

# 泥石流堵塞主河试验特征与模式

宋志<sup>1,2</sup>, 邓荣贵<sup>1</sup>, 陈泽硕<sup>1</sup>

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 中国地质调查局 成都地质调查中心, 四川 成都 610081)

**摘要:** [目的] 分析泥石流流入汇主河后对主河的影响以及泥石流堵塞主河的模式机理。[方法] 通过泥石流堵河试验, 同时对历史泥石流堵河案例进行调查研究和典型性深入剖析。[结果] 根据泥石流运动过程与淤积形态得出泥石流堵河的 3 种模式分别为顶冲堰塞堵断模式、渗混堵塞溃决模式、束窄渐进式堵塞模式。对泥石流堵塞主河 3 种模式的运动与成灾机理进行了初步探索。[结论] 顶冲堰塞堵断模式表现为龙头顶冲对岸, 物源塞满主槽、脆弱区渗漏到主体垮塌的特征; 渗混堵塞溃决模式表现为短时塞满主槽, 水流渗混堵塞, 流量加大的特征; 束窄渐进式堵塞模式表现为主槽断面束窄、局部流量瞬时加大、渐进式局部堵塞的特征。当前的历史堵河事件以束窄渐进式堵塞为主, 与试验统计结果吻合较好。

**关键词:** 泥石流; 堵河; 模式

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)05-0100-06

中图分类号: P642.23

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.1022.001

## Experimental Characteristics and Mode of Debris Flow Blocking Main River

SONG Zhi<sup>1,2</sup>, DENG Ronggui<sup>1</sup>, CHEN Zeshuo<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China;

2. Chengdu Center of China Geological Survey, Chengdu, Sichuan 610081, China)

**Abstract:** [Objective] The objective of this study is to analyze the impact of debris flow on the main river and the possibility of debris flow blocking the main river. [Methods] We conducted experiments for the debris flow blocked river tests, and analyzed the debris flow blocking the river cases in history. [Results] Three basic modes of debris flow blocking river were concluded according to debris flow motion and deposition morphology. These modes included top damming block mode, seepage mixed jamming burst mode and narrow beam progressive blocking mode. Based on three modes, we studied the motion and the disaster mechanism of the debris flow blocking river. [Conclusion] The top rushed damming block mode was characterized as the top leading rushed across the side bank, provenance stuffed the main channel and the fragile parts seeped to the collapsed body. The seepage mixed jamming burst mode was characterized as short-term crammed into the main channel, water permeability mixed jam and increased flow. The narrow beam progressive blockage model was characterized as based groove section of narrow beam, local flow transient increasing and gradual local blockage. The current history in the river blocking events is mainly narrow and progressive blockage, and the results agree with the experimental results.

**Keywords:** debris flow; blocking river; mode

泥石流骤然间将大量包含各种粒径的泥沙输入主河, 在短时间内改变主河水沙组成及局部边界条件, 对主河水沙特性、运动特性及演变规律等都带来重要的影响。当支沟泥石流与主河相关因素对比关系在某种范围时, 支沟泥石流有可能横穿主河, 完全堵断主河水流, 形成堵河堰塞坝体, 在堰塞坝上游形

成堰塞湖。而堰塞坝结构性差、强度低, 随上游水位上涨坝体容易溃决而引发洪水等一系列次生灾害。

国内学者对泥石流堵河也进行了大量的研究, 提出了泥石流堵河模式及特征。匡尚富<sup>[1]</sup>通过理论分析和试验研究, 探讨了支沟泥石流到达主流汇流部后的特性。根据泥石流在汇流部的淤积堵塞状况, 将其

收稿日期: 2015-04-02

修回日期: 2015-06-03

资助项目: 成都地质矿产研究所青年资助项目“极端条件下泥石流堵河灾害链效应与模型试验”(所控基[2014]-05); 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开放基金(SKLG2014K020); 中国地质调查局地质调查项目(12120114069501)

第一作者: 宋志(1982—), 男(汉族), 四川省宣汉县人, 博士研究生, 工程师, 主要从事岩土工程与泥石流研究。E-mail: 35842126@qq.com。

通信作者: 邓荣贵(1960—), 男(汉族), 四川省自贡市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程与地质灾害及防治研究。E-mail: 1305118903@qq.com。

特性大致分为如下 3 种类型:(1)泥石流的泥沙全部停积在汇流部;(2)支沟泥石流进入汇流部后,部分泥沙淤积在汇流部而继续流向下游;(3)支沟泥石流在汇流部不发生淤积而通过汇流部流向下游。陈德明<sup>[2]</sup>通过试验,归纳出了泥石流与主河水流的 4 种作用方式,即泥石流堵河的 4 种模式:“部分—完全堵河模式”、“潜入模式”、“掺混并潜入模式”、“顶冲对岸模式”。陈春光等<sup>[3-4]</sup>通过室内模型试验,观察到了泥石流流入汇主河的“潜坝壅堵”、“堰塞坝局部阻塞”、“堰塞坝全堵”3 种泥石流堵河模式,并建立了局部堵河和泥石流潜坝式堵河的数学方程。刘翠容<sup>[5-6]</sup>研究了典型堵河事件,提出了泥石流堵塞大河的特点:存在全堵、壅堵和局部堵塞 3 种堵河模式;其中局部堵塞是最普遍的堵河形式,高速水流冲刷异岸,或迫使主河改道而成灾是泥石流局部堵塞大河的主要成灾模式之一。本文以泥石流流入汇主河水槽模型试验为基础,研究泥石流堵河主河试验特征研究与堵河模式,以期揭示泥石流与主河交汇初期相互作用机理,提出合理的泥石流堵河模式,以期为复杂山区泥石流防灾减灾提供理论与实践依据。

## 1 试验方案与装置

通过对大量典型泥石流堵河事件的统计分析发现,大部分泥石流沟平均纵坡都在 90%~300%,也就是说大部分泥石流沟纵坡在 5.1°~16.7°,如 2009 年 8 月 18 日,格地罗沟<sup>[7]</sup>泥石流堵塞卧罗河,格地罗沟平均纵坡为 5°左右;2013 年 7 月 11 日,七盘沟泥石流堵塞岷江,七盘沟<sup>[8]</sup>平均纵坡为 9.6°;柳杨沟<sup>[9]</sup>平均纵坡为 14.9°。对于泥石流沟与主河的交汇角,不外乎 3 种情况,即流向夹角呈锐角、直角和钝角,从典型泥石流堵河事件统计分析来看,大部分的泥石流都是以直角或者近直角汇入主河道,也不乏锐角和钝角入汇的情况,如柳杨沟以近 120°入汇瓦斯河;培龙沟<sup>[10]</sup>1983—1985 年泥石流分别以锐角、直角、钝角方向入汇帕隆藏布江。

泥石流堵塞主河试验基本思路为:根据典型堵河事件统计分析结果,以主支槽交汇角为 60°,90°,120°情况下,考虑主河物理参数的影响,选取了 4°与 8°不同主槽纵坡以及 5°,10°,15°不同支槽纵坡来进行试验。由于试验条件不足,支槽泥石流流量难以控制,则通过控制不同容重、主槽流量关键参数,得出主支沟回水长度、溃决历时等基础数据。最终,根据交汇区堆积与堵塞形态,建立泥石流堵河的判别指标。本文仅对 60°主支槽交汇角试验数据、试验现象进行展示和分析。

试验的方案较为简易,其目的是由几何规则的交汇形状开展堵塞试验,得出泥石流堵河普适性认识与模式。试验的水槽为铁皮定制,中部由横向铁杆支撑受力,保证铁皮水槽的稳定;主槽供流系统为水泵抽水至储水池,用三角堰控制所需的主槽流量;支槽供流系统用简易搅拌机搅拌后倒入支槽,其流量的大小与重力、冲击力影响密切,所以支槽流量无法控制,只能通过现场流速计测量、泥痕反算泥石流流量,然后计算支主槽流量比,通过流量比单一变量对试验结果进行分析;观测系统由交汇区高程、竖横刻度进行量测,通过数码相机对支槽泥石流流入汇主槽全程影像采集,记录支槽泥石流与主槽水流交汇个时刻的特征;在切断主槽水流后,对泥石流在主槽中的堆积体物理参数进行测量以及绘制堆积体形态素描图。泥石流堵河数据展示见表 1。

## 2 试验模式研究

通过在 I 类 60°主支槽交汇角大类下,划分为 II 类,及主槽纵坡为 4°和 8°情况,再细分为 III 类情况(支槽纵坡为 5°,10°,15°)下 6 种不同工况条件下,开展不同物质组成(黏、粉、砂、砾石、混合土)共计 30 组泥石流堵河试验。通过分析支槽泥石流流入汇主槽后各时刻的影像记录、对应的堆积体物理参数以及堵塞体宽度与主槽宽度之比来综合确定各组试验的堵河模式类型。本次泥石流堵河试验的特征较为明显,数据相关性较好,可分为 4 种类型:(1)顶冲堰塞堵断模式;(2)渗混堵塞溃决模式;(3)束窄渐进式堵塞;(4)未堵,其主要交汇机理如下。

### 2.1 顶冲堰塞堵断模式

泥石流体在短时内汇入主槽,完全堵断主槽,形成典型的堰塞体,其雍水高度以 14~16 cm 为主,回水长度 5~10 cm,溃决前多历时 5~8 s。在堵断模式下,堵河各特征表现明显:瞬时汇入主槽—龙头顶冲对岸—物源塞满主槽—主槽水位上涨—主支槽回水形成—堵塞体脆弱区渗漏—堵塞体主体失稳垮塌—溃坝。

顶冲堰塞堵断模式下的各参数表现为泥石流体容重大,以过渡性和黏性泥石流为主、物质抗剪切剪应力强,支主沟流量比大、主河水深不大。出现该模式的原因主要是泥石流冲出固体物质总量足够多、沉积速度较快、流量相对较大而主河的水流不能及时将运动堆积的泥石流体冲刷带走,也无法改变泥石流的流向使之向下游运动时,入汇的泥石流将会在短时间内运动到主河对岸,堵塞河道形成暂时性的天然坝,使之断流(见图 1)。

表 1 泥石流堵河数据

交汇角	主槽纵坡	支槽纵坡	颗粒	实测容重/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	主槽流量/ ( $L \cdot s^{-1}$ )	支槽流量/ ( $L \cdot s^{-1}$ )	流量比	支沟回水 长度/cm	主沟回水 长度/cm	堵塞体 长度/cm	溃决 历时/s
60°	4°	5°	黏土	1.60	1.5	2.4	1.60	0	5	2	—
			粉土	1.68	1.5	2.4	1.60	0	5	2	—
			砂土	1.78	1.5	2.7	1.80	0	5	4	—
			砾石土	1.89	1.5	2.7	1.80	1	5	5	—
			混合土	1.98	1.5	2.4	1.60	2	6	10	1.5
	4°	10°	黏土	1.75	1.5	2.7	1.80	1	5	5	—
			粉土	2.06	1.5	2.4	1.60	0	6	6	—
			砂土	2.05	1.5	3	2.00	1	5	10	1.0
			砾石土	2.03	1.5	3.3	2.20	2	4	10	1.5
			混合土	2.56	1.5	3.3	2.20	1	3	12	2.0
	4°	15°	黏土	1.78	1.5	3.3	2.20	2	4	9	—
			粉土	2.18	1.5	3.6	2.40	3	5	10	—
			砂土	2.18	1.5	3	2.00	3	5	12	1.0
			砾石土	2.14	1.5	3.3	2.20	2	6	15	1.0
			混合土	2.57	1.5	3.9	2.60	5	8	20	1.5
	60°	5°	黏土	1.68	1.8	3.3	1.83	1	4	3	1.5
			粉土	1.95	1.8	3.3	1.83	1	5	4	2.5
			砂土	2.15	1.8	3	1.67	2	5	5	2.5
			砾石土	2.36	1.8	3.9	2.17	2	6	20	3.0
			混合土	2.24	1.8	3.6	2.00	4	8	20	3.5
8°		10°	黏土	1.78	1.8	3.6	2.00	2	4	3	1.0
			粉土	1.98	1.8	3.9	2.17	2	5	6	1.0
			砂土	2.04	1.8	3.3	1.83	3	5	15	1.5
			砾石土	2.27	1.8	3.9	2.17	4	6	18	2.5
			混合土	2.28	1.8	3.6	2.00	6	8	20	3.5
60°	15°	黏土	1.68	1.8	3.6	2.00	3	4	6	—	
		粉土	2.14	1.8	3.3	1.83	3	5	8	1.0	
		砂土	2.27	1.8	3.9	2.17	4	6	10	2.0	
		砾石土	2.09	1.8	3.9	2.17	5	6	15	2.0	
		混合土	2.28	1.8	3.9	2.17	6	8	20	3.5	

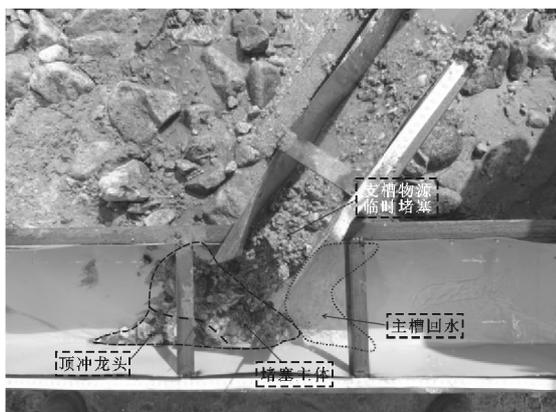


图 1 顶冲堰塞堵断模式下冲刷淤积特征

## 2.2 渗混堵塞溃决模式

泥石流体汇入主河后,基本上塞满主槽,物质渗混主槽,形成短时的堵塞体,在交汇口主支槽水流作用强

烈,水位上涨,相互作用。短时堰塞体历时 2~4 s,壅水高度以 5~8 cm 为主,回水长度 3~8 cm。在基本堵断模式下,特征表现明显:泥石流体汇入支槽—短时塞满主槽—水流渗混堵塞—流量加大—堵塞体主体失稳垮塌—溃坝。渗混堵塞模式下的各参数表现为泥石流体容重较高,以黏性泥石流为主,支主沟流量比较大、主河水流作用较强烈。出现该模式的主要原因是部分泥石流的固体成分潜入主河、向对岸运动或者沉积;另外部分泥石流的水以及较小颗粒与主河水流发生渗混现象。泥石流体遭到主河水流剪切与紊动作用,泥石流与水流混合,引起局部地区水体含沙量的增加,形成高含沙水流或一般挟沙水流流向下流(见图 2)。

## 2.3 束窄渐进式堵塞模式

泥石流体汇入主槽后,在主支槽共同水流作用

下,龙头迅速抵达对岸下游,主槽断面被束窄,局部流量瞬时加大,主槽交汇区下游两侧形成侧堤,堵塞主槽为渐进式推进,始终未完全堵断主槽。特征表现明显:泥石流流体汇入支槽—龙头与主槽水流作用—龙头抵达斜下游—主槽断面束窄—局部流量瞬时加大—渐进式局部堵塞—下游两侧侧堤形成。半堵断模式各参数表现为泥石流流体容重中—高,以过渡性和稀性泥石流为主,主河水流作用较强烈。出现该模式主要原因是主槽两侧水流相对主槽中间水流流速较慢、水深度较浅,同时泥石流少含大粒径,泥石流汇入主槽后,能够达到对岸,但是于由水流对中间部位泥沙冲刷较强,位于中间部位的泥沙被冲走或至下游沉积。随泥石流继续汇入,两侧堤逐渐增宽向中心靠拢,但由于水流进一步束窄,水流的流速流量增加,后续入汇泥沙未能在该处沉积,始终未完全堵断主槽(见图 3)。

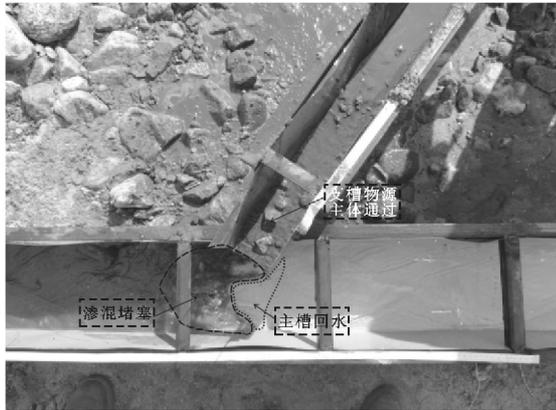


图 2 渗混堵塞溃决模式下冲刷淤积特征

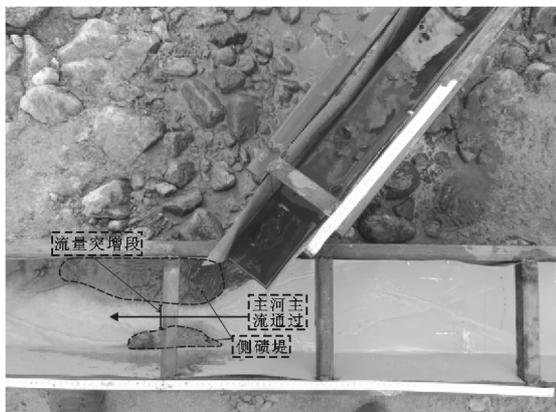


图 3 束窄渐进式堵塞模式下冲刷淤积特征

### 2.4 未堵

泥石流进入主槽后,堆积体未形成即被主槽水流带走,从地貌上未有泥石流强烈的活动特征。未堵模式下,泥石流流体容重低,流量比小,主槽水流作用强烈(见图 4)。



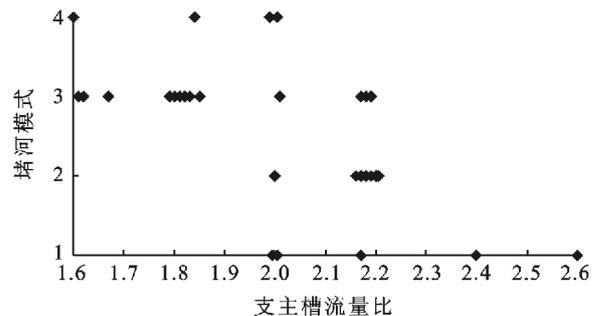
图 4 未堵模式下冲刷淤积特征

### 2.5 试验统计分析

通过 30 组泥石流堵塞主河试验,对运动过程与堆积形态分析后得出的顶冲堰塞堵断模式、渗混堵塞溃决模式、束窄渐进式堵塞模式、未堵 4 种模式所占数量分别为 5,7,14,4 处,其中,束窄渐进式堵塞占近 50%,是堵河试验中常见的堵塞模式。

## 3 流量比与堵河模式

试验中支槽泥石流流量难以控制,故采用流量比对试验结果进行分析,流量比反映的是支流流量与主河水流流量的比例关系,是影响水位壅高以及交汇区淤积体大小的主要因素。流量比越大,支流流势越强,泥石流对主河的作用越明显,大流量的泥石流在有限的主河宽度方向运动不仅阻碍主河的水流运动造成主河壅水,而且将大量泥沙带入主河,在交汇口沿横向和纵向沉积在主河内,甚至堵江。小流量的泥石流在主河强大的水流冲刷下沉积的泥沙也很容易被主河水流带走,很难形成堵江。且不同流量比下的堵河形成模式也存在着明显差异。通过对 30 组试验数据分析发现,泥石流堵塞主河的模式与主槽流量和支槽流量对比的数量存在密切关系。在不同支主槽流量比条件下泥石流堵河的不同模式如图 5 所示。



注:堵河模式:1 顶冲堰塞堵断; 2 渗混堵塞溃决;

3 束窄渐进式堵塞; 4 未堵

图 5 不同流量比条件下各堵河模式次数统计

从图 5 中可看出,随流量比的增加,各不同容重情况向下的试验结果呈现相同的变化趋势。表现为,随流量比的增加,从束窄渐进堵塞模式向顶冲堰塞堵断模式变化。当流量比小于 2.0 时,不会出现顶冲堰塞模式和渗混堵塞溃决模式,也就是说此时泥石流只能不堵或者部分堵河,不会发生泥石流全堵主河;当流量比大于 2.2 时,全为顶冲堰塞模式,泥石流全堵主河;当流量比在 2.0~2.2 时,3 种堵河模式都有发生,还受其他因素影响。

#### 4 历史堵河案例模式初探

复杂山区泥石流堵河事件频繁发生,尤其在经历极端天气与特大地震,地质条件脆弱区常常发生群发性泥石流堵河事件,例如,2013 年 7 月 4 日,石棉县特大山洪造成马颈子沟、广元堡后沟群发性泥石流堵河事件;2013 年 7 月 11 日,汶川县沿岷江沿线发生七盘沟等多出泥石流堵河事件。通过遥感解译、实地调查等手段,本文选取了多处具有典型性案例进行调查,并对 2005 年 7 月 11 日,泸定县磨西河堵塞大渡河;2013 年 7 月 4 日,石棉县广元堡后沟堵塞南桫河进行了深入剖析,典型案例遥感解译见图 6—7。图 6 中磨西河泥流入汇大渡河,泥石流达到大渡河对岸,龙头撞击对岸,但由于大渡河河靠近两岸水深较中部浅,水流速度较慢,达到河流中部的泥石流被冲刷带到下游,在入汇口以下河流两岸形成了长条形的侧堤碛,在龙头撞击处附近束窄最严重,束窄河流过流断面宽度,随泥流入汇,过流断面被进一步束窄。同样,图 7 中广元堡后沟入汇南桫河束窄南桫河过流断面,渐进堵河。



图 6 2005 年磨西河堵河遥感解译

典型堵河事件资料显示:磨西河平均纵坡为 10.2%,也就是 5.8°左右,经现场调查计算发现该次泥石流堵河为 50 年一遇,泥石流流量和洪峰流量分

别为 4 083 和 2 722 m<sup>3</sup>/s,流量比为 1.5 左右<sup>[11]</sup>;广元堡后沟主沟平均纵坡为 236‰,也就是 13.3°左右,经现场调查试验确定泥石流容重中—高,在 1.60~1.80 g/cm<sup>3</sup>,50 年一遇泥石流峰值流量达到了 232.11 m<sup>3</sup>/s,南桫河最大洪峰流量 200 m<sup>3</sup>/s,年平均流量 47.7 m<sup>3</sup>/s,但是,广元堡沟口地段地形较为开阔、平缓泥石流运动至此,其能量可以得到较大程度的释放,多数会停积于沟口,且进入南桫河的泥石流流体一般容易被河水搬运<sup>[12]</sup>,堵河模式均以束窄渐进式堵塞为主,与试验结果较好吻合。



图 7 2013 年广元堡后沟遥感解译

通过历史泥石流堵河统计分析,当前泥石流堵河事件以束窄渐进式堵塞模式为主,主要的特征表现为主槽断面被束窄,局部流量瞬时加大,主槽交汇区下游两侧形成侧堤碛,堵塞主槽为渐进式推进,始终未完全堵断主槽,这与西南山区主河强水动力特点有关,西南地区发生泥流入汇河流多为山谷河流,靠近两岸水深较河流中心浅,流量流速相对河流中心小,尽管两岸泥石流活动也很强烈,泥石流在汇入主河后能够到达对岸,但是大量砂石在强大的主河道中心水流作用下以悬移质的形式被水流冲走,直到相当距离后才落淤下来;而在河流靠岸两侧水流对泥石流作用相对较小,泥石流主体在出山口处入汇口形成堆积地区;最终在入汇口下游两侧形成侧堤碛,束窄后的河道中心水流流速流量进一步增大,使得泥石流完全堵断主河的概率较小,从而呈现束窄—渐进—壅堵的特征。历史上泥石流堵河事件与试验结果有较好的吻合,案例与试验得出的堵河模式均以束窄渐进式堵塞为主。

#### 5 结论

(1) 通过泥石流堵河试验,根据泥石流运动过程与淤积形态得出泥石流堵河的 3 种模式,分别为顶冲

堰塞堵断模式、渗混堵塞溃决模式、束窄渐进式堵塞模式。

(2) 对泥石流堵塞主河3种模式的运动与成灾机理进行了初步探索。顶冲堰塞堵断模式表现为龙头顶冲对岸、物源塞满主槽、脆弱区渗漏到主体垮塌的特征;渗混堵塞溃决模式表现为短时塞满主槽、水流渗混堵塞、流量加大的特征;束窄渐进式堵塞模式表现为主槽断面束窄、局部流量瞬时加大、渐进式局部堵塞的特征。

(3) 对历史泥石流堵河案例进行调查研究和典型性深入剖析。当前的历史堵河事件以束窄渐进式堵塞为主,与试验统计结果有较好的吻合。

(4) 不同流量比发生的堵河模式不同,堵塞主河程度也不同。当流量比小于2.0时,此时泥石流不堵或者部分堵河;当流量比大于2.2时,将发生泥石流全堵主河。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 匡尚富. 汇流部泥石流的特性和淤积过程的研究[J]. 泥沙研究, 1995, 3(1): 1-15.
- [2] 陈德明. 泥石流与主河水流交汇机理及其河床响应特征[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2000.
- [3] 陈春光, 姚令侃, 杨庆华, 等. 基于堰流理论的泥石流堵河模型研究[J]. 自然灾害学报, 2012, 21(6): 131-135.
- [4] 陈春光, 姚令侃, 刘翠容. 泥石流堵河条件的研究[J]. 水利学报, 2013, 44(6): 648-656.
- [5] 刘翠容, 姚令侃. 泥石流堵塞大河的特点及异岸受灾判据研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2012, 44(5): 93-100.
- [6] Liu Cuirong, Du Cui. Characteristic and criteria of debris flow partially blocking big river [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2014, 33(1): 79-84.
- [7] 王峥嵘, 邓辉, 黄润秋. 格地罗沟高频泥石流特征及成因机制研究[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(5): 1198-1202.
- [8] 曾超, 崔鹏, 葛永刚, 等. 四川汶川七盘沟“7·11”泥石流破坏建筑物的特征与力学模型[J]. 地球科学与环境学报, 2014, 36(2): 81-91.
- [9] 彭秀红, 徐佩华. 柳杨沟泥石流特征及其工程影响分析[J]. 工程地质学报, 2007, 15(3): 374-379.
- [10] 朱平一, 程尊兰, 游勇, 等. 川藏公路培龙沟泥石流输砂堵江成因探讨[J]. 自然灾害学报, 2000, 9(1): 80-83.
- [11] 宋志, 巴仁基, 刘宇杰. 磨西河特大型泥石流堵塞大渡河分析: 以一次泥石流规模、不同频率雨洪法流量定量计算[J]. 灾害学, 2010, 25(3): 71-73.
- [12] 地矿眉山工程勘察院. 四川省雅安市石棉县广元堡泥石流治理工程补充勘查报告[R]. 四川 眉山: 地矿眉山工程勘察院, 2011.
- [13] 李禄军, 蒋志荣, 李正平, 等. 3 树种抗旱性的综合评价及其抗旱指标的选取[J]. 水土保持研究, 2006, 13(6): 252-254.
- [14] 李清河, 王赛宵, 徐军, 等. 几种沙生灌木的抗旱性综合评价[J]. 中国农学通报, 2012, 28(13): 103-108.
- [15] 赖声渭, 曹兵. 浅谈林木抗旱性评价方法[J]. 防护林科技, 2002(3): 48-49.
- [16] 郭连生, 田有亮. 4 种针叶幼树光合速率、蒸腾速率与土壤含水量的关系及其抗旱性研究[J]. 应用生态学报, 1994, 5(1): 32-36.
- [17] 郝再彬, 苍晶, 徐仲, 等. 植物生理实验[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004: 22-25.
- [18] 孙书存, 陈灵芝. 东灵山地区辽东栎叶的生长及其光合作用[J]. 生态学报, 2000, 20(2): 212-217.
- [19] Tilman D. Plant strategies and the Structure and Dynamics of Plant Communities[M]. Princeton: Princeton University Press, 1988: 52-97.
- [20] 李雪华, 蒋德明, 阿拉木萨, 等. 科尔沁沙地 4 种植物抗旱性的比较研究[J]. 应用生态学报, 2002, 13(11): 1385-1388.
- [21] 孙启忠. 略论与植物抗旱性有关的问题[J]. 牧草与饲料, 1991(1): 6-10.
- [22] 宋凤斌, 徐世昌. 玉米抗旱性鉴定指标的研究[J]. 中国生态农业学报, 2004, 12(1): 127-129.
- [23] 万小荣, 李玲. 脱水胁迫下抗旱性不同花生品种中某些生理生化指标变化比较[J]. 植物生理学通讯, 2006, 42(6): 1117-1118.
- [24] 蒋志荣, 杨占彪, 汪君, 等. 兰州九州台四种绿化树种抗旱性机理比较研究[J]. 中国沙漠, 2006, 26(4): 553-558.
- [25] Marshall J, Rutledge R, Uluwald E, et al. Reduction in turgid water volume in jack pine, white spruce and black spruce in response to drought and paclobutrazol [J]. Tree Phkysiol, 2000(20): 701-707.
- [26] Saitoh K, Kikuiri M, Ishihara K. Relationship between leaf movement of trifoliolate compound leaf and environmental factors in the soybean canopy[J]. Japanese Journal of Crop Science, 1995, 64(2): 259-265.
- [27] 庄丽, 陈亚宁, 陈明, 等. 模糊隶属法在塔里木河荒漠植物抗旱性评价中的应用[J]. 干旱区地理, 2005, 28(3): 368-372.
- [28] 王琰, 狄晓艳, 马建平, 等. 8 个油松种源抗旱性的比较研究[J]. 水土保持通报, 2009, 29(4): 46-50.

(上接第 99 页)