

# 西藏东南部泥石流堵塞坝的形成机理

吴积善, 程尊兰, 耿学勇

(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:** 西藏东南部山高谷深, 冰川发育, 冰碛等松散堆积物厚度大, 经常发生大型或特大型泥石流堵断主河, 形成堵塞坝。针对西藏东南部 4 条典型泥石流沟所发生的 7 次大型或特大型泥石流中, 有 5 次形成堵塞坝, 来剖析泥石流堵塞坝形成的机理和主要因素。提出由于冰雪崩、冰湖溃决或大规模滑坡活动, 所激发的首阵或前几阵大流量、高速度、多巨砾, 并与主河正交的粘性泥石流, 最容易形成堵塞坝。

**关键词:** 西藏东南部; 泥石流堵塞坝; 形成机理

**中图分类号:** P642. 23

**文献标识码:** A

西藏东南部耸立着喜马拉雅山、念青唐古拉山和横断山, 雅鲁藏布江、怒江、澜沧江、金沙江深切其中, 山高谷深, 垂直高差达 2 000~ 3 000 m, 山坡多在 35° 以上, 冰川广布, 冰湖棋布; 地震等新构造活动强烈, 岩石破碎, 冰碛等松散堆积物厚度大, 储量多; 局地性暴雨强盛, 冰雪消融快, 冰湖溃决和冰雪崩频繁。这些独特而又脆弱的自然环境导致本区泥石流活动强烈, 规模巨大, 经常堵断其汇入的主河, 形成高大的泥石流堵塞坝, 造成惨重的危害。如波密县扎木弄巴, 1902 年和 2000 年二次特大泥石流, 堵断了主河易贡藏布, 形成了堵塞坝, 尤其 2000 年形成了累积高 130 m 的堵塞坝<sup>[1]</sup>, 上游回水成湖长 30 km, 淹没了这范围内的一切村寨和农田; 62 d 后堵塞坝溃决, 最深处达 110 余 m, 高而凶猛的涌波, 沿易贡藏布进入帕隆藏布, 汇入雅鲁藏布江, 直泻我国的墨脱和印度, 荡尽了两岸的耕地和建筑物, 在我国境内损失达 2.8 亿元人民币。林芝县的培龙沟, 1984 和 1985 年的特大泥石流均形成堵塞坝, 回水淹埋了上游 6 km 的川藏公路和 79 辆装有货物的汽车; 溃坝后, 涌波又冲毁了下游 2 km 川藏公路和沿程的 5 座桥梁, 至今这上下游共 8 km 的路段成为川藏公路著名的

“盲肠”, 经常发生断道和翻车事故。在西藏东南部这种例子还很多。为了避免或减轻堵塞坝的危害, 本文试图从分析西藏东南部 4 条典型的泥石流沟的堵塞坝形成过程着手, 揭示堵塞坝形成的机理和主要因素, 提出什么样的泥石流最容易形成堵塞坝, 以便今后在公路选线或改造, 修建各类建筑物时, 能尽量避免或妥善处治易形成堵塞坝的泥石流沟。

## 1 泥石流堵塞坝形成的典型实例

虽然西藏东南部泥石流堵塞坝经常形成, 但第一手资料很少, 本文根据目击者的介绍、形成后的现场调查和有关文献, 分析了西藏东南部有代表性的 4 条泥石流沟, 所发生的 7 次特大型或大型泥石流的性质和规模, 其中有 5 次形成了堵塞坝 (表 1、2)。

### 1.1 培龙沟泥石流堵塞坝的形成

培龙沟是帕隆藏布下游右岸的一条大型泥石流沟, 流域的特征值如表 1 所示。1983- 07- 29 上午, 上游冰川右侧发生大规模的冰崩, 堵断了沟道, 形成了冰崩物堆积坝, 晚上 23 时左右, 冰崩坝溃决, 扫荡沿程的冰碛物, 形成了最大流量超过  $1 \times$

收稿日期 (Received date): 2005- 03- 10; 改回日期 (Accepted): 2005- 05- 05。

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金资助项目 (40371016); 交通部西部交通建设科技项目 (2001 318 79257)。This research is supported by China National Science Found (40371016), The Ministry of Communications (2001 31879257)。

作者简介 (Biography): 吴积善 (1938- ), 男 (汉族), 浙江慈溪市人, 研究员, 主要从事山地灾害及防治工程研究。Wu Jishan (1938- ), male, Han, born in Cixi, Zhejiang. Professor, major in prevention of mountain hazards.

$10^4\text{m}^3/\text{s}$  的特大泥石流, 但经过中游峡谷段的阻拦和下游宽谷段的淤积展平, 到主河堆积区进口处的最大流量  $Q_c$  为  $2\,950\text{m}^3/\text{s}$ , 最大深度 (即龙头高)  $h_c$  为  $13\text{m}$ , 最大流速  $U_c$  为  $7.44\text{m/s}$ , 泥石流的重度  $\gamma_c$  为  $21.56\text{kN}/\text{m}^3$ , 属粘性泥石流 (表 2); 当帕隆藏布的流量  $Q_w$  为  $2\,298\text{m}^3/\text{s}$ , 流速  $U_w$  为  $5.09\text{m/s}$ ; 泥石流在主河弯道的凹岸汇入, 对岸有很宽的凸岸边滩, 从进口处到对岸边滩上部宽  $654\text{m}$ , 泥石流汇入主河时偏向下游, 交角为  $41^\circ$ , 汇入段发生严重淤积, 把主河河床推向对岸  $120\text{m}$ , 河床淤高  $2\sim 3\text{m}$ , 没有形成堵塞坝, 但在进口处淤高时帕隆藏布的流量  $Q_w$  为  $2\,298\text{m}^3/\text{s}$ , 流速  $U_w$  为  $10\text{m}$  左右 (图 1)。

表 1 西藏东南部 4 条典型泥石流沟的主要特征值

Table 1 Elementary features of 4 gullies in the southeast Tibet

项目	主河名称	所在县名	流域面积 ( $\text{km}^2$ )	主沟长 ( $\text{km}$ )	主沟床比降 ( $\text{‰}$ )	冰川和永久积雪		年均降水量 ( $\text{mm}$ )	年均气温 ( $^\circ\text{C}$ )
						面积 ( $\text{km}^2$ )	占流域 ( $\text{‰}$ )		
培龙沟	帕隆藏布	林芝	86.1	18.8	132	22.7	26.4	1 360.5	13.1
冬茹弄巴	帕隆藏布	波密	23.7	10.0	214	2.06	8.69	750.0	7.0
扎木弄巴	易贡藏布	波密	31.8	9.7	343	2.20	6.92	1086.1	11.9
米堆沟	帕隆藏布	波密	117.5	29.8	63.5	31.4	26.7	884.5	8.6

项目	松散固体物质储量		泥石流性质	泥石流主要激发因素	堵主河情况 (1950 年以来)	参考文献
	总量 ( $\text{m}^3$ )	可参与泥石流的量 ( $\text{m}^3$ )				
培龙沟	$5.77\times 10^8$	$3.61\times 10^8$	粘性	冰雪崩	形成二次堵塞坝	[2]
冬茹弄巴	$1.80\times 10^8$	$0.688\times 10^8$	粘性	冰雪融水、降水	形成三次堵塞坝	[3]
扎木弄巴	$>10\times 10^8$	$>4\times 10^8$	高粘性、碎屑流	滑坡、雪崩	1902 年来二次堵塞坝	[1][5]
米堆沟		$6.25\times 10^8$	稀性	冰湖溃决	一次局部堵江	[4]

表 2 西藏东南部典型泥石流堵塞坝形成条件和主要特征值

Table 2 Conditions and major factors for debris flow dam formation in the southeast Tibet

项目	泥石流发生日期		泥石流特征值					
			最大流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	平均宽度 ( $\text{m}$ )	一般泥深 ( $\text{m}$ )	最大泥深 ( $\text{m}$ )	平均流速 ( $\text{m/s}$ )	重度 ( $\text{kN}/\text{m}^3$ )
培龙沟	1983- 07- 29		2 950	113.5	8~ 11	13.0	3.42	21.56
	1984- 08- 23		5 245	143.7	10~ 12	13.0	3.72	19.60
	1985- 06- 20		8 195	193.1	10~ 14	16.0	4.05	20.58
冬茹弄巴	1975- 06- 12		562.1	16.9	4.1		8.10	22.54
扎木弄巴	1902- 07- 08		58 600	85	53	60	13.0	22.54
	2000- 04- 09					约 100	50.0	约 2.0~ 2.3 19.60~ 22.54
米堆沟	1988- 07- 14		1 021	47.1	5.7		3.8	16.66

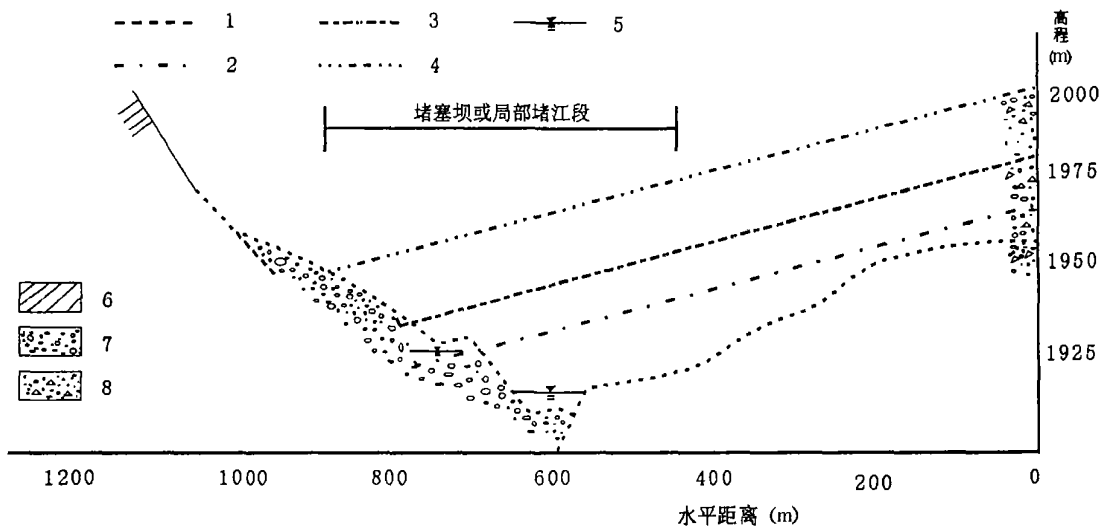
项目	主河水流特征值		泥石流与主河交角及汇流处地形			局部堵江和堵塞坝特征值		
	流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	平均流速 ( $\text{m/s}$ )	交角	汇流处地形		高度 ( $\text{m}$ )		沿主河长 ( $\text{m}$ )
				沿主河宽度 ( $\text{m}$ )	主河比降 ( $\text{‰}$ )	本次高	累积高	
培龙沟	2 298	5.09	偏向主河下游, $41^\circ$	654	5.13	(2- 3)	(2- 3)	220
	1 191	4.20	接近垂直, 略偏上游	654	5.12	11.3	14.3	822
	2 104	4.86	基本垂直	654	5.08	15.0	29.3	1 135
冬茹弄巴	232	2.65	基本垂直	64	13.5	13.4	13.4	410
扎木弄巴	1 100	4.56	基本垂直	3 350	7.69	80	80	3 200
	720	3.68	基本垂直	3 350	16.7	50	130	1 500
米堆沟	194	2.56	接近垂直, 略偏下游	91	21.5	(7~ 9)	(7~ 9)	(1 520)
备注	1. 参考文献同表 1; 2. 局部堵江特征值加 ( ); 3. 本表部分数据系估算。							

1984- 08- 23 培龙沟由于再次冰崩激发了第二次特大泥石流<sup>[2]</sup>, 在进口处的  $Q_c$ 、 $h_c$  和  $U_c$  为  $5\,245\text{m}^3/\text{s}$ 、 $13.0\text{m}$  和  $8.09\text{m/s}$ ,  $\gamma_c$  为  $19.6\text{kN}/\text{m}^3$ , 含有大量长径  $>1.0\text{m}$  的巨砾; 当时主河帕隆藏布的  $Q_w$  和  $U_w$  为  $1\,191\text{m}^3/\text{s}$  和  $4.20\text{m/s}$  (表 2); 泥石流略偏主河上游。开始几阵大泥石流以很大惯性冲向对岸, 堵断了主河, 形成了高  $14.3\text{m}$  (含 1983 年淤高部分), 长  $348\text{m}$ , 宽  $822$

m<sup>[2]</sup>的堵塞坝。该坝约 15 min 后溃决, 主河河床向南移了 80 m (图 1)。

1985- 06- 19 或前一天, 又发生了一次大规模的冰崩, 形成了由冰崩物质构成的堆积坝, 拦截了上游冰雪融水, 估计在 19 T10 左右溃决。据目击者介绍, 当天上午天气晴朗, 约在 11 时, 培龙沟道出现断流, 11: 10, 沟内响声振天, 烟雾弥漫, 如一团黑云咆哮奔腾而来, 可看到前缘有帐篷那样大的巨砾, 推移翻滚, 瞬间淹没正在抢修的公路桥, 直扑帕隆藏布, 一下子就冲到对岸, 堵断了江水, 后继的泥石流很快堆积淤高。这首阵泥石流, 持续了 15 min, 河床淤高了近 20 m (图 1),

断流 5 min 后, 就来第二阵泥石流, 但没有第一阵大。帕隆藏布上游的水位迅速上涨, 约 0.5 h 后发生溃坝。这首阵泥石流最大的  $Q_c$ 、 $h_c$  和  $U_c$  分别为 8 195 m<sup>3</sup>/s、16.0 m 和 8.80 m/s, 前缘含有大量 > 1.0 m 的巨砾, 并有多块长径 > 3.2 m 特大漂砾; 当时主河的  $Q_w$ 、 $h_w$  和  $U_c$  依次为 1 191 m<sup>3</sup>/s、3.6 m 和 4.20 m/s, 流向与主河基本上正交。堵塞坝比 1984 年的高了 15 m, 包括 1983 年以来的多次泥石流堆积在内, 整个泥石流堵塞坝 (堆积扇) 长 440 m, 宽 1 135 m, 高出原河床或原地面最低处为 29.3 m (即堵塞坝高), 最高处 44.8 m。



1. 为 1983- 07- 29 泥石流前原河床和沟床表面; 2. 1983- 07- 29 泥石流堆积体表面; 3. 为 1984- 08- 23 泥石流堵塞坝表面; 4. 为 1985- 06- 20 泥石流堵塞坝表面; 5. 主河水面; 6. 基岩; 7. 主河堆积物; 8. 泥石流堆积物

图 1 林芝县培龙沟泥石流堵塞坝和局部堵江示意纵剖面

Fig 1 Sketch profile for the local blocking river and the blocking dam of debris flow from Peilong Gully, Lingzhi

### 1.2 冬茹弄巴泥石流堵塞坝的形成

冬茹弄巴是帕隆藏布中偏上游左岸的一条粘性泥石流沟, 流域特征值见表 1<sup>[3]</sup>。在离沟口 2.5 km 处的 2 个跌水下方和 1.8 km 处分布有滑坡 (含崩塌), 前者总量为 12.0 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>; 后者为 3.5 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup><sup>[3]</sup>。该沟自 1961 年以来, 形成过三次泥石流堵塞坝, 这里介绍的是 1975- 06- 12 发生的最近一次。

12T15 以后, 上游冰雪消融加快, 晚上又开始下雨, 两种径流叠加, 形成了比较大的洪水, 当洪水通过跌水后, 流速加大, 掀动并冲起第一滑坡处的松散固体物质形成泥石流, 泥石流又引起第二处的滑坡下滑, 堵塞了沟道, 并很快演化为第二阵泥石流, 因其粒度细, 泥位高, 流速大, 很快追上前

一阵泥石流, 二阵复合构成了一阵重度为 22.54 kN/m<sup>3</sup> 的大型泥石流,  $Q_c$  为 562.1 m<sup>3</sup>/s。主河河谷很窄, 底宽 30 m, 上部宽 62 m,  $Q_w$  和  $U_w$  为 232 m<sup>3</sup>/s 和 2.65 m/s。与主河正交的泥石流, 以 8.10 m/s 的流速冲出山口, 在惯性的作用下, 一下子越过主河, 冲上对岸, 堵断主河, 形成了高 13.4 m 的堵塞坝 (图 2)。但坝体很快溃决。

### 1.3 扎木弄巴泥石流堵塞坝的形成

扎木弄巴的流域特征值如表 1 所示。1902- 07 ~ 08 间, 经过长期的连续大雨后, 沟道突然断流, 很可能中游发生大滑坡阻断沟道, 形成滑坡堵塞坝, 15 d 后沟水充满了堵塞湖, 浸润了堵塞坝, 并突然失稳溃决, 呈粘性或塑性泥石流, 以 53~ 60 m 的厚度<sup>[5]</sup> > 13 m/s 的速度, 约 58 600 m<sup>3</sup>/s

的流量冲出沟道, 越过易贡藏布, 爬上对岸山坡, 并迅速向两侧扩散, 几小时后形成厚 75~ 140 m, 宽 3.2~ 3.6 km, 长 2.7 km 的泥石流堵塞坝。其最低处高出原河床面约 80 m (即坝高), 总体积达  $5.13 \times 10^8 \text{ m}^3$ <sup>[5]</sup>。该坝约 1 月后局部溃决, 深达 50 m, 留下的 30 m 坝高, 构成了风景秀丽的易贡湖。

近 100 a 后的 2000- 04- 29, 经过连续数天的高温后, 上游发生总体积为  $2.02 \times 10^6 \text{ m}^3$  的雪崩<sup>[1]</sup>, 沿数百米高的陡坡掀动沿程的松散堆积物, 冲击到由巨厚松散堆积物构成的相对缓坡段, 促使

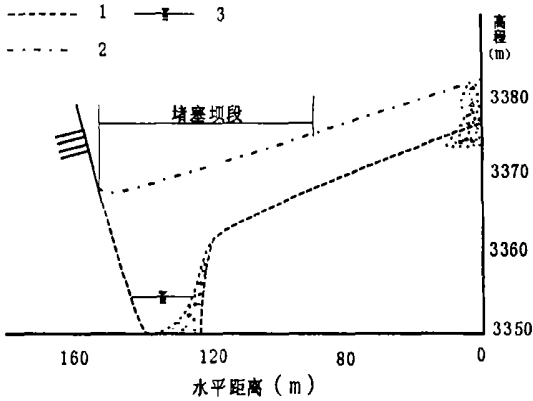
其发生滑动, 从而构成巨大的高粘性泥石流奔向易贡藏布, 直冲对岸边坡, 很快堵断易贡藏布, 并向二侧扩展。当上部含水量丰富的固体物质下泄后, 逐渐成为碎屑流, 继续堆高和拓宽堆积体, 形成了波及长度 2.6 km, 堵塞长度 1.5 km, 高 130 m<sup>[1]</sup> (含 1902 年末冲溃的 30 m) 的泥石流堵塞坝。虽然当时易贡藏布的流量和流速可达  $720 \text{ m}^3/\text{s}$  和  $4.56 \text{ m/s}$ , 但对由雪崩激发的特大滑坡型泥石流来讲已发挥不了什么作用。该堵塞坝在 62 d 后溃决, 几乎一溃到底, 秀美的易贡湖也接近消失。

### 1.4 米堆沟泥石流局部堵江的形成

米堆沟是帕隆藏布江中偏上游左岸的一条稀性泥石流沟, 流域特征值如表 1 所示。该沟在冰川下侧有一个面积为  $0.128 \text{ km}^2$  的终碛堤堰塞湖<sup>[4]</sup>, 名为谢光错。1988- 07- 14 冰舌前缘约  $3.6 \times 10^5 \text{ m}^3$  崩入冰湖, 造成冰碛堤局部溃决, 强劲的溃决洪水, 冲刷沿程的松散固体物质, 逐渐演变为重度为  $16.66 \text{ kN/m}^3$  的稀性泥石流<sup>[4]</sup>, 固体颗粒比较细,  $> 100 \text{ mm}$  的不足总量的 5%, 汇入帕隆藏布前, 最大  $Q_c$  为  $1\,021.4 \text{ m}^3/\text{s}$ , 平均  $U_c$  为  $3.8 \text{ m/s}$ ; 当时主河的  $Q_w$ 、 $U_w$  和  $i$  为  $194 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $2.56 \text{ m/s}$  和  $21.5\%$ 。河床下部宽约为 20 m, 上部为 42 m。泥石流从主河凹岸汇入, 与主流流向大致正交。当  $Q_c$  为主河  $Q_w$  4.26 倍的泥石流冲入主河后, 把主流水流逼向对岸, 部分粗砾淤落, 其它部分与主河来水逐渐混杂, 呈  $\gamma_c$  约  $14.7 \text{ kN/m}^3$  的稀性泥石流沿主河下泄。随着粗砾的淤落, 河床逐渐抬高, 水位上升, 主流偏向对岸, 河床淤高最多为 7~ 9 m, 对岸水位高出原河床约 10 m (图 3), 因此泥石流只局部堵塞主河, 形成了高 7 m 左右的潜坝, 没有形成堵塞坝。泥石流模型试验结果也是这样<sup>[4]</sup>。

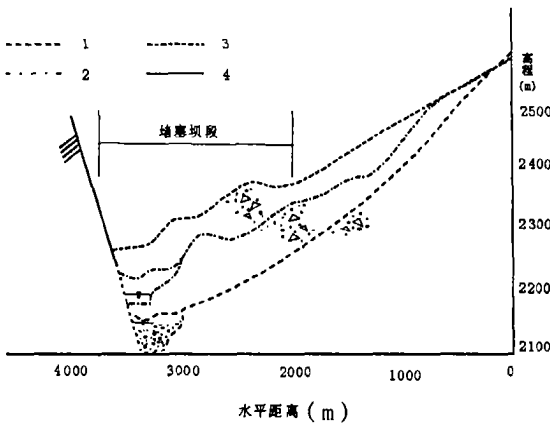
## 2 泥石流堵塞坝的形成机理

泥石流堵塞坝实际上是支沟暴发大泥石流时, 泥石流堆积体 (扇) 向其汇入的主河推进、扩展, 与对岸的岸坡相接, 堵断主河, 形成顶部高出上游主河水面的堆积体 (扇)。要形成泥石流堵塞坝需满足三个条件: 一是泥石流向对岸方向推进的堆积量  $V_{cb} >$  主河水流对泥石流堆积体的冲刷量  $V_{wb}$ ; 二是泥石流堆积体顶部在某一时段堆积的高度  $H_c >$  上游主河水位上升的高度  $H_w$ ; 三是在任何深



1. 1975- 06- 12 泥石流前原河床和堆积扇表面;  
2. 1975- 06- 12 泥石流堵塞坝表面; 3. 主河水面。其它符号同图 1

图 2 波密县冬茹弄巴泥石流堵塞坝示意纵剖面  
Fig. 2 Sketch profile for the blocking dam of debris flow from Dong-runongba Gully, Bomi



1. 1902 年泥石流前原河床和沟床表面; 2. 1902- 07~ 08 间泥石流堵塞和局部溃决后的表面; 3. 2000- 04- 29 泥石流堵塞坝表面;  
4. 对岸山坡线

图 3 波密县扎木弄巴泥石流堵塞坝示意纵剖面  
Fig. 3 Sketch profile for the blocking dam of debris flow from Zhamunongba Gully, Bomi

度, 一般是上部, 泥石流堆积体的抗剪切应力  $P_c > \text{上游主河水体对堆积体的水平总压力 } P_w$ ,  $P_w$  包括静水压力和动水压力。

因为, 条件一只能满足堆积体向对岸推进, 不能保证堆积体顶部能高出水面, 它可以呈潜坝形成伸向对岸, 并与对岸连接, 但不能形成高出主河上游水面的泥石流堆积坝, 如培龙沟 1983-07-29 和米堆沟 1988-07-14 的泥石流就是这样, 只形成了堆积潜坝, 即系局部堵江。因此要形成堵塞坝, 必须满足条件二, 即  $H_c > H_w$ , 这样才能使堆积体高出上游主河水面。但如果堆积体上部的抗剪切应力小, 出现  $P_w > P_c$ , 则其上部还没有高出水面就被推向下流, 不能形成堵断主河的堵塞坝。由于计算确定  $V_{cb}$ 、 $V_{wb}$ 、 $H_c$ 、 $H_w$ 、 $P_c$  和  $P_w$  值比较复杂, 需要较多的篇幅来阐述, 故拟在另一篇论文中介绍, 本文只作上述定性的分析。

### 3 泥石流堵塞坝形成的主要控制因素

实质上, 在泥石流暴发过程中能否形成堵塞坝, 是支沟泥石流与主河水流在二者交汇处相互抗衡的结果, 故同时受泥石流、主河水流和交汇处地形等三方面因素的综合控制。而每一个方面的因素又有多个子因素。

#### 3.1 支沟泥石流

##### 3.1.1 泥石流的性质

泥石流性质虽然不是一个数量值, 却控制着堵塞坝能否形成的一些重要数值, 包括  $V_{cb}$ 、 $H_c$  和  $P_c$  等。西藏东南部的泥石流主要是粘性 (含部分高粘性) 和稀性二类。粘性泥石流呈伪一相流, 当其停积时, 除个别巨砾外呈整体堆积, 因此  $V_{cb}$  实际上等于进入堆积区的泥石流总量  $V_c$ ; 而稀性泥石流为二相流, 进入堆积区后, 只有固体颗粒中粒径  $>$  极限粒径  $d_0$  的部分, 即  $V_c \cdot C_{s0}$  ( $C_{s0}$  为泥石流流体中  $> d_0$  的那部分颗粒的体积比) 可能堆积, 其它部分随液相流从上部下泄, 再加之主河的来水量, 使上部的流体始终不能被阻断。因此在正常情况下, 稀性泥石流不易形成堵塞坝, 米堆沟 1988-07-14 泥石流就是这样。

泥石流的性质还决定着泥石流的抗剪强度和相应的  $P_c$ , 粘性泥石流刚堆积下来时可用极限抗剪强度  $\tau_a^{[6]}$  来表示,  $\tau_a$  可从 1 000 Pa 到 40 000 Pa, 或更大。通常重度  $\gamma_c$  越大, 粘粒和巨砾含量越

多,  $\tau_a$  越大, 泥石流的极限堆积坡度  $\theta_c$  也越大。如扎木弄巴的  $\gamma_c$  为 22.54 kN/m<sup>3</sup> 左右, 巨砾含量较多, 故  $\tau_a$  最大,  $\theta_c$  为 5.54°; 冬茹弄巴次之,  $\theta_c$  为 4.80°; 培龙沟  $\gamma_c$  相对较小, 但巨砾含量多,  $\tau_a$  小偏中,  $\theta_c$  为 3.49°。当其它因素相同时,  $\tau_a$ 、 $\theta_c$  越大, 形成堆积坝的可能性和高度就越大。稀性泥石流与粘性泥石流不同, 堆积体的抗剪强度和  $\theta_c$  主要取决于堆积体的内摩擦角大小。

##### 3.1.2 泥石流的规模

泥石流规模的标征值主要是泥石流的  $Q_c$  和一次泥石流的总量  $V_c$ , 但对形成堵塞坝有实际作用的往往是泥石流暴发开始时的  $Q_c$  及其持续时间  $T$ , 即最大流量  $Q_c$  期间的泥石流总量  $V_c$ , 对粘性泥石流来讲  $V_{cb}$  接近  $V_c$ 。培龙沟 1985-06-20 和冬茹弄巴 1975-06-12 都是第一阵大泥石流就堵断了主河, 形成堵塞坝, 扎木弄巴的二次泥石流更是这样。这主要是因为西藏东南部, 冰 (雪) 崩堆积坝 (培龙沟), 滑坡堵塞坝 (扎木弄巴 1902 年、冬茹弄巴 1975 年的一部分)、冰湖溃决或雪崩 (扎木弄巴 2000 年) 等都是突然溃决或发生的, 开始时水量、土量或雪量最大, 所激发或演变的泥石流流量  $Q_c$  也是开始最大, 只要持续几分钟就会有大量泥石流流体堆积, 使  $H_c$  很快增大, 明显超过  $H_w$  的逐步加大, 而成形堵塞坝。

##### 3.1.3 泥石流体的粒径

泥石流进入主河时, 固体颗粒的粒径越大, 抗冲能力越强, 当其它条件相同时,  $V_{wb}$  就越小, 越有利于堵塞坝的形成。对于粘性泥石流, 其呈整体堆积, 主河流水首先冲刷其头部, 而粘性泥石流的巨砾往往集中在阵性泥石流的头部, 如培龙沟 1985-06-20 的第一阵泥石流, 在其头部集中了多块长径  $> 3.2$  m 的巨砾, 并以 8.80 m/s 的速度冲向主河, 抵制了主河的冲刷, 减少了  $V_{wb}$ , 加速了堵塞坝的形成。对于稀性泥石流, 进入堆积区的固体颗粒粒径越大,  $C_{s0}$  也越大, 堆积量就越多, 尤其当稀性泥石流  $Q_c$  很大, 固体颗粒又特别粗时, 进入主河后, 大量堆积和淤高, 甚至堵断主河, 形成堵塞坝, 不过这种特殊情况极少。

#### 3.2 主河

##### 3.2.1 主河的流量和流速

流量  $Q_w$  越大, 当其它条件相同时,  $H_w$  上涨的速度越快, 高度越大, 越不利堵塞坝的形成。流速  $U_w$  越大, 冲刷能力越强,  $V_{wb}$  相应地也越

大,不利于泥石流堆积体向对岸推进和堵断主河,培龙沟 1983-07-29 泥石流未能形成堵塞坝,与当时主河  $Q_w$  ( $2\,298\text{ m}^3/\text{s}$ ) 较大,  $U_w$  ( $5.09\text{ m/s}$ ) 较快,有一定关系。如果主河流量极小,接近断流,则很容易形成泥石流堵塞坝,包括稀性泥石流,因为主河水流无力搬动稀性泥石流堆积的沙砾石体,而被堵断。

### 3.2.2 主河的比降和河床及河谷宽度

如果主河比降  $i$  越大,河床及河谷越窄,则当上游来水量相同时,  $H_w$  就越高,使泥石流堵塞主河可能性越小。反之,  $H_w$  就低,形成堵塞坝的可能性就大。

## 3.3 泥石流沟与主河交汇处地形和流向

### 3.3.1 交汇处的地形

交汇处地形开阔,主河的河床、河滩地及低阶地的宽度  $B_w$  大,则堵断主河所需  $V_c$  也大,堵塞坝形成的可能性就小,如培龙沟主河的河床、凸岸的边滩,加进口段的老泥石流堆积扇总宽为  $654\text{ m}$ ,因此 1983-07-29 的泥石流堆积,只把主河河床向对岸推进了  $120\text{ m}$ ,淤高  $2\sim 3\text{ m}$  (见图 1),未能堵断;而冬茹弄巴主河床上部宽  $61\text{ m}$ ,连同老泥石流堆积扇前缘较低的部分,总宽  $91\text{ m}$  (见图 2),第一阵泥石流就形成了堵塞坝。

### 3.3.2 泥石流流向与主河交角

一般泥石流与主河正交,堵塞主河的长度最短,所需的  $V_c$  最小,加之泥石流到达主河对岸的行程短,可以充分发挥泥石流的惯性作用,故最有利于堵塞坝的形成;泥石流流向偏向主河上游,虽然行程加长,但主河的河床高程加大,故所需  $V_c$  即使增加,但增量不大,仍有利于堵塞坝的形成;泥石流流向偏向下流,与主河夹角  $\beta$  越小,越不利于堵塞坝的形成,一般当  $\beta < 30^\circ$  后,很难形成堵塞坝。如培龙沟 1983-07-29 泥石流,在刚入主河处交角为  $41^\circ$ ,但该段主河为弯道,这样向下游延伸,与主流接近平行,很难堵断主河。

### 3.3.3 交汇处主河的纵向坡度

一般主河纵向坡度(即比降)越大,越不利于堵塞坝形成,当主河坡度  $\alpha >$  泥石流的极限堆积坡度  $\theta_c$  时,在正常情况下,不可能形成堵塞坝,不过这情况极少。

## 3.4 三方面因素的综合影响

泥石流堵塞坝的形成是三方面因素及其相应的子因素综合作用的结果,但往往有一个或几个子因

素起着主导的作用。如培龙沟 1983-07-29 泥石流未形成堵塞坝是因为  $Q_c$ 、 $\beta$  比较小,  $Q_w$  较大、主河宽度大,但前二个因素是主导因素;米堆沟 1988-07-14 泥石流未形成堵塞坝,主导因素是稀性泥石流和泥石流的固体颗粒比较细;培龙沟 1985-06-20 泥石流形成堵塞坝是因为第一阵泥石流  $Q_c$  大、流向与主河正交、头部含有大量巨砾,主河宽度经前二次泥石流堆积后已经变窄,  $Q_w$  比较小,但前二者是主导因素;扎木弄巴 1902 年和 2000 年泥石流都形成堵塞坝,主导因素是  $Q_c$  特别大。

## 5 结 语

1. 藏东南部特殊而又脆弱的自然环境,使冰雪崩或其形成的堆积坝溃决、冰湖溃决、滑坡(含崩塌)或其堵塞坝溃决等所激发的泥石流经常发生,由于这类泥石流首阵或开始时的流量特别大,流速非常快,又含有大量巨砾,极易形成堵塞坝,而且规模大或比较大。

2. 泥石流堵塞坝,实际上是支沟的泥石流进入主河后,以堆积扇(体)的形式向对岸迅速推进,并与对岸连接,堵断主河而成。要形成泥石流堵塞坝一般要满足 3 个条件:  $V_{cb} > V_{wb}$ ,  $H_c > H_w$ ,  $P_c > P_w$ 。

3. 泥石流堵塞坝能否形成,是支河泥石流与主河水流在二者交汇处相互抗衡的结果,受支沟泥石流的性质、规模(含  $Q_c$ 、 $U_c$ )和粒度;主河的来水(含  $Q_c$ 、 $U_w$ )和河床形态(含  $i$ 、 $B_w$ ),以及交汇处的地形和泥石流与主河的交角( $\beta$ )等众多的因素影响,但对某一个具体堵塞坝的形成,往往有一个或几个为主导因素。通常稀性泥石流,交汇角  $\beta < 30^\circ$ ,交汇处主河纵坡  $\alpha >$  泥石流极限堆积坡度  $\theta_c$  时,不易形成堵塞坝。当泥石流  $Q_c$  特别大,固体颗粒又特别粗;或主河  $Q_w$  特别小,接近断流时,则几乎在任何条件下,包括稀性泥石流,都能形成堵塞坝。

因此在西藏东南部,由于冰雪崩、冰湖溃决或大规模滑坡(含崩塌)活动,所激发的首阵或前几阵大流量、高速度、多巨砾,并与主河正交的粘性泥石流,最容易形成堵塞坝。

## 参考文献 (References):

- [1] Zhu Pingyi, Wang Chenghua, Tang Bangxing, Characteristics of

- largescale debris deposits in Tibet [J]. *Mountain Research*, 2000, **18** (5): 453~ 456 [朱平一, 王成华, 唐邦兴. 西藏特大规模碎屑堆积特征. 山地研究 (现山地学报), 2000, **18** (5): 453~ 456]
- [2] Yang Zonghui. Report about the large debris flow of Polong Gully in Tibet [A]. In: Proceedings of the and National Conference on Debris Flow [C]. Beijing: Science Press, 1991. 252~ 254 [杨宗辉. 川藏公路迫龙沟特大泥石流灾害纪实 [A]. 第二届全国泥石流学术会议论文集 [C]. 北京: 科学出版社, 1991. 252~ 254]
- [3] L Ruren, Li Deji. Debris flow induced by melted water of Dongrunonglu, Bomi, Tibet [J]. *Glaciers and Frozen Earth*, 1989, **11** (2): 148~ 160 [吕儒仁, 李德基. 西藏波密冬茹弄巴的冰雪融水泥石流. 冰川冻土, 1989, **11** (2): 148~ 160]
- [4] Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Institute of Traffic Science, Tibet. Research on Water Destruction of Highway in Tibet [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 2001. 123~ 144 [中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 西藏自治区交通科学研究所. 西藏公路水毁研究. 成都: 四川科学技术出版社, 2001. 123~ 144]
- [5] Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Institute of Traffic Science, Tibet. Debris Flow and Environment in Tibet [M]. Chengdu: Chengdu Science and Technology University Press, 1999. 32~ 40 [中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 西藏自治区交通科学研究所. 西藏泥石流与环境 [M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1999. 32~ 40]
- [6] Wu Jishan, Zhang Jun, Cheng Zunlan. Depth and residual layer of viscous debris flow [J]. *Sediment Research*, 2003, **6**: 8~ 14 [吴积善, 张军, 程尊兰, 等. 粘性泥石流的泥深与残留层关系及其确定. 泥沙研究, 2003, **6**: 8~ 14]

## Formation of Dam from Debris Flow in the Southeast Tibet

WU Jishan, CHENG Zunlan, GENG Xueyong

(Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** Glaciers with their deposits abound in the high mountains of the Southeast Tibet. Large scale debris flow occurs frequently from these deposits and forms dams that block mainstreams. In this paper, seven events of large-scale debris flows occurred in four gullies, from which five blocking dams resulted, are discussed in details, focusing on the major factors impacting the dam formation. Result shows that the first surge group caused by snow and ice avalanches, ice-lake break, and large-scaled landslides, with peak discharge and high speed, and in abundance with boulders, are most likely to form blocking dams.

**Key words:** southeast of Tibet; debris-flow dam; formation mechanism