

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.161>



冰碛湖溃决易发性的定量评价

余斌¹, 何元勋², 刘秧³

1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川成都 610059
2. 四川省交通勘察设计研究院有限公司, 四川成都 610017
3. 湘潭市勘测设计院, 湖南湘潭 411100

摘要:世界范围内的冰碛湖溃决往往造成巨大经济损失和人员伤亡。通过分析不含死冰的冰碛坝溃决机理和相关影响因素,采用控制变量法,以喜马拉雅山区21个溃决冰碛湖及其周围未溃决冰碛湖为研究对象,采用6个无量纲影响因子可以合理评估喜马拉雅山区和加拿大哥伦比亚省西南地区以及美国西北部地区的冰湖溃决易发性,但喜马拉雅山区不同级别判别阈值较加拿大哥伦比亚省西南地区偏大。危险冰体坡度因子、危险冰体温度因子、冰川坡向因子、危险冰体与冰碛湖体积因子、危险冰体与冰湖的运动因子、冰碛坝坡度因子是影响不含死冰冰碛湖溃决的主要因子,由这些影响因子构成的冰碛湖溃决易发性定量评价方法,可以用于其他地区的冰碛湖溃决易发性评价。

关键词:定量研究;冰碛湖;溃决;易发性评价;岩土工程。

中图分类号: P694

文章编号: 1000-2383(2022)06-1999-16

收稿日期: 2021-08-03

Quantitative Susceptibility Assessment of Breach of Moraine-Dammed Lakes

Yu Bin¹, He Yuanxun², Liu Yang³

1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China
2. Sichuan Communication Surveying & Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610017, China
3. Survey and Design Institute of Xiangtan City, Xiangtan 411100, China

Abstract: Glacial lake outburst floods (GLOFs) have caused tens of millions of dollars of damage to infrastructure and have killed thousands of people worldwide. Based on the formation mechanism of GLOF of moraine-dammed lakes without ice core, 21 GLOFs were selected for the analysis of triggering factors in the Himalayan region. A statistical method was used via the Variable-Controlling Approach (VCA). Six dimensionless impact factors can be used to reasonably assess the GLOFs susceptibility in the Himalayan mountains, southwestern part of Canadian Columbia and northwestern part of the United States, but the threshold values in the Himalayan mountains are larger than those in southwestern part of Canadian Columbia. The dangerous glacier slope factor, the dangerous glacier temperature factor, the glacier aspect factor, the dangerous glacier volume and lake volume factor, the dangerous glacier and lake kinetic factor, and the downstream slope of the moraine-dam factor are major factors for the breaching of moraine-dammed lake and GLOF. The assessment model with these factors may thus be used to assess the hazard of

基金项目:国家自然科学基金重大专项资助(No.41941019);第二次青藏高原综合科学考察研究资助(No.2019QZKK0201)。

作者简介:余斌(1966—),男,教授,博士,主要从事泥石流灾害与防治、泥石流预报研究及相关教学工作。ORCID:0000-0003-2367-7746。
E-mail:yubin08@cdut.cn

引用格式:余斌,何元勋,刘秧,2022.冰碛湖溃决易发性的定量评价.地球科学,47(6):1999-2014.

Citation: Yu Bin, He Yuanxun, Liu Yang, 2022. Quantitative Susceptibility Assessment of Breach of Moraine-Dammed Lakes. *Earth Science*, 47(6):1999-2014.

GLOFs occurrence in other areas.

Key words: quantitative study; moraine-dammed lake; breach; hazard assessment; geotechnical engineering.

0 引言

在世界范围内的高纬度或高海拔地区广泛分布有冰碛湖,在我国的西藏与新疆也同样大量分布有冰碛湖。冰碛湖一旦溃决,往往形成泥石流并堵塞下游河道,再溃决形成灾害链,造成极大的灾害,如1981年7月5日位于西藏自治区聂拉木县樟藏布沟内的次仁玛措冰碛湖发生溃决并形成泥石流,泥石流堰塞坝堵断波曲河后再溃决,巨大流量的洪水沿途破坏多处公路桥、水电站和公路,不仅冲毁我国境内高曲乡20余户民房,还造成下游的尼泊尔境内死亡达200人(程尊兰等,2003)。到目前为止世界范围内冰碛湖溃决造成最大灾害是1941年12月13日发生在南美洲秘鲁的Cordillera Blanca地区Cohup冰碛湖溃决,溃决洪水形成泥石流的总量达 $8 \times 10^6 \text{ m}^3$,泥石流毁灭了1/3的Huaraz城,造成6 000多人死亡(Lliboutry *et al.*, 1977)。研究冰碛湖溃决易发性评价可以为冰碛湖溃决及其灾害链的防灾减灾提供依据。

在喜马拉雅山区历史上发生溃决和具有潜在易发性的冰湖主要是冰碛湖(徐道明和冯清华,1989)。现代冰碛湖大部分形成于小冰期(1600—1850年)各冰退阶段,其中危险冰碛湖主要产生于小冰期的最后一次冰退,冰碛下部有时有残留的死冰(徐道明和冯清华,1989)。残留的死冰消融活动对冰碛坝的稳定性影响很大,喜马拉雅山区冰碛湖溃决的直接原因主要是冰崩和死冰的消融(徐道明和冯清华,1989)。

涌浪和冰湖水位上升是造成不含死冰冰碛坝溃决的主要原因,而有死冰冰碛坝溃决的原因主要是温度上升造成死冰的消融。因为溃决机理不同,需要将这两类冰碛湖区分开,不含死冰的冰碛坝可以通过影像来区别(McKillop and Clague, 2007a):(1)表面较圆滑并有分层的弯曲山脊冰碛坝是有死冰的冰碛坝;(2)小的冰川前有一个不成比例的非常大的冰碛坝是有死冰的冰碛坝;(3)狭窄的尖顶、横断面为三角形的冰碛坝是不含死冰的冰碛坝;(4)冰碛坝内有湖塘发育是有死冰冰碛坝。本文不研究有死冰冰碛坝溃决易发性,仅研究不含死冰冰碛坝溃决易发性。为了方便叙述,本文后面部分(包

括题目)所指冰碛坝均为不含死冰冰碛坝,冰碛湖为不含死冰冰碛坝的冰碛湖。

冰碛湖溃决易发性研究有定性、半定量和定量的研究方法。定量研究冰碛湖溃决主要在有加拿大哥伦比亚省西南地区的186个冰碛湖易发性评价(McKillop and Clague, 2007b),青藏高原东南部的78个冰碛湖易发性评价(Wang *et al.*, 2011),塔吉克斯坦的塔吉克帕米尔西南地区的428个冰碛湖易发性评价(Mergili and Schneider, 2011)。尽管这些定量评价中消除了不利于定量评价的主观因素,但每个评价方法都存在不足(Emmer and Vilmek, 2013)。此外,这些方法都是区域评价方法,不能用于其他区域进行定量评价。当需要评价其他区域的冰碛湖易发性时,还需要重新建立评价模型并进行评价,这是目前对冰碛湖溃决易发性定量评价的主要缺陷。

本文以常见的冰崩引起涌浪和冰湖水位上涨导致的冰碛湖溃决为研究对象,定量研究能适用于不同地区的冰碛湖溃决易发性评价方法。论文根据冰碛湖溃决机理以及评价因子筛选原则,确定最终评价易发性的因子,采用控制变量法和统计方法研究了喜马拉雅山区的冰碛湖溃决案例,得到了冰碛湖的易发性定量评价方法,并在加拿大哥伦比亚省西南地区以及美国西北部地区的冰碛湖易发性评价的验证中取得了较好的结果,本文的冰碛湖易发性评价方法可以为冰碛湖溃决及其灾害链的防灾减灾提供依据。

1 研究区域

喜马拉雅山区是冰碛湖溃决最活跃的地区之一,也是本文易发性评价的研究区域。图1中有14个研究子区域分布在喜马拉雅山区,每个子区域内都至少1个溃决冰碛湖,以及数个未溃决冰碛湖。最大的子区域面积为 898 km^2 ,最小面积为 94 km^2 。各子区域中溃决冰碛湖与未溃决冰碛湖的水平距离在30 km范围内,溃决冰碛湖与未溃决冰碛湖的危险冰体质心海拔相差在300 m的范围内,因此可以视为各点位在子区域间的岩性和温度条件相似。

表1为14个子区域的溃决冰碛湖名字、相关参考文献来源和评价因子值,周围未溃决冰碛湖的评

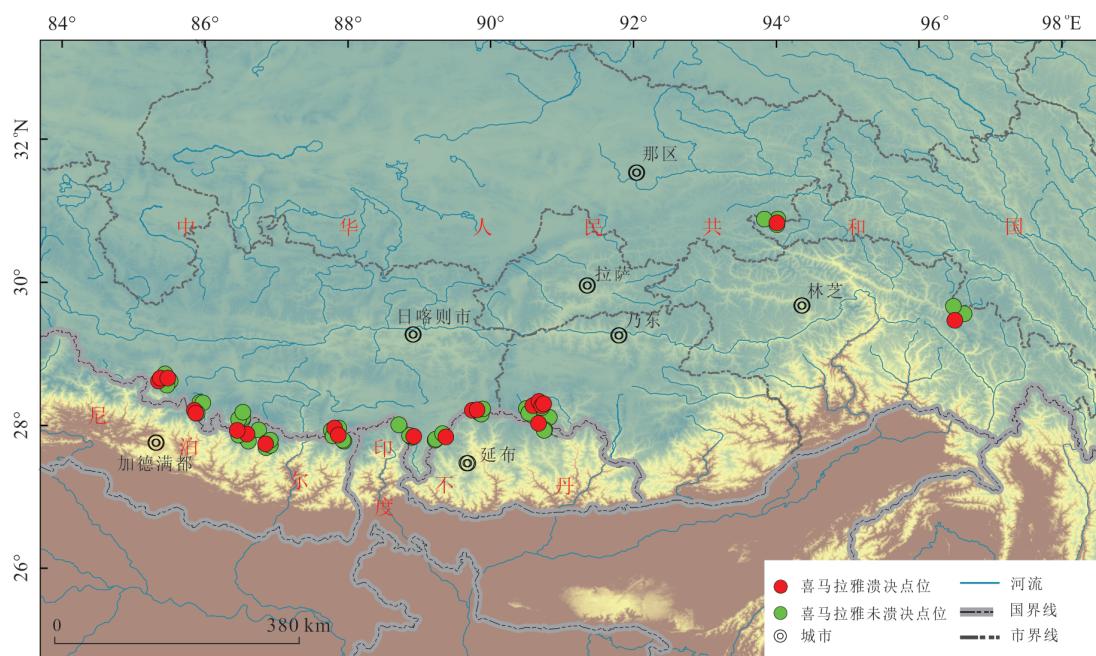


图1 喜马拉雅山区内14个研究子区域分布

Fig.1 The distribution of 14 sub-areas in Himalaya

表1 喜马拉雅山区各子区域溃决与未溃决冰碛湖的评价因子

Table 1 The factors of sub-areas in the Himalayan region with or without GLOFs

名称	子区域	X	S	G	R	D	T	溃决	参考文献
穷比吓玛错	1	0.93	0.51	0.68	0.20	0.39	-7.42	是	McKillop and Clague(2007b)
1-1	1	0.42	0.47	0.17	0.39	0.46	-6.19	否	
1-2	1	0.86	0.47	0.08	0.51	0.35	-6.34	否	
1-3	1	0.71	0.47	0.39	0.36	0.44	-6.73	否	
1-4	1	0.07	0.50	-0.67	0.26	0.35	-8.84	否	
鲁惹错	2	0.38	0.50	0.99	0.20	0.40	-9.59	是	吕儒仁等(1999)
得嘎错	2	0.33	0.48	1.52	0.20	0.43	-8.78	是	姚晓军等(2014)
Upper Jiejiu Tsho	2	0.89	0.48	1.13	0.38	0.45	-8.18	是	刘美(2020)
Upper Shegong Tsho	2	0.79	0.47	0.26	0.50	0.44	-8.41	是	刘美(2020)
Tarikha Lake	2	0.99	0.47	0.54	0.17	0.41	-7.90	是	Nie <i>et al.</i> (2018)
2-1	2	0.05	0.48	0.81	0.30	0.24	-9.66	否	
2-2	2	0.08	0.22	1.57	0.17	0.42	-8.38	否	
2-3	2	0.86	0.49	-0.02	0.26	0.21	-8.45	否	
2-4	2	0.24	0.48	0.40	0.24	0.41	-7.81	否	
2-5	2	0.87	0.46	0.45	0.20	0.22	-7.79	否	
2-6	2	0.02	0.47	0.18	0.30	0.33	-9.17	否	
2-7	2	0.51	0.25	0.53	0.24	0.39	-8.85	否	
2-8	2	0.26	0.37	0.95	0.18	0.35	-9.11	否	
隆达错	3	0.51	0.47	0.55	0.22	0.47	-5.31	是	徐道明和冯清华(1989)
扎那泊	3	0.73	0.51	1.40	0.22	0.48	-5.99	是	姚晓军等(2014)
扎隆嘎布	3	0.60	0.50	0.02	0.20	0.37	-6.16	是	刘建康等(2019)
3-1	3	0.39	0.49	0.67	0.27	0.43	-6.83	否	
3-2	3	0.39	0.59	0.00	0.26	0.69	-6.49	否	
3-3	3	0.28	0.57	-0.36	0.25	0.40	-5.49	否	
3-4	3	0.16	0.56	-0.13	0.31	0.48	-6.27	否	

续表1

名称	子区域	X	S	G	R	D	T	溃决	参考文献
3-5	3	0.60	0.55	1.17	0.33	0.44	-5.92	否	
吉莱错(吉来普错)	4	0.64	0.49	0.04	0.18	0.37	-5.13	是	刘建康等(2019)
4-1	4	0.37	0.49	-0.55	0.22	0.37	-5.41	否	
4-2	4	0.01	0.51	0.77	0.26	0.31	-6.51	否	
Nagma Pokhari	5	1.00	0.48	0.18	0.40	0.46	-4.75	是	Nie <i>et al.</i> (2018)
5-1	5	0.29	0.51	0.92	0.40	0.54	-4.99	否	
5-2	5	1.00	0.44	0.37	0.36	0.59	-4.61	否	
5-3	5	0.97	0.30	1.25	0.31	0.36	-4.27	否	
5-4	5	0.92	0.47	-0.18	0.32	0.49	-5.18	否	
Dig Tsho	6	0.67	0.52	0.34	0.52	0.43	-2.40	是	Gurung <i>et al.</i> (2017)
6-1	6	0.58	0.48	1.21	0.33	0.37	-3.57	否	
6-2	6	0.43	0.54	-0.86	0.30	0.14	-3.66	否	
6-3	6	0.29	0.60	-0.95	0.21	0.53	-4.22	否	
6-4	6	0.55	0.49	0.78	0.39	0.28	-4.05	否	
Upper Langbu Tsho	7	0.79	0.48	1.19	0.31	0.62	-4.31	是	Nie <i>et al.</i> (2018)
7-1	7	0.26	0.36	-0.44	0.22	0.46	-4.96	否	
7-2	7	0.72	0.42	1.08	0.27	0.38	-5.17	否	
7-3	7	0.40	0.48	0.53	0.19	0.42	-3.55	否	
7-4	7	0.34	0.51	-0.28	0.28	0.42	-4.63	否	
错嘎	8	0.93	0.48	0.00	0.28	0.37	-6.55	是	姚晓军等(2014)
8-1	8	0.03	0.50	-0.12	0.38	0.23	-6.46	否	
8-2	8	0.56	0.52	-0.15	0.20	0.47	-6.45	否	
8-3	8	0.94	0.49	-0.11	0.40	0.35	-5.15	否	
光谢错	9	0.34	0.51	0.94	0.24	0.44	-6.68	是	刘建康等(2019)
9-1	9	0.17	0.49	1.12	0.24	0.53	-5.39	否	
9-2	9	0.99	0.34	0.18	0.47	0.27	-5.52	否	
Tam Pokhari	10	0.97	0.52	-0.41	0.56	0.50	-5.35	是	Nie <i>et al.</i> (2018)
10-1	10	0.34	0.28	-0.03	0.31	0.52	-4.33	否	
10-2	10	0.72	0.56	0.47	0.31	0.53	-4.43	否	
10-3	10	0.34	0.50	0.13	0.33	0.45	-5.91	否	
10-4	10	0.95	0.48	-0.34	0.21	0.33	-6.73	否	
龙纠错	11	0.55	0.57	-0.19	0.37	0.44	-6.92	是	姚晓军等(2014)
Simdong Goi Tsho	11	0.84	0.51	1.30	0.28	0.40	-6.72	是	Nie <i>et al.</i> (2018)
11-1	11	0.24	0.47	0.61	0.22	0.42	-6.88	否	
11-2	11	0.59	0.49	1.07	0.30	0.32	-8.16	否	
11-3	11	0.59	0.48	0.87	0.32	0.55	-7.28	否	
11-4	11	0.19	0.58	0.42	0.19	0.50	-7.35	否	
嘉龙错	12	0.74	0.55	0.46	0.54	0.53	-3.34	是	陈晓清等(2006)
12-1	12	0.22	0.47	0.65	0.45	0.42	-4.42	否	
12-2	12	0.03	0.48	0.46	0.32	0.21	-2.53	否	
Unnamed 6th	13	0.92	0.51	1.18	0.49	0.44	-1.98	是	刘美(2020)
13-1	13	0.19	0.49	1.18	0.24	0.41	-1.49	否	
Upper ChokhamTsho	14	0.85	0.48	0.60	0.59	0.36	-5.36	是	Nie <i>et al.</i> (2018)
14-1	14	0.61	0.47	0.34	0.29	0.49	-5.79	否	
14-2	14	0.55	0.53	-0.19	0.30	0.50	-6.82	否	
14-3	14	0.15	0.53	0.51	0.40	0.33	-5.79	否	

注:表中的因子X、S、G、R、D、T等分别表示坡向因子、危险冰体坡度因子、危险冰体与冰湖体积因子、运动因子、背水坡坡度因子、温度因子,详细定义见文章第2部分。

价因子值也列在表1中.评价因子及其取值见下文研究方法章节.溃决冰湖的坐标和溃决时间等可以通过相关文献查阅.影像数据来自Landsat、Keyhole以及Google Earth pro,高程数据来自于ALOS-12.5 m数据,对于溃决冰湖,在溃决前的影像和溃决后的影像均需要用于评价因子的取值,而未溃决冰湖仅仅最近的影像即可以用于评价因子取值.

2 研究方法

2.1 基本方法

在统计学研究中,保持其他变量均为固定不变值,研究另外1个变量的独立作用的方法,称为控制变量法.控制变量法在地球科学中应用很少,这是因为地球科学问题中的变量太多,野外数据较分散,很难控制多个变量为固定不变值.冰碛湖溃决问题涉及到的变量至少有27个(如表2),要做到控制多个变量为固定值并研究单个变量的独立作用非常困难.

要采用控制变量法研究冰碛湖溃决的易发性问题,首先需要根据冰碛湖的溃决机理和评价因子筛选原则,减少变量,并通过简化和合并仅保留必要的少数变量,使需要控制的变量数也很少;其次,因为涉及到冰碛湖溃决问题的变量范围较大,即使有个别变量有固定不变值,也无法满足其他变量也同时不变,因此需要采用特定的取值区间代替固定不变值,才有可能采用控制变量法研究冰碛湖溃决问题.尽管这种替代方法会带来一定的误差,但有相当程度的控制变量的研究结果,仍然有较大的优势,比完全不控制变量的统计研究有更好的结果.本文研究中采用控制变量法就是用特定的取值区间来代替固定不变值,以实现变量控制.

对于每一个变量,都可以分为2个区间:(1)易于发生冰碛湖溃决;(2)难于发生冰碛湖溃决(吕儒仁等,1999).将易于发生冰碛湖溃决的变量范围设定为特定的取值区间,由此可以采用控制变量法研究冰碛湖溃决易发性.

2.2 基本变量

涉及到冰碛湖溃决问题的变量很多,主要涉及的因子见表2.采用评价因子筛选原则可以减少一些变量:(1)变量必须是客观的,可重复测量,不同学者的测量结果基本相同(Mergili and Schneider, 2011);(2)与发生机理相关的变量才应该考虑(Mergili and Schneider, 2011);(3)变量必须通过遥

感影像可以获得(Mergili and Schneider, 2011; Wang et al., 2011);(4)相关变量不是仅仅与某个区域相关(Wang et al., 2011);(5)变量是连续的定量值(Wang et al., 2011);(6)所有变量相互独立而不是相关联(Wang et al., 2011).本文的研究目标是建立一种快速而经济的冰碛湖溃决易发性评价方法,因此需要野外现场调查和购买高精度遥感影像数据才能获得的变量都不予考虑.在冰碛湖因子中,湖面面积以及相应计算的湖水体积,其精度较高,因为湖面面积相对于数据精度较大.本文影像数据溃决点位冰湖影像数据主要来源于Landsat及Keyhole数据为主,分辨率为1.83 m/像素至30 m/像素.未溃决点影像数据主要来源于Google Earth pro数据分辨率为0.26 m/像素至8.21 m/像素.

国内外学者研究冰碛湖溃决用到的一些变量,如冰川裂缝宽度(McKillop and Clague, 2007b; 柴波等, 2020)、冰碛坝高宽比(Clague and Evans, 1994)、冰碛坝溢流口宽度、冰碛坝溢流口长度等都不考虑,因为这些需要购买高精度遥感数据或现场调查.有的变量仅仅在瑞士阿尔卑斯山区和加拿大不列颠哥伦比亚才有效,如冰湖湖面与冰碛坝顶距离(Lliboutry et al., 1977; Wang et al., 2011)、冰湖湖面与冰碛坝顶距离和冰碛坝高之比(Lliboutry et al., 1977; Wang et al., 2011)等,也不在本文研究中.冰湖与危险冰体距离,冰湖与危险冰体高差,危险冰体与冰湖的运动因子(冰湖和危险冰体高差与冰湖和危险冰体距离之比)(Wang et al., 2002)等可以相互计算获得,因此有重复,只保留危险冰体与冰湖的运动因子即可,冰湖与危险冰体距离、冰湖与危险冰体高差可以不考虑.

本文仅研究不含死冰冰碛坝,因此假定管涌影响较小,不是冰碛湖溃决的主要因素,不考虑其影响.冰碛坝形成时间在小冰期,因此冰碛坝泥沙之间没有固结,处于松散状态.因为每个子区域的范围有限,最大的子区域面积为898 km²,最小面积为94 km²,因此假定各子区域内岩石岩性一致,即组成冰碛坝的岩石具有相同岩性.同样,由于子区域面积有限,各子区域内受地震的影响差异可以忽略.在上述简化下,可以得出与冰碛湖溃决问题有关变量如下.

2.2.1 冰川 (1)集水面积.集水面积越大,水流量越大,冰湖水位越高,冰川裂缝越多,越有利于冰碛湖溃决(McKillop and Clague, 2007b; Allen et al.,

表 2 与冰碛湖溃决的相关参数
Table 2 The factors related to GLOFs

参数	本文采用	参数	本文采用	参数	本文采用
流域集水面积	否	冰湖与危险冰体高差	是	冰碛坝溢流口宽度	否
冰川面积	是	危险冰体与冰湖的运动参数	是	冰碛坝溢流口长度	否
冰川坡向	是	危险冰体体积与冰湖体积比	是	冰碛坝背水坡坡度	是
危险冰体面积	否	冰湖面积	否	冰碛坝岩性	否
危险冰体体积	是	冰湖体积	是	死冰	否
危险冰体坡度	是	冰碛坝高宽比	否	管涌	否
危险冰体裂缝	否	冰碛坝固结程度	否	温度	是
冰川裂缝宽度	否	冰湖湖面与冰碛坝顶距离	否	地震	否
冰湖与危险冰体距离	是	冰湖湖面与冰碛坝顶距离和冰碛坝高之比	否	滑坡	否

2019).(2)冰川面积和坡向.母冰川面积越大,融化冰水越多,冰湖水位越高,冰川裂缝越多(吕儒仁等,1999; McKillop and Clague, 2007a);冰川坡向影响冰川对太阳热能的吸收,并影响冰崩的发生(刘秧,2016; 汤明高等,2021).(3)危险冰体面积、体积和坡度(刘海阔和张义勋,2005)(危险冰体定义见图2).危险冰体面积或体积越大,产生的冰崩面积或体积越大(乐茂华等,2014);危险冰体坡度越大,越容易产生冰崩(吕儒仁等,1999; McKillop and Clague, 2007a; Allen *et al.*, 2019; 汤明高等,2021).(4)危险冰体与冰湖之间的运动角.危险冰体与冰湖之间的距离越短,高差越大,或者危险冰体与冰湖之间的运动角越大(高差与距离之比),冰崩体越容易进入冰湖(吕儒仁等,1999; McKillop and Clague, 2007a; Allen *et al.*, 2019).(5)危险冰体温度越高,越容易产生冰崩(汤明高等,2021).

2.2.2 冰湖 (1)冰湖面积与体积.面积或体积巨大的冰湖在一般体积的冰崩进入冰湖后,涌浪和水位上涨较小;而面积或体积很小的冰湖在冰崩引起的水位上涨后会很快回落;这两种情况都不利于冰碛湖溃决(吕儒仁等,1999; McKillop and Clague, 2007a; Wang *et al.*, 2020),只有冰湖面积(或体积)处于一个适中的值时才有利于冰碛湖溃决.(2)冰碛坝背水坡坡度.冰碛坝背水坡坡度越大,溢流水流侵蚀冰碛坝越容易(吕儒仁等,1999; Mergili and Schneider, 2011; Lamsal, 2016; Allen *et al.*, 2019).

前人对危险冰体研究主要集中于冰川冰舌段的研究,但前缘冰舌段坡度一般较低,不易发生冰崩.王欣等(2009)认为危险冰体范围为冰川末端至变坡点的范围或末端裂隙发育的冰体范围;Huggel *et al.*(2004)在冰崩易发性评价中提出冰川的表面坡度大于25°,冰崩才能发生.通过前人对危险冰体

的研究总结(Huggel *et al.*, 2004; 王欣等, 2009; Gharamti *et al.*, 2021),危险冰体往往具有以下3个特征:(1)危险冰体后缘具有裂缝;(2)危险冰体的范围为末端裂隙发育的冰体位置或者冰川末端至变坡点的位置;(3)危险冰体坡度大于25°.由以上3个特征,确定解译危险冰体以及范围的方法:危险冰体后缘有裂缝段,前缘为变坡点或无冰川段,两侧为裂缝两侧尽头端.解译的危险冰体范围如图2c所示.当一个冰川解译出多个危险冰体时,离冰湖位置较近的危险冰体更容易影响冰碛湖溃决,因此作为研究的危险冰体,如图2a所示,冰体Ⅰ离冰湖位置较近,因此冰体Ⅰ作为危险冰体.

2.3 易发性评价因子

造成冰碛湖溃决的直接原因是冰崩,因此首先需要确定形成冰崩的危险冰体.有可能发生冰崩并距离冰湖最近的冰体,定义为危险冰体(吕儒仁等,1999; Wang *et al.*, 2002).危险冰体的范围为危险冰体后缘有横向裂缝,前缘至无冰川段或平缓段,两侧为裂缝两侧的末端.

由于无法测量和直接计算危险冰体厚度,本文以冰川平均厚度 h 近似代替危险冰体厚度.冰川平均厚度可以由下式计算得到(吕儒仁等,1999):

$$h=5.2+15.4F^{0.5}, \text{ 海洋性冰川}, \quad (1)$$

$$h=-11.32+53.21F^{0.3}, \text{ 大陆性冰川}, \quad (2)$$

式(1)~(2)中: h 为冰川平均厚度,单位m; F 为冰川面积,单位km².

由危险冰体面积与厚度,可以计算得到危险冰体体积(吕儒仁等,1999):

$$V_G=hA_G, \quad (3)$$

式(3)中: V_G 为危险冰体体积,单位m³; A_G 为危险冰体面积,单位m².

危险冰体体积变量中包括了危险冰体面积变

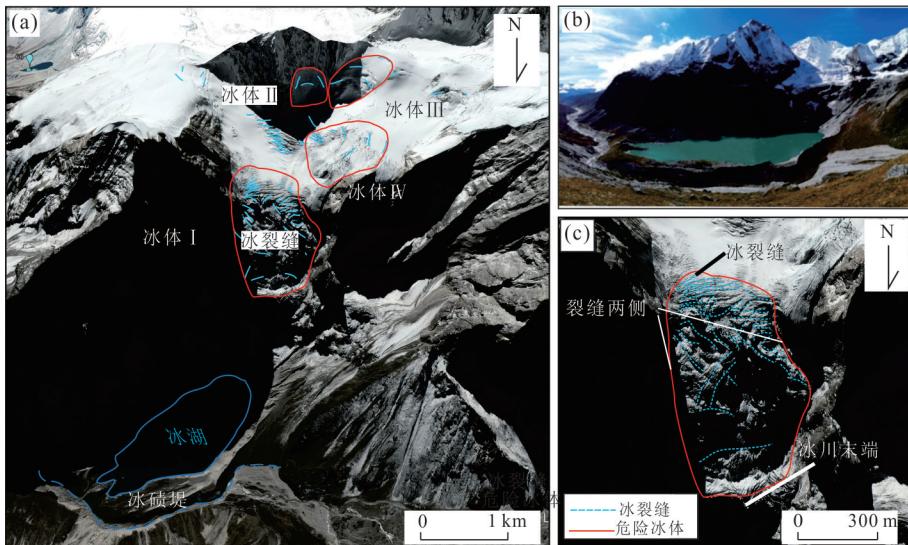


图2 危险冰体示意图(嘉龙措)
Fig.2 The dangerous glacier (Lake Jialong)

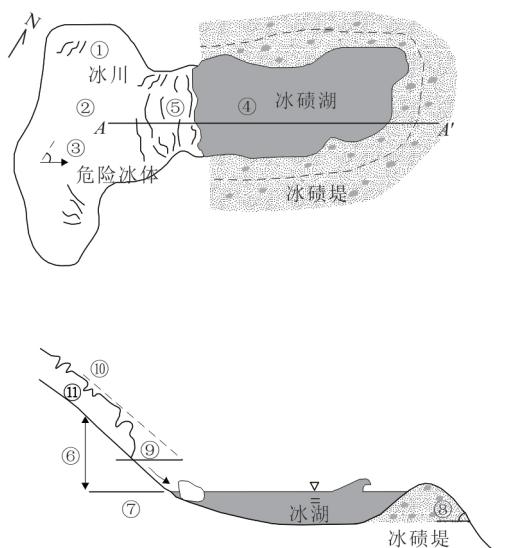


图3 与冰碛湖溃决有关的冰川与冰湖的变量
Fig.3 The factors related drained moraine-dammed
数字表示:①冰川类型;②冰川面积;③冰川坡向;④冰湖体积;
⑤危险冰体面积;⑥危险冰体质心至冰湖的高差;
⑦危险冰体至冰湖的水平运动距离;⑧冰碛堤背水坡坡度;
⑨危险冰体坡度;⑩危险冰体温度;⑪危险冰体高程

量和冰川面积变量。由于集水面积一般与冰川面积成正比(刘秧,2016),危险冰体体积变量也包括了集水面积变量。为了避免变量的重复使用,本文在这些变量中仅仅使用危险冰体体积作为评价变量。由于危险冰体体积越大,潜在冰崩体积往往也越大,因此危险冰体体积也可以代表冰崩体积。

危险冰体坡度 α 和冰川坡向的平面投影角 θ 是

代表冰川的两个因子,这两个用于易发性评价的因子可以表达为:

$$S = \tan \alpha, \quad (4)$$

$$X = \sin(\theta/2), \quad (5)$$

式(4)~(5)中: S 为危险冰体坡度因子; α 为危险冰体坡度,单位 $^\circ$; X 为冰川坡向因子; θ 为北半球冰川坡向的平面投影角(如图4);如果在南半球,冰川坡向的平面投影角是与正南方向夹角。

危险冰体与冰湖的运动因子代表冰崩进入冰湖的可能性,可以由下式表达:

$$R = H/L, \quad (6)$$

式(6)中: R 为危险冰体与冰湖的运动因子; H 为危险冰体质心与冰湖湖面的高差,单位m; L 为危险冰体质心与冰湖后缘之间的路程长度,单位m。当危险冰体位于冰碛湖正上方时, R 值可能非常大,为了避免 R 值过大而夸大 R 的作用,本文设定一个最大的 R 值: $R=1$,即危险冰体与冰湖的运动角为 45° 时,冰崩体能够很容易进入冰湖,再大的运动角也不会有更多的贡献。这个假设在已溃决冰湖的因子统计中得到验证(见第3部分和表1;21个已溃决冰碛湖中运动因子 R 的值分布在 $0.17\sim0.59$)。

冰湖面积 $A(m^2)$ 和体积 $V_L(m^3)$ 是冰湖的两个重要参数(图3)。冰湖体积可以由冰湖面积计算得到(Huggel et al., 2002):

$$V_L = 0.104A^{1.42}. \quad (7)$$

冰碛坝背水坡坡度 β 可以由下式表达为冰碛坝坡度因子 D :

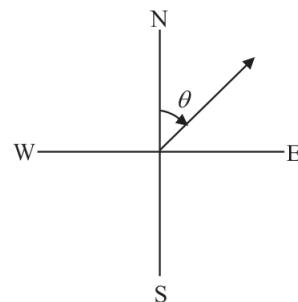


图 4 北半球冰川坡向的平面投影角

Fig.4 The planar projection of aspect of the glacier in the northern Hemisphere

$$D = \tan \beta. \quad (8)$$

尽管前人研究表明冰湖面积(或体积)处于一个适中的值时有利于冰碛湖溃决(吕儒仁等,1999; McKillop and Clague, 2007a),但是如果冰崩体积足够大,有足够的冰崩体进入冰湖,较大的冰湖体积也是有可能发生冰碛湖溃决的.因此这里重要的参数不是冰崩体积,也不是冰湖体积,而是两者的比值.因为无法获得预期的冰崩体积,本文用危险冰体体积代替冰崩体积(一般两者成正比),获得体积因子 G :

$$G = \lg(V_G/V_L). \quad (9)$$

危险冰体平均温度是影响冰崩发生及冰湖溃

决的重要参数.危险冰体平均温度越高,越有利于发生冰崩,越有利于冰碛湖溃决.危险冰体所处的海拔位置越低,年平均温度越高,越有利于发生冰崩,越有利于冰碛湖溃决.因此由危险冰体当地(或附近)的年平均温度和危险冰体的海拔高度等变量组成一个危险冰体温度因子 T ,因子值越大,越有利于冰碛湖溃决:

$$T = (T_0 - ch_0)/T_1, \quad (10)$$

式(10)中: T 为危险冰体温度因子; T_0 为危险冰体当地(或附近)的气象站年平均温度,单位 $^{\circ}$; c 为系数,为0.006 5 $^{\circ}$ /m(周淑贞等,1997); h_0 为危险冰体与当地(或附近)的气象站高差,单位m; T_1 为单位温度,值为1 $^{\circ}$.

通过简化和合并,仅仅剩下6个因子,并且通过图3中的变量,由公式(1)~(10)计算得到这6个因子: S 、 X 、 R 、 D 、 G 、 T ,用于冰碛湖溃决易发性评价模型的建立.

3 冰碛湖溃决易发性评价方法

控制变量法是本文冰碛湖溃决易发性评价的研究方法.表1给出了14个喜马拉雅山区研究子区域的溃决冰湖以及附近未溃决冰湖的6个评价因子

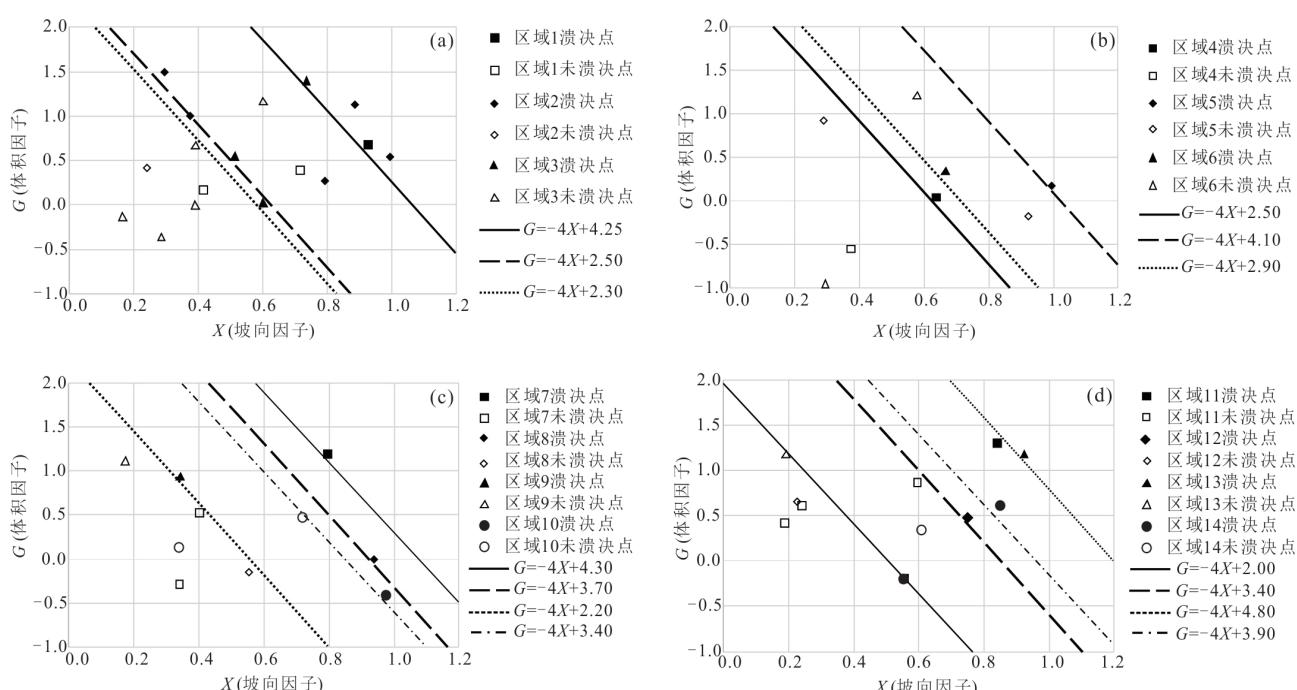
图 5 冰川坡向因子 X 与体积因子 G 关系图

Fig.5 The relationship between the glacier aspect factor X and the volume factor G

a. 子区域 1~3; b. 子区域 4~6; c. 子区域 7~9; d. 子区域 10~14

值。首先每个子区域范围有限,各危险冰体的海拔相差300 m以内,因此在子区域内可以忽略温度的影响。溃决冰碛湖的危险冰体坡度因子S必须在0.47(25°)以上,因此该范围作为危险冰体坡度因子的特定取值区间最小值。发生冰湖溃决的冰川坡向最小值为0.33,因此可以将冰川坡向因子X=0.33设定为特定取值区间最小值;同样方法,可以获得冰碛坝坡度因子D=0.36(19.7°)为特定取值区间最小值;体积因子G=-0.41为特定取值区间最小值(即危险冰体体积与冰湖体积之比在0.39以上);危险冰体与冰湖的运动因子R=0.17为特定取值区间最小值。

要获得冰川坡向因子X与体积因子G的关系,首先需要控制其他几个因子值都在特定取值区间,即 $S \geq 0.47, D \geq 0.36, R \geq 0.17$ 。满足其他几个因子控制在特定取值区间的条件下,对比研究14个子区域内(每个区域内T基本一致)的溃决冰湖与未溃决冰湖的X与G的关系(如图5)。总体上冰碛湖溃决的可能性随X和G值的增大而增大。以最大程度地区分开溃决和未溃决冰湖为目标,可以获得一个新的因子P1:

$$P1 = 4X + G \geq Cr1, \quad (11)$$

式(11)中: $Cr1$ 冰碛湖溃决临界值,在不同子区域因温度或地震的原因不同而不同。

同样的,要获得因子P1与运动因子R的关系,

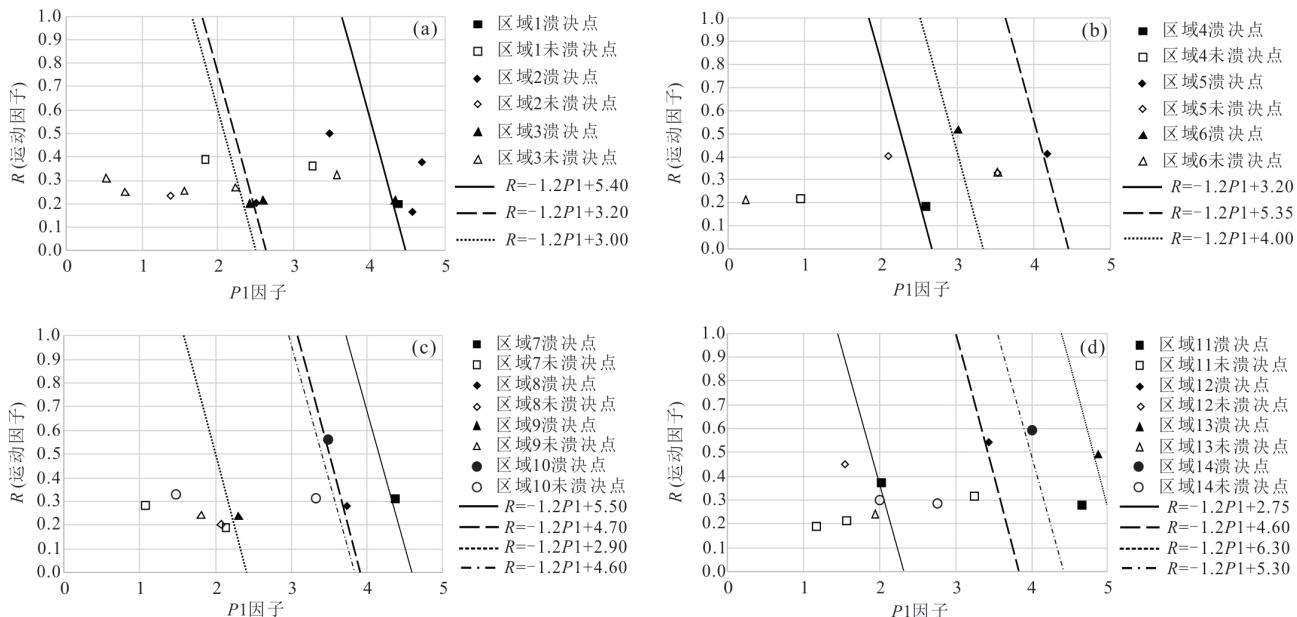


图6 因子P1与运动因子R关系图

Fig.6 The relationship between the factor $P1$ and the kinetic factor R

a. 子区域1~3;b. 子区域4~6;c. 子区域7~9;d. 子区域10~13

首先需要控制其他几个因子值都在特定取值区间,即 $S \geq 0.47, D \geq 0.36$ 。满足其他几个因子控制在特定取值区间的条件下,对比研究14个子区域内的溃决冰湖与未溃决冰湖的P1与R的关系(如图6)。总体上冰碛湖溃决的可能性随P1与R值的增大而增大。以最大程度地区分开溃决和未溃决冰湖为目标,可以获得一个新的因子P2:

$$P2 = 4.8X + 1.2G + R \geq Cr2, \quad (12)$$

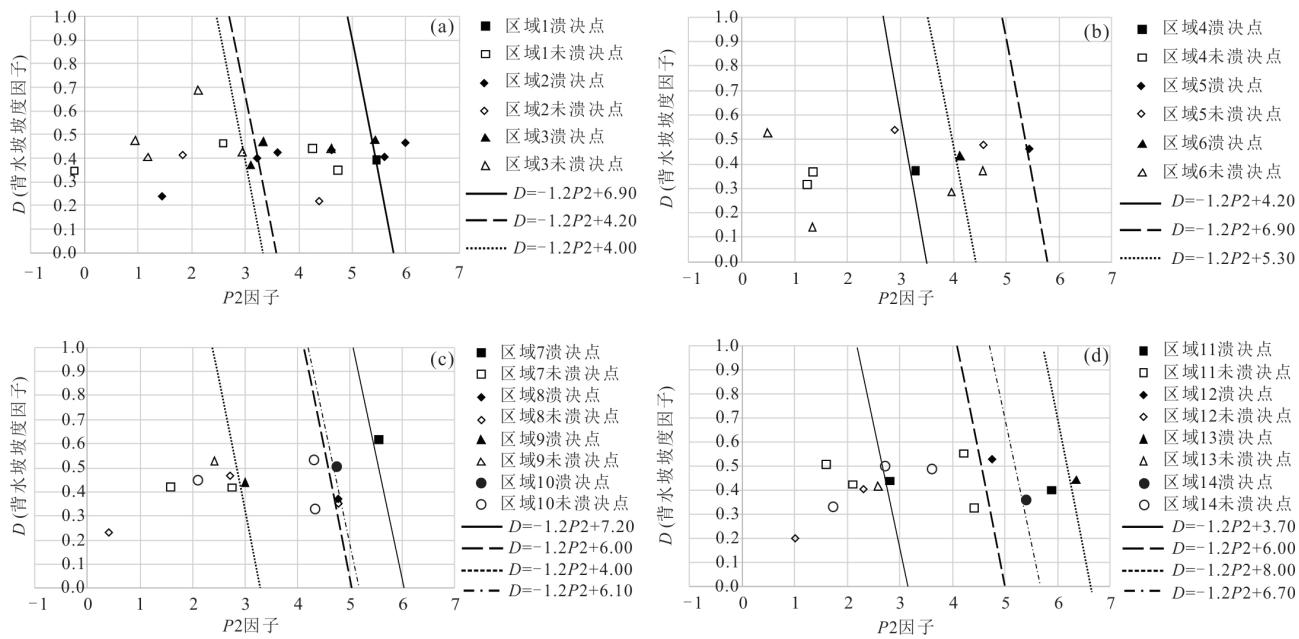
式(12)中: $Cr2$ 冰碛湖溃决临界值,在不同子区域因温度或地震的原因不同而不同。

同理,为了获得因子P2与背水坡坡度因子D的关系,首先需要控制其他几个因子值都在特定取值区间,即 $S \geq 0.47$ 。满足其他几个因子控制在特定取值区间的条件下,对比研究14个子区域内的溃决冰湖与未溃决冰湖的P2与D的关系(如图7)。总体上冰碛湖溃决的可能性随P2与D值的增大而增大。以最大程度地区分开溃决和未溃决冰湖为目标,可以获得一个新的因子P3:

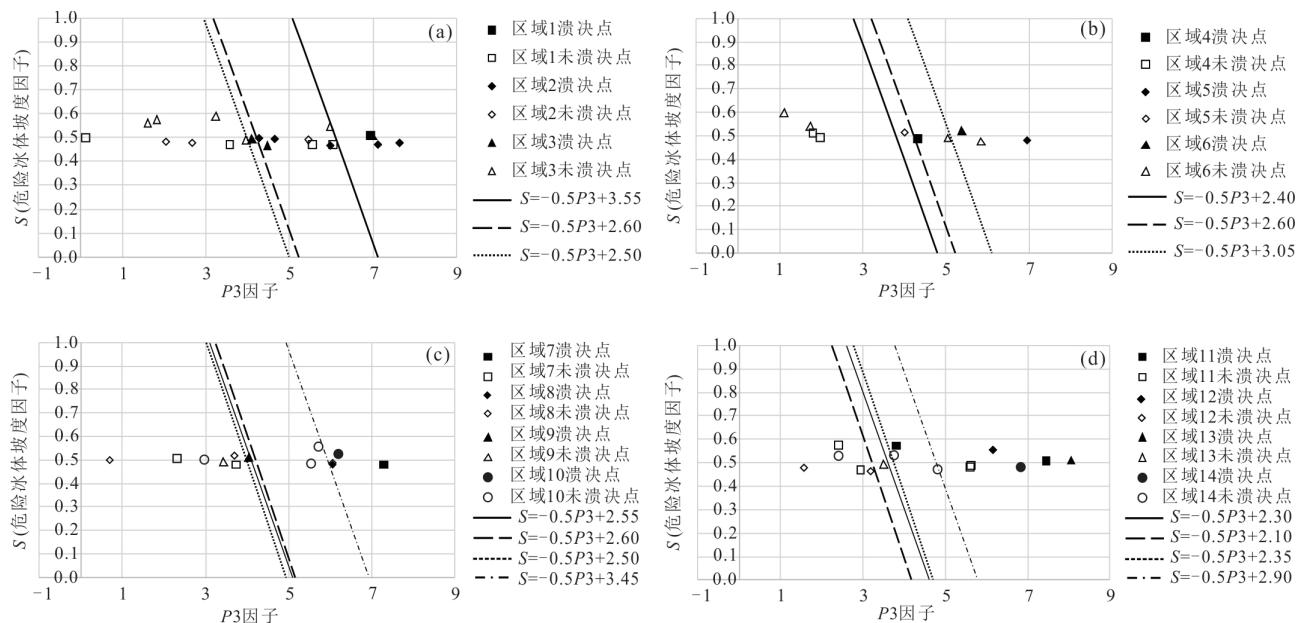
$$P3 = 5.76X + 1.44G + 1.2R + D \geq Cr3, \quad (13)$$

式(13)中: $Cr3$ 冰碛湖溃决临界值,在不同子区域因温度或地震的原因不同而不同。

为了获得因子P3与危险冰体坡度因子S的关系,由于危险冰体坡度需要大于25°,因此需要 $S \geq 0.47$ 。对比研究14个子区域内的溃决冰湖与未溃决冰湖的P3与S的关系(如图8)。总体上冰碛湖溃决

图 7 因子 P_2 与冰碛堤背水坡度因子 D 关系图Fig.7 The relationship between the factor P_2 and the downstream slope of the moraine-dam factor D

a. 子区域 1~3; b. 子区域 4~6; c. 子区域 7~9; d. 子区域 10~13

图 8 因子 P_3 与危险冰体因子 S 关系图Fig.8 The relationship between the factor P_3 and the dangerous glacier slope factor S

a. 子区域 1~3; b. 子区域 4~6; c. 子区域 7~9; d. 子区域 10~13

的可能性随 P_3 与 S 值的增大而增大. 以最大程度地区分开漏决和未漏决冰湖为目标, 可以获得一个新的因子 P_4 :

$P_4 = 2.88X + 0.72G + 0.6R + 0.5D + S \geq Cr_4$, (14)
式(14)中: Cr_4 冰碛湖漏决临界值, 在不同子区域因温度或地震的原因不同而不同.

由于选取的各子研究区内的研究点的危险冰体质心海拔高差在 300 m 以内, 且每一个子研究区漏决点与未漏决点距离为 30 km 范围内, 因此可以近似地认为各子研究区内漏决冰碛湖与未漏决冰碛湖的温度条件相似. 但就整个研究区而言, 温度因素和海拔因素在各子区域间, 具有一定的影响.

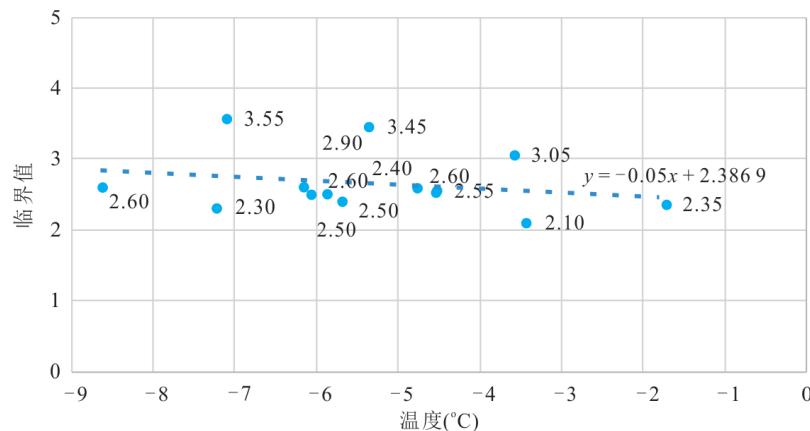


图9 因子P4临界值与温度因子T关系

Fig.9 The relationship between the critical value of factor $P4$ and the temperature factor T

所以需要考虑温度的影响,通过子区域危险冰体的平均高程,获得各子区域危险冰体平均高程位置处的年均温度因子.通过对各子区域 $P4$ 临界值与年均温度因子的关系拟合如图9所示,可得到研究区的冰碛湖溃决易发性评价模型 P :

$$P=2.88X+0.72G+0.6R+0.5D+S+0.05T \geq Cr, \quad (15)$$

式(15)中: Cr 冰碛湖溃决临界值,在不同区域因温度年际变化的原因不同而不同.

4 冰碛湖溃决易发性评价模型及其在其他地区的验证

公式(15)为冰碛湖溃决易发性评价的综合判断因子 P 的计算公式.根据公式(15),可以将喜马拉雅山区的14个子区域的全部冰碛湖易发性判断因子放在一个图中,从而得出易发性的判断指标.图

10为14个子区域冰湖的坡向因子 X 和背水坡坡度因子 D (X 轴),体积因子 G 和运动因子 R 及危险冰体坡度因子 S 和温度因子 T (Y 轴)之间关系以及冰碛湖溃决易发性图.公式(15)中的评价因子 P 可以由2个临界值评价冰碛湖溃决易发性:2.00和3.25.这两个临界值将冰碛湖溃决易发性划分为3个区域: $P < 2.00$,易发性低; $3.25 > P \geq 2.00$,易发性中等; $P \geq 3.25$,易发性高.

本文通过冰碛湖溃决机理和评价因子筛选原则,简化合并后保留少量必要的变量,运用控制变量统计研究的冰碛湖溃决易发性并不局限于获得公式(15)的研究区域.加拿大不列颠哥伦比亚西南地区及美国西北部地区有186个冰碛湖(包括有死冰的冰碛湖和不含死冰的冰碛湖),据研究发现其中不含死冰冰湖点位共62个,有19个发生了溃决或部分溃决,未溃决点位43个(McKillop and Clague, 2007a).其中危险冰体坡度大于 25° 共计49

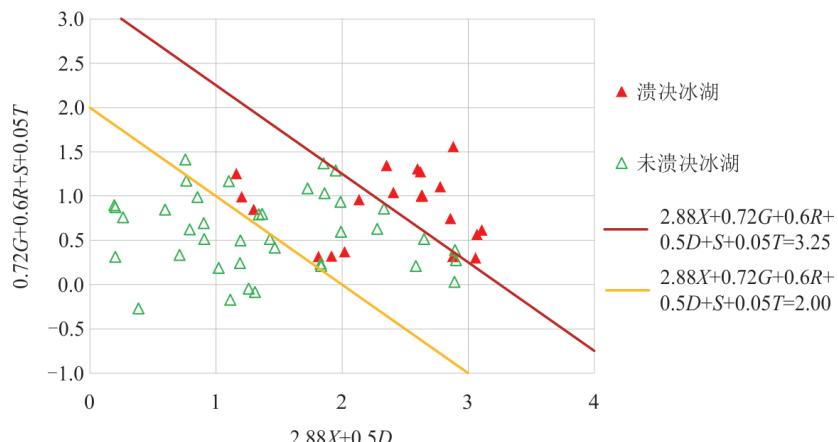


图10 易发性评价和临界值

Fig.10 The susceptibility assessment model and the critical value

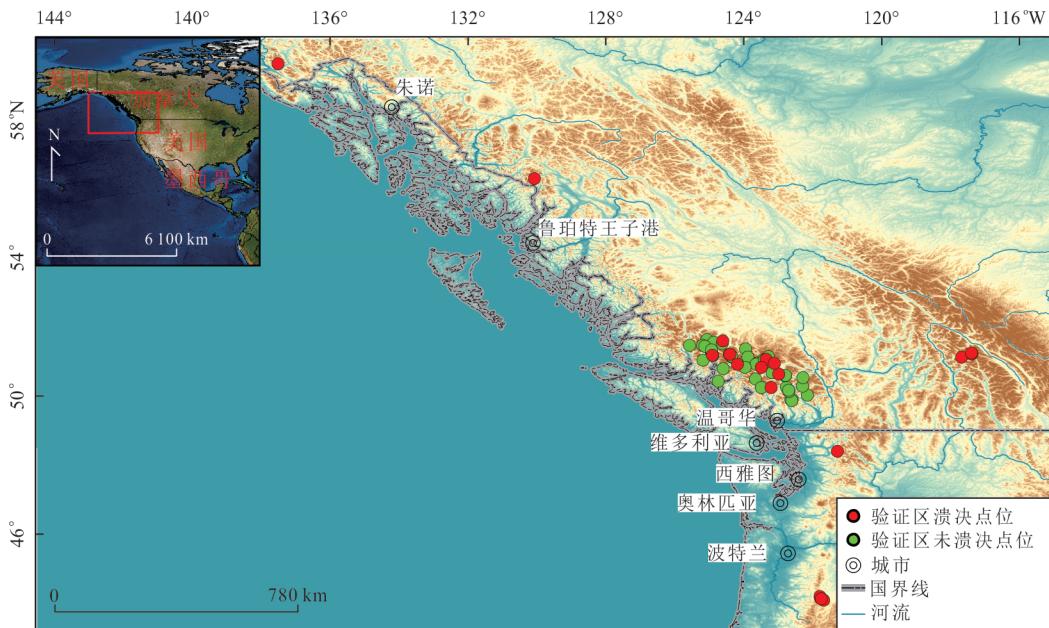


图 11 加拿大不列颠哥伦比亚西南地区及美国西北部地区的溃决和未溃决冰碛湖分布

Fig.11 The distribution of moraine lakes in southwestern British Columbia, Canada and the Northwest United States

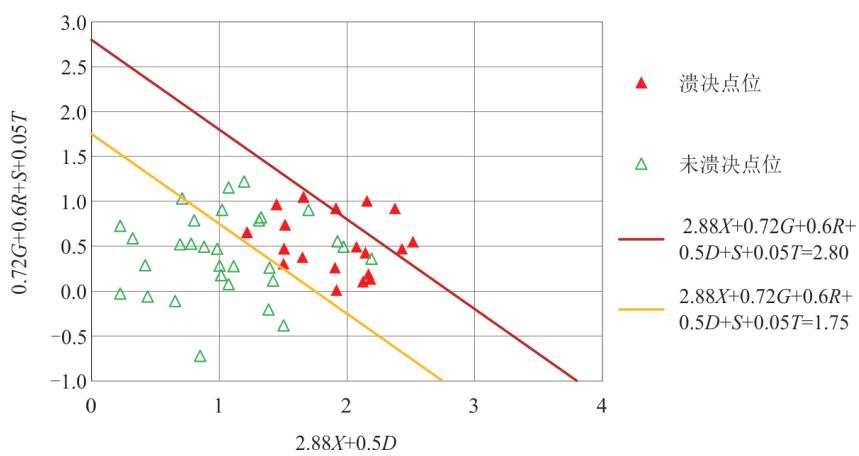


图 12 易发性模型的验证

Fig.12 Validation of the susceptibility assessment model

个,发生溃决的点全部(19个)都大于 25° ,而未溃决点有30个大于 25° .

该区域19个已溃决冰碛湖采用本文易发性评价方法的结果是易发性中(14个)和高(5个),但需要采用新的临界值评价冰碛湖溃决易发性:1.75和2.80.该区域其他30个满足危险冰体坡度大于 25° 的未溃决冰碛湖的易发性用本文易发性模型也进行了评价,评价结果如图12.这些未溃决冰碛湖的易发性判断值在 $0.11\sim 2.60$.所有的30个未溃决冰碛湖中,21个(70%)的易发性为低($P<1.75$),9个(30%)的易发性为中等($2.80>P\geq 1.75$).这一结果表明冰碛湖溃决易发性评价模型在该区域验证结

果较好.

由图10、图12可知,研究区易发性阈值整体高于验证区易发性阈值约15%.通过对两区域整体差异分析得出,主要因为温度年际变化的影响造成两区域阈值差异.两地区气温的年均变化如图13所示,验证区加拿大气温的年际变化较研究区剧烈,气温的年际变化影响主要体现在:气温较低的年代,冰川得以推进,为危险冰体的产生创造了条件.气温较高的年代,冰川退缩,为危险冰体失稳提供了更有利的温度条件(刘晶晶等,2011).综上所述,研究区阈值应高于验证区阈值.

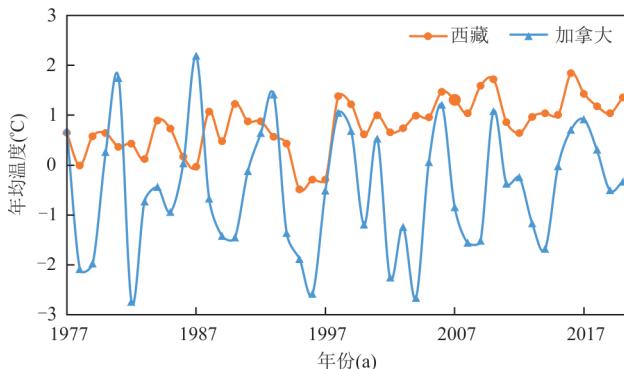


图13 研究区与验证区温度年际变化对比

Fig.13 The comparison of the interannual variation of temperature in the study area and in the verification area

5 讨论和结论

5.1 讨论

本文易发性评价的6个因子有特定取值区间最小值:危险冰体坡度因子 $S=0.47(25^\circ)$ 为最小值,与吕儒仁等(1999)研究的有利于冰碛湖溃决的最小危险冰体坡度为8度相差很大,但与Huggel *et al.*(2004)一致,需要在将来的工作中根据造成冰湖溃决的冰崩坡度进一步确认这个最小值;冰碛坝坡度因子 $D=0.36(19.7^\circ)$ 为最小值,同样与吕儒仁等(1999)的有利于冰碛湖溃决的最小冰碛坝坡度20度很接近,与徐道明和冯清华(1989)的危险终碛湖最小背水坡坡度 23° 也比较接近;体积因子 $G=-0.41$ (危险冰体体积与冰湖体积之比为0.39)为最小值,与徐道明和冯清华(1989)中指出的引起冰碛湖溃决的冰崩体体积占冰碛湖体积的 $1/4\sim 1/2$ 也很接近;危险冰体与冰湖的运动角因子 $R=0.17(9.7^\circ)$ 为最小值,与Wang *et al.*(2011)以及Ding and Liu(1992)研究结果10度相近;冰川坡向因子 $X=0.33$ 为最小值,即冰川坡向与正北(南半球为正南)方向夹角在 38.4° 以上时有利于冰碛湖溃决;该范围除了完全(或接近完全)背对阳光的区域外都适用,与实际接近.温度因子 T 的系数为0.05,是公式15中最小的系数,远小于冰川坡向因子 X 的系数2.88,尽管这两个参数都与危险冰体的温度有关.造成这样差异巨大的原因是:(1)坡向对温度的影响比较大,南坡地面以上1.5 m的温度可以比北坡地面以上1.5 m的温度高 $2^\circ\sim 3^\circ$ (周淑贞等,1997),坡向对冰崩的影响很大;(2)温度作为冰崩的诱发原因,在各子区域的冰崩及冰湖溃决事件中都有举足轻重的作用,但本文的温度因子 T 是指危险冰体的

年平均温度,与诱发时的温度没有直接关系,温度因子 T 也不能反映冰崩或冰湖溃决前的当地温度,这也是图9的点比较分散的原因.但是在本文的冰湖溃决易发性模型中,因为温度因子 T 的系数很小,危险冰体的年平均温度对于易发性的影响也很小,与温度是冰崩及冰碛湖溃决的主要诱发原因相矛盾.危险冰体所处海拔以及年平均温度对冰碛湖溃决的影响,还需要将来进一步深入研究.

危险冰体作为冰川的一部分,在坡向上与冰川坡向存在一定差异.如果用危险冰体坡向代替冰川坡向,可能会更接近实际.但是有几个溃决点的危险冰体坡向几乎向正北方,并导致模型结果偏差较多,效果并不理想.考虑到整个冰川对危险冰体都有影响,尽管冰川坡向比危险冰体坡向更粗略,但还可以接受.从这几方面考虑,特别是建模效果上,本文采用冰川坡向作为坡向的影响因子.但在将来的研究工作中,需考虑危险冰体坡向的影响.

危险冰体后部的裂隙与变坡转折点是最容易发生冰崩的危险冰体部分(吕儒仁等,1999; Wang *et al.*, 2012),也是本文判断危险冰体面积及体积的重要指标.在吕儒仁等(1999)中,危险冰体与冰湖体积之比的范围在 $1.4\sim 30.4$,比本文的危险冰体体积与冰湖体积之比 V_g/V_L 值稍大.本文的易发冰湖 V_g/V_L 最小值为0.39,处于徐道明和冯清华(1989)的最小值的 $0.25\sim 0.50$ 范围内,说明本文的定量获取危险冰体体积方法比较可靠.

本文以快速而廉价的冰碛湖溃决定量易发性评价方法为研究目标,采用评价因子筛选原则最终选用了11个变量,进一步简化为6个无量纲评价因子对冰碛湖溃决进行定量易发性评价.与国内外相应的定量化冰碛湖溃决易发性评价相比(McKillop and Clague, 2007a; Wang *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2012),本文的易发性评价方法的主要优势在于:(1)不局限于论文研究区域,在适当考虑温度年际变化情况下,可以用于其他区域的易发性评价;(2)评价因子涉及到冰川、冰湖以及冰川与冰湖之间的11个变量,比较全面考虑冰碛湖溃决因素.尽管如此,一些对冰碛湖溃决有重要和直接影响的参数,如冰碛坝高宽比、冰湖湖面与冰碛坝顶距离等参数没有被考虑进入易发性评价中,降低了本文易发性评价的准确性,这是本文的局限所在,也是将来进一步工作需要着重考虑的问题.此外,温度年际变化的影响也是重要因素,本文仅仅做了定性影

响判断,需要在将来做进一步定量研究。

5.2 结论

本文通过分析研究冰碛湖溃决机理和评价因子筛选原则,简化和合并一些变量后,得到 6 个无量纲冰碛湖溃决易发性评价因子,利用控制变量方法,以最大程度区分开喜马拉雅山区的 14 个子区域的溃决和未溃决冰碛湖为目标,统计得出了冰碛湖溃决易发性评价模型,并得出以下结论。

(1)冰碛湖溃决易发性的评价因子有 6 个,分别为:①冰川的因子.冰川坡向因子 X 、危险冰体坡度因子 S 、危险冰体温度因子 T ;②冰湖的因子.冰碛坝坡度因子 D ;③冰川及冰湖的因子.体积因子 G 、危险冰体与冰湖运动因子 R 。

(2)冰碛湖溃决易发性评价指数 P 是上述 6 个因子的综合表达式。冰碛湖溃决易发性随 P 值增加而增加。由 P 值可以将冰碛湖溃决易发性划分为 3 类:易发性低、易发性中等和易发性高。

(3)采用 6 个无量纲影响因子可以合理评估喜马拉雅山区和加拿大哥伦比亚省西南地区以及美国西北部地区的冰湖溃决易发性,但喜马拉雅山区不同级别判别阈值较加拿大哥伦比亚省西南地区偏大。本文研究的冰碛湖溃决易发性的评价模型不是一个区域的简单统计模型,而是从冰碛湖溃决机理出发的控制变量统计模型,可以为其他区域的冰碛湖溃决易发性评价提供参考。

References

- Allen, S.K., Zhang, G.Q., Wang, W.C., et al., 2019. Potential-Dangerous Glacial Lakes across the Tibetan Plateau Revealed Using a Large-Scale Automated Assessment Approach. *Chinese Science Bulletin*, 64(7): 435–445.
- Chai, B., Tao, Y.Y., Du, J., et al., 2020. Hazard Assessment of Debris Flow Triggered by Outburst of Jialong Glacial Lake in Nyalam County, Tibet. *Earth Science*, 45(12): 4630–4639(in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.294>
- Chen, X.Q., Cui, P., Yang, Z., et al., 2006. Debris Flows of Chongdui Gully in Nyalam County, 2002: Cause and Control. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 28(5): 776–781(in Chinese with English abstract).
- Cheng, Z.L., Zhu, P.Y., Gong, Y.W., 2003. Typical Debris Flow Triggered by Ice-Lake Break. *Journal of Mountain Science*, 21(6): 716–720(in Chinese with English abstract).
- Clague, J.J., Evans, S.G., 1994. Formation and Failure of Natural Dams in the Canadian Cordillera. *Bulletin of the Geological Survey of Canada*, 464:35.
- Ding, Y.J., Liu, J.S., 1992. Glacier Lake Outburst Flood Disasters in China. *Annals of Glaciology*, 16: 180–184. <https://doi.org/10.1017/s0260305500005036>
- Emmer, A., Vilímek, V., 2013. Review Article: Lake and Breach Hazard Assessment for Moraine-Dammed Lakes: An Example from the Cordillera Blanca (Peru). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(6): 1551–1565. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-1551-2013>
- Gharamti, I.E., Dempsey, J.P., Polojärvi, A., et al., 2021. Fracture of Warm S2 Columnar Freshwater Ice: Size and Rate Effects. *Acta Materialia*, 202: 22–34. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.10.031>
- Gurung, D.R., Khanal, N.R., Bajracharya, S.R., et al., 2017. Lemthang Tsho Glacial Lake Outburst Flood (GLOF) in Bhutan: Cause and Impact. *Geoenvironmental Disasters*, 4: 17. <https://doi.org/10.1186/s40677-017-0080-2>
- Huggel, C., Haeberli, W., Kääb, A., et al., 2004. An Assessment Procedure for Glacial Hazards in the Swiss Alps. *Canadian Geotechnical Journal*, 41(6): 1068–1083. <https://doi.org/10.1139/t04-053>
- Huggel, C., Kääb, A., Haeberli, W., et al., 2002. Remote Sensing Based Assessment of Hazards from Glacier Lake Outbursts: A Case Study in the Swiss Alps. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(2): 316–330. <https://doi.org/10.1139/t01-099>
- Lamsal, D., Sawagaki, T., Watanabe, T., et al., 2016. Assessment of Glacial Lake Development and Prospects of Outburst Susceptibility: Chamlang South Glacier, Eastern Nepal Himalaya. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7(1): 403–423. <https://doi.org/10.1080/19475705.2014.931306>
- Le, M.H., Tang, C., Zhang, D.D., et al., 2014. Logistic Regression Model-Based Approach for Predicting the Hazard of Glacial Lake Outburst in Tibet. *Journal of Natural Disasters*, 23(5): 177–184(in Chinese with English abstract).
- Liu, H.K., Zhang, Y.X., 2005. *Geological Dictionary (I)*. Geological Publishing House, Beijing(in Chinese).
- Liu, J.J., Tang, C., Cheng, Z.L., et al., 2011. Impact of Temperature on Glacier-Lake Outbursts in Tibet. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 41(4): 1121–

- 1129(in Chinese with English abstract).
- Liu, J. K., Zhang, J. J., Gao, B., et al., 2019. An Overview of Glacial Lake Outburst Flood in Tibet, China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 41(6): 1335—1347(in Chinese with English abstract).
- Liu, M., 2020. Glacial Lake Outburst Flood/Debris Flow Disaster Mechanism and Hazards Assessment in Bhote Koshi Basin (Dissertation). Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu(in Chinese with English abstract).
- Liu, Y., 2016. Preliminary Study on the Glacial and Temperature Conditions of Terminal Moraine Dam Glacier Lake Outburst in Tibet (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu(in Chinese with English abstract).
- Lliboutry, L., Morales A.B., Pautre, A., et al., 1977. Glaciological Problems Set by the Control of Dangerous Lakes in Cordillera Blanca, Peru. I. Historical Failures of Morainic Dams, Their Causes and Prevention. *Journal of Glaciology*, 18(79): 239—254. <https://doi.org/10.3189/s002214300002133x>
- Lü, R.R., Tang, B.X., Li, D.J., 1999. Debris Flow and the Environment in Tibet. Chengdu University of Science and Technology Press, Chengdu(in Chinese).
- McKillop, R. J., Clague, J. J., 2007a. Statistical, Remote Sensing-Based Approach for Estimating the Probability of Catastrophic Drainage from Moraine-Dammed Lakes in Southwestern British Columbia. *Global and Planetary Change*, 56(1/2): 153—171. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.07.004>
- McKillop, R. J., Clague, J. J., 2007b. A Procedure for Making Objective Preliminary Assessments of Outburst Flood Hazard from Moraine-Dammed Lakes in Southwestern British Columbia. *Natural Hazards*, 41(1): 131—157. <https://doi.org/10.1007/s11069-006-9028-7>
- Mergili, M., Schneider, J.F., 2011. Regional-Scale Analysis of Lake Outburst Hazards in the Southwestern Pamir, Tajikistan, Based on Remote Sensing and GIS. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(5): 1447—1462. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-1447-2011>
- Nie, Y., Liu, Q., Wang, J.D., et al., 2018. An Inventory of Historical Glacial Lake Outburst Floods in the Himalayas Based on Remote Sensing Observations and Geomorphological Analysis. *Geomorphology*, 308: 91—106. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.02.002>
- Tang, M.G., Wang, L.N., Liu, X.X., et al., 2022. Distribution and Risk of Ice Avalanche Hazards in Tibetan Plateau. *Earth Science*, 47(6): 1917—1931(in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.1016/10.3799/dqkx.2021.074>
- Wang, F. W., Sassa, K., Wang, G. H., 2002. Mechanism of a Long-Runout Landslide Triggered by the August 1998 Heavy Rainfall in Fukushima Prefecture, Japan. *Engineering Geology*, 63(1—2): 169—185. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(01\)00080-1](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00080-1)
- Wang, S.J., Che, Y.J., Ma, X.G., 2020. Integrated Risk Assessment of Glacier Lake Outburst Flood (GLOF) Disaster over the Qinghai-Tibetan Plateau (QTP). *Landslides*, 17(12): 2849—2863. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01443-1>
- Wang, W.C., Yao, T.D., Gao, Y., et al., 2011. A First-Order Method to Identify Potentially Dangerous Glacial Lakes in a Region of the Southeastern Tibetan Plateau. *Mountain Research and Development*, 31(2): 122. <https://doi.org/10.1659/mrd-journal-d-10-00059.1>
- Wang, X., Liu, S.Y., Guo, W.Q., et al., 2009. Hazard Assessment of Moraine-Dammed Lake Outburst Floods in the Himalayas, China. *Acta Geographica Sinica*, 64(7): 782—790(in Chinese with English abstract).
- Wang, X., Liu, S., Ding, Y., et al., 2012. An Approach for Estimating the Breach Probabilities of Moraine-Dammed Lakes in the Chinese Himalayas Using Remote-Sensing Data. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12(10): 3109—3122. <https://doi.org/10.5194/nhess-12-3109-2012>
- Xu, D.M., Feng, Q.H., 1989. Dangerous Glacial Lake and Outburst Features in Xizang Himalayas. *Acta Geographica Sinica*, 44(3): 343—351, 385(in Chinese with English abstract).
- Yao, X.J., Liu, S.Y., Sun, M.P., et al., 2014. Study on the Glacial Lake Outburst Flood Events in Tibet since the 20th Century. *Journal of Natural Resources*, 29(8): 1377—1390(in Chinese with English abstract).
- Zhou, S. Z., Zhang, R. Y., Zhang, C., 1997. Meteorology and Climatology. Higher Education Press, Beijing(in Chinese).

附中文参考文献

- 柴波,陶阳阳,杜娟,等,2020.西藏聂拉木县嘉龙湖冰湖溃决型泥石流危险性评价.地球科学,45(12): 4630—4639.
- 陈晓清,崔鹏,杨忠,等,2006.聂拉木县冲堆普2002年泥石流成因分析及防治对策.冰川冻土,28(5): 776—781.

- 程尊兰,朱平一,宫怡文,2003.典型冰湖溃决型泥石流形成机制分析.山地学报,21(6): 716—720.
- 乐茂华,唐川,张丹丹,等,2014.基于逻辑回归法的西藏地区冰湖溃决危险性预测模型.自然灾害学报,23(5): 177—184.
- 刘海阔,张义勋,2005.地质大辞典(一),北京:地质出版社.
- 刘晶晶,唐川,程尊兰,等,2011.气温对西藏冰湖溃决事件的影响.吉林大学学报(地球科学版),41(4):1121—1129.
- 刘建康,张佳佳,高波,等,2019.我国西藏地区冰湖溃决灾害综述.冰川冻土,41(6): 1335—1347.
- 刘美,2020.流域冰湖溃决成灾机制与危险性评估(博士学位论文).成都:中国科学院大学,中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所.
- 刘秧,2016.西藏终碛堤冰湖溃决冰川、温度条件的初步研究(硕士学位论文).成都:成都理工大学.
- 吕儒仁,唐邦兴,李德基,1999.西藏泥石流与环境.成都:成都科技大学出版社.
- 汤明高,王李娜,刘昕昕,等,2022.青藏高原冰崩隐患发育分布规律及危险性.地球科学,47(6)1917—1931.
- 王欣,刘时银,郭万钦,等,2009.我国喜马拉雅山区冰碛湖溃决危险性评价.地理学报,64(7): 782—790.
- 徐道明,冯清华,1989.西藏喜马拉雅山区危险冰湖及其溃决特征.地理学报,44(3):343—351,385.
- 姚晓军,刘时银,孙美平,等,2014.20世纪以来西藏冰湖溃决灾害事件梳理.自然资源学报,29(8):1377—1390.
- 周淑贞,张如一,张超,1997.气象学与气候学.北京:高等教育出版社.