

# 甘家沟泥石流特征及其防治对策

祁 龙 高守义

(中国科学院兰州冰川冻土研究所·兰州市·730000)

## 提 要

甘家沟是一条国内有名的严重泥石流沟,流域内有滑塌体52处,面积达 $24.3\text{km}^2$ ,松散固体物质达 $13\,413\text{万 m}^3$ ,泥石流形成条件极为优越。为了保护沿江农田、村镇、公路和上游武都县城的安全,根据泥石流的形成特点和成灾方式,该流域的泥石流防治采取了生物措施与工程措施相结合,以工程措施为主,拦挡与排导相结合,以拦为主的综合治理方案。

关键词: 泥石流 固体物质 形成条件 拦挡坝

## The Features and Prevention of Debris Flow in Ganjiagou

Qi Long Gao Shouyi

(Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, 730000)

## Abstract

Ganjiagou is one of the famous debris flow disastrous gully in China. The catchment area is  $24.3\text{km}^2$ . There are 52 landslides and  $13.413\times 10^7\text{m}^3$  loosened solid material in the gully. The formation condition of debris flow is extremely advantageous. In order to protect the farmland villages and towns, roads and Wudu city in upper reach, one comprehensive prevention countermeasures has been put forwards according to formation features and disasters forms of debris flow, which is to combine the engineering and biological measures, to take engineering measure as the dominant factor and to combine the regulating and drainly measures, taking regulating measure as the dominant factor.

**Key words** debris flow sold material formation condition blocked dam

甘家沟位于甘肃省武都县城东南10km处的白龙江左岸,是一条与云南东川将家沟齐名的严重的泥石流沟。该沟泥石流极为活跃,规模巨大,严重危害农田、村镇、交通和武都县城的安全。自50年代起曾先后进行过3次治理,皆因财力、物力和技术水平所限而未能奏效,是当地人民的心头大患。80年代以来,由于灾害加剧,要求治理甘家沟的呼声再次强烈,经上报国家计委批准,我们于1992年又一次对该沟进行了全面的前期勘查,制定了综合整治方案,完成了工程设计。现就上述工作的若干特点作一介绍。

## 一、泥石流发育条件

泥石流的发生和发展有赖于陡峻的地形,丰富的固体物质和充足的水源,而它们又受制于地

层、岩性、构造等因素的控制。

(一)地形条件

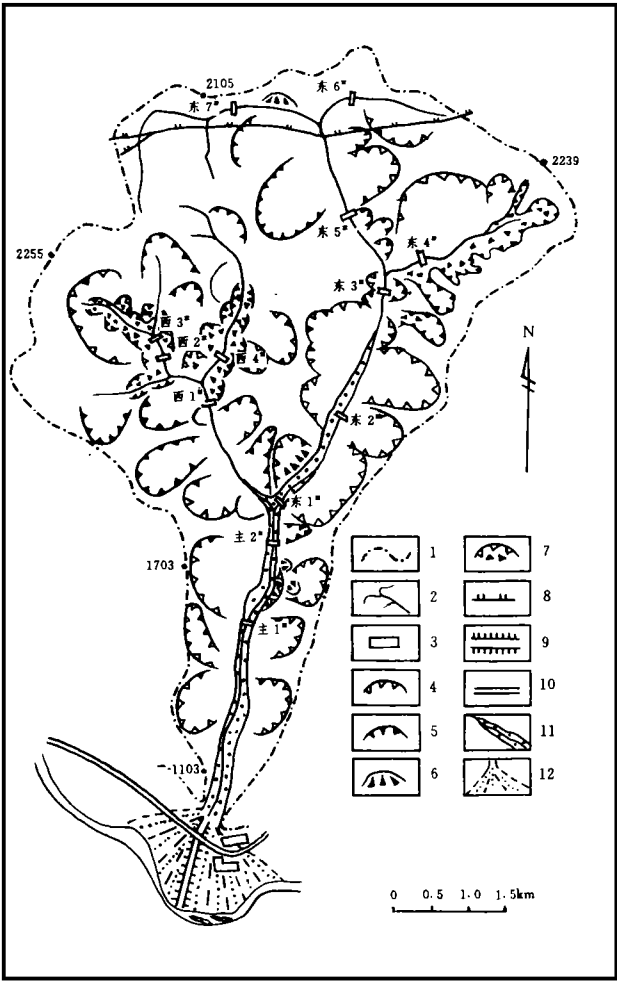
该沟位于陇南山地中部,属南秦岭高中山侵蚀、风化和构造活动强烈的山地,山高坡陡,沟谷纵横,梁峁起伏,坡面支离破碎。该沟流域面积 43.3km<sup>2</sup>,形态呈葫芦状,南北长 11km,东西宽 6.4km,源头分水岭海拔高度 2 105m,沟口与白龙江交汇处 970m,相对高差 1 135m。流域主沟长 12km,平均比降 7.3%,山坡平均坡度为 27°~35°,切割深度为 300~540m。流域内有主要支沟 1 条,长度在 1.5km 以上的支沟 6 条,沟壑密度 2.39km/km<sup>2</sup>。由于该沟泥石流特别活跃,沟口形成了长 1.5km,面积约 1km<sup>2</sup> 的巨大扇形地,压缩白龙江河床,阻碍水流下泄。

甘家沟座落在志留系地层之上,发育有巨厚的炭质千枚岩、灰绿色千枚岩、板岩、夹薄层砂岩、灰岩。这种相对较软弱的岩性使山坡风化十分严重,倒石堆等重力堆积十分发育。在山梁和缓坡处分布有第四系黄土,面积约 14km<sup>2</sup>,厚度 1~50m。主沟两岸残留有阶地泥石流沉积层,上游沟道中有现代泥石流沉积。

该区新构造运动十分强烈,自第三纪以来,长期处于上升状态,山地平均 100 年升高 1.6~1.8mm,河道急剧下切,这不仅造成了坡陡沟深的地形,而且加剧了地层的断裂破碎,节理和裂隙的发育,促进了滑坡、坍塌的发生,为泥石流的形成提供了势能条件和充足的物质来源。据本次调查,流域内有大小滑坡(坍塌)52 处(见附图),滑塌面积 24.3km<sup>2</sup>,松散固体物质 13 413 万 m<sup>3</sup>,平均 307 万 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>。

(二)降水条件

该流域地处亚热带北部边缘,属过渡带季风山地气候,受地形影响,气候垂直带差异明显。据武都县气象站资料,该区多年平均降水量 474.6mm,年内降水主要集中在 7、8、9 三个月,占全年总降水量的 53%。该区降水偏少,但暴雨较多,日降水 25~49mm 的大雨发生在 5~9 月,历年平均 2.1 次,日



1. 流域界线; 2. 流水线; 3. 拦挡坝; 4. 活动滑坡; 5. 老滑坡;  
6. 崩塌体; 7. 滑塌体; 8. 断裂带; 9. 导流堤; 10. 公路;  
11. 泥石流堆积; 12. 扇形地。

附图 甘家沟滑坡(滑塌)情况

降水 50~90mm 的暴雨发生在 7、8 两月,历年平均 0.3 次。连续 24h 最大降水 78.6mm,1h 最大降水 41mm,10min 最大降水 16.2mm。这种高强度的降水为泥石流的形成提供了充沛的水源和足够的水动力条件。

## 二、泥石流特征和危害

### (一)泥石流规模

甘家沟自本世纪以来,发生过 10 次大规模泥石流,其中以 1933 年最大,1984 年次之。据北峪河管理局调查,1984 年 8 月 30 日泥石流流量为  $641\text{m}^3/\text{s}$ ,其重现期约为 50 年。小规模泥石流则每年都有发生,有时多达 10 几次。据武都地区水电局调查,甘家沟多年平均侵蚀模数为  $35\,400\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。

### (二)粒度特征

甘家沟泥石流十分粘稠,颗粒粗大,据对 1984 年 8 月 3 日大型泥石流沉积物样品分析<sup>[1]</sup>,容重达  $2.29\text{t}/\text{m}^3$ ,流体中携带有 3~5m 的巨石,大多数石块粒径为 0.3~0.6m,平均粒径 11.1mm,粘土含量平均为 4.2%,和该地区其它泥石流沟的情况基本一致,而和云南东川地区的泥石流相比,平均粒径较小,而粘土含量稍高。

### (三)泥石流危害

甘家沟泥石流危害十分严重,除了直接威胁沟口汉王镇数千人的生命财产安全,经常淹没农田和阻断甘川公路外,还对上游武都县城的安全造成严重威胁。由于甘家沟泥石流规模巨大,活动十分频繁,沟口扇形地的发展十分迅速,挤占了原河床的 2/3,将河床压缩到不足 50m 宽,迫使白龙江主流从对岸山脚下通过,并强烈冲蚀坡脚,造成大坪山滑坡的不断活动,当地村庄已 3 次搬家,仍未摆脱滑坡的威胁。

沟口扇形地的发展还严重阻碍洪水下泄,造成泥沙大量淤积和河床迅速上涨,使该段河床平均每年上升 10cm。目前,在武都县城附近,河床高出城中心地面 2.1m,严重威胁城区 3.5 万人和 6 亿多元财产的安全。同时,河床的不断抬高还危及沿江农田、村镇和公路,数千亩农田已变成死水滩,而公路路基几年就要加高一次。

50 年代以来,甘家沟泥石流曾 4 次堵断白龙江,每次约 2~3h,回水几公里,淹没农田千余亩,毁坏大批水利和交通设施。尤其在堵江和白龙江特大洪水同时发生时,严重危及武都县城的安全,1984 年 8 月 3 日就出现过此类情况。

## 三、防治泥石流的对策

根据甘家沟泥石流的发育特征和危害方式,为了保护武都县城,减缓泥石流对沿江农田、村镇、公路的危害,甘家沟防治泥石流应因地制宜地实行生物措施与工程措施相结合,以工程措施为主,拦挡与排导相结合,以拦为主的防治对策。

### (一)以工程措施为主,工程措施和生物措施相结合

通过对泥石流形成条件的分析,我们可以看出,甘家沟滑塌面积达  $24.3\text{km}^2$ ,泥石流主要由深层大型滑坡补给而成,坡面侵蚀补给很少,因此要治理泥石流必须首先治理滑坡,减少固体物质来源,对此采取植树造林等生物措施已无能为力,有时还会因滑坡体含水量的增加促使其活动。根据该区多年来的治理经验,植树造林对以坡面侵蚀为主的水土流失具有较好的治理效果,而对那些以点状重力侵蚀为主的泥石流沟收效甚微,如 1984 年该区连续普降大雨和暴雨时冲毁

林地 1.63 万亩,草地近 1.9 万亩,各种林草措施对滑坡泥石流的发生没有发挥出预期的控制作用。这一事实引起了当地有关部门和技术人员的深思,并对以往水土保持工作中单纯的植树造林方法产生了疑虑。事实上,严重的泥石流地区和黄土高原,在水土流失的机制上有着很大差异。因此,在防治措施上应有所区别,不能简单的死搬硬套,其中重要的一点就是要重视和加强稳坡固床措施,减少各类重力侵蚀作用,这样才能达到理想的治理效果。当然,在强调工程措施作用的同时,不能否认生物措施的作用,它可以通过减少坡面侵蚀,拦蓄水流,削减洪峰、降低水流冲蚀搬运能力等起到控制泥石流的作用。尤其在稳定后的滑坡体上,大力植树造林,能防止坡面冲沟的发育,促进滑坡稳定,又能改善生态环境,增加经济效益。因此,生物措施和工程措施二者应很好的结合起来,取长补短,功能互补,达到最佳的治理效果。

#### (二)以拦为主,拦排结合

甘家沟泥石流防治采取以拦为主的治理措施,不仅是由泥石流的形成机制和危害方式决定的,也是保护沟口和沿江农田、村镇、交通及武都城区的需要,同时这也有利于保护生态环境,减少对下游及长江的泥沙补给,有利于国土整治。

如前所述,该沟泥石流的治理关键在于稳定滑坡,而滑坡的稳定最简便易行的办法是用拦挡的形式拦蓄泥沙于沟内,以此来提高沟床侵蚀基准,展宽沟床,减缓比降。这样不仅可以通过降低水深和流速来减弱水流的冲蚀搬运能力,还能增加被动土压力,达到稳定滑坡的目的,而排导措施往往会加剧上游沟床的侵蚀速度,不仅无助于滑坡的稳定,而且还会起到促进滑坡活动的作用,同时,排导措施也会加大对白龙江的泥沙补给量,加剧泥石流扇形地的发展和河床的淤积抬高,从而造成更大的堵江淹没危害。当然,为了保护农田、村镇和公路,采取必要的排导措施是需要的,但单纯的排导措施只是一种被动消极的临时措施,不仅不能控制泥石流的发生和发展,而且还会起到推波助澜的作用,从长远的和全局的观点来看,不利于环境保护和国土整治,也不能实现保护沿江农田、村舍、公路和武都城安全的目的。更何况,由于扇形地的发展和白龙江河床的抬高,甘家沟泥石流的排导已十分困难。因此,应采用以拦为主,拦排结合的综合治理措施。

### 四、治理措施及布局

甘家沟泥石流治理采用的沟道工程:有拦挡坝和排导沟;坡面工程:有梯田。同时,为了拦蓄径流,削减洪峰,减少坡面冲蚀和减轻对工程措施的压力,制定了各种林草措施,它们共同形成综合治理体系。

#### (一)林草措施

1. 造林。在海拔 1 800m 以上的宜林荒坡上,大力种植以油松、华山松为主的用材林;在海拔 1 800m 以下的荒坡,沟谷及滑坡地带种植以洋槐、臭椿为主的防护林;在地形支离破碎、坡度较陡的荒坡和荒沟种植洋槐和酸刺为主的薪炭林;在海拔 1 600m 左右的村庄周围,发展以花椒、苹果为主的经济林。以上共计造林 13 000 亩。

2. 人工种草。充分利用 25°以上退耕地及部分荒地种植牧草,以草促林,以草兴牧。在草种配置上以紫花苜蓿、草木樨为主,同时引进一些优良草种,如红豆草、沙打旺等。共计种草 4 300 亩。

#### (二)工程施工

1. 拦挡坝。拦挡坝是甘家沟泥石流治理工作的核心,它的成败关系到整个治理工作的成败,必须精心设计,谨慎从事,既要在技术上安全可靠,又要在经济上合理可行,尽量节约投资。甘家沟泥石流拦挡坝在设计中主要应解决好以下关键问题。

(1)流量设计。流量是防治工程的主要控制因素,目前多用配方法来设计(表 1)。

$$Q_c = Q_B(1 + \varphi) \cdot D$$
 (1)

式中: $Q_c$  为某一频率的泥石流设计流量;  $Q_B$  为同频率的清水流量;  $\varphi$  和  $D$  分别为泥石流修正系数和堵塞系数。根据 1984 年泥石流调查,该次泥石流流量为  $641\text{m}^3/\text{s}$ ,频率约为 50 年一遇,据此推算,泥石流流量约为清水流量的 3.4 倍,即泥石流修正系数  $\varphi$  为 2.4,堵塞系数  $D$  为 1。因此在各拦挡坝断面处的流量设计中,将  $D$  取为 1,而  $\varphi$  值按泥石流设计容重计算:

$$\varphi = (r_c - 1)/(r_H - r_c)$$
 (2)

式中: $r_c$  和  $r_H$  分别为泥石流和泥沙容重; 清水流量采用铁道部第一设计院等单位制定的小流域暴雨洪峰流量简化公式计算,经计算分析,发现清水流量与流域面积成如下关系:

$$Q_{B1\%} = 11.2F^{0.84}$$
 (3)

表 1 泥石流流量及溢流口(溢洪道)设计表

拦挡坝 编号	面积 ( $\text{km}^2$ )	$Q_{B1\%}$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	$Q_{B2\%}$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	$r_c$ ( $\text{t}/\text{m}^3$ )	$\varphi$	$Q_{c2\%}$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	$r'_c$ ( $\text{t}/\text{m}^3$ )	$\varphi'$	$Q'_{c2\%}$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	设计比 降(%)	溢流口 宽(m)	过流深 (m)	流速 ( $\text{m}/\text{s}$ )	过流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
主 <sub>1</sub>	37.7	224.1	179.3	2.20	2.40	610	1.80	0.89	339	20.8	12	1.9	14.7	336
主 <sub>2</sub>	35.4	211.3	169.0	2.20	2.40	575	1.80	0.89	319	28.0	10	1.8	19.0	342
东 <sub>1</sub>	19.8	120.1	96.1	2.20	2.40	326	2.00	1.43	234	7.10	18.4	2.0	6.45	237
东 <sub>2</sub>	17.8	113.4	90.7	2.20	2.40	308	1.80	0.89	171	5.27	14	2.3	5.32	171
东 <sub>3</sub>	15.2	109.3	87.4	2.20	2.40	297	1.80	0.89	165	4.36	17	2.2	4.50	169
东 <sub>4</sub>	2.7	20.4	16.3	2.20	2.40	55	2.00	1.43	39	7.27	5.6	1.2	5.99	40
东 <sub>5</sub>	8.9	79.0	63.2	2.00	1.43	154	1.80	0.89	119	3.79	16	2.0	3.90	126
东 <sub>6</sub>	1.6	12.0	9.6	1.80	0.89	18	1.60	0.55	15	5.67	5.0	0.7	4.19	15
东 <sub>7</sub>	2.3	25.9	20.7	1.80	0.89	39	1.60	0.55	32	5.92	17	0.5	3.99	34
西 <sub>1</sub>	10.8	83.7	67.0	2.20	2.40	228	1.80	0.89	127	6.40	18	1.3	5.38	126
西 <sub>2</sub>	4.3	40.5	32.4	2.20	2.40	110	1.80	0.89	61	6.29	13	1.0	4.71	61
西 <sub>3</sub>	4.0	39.5	31.6	2.00	1.43	77	1.60	0.55	50	7.42	11	0.9	5.53	54
西 <sub>4</sub>	3.4	25.1	20.1	2.20	2.40	68	2.00	1.43	49	13.93	5.5	1.0	9.40	52

注: \* 为溢洪道。

(2)容重设计。泥石流容重受流域的产沙能力和沟床的输沙能力共同控制,本次泥石流设计按该区经验公式计算<sup>[2]</sup>:

$$r_c = 1.1A^{0.11}$$
 (4)

式中: $A$  为单位面积固体物质补给量( $\text{万 m}^3/\text{km}^2$ ),并将计算结果与调查数据综合比较后确定。为了计算各拦挡坝址处的泥石流流量,还需要设计不同断面处的泥石流容重,为此视固体物质补给状况及拦挡坝淤满后沟床的变化进行设计,表 1 中  $r_c$  指治理前的泥石流容重, $r'_c$  指治理后的泥石流容重,相应的还有  $Q_c$  和  $Q'_c$ ,前者用于冲击力的分析,后者用于溢流口及排洪道的设计。

(3)流速设计。流速设计按各断面处的流量,沟床断面形态和比降用下式计算<sup>[3]</sup>:

$$V = 45.5H^{0.25}I^{0.8}$$
 (5)

由于坝库淤满后沟床形态和比降都要发生变化,因此,流速设计按两种不同情况分别计算,前者用来分析动压力,后者用来设计溢流口。

(4)消能处理。泥石流过坝后往往使坝基和下游河床产生严重的冲刷变形,危及坝体安全,对此在设计中做了以下处理:

①限制坝高。坝下冲刷与坝高有关,故在设计中对软基础的拦挡坝的高度限制在17m以下。

②子坝消能。对坝距较长,且为软基础的拦挡坝,设计中增加了数道子坝,其回淤线高于主坝基础顶面。

③梯级坝保护坝基。设计中通过调整坝高,坝距和回淤比降之间的关系,利用下级坝的回淤来保护上级坝的基础。回淤比降按原沟床的70%设计。

(5)断面设计。拦挡坝采用80°浆砌块石结构的重力坝,坝身设有泄水孔和涵洞,其目的是尽快排出积水,减轻对坝体的渗水压力。拦挡坝背水面全部采用1:0.1的坡度,这是为了避免从坝顶落下的石块撞击坝脚。顶宽2~3m,迎水坡分3种情况:坝高15m以下者取1:0.3;15~25m者上部取1:0.3,下部取1:0.5;25~38m者取3种坡度,上部为1:0.3、中部1:0.4,下部取0.6或0.5。上述尺寸均满足稳定性要求。

(6)稳定性分析。稳定性分析中考虑的作用力有泥沙压力、泥沙重力、坝体重力和冲击力。由于坝体底部没有涵洞,地下水可自由排出,所以没有考虑静水压力和扬压力。各种作用力的组合分两种情况:

①坝体全部淤满后的工作状态下,泥石流从溢流口通过,无冲击力,只有自重、土压力和淤积物重力。②泥沙在坝库中淤积到距坝顶只差一冲击力作用高度后,若发生50年一遇的泥石流,顶部受冲击力作用,这时坝体所受的作用力有自重、淤积物重力、土压力和冲击力。

按上述两种情况,分别对各拦挡坝的抗滑、抗倾和应力状态进行了分析,在最危险的情况下,主1#坝的抗倾安全系数为1.10,东2#号坝的抗倾安全系数为1.15,安全系数虽然偏低,但出现这种最不利的情况的概率极小,为了节约投资,可维持原断面不变,其余各坝的安全系数均在1.4以上,可保坝体安全。

甘家沟内有多处工程地质条件较好的坝址,且沟内石料来源丰富,故泥石流拦挡坝采用浆砌块石结构的重力坝。这种坝造价较低,施工方便,安全可靠,可抵御大型泥石流的冲击破坏。这次共规划各种不同性能的泥石流拦挡坝13座,其中主沟2座,东支沟7座,西支沟4座。其位置因其功能和用途不同亦有不同;稳坝坝布置在靠近滑坡体下游的沟道中;固床坝布置在冲刷下切严重的沟段;拦砂坝则布置在口小肚大,比降平缓的沟段,拦挡坝沟道中的总体布局按梯级形展开,构成坝群,其坝高和间距按坝基条件、回淤比降和功能要求综合分析确定。

2. 排导沟。当上游沟道治理后,由于水沙条件的巨大变化,沟口扇形地上的沟道比降、沟型、断面形态等将会重新调整,直至其输沙能力与上游来水来沙相适应,其间将会出现强烈的冲刷现象,为了保护扇形地上的农田、村舍及公路,在沟口用泥石流沉积物修筑排导沟2000m,局部地段用浆砌块石修筑防冲潜坝和加固堤岸。

3. 梯田。梯田建设不仅可直接发挥保持水土的作用,而且可通过发展农业生产和增加粮食产量而实现退耕还林,调整种植结构,和发展多种经营的目的,这样既可改善群众生活,又能减少人为因素造成的水土流失,起到保护生态环境的作用。梯田建设安排在小于25°的坡耕地上,自上而下呈弧状等高分层布设,田埂高0.3m,并加固。地埂上种植草带,田间修建排水沟。

#### 参 考 文 献

- [1] 崔炳田. 北峪河和甘家沟泥石流危害.《水土保持通报》,1985年,第2期
- [2] 中国科学院兰州冰川冻土研究所等. 甘肃泥石流. 北京:人民交通出版社,1982年
- [3] 杨针娘. 粘性泥石流流速公式. 中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊,北京:科学出版社,1985年