River Basin

Cui Peng¹, Wen Linke¹, Xiang Lingzhi^{1, 2}

(1 Key Laboratory for Mountain Hazards and Surficial Processes, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences (CAS), Chengdu 610041, China; 2 Graduate University of CAS, Beijing 100049, China)

Abstract: Using a long-term observation dataset of typical debris flows in Jiangjiagou ravine in Xiaojiang River basin, northern Yunnan Province, this paper analyzes the relationship between debris flows and rainfall as well as that between ENSO and JJA (June, July, August) precipitation of Zhanyi and Huize regular meteorological stations in the vicinity of Jiangjiagou ravine. The results show that the number of the debris-flow occurrences in Jiangjiagou Ravine are positively related to the JJA rainfall, which is significantly negatively related to the January SST in Nino3 region. Moreover, the annual number of debris flows strongly depends on the date of the first occurrence in that year, while the precipitation of May and June which triggers the first occurrence is negatively related to the Nino3 SST in winter and spring. The debris flow in Jiangjiagou is sensitive to the heavy rainfall (>25 mm) that responds well to the Nino3 SST. This suggests that the Nino3 SST in winter and spring has a powerful influence on the occurrences of debris flows in the Xiaojiang River basin. It is found that the number of debris flows in Jiangjiagou Ravine is negatively correlated with January SST in the Nino3 region: it is smaller in E1 Niño phase years and larger in La Niña phase years. Because the Nino3 SST signal is at least 4 months ahead of debris flows, so it might provide an indicator for forecasting debris flows in the northern Yunnan. Particularly, it is possible to use the winter information of ENSO to predict debris flows in the subsequent summer in Xiaojiang River basin and its vicinity.

Key words: ENSO; precipitation; debris flows; disaster forecasting