

一场典型的冰雪雨水泥石流过程*

吕儒仁

(中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所)

提 要 1989年7月26日,贡嘎山东坡南关沟发生了一场典型的冰雪雨水泥石流。它下行30多公里后堵塞大渡河,造成直接经济损失245万元。这场泥石流历时约3小时,持续流动时间2小时。到达大渡河时的流速9.4米/秒,最大流量6768.0立方米/秒,总径流量1716.4万立方米,总输沙量627.0万立方米,残留沉积物总方量310.4万立方米(其中泥石流堵塞大渡河的扇形地方量30.0万立方米),弯道爬高15.5—16.5米。输往堵河扇形地下游方的固体物质方量是扇形地方量的19.9倍,泥石流尾流作用强烈。

关键词 贡嘎山 南关沟 冰雪雨水泥石流 尾流作用

1989年7月26日15—18时,贡嘎山东坡燕子沟流域内的左岸支沟南关沟,发生了近百年来规模最大的一场冰雪雨水泥石流。它下行30多公里,汇入并堵塞了大渡河(照片1)¹⁾,其主流线左(东)移,冲毁泸定—石棉公路820米(照片2),断道9个多月,造成直接经济损失达200万元;距与大渡河汇合处9.6公里的磨西—海螺沟冰川森林公园公路,横跨燕子沟的共和大桥(全长100多米,净跨一孔40米,净高10米,桥面宽8米)在这场泥石流的第三阵洪峰中被摧毁(照片3,4),造成直接经济损失45万元。

以下简要叙述这场典型的冰雪雨水泥石流过程。

一、自然背景

南关沟位于101°54'37"—101°59'11"E, 29°41'23"—29°44'39"N,燕子沟中游左岸。

南关沟流域面积19.8平方公里(其中林线以上为9.9平方公里),占燕子沟(229.7平方公里)全流域面积的8.6%。

在南关沟流域内有森林(照片5)面积2.1平方公里,高山灌丛草甸(照片6)面积3.0平方公里,雪蚀冰蚀寒冻风化基岩陡坡山地面积13.9平方公里,1966年12月时的冰川面积仅0.8平方公里(残存在林线以上的主沟内,附图)。

南关沟主沟道长9.26公里,与燕子沟汇合处的海拔约2630米,源头最高峰海拔6618米,最大相对高度3988米。

主沟沟床平均纵比降215.7‰(12°10'),林线以上沟段为443.3‰(23°54')。沟床内

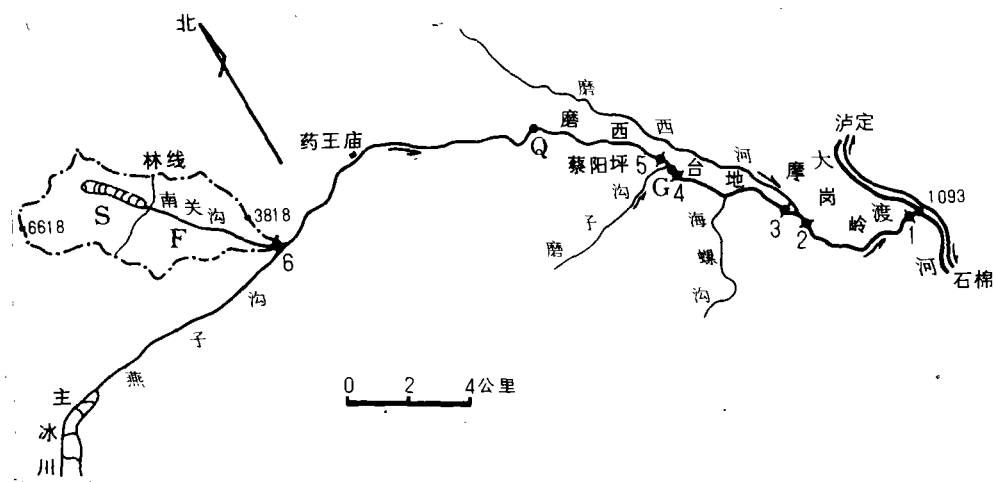
* 高生淮副研究员与作者一道作了实地调查,他还提供了海螺沟3000米气象站的许多资料;潘冀峰研究实习员参加了部分野外考察,郑本兴研究员提供了照片,在此一并致谢。

1) 本文照片见刊末图版I, II。

本文收稿日期: 1991-02-25 (改回日期: 1992-02-28)。

最缓坡度 $5^{\circ}42'$, 最陡坡度 69° 以上。

该沟内的基岩全为黑云母花岗岩, 主沟沿北西向断层发育, 呈一直线。正因为这一点, 加之古冰川作用和寒冻风化剥蚀作用, 冰碛层(尤其是沟床内的冰碛层)深厚。



附图 1989年7月26日燕子沟冰雪雨水泥石流流路图

Figure Flow way map of the ice-snow-melt water and rain debris flow

1—6. 泥石流断面编号; G. 共和大桥位置(海拔 1526 米); Q. 燕子沟与磨西古冰蚀谷盆交汇点(海拔 1818 米); S. 南关沟泥石流源地; F. 南关沟泥石流形成流通段

二、一场泥石流的全过程

1989年7月26日15时后, 南关沟林线以上, 因天气转暖, 残留冰川在消融(照片7), 巨厚冰碛层经流水(季节冰雪融水和雨水)侵蚀切割, 形成V形沟槽。4—7月正值雨季, 降水(海螺沟3000米气象站记录到的降水999.2毫米)下渗, 使土体饱和; 当日降水(42.8毫米)和高海拔处积雪融水的径流汇合后, 对冰碛层有冲刷作用, 沟床再度下切, 岸坡失稳, 产生众多滑坡、崩塌, 沟道遭堵塞, 后续洪水到来时, 使土体进一步饱和。

由于沟床纵比降大, 堵塞沟道的土体整体溃决, 而演变成泥石流, 其最小流量也在1130.4立方米/秒以上。这样的堵塞型泥石流(照片8)前后至少发生了5次, 其中以第三次为最大。这种泥石流相当粘稠, 根据泥痕和边岸残留沉积物, 估计最大容重在2.4吨/立方米左右。

泥石流到达森林带(长4.7公里)时, 又将原沟道内深厚的泥石流堆积体和古冰碛层铲刮揭起(照片9), 松散固体物质方量滚雪球似地增大, 到南关沟沟口段(照片10)最大流量达2340.0立方米/秒。

泥石流至与燕子沟汇合处(照片11), 在短暂壅塞后又形成溃流, 流量大增, 往下左突右拐, 冲蚀岸坡, 掏揭沟床, 获得巨量松散固体物质补给。

泥石流在燕子沟内又先后接纳了磨子沟、海螺沟和磨西河(照片12)等诸沟的洪水,

流量又递增,破坏能力更强,最后到达大渡河时,以 9 米/秒以上流速、6700 立方米/秒以上流量,在不到 20 秒的时间内,堵塞并跨河而过。

到达大渡河的时间是 7 月 26 日 16 时,结束是 18 时。从南关沟泥石流源地到与大渡河汇合处距离达 30 多公里,泥石流若以平均 9 米/秒左右流速,也要 1 小时左右才能走完。所以从源地起到大渡河,整个泥石流过程历时约 3 小时左右,但持续流动时间是 2 小时。

三、泥石流运动特征

(一)泥石流流速、流量大,呈阵性和粘性,沿程不因沟床纵比降变缓而流速减小

将附图中六个调查断面上所获资料及计算结果列入附表。洪峰平均流速 V_c (米/秒)曾用三种公式作了计算,经比较分析后,确定以最接近实际的参考文献[1]中的式(6)为准。计算中一律采用泥石流固体物质比重 $\gamma_m = 2.70$ 吨/立方米,洪峰流量 Q_c (立方米/秒)采用断面法计算,即

$$Q_c = V_c W_c,$$

式中 W_c 为过流断面面积。

附表 1989 年 7 月 26 日燕子沟冰雪雨水泥石流流路变化

Table A change along flow way of the ice-snow-melt water and rain debris flow in the Yanzi Valley on 26 July, 1989

断面 编号	位 置	至与大渡河 汇合处距离 (米)	过流断 面面积 W_c (米 ²)	平均泥深 H (米)	纵比降 I	泥石流最 大容重 γ_c (吨/米 ³)	洪峰平 均流速 V_c (米/秒)	洪峰流量 Q_c (米 ³ /秒)
1	与大渡河汇合处上游	300	720.0	8.0	0.0280	2.0	9.4	6768.0
2	吊嘴下游 300 米	4633	682.5	6.5	0.0318	2.1	9.4	6415.5
3	铁索桥上游 114 米	5812	631.8	8.5	0.0404	2.2	9.2	5812.6
4	共和大桥下游 200 米	9436	650.0	5.0	0.0541	2.3	8.2	5330.0
5	磨子沟沟口上游 300 米	10051	605.2	8.9	0.0696	2.3	10.7	6475.6
6	南关沟沟口处(海拔 2720 米)	25060	200.0	10.0	0.1084	2.4	11.7	2340.0

由附表可知,断面 6—1 的洪峰流速平均约 9.8 米/秒,洪峰平均流速变化在 8.2—11.7 米/秒之间;洪峰流量则变化在 2340.0—6768.0 立方米/秒之间;泥石流最大容重变化在 2.0—2.4 吨/立方米。从残留沉积物特征判断,泥石流都属粘性,且粘度在 0.1 帕·秒以上。

由于泥石流规模很大,流路又都是洪水沟道,故经沿程铺床、落淤减流后,泥石流很快会得到汇流洪水的补充,并以铲刮揭底获得大量松散固体物质补给,两者混合后便又成为汹涌奔流的粘性泥石流。

尽管断面 4 以下,沟床纵比降 $< 50\%$,最小达 28%,但沿程由于流量递增,能量有增无减,流速亦并未减小,以致泥石流能超过大渡河。

(二)整个泥石流过程的总径流量甚大

计算结果表明,从断面 1 处向大渡河输送的总径流量 1716.4 万立方米,这为南关沟沟口(断面 6)处总径流量(591.8 万立方米)的 2.9 倍。

(三) 总输沙量亦大

计算结果又表明,由断面1处输入大渡河的泥沙总量627.0万立方米,这比由南关沟输往燕子沟内的泥沙石块方量(443.4万立方米)多183.6万立方米,该多出的部分是泥石流从燕子沟沟床铲刮揭底获得的。

(四) 直进性强,弯道爬高和泥位超高均大

由于粘性泥石流在运动过程中有直线前进的特性^[2],故在弯道处出现爬高和泥位超高现象。在共和大桥左岸上端测得弯道爬高15.50米,这超过泥位(6.74米)的8.76米。再则在断面3下游114米的铁索桥(在这场泥石流中已被摧毁)右岸,测得弯道爬高16.50米,它超过泥位(8.48米)的8.02米。用参考文献[3]中式(4),反算得共和大桥左岸上端和铁索桥右岸爬高前的泥石流流速 V 分别为13.8和14.2(米/秒),两者皆比平均流速(见附表)要大。

四、泥石流沉积特点

(一) 残留沉积物方量大

根据粗略估算,断面6—大渡河的残留沉积物总方量310.4万立方米,其中残留在燕子沟沟道内的堆积方量280.4万立方米,泥石流堵河的扇形地方量30.0万立方米。

(二) 填满沟道,出现漫淤、落淤和回淤诸现象

断面6以下,燕子沟沟道平均宽100米左右,最宽130米,峡谷段宽一般20—30米,但长度小。由于这场泥石流规模很大,沟道底床皆被填满,泥深最小都在5米以上,南关沟下游段泥深10米左右。泥石流过程后期及完结后,水流归槽(洪流槽宽64米,清水槽宽12米),呈现以下几种沉积现象。

1. 漫流沉积 泥石流洪峰时满槽,近边岸一带流速减小,逐渐淤积,待洪峰过去,主流归槽,边岸泥石流体完全沉积下来。流体中水分析出后,呈坚固的泥石体。其特点是表面十分平缓,凸出的大漂砾极少,似乎漂砾巨石在漫淤过程中因重力分异而沉底。这种漫流沉积物沿沟道呈左右斜接式排列(见照片3),而非对称式分布。

2. 减速落淤 由于高容重粘性泥石流洪峰直进性强,弯道爬高和泥位超高均大,能量损失很大,阵流洪峰所挟带的大量漂砾巨石便会部分落淤。待泥石流过程后期和完结后,洪水和清水冲洗掉细颗粒泥沙,露出一片石砾河滩,并有石背石现象。这在共和大桥和铁索桥附近最为典型。前者大漂砾粒度可达 $7.0 \times 3.4 \times 3.0$ 米, $6.5 \times 2.3 \times 2.0$ 米, $5.0 \times 3.0 \times 2.5$ 米, $1.5 \times 1.2 \times 0.8$ 米;漂砾岩性成分几乎全为花岗岩,片岩和石英岩极少。落淤段地表起伏较大,常达3米以上。

3. 回淤沉积 这场泥石流堵塞大渡河后,磨西河河口临时侵蚀基准很快抬高,导致泥石流过程后期泄流不畅,回淤长3.98公里。初步估算,这段泥石流回淤沉积体达16.1万立方米(这可能是一个偏小的数字)。回淤段沟谷内不见泥痕,河床表面平整,无漂砾巨石,这全系回淤沉积所致。

五、关于泥石流尾流的讨论

如前所述,这场泥石流堵塞大渡河的扇形地方量 30.0 万立方米,而由断面 1 处输入大渡河的泥沙总量 627.0 万立方米,即此处有 597.0 万立方米泥沙被大渡河输往远方。

龚嘴电站水库是最大的泥沙落淤场所。据报道¹⁾,大渡河下游的龚嘴电站水库自 1971 年建成至 1991 年的 20 年间,平均每年入库泥沙 3500 万吨左右,唯 1989 年入库泥沙达 1 亿吨。显然 1989 年 7 月 26 日燕子沟内的这场冰雪雨水泥石流,输入大渡河的巨量泥沙有相当部分可能入了库。

这里要表述的是,泥石流洪峰在形成扇形地等堆积形态后,后续稀性泥石流和洪水,以及堆积体中析出的水体继续会作用,将泥石流作用过程后期或堆积体固体物质(一般其粒度<洪峰堆积体固体物质粒度)输向扇形地等堆积形态下游,经很长距离后才沉积下来,这就叫做尾流作用,其相应沉积物叫做尾流沉积。

此种作用在内流区最容易区分,如青藏高原北缘祁连山北坡疏勒河出山口扇形地下游的流路属之,这在卫星像片上清晰可见。

但在外流区尾流作用为大河影响所复杂化。它是沟床上涨,泥沙量猛增(水文观测断面上出现很高的沙峰),大型水库库尾扇形地及河口三角洲快速扩展的重要原因之一。

因此一场完整的泥石流过程应包括侵蚀、输移、堆积和尾流四个环节,后两者在沉积学上不难区分,在成矿作用上尾流作用不可忽视。

参 考 文 献

- [1] 康志成,1985,云南东川蒋家沟粘性泥石流流速分析,中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊,第 4 号(中国泥石流研究专辑),科学出版社,第 108—118 页。
- [2] 吕儒仁、李德基,1985,四川大型泥石流,科学杂志,37(1),第 39—45 页。
- [3] 康志成,1985,云南东川蒋家沟泥石流运动流态特征,中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊,第 4 号(中国泥石流研究专辑),科学出版社,第 97—107 页。

THE PROCESS OF A TYPICAL ICE-SNOW-MELT WATER AND RAIN DEBRIS FLOW

Lü Ruren

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

Abstract

At 15—18h, on 26 July, 1989, an ice-snow-melt water and rain debris flow occurred in the

1) 李复如、毛绍清, 1991, 来自龚嘴水力发电总厂的报告, 四川日报, 10 月 26 日, 第 2 版。

Nanguan Gully on the left bank in the Yanzi Valley of the east slope in Mt. Gongga. After flowing down more than 30km, it blocked up the Dadu River and resulted in that the highway of Luding—Shimian was washed out the length of 820m and cutting off the road is more than 9 months. A large highway bridge across the Yanzi Valley from Moxi to the Hailuoguo Glacier-Forest Park was destroyed. Direct loss in economy is 2.45Myuan.

The Nanguan Gully with an area of 19.8 km^2 (9.9 km^2 is above forest line) located at $101^\circ54'37''$ — $101^\circ59'11''\text{E}$, $29^\circ41'23''$ — $29^\circ44'39''\text{N}$. In the gully, there are a forest of 2.1 km^2 , alpine-shrub-grassy marshland about 3.0 km^2 , mountainous region of precipitous bedrock of 13.9 km^2 , a glacial area in Dec. 1966 was 0.8 km^2 and remained in main channel above forest line. The length of main gully is 9.26 km , maximum relative height is 3988 m , average longitudinal gradient of main gully bed is 215.7‰ ($12^\circ10'$), but above the forest line is 443.3‰ ($23^\circ54'$). All the gully is granite, main gully has been developing along the west-north fault, thickness of its till is large.

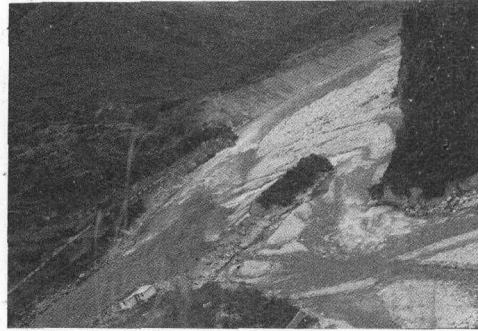
On the basis of site investigation, analysis and calculation, the debris flow went through 3h more or less from beginning motion to end, but practical time of continuing motion is only 2h more or less. In a distance of over 25km from No. 6 section to No. 1, average velocity is 9.8 m/s , discharge of flood peak changes from 2340 — $6768\text{ m}^3/\text{s}$, the maximum weight of a unit volume of debris flow is 2.0 — 2.4 t/m^3 , the runoff total of transporting into the Dadu River is 17.16 Mm^3 , a total of transporting mud, sand and stone into the Dadu River is 6.27 Mm^3 . The debris flow appears spasmodically and with viscosity, a nature of its straight advancing is strong, the height of creeping up on the bend way is 15.5 — 16.5 m . A total of remaining deposits is 3.10 Mm^3 . The debris flow body in the process filled all the gully bed on its flow way, occurred sediments of overflowing, decelerating and back flowing.

Solid materials of debris flow of blocking up the Dadu River are about 0.30 Mm^3 , but one of transporting into the Dadu River are 6.27 Mm^3 . The latter is more 5.97 Mm^3 than the former, i. e. the most part of solid materials in the process all transported into the lower reaches below blocking the river fan of the Dadu River. It is called the tail-flow action of debris flow, its sediment is called the tail-flow one. For this reason, a complete process of debris flow should include 4 links of erosion, transportation, accumulation and tail-flow action.

Key words Mt. Gongga, Nanguan Gully, ice-snow-melt water and rain debris flow, tail-flow action



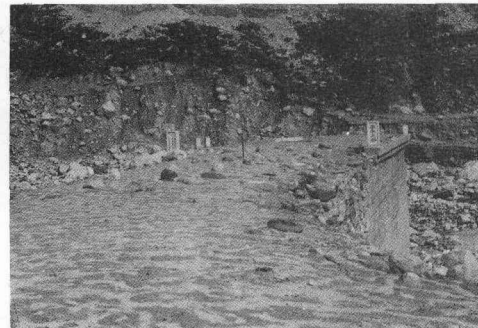
照片 1 南关沟泥石流堵塞大渡河,迫使泸定—石棉公路改线(1990年4月30日吕儒仁摄)



照片 2 泥石流使大渡河主流线左(东)移,并冲毁公路路基(1989年11月3日潘嘉峰摄)



照片 3 南关沟汇入燕子沟后的泥石流堆积体(原共和大桥附近)(1989年10月18日吕儒仁摄)



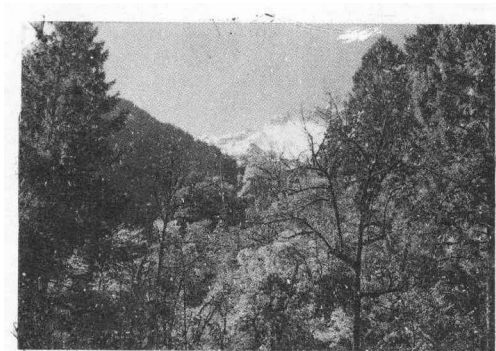
照片 4 共和大桥遭泥石流摧毁,南岸桥台还保存,桥面淤有泥沙,厚12厘米(1989年10月21日吕儒仁摄)



照片 5 南关沟下游的原始森林,下方为泥石流堆积体(1989年11月1日潘嘉峰摄)



照片 6 流云雾海所覆盖的高山灌丛草甸(1989年11月1日潘嘉峰摄)



照片7 远处林线以上的冰雪融水是泥石流水源之一(1989年11月1日潘冀峰摄)



照片8 南关沟内林线上下的堵塞型泥石流堆积体(1990年10月29日郑本兴摄)



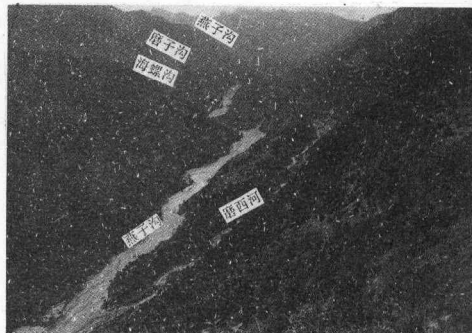
照片9 森林带内南关沟谷底遭泥石流铲刮揭起。泥深10米以上(1989年11月1日潘冀峰摄)



照片10 南关沟下游段泥石流沟床。左侧为1966年6月6日泥石流堤(1989年11月1日吕儒仁摄)



照片11 南关沟与燕子沟主沟汇合处的泥石流堆积体。右下侧为大漂砾,粒度 $8 \times 5 \times 3$ 米(1989年11月1日吕儒仁摄)



照片12 燕子沟接纳的沟谷(1990年4月30日吕儒仁摄)