

文章编号: 1008 - 2786 - (2011)3 - 369 - 09

青藏高原典型冰湖溃决泥石流预警技术

程尊兰^{1,2}, 洪勇^{1,2}, 黎晓宇^{1,2}

(1. 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;
2. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041)

摘 要: 从冰湖溃决型泥石流坝的形成、溃决机制, 主要特点和成灾过程着手, 在广泛收集和分析国内外有关冰川-冰湖-冰湖溃决-冰湖溃决泥石流-冰湖溃决泥石流坝-坝溃决研究基础上, 通过川藏公路然乌至培龙段冰湖、冰湖溃决泥石流的区域考察, 选择典型沟道米堆沟和光谢错冰湖典型点进行详勘, 按照溃决泥石流重点防治溃决的主要原则, 提出研究路段典型冰湖溃决泥石流预警的基本体系和配套技术。

关键词: 冰湖溃决; 泥石流; 预警技术

中图分类号: P642. 23, P931. 4

文献标识码: A

冰湖溃决泥石流是高山冰湖溃决洪水引起的突发性泥石流。典型的冰湖溃决几乎与洪水演化为泥石流的过程相一致, 具有突发性强、洪峰高、流量大、破坏性强、持续时间短、波及范围大的特点, 在泥石流形成、运动和堆积的过程中又会激发其他次生灾害, 从而形成灾害链。国外对冰湖溃决的研究起步比较早, 但进展比较缓慢, 近年来新的研究成果很少^[1]; 尤其对冰湖溃决泥石流坝的研究一直都很少。长期以来, 除前苏联 1970 年代对哈萨克斯坦的泥石流坝进行过调查研究外, 其他国家几乎没有进行过专题研究。日本、美国虽对滑坡(含崩塌)坝作了比较深入的研究, 开展了模型试验, 建立了溃决模式模型, 但对冰湖溃决泥石流坝溃决也未有涉及。

我国关于这方面研究较晚, 因此对冰湖溃决泥石流坝溃决对公路危害的研究, 大都是结合西藏地区冰湖溃决泥石流及其危害的研究进行。比如 1975—1977 年进行西藏泥石流考察^[2]时, 发现一些大型或特大型泥石流的形成是由于冰湖溃决的超常洪水激发的, 这类泥石流不仅对公路造成严重的直接危害, 同时还可能堵塞其汇入的主河, 形成泥石流

坝, 泥石流坝溃决时, 在主河形成溃决洪水, 对公路造成二次危害^[3-6]。嗣后, 在西藏地区, 尤其在川藏公路南线进行泥石流等山地灾害的考察和防治研究时, 都对冰湖溃决泥石流及其形成的泥石流坝溃决、公路沿河路基水毁作为重点进行考察研究^[7-10], 也对冰湖溃决泥石流形成机理、坝溃决等相关问题作了不同程度的研究^[11-14], 并开展了室内模拟试验^[15-16]研究, 但对冰湖泥石流坝溃决机制、条件以及预警和防治技术等研究很少, 仅作了一般性的介绍。只有吕儒仁^[8]对西藏冰湖溃决的机制、类型、水热条件和危险性判别等作了比较全面的分析; 陈储军等对西藏年楚河上游终碛湖溃决条件进行了分析, 并作了溃决洪水流量的估算^[17]。但这些研究对象主要是冰川终碛湖的溃决, 对其他类型的冰湖溃决涉及很少, 尤其是预警技术未见这方面的成果介绍。川藏公路南线然乌至培龙段是西藏干线公路、也是全国公路干线中出现大型冰湖溃决泥石流及泥石流堵塞坝溃决最多、危害最严重的路段, 为避免或减轻冰湖溃决泥石流对本路段的危害, 提高该路段通车率和运力, 保证当地经济发展, 本文以这一路段

收稿日期(Received date): 2010-03-05; 改回日期(Accepted): 2011-01-24。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金(40771024), 国家科技支撑计划专题项目(2008BAKSOB04-5), 水利部公益性行业科研专项项目(200801032)资助。[Supported by National Science Foundation Project(40771024), National Science and Technology Plan Projects(2008BAKSOB04-5), Chinese Ministry of Water Conservation Special Fund for Public Welfare Industry Project(200801032).]

作者简介(Biography): 程尊兰(1952-), 女, 四川隆昌人, 研究员, 博导。主要从事泥石流和山区洪水的成灾机理与减灾技术研究。[Cheng Zunlan(1952-), female, born in Longchang of Sichuan, majoring on torrential flood & debris flow prevention engineering.]

典型冰川、冰湖、冰湖溃决、冰湖溃决泥石流、冰湖溃决泥石流汇入主河形成泥石流坝、泥石流坝溃决为例,就典型冰湖溃决泥石流预警技术进行初步的探讨,以促进冰湖泥石流坝溃决防灾能力的提高。

1 研究区概况

研究区位于青藏高原东南部,是我国海洋性冰川最发育、分布最集中的地区。本区地貌属发育过程中的青年期,区内岭谷高差悬殊,新构造运动十分频繁(图1)。气候上属于亚热带山地湿润区,正好处在西藏高原所谓“舌状多雨带”舌腰部分。从河谷到高山年降水量多达800~3000 mm。由于高强度的山地降水再辅之以荫蔽度很高的地形条件,本区又成为地球上中、低纬度著名的山地冰川作用中心。其位于高原的东部,是整个青藏高原向东运动的前缘地区,发育许多目前仍在强烈活动的断裂构造,主断层都是压性和压扭性断层,以近东西向和北东向为主,小断层多系张性和张扭性断层;以北北西及近南北向两组张性断裂和北东向压扭性断裂为主。沿这些断层发育许多强烈切割的河流,北北西

和北西西断裂控制主水系的发育与形成。帕隆藏布江在然乌湖以上为北北西向,然乌湖以下至本研究区河段的主流方向为北西。实际上这组断裂控制了整个帕隆藏布江的流向,以至在下游其与雅鲁藏布江的汇入口,也呈反向北西西方向。

在第四纪末,本区发育着巨大的网状古冰川,几乎所有河谷均被深厚的(500~1000 m)冰层所覆盖。冰川退缩之后留下丰富的古冰川遗迹和各种类型的松散冰碛物,所形成的冰川地貌类型丰富多样,冰蚀地貌类型有角峰、刃脊、冰蚀盆地、冰斗、“U”形谷与悬谷、槽谷等,冰碛地貌类型有冰碛垅、冰碛平台、冰碛丘陵等。

由于本区正好位于孟加拉湾湿润气流进入青藏高原的水汽通道,冰川区降水极为丰富。根据1964—1965年古乡冰川站夏季定位观测,中国科学院青藏高原综合科学考察队在本区冰川积累区的考察资料,结合波密、易贡、察隅等河谷地区气象站的资料综合分析,本区4500 m高山冰川区的年降水量为1500~3000 mm,最大降水量以易贡—通麦—培龙为中心向西、北、东三个方向逐渐减少,如西至米堆冰川区年降水减少到1700 mm左右。

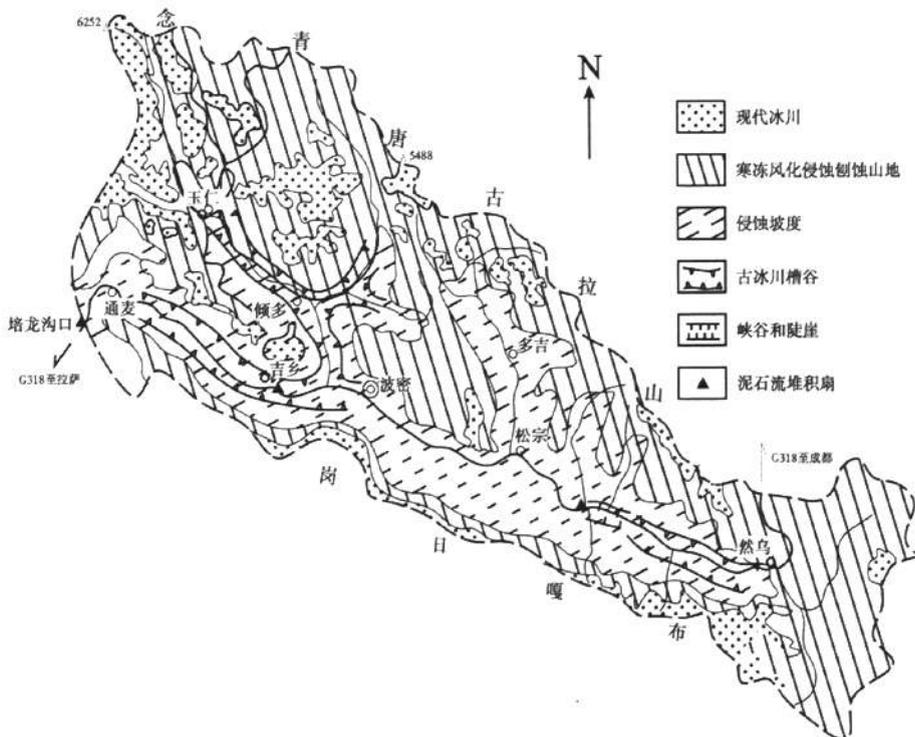


图1 研究区地貌类型图

Fig.1 Landform of study area

由于冰川区降水丰富,加上山势陡峻,高山区雪崩频繁,规模巨大,成为冰川的主要补给方式,雪线下降很低,比同纬度的珠穆朗玛峰地区低 1 000 ~ 1 500 m,使冰川能在较高的温度条件下生存,成为我国跃动冰川分布最多的地区。根据考察资料,本区冰川温度除表面 10 ~ 15 m 以上受季节变化影响外,冰川主体温度常年保持在 0℃。丰富的补给,很高的湿度,加上较陡的坡度,使冰川运动迅速。本区冰川舌部能下降到很低的河谷中,冰舌末端高度一般为 2 500 ~ 3 500 m,比同纬度的青藏高原内部同等长度的冰川低 2 000 ~ 2 500 m。因此,冰川消融强烈,冰川迳流丰富,年迳流量 1 500 ~ 3 000 mm。比同纬度的大陆型冰川多 3 ~ 6 倍。由此可见,本区的海洋型冰川分布广泛,下降很低,消融强烈,为泥石流的发生提供了丰富的水能条件。加上冰碛物广泛分布,又提供了足够的固体物质来源。本区较大规模的泥石流和灾害性洪水均与现代和古代冰川作用密切相关,冰川作用成为本区近代大型自然灾害的主要外营力来源。

2 冰湖溃决泥石流的特征

一般而言,冰面湖、冰内湖、冰川堵塞湖及冰碛湖统称冰湖。由于输入的水超过湖的容量,或冰崩雪崩体溶入湖中,或地震等使湖溃决的洪水,均可引起冰湖溃决泥石流。

中国的极大陆型冰川温度低,热融作用弱,冰面和冰下水系均不发育,同时运动速度小,一般无冰面湖和冰川堵塞湖,泥石流多由冰碛湖溃决形成。据冰川学家研究,温性冰川,特别是暖性冰川,水热条件优越,冰体压力大,冰内水系发育,并存在冰内湖与冰面湖。中国境内因冰湖溃决引起的泥石流为数较多(仅研究区就有 67 条泥石流沟),例如,米堆沟;又如喜马拉雅山南坡樟藏布沟的次仁玛措湖,于 1981-07 的持续高温影响下,07-10 约有 $700 \times 10^4 \text{ m}^3$ 冰块滑入容量约 $2\,000 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的湖中,使湖溃决,形成总流量为 $160 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的泥石流,流到尼泊尔境内,200 多人罹难。徐道明对该山区的朋曲河和波曲河流域 356 处冰碛湖溃决过程考察后认为,落入湖中的大量冰块的冲击,是溃决的主要原因^[4]。1965 年西藏东部工布江达的大规模泥石流,也是冰块滑入湖中引起的^[18]。

冰川堵塞湖也多出现在水热条件较好的地区。

如喀喇昆仑山北坡的叶尔羌河也常发生堵塞湖溃决洪水,和冰湖溃决泥石流^[19]。

2.1 冰湖溃决特征

海洋型冰川区和亚大陆型冰川区,大型冰崩、雪崩繁多,可为泥石流提供足够的水体和泥砂。据考察,川藏公路南线然乌至培龙段冰崩、雪崩十分发育,如该路段的培龙贡支沟易贡藏布支流勒曲藏布中一处雪崩堆积体约 $8\,000 \times 10^4 \text{ m}^3$,覆盖了 300 m 宽的河谷;据古乡沟面积 10 km^2 的围谷统计,有 200 多处雪崩堆,其中含有 2.6% 的碎石^[20]。1950-08-15 西藏察隅 8.5 级地震,使雅鲁藏布江大拐弯区 13 条沟发生冰崩泥石流,其中古乡沟冰崩规模颇大,大量冰雪从海拔 6 000 m 高的少女峰腾空而下,堵塞上游峡谷形成堵塞湖,历时 3 a 后的 1953-09,恰遇比往年同期多 200 mm 的降水和极端最高温度达 30.3℃ 的天气,终于在 09-29 发生流量 $28\,600 \text{ m}^3/\text{s}$ 的泥石流,以高达 40 ~ 95 m 的浪头破山而出,冲出砂石 $100 \times 10^4 \text{ m}^3$,堵断帕隆藏布江,形成长 70 km、深 40 m 的古乡湖。

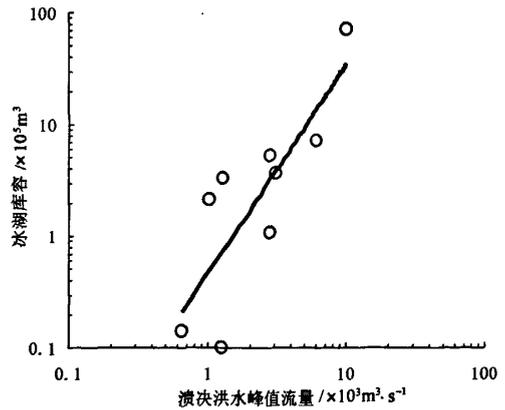


图2 冰湖库容与洪水峰值流量关系

Fig. 2 The relationship between storage capacity of glacier lake and flood peak discharge

冰湖的库容不仅决定了溃决洪水的总量,而且还决定了溃决洪水的峰值流量(图2)。从西藏地区的 18 次冰湖溃决事件来看,大部分的冰湖都属于瞬时部分溃决或全部溃决,所有溃决的冰湖所排空的水量都超过了 $1 \times 10^5 \text{ m}^3$ (表 1),其峰值流量都超过了 $1\,000 \text{ m}^3/\text{s}$,而次仁玛措冰湖溃决的流量更是达到了 $15\,926 \text{ m}^3/\text{s}$ 。这样巨大流量为沟床内松散物质的启动提供了强大的水动力条件,因此只要存在有利的沟道坡度和丰富的松散物质,溃决洪水即可

表1 西藏溃决冰湖特征表
Table 1 The characteristics of glacier lakes in Tibet

名称	溃决时间	流域	湖面海拔 /m	冰湖面积 / $\times 10^5 \text{ m}^2$	溃决水深 /m	溃决水量 / $\times 10^6 \text{ m}^3$	溃决原因	沟道坡度 /%	峰值流量 / $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	成灾形式
塔阿错	1935-08-028	波曲	5 240	6.3	10	2.10	冰滑坡	10.2	1 036	稀性泥石流
穷比吓玛错	1970-07-10	康布曲	4 660	2.0	50	3.33	冰崩	2.29		稀性泥石流
桑旺错	1954-07-16	年楚河	5 150	53.75	40	71.66	冰滑坡	1.30	10 000	稀性泥石流
隆达错	1964-08-25	吉隆藏布	5 460	4.91	22	3.60	冰崩、冰滑坡	6.80	3 100	稀性泥石流
吉莱普错	1964-09-21	朋曲	5 271	5.25	41	7.17	冰滑坡	5.96	6 048	稀性泥石流 粘性泥石流
达门拉咳错	1964-09-28	尼洋河	5 210	1.89	17	1.07	冰崩、冰滑坡	8.10	2 812	稀性泥石流 粘性泥石流
	1968-08-15									
阿亚错	1969-08-17	朋曲	5 560	4.2	20	2.80	冰崩、冰滑坡	3.24		稀性泥石流
	1970-08-18									
班戈错	19720-8-23	怒江	4 332	5.0	8	1.33	冰崩、冰滑坡	2.14		稀性泥石流
扎日错	1981-06-24	洛扎雄曲					冰崩、冰滑坡			稀性泥石流
次仁玛错	1981-07-11	波曲	4 640	4.94	32	5.27	管涌、冰崩	14.96	2 777	稀性泥石流 粘性泥石流
金错	1982-08-27	朋曲	5 350	5.12	25	4.27	冰崩			稀性泥石流
光谢错	1988-07-15	帕隆藏布	3 818	5.23	19	3.31	冰崩、管涌	2.81	1 270	稀性泥石流
嘉龙错	2002-05-23	波曲	4 410	0.21	15	0.10	冰体坠落	4.50	1 242	稀性泥石流
得嘎错	2002-09-18	洛扎雄曲	5 316	0.61	6.8	0.14	冰崩、冰滑坡		651	稀性泥石流

注:部分数据来自徐道明、李伟、吕儒仁;库容为水深和面积乘积的1/3,做近似计算,坡度条件部分来自于文献,还有一部分来自地形图,另外还有几处冰湖溃决参数无相关资料。

演化为泥石流,而冰湖库容对泥石流持续时间以及总量有很大的影响。

2.2 分布与类型

川藏公路南线然乌-培龙段为目前国内外冰湖溃决泥石流最发育、危害最严重的路段。对本路段来讲,冰湖溃决后形成的泥石流的危害除了其直接淤埋和冲毁公路外,更严重的是由于这类泥石流规模特别大,汇入主河后堵塞主河形成堵塞坝,其高度达30 m左右,最高可超过100 m,其上游积水成湖,淹没公路。一旦溃决形成超常洪水,荡净洪水所及的一切公路和桥涵,对公路危害大大超过泥石流本身的直接危害。

据统计,然乌至培龙段共有冰湖130个(图3),总面积8.096 km²,估算总蓄水量140.4 × 10⁶ m³。资料分析表明,研究区冰湖成因类型分两大类,即冰川侵蚀湖和冰碛阻塞湖。前者主要是历史上冰川作用其基岩中或河槽内挖掘形成的,又分为冰斗湖、冰川槽谷湖和冰蚀湖三种。冰川的进退变化对冰湖水

位及终碛堤的稳定性直接有关,由于终碛堤形成的年代较新,主要是在近百年以来小冰期最后一次冰退形成的,冰碛物胶结差,一般终碛堤都有渗水情况(如米堆光谢错)。统计表明,区内具有潜在危险的冰湖除1个目前为雪崩阻塞的槽谷湖外,其余都是终碛湖。该地区占总数48%的为数众多的冰斗湖分布在冰川退缩后遗留的空冰斗中,或上部仍留有规模较小的冰川,有些冰斗湖成串珠状分布。位于83道班东侧流域上游一处槽谷湖已被雪崩锥裙阻塞多年,1970年代航片及1980年代航摄时均可见到这种阻塞状况,是一个具有潜在危险的冰湖。

调查发现研究区冰川、冰湖主要分布在松宗以东至安久拉地段,其中以然乌-松宗最为集中,在冰湖数量上,此段集中了占总数64.4%的冰湖,其冰湖总面积和总蓄水量的2/3以上也集中在此地段。这种分布特征与冰川分布相适应。所有潜在危险的冰湖都分布在松宗至然乌地段。对地形图及航片分析表明,易贡藏布、波得藏布等未统计的4条大支流

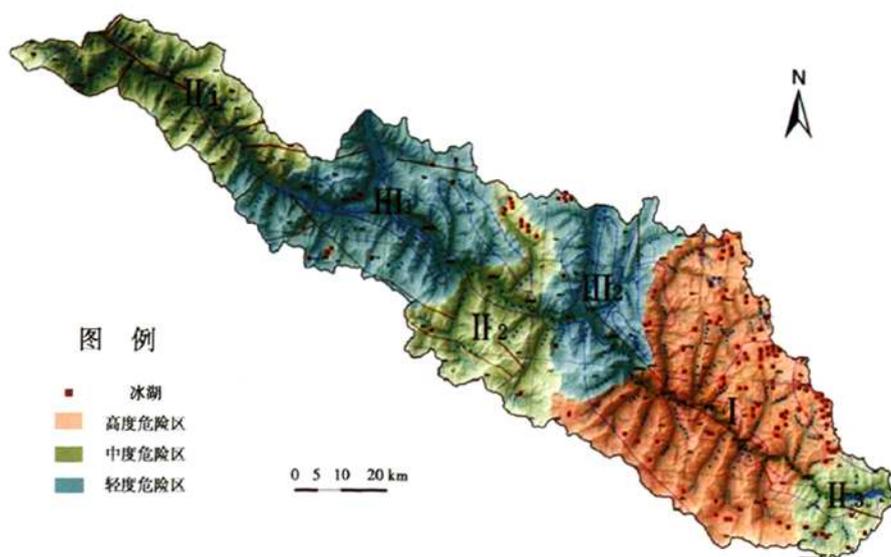


图3 冰湖分布及危险性分区

Fig. 3 The distribution and risk zoning of glacier lakes

中也有为数较多的冰湖,也不乏危险冰湖存在,但因距公路较远,且沟谷宽大,对公路的影响不甚明显。

从各沟的冰湖、冰湖分布和泥石流性质,规模以及冲淤特征来看,由于寒冻风化极为强烈,现代冰川发育,根据冰湖溃决泥石流活动的固体物质,川藏公路南线然乌至培龙段泥石流沟的类型划分三类:1.寒冻风化的巨大残坡积和古冰碛;2.现代冰川所形成的冰碛物;3.发育于坡面的各种不良现象提供的固体物质。研究区是寒冻风化或冰碛储备的场所,由于汇水面积过大,中、下游汇流的清水对上游形成的泥石流具强大的稀释力,改变泥石流的性质和对下游冲淤的变化,而大范围的空间又承载了巨量的寒冻风化物 and 古冰碛物,为冰湖溃决泥石流形成提

供了丰富的物质。

由于各沟所处的地理条件、海拔、坡向以及气候环境不一样,现代冰川发育程度也十分悬殊。通过近2 a的考察,依据沟床平均比降(J)、流域山坡平均坡度(θ)、冰川表面坡度(θ_0)以及主沟长(L)这些直接影响泥石流性质的因素,采用权衡法,将各单因子的影响度进行统计分析,结合前人资料提供的数据,以1:10万地形图作底图,将然乌至培龙段67条沟谷进行分类计算,划分出研究区沿线冰湖类型(表2)和冰湖分布特征(表3)。

根据考察,川藏公路南线然乌至培龙段泥石流,无论从类型、规模活动与分布上,具明显的分区规律,并与地质地貌分区基本吻合。

表2 川藏公路然乌-培龙段沿线冰湖类型统计

Table 2 The types of glacier lakes along the highway from Ranwu to Peilong

冰湖类型	冰湖数量		冰湖面积		冰湖蓄水量		冰湖平均 面积 /km ²	冰湖平均 水深 /m	潜在危险冰湖			
	数量	百分比 /%	面积 /km ²	百分比 /%	蓄水量 /×10 ⁶ m ³	百分比 /%			数量	面积 /km ²	蓄水量 /×10 ⁶ m ³	
冰川 侵蚀湖	冰斗湖	45	34.6	1.909	23.6	25.63	18.3	0.042	13	2	0.056	0.435
	槽谷湖	8	6.2	0.486	6.0	7.78	5.5	0.061	16	1	0.148	2.282
	冰蚀湖	13	10.0	0.306	3.8	2.84	2.0	0.024	9			
冰碛 阻塞湖	终碛湖	57	43.8	5.214	64.4	102.39	72.9	0.091	20	16	2.997	71.654
	侧碛湖	7	5.4	0.181	2.2	1.77	1.3	0.026	10			
总计	130	100	8.096	100	140.4	100	0.062	17				

表3 川藏公路然乌-培龙各地段冰湖分布

Table 3 The distribution of glacier lakes along the highway from Ranwu to Peilong

地段	冰湖类型	数量			面积/km ²			蓄水量/10 ⁶ m ³			已溃决 冰湖数量	危险冰湖 数量
		个数	总计	百分比 /%	面积	总计	百分比 /%	蓄水量	总计	百分比 /%		
然乌至 松宗	冰斗湖	45			1.909			25.632				
	槽谷湖	8			0.486			7.78				1
	冰蚀湖	4	108	83.1	0.062	6.915	85.4	0.376	123.3	87.8		
	终碛湖	44			4.277			87.783			1	6
	侧碛湖	7			0.181			1.77				
松宗至 培龙	冰蚀湖	9	22	16.9	0.244	1.181	14.6	2.463	17.074	12.2		
	终碛湖	13			0.937			14.611				

3 冰湖溃决泥石流预警技术

对冰湖溃决泥石流坝溃决的监测和预警受客观条件的限制,难度很大。研究中采用间接的方式,通过监测和预警冰湖溃决产生的泥石流或山洪及引起沟道流体发生的变化来实现冰湖泥石流坝溃决的预警。

3.1 泥石流预警技术

泥石流预警技术包括泥石流预报和警报:泥石流预报是选定某些泥石流形成条件的参数指标对泥石流发生与否及可能产生的规模的大小进行预报,准确实施泥石流预报是非常困难的。目前泥石流预报仍停留在经验或半经验的水平上。对于冰湖溃决泥石流而言,还应掌握气温变化及冰湖水位和冰湖坝的动态等要素,因此难于达到预期效果。相比而言,用间接的方式进行冰湖泥石流坝溃决的预警报在技术上更具可行性。

泥石流警报实施的技术方法通常分为接触式和非接触式两种。顾名思义,接触式是直接感知泥石流的运动和到来,并发回信息。这种方法有断线法,即在泥石流沟床内布设金属感知线,一旦泥石流冲断了该线,断线信号发回而实现了报警。此法于20世纪70-80年代日本首次应用,至今仍在世界各地流行。中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所1984年在四川省南坪县(现九寨沟县)的泥石流防治中,就利用在沟道中设置金属感知线,当发生泥石流时将冲断金属感知线,产生信号的方式发出警报,警报的提前量是以分钟或10 min为单位。这种方法不适合大冲大淤的泥石流沟床,因为感知线会

万方数据

因沟床冲刷而凌空不被冲断,或因沟床淤积金属感知线被埋而不断,丧失了报警的功能。接触法的另外一种冲击力测量法,它是在泥石流沟床内布设冲击力传感器,一旦泥石流流过,其冲击力信号随即被捕捉并发回而实现报警。该法如果仅为警报服务,显得过于昂贵,一般都结合观测研究使用。上面两种方法的信号传输可以是有线的,也可以是无线遥测遥控的。非接触法是传感器不与流体直接接触,从而可保证仪器的使用安全和连续作用。

3.2 预警工作组成、主要结构和工作原理

根据研究区具体要求和试点的实际情况,采用在沟道上游安置泥石流次声报警器和在沟口主河上游水位实测监测,超高报警综合方案。将中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所和西南交通大学合作研制的DFW-I III型泥石流次声报警器^[21],安置在沟口作为第一道报警设置,冰湖溃决和形成泥石流时,报警器采集到泥石流的特殊次声后向控制中心发出报警信号;第二道报警设置则利用发生的泥石流进入主河时,必将抬升主河水位,在沟口主河上对主河水位进行实时监测,平时可作为水文水位测量资料的积累,发生泥石流时,根据设定的水位报警指标向控制中心发出报警信号。水位的实时监测采用浮漂式或压力传感器式两种方式,两种方式的仪器可作为相互验证及保证,当其中一套发生故障时,另一套可保证资料的连续性并避免警报水位的漏报。

1. 工作组成

仪器由传感器、鉴别装置、单片机、键驱动、显示输出、RS232接口、GPRS无线传输模块、供电模块等组成(图4)。

2. 主要结构(图5)

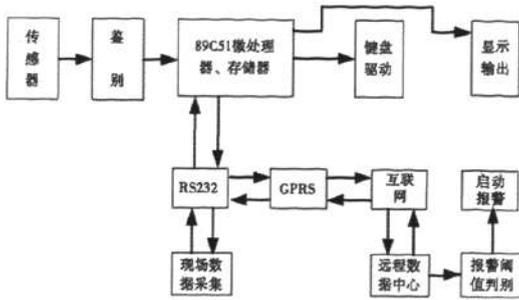


图4 预警技术工作组成示意图

Fig.4 The sketch map of early warning technology

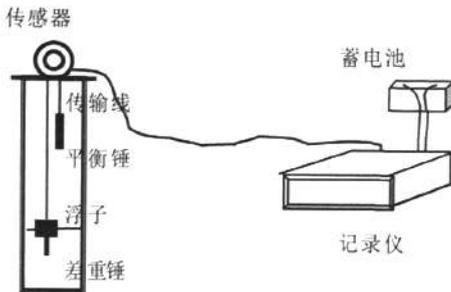


图5 仪器结构连线示意图

Fig.5 The sketch map of instrument structure

仪器采用浮子式光电增量传感器、液晶显示器、低功耗单片机、128K 存储器和 DS12887 时间电路组成一个控制采集系统,通过 RS232 接口与计算机通信读取数据。无线 GPRS 实时传输系统,采用了 512 k 非易失性存储器和实时时钟芯片,并可实时通过 internet 进行人机交换。仪器结构简单、体积小,功耗低,功能齐全,自动化程度高。

3. 工作原理(图6)

通过与水面接触的浮子式光电增量传感器,将水位数值转换为两组光电信号,由单片机采集 2 组光电信号,由光电信号向位先后来判断是水位上升还是下降、脉冲个数来判断升降水位变化幅度。通过与初始设置数值来计算当前水位,并存储数据。然后通过无线 GPRS 模块,从 internet 将实时指令发送到单片机,进行人机交换,获取需要数据。

4. 仪器工作房的建设

观测房设在沟岸,平顶,便于安装太阳能电池用于仪器补充电能。房内建设观测深井,圆形直径 1.0~1.5 m,深度到枯水时最低水面以下 1 m,深井

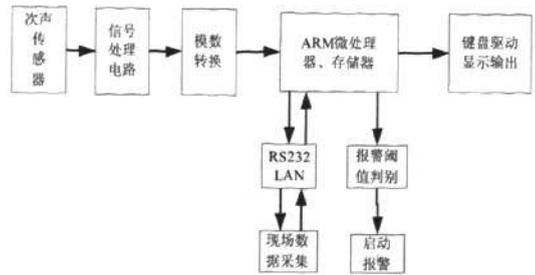


图6 报警器原理框图

Fig.6 The diagram of annunciator

与河道相通将河水引入观测井。深井与河道引水通道位于深井底部以上 1 m 处。通道施工完成后最好埋设 150~200mmPVC 管,以避免通道上部土体垮塌阻塞。

报警器在雨季使用期间,同时打开交直流电源开关,设置好相关参数,报警器处于值班状态。当交流电断电时,自动切换到直流电供电状态,仍可工作约 10 h。当交流电恢复供电时,整个仪器又恢复到值班状态(图7)。

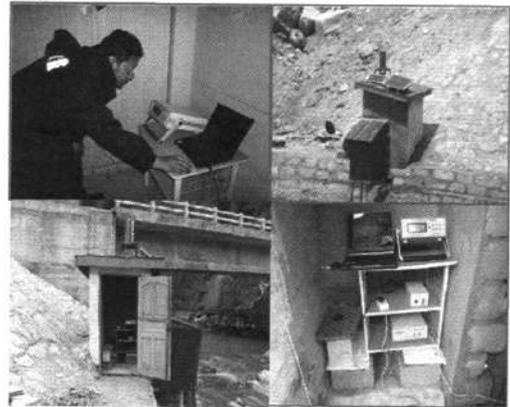


图7 米堆沟冰湖溃决泥石流监测系统仪器房

Fig.7 The monitoring system and equipment room in Midu gully

4 结论与建议

自 2008-05 仪器安装调试成功以来,仪器一直都能正常工作收集数据。2008 年仪器安置在沟口有人值守的旅游局房内,2009 年安置在新建的水位计房内。从 2008-08-10 和 2009-04 的资料分析,有多次小型泥石流发生(或未流出沟口),此类泥石流频率在 10~15 Hz 之间,振幅多为 0.2 Pa 左右。其为山坡型泥石流,由于没有大量的固体物质

补给,因而没有形成大规模的泥石流流出沟口到达主河而形成泥石流坝。

此外,从收集的米堆冰川1、4、5、6资料可以分析出,在2008-10—2009-04间曾发生了山崩或雪崩,频率为2~4 Hz,振幅为1~5 Pa。仪器对山崩和雪崩的成功监测,对冰湖溃决泥石流的研究亦能起到重要的作用。

经多年观测研究,泥石流在形成和运动过程的声发射信号中有次声成分(其他为可闻声和地声)。这种次声成份为确定性信号(即有确定的时域和频域特性),几乎不衰减且约等于声速,以空气为介质传递。因为泥石流次声速度约为340 m/s,远大于泥石流运动速度(通常为10 m/s左右),因而报警器能在泥石流到达前率先捕捉到它的次声信号,有足够的提前量来实现报警。其提前量视流域泥石流源地和流通区至沟口距离而定,通常为数分钟至数十分钟。

研究表明,由于次声声速为344 m/s,而泥石流运动速度为10~20 m/s,况且泥石流在沟床内还会走走停停。因而这种报警器有足够的警报提前量。自1995年以来对数十次泥石流的应用,其提前量为10~31 min,且无一错报,漏报。与其他类型报警器相比,泥石流次声报警器有明显的优点,除了稳定、可靠、耗电小、体积小外,全部设备(含传感器)都可置于室内,无需专人值守。

冰湖溃决泥石流不仅仅是一次性惨重危害,同时由于冰湖溃决泥石流堵江形成的堰塞坝再次溃决造成的强劲、高水头的溃决洪水,因此开展泥石流预警,获取准确可靠的观测数据是关键,观测地点的选择也至关重要。

参考文献(References)

- [1] W. S. B. Petson. The glacier-lake outburst[J]. Translated report in Journal of Glaciology and Geocryology 1985, 2(1): 48-51 [W. S. B. 佩特森. 张祥松等译. 冰湖溃决[J]. 冰川冻土译报, 1985, 2(1): 48-51]
- [2] Li Jijun. The reasons of glacier-lake outburst in Tibet [G]. Academy Comprehensive Scientific Expedition to Qinghai-Tibet Plateau (SEQTP, CAS), 1997 [李吉均. 西藏冰湖溃决的原因[G]. 中国科学院青藏高原综合科学考察队, 1977]
- [3] Xu Daoming. Characteristics of debris flow caused by outburst of glacier lake on Boqu River in Xizang[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1987, 9(1): 23-24 [徐道明. 西藏波曲河冰湖溃决泥石流的形成与沉积特征[J]. 冰川冻土, 1987, 9(1): 23-24]
- [4] Xu Daoming. The dangerous glacier lake and outburst characters in Himalayas[J]. Acta Geographica Sinica, 1989, 44(5): 343-352 [徐道明. 西藏喜马拉雅山区危险性冰湖及溃决特征[J]. 地理学报, 1989, 44(5): 343-352]
- [5] Lü Rurren, Li Deji. Debris flow induced by glacier lake outburst in Tangbulang gully, Gongbujiangda, Tibet [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1986, 8(1): 61-64 [吕儒仁, 李德基. 西藏工布江达县唐不朗沟的冰湖溃决泥石流[J]. 冰川冻土, 1986, 8(1): 61-71]
- [6] Xu Daoming, Feng Qinghua. The study of glacial debris flow and outburst[J]. Journal of Glaciology and Cryopedology, 1988, (3): 284-289 [徐道明, 冯清华. 冰川泥石流与冰湖溃决灾害研究[J]. 冰川冻土, 1988, (3): 284-289]
- [7] Luo Defu, Feng Qinghua, Zhu Pingyi, et al. The mountain hazards and prevention in the south line of Sichuan-Tibet Highway (in Tibet) [M]. Beijing: Science Press, 1995: 130 [罗德富, 冯清华, 朱平一, 等. 川藏公路南线(西藏境内)山地灾害及防治对策[M]. 北京: 科学出版社, 1995: 130]
- [8] Lü Ruren, Tang Bangxing, Zhu Pingyi. Debris flow and environment in Tibet [M]. Chengdu: Sichuan University Press, 1999: 69-112 [吕儒仁, 唐邦兴, 朱平一. 西藏泥石流与环境[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1999: 69-112]
- [9] Zhu Pingyi, He Ziwen, Wang Yangchun, et al. A study of typical mountain hazards along Sichuan-Tibet highway [M]. Chengdu: Science and Technology University Publishing House, 1999 [朱平一, 何子文, 汪阳春, 等. 川藏公路典型山地灾害研究[M]. 成都科技大学出版社, 1999]
- [10] Liang Guangmo, Cheng Zunlan. The study of water-damage in Tibetan highway [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 2005 [梁光模, 程尊兰. 西藏公路水毁研究[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2005]
- [11] Cheng Zunlan, Zhu Pingyi, Gong Yiwen. Typical debris flow triggered by ice-lake break [J]. Journal of Mountain Science, 2003, 21(6): 716-720 [程尊兰, 朱平一, 官怡文. 典型冰湖溃决型泥石流形成机制分析[J]. 山地学报, 2003, 21(6): 716-720]
- [12] Cui Peng, Ma Dongtao, Chen Ningsheng, et al. The initiation, motion and mitigation of debris flow caused by glacier lake outburst [J]. Quaternary Sciences, 2003, 26(3): 621-628 [崔鹏, 马东涛, 陈宁生, 等. 冰湖溃决泥石流的形成、演化与减灾对策[J]. 第四纪研究, 2003, 26(3): 621-628]
- [13] Liu Wei. Preliminary study on debris flow induced by glacier lake outburst in Tibet [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2006, 3: 89-90 [刘伟. 西藏典型冰湖溃决型泥石流的初步研究[J]. 水文地质工程地质, 2006, 3: 89-90]
- [14] Wu Jishan, Cheng Zunlan, Geng Xueyong. The forming mechanism of debris-flow dam in southeast Tibet [J]. Journal of Mountain Research, 2005, 23(4): 399-405 [吴积善, 程尊兰, 耿学勇. 西藏东南部泥石流堵塞坝形成机理[J]. 山地学报, 2005, 23(4): 399-405]
- [15] You Yong, Cheng Zunlan. Modeling experiment of debris flow in Midui Gully, Tibet [J]. Journal of Mountain Science, 2005, 23(3): 288-293 [游勇, 程尊兰. 西藏波密米堆沟泥石流堵河模型试验[J]. 山地学报, 2005, 23(3): 288-293]

- [16] You Yong, Cheng Zunlan, Hu Pinghua, et al. A study on model testing of debris flow in Guangxie gully, Tibet [J]. *Journal of Natural Disaster*, 1997, 6(1): 52-58 [游勇, 程尊兰, 胡平华, 等. 西藏古乡沟泥石流模型试验研究[J]. *自然灾害学报*, 1997, 6(1): 52-58]
- [17] Chen Chujun, Liu Ming, Zhang Zhi. Outburst conditions of moraine dammed lakes and their flood estimation in the headwaters of Nianchu river, Tibet [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1996, 18(4): 347-352 [陈储军, 刘明, 张帆. 西藏年楚河冰川终碛湖溃决条件及洪水估算[J]. *冰川冻土*, 1996, 18(4): 347-352]
- [18] Lü Ruren, Li Deji. Debris flow induced by ice lake burst in the Tangbulang Gully, Gongbujiangda, Xizang (Tibet) [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1986, 8(1): 61-71 [吕儒仁, 李德基. 西藏工布江达县唐不朗沟的冰湖溃决泥石流[J]. *冰川冻土*, 1986, 8(1): 61-71]
- [19] Shen Yongping, Ding Yongjian, Liu Shiyin, et al. An increasing glacial lake outburst flood in Yarkant River, Karakorum in past ten years [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(2): 234 [沈永平, 丁永建, 刘时银, 等. 近期气温变暖叶尔羌河冰湖溃决洪水增加. *冰川冻土*, 2004, 26(2): 234]
- [20] Chen Ningsheng, Chen Rui. Glacial and rainstorm debris-flow in Peilong Gully and possibility in its blocking main river [J]. *Journal of Mountain Science*, 2002, 20(5): 110-115 [陈宁生, 陈瑞. 培龙沟泥石流及其堵江可能性探讨[J]. *山地学报*, 2002, 20(5): 110-115]
- [21] Zhang Shucheng, Yu Nanyang. Early warning system to debris flow [J]. *Journal of Mountain Science*, 2010, 28(3): 379-84 [章书成, 余南阳. 泥石流早期警报系统[J]. *山地学报*, 2010, 28(3): 379-384]

The Warning Technology of Debris Flow Caused by Glacier-lake Outburst in Qinghai - Tibet Plateau

CHENG Zunlan^{1,2}, HONG Yong^{1,2}, LI Xiaoyu^{1,2}

(1. *Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, China;*

2. *Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Process, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China*)

Abstract: Based on the formation of debris-flow dam, outburst mechanism, the main features and disaster process, we chose the high way from Ranwu to Peilong in Tibet to be study area. The Guangxieco Lake is a typical outburst lake, and Midui Gully is its downstream gully. The region was investigated many times and chose to be the early-warning point. In this paper, an early warning system and supporting technology for debris flow caused by glacier lake outburst is proposed depending on the main principle of glacier-lake outburst prevention.

Key words: glacier-lake outburst; debris flow; warning technology

作者: [程尊兰](#), [洪勇](#), [黎晓宇](#), [CHENG Zunlan](#), [HONG Yong](#), [LI Xiaoyu](#)
作者单位: [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; 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 四川, 成都, 610041](#)
刊名: [山地学报](#) **ISTIC** **PKU**
英文刊名: [JOURNAL OF MOUNTAIN SCIENCE](#)
年, 卷(期): 2011, 29(3)
被引用次数: 2次

参考文献(21条)

1. W. S. B. 佩特森;张祥松 [冰湖溃决](#) 1985(01)
2. 李吉均 [西藏冰湖溃决的原因](#) 1977
3. 徐道明 [西藏波曲河冰湖溃决泥石流的形成与沉积特征](#) 1987(01)
4. 徐道明 [西藏喜马拉雅山区危险性冰湖及溃决特征](#)[期刊论文]-[地理学报](#) 1989(05)
5. 吕儒仁;李德基 [西藏工布江达县唐不朗沟的冰湖溃决泥石流](#) 1986(01)
6. 徐道明;冯清华 [冰川泥石流与冰湖溃决灾害研究](#) 1988(03)
7. 罗德富;冯清华;朱平一 [川藏公路南线\(西藏境内\)山地灾害及防治对策](#) 1995
8. 吕儒仁;唐邦兴;朱平一 [西藏泥石流与环境](#) 1999
9. 朱平一;何子文;汪阳春 [川藏公路典型山地灾害研究](#) 1999
10. 梁光模;程尊兰 [西藏公路水毁研究](#) 2005
11. 程尊兰;朱平一;官怡文 [典型冰湖溃决型泥石流形成机制分析](#)[期刊论文]-[山地学报](#) 2003(06)
12. 崔鹏;马东涛;陈宁生 [冰湖溃决泥石流的形成、演化与减灾对策](#)[期刊论文]-[第四纪研究](#) 2003(06)
13. 刘伟 [西藏典型冰湖溃决型泥石流的初步研究](#)[期刊论文]-[水文地质工程地质](#) 2006(3)
14. 吴积善;程尊兰;耿学勇 [西藏东南部泥石流堵塞坝形成机理](#)[期刊论文]-[山地学报](#) 2005(04)
15. 游勇;程尊兰 [西藏波密米堆沟泥石流堵河模型试验](#)[期刊论文]-[山地学报](#) 2005(03)
16. 游勇;程尊兰;胡平华 [西藏古乡沟泥石流模型试验研究](#) 1997(01)
17. 陈储军;刘明;张帜 [西藏年楚河冰川终碛湖溃决条件及洪水估算](#) 1996(04)
18. 吕儒仁;李德基 [西藏工布江达县唐不朗沟的冰湖溃决泥石流](#) 1986(01)
19. 沈永平;丁永建;刘时银 [近期气温变暖叶尔羌河冰湖溃决洪水增加](#)[期刊论文]-[冰川冻土](#) 2004(02)
20. 陈宁生;陈瑞 [培龙沟泥石流及其堵江可能性探讨](#)[期刊论文]-[山地学报](#) 2002(05)
21. 章书成;余南阳 [泥石流早期警报系统](#)[期刊论文]-[山地学报](#) 2010(03)

引证文献(2条)

1. 薛玉敏,朱环娟,王淑兰 [一次暴雨山洪灾害气象预警应急工作评价及建议](#)[期刊论文]-[现代农业科技](#)

2013(18)
2. 薛玉敏,朱环娟,王淑兰 [一次暴雨山洪灾害气象预警应急工作评价及建议](#)[期刊论文]-[现代农业科技](#) 2011(18)