

小江流域泥石流堆积扇形成的制约因素及其特征

陈杰, 韦方强, 崔鹏

(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: 在系统分析了各种因素对泥石流堆积扇形成影响的基础上, 提出流域腹地中流域面积、沟床比降和堆积区主河河谷宽度及主河能量等因素对泥石流堆积扇发育的影响较大。结合 TM 卫星影像和 1:5 万地形图, 解译了小江流域内泥石流堆积扇的范围。在此基础上, 统计了流域腹地内两大重要条件—流域面积和沟床比降与堆积扇面积之间的关系。在小江流域, 堆积扇的面积随流域面积的增加而增加, 二者之间是正的指数关系; 而堆积扇面积与沟床比降之间可用一个负的指数关系式表达。最后, 堆积区特征对小江流域泥石流堆积扇的影响主要是其堆积空间限制了大型堆积扇, 比如蒋家沟泥石流堆积扇的发展。

关键词: 泥石流; 堆积扇; 流域腹地; 堆积区

中图分类号: P642.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2005)06-0704-05

中国西部山区人地关系矛盾比较敏感和突出^[1], 泥石流堆积扇往往由于地形开阔, 并且水热条件较好, 从而具有很高的生物生产力。同时, 在西南山区, 由于其严重的土地退化^[2,3], 因此对堆积扇的开发利用将会受到更多的重视。另一方面, 泥石流堆积扇比一般洪积扇更不稳定, 使得泥石流堆积扇土地利用具有高风险性。因此, 研究和掌握泥石流堆积扇的形成演化规律, 有利于指导山区居民在堆积扇上的生产和生活活动。

堆积扇的特征与流域的气候和构造背景等条件密切相关。比如文献[4]研究了堆积扇的类型和形态与环境条件的关联程度, 使用堆积扇坡度、面积和长宽比以及流域形态和物质供应率等作为判别变量, 建立判别函数, 进行判别分析。这些影响堆积扇形成的环境背景因素很多, 大的方面如地貌、水文气象和地质过程(构造过程)^[5]; 具体的影响因素如流域面积和主沟比降^[6], 另外, 泥石流的暴发频率以及主河特征(主河河谷宽度和主河能量)也在很大程度上影响泥石流堆积扇的形成^[7]。

所有的环境背景条件组成一个系统控制泥石流堆积扇的形成。在这个系统中, 各种因素所起的作用不同。而在不同地区, 影响泥石流堆积扇的形成又有不同的主导因素。本文选择小江流域这一泥石流多发区, 探讨该地区泥石流堆积扇发育的控

制因素以及主导因素。

1 泥石流堆积扇形成的制约因素及其作用

要系统理解泥石流堆积扇的形成和演变特性, 需要建立起一个包括泥石流堆积扇发育的各个变量的格架, 并且能够从成因上对各组变量进行划分。如果不考虑泥石流形成、搬运和堆积时的力学机理及具体过程, 则堆积扇的形成的必要条件有两点: 一是有一定的物质来源(一定流量和频率的泥石流); 二是要有开阔地形的存在(堆积区)。相应的, 影响山区泥石流堆积扇发育的变量取决于除堆积扇以外的流域特征和接纳泥石流的堆积区特征。因此, 将泥石流堆积扇体系看成是整个环境背景总的表现, 影响堆积扇体系的变量取决于流域腹地(除堆积扇以外的流域)特征和堆积区特征。

借用 H. G. 里丁对河流三角洲概念架构的描述^[8]并稍作修改, 此处用于描述泥石流堆积扇(图 1)。

1.1 流域腹地特征

由于流域腹地是泥石流固体物质的供应区, 其影响主要反映在泥石流的性质以及输送泥石流物质的沟道特征上。概括来讲, 流域腹地的自然特征主要有地质、地貌、水文、植被等条件^[9,10]。这些

收稿日期: 2004-08-10; 修订日期: 2004-12-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(批准号: 40201009)和国家杰出青年科学基金项目(批准号: 40025103)资助。

作者简介: 陈杰(1977-), 男, 四川眉山人, 博士研究生, 主要从事山地灾害研究。E-mail: chenjie@imde.ac.cn

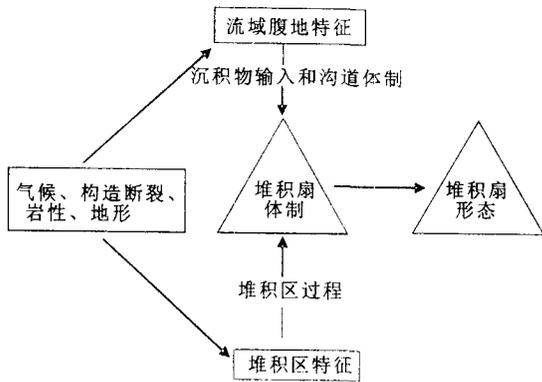


图1 各种环境条件组成的
泥石流堆积扇形成体系

Fig. 1 Development system of debris flow fans

条件的组合通过决定泥石流的流体性质(组成、密度、频率以及规模)、运动速度以及泥石流物质的输送效率等,从而影响泥石流堆积扇的形成。

流域腹地对泥石流堆积扇的影响是通过多种条件及其组合共同作用而实现的,各种条件在特定的区域中对泥石流堆积扇所起的作用大小是不一样的,作用的方式也是不一样的。不同的泥石流沟,在流域腹地的构造、岩性等地质条件相同的条件下,所产生的松散物质相近,若气候、植被条件也相似,则流域集水区面积和沟床特征(包括沟床比降和沟谷宽度)可以认为决定着泥石流的形成规模和搬运方式,因而被视为流域腹地中最重要的两个条件。腹地面积的大小从某种程度上代表了其提供固体物质的能力,从而影响堆积扇形态,特别是堆积扇面积;沟床比降不仅影响泥石流的形成,而且泥石流固体物质还通过沟床直接输送到泥石流堆积区,因此沟床比降在地貌条件当中,甚至在整个泥石流堆积扇形成的影响因素中都占据着重要的地位。

1.2 堆积区特征

堆积区是容纳沉积物的场所,堆积区特征主要是指其接纳输入沉积物的体制。堆积区体制取决于诸如泥石流沟出口位置以及出口处泥石流沟谷宽度、主河河谷宽度、形状以及主河能量条件等几个主要的相互关系。

首先,堆积区的形状和大小是决定堆积扇形状和大小的重要条件。泥石流堆积扇的形成必须要有开阔地形的存在。泥石流的堆积是伴随着流通

坡度减小、流速以及流深的降低,使整体的搬运能力下降而实现的。在堆积扇地区,坡度降低,沟道消失,泥石流减速并向两侧展宽,其固体物质也随之停积下来。可提供这种堆积的环境有:江河床面、河漫滩、阶地、山麓平原带和湖泊盆地等^[5]。一般来说,山区泥石流堆积扇展布于主河床面,因此,主河河谷的宽度以及主河的能量大小对泥石流堆积扇的形成影响极大,是堆积区中两个最重要的因素。若泥石流沟口距主河较近,而泥石流强度与主河相比太小,则很可能无法形成泥石流堆积扇,或者至少堆积扇形态不会很完整。那些大的堆积扇都是高活动强度的泥石流沟在开阔堆积区的堆积作用结果。

2 小江流域泥石流堆积扇特征分析

2.1 流域面积、沟床比降对泥石流堆积扇的影响

小江位于滇东北,属金沙江的一级支流,流域面积共3 043.45 km²,是中国泥石流活动最强烈的地区之一。小江流域共发育泥石流沟140条,选择了其中86个泥石流堆积扇进行分析研究,其中小江干流50个,支流小清河3个,支流乌龙河9个,支流块河9个,支流大白河15个。所选择的86个流域中,流域面积超过100 km²的只有3个,绝大多数都小于20 km²(73个,占84.9%)。

为了探讨流域面积、沟床比降对泥石流堆积扇形成的影响,作者以云南小江流域为例,对此进行了统计分析。方法是以TM卫星影象为基础,结合1:5万的地形图,根据泥石流与主河交汇处的影像,解译并勾绘出泥石流堆积扇范围,进而得到泥石流堆积扇的面积。再根据对应的流域面积、沟床比降资料^①(表1)。

表1 小江流域几个典型泥石流堆积扇资料

Table 1 Database of several typical debris flow fans
in the Xiaojiang River valley

堆积扇名称	堆积扇面积 (10 ⁴ m ²)	堆积扇比降 (%)	流域面积 (km ²)	主沟比降 (%)
小白泥沟	60.5	61	12.49	162
大白泥沟	143.07	52	18.1	99
蒋家沟	179	50	47.1	180
查箐沟	23.78	123	4.65	227
老村沟	49.83	67	10.7	118
补味沟	14.82	94	15.4	160
新厂沟	51.8	98	16	137

注:蒋家沟堆积扇面积系指红山嘴以下的堆积区面积。

① 资料由中国科学院特别支持领域“山地灾害——泥石流滑坡”基础研究第三期资助项目“小江流域泥石流滑坡形成背景及其分布规律”课题组提供。

沿小江主、支流沿岸分布的泥石流堆积扇密度大,常常是堆积扇成群展布,扇缘相接,极大地影响着主河的河床平面形态。同时,堆积扇之间也表现出明显的差异,包括堆积扇面积和堆积扇坡度,以及堆积扇上沟道的发育程度。

尽管泥石流堆积扇面积之间表现出较大的差异,但总体上来看,小的堆积扇基本上是与小的流域对应,而大的泥石流堆积扇基本上是与大的流域相对应。根据回归分析的结果,两者之间可以用一指数关系式表达(图 2a; $n=86, y=866\ 96 \times x^{0.401}, R^2=0.349$)。因此,同其它研究区域一样^[11,12],小江流域的泥石流堆积扇面积(F_f)与流域面积(F_w)之间也存在着 $F_f=CF_w^b$ 这样一种指数关系,只不过在这里, C 和 b 值与其它区域的值不一样。因此,在小江流域,泥石流流域面积首先是通过积水区域和流域内包含的松散固体物质量决定泥石流规模和频率,从而影响泥石流堆积扇的规模。大的流域容易形成规模和频率可观的泥石流,堆积扇的增长速度和最终面积也就比流域面积小的流域对应的堆积扇大。

另一方面,流域内松散物质存量的多寡也可以解释流域面积与堆积扇面积统计关系中的振荡。以表 1 中几条泥石流沟为例:表 1 中老村沟、补味沟、新厂沟和大、小白泥沟的流域面积相近,但后两者的堆积扇面积明显比前三个大,特别是大白泥沟的堆积扇面积超过了 1 km^2 。在这里,泥石流固体物质的补给即沟内岩性和滑坡、崩塌物的数量,决定着泥石流的发生频率和泥石流规模,从而影响泥石流堆积扇的大小。比如大白泥沟,其泥石流形成区每平方公里的松散固体物质储量为 $2\ 694 \times 10^4\text{ m}^3$,为整个小江流域平均的 1.9 倍,小白泥沟的泥石流形成区松散固体物质储量也达 $2\ 348 \times 10^4\text{ m}^3/\text{km}^2$ ^[13]。如果大的流域没有丰富的固体松散物质,也不容易形成大的堆积扇,而小的流域内如果松散固体物质丰富,也有可能形成大的堆积扇。

同时还统计了堆积扇面积与沟床纵比降之间的关系,二者可以用一负指数关系式表达(图 2b, $n=86, y=32\ 359\ 366 \times x^{-1.006}, R^2=0.203$)。泥石流沟道纵剖面形态是随泥石流的发生而不断演化的^[14],而泥石流堆积扇规模也是流域演化到一

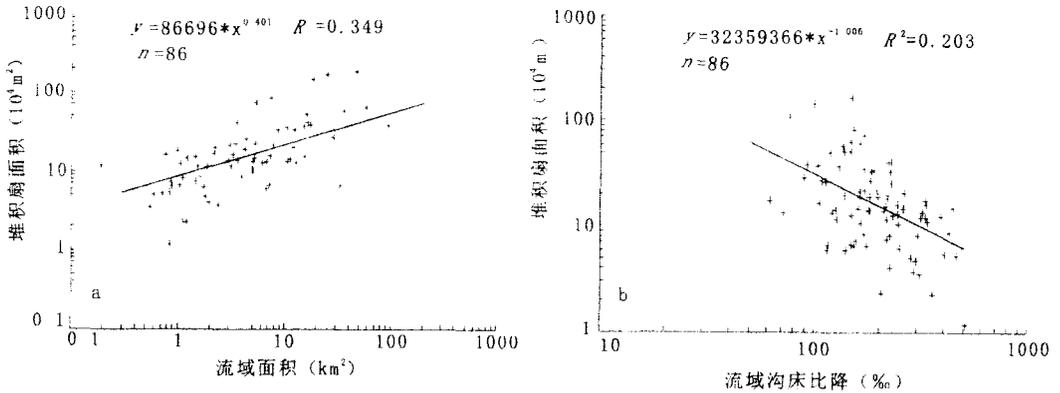


图 2 流域面积与堆积扇面积的关系(a);沟床纵比降与泥石流堆积扇面积之间的关系(b)

Fig.2 Power function relationship between drainage area and fan area (a) and power function relationship between channel gradient and fan area (b)

定阶段的结果,因此,泥石流堆积扇的发育状态也是与流域沟道发育的一定阶段相联系的。

2.2 堆积区特征对泥石流堆积扇的影响

堆积区因素主要包括主河河谷的宽度和主河能量条件,其影响表现在堆积扇完整性上。然而在小江流域,一方面小江河谷的宽度较大,有足够的空间容纳两岸的大多数泥石流堆积扇,从上游支流大白河到小江下游,主河河谷宽度一般都在 200 m

以上,有些河段甚至达到 600 ~700 m^[15];另一方面,小江的流量与泥石流规模相比很小,不能从根本上影响泥石流堆积扇形态,比如蒋家沟泥石流最大流量可为小江洪峰流量的 5 倍以上^[16]。尽管如此,某些大的堆积扇由于其所需的堆积空间特别巨大,从而表现出堆积形态上,特别是堆积扇前缘的不完整性。大、小白泥沟堆积扇,蒋家沟堆积扇和新厂沟堆积扇都属于前缘缺失的例子。

以蒋家沟堆积扇为例。蒋家沟是一条极其活跃的泥石流沟, 1965 ~2002 年平均每年发生泥石流 11.7 次, 多年平均输沙量约 $260 \times 10^4 \text{ m}^3$ ^①。与此对应的是, 堆积区(泥石流堆积扇)受到达朵台地和泥得坪台地的影响, 其格局很大程度上被这两大地形限制了。特别是其前缘受到对面达朵台地的顶托, 从而没有完全展布开(图 3), 在平面形态上, 堆积区呈不完整的扇形。小江正好处于达朵台地和蒋家沟泥石流堆积扇挤压之下, 在这一段沟床狭窄, 实际上, 有很大一部分现在是穿行在蒋家沟泥石流堆积扇上。在这种情况下, 小江位于堆积扇

“腹地”, 每年便有大量泥石流固体物质进入小江, 形成多次堵江事件, 造成巨大的财产损失^[16, 17]。同时, 由于蒋家沟泥石流的长期作用, 使得小江河床纵坡面在该处出现一个折点, 即堆积扇上游形成平坡缓流段, 堆积扇所在处及邻近下游区比降变大, 形成急滩^[18]。另一方面, 每年进入小江的一部分泥石流固体物质被带走, 减缓了堆积扇的增长速度; 主河还不断掏蚀、破坏堆积扇的前缘, 根据 2003 年的测量, 小江右侧的蒋家沟堆积扇扇面高程与小江水面高程相差约 7 ~13 m。

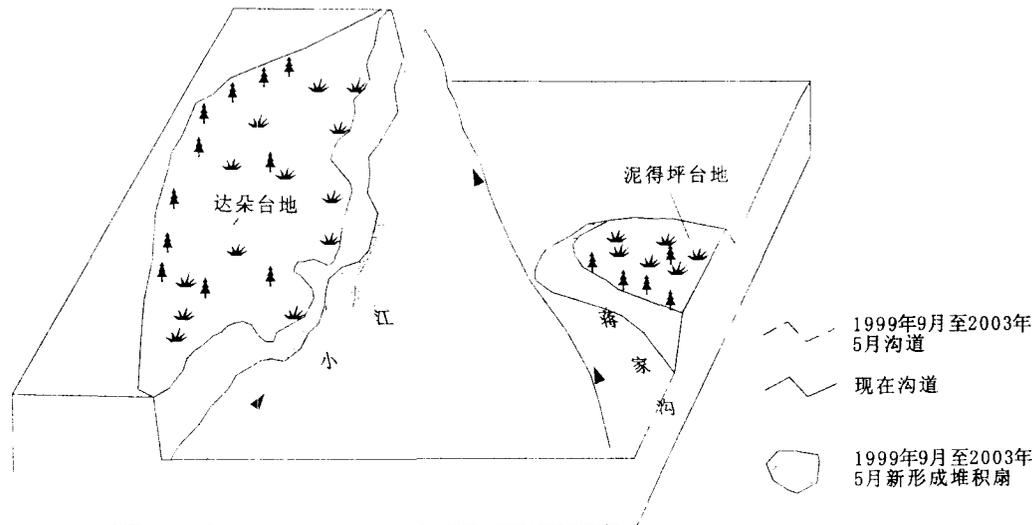


图 3 蒋家沟泥石流堆积环境示意图

Fig. 3 Sketch of the deposition environment of the debris flow fan in Jiangjiagou

3 结 论

影响泥石流堆积扇的形成因素可以归结为流域腹地特征和堆积区特征两方面。

流域腹地特征决定泥石流的性质、规模和搬运方式。流域可提供的松散物质数量和流域面积大小对泥石流规模的影响比较大, 从而潜在地影响泥石流堆积扇的形成; 而泥石流沟床比降决定了泥石流固体物质的搬运方式和搬运效率, 而且决定了到达堆积区的泥石流流速, 从而直接影响泥石流堆积扇的形态。在小江流域, 泥石流沟流域面积、沟床比降与泥石流堆积扇面积可以分别用正、负指数关系表达。

堆积区最主要的特征是指主河山谷宽度以及主河相对于泥石流的能量大小。在小江流域, 由于

具有比较大的河谷宽度, 并且主河的能量与泥石流规模相比较小, 因此小江沿岸的泥石流堆积扇普遍发育完整。但对于某些规模特别大的堆积扇如蒋家沟堆积扇而言, 由于其所要求的堆积范围广大以及受堆积地形的限制, 使得堆积扇发育受到影响。

参考文献:

- [1] 陈 勇, 陈国阶, 王益谦. 山区人口与环境互动关系的初步研究[J]. 地理科学, 2002, 22(3): 282 ~287.
- [2] 张建平. 西南地区山地不同土地退化类型特征及调控途径[J]. 地理科学, 2001, 21(3): 236 ~241.
- [3] 陈国阶. 我国西部生态退化的社会经济分析——以川西为例[J]. 地理科学, 2002, 22(4): 390 ~396.
- [4] Marino Sorriso - Valvo, Loredana Antonico, Emilia Le Pera. Controls on modern fan morphology in Calabria, Southern Italy [J]. Geomorphology, 1998, 24: 169 ~187.

① 何易平. 泥石流对山区河流河床演变的影响. 中国科学院研究生院博士学位论文, 2003. 37 ~38.

- [5] 唐川. 泥石流扇形地研究[J]. 云南地质, 1990, 9(3): 239~246.
- [6] 刘希林. 石流平面形态的统计分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1995, 15(3): 93~104.
- [7] Christine L. May, Robert E. Gresswell. Spatial and temporal patterns of debris-flow deposition in the Oregon Coast Range, USA [J]. *Geomorphology*, 2004, 57: 135~149.
- [8] H. G. 里丁(主编). 周明鉴(译). 沉积环境和相[M]. 北京: 科学出版社, 1985. 129~131.
- [9] 刘家宏, 王光谦. 基于遥感图像的泥石流地面活动程度评价[J]. 地理科学, 2003, 23(4): 454~459.
- [10] 唐邦兴. 中国泥石流[M]. 北京: 商务印书馆, 2000. 1~13.
- [11] 刘希林. 泥石流堆积扇危险范围讨论[J]. 灾害学, 1990, 5(3): 86~89.
- [12] Blair T C, McPherson J G. Alluvial fans and their natural distinction from rivers based on morphology, hydraulic processes, sedimentary processes, and facies assemblages [J]. *J. of Sed. Res.*, 1994, 64: 450~489.
- [13] 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: 中国科学技术文献出版社重庆分社, 1987. 236~242.
- [14] 蒋忠信. 藏东南泥石流沟纵剖面演化的最小功模式[J]. 地理科学, 2003, 23(1): 25~31.
- [15] 程尊兰, 吴积善, 张家福, 等. 西部山区河滩地开放与保护规划研究——以昆明市东川区小江河谷为例[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 20~57.
- [16] 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. 1~4.
- [17] 韦方强, 胡凯衡, 崔鹏, 等. 蒋家沟泥石流堵江成因与特征[J]. 水土保持学报, 2002, 16(6): 71~75.
- [18] 钱宁, 张仁. 河床演变学[M]. 北京: 科学出版社, 1987. 89~90.

Restricting Conditions and Their Characteristics for Debris Flow Fans in Xiaojiang River Valley

CHEN Jie, WEI Fang-Qiang, CUI Peng

(*Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources, Chengdu, Sichuan 610041*)

Abstract: The debris flow fans morphology is an integrated impact of its environment conditions. All of these conditions influencing the debris flow fans in the mountain area are sorted as inner-drainage basin and deposition basin. The way each condition influences the debris flow fans is analyzed systematically. Drainage basin area and channel gradient among the drainage factors, and width of main river valley and main river energy among the deposition basin factors, are elicited as more strong factors influencing the formation of debris flow fans. Using TM image and 1:50000 topographic maps, each debris flow deposited scopes are examined. Based on that, the relationship between the two most important factors of the inner-drainage basin and the debris flow fans is discussed. In the Xiaojiang River valley, the area of debris flow fans is basically increasing with the increasing of drainage area and a positive power function can be used to express the relationship; and a negative power function can be used to express the relationship between channel gradient and debris flow fan area. Lastly, the influence of depositional basin character on the Xiaojiang debris flow fans is mostly that the valid space confines the development of super debris flow fans, like Jiangjia debris flow fan.

Key words: debris flow; fan; inner-drainage basin; deposition basin