

DOI: 10. 16031 /j. cnki. issn. 1003-8035. 2019. 06. 05

西藏定日朋曲流域达仓沟冰湖溃决泥石流特征

童龙云 张 继 孔应德

(四川省地质工程勘察院集团有限公司 四川 成都 610072)

摘要: 以西藏朋曲流域达仓沟为研究对象,结合现场调查及遥感解译,总结了达仓沟流域的孕灾背景,再现了冰湖溃决泥石流特征,并在此基础上对该沟溃决泥石流发展趋势进行了分析。研究表明,流域现有冰川 8 条,冰湖 11 个,历史上至少爆发过 3 次大型冰湖溃决泥石流,其中最大的 1956 年冰湖溃决泥石流沟口峰值流量 $3\ 862\ \text{m}^3/\text{s}$,流速 $8.06\ \text{m/s}$;目前流域内冰川呈现不断缩小的趋势,3 处冰湖存在溃决风险,具备了形成泥石流的陡峭地形和丰富松散固体物质的充分条件,发生冰湖溃决泥石流可能性大。

关键词: 达仓沟; 溃决泥石流; 冰湖; 冰川; 遥感解译

中图分类号: P642. 23; TU 42

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2019)06-0034-06

Characteristics of the Dacanggou Debris Flow induced by breakout of glacier-lake in the Pengqu Basin Dirin County of Tibet

TONG Longyun, ZHANG Ji, KONG Yingde

(Sichuan Institute of Geological Engineering Investigation Group Co. LTD, SBGEEMR, Chengdu, Sichuan 610072, China)

Abstract: Taking Dacanggou in the Pengqu Basin of Tibet as our research target, by means of field investigation and interpretation of remote sensing, the disaster-breeding backgrounds of Dacanggou Basin are summarized, the characteristics of the debris flow induced by breakout of glacier-lake are reproduced, and the development trend of ice lake collapse in Dacanggou Basin is analysed. The studies shows that there are 8 glaciers and 11 ice lakes in the basin, and at least three large-scale ice lake ruin debris flows broke out in history, and the ice lake collapse debris flow outbreak in 1956 is the largest one, whose peak flow and velocity in mizoguchi is $3\ 862\ \text{m}^3/\text{s}$ and $8.06\ \text{m/s}$. At present, glaciers in the basin show a decreasing trend, and there are three glaciers are at risk of outburst. There are sufficient conditions for the precipitous topography and the rich and abundant loose solid material that form the debris flow, so there is a large possibility of the glacial lake outburst in Dacanggou Basin.

Keywords: Dacanggou; debris flow induced by breakout; ice lake; glacier; interpretation of remote sensing

0 引言

冰湖溃决泥石流是高山冰川作用区常见的自然灾害之一,其以突发性强、频率低、洪峰高、流量过程暴涨暴落、破坏力强、灾害波及范围广等特点而著称,对下游人民生命财产和基础设施带来极大破坏^[1]。因此

日益受到地方政府和学术界的广泛关注。

我国是冰湖溃决泥石流灾害分布广泛、危害严重的国家之一,主要发生在西藏和新疆^[2],其中西藏地区的雅鲁藏布江、波曲及朋曲河流域尤为突出。西藏冰湖溃决泥石流研究始于 20 世纪 60 年代,1964 年,施雅风等^[3]对古乡冰川泥石流进行了初步考察,分析

收稿日期: 2018-11-08; 修订日期: 2019-07-05

第一作者: 童龙云(1986-),男,硕士研究生,工程师,主要从事地质灾害研究。E-mail: tonglongyun1987@163.com

了溃决泥石流爆发原因;1987年,刘潮海等对喜马拉雅山中段朋曲和波曲流域冰湖溃决洪水进行了考察研究,对该地区各种类型的高山冰湖进行调查、编目;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进行了重点考察研究^[4-6];进入21世纪,研究者主要聚焦于冰湖溃决泥石流形成机理、溃坝分析等相关问题^[7-13]。

通过30多年的努力,对冰湖溃决泥石流的时空分布、形成机理、防灾对策等有了一定的认识,由于冰湖溃决及其诱发的泥石流往往出现于人迹罕至的高山、极高山地区,分布范围有限,几乎没有人目睹过泥石流的形成和演化过程,研究素材匮乏,目前研究程度较低;目前的研究主要集中于特定冰湖溃决型泥石流事件的调查访问后现象和过程的描述,由于高山高寒和艰险的地形与交通条件,已有成果对冰湖溃决泥石流的调查访问资料往往存在一定的出入,造成研究结果与实际情况有较大偏差。本文以达仓沟冰湖溃决型泥石流为例,采用高空间分辨率和多时相图像进行解译,获取了流域内冰川、冰湖分布及演化特征,结合现场调查的地形条件、物源条件及泥石流爆发痕迹,讨论此类泥石的形成机制、爆发过程和发展趋势。

1 达仓沟流域基本特征

达仓沟位于日喀则市定日县绒辖乡达仓村,距定日县县城约125 km,泥石流沟口坐标为:北纬 $28^{\circ}08'51.77''$,东经 $86^{\circ}25'22.29''$ 。

达仓沟流域面积 40.1 km^2 ,主沟长13 km,沟源最高点高程6 210 m,沟口最低高程为3 995 m,高差2 215 m,平均纵坡降约为170‰。两岸山坡较对称,坡度一般大于 35° ,山脊较狭窄,陡缓不一,沟道上游和中游沟谷切割相对较深,多为“V-U”型沟谷地貌,局部跌水陡坎发育,沟口平缓宽阔,堆积区坡度约 $4^{\circ}\sim 8^{\circ}$,堆积区呈不规则扇形分布,扇形前缘宽近500 m。

该沟区域上处在北喜马拉雅构造带中的定日-岗巴亚带,总体上为一近东西向复式向斜构造,褶皱较宽缓,流域内发育一些规模较小的小型断层。岩性上主要出露前震旦系聂拉木群(AnZnl)片岩、片麻岩、混合片麻岩及第四系残坡积、崩坡积碎块石土,地质构造复杂,岩体节理裂隙发育,表层多分布风化裂隙和卸荷裂隙。

利用高分辨率遥感图像,基于冰川、冰湖的遥感解译标志,遥感调查达仓沟流域现存规模较大的冰川、冰

湖。结果显示,达仓沟流域现有冰川8条,其中规模最大的面积超过 2.24 km^2 ,面积最小的仅为 0.04 km^2 ;达仓沟流域现有冰湖11个,面积最大的约 0.22 km^2 ,面积最小的冰湖面积仅有 700 m^2 (图1)。

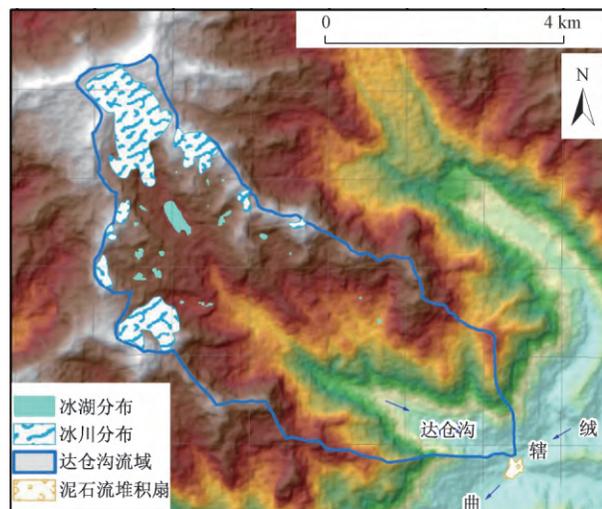


图1 达仓沟冰川、冰湖分布特征

Fig. 1 The distribution of ice lake and glacier in Dacangou

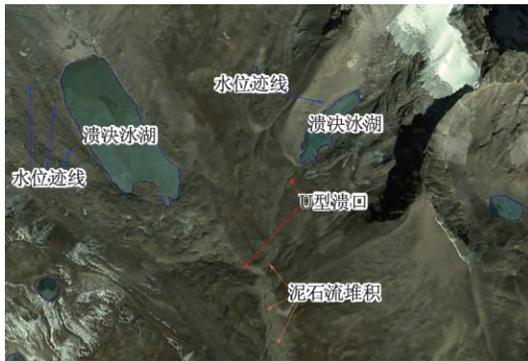
2 冰湖溃决泥石流基本特征

根据冰湖溃决泥石流遥感判别的三要素(冰湖水位变化、U型溃口、下游显著泥石流堆积),达仓沟流域内至少发生过三次较大规模的冰湖溃决,据现场调查访问,达仓沟于1956年发生过冰湖溃决泥石流(图2)。

经调查访问,1956年农历5月,达仓沟持续降雨数日,其后天气晴朗,气温骤升,于某日中午午餐时分,听见上游沟道内轰隆作响,沟岸村民纷纷出门查看,只见高约15 m的龙头倾泻而下,在出山口弯道处受左岸山体阻挡,向山体右侧改道。见水势凶猛,当地村民纷纷向右岸山体转移,只见沟道内水夹杂着石头、土和树木向下推进,水流浑浊,流体颜色偏黑,浓粥状,含大量块石,可听见巨石碰撞的声音。整个过程持续约60分钟,导致沟口村庄被夷为平地,所幸时值中午,村民纷纷逃到沟道右侧岸坡上,此次泥石流并未造成人员伤亡。

根据遥感影像上泥石流的空间分布特征推断,规模最大的冰湖(图2(a)中左侧冰湖),现存面积超过 0.22 km^2 ,是造成1956年达仓沟大规模冰湖溃决泥石流灾害的源头。通过对本次泥石流灾害的调查,由于溃决洪水顺沟迅速向下推进,沿途掏蚀沟床松散物质,并冲刷形成山洪泥石流,在流域中下游又得到两岸物

质的大量补给,最终演变成高重度黏性泥石流。泥石流固体物质主要来源于冰湖以下的冰碛物沟道内各种成因的堆积物,流体中最大块石粒径达 15 m(图 3)。



(a)



(b)

图 2 达仓沟典型冰湖溃决遥感特征

Fig.2 The remote sensing features of ice lake collapse in Dacangou Basin



图 3 泥石流冲出最大块石

Fig.3 The largest stone rushed out by debris flow

图 4 所示为本次泥石流在左侧岸坡残留物,该处泥石流弯道中心线曲率半径为 62.5 m,两岸泥位高差为 7.7 m,泥面宽度为 72.5 m。结合野外调查泥痕坡度,参考中国铁道出版社《泥石流防治工程技术》(1996 年)泥石流流速计算公式:

$$V_c = \sqrt{R_0 \sigma g / B} \quad (1)$$

式中: V_c ——泥石流流速/($m \cdot s^{-1}$);

R_0 ——弯道中心曲率半径/m;

σ ——弯道内外侧泥面高差/m

B ——泥面宽度/m;

计算得泥石流流速 $V_c = 8.06 m/s$ 。该处过流面积为 $479.2 m^2$,计算得沟口泥石流流量达 $3862 m^3/s$ 。强大的泥石流摧毁了沟口达仓村,在沟口形成了面积约为 $0.11 km^2$ 的堆积扇,扇宽约为 500 m,轴长平均约 220 m。所幸泥石流发生于午后,沟口村民及时撤离,并未造成人员伤亡,但沟口达仓村被夷为平地,造成不可估量的损失(图 5)。



图 4 泥石流残留物

Fig.4 The residue of debris flow



图 5 泥石流堆积扇遥感解译特征

Fig.5 The remote sensing features of the stacking fans

3 冰湖溃决泥石流形成机制及发展趋势分析

3.1 溃决泥石流形成机制

达仓沟泥石流的形成是丰富的松散固体物质、有利的地形条件和充足的水源条件共同作用的结果。

(1) 地形条件

冰湖溃决洪水是否会演变成泥石流与沟床比降关系密切,可将沟床比降作为判断冰湖溃决型泥石流形成和性质的一个重要标志^[9]。达仓沟流域相对高差约2 215 m,沟床平均坡降170‰,较大的相对高差和较陡的沟床比降保证了流域内拥有充足的势能,为泥石流的形成和发展提供了足够的动力条件,在水源和固体物质供给充足的情况下,会孕育出大规模泥石流。

(2) 物源条件

地质条件为泥石流的形成提供了松散固体物质,控制着泥石流的空间分布与规模。达仓沟内流域内重力地质作用突出,同时达仓沟沟谷两侧冰碛台地广泛分布,物源主要来自于沟床侵蚀物源、崩滑物源及坡面侵蚀物源,尤以沟床侵蚀物源为主。

崩滑物源呈现明显的局部集中,总体分散的特征,调查共发现2处中型滑坡,其所占达仓沟流域形成泥石流的物源比重较小;坡面侵蚀物源主要流域面上的水土流失和岸坡第四系堆积物受洪水或泥石流侧蚀两部分构成,沟域内生态环境较差,植被覆盖率较小,岩体表层寒冻风化较强烈,水土流失严重,是提供该泥石流活动的主要物源;沿沟道堆积的松散沟床侵蚀物源是参与泥石流的主要物源,这类物源沿沟分布多少不一,其中形成区段沟道宽阔,沟道内松散堆积物厚5~10 m,是沟道物源主要集中地段。

表1 流域内物源统计表

Table 1 Statistical table of provenance in the basin

编号	类型	稳定性	物源总量/ ×10 ⁴ m ³	动储量/ ×10 ⁴ m ³
—	崩滑物源		10.5	6.6
B01	滑坡	欠稳定	6	3.9
B02	滑坡	基本稳定	4.5	2.7
二	沟道物源		882.4	343.1
G01	洪积、泥石流堆积物	欠稳定	12	2.8
G02	洪积、泥石流堆积物	欠稳定	187.2	47
G03	坡洪积物	欠稳定	37.2	11.2
G04	坡洪积物	欠稳定	86	30.1
G05	坡洪积物	欠稳定	560	252
三	坡面物源		802	80.2
合计			1 694.9	345.9

根据调查统计,流域内堆积固体物源总量为1.695 × 10⁷ m³,可能参与泥石流活动的动储量为3.459 × 10⁶ m³,丰富的固体物源为泥石流爆发提供了物质基础。

(3) 水源条件

水是泥石流爆发最直接的诱发因素,本次泥石流爆发的激发因素为冰湖溃决,根据波能量变化与外力

的关系,清水的洪峰流量与泥石流洪峰流量关系为^[8]:

$$Q_{\max}^d = kQ_{\max} \quad (2)$$

式中: Q_{\max}^d ——冰湖溃决泥石流洪峰流量/m³;

Q_{\max} ——冰湖溃决清水洪峰流量/m³;

k ——洪峰流量系数,按照泥石流的特征,可以用泥石流的容重来计算。

$$k = 1 + \frac{\gamma_d - \gamma_w}{\gamma_s - \gamma_d} \quad (3)$$

式中: γ_d ——泥石流体的容重/(kN·m⁻³);

γ_w ——水的容重/(kN·m⁻³);

γ_s ——泥石流固体颗粒的容重/(kN·m⁻³)。

沟口泥石流流量为3 862 m³/s,根据以上公式求得溃决洪峰流量达2 408.1 m³/s,大规模的溃决洪水启动沟域内松散碎屑物质形成了巨大的泥石流灾害,较大的相对高差和较陡的沟床比降保证了流域内拥有充足的势能,为泥石流的形成和发展提供了足够的动力条件。

本次泥石流爆发,地质条件为泥石流的形成提供了松散固体物质,控制着泥石流的规模;较大的相对高差和较陡的沟床比降保证了流域内拥有充足的势能,为泥石流的形成和发展提供了足够的动力条件;而溃决洪水是触发因素。

3.2 溃决泥石流发展趋势分析

影响冰湖溃决地质灾害的因素有很多,乐茂华等^[14]基于逻辑回归法,选取冰湖坝顶宽度、湖水位距坝顶高度与湖坝高度之比、冰舌前端距冰湖距离、冰舌段坡度、冰湖面积和补给冰川面积6个预测指标作为变量,提出了西藏地区冰湖溃决的危险性概率预测模型:

$$P = [1 + \exp(1.895 + 17.556X_1 + 36.642X_2 + 20.658X_3 - 43.884X_4 + 0.017X_5 - 0.199X_6)]^{-1} \quad (3)$$

式中: X_1 ——坝顶宽度/km;

X_2 ——湖水位距坝顶高度与湖坝高度之比;

X_3 ——冰舌前端距冰湖距离/km;

X_4 ——冰舌段坡度;

X_5 ——冰湖面积/km²;

X_6 ——补给冰川面积/km²。

(1) 坝顶宽度

终碛堤坝宽度是影响冰湖溃决的边界条件之一,终碛堤坝顶宽度越大,冰湖越不容易溃决。一般B < 60 m多会发生一次溃决,而且是击溃性溃决。坝顶宽

度越大,越不容易发生击溃性溃决,而有可能出现多次溃决洪水,最后演变为溢流式洪水。流域内 11 个冰湖坝顶宽度在 40~260 m,具有发生溃决可能性。

(2) 湖水位距坝顶高度与湖坝高度之比

冰湖水位距坝顶高度与湖坝高度之比是冰湖溃决的关键性指标,其直接影响坝体水力梯度,其值越小,越易失稳溃决。

(3) 冰舌前端距冰湖距离

冰湖湖岸距离现代冰川冰舌前端距离是冰湖溃决的动力条件之一。一般具有危险性的冰湖湖岸与现代冰川直接相连或相距很近。流域内现有冰川 8 条,自 20 世纪 80 年代以来,达仓沟流域冰川呈现不断缩小的趋势(图 6),流域内有 3 处冰湖距冰川冰舌前端较近。可以预见,随着气温升高和降水的增加,沟域内冰川将延续其缩小的趋势,导致冰湖溃决可能性增大。

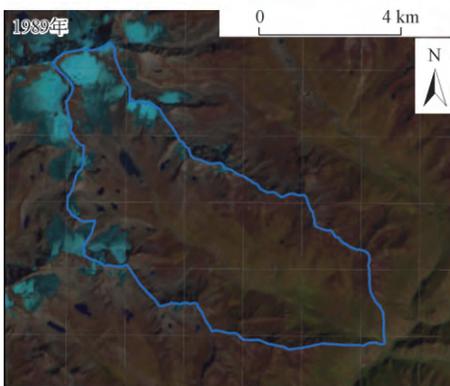
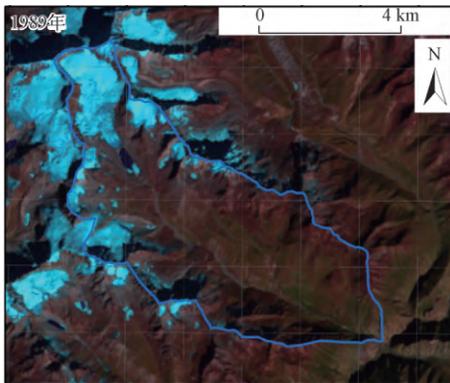


图 6 达仓沟冰川、冰湖动态变化图像

Fig. 6 The dynamic maps of ice lake and glacier in Dacanggou

(4) 冰舌段坡度

冰舌是冰川作用最活跃的一段,冰舌段坡度越大,在水热组合条件下,越容易导致冰川的退化,从而诱发冰湖溃决。流域内共三处冰湖坡度较陡,冰川表面裂缝分布较广,具有典型跃动冰川的特点。

(5) 冰湖面积

对于现代冰湖来说,冰湖的面积越大,其储水量相应地也越大,相应水体库容对终碛堤的静压力也越大,从而影响到终碛堤的稳定性,同时溃决时形成的洪峰流量也越大,危险度也就越高^[7]。达仓沟流域现有冰湖 11 个,面积最大的约 0.22 km²,面积最小的冰湖面积仅有 700 m²。

(6) 补给冰川面积

达仓沟流域现有冰川 8 条,其中规模最大的面积超过 2.24 km²,面积最小的仅为 0.04 km²。补给冰川面积越大,消融水流越多,越容易导致冰湖溃决。据相关研究^[15],近 50 年来,中国西部气候变暖,降水增加,并预测未来 50 年中国西部,特别是西藏地区,气温有进一步升高,降水有进一步增加的趋势,气温升高和降水的增加加速了冰川的退化,冰雪融水的增加必将造成冰湖溃决可能性增大。

根据回归分析,西藏地区冰湖溃决的危险性概率预测模型^[14]将冰湖溃决的危险性用概率划分为四级,溃决可能性 <30% 为低,30%~50% 为中,50%~80% 为高,>80% 为极高。采用式 3 对流域内冰湖溃决概率值进行计算,计算参数及结果如表 2 所示。根据计算结果,冰湖 1、2、3 溃决可能性高,其余冰湖溃决可能性低。

表 2 冰湖溃决概率计算结果

Table 2 The probability calculation result of glacial lakes outburst

序号	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	P
1	0.04	0.03	0.31	0.23	0.22	2.24	0.61
2	0.05	0.11	0.25	0.29	0.008 4	0.86	0.72
3	0.08	0.21	0.14	0.33	0.063	0.13	0.65
4	0.06	0.12	0.15	0.21	0.003 6	0.97	0.26
5	0.08	0.13	0.21	0.2	0.015 2	0.56	0.03
6	0.12	0.1	0.2	0.13	0.03	0.18	0.00
7	0.14	0.17	0.54	0.08	0.027 3	0.15	0.00
8	0.26	0.15	0.35	0.17	0.034 5	0.26	0.00
9	0.09	0.09	0.54	0.08	0.01	0.15	0.00
10	0.22	0.14	0.21	0.13	0.018	0.18	0.00
11	0.08	0.12	0.52	0.09	0.000 7	0.56	0.00

结合预测结果,达仓沟流域存在三处冰湖溃决隐患,三处冰湖坡度较陡,冰川表面裂缝分布较广,具有典型跃动冰川的特点(图 7)。其余冰湖考虑到其现代冰川前缘距离冰湖已较远,且陡坎部位以下的冰川基本消融,由于其后缘冰川跃动发生溃决的可能性较小。

三处冰湖在突发强烈地震活动造成冰崩、天气异



图7 达仓沟流域溃决危险冰湖

Fig. 7 The glaciers are at risk of outburst in Dacanggou basin

常(极端降雨、升温)等影响下,可能发生冰湖溃决,大规模的蓄水一旦溃决,溃决洪水将启动沟域内松散碎屑物质再次形成规模巨大的泥石流灾害。达仓沟沟口分布达仓村56户273人及岗绒公路重要公共设施,沟口沟道宽3~4m,切割深0.5~3.5m,居民房屋均傍沟修建,一旦爆发泥石流,将对沟口造成巨大的损失。

4 结论

本文在对达仓沟遥感解译和现场调查的基础上,对达仓沟冰湖溃决泥石流基本特征进行了分析,对发展趋势进行了预测。主要取得了如下成果:

(1) 达仓沟流域内至少发生过三次较大规模的冰湖溃决,其中最大的1956年溃决泥石流沟口流速达 8.06 m/s ,沟口流量达 $3\ 862\text{ m}^3/\text{s}$,导致沟口达仓村毁灭。

(2) 沟域内冰川呈现不断缩小的趋势,存在3处冰湖溃决隐患。

(3) 达仓沟流域沟床纵坡降大,固体物源丰富,一旦发生冰湖溃决,可能再次发生冰湖溃决泥石流。

参考文献:

- [1] 姚晓军,刘时银,孙美平,等. 20世纪以来西藏冰湖溃决灾害事件梳理[J]. 自然资源学报,2014,29(8):1377-1390.
YAO Xiaojun, LIU Shiyin, SUN Meiping, et al. Study on the glacial lake outburst flood events in Tibet since the 20th century [J]. Journal of Natural Resources,

2014, 29(8): 1377-1390.

- [2] 党超,褚娜娜,丁瑜. 冰湖溃决泥石流形成的临界条件[J]. 冰川冻土,2014,36(5):1176-1183.

DANG Chao, CHU Nana, DING Yu. The critical condition for the formation of debris flow induced by glacial lake outburst flood [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(5): 1176-1183.

- [3] 施雅风,任炳辉. 中国冰川研究发展简史[J]. 冰川冻土,1983(1):21-31.

SHI Yafeng, REN Binghui. A brief history of Chinese glacier research development [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1983(1): 21-31.

- [4] 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.

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.

- [5] 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.

LYU Ruren, TANG Bangxing, ZHU Pingyi. Debris flow and environment in Tibet [M]. Chengdu: Chengdu Science and Technology University Press, 1999.

- [6] 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:成都科技大学出版社,1999.

ZHU Pingyi, HE Ziwen, WANG Yangchun, et al. Study on typical mountain hazard along Sichuan-Tibet highway [M]. Chengdu: Chengdu Science and Technology University Press, 1999.

- [7] 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.

CHENG Zunlan, ZHU Pingyi, GUAN Yiwen. Typical debris flow triggered by ice-lake break [J]. Journal of Mountains Sciences 2003, 21(6): 716-720.

- [8] 陈晓清,陈宁生,崔鹏. 冰川终碛湖溃决泥石流流量计算[J]. 冰川冻土,2004,26(3):357-362.

CHEN Xiaqing, CHEN Ningsheng, CUI Peng. Calculation of Discharge of Debris Flow Induced by Glacier Lake Outburst [J]. Journal of Glaciology and Geocryology 2004, 26(3): 357-362.

- [9] 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,2003,23(2):41-49.

(下转第48页)

- Processing Technology 2008, 204(1-3): 192-198.
- [15] 匡乐红,徐林荣,刘宝琛.基于可拓方法的泥石流危险性评价[J].中国铁道科学,2006,27(5):1-6.
KUANG Yuehong, XU Lingrong, LIU Baochen. Risk assessment of debris flow based on extension method [J]. China Railway Science, 2006, 27(5): 1-6.
- [16] 匡乐红,刘宝琛,姚京成.基于模糊可拓方法的泥石流危险度区划研究[J].灾害学,2006,21(1):68-72.
KUANG Yuehong, LIU Baochen, YAO Jingcheng. Study on the risk zoning of debris flow based on fuzzy extension method [J]. Disaster Science, 2006, 21(1): 68-72.
- [17] 谷复光,王清,张晨.基于投影寻踪与可拓学方法的泥石流危险度评价[J].吉林大学学报(地球科学版),2010,40(2):373-377.
GU Fuguang, WANG Qing, ZHANG Chen. Risk assessment of debris flow based on projection tracing and extenics method [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2010, 40(2): 373-377.
- [18] 郑立峰,唐见兵.基于灰色关联分析的系统仿真因素权重确定[J].计算机仿真,2007,24(9):76-78.
ZHENG Lifeng, TANG Jigbing. Determination of the weight of system simulation factors based on grey correlation analysis [J]. Computer Simulation, 2007, 24(9): 76-78.
- [19] 张廷.基于DEM的洮河流域构造地貌分析[D].北京:中国地质大学,2010.
ZHANG Ting. Structural geomorphology analysis of Taohe River basin based on DEM [D]. Beijing: China University of Geology, 2010.
- [20] 李常斌,王帅兵,杨林山,等.1951—2010年洮河流域水文气象要素变化的时空特征[J].冰川冻土,2013,35(5):1259-1266.
LI Changbin, WANG Shuaibing, YANG Linshan, et al. Temporal and spatial characteristics of the changes of hydrometeorological elements in the Taohe basin in the 1951—2010 [J]. Glacierpermafrost, 2013, 35(5): 1259-1266.
- [21] 冯尊斌.基于GIS的兰州泥石流危险性评价[D].兰州理工大学,2018.
FENG Zunbin. Risk assessment of debris flow in Lanzhou based on GIS [D]. Lanzhou University of Technology, 2018.
- [22] 曹兴山.甘肃的第四系[J].甘肃地质,1997(2):1-51.
CAO Xingshan. The fourth system of Gansu [J]. Gansu Geology, 1997(2): 1-51.

(上接第39页)

- CUI Peng, MA Dongtao, CHEN Ningsheng, et al. The initiation, motion and mitigation of debris flow caused by glacial lake outburst [J]. Quaternary Sciences, 2003, 23(2): 41-49.
- [10] 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):88-92.
LIU Wei. Preliminary study on debris flow induced by glacier lake outburst in Tibet [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2006(3): 88-92.
- [11] 吴积善,程尊兰,耿学勇.西藏东南部泥石流堵塞坝的形成机理[J].山地学报,2005,23(4):399-405.
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.
- [12] 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.
YOU Yong, CHENG Zunlan. Modeling experiment of debris flow in Midui gully, Tibet [J]. Journal of Mountain Science, 2005, 23(3): 288-293.
- [13] 程尊兰,朱平一,党超,等.藏东南冰湖溃决泥石流灾害及其发展趋势[J].冰川冻土,2008,30(6):954-959.
CHENG Zunlan, ZHU Pingyi, DANG Chao, et al. Hazards of debris flow due to glacier-lake outburst in southeastern Tibet [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30(6): 954-959.
- [14] 乐茂华,唐川,张丹丹,等.基于逻辑回归法的西藏地区冰湖溃决危险性预测模型[J].自然灾害学报,2014,23(5):177-184.
LE Maohua, TANG Chuan, ZHANG Dandan, et al. Logistic regression model-based approach for predicting the hazard of glacial lake outburst in Tibet [J]. Journal of Natural Disasters, 2014, 23(5): 177-184.
- [15] 王绍武,董光荣.中国西部环境特征及其演变[M].北京:科学出版社,2002.
WANG Shaowu, DONG Guangrong. Environmental characteristics and evolution of the Chinese western regions [M]. Beijing: China Science Press, 2002.