

典型暴雨泥石流堆积扇危害范围演变规律^{*1}

李彦稷^{1,2,3} 颜春达⁴ 胡凯衡^{1,2} 魏丽^{1,2,3}

(1. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041;

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;

3. 中国科学院大学, 北京 100049;

4. 云南省昆明市东川区地质灾害防治中心, 云南 昆明 654100)

【摘要】：以小江流域蒋家沟、大白泥沟为研究区，利用 1987~2014 年陆地卫星影像数据，采用面向对象自动解译和人工目视解译相结合的方法，生成两条泥石流沟不同时期堆积扇危害范围数据集产品；结合地形资料，分析不同发育期泥石流堆积扇危害范围变化情况及其影响因素。分析表明：(1)1987~2014 年，蒋家沟、大白泥沟泥石流堆积扇危害面积出现退缩趋势。(2)处于壮年期的大白泥沟流域堆积扇退缩幅度小，处于老年期的蒋家沟泥石流堆积扇退缩幅度大，且已趋于稳定。(3)水源、物源和人类活动是蒋家沟、大白泥沟堆积扇危害范围变化的主要影响因素。

【关键词】：暴雨泥石流；堆积扇；演变；TM 影像；OLI 影像

【中图分类号】：P642.23 **【文献标识码】**：A **【文章编号】**：1004-8227(2017)05-0789-08

DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201705017

泥石流运动到下游出山口后，由于坡度变缓和沟道变宽，携带的大量泥沙在沟口堆积，形成泥石流堆积扇。堆积扇是山区宝贵的土地资源，由于具有较好的水热条件，往往成为山区人们生产、生活的集中区域^[1]。同时，堆积扇作为泥石流流域的重要组成部分，也是泥石流灾害破坏最严重的区域。很多地学工作者很早就开展了针对泥石流堆积扇特征及其发育规律的研究。杜榕桓等^[2]通过对西藏古乡沟冰川泥石流形成的堆积扇堆积趋势进行分析发现，泥石流出山后的频繁改道，使得泥石流堆积扇的发

¹ 收稿日期：2016-11-04；修回日期：2017-01-07

基金项目：国家重点基础研究发展计划(2015CB452704) [National Program on Key Basic Research Project (2015CB452704)]；国家自然科学基金面上项目(41371039) [National Natural Science Foundation of China (41371039)]；中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室开放基金 [the Open Foundation of Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Processes, Chinese Academy of Sciences]

作者简介：李彦稷(1991~)，女，硕士研究生，主要研究方向为山地灾害防治工程。E-mail: 501830073@qq.com

***通讯作者** E-mail: khhu@imde.ac.cn

展不平衡,但就泥石流堆积扇形态看,从泥石流流出山到停淤,扇面地形也从起伏大逐渐趋于平缓。张金山等^[3]人通过野外长期观察研究发现,泥石流形成的堆积扇,当到达一定规模后,其纵比降基本稳定且不变,靠近主沟上游方向的坡度较小,下游方向的坡度较大。唐川^[4]将泥石流扇形地发育分为3个时期:幼年期(体积较小,长宽之比相差大,扇面上的纵比降大)、壮年期(前缘受谷底或主河水流影响,扇面趋于不对称性,扇面向主河下游一侧延伸)和老年期(扇体几乎不再扩展,体积大,长宽之差较小,扇面陈旧,植被开始恢复)。但是,目前对泥石流堆积扇危害范围变化的定量研究较少。

小江流域是我国暴雨泥石流典型区域,泥石流活动频繁。泥石流冲毁了小江沿岸公路、铁路等交通设施,同时,冲出的泥石流堆积物淹没了河漫滩上的农田,给山区人民的生产生活带来巨大的损失^[1]。分析泥石流堆积扇危害范围演变规律,对山区河流滩地开发、铁路等交通设施布局具有重要意义。以小江流域蒋家沟、大白泥沟为例,基于1987~2014年陆地卫星遥感影像,采用面向对象自动解译方法提取泥石流堆积扇形态信息,利用人工目视解译进行修正。结合流域地形数据,分析近30年小江流域典型泥石流沟堆积扇危害范围演化规律。

1 研究区概况

小江地处云南省东北部(102° 52′ ~103° 22′ E, 25° 32′ ~26° 35′ N),是金沙江一级支流。发源于鱼味后山,自南向北流经昆明市寻甸县、东川区和曲靖市会泽县,最后注入金沙江,是我国暴雨型泥石流的典型发育区,被称为“泥石流的天然博物馆”^[1]。

研究对象选取小江流域的蒋家沟和大白泥沟(图1)。蒋家沟位于小江流域下游,是流域内泥石流活动最频繁、危害最严重、人类监测研究最早的泥石流沟,流域面积48.6 km²,主沟长13.9 km,主要支沟包括门前沟、多照沟、查箐沟、大四子沟、老蒋家沟等,流域形态东宽西窄,整体呈葫芦瓢状,山高坡陡,相对高差达500 m左右^[6]。大白泥沟位于小江流域中上游的大白河左岸,主河长11.8 km,流域面积18.04 km²,是小江流域活动强度较大的一条大型泥石流沟,主要以黏性泥石流活动为主。研究区在地质上地处川滇南北构造带和新华夏北-北向构造带过渡区,地质构造复杂,地震活动强烈,岩石破碎程度高。岩性软弱,地表破碎,崩塌、滑坡活动强烈,为泥石流活动提供了充足的物源。气候受印度洋暖湿气流和地形的影响,属亚热带季风气候,垂直分布和干湿季分布显著。11月到次年4月为干季,受较强的西风环流控制,此时晴天多,气温高,但风速大,降水少,蒸发强烈,河流处于枯水期。5~10月为雨季,受印度洋西南季风和南海东南季风的影响,多阴天,少日照,降水强度大,河流处于丰水期,泥石流等地质灾害频发^[7]。

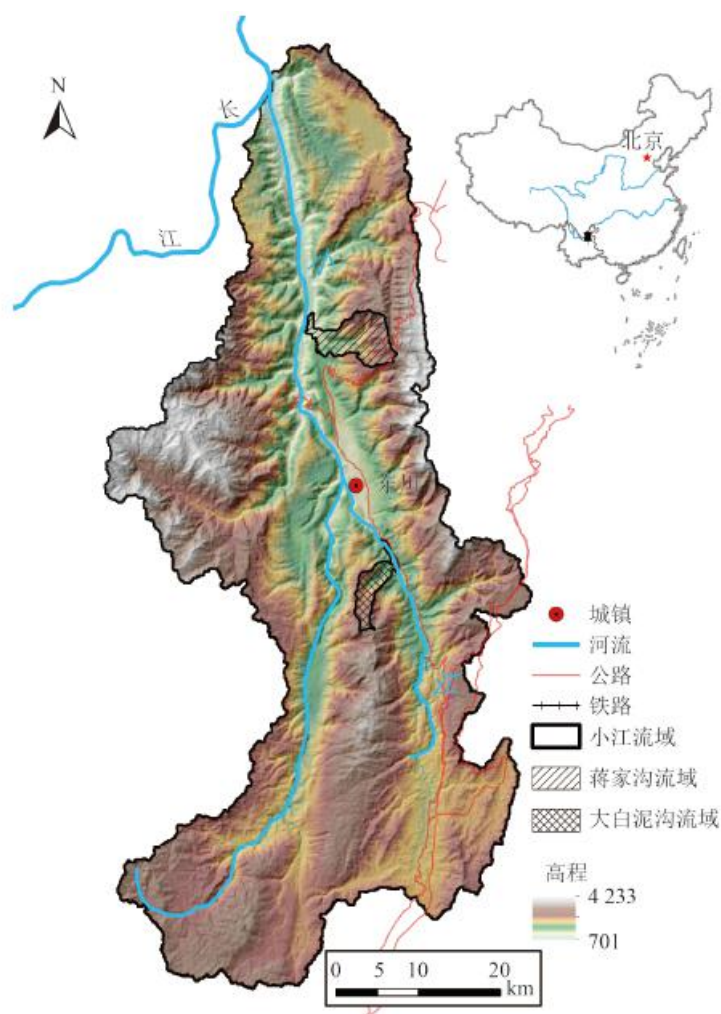


图 1 小江流域地势图

Fig.1 Terrain Map of Xiaojiang Basin

2 数据与方法

2.1 数据源

研究使用数据包括美国陆地卫星遥感数据(由 USGS 提供)和小江流域 1:50 000 地形图。其中,1987~2011 年的陆地卫星遥感数据为 Landsat-4、5 的 TM 数据,2011 年以后遥感数据为 Landsat-8 的 OLI 数据。TM 和 OLI 数据分辨率均为 30 m(TM-6 为 60 m),覆盖范围小江流域整个区域。

雨季小江流域云层覆盖概率高,5~10 月能满足研究云量要求的陆地卫星遥感影像数据有限。为了保证研究需要的高时间分辨率,结合流域降水特点,对满足需求的影像进行重分类,每年 6 月前影像算为上一年影像;6 月至次年 5 月影像算为当年影像,同时控制影像云层覆盖率小于 10%。共获得 1987~2014 年满足研究需求的影像 19 期。

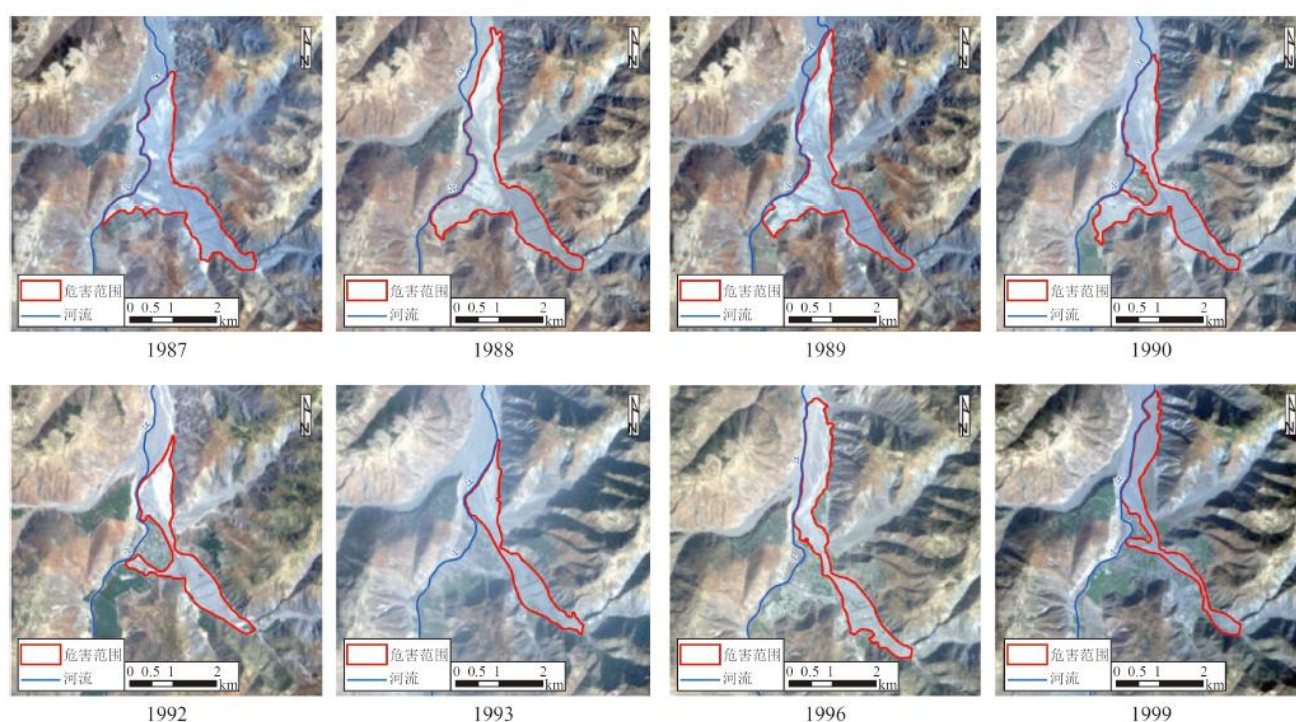
2.2 影像预处理

遥感影像正射校正 研究区地处我国西部山区，地形起伏大，不同海拔高度的太阳入射角和高度角对解译精度产生影响。利用小江流域 1:50 000 地形图对全部陆地卫星影像数据进行正射校正，降低地形的影响，保证影像的最大 RMSE 不超过 50 m^[8, 9]。影像校正在 ENVI5.2 遥感影像处理平台 FLAASH 模块^[10]进行。

2.3 遥感解译

(1)面向对象的堆积扇危害范围解译 传统的监督分类和非监督分类是利用影像像元的光谱信息^[11]，通过算法或人工目视选择样本，对影像进行分类，所得结果精度有限，容易产生“椒盐”效应^[12]。面向对象的分类是近年较主流的影像分类方法^[13]，相比较传统方法，面向对象的分类方法能很好地抑制“椒盐”噪声，提高分类精度^[14]。

(2)人工目视解译 面向对象分类获取的泥石流堆积扇危害范围存在一些混分现象，因此，结合专家经验知识，利用人工目视解译，对初步获取的泥石流堆积扇危害范围数据进行全面检查和修正，获得高质量的泥石流堆积扇危害范围变化信息，结果如图 2、图 3。



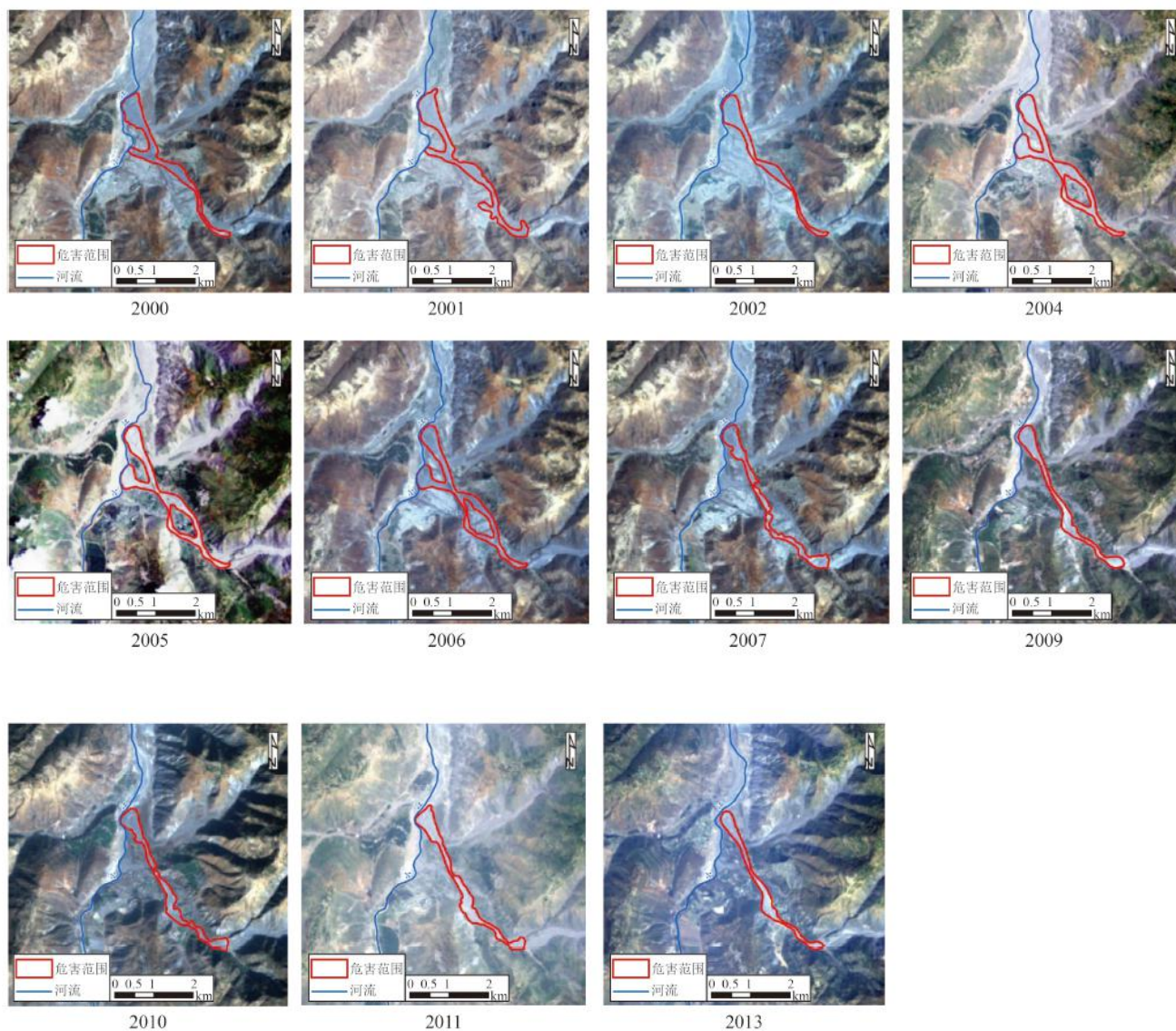
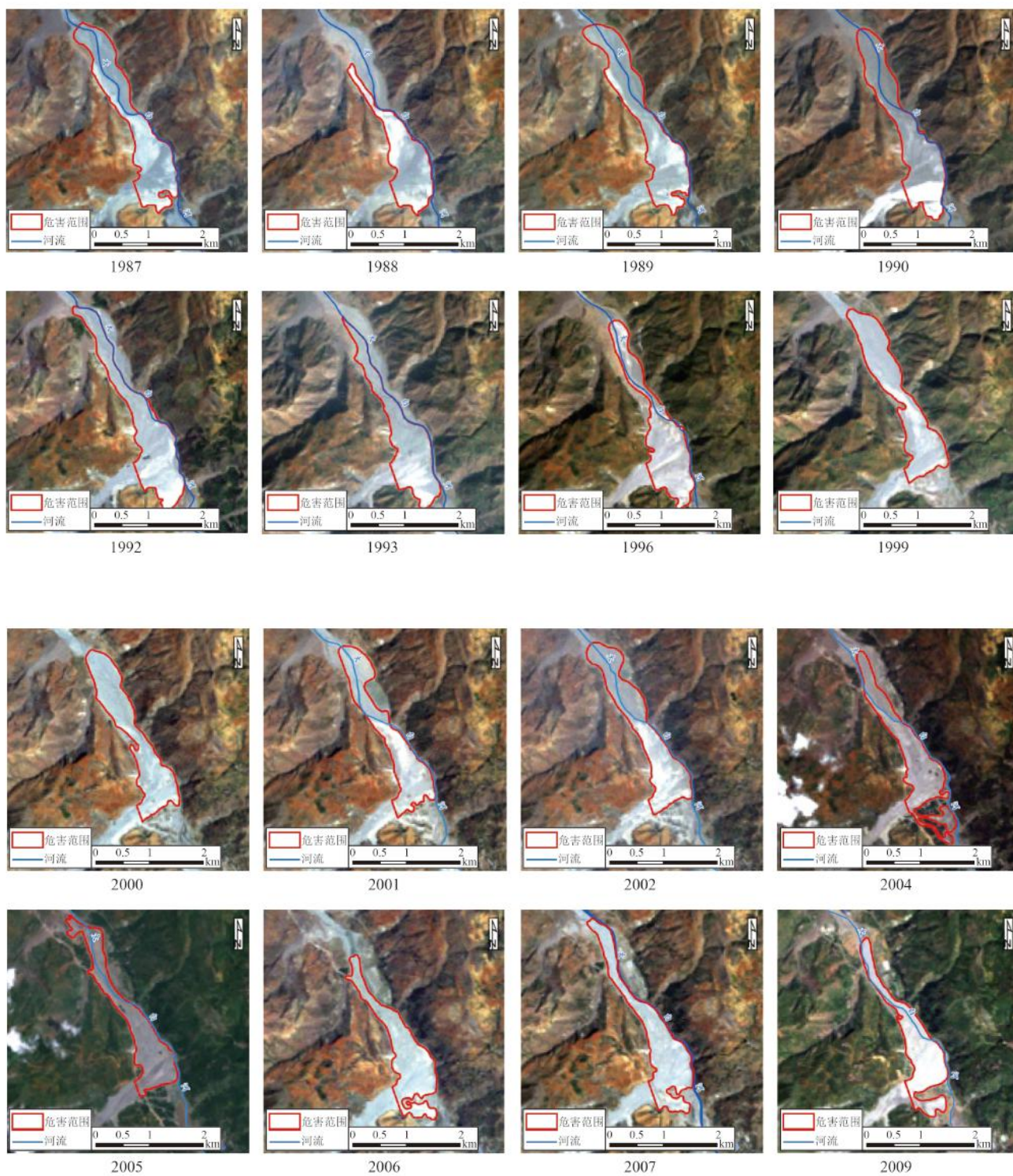


图 2 蒋家沟堆积扇危害范围遥感解译结果(统计结果见表3)

Fig.2 Interpretation Results of Hazard Areas at the Alluvial Fans in Jiangjia Catchments (the data shows in table 3)



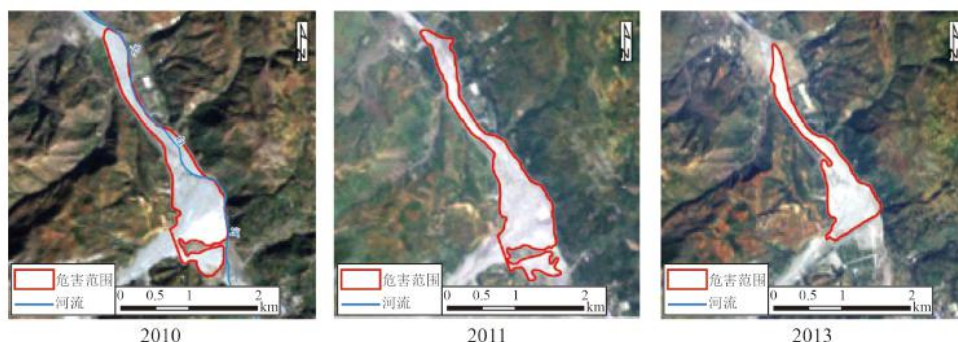


图3 大白泥沟堆积扇危害范围遥感解译结果(统计结果见表4)

Fig.3 Interpretation Results of Hazard Areas at the Alluvial Fans in Dabaini Catchments (the data shows in table 4)

(3)野外实地调查 2014年8月和2015年8月分别对蒋家沟、大白泥沟进行了野外考察和实地测量,利用GPS分别对两条沟当时的堆积扇危害范围进行实测,以验证解译结果。

3 结果分析与讨论

对蒋家沟、大白泥沟1987~2014年泥石流堆积扇危害范围变化进行解译,结果分析如下。

3.1 解译结果

(1)蒋家沟

结合图2解译结果和表1统计分析发现:蒋家沟泥石流堆积扇危害范围总体呈现退缩趋势。1987年堆积扇危害面积 3.875 km^2 ,2013年 0.706 km^2 ,减少81.69%。年均减少约 0.175 km^2 。但就每年情况看,蒋家沟泥石流扇形地危害范围变化波动大,面积最大时 4.435 km^2 (1988年),最小时 0.706 km^2 (2013年),最大面积与最小面积相差 3.729 km^2 。在2007年以后泥石流堆积扇危害范围面积在 1 km^2 以内并基本保持不变。

表1 蒋家沟泥石流堆积扇危害面积

Tab.1 Hazard Areas at the Alluvial Fans in Jiangjia Catchments

年份	实际影像获取时间	面积(km^2)	年份	实际影像获取时间	面积(km^2)
1987	1988.5.1	3.857	2002	2003.4.9	0.793
1988	1989.3.17	4.435	2004	2004.6.30	1.320
1989	1990.4.21	4.275	2005	2005.8.4	1.313
1990	1991.2.19	3.660	2006	2007.4.20	1.275
1992	1992.8.16	2.576	2007	2008.4.6	0.844
1993	1993.12.25	2.090	2009	2009.8.31	0.828
1996	1996.10.30	3.144	2010	2010.12.24	0.880
1999	1999.12.2	2.080	2011	2011.7.20	0.932
2000	2001.4.3	1.003	2013	2013.10.13	0.706
2001	2002.4.6	1.226			

野外调查发现,近年来,蒋家沟堆积扇物质补充越来越少,指示堆积扇危害范围越来越小。部分原始泥石流堆积扇区域由于没有新的泥石流物质覆盖,已有少量低矮灌木和草本植物生长。

(2)大白泥沟

大白泥沟近年来泥石流活动较蒋家沟流域频繁。通过图 3 和表 2 分析发现, 1987~2014 年, 大白泥沟堆积扇危害范围变化总体呈现缩小趋势, 1987 年堆积扇危害面积为 1.865 km², 2013 年为 0.928 km², 减少 50.24%。年均减少 0.052 km²。就每年情况看, 大白泥沟泥石流堆积扇危害范围在 1987~2014 年间也出现波动, 1996 年前后曾出现小幅扩张, 但扩张趋势不明显。总的来看, 大白泥沟泥石流堆积扇危害面积最大出现在 1989 年, 为 1.866 km², 最小出现在 2013 年, 为 0.928 km², 最大危害面积与最小危害面积相差 0.938 km²。

表 2 大白泥沟泥石流堆积扇危害面积
Tab.2 Hazard Areas at the Alluvial Fans in Dabaini Catchments

年份	实际影像获取时间	面积(km ²)	年份	实际影像获取时间	面积(km ²)
1987	1988.5.1	1.865	2002	2003.4.9	1.585
1988	1989.3.17	1.209	2004	2004.6.30	1.423
1989	1990.4.21	1.866	2005	2005.8.4	1.357
1990	1991.2.19	1.815	2006	2007.4.20	1.193
1992	1992.8.16	1.744	2007	2008.4.6	1.503
1993	1993.12.25	1.448	2009	2009.8.31	1.256
1996	1996.10.30	1.556	2010	2010.12.24	1.445
1999	1999.12.2	1.606	2011	2011.7.20	1.483
2000	2001.4.3	1.527	2013	2013.10.13	0.928
2001	2002.4.6	1.419			

据实地调查发现, 大白泥泥石流冲出沟口后, 由于对岸山体阻挡, 沿原有方向扩展受阻, 速度递减, 沿主河向下游扩散速度增加, 泥石流体逐渐向两侧扩散。遇到规模较大的泥石流时, 冲出的泥石流物质直接阻塞大白河, 形成堰塞湖; 当堰塞湖水位逐渐升高超过临界水位后, 形成溃口, 主河河水重新冲刷、侵蚀泥石流堆积物, 形成新的河道。遥感影像解译发现在近 30 年间, 大白泥沟以下的小江河道呈游荡性变化, 且在 1999、2000、2006、2011 和 2013 年形成断流。

3.2 危害区变化趋势

历史资料显示, 蒋家沟、大白泥沟泥石流暴发频繁。对两条沟泥石流进行分析, 用多项式函数分别对大白泥沟、蒋家沟 1987~2014 年暴发形成的堆积扇危害范围的遥感解译面积结果进行拟合(图 4), 结果发现, 蒋家沟泥石流危害范围退缩趋势较大白泥沟明显, 同时, 近年来, 蒋家沟泥石流堆积扇危害面积大小基本趋于稳定。野外调查蒋家沟泥石流堆积扇上自然状态下植被开始恢复, 对比唐川^[4]对泥石流堆积扇发育阶段划分, 蒋家沟泥石流活动已进入老年期, 泥石流暴发频率、规模都趋于稳定; 与之形成对比的大白泥沟泥石流堆积扇危害范围, 遥感解译显示近年来虽然总体趋势是退缩, 但退缩幅度不明显, 根据发育阶段的划分, 大白泥沟泥石流活动正处于壮年期, 泥石流活动仍很频繁。

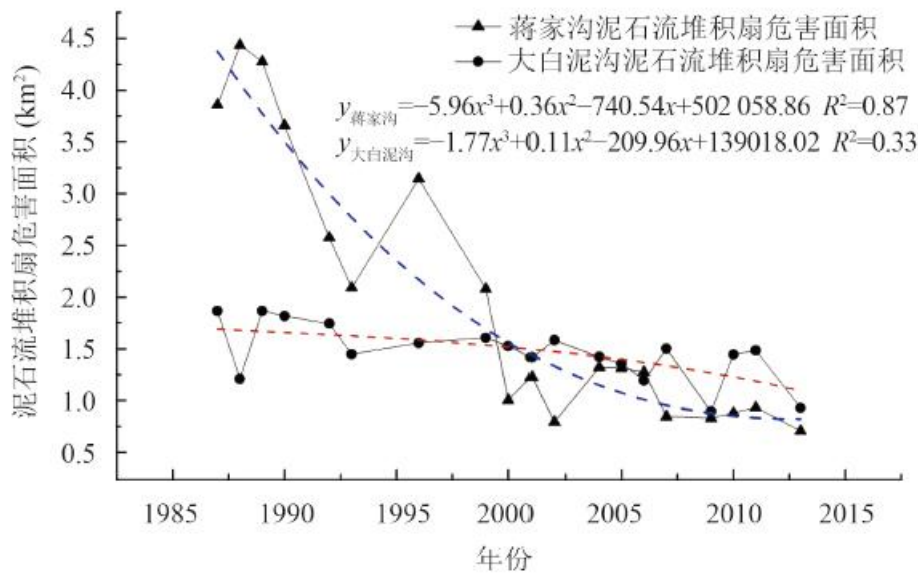


图 4 大白泥沟、蒋家沟堆积扇危害范围面积变化拟合图

Fig.4 Fitting Results of the Alluvial Fans in Dabaini and Jiangjia Catchments

3.3 变化原因分析

泥石流是水、松散物质、地形三者共同作用的产物。泥石流规模和暴发频率也受这三者的影响。自 20 世纪 70、80 年代以来,小江流域蒋家沟、大白泥沟泥石流活跃性降低,暴发规模减小,致使在下游堆积区形成的泥石流堆积扇危害范围也呈现退缩变化趋势。通过遥感影像,结合野外调查和前人研究结果,发现影响蒋家沟、大白泥沟泥石流堆积扇危害范围变化的原因如下:

(1) 水源

近年来,厄尔尼诺暴发,全球气候逐渐变暖。根据东川气象观测站观测资料显示,近 30a,蒋家沟、大白泥沟所处的东川地区气温呈升高趋势,地表蒸发量大,降水减少,地表水补给量远远小于蒸发量,地面干涸龟裂。特别是 2009 年以来,云南地区遭受严重干旱,地下水补给受到影响,地表水位下降明显。而充足的水源是泥石流形成的重要因素,因此,蒋家沟、大白泥沟泥石流暴发频率和规模受降水影响减弱,形成的堆积扇危害面积也逐渐减小。

(2) 物源

泥石流物源是泥石流过程最基本的组成。流域的松散堆积物储量对泥石流暴发规模产生影响。野外研究通过设置断面监测泥石流输沙量,从而探讨泥石流形成物源的变化。前人对蒋家沟泥石流输沙的监测见表 3^[15],分析发现 2 000 年前,蒋家沟泥石流输沙量在大多数年份均大于 $100 \times 10^4 \text{ m}^3$,但 2 000 年后,蒋家沟泥石流输沙量大部分年份均小于 $100 \times 10^4 \text{ m}^3$ (2001、2002 年除外)。说明进入 21 世纪后,蒋家沟泥石流形成区泥石流物源储量减少,导致泥石流的输沙量减少,从而使得泥石流在下游堆积区形成的堆积扇危害面积减少。

表 3 蒋家沟历年泥石流输沙量(10^4 m^3)^[15]Tab.3 Sediment Yield of Debris Flows per Year Along Jiangjia Ravine (Unit: 10^4 m^3)

年份	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
输沙量	200	263	659	119	26	200	374	315	657
年份	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	
输沙量	215	184	61	288	149	69	69	50	

(3) 人类活动

人类活动对泥石流堆积扇危害范围变化的影响使迅速而剧烈的。对蒋家沟和大白泥沟的野外调查发现, 为了控制泥石流危害, 在泥石流形成区修筑了拦砂坝, 在泥石流流通区修筑了人工排导槽。当泥石流暴发后, 拦砂坝的拦截作用使得运动到下游的泥石流物质减少, 同时, 人工排导槽能人为地引导泥石流运动, 从而控制了泥石流在堆积区形成的堆积扇危害范围。

4 结论

以小江流域泥石流暴发频繁的蒋家沟、大白泥沟为典型研究区, 利用 1987~2014 年陆地卫星影像数据分别解译两条沟泥石流堆积扇危害范围, 并进行分析, 结论如下:

(1) 从 20 世纪 80 年代末至今, 小江流域蒋家沟、大白泥沟泥石流暴发形成的堆积扇危害面积变化均呈现退缩趋势。其中, 自 1987~2014 年, 蒋家沟泥石流堆积扇危害面积缩小 3.169 km^2 , 减少 81.69%; 大白泥沟泥石流堆积扇危害面积缩小 0.937 km^2 , 减少 50.24%。

(2) 结合实地调查和前人研究结果发现, 蒋家沟泥石流堆积扇危害范围退缩明显且已逐渐趋于稳定, 说明蒋家沟泥石流活动进入老年期; 而大白泥沟泥石流堆积扇危害范围尽管出现退缩, 但每年仍有泥石流活动, 大白泥沟泥石流活动仍处于壮年期。

(3) 水源、物源和人类活动是蒋家沟、大白泥沟堆积扇危害范围变化的主要影响因素。对泥石流堆积扇危害范围变化规律的研究有助于对泥石流暴发危险性进行评价, 对扇形地土地资源开发、利用提供指导。

参考文献:

[1] 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.

【DU R H, KANG Z C, CHEN X Q, et al. A comprehensive investigation and control planning for debris flow in the Xiaojiang River basin of Yunnan Province[M]. Chongqing: Science and Technology Literature Press. Chongqing Branch, 1987.】

[2] 杜榕桓, 王立伦, 钱宗麟. 西藏古乡沟冰川泥石流堆积特征[M]//中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊(第 4 号)中国泥石流研究专集. 北京: 科学出版社, 1985: 48 - 57.

【DU R H, WANG L L, QIAN Z L. Depositional properties of glacial debris flow in the Guxiang Gully of Xizang[M]//Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences No. 4 (Chinese Debris Flow Research Album). Beijing: Science Press, 1985:48 - 57.】

[3] 张金山, 沈兴菊, 魏军林. 泥石流堆积扇发育演化特征观测研究[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(12): 1478 - 1483.

【ZHANG J S, SHEN X J, WEI J L. Observational study on the characteristics of development and evolvement of debris flow deposit fan[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2010, 19(12): 1478 - 1483.】

[4] 唐 川. 泥石流扇形地研究[J]. 云南地质, 1990, 9(3): 239 - 246.

【TANG C. Study on debris flow fan[J]. Yunnan Geology, 1990, 9(3):239 - 246.】

[5] 陈循谦, 王思荣. 东川泥石流防治回顾与展望[M]//昆明市东川区泥石流防治研究所. 东川泥石流防治研究论文集(1975~2000年). 昆明:云南科技出版社, 2000: 1 - 233.

【CHEN X Q, WANG S R. Review and prospect on debris flow control in Dongchuan[M]//Selected Papers on Debris Flow Control in Dongchuan. Kunming: Yunnan Scientific Publishing Press, 2000:1 - 233.】

[6] 吴积善, 康志成, 田连权, 等. 云南蒋家沟泥石流观测研究[M]. 北京:科学出版社, 1990.

【WU J S, KANG Z C, TIAN L Q, et al. Observation of debris flow in Jiangjia Ravine, Yunnan Province[M]. Beijing: Science Press, 1990.】

[7] 陈景武. 云南东川蒋家沟泥石流暴发与暴雨主体关系的初步分析[C]//中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊(中国泥石流研究专辑),第4号. 北京: 科学出版社, 1985: 88 - 96.

【CHEN J W. A preliminary analysis of the relation between debris flow and rainstorm at Jiangjia Gully of Dongchuan in Yunnan[C]//Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences (Research Album). Beijing: Science Press, 1985: 88 - 96.】

[8] GLCF. GLCF landsat technical guide[Z]. Global Land Cover Facility, 2007: 1 - 2.

[9] TUCKER C J, GRANT D M, DYKSTRA J D. NASA's global orthorectified Landsat data set. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2004, 70(3): 313 - 322.

[10] 邓书斌, 陈秋锦, 杜会建, 等. ENVI 遥感图像处理方法[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2014.

【DENG S B, CHEN Q J, DU H J, et al. ENVI remote sensing image processing methods[M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2014.】

[11] ZHANG L, LIAO M S. Contextual fuzzy clustering of remote sensing imagery[J]. Journal of Remote Sensing, 2006, 10(1): 58 - 65.

[12] BLASCHKE T, HAY G J. Object-oriented image analysis and scalespace: theory and methods for modeling and evaluating multiscale landscape structure[J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2001,

34(4): 22 - 29.

[13] 苏 伟, 李 京, 陈云浩, 等. 基于多尺度影像分割的面向对象城市土地覆被分类研究——以马来西亚吉隆坡市城市中心区为例[J]. 遥感学报, 2007, 11(4): 521 - 530.

【SU W, LI J, CHEN Y H, et al. Object-oriented urban land-cover classification of multi-scale image segmentation method——a case study in Kuala Lumpur City Center, Malaysia[J]. Journal of Remote Sensing, 2007, 11(4): 521 - 530. 】

[14] 王启田, 林祥国, 王志军, 等. 利用面向对象分类方法提取冬小麦种植面积的研究[J]. 测绘科学, 2008, 33(2): 143 - 146.

【WANG Q T, LIN X G, WANG Z J, et al. Extraction of winter wheat planting area by object-oriented classification method[J]. Science of Surveying and Mapping, 2008, 33(2): 143 - 146. 】

[15] 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.

【LIU X L, NI H Y. Variation property of annual sediment yield of debris flow along Jiangjia ravine and catastrophe forecast[J]. Journal of Mountain Science, 2006, 24(5): 550 - 554. 】