

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2023.05.006

青藏高原冰湖溃决灾害隐患识别、发育规律及危险性评价

汤明高^{1,2}, 陈浩文^{1,2}, 赵欢乐^{1,2}, 杨威³, 邓文锋^{1,2}

TANG Minggao^{1,2}, CHEN Haowen^{1,2}, ZHAO Huanle^{1,2}, YANG Wei³, DENG Wenfeng^{1,2}

1.地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 四川 成都 610059;

2.成都理工大学环境与土木工程学院, 四川 成都 610059;

3.中国科学院青藏高原研究所, 北京 100101

1.State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China;

2.College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China;

3.Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

摘要:青藏高原是全球冰湖溃决灾害发生最频繁的区域之一,冰湖溃决对人类及工程建设安全造成严重威胁。以2015—2018年 Landsat 8 OLI_TIRS 等遥感影像及数据为基础,对青藏高原40000余条冰川10 km范围内且面积大于900 m²的冰湖进行了遥感解译,分析了冰湖分布与发育特征,建立了冰湖溃决隐患的识别指标体系,利用突变级数法(CPM)对隐患点进行了危险性分级评价。结果表明:①青藏高原发育冰湖16481处,海拔分布在5000~5500 m之间的冰湖占总量的43.69%;面积集中在100~500 km²之间的占总量的47.40%;行政分布上主要分布在西藏自治区,有12664个,占总量的76.84%;流域上主要分布在雅鲁藏布江流域,有8321个,占总量的50.49%。②识别出冰湖灾害隐患点369个,其中低风险点126个,中危险点177个,高风险点66个。③冰湖溃决隐患点面积多为0.1~0.2 km²;海拔主要分布在5000~5500 m之间;与母冰川距离大多小于100 m;冰溃坝宽度一般小于300 m,背水坡坡度大多小于50°;冰湖溃决隐患点的母冰川冰舌端坡度分布在10°~20°之间;绝大多数冰湖溃决的方向朝向北方。

关键词:青藏高原;冰湖溃决洪水;遥感解译;发育规律;危险性评价

中图分类号:P627;P694 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2023)05-0730-13

Tang M G, Chen H W, Zhao H L, Yang W, Deng W F. Identification, development law and risk assessment of the hidden dangers of glacial lake outburst disasters on the Qinghai-Tibet Plateau. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(5): 730-742

Abstract: The Qinghai-Tibet Plateau is one of the most frequent glacial lake outburst floods (GLOFs) areas in the world. The GLOF poses a serious threat to the safety of human beings and engineering construction. Based on the remote sensing images and data of Landsat 8 OLI_TIRS from 2015 to 2018, this paper interprets the GLOFs where located within 10 km range of more than 40000 glaciers and its area is greater than 900 m². This paper analyzes the distribution and development characteristics of glacial lakes, establishes the identification index system of GLOFs, and evaluates the hidden danger points by the catastrophe progression method (CPM). The following results the shown. ① There are 16481 glacial lakes in Qinghai-Tibet Plateau, which are mainly distributed at 5000~5500 m above sea level, accounting for 43.69% of the total. The area is concentrated between 0.01~0.05 km², accounting for 47.40% of the total. In terms of administrative distribution, the Tibet Autonomous Region has the largest number of glacial lakes, 12664, accounting for

收稿日期:2021-04-01;修订日期:2022-01-08

资助项目:第二次青藏高原综合科学考察《冰川、积雪、冻土变化与影响及应对》(编号:2019QZKK0201)、国家自然科学基金专项项目(批准号:41941019)、地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室自主研究课题《全球气候变暖环境下青藏高原冰崩隐患时空预测研究》(编号:SKLGP2017Z005)

作者简介:汤明高(1978-),男,博士,教授,从事地质灾害机理、评价与预测研究。E-mail:tommyr2008@163.com

76.84% of the total. In terms of basin distribution, the Yarlung Zangbo River Basin has the largest number of glacial lakes, with 8321, accounting for 50.49% of the total. ②369 potential GLOFs were identified, including 126 low-risk points, 177 medium risk points and 66 high-risk points. ③The area of hidden danger of GLOFs is mostly $0.1 \sim 0.2 \text{ km}^2$. The altitude is mainly distributed between 5000 ~ 5500 m above sea level. The distance between the hidden danger point and the mother glacier is less than 100 m, and the width of the moraine dam is mostly less than 300 m. The backwater slope is mostly less than 50° , the slope of the ice tongue of the mother glacier is between 10° and 20° , and most of the GLOFs burst to the north direction.

Key words: Qinghai-Tibet Plateau; glacier lake outburst flood; interpretation of remote sensing; development law; risk assessment

冰湖是以现代冰川融水为主要补给源、在冰碛垄洼地内积水形成的天然水体(姚晓军等, 2017)。近几十年来, 气候变暖导致高原地区的冻土和冰川消融加剧, 冰碛坝稳定性下降, 冰湖溃决灾害频发(Beniston et al., 1997)。全球范围内, 阿尔卑斯山、安第斯山、加拿大洛基山, 以及中国的喜马拉雅山、喀喇昆仑山、天山是冰湖溃决灾害的频发区和重灾区(Huggel et al., 2002; 铁永波等, 2009)。冰湖溃决产生的洪水(GLOFs)(Bajracharya et al., 2009; 刘建康等, 2021)或突发性泥石流(吕儒仁等, 1986; Liu et al., 1988)对自然环境和生命财产造成严重威胁(Osti et al., 2009; 姚晓军等, 2014; 王雪冬等, 2022)。青藏高原冰湖溃决灾害频繁, 损失十分严重, 1954年西藏康马县桑旺错冰湖溃决导致下游约400人死亡, 2万多人受灾; 1981年聂拉木县章藏布冰湖因冰碛坝下死冰层开裂、融蚀, 冰碛坝管涌、沉陷溃决, 引发重大灾害(徐道明等, 1989); 1988年波密县光谢错冰湖因冰川前缘冰舌整体崩落滑入, 冰碛坝瞬间失稳溃决, 冲毁房屋51间, 造成5人死亡(吕儒仁等, 1999); 2016年聂拉木县章藏布次仁玛错右侧支沟冰湖溃决导致樟木口岸受淹, 并且冲毁下游尼泊尔Kodari和Tatopani镇的水电设施、公路、房屋等, 引起国际广泛关注(Cook et al., 2018)。

冰湖调查编目以遥感解译(杨宗佶等, 2021)为主, 张国庆(2018)以中国第二次冰川编目数据、云量覆盖度低于10%的Landsat OLI等数据为基础, 利用ArcGIS、ENVI等地理信息软件, 对以青藏高原为核心的西部地区, 人工目视解译了距离冰川边界向外10 km缓冲区内的冰湖。杨成德等(2019)以159景Landsat 8 OLI遥感影像为基础, 结合中国第二次冰川编目数据与Google Earth中的影像数据等, 通过人工目视解译获取冰湖边界, 首次完成了基于统一规范的中国冰湖编目数据库建设。

关于冰湖溃决危险性评价研究, 早期主要是依靠专家考察对比分析评价, 专家经验成分占主导。

随着卫星遥感技术(RS)及地理信息系统(GIS)的发展, 评价指标逐步从定性指标转为了定量指标。在多学科理论应用的背景下, 不少冰湖溃决预测模型被提出, 较普遍的有层次分析法(黄静莉等, 2005)、模糊物元法(柳金峰等, 2012)、逻辑回归法(McKillop et al., 2007)等。此外, 还有结合多种数理方法而衍生出的新评价方法, 如支持向量机(SVM)(庄树裕, 2010)、人工神经网络(ANN)及BP算法(舒有锋, 2011)、突变级数法(CPM)、预分类方法(张力, 2012)等。其中突变级数法相对于其他评价方法, 优势在于可以避开对评价指标权重的确定, 只需确定评价指标的相对重要性, 从而降低人为主观性在评价过程中的影响, 被广泛应用于相关评价工作。

本文基于多种遥感影像及数据, 利用ENVI、ArcGIS等地理信息软件, 通过人机交互方式系统调查了青藏高原范围内的冰湖数据; 建立了冰湖溃决隐患识别指标, 系统解译和识别了青藏高原区域的冰湖溃决隐患, 分析了其空间分布规律及发育特征; 采用突变级数法对冰湖溃决隐患点进行了危险性分级评价, 以期对青藏高原冰湖溃决灾害防控及重大工程建设提供技术支撑。

1 研究区概况

青藏高原是世界上海拔最高的高原, 平均海拔4000~5000 m, 众多山峰耸立于雪线之上、海拔高达6000~8000 m, 有“世界屋脊”和“地球第三极”之称。青藏高原范围数据采自张镱锂等(2002)发布于国家地球系统数据中心(<http://www.geo-data.cn>)的矢量数据。研究区范围: 北纬 $25^\circ 59' 37'' \sim 39^\circ 49' 33''$ 、东经 $73^\circ 29' 56'' \sim 104^\circ 40' 20''$, 总面积约2 542 298 km^2 , 涉及西藏自治区、新疆维吾尔自治区、四川省、青海省、云南省和甘肃省(图1)。

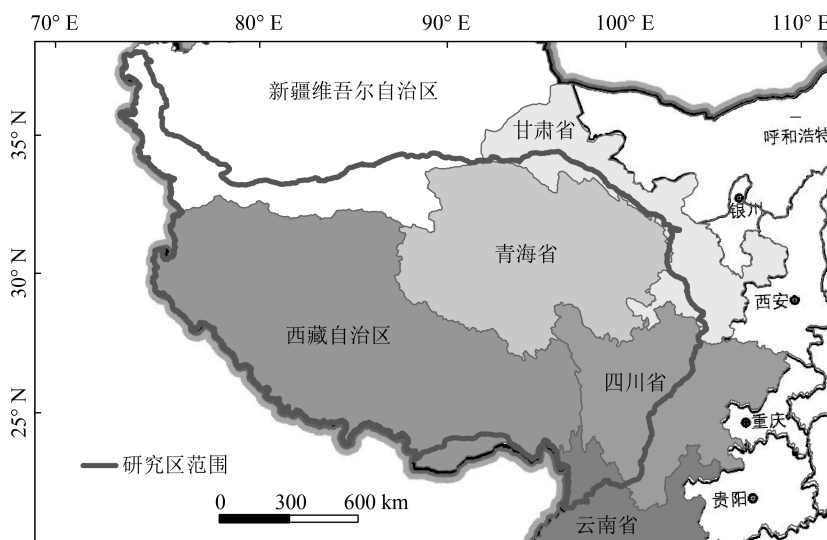


图1 研究区范围(底图据自然资源部网站,审图号:GS(2019)1823号)

Fig. 1 The range of study area

2 数据与方法

2.1 数据源

冰湖解译的数据源主要为 2015—2018 年青藏高原区域 Landsat 8 OLI_TIRS 遥感影像数据,重点区域为近 5 年的高分二号影像数据及 30 m 空间分辨率(1")的 SRTM1 数字高程模型(DEM)数据,参考了国家青藏高原科学数据中心的《中国西部冰湖编目数据》(王欣,2018;杨成德等,2018)和寒区旱区科学数据中心的《中国第二次冰川编目数据集(V1.0)》(郭万钦等,2014)。具体遥感影像数据时相如图 2 所示。

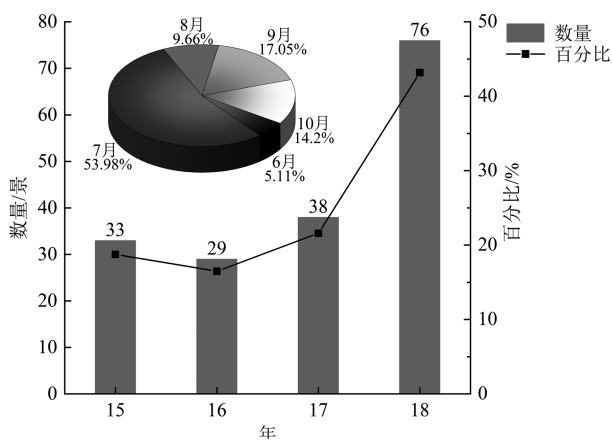


图2 Landsat 8 OLI 影像组成

Fig. 2 The composition of Landsat 8 OLI image

2.2 研究方法

2.2.1 解译方法

使用 ENVI 软件将影像数据组合处理成单张影像文件,并在 ArcGIS 软件中将其裁剪为仅包含研究区的影像文件。在此基础上利用水体指数法(NDWI)逐景提取冰湖边界,再利用 DEM 数据计算表面坡度和生成坡度模型,提取冰湖高程。最后结合《中国西部冰湖编目数据》进行对比分析,去重补足,并通过《中国第二次冰川编目数据集(V1.0)》录入冰湖所属冰川、流域等一系列信息,具体流程如图 3 所示。

2.2.2 隐患识别方法

用于识别冰湖溃决隐患的指标既要能够直观地反映冰湖溃决的可能性,也要考虑到人机交互解译遥感图像的局限性,使其能够在遥感影像上方便地提取出来。

已有研究表明,发生溃决的冰湖类型主要是冰川阻塞湖(冰坝湖)和冰碛阻塞湖(冰碛湖)两大类(邬光剑等,2019)。由于前者坝体介质为冰,通常较稳定(Clague et al., 2000),因此将冰碛阻塞湖(图 4)作为冰湖溃决隐患识别的首要指标。此外,笔者还将从以下 3 个方面来选取指标。

(1) 距母冰川距离

冰碛坝通常因漫顶和切割而发生溃决(Clague et al., 2000),冰碛湖与母冰川的距离能定量反映母冰川发生崩塌或滑坡坠入冰碛湖中的可能性,以及造成的冲击能量大小。刘春玲等(2016)指出,冰碛湖后缘与现代冰川冰舌距离一般在几百米内。吕儒仁等(1999)统计得到中国较详细资料记载已溃决冰碛湖中的“湖冰”距离均小于 500 m。因此将冰碛湖与母冰川距离小于 500 m 作为溃决隐患识别指标之一。

(2) 冰湖面积

只有当冰碛湖达到一定规模时才能在溃决之后造成危害。车涛等(2004)统计近 20 年来西藏朋曲流域潜在危险冰湖,其面积在 $1.8 \times 10^5 \sim 39 \times 10^5 \text{ m}^2$ 之间。崔鹏等(2003)调查发现中国 1935 年以来有数据的 11 个溃决冰碛湖中有 10 个冰湖的面积为

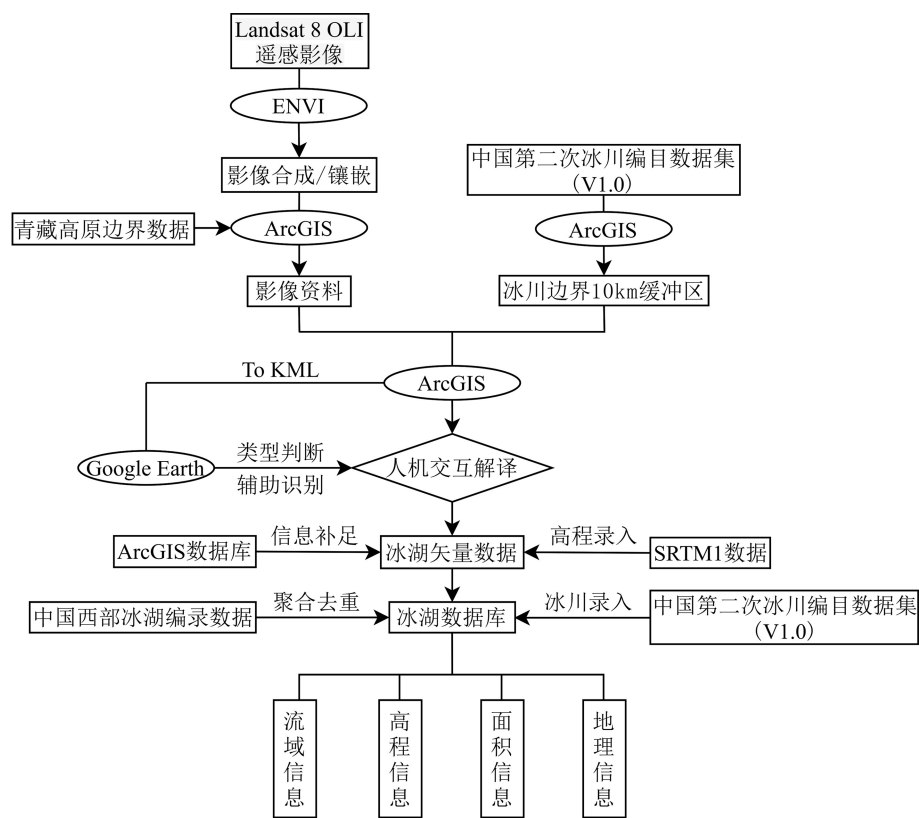


图 3 冰湖解译编录流程

Fig. 3 The process of glacier lake decoding and cataloging

$1.89\times10^5\sim6.3\times10^5\text{ m}^2$,认为达到 10^5 m^2 量级的冰碛湖是危险性冰碛湖。故将冰碛湖面积大于 10^5 m^2 作为溃决隐患识别指标之一。

(3) 变形迹象

冰碛坝作为冰碛湖的坝体,对冰碛湖的稳定起着至关重要的作用,其变形迹象能反映冰碛湖溃决的可能性。冰滑坡入湖后,冰碛坝上溢流口可能会被冲刷下切,导致局部堤段瞬时溃决(崔鹏等,2003)。因此在进行冰湖溃决隐患识别时,冰碛坝上是否有明显溢流口及坡体上是否有冲沟也作为识别指标之一。

通过以上分析,确定了中国青藏高原地区冰湖溃决隐患的识别指标体系,如表 1 所示。

2.2.3 隐患危险性评价方法

突变理论诞生于 1972 年,Rene Thom 在《结构稳定性与形态发生学》(雷内·托姆著,中国科学院译,1992)一书中对其进行了较详细的介绍,基本原理是利用势函数描述非线性现象,然后将此理论与观察资料联系起来,建立基于初等突变理论的突变模型,以建立的模型为标准,深入分析不

连续现象的内部机理,突变理论最大的功能是可以解释系统发生的突变跃迁现象,即使是对于未知系统产生的非连续现象也可以有效地分析解决。其中突变级数法(CPM)(桑博得著,凌复华译,1988;阿诺德著,周燕华译,1990)是基于突变、模糊数学理论的系统内部状态“跃变”评价方法,又被称为突变模糊隶属函数,核心思想在于对评价目标逐级分解,直到最下层指标可以被量化,以此进行多目标评价决策。该方法仅需确定指标的相对重要性,减小了人的主观性对评价结果的影响,且计算简易准确。

表 1 冰湖溃决隐患识别指标体系
Table 1 Identification index system of glacier lake outburst

指标	筛选标准
冰湖类型	冰碛阻塞湖
冰湖距母冰川距离	< 500 m
冰湖面积	> 10^5 m^2
冰碛坝变形迹象	存在明显溢流口及冲沟

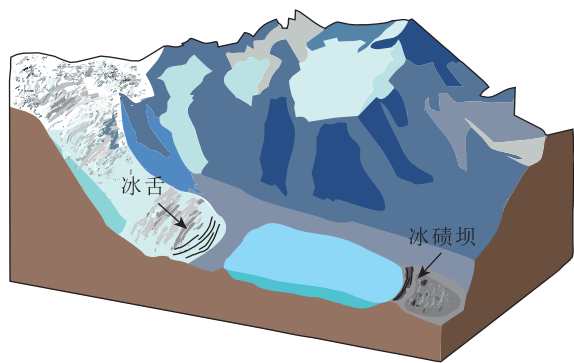


图4 冰碛阻塞湖

Fig. 4 Moraine-dammed lake

本文运用该方法的基本流程:首先建立评价总指标,再根据评价目的对评价总指标进行多层次矛盾分组,在确定系统内部状态“跃变”(状态变量)影响指标(控制变量)的基础上,依据一定分类方法对指标进行分类,由评价总指标逐渐分解到下层子指标,排列成倒立树状目标层次结构,即层次分解;其次由低层指标向高层指标逐层综合,把各层的控制变量代入相应的突变模型中进行归一

化计算,对于同一评价对象采取“舍大取小”原则或取平均值,得到各层次的突变级数(李思平等,2002),然后利用相应的突变数学模型(如折叠突变、尖点突变、蝴蝶突变模型等)计算得到归一化量值,即突变级数。最后参照危险性分级标准即可完成定级。

3 研究成果

3.1 冰湖分布与发育特征

通过人机交互解译得出青藏高原范围内大于 900 m^2 的冰湖共有 12614 个,利用《中国第二次冰川编目数据集(V1.0)》数据,筛选出位于冰川边界 10 km 范围的冰湖 5863 个,与《中国西部冰湖编目数据》中位于青藏高原的冰湖进行对比分析汇总,最终得到的冰湖总数为 16481 个(图 5),以此冰湖数据为基础进行分析识别评价。

3.1.1 冰湖空间分布

依据行政区划进行统计分析,西藏自治区冰湖的数量最多,有 12664 个,占青藏高原冰湖总数的 76.84%。冰湖数量依次为西藏自治区>青海省>四

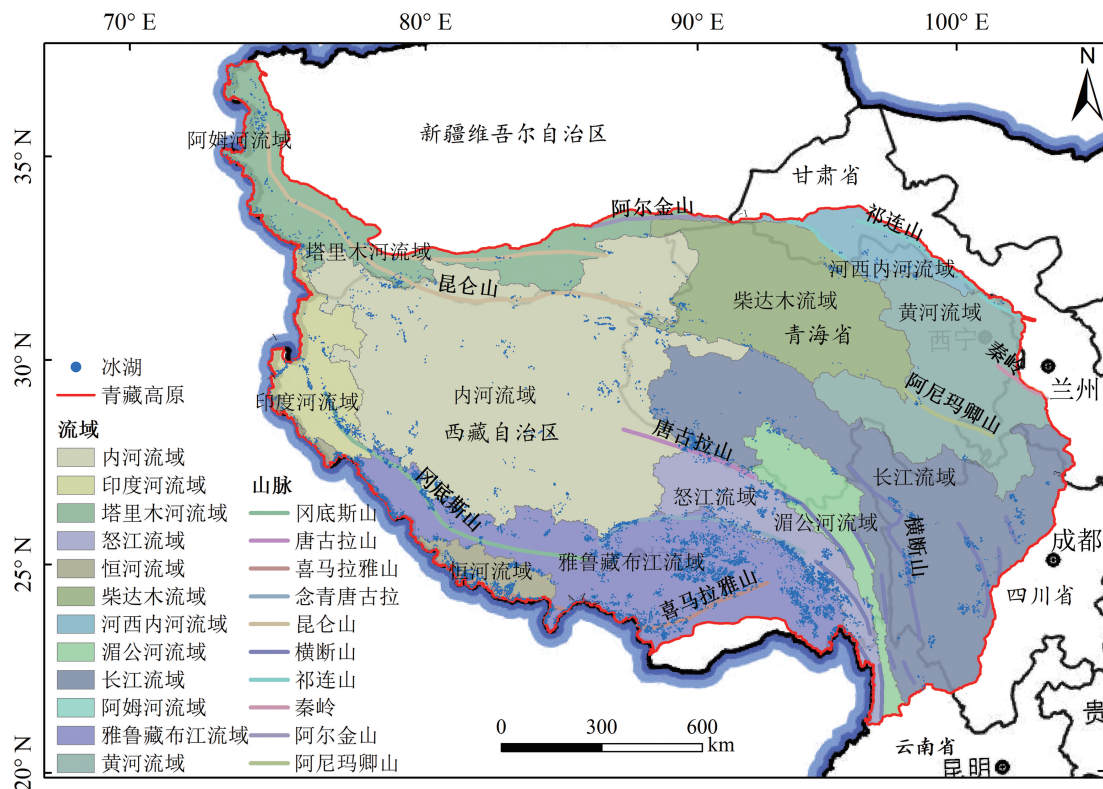


图5 青藏高原冰湖分布情况(底图据自然资源部网站,审图号:GS(2019)1823号)

Fig. 5 Distribution of glacial lakes on the Qinghai-Tibet Plateau

川省>新疆维吾尔自治区>甘肃省>云南省。

阿姆河流域、恒河流域、印度河流域、内河流域、塔里木河流域等 12 个流域流经青藏高原。通过流域统计可以看出(图 6),冰湖大部分位于雅鲁藏布江流域,数量达 8321 个,占比 50.49%,内河流域和长江流域也较多,冰湖数量都在 2000 个以上,这与冰湖主要分布在念青唐古拉山、喜马拉雅山、冈底斯山等区域有关。

3.1.2 冰湖发育特征

随着与母冰川距离的增加,冰湖的数量呈现逐渐减少的趋势。距离母冰川 2000 m 范围内的冰湖数量,占总数量的 50.13%。距离母冰川 0~500 m 范围的冰湖密度最大,占总数的 19.11%。距离母冰川大于 2000 m 后,冰湖数量随距离变化趋于稳定。可见距离母冰川越近,越容易获得冰川融水补给,越容易形成和发育冰湖(图 7)。

通过统计分析冰湖面积得知,青藏高原地区冰湖的面积多在 0.01~0.05 km² 之间,有 7812 个冰湖,占总数的 47.40%。不同面积的冰湖分布如图 8 所示。

通过将 SRTM1 数据与冰湖数据进行叠加,提取冰湖高程信息。统计分析可以看出,冰湖数量随高程呈现出先增加后减少的趋势,主要分布于海拔 5000~5500 m 之间,数量为 7201 个,占总数的 43.69%,而这一高程段主要为雪线附近,冰湖多分布于这个海拔区间,可能与附近冰川的生长和消融活动有关(图 9)。

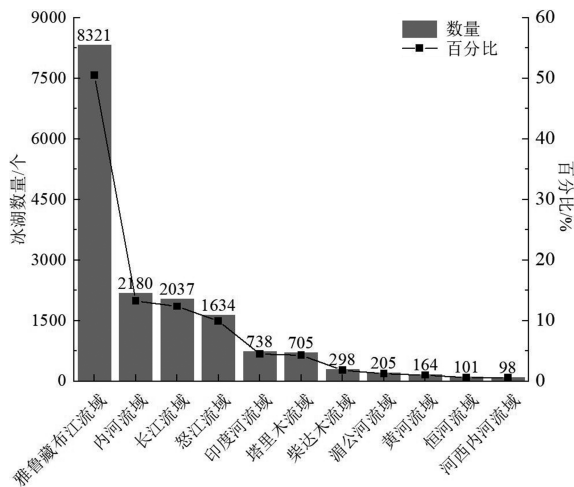


图 6 冰湖流域分布

Fig. 6 Drainage basin distribution of glacier lake

3.2 冰湖溃决隐患危险性评价

3.2.1 指标选取及分类

影响冰湖溃决危险性的指标众多,按位置关系可将其归为母冰川指标、冰湖指标及冰碛坝指标(裴希琛,2019)。依据前述统计的冰湖分布发育特征及文献成果,最终确定了 7 个既能反映危险性又能通过三维卫星影像、DEM 地形数据及 GIS 技术处理获取的指标,分别为冰舌与冰湖的距离、母冰川面积、冰舌段坡度、冰川积雪区平均坡度、冰碛坝宽度、冰碛坝背水坡坡度和冰湖面积(图 10)。各个指标描述及与冰湖溃决可能性的关系如表 2 所示。

基于突变级数法原理,将上述指标按位置关系分为三大类,即后缘冰川指标、冰碛坝指标、冰湖指标。通过分析冰湖溃决诱发条件和冰湖溃决模式,结合研究区冰湖特征及自然地理环境,参考相关文献(庄树裕,2010;朱海波,2016;裴希琛,2019;闫帅营,2020),依据相对重要性从前至后进行排序,每个指标自定义一个编号,便于后续统计。分层排序结果如图 11 示。

3.2.2 级数计算

将地理信息软件处理得到的冰湖溃决隐患点指标值,按如下步骤计算得到顶层级数,从而完成危险性定级。

(1) 指标分级

结合多位学者(徐道明等,1989;史志富等,2006;朱海波,2016;闫帅营,2020)总结的指标分级标准,将上述指标值分为 I、II、III 3 个级别(表 3),分别代表低、中、高 3 个危险度。

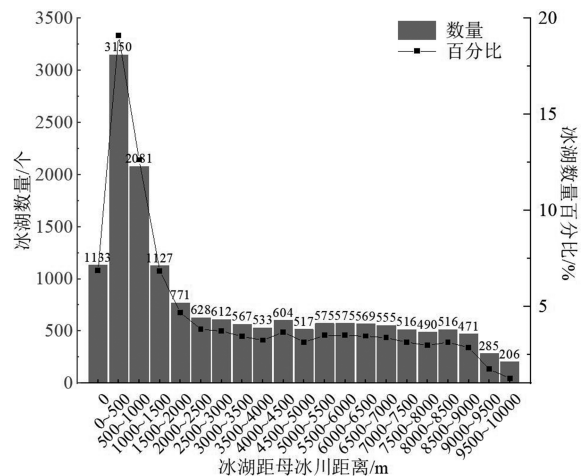


图 7 冰湖距母冰川距离

Fig. 7 Distance between glacier lake and mother glacier

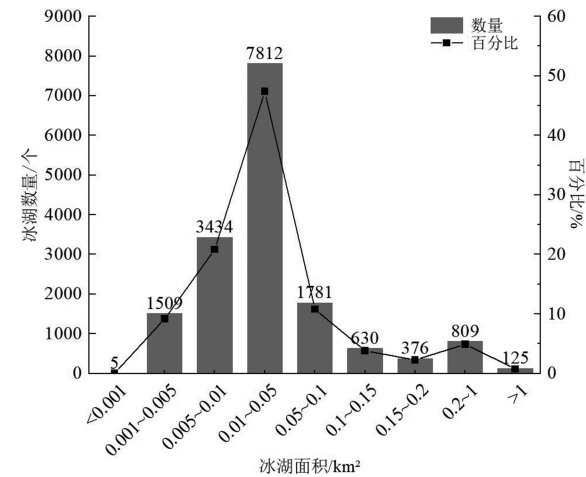


图 8 冰湖面积分布
Fig. 8 Distribution of glacier lake area

(2) 指标标准化
分别对单位不统一的最底层正向 (D2~D4、D6~D7)、负向 (D1、D5) 指标进行离差标准化处理。离差标准化公式 (公式 (1)) 里的最大值、最小值考虑表 3 中各指标分级之间的阈值。

$$y_i = \frac{x_i - \min_{1 \leq j \leq n} \{x_j\}}{\max_{1 \leq j \leq n} \{x_j\} - \min_{1 \leq j \leq n} \{x_j\}}$$

正向

$$y_i = \frac{\max_{1 \leq j \leq n} \{x_j\} - x_i}{\max_{1 \leq j \leq n} \{x_j\} - \min_{1 \leq j \leq n} \{x_j\}}$$

负向

$$\min_{1 \leq j \leq n} \{x_j\} \quad (1)$$

式中, y_i 为指标标准化值; x_i 为指标原始数据;

表 3 分级标准
Table 3 Grading standard

指标	I	II	III
D1/m	>300	50~300	<50
D2/km²	<2	2~10	>10
D3/°	<10	10~20	>20
D4/°	<15	15~30	>30
D5/m	>1000	100~1000	<100
D6/°	<25	25~33	>33
D7/km²	<0.1	0.1~0.2	>0.2

注: 指标含义见图 11

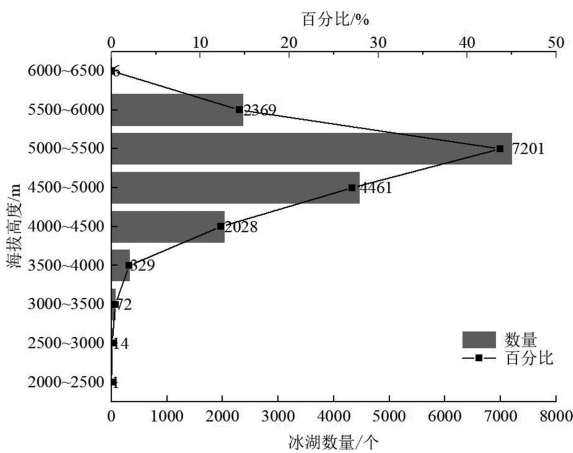


图 9 冰湖高程分布
Fig. 9 Elevation distribution of glacier lake

$\min_{1 \leq j \leq n} \{x_j\}$ 为包括指标分级阈值的单指标最小值;
 $\max_{1 \leq j \leq n} \{x_j\}$ 为包括指标分级阈值的单指标最大值。

(3) 顶层级数计算

将标准化后的指标代入相应归一化公式 (表 4) 中, 按照“大中取小”或取平均值原则 (史志富等, 2006), 由底至顶逐层计算突变级数, 利用最顶层突变级数进行冰湖溃决危险等级划分。本文中 Z1 及下属 4 个指标分支、Z2 及下属 2 个指标分支、Z3 及下属单个指标分支分别按蝴蝶突变模型、尖点突变模型、叠突变模型进行综合量化运算; E 的突变级数通过下属 3 个分类指标, 即 Z1-Z3 利用燕尾突变综合量化运算得到。

表 4 突变模型
Table 4 Catastrophic models

突变模型	势函数	归一化公式	分支图
折叠突变	$f(x) = x^3 + ux$	$x_u = u^{1/2}$	$\begin{array}{c} x \\ \\ u \end{array}$
尖点突变	$f(x) = x^4 + ux^2 + vx$	$x_u = v^{1/3}$ $x_v = u^{1/3}$	$\begin{array}{c} x \\ / \quad \backslash \\ u \quad v \end{array}$
燕尾突变	$f(x) = x^5 + ux^3 + vx^2 + wx$	$x_u = u^{1/2}$ $x_v = v^{1/3}$ $x_w = w^{1/4}$	$\begin{array}{c} x \\ / \quad \quad \backslash \\ u \quad v \quad w \end{array}$
蝴蝶突变	$f(x) = x^6 + ux^4 + vx^3 + wx^2 + tx$	$x_u = u^{1/2}$ $x_v = v^{1/3}$ $x_w = w^{1/4}$ $x_t = t^{1/5}$	$\begin{array}{c} x \\ / \quad \quad \backslash \quad / \quad \backslash \\ u \quad v \quad w \quad t \end{array}$

注: x 为状态变量; u, v, w, t 为控制变量

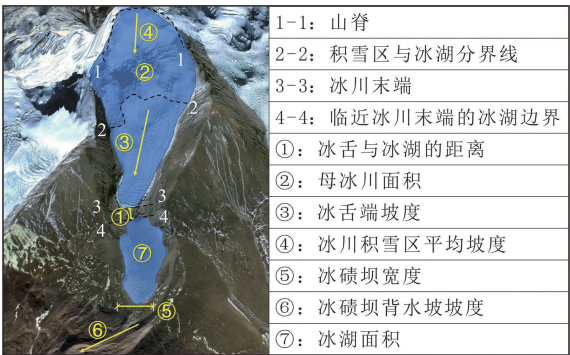


图 10 冰湖指标示意图

Fig. 10 Indicator diagram of glacier lake

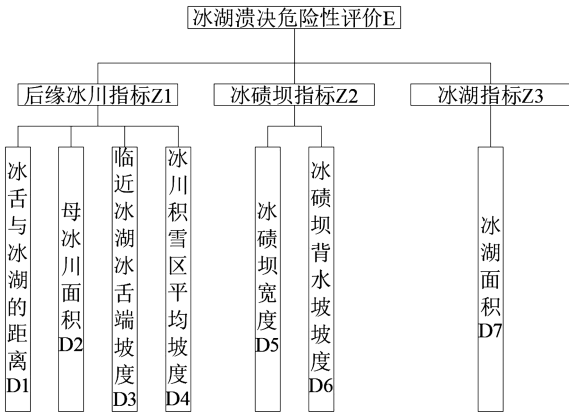


图 11 指标分层排序图

Fig. 11 Index hierarchical ranking chart

表 2 评价指标说明

Table 2 Indexes description

序号	名称	定义	类型	影响
①	冰舌与冰湖的距离	冰川末端与冰湖边界的最短距离	负向指标	距离越近,冰舌前端发生断裂时造成的破坏力越大,冰湖溃决风险越高
②	母冰川面积	冰湖的主要补给冰川面积	正向指标	面积越大,补给冰川的水流越多,最终汇集流至冰湖的水量越大,冰湖溃决风险越高
③	冰舌段坡度	临近冰湖冰舌段坡度	正向指标	坡度越大,冰舌越容易断裂坠入湖中产生冲击,冰湖溃决风险越高
④	冰川积雪区平均坡度	冰舌段后缘至山脊之间的平均坡度	正向指标	坡度越大,冰川越容易积累、释放能量,冰湖溃决风险越高
⑤	冰碛坝宽度	由于冰川移动在其末端形成的堤防状冰碛物宽度	负向指标	宽度越小,冰湖越容易发生溃决,冰湖溃决风险越高
⑥	冰碛坝背水坡坡度	冰碛物末端至坝顶区段的坡度	正向指标	坡度越大,冰碛坝的稳定性也就越差,冰湖溃决风险越高
⑦	冰湖面积	冰湖边界围成的区域面积	正向指标	面积越大,相应的冰湖库容量越大,冰湖溃决风险越高

3.2.3 识别与评价结果

首先根据表 1 冰湖溃决隐患识别指标体系,识别出 369 个冰碛阻塞湖溃决隐患点。

采用上述方法对识别筛选出的 369 个冰湖溃决隐患点进行危险性评估,得到低危险性冰湖 126 个,占总数的 34.15%;中危险性冰湖 177 个,占总数的 47.97%;高危险性的冰湖 66 个(表 5),占总数的 17.89%(图 12)。

(1)冰湖溃决隐患点的空间分布

行政:青藏高原冰湖溃决隐患点主要分布在西藏自治区,其他行政区划虽有分布,但数量均较少。在西藏自治区分布有 332 个冰湖溃决隐患点,占总数的 89.97%,其中中危险性冰湖数量最多,有 159 个,占总数的 47.89%。在下一级行政区域分布方面,冰湖溃决隐患点主要分布在日喀则市、林芝市、山南市、阿里地区、昌都市、那曲市及拉萨市(图 13-a、b)。

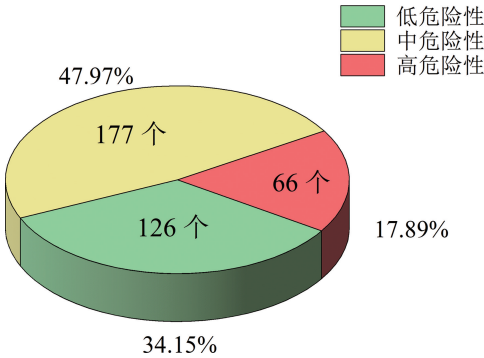


图 12 冰湖溃决隐患危险性等级划分

Fig. 12 Classification of risk of hidden danger points of glacier lakes

表 5 青藏高原高危险性冰湖基本信息
Table 5 Basic information of high risk glacier lakes in the Qinghai-Tibet Plateau

序号	经度 (E)	纬度 (N)	高程 /m	面积 /km ²	序号	经度 (E)	纬度 (N)	高程 /m	面积 /km ²
1	91°27'06"	28°2'11"	4742	0.52	34	94°43'56"	30°21'08"	4694	0.35
2	85°50'13"	28°19'17"	5075	5.09	35	94°26'37"	30°37'34"	4105	0.69
3	88°4'33"	27°56'46"	5495	1.42	36	94°19'24"	30°40'59"	4127	0.22
4	87°54'31"	27°57'05"	5171	0.67	37	94°50'32"	30°40'30"	4512	0.17
5	86°26'37"	27°56'44"	5052	2.23	38	94°59'25"	30°39'43"	4249	0.63
6	86°22'45"	28°23'33"	5492	0.97	39	94°36'12"	30°27'04"	3998	1.59
7	86°18'21"	28°22'29"	5352	3.69	40	95°54'19"	29°58'56"	4194	0.22
8	85°38'06"	28°29'45"	5284	4.65	41	96°23'28"	29°52'58"	4696	0.30
9	85°46'48"	28°26'31"	5584	0.51	42	90°4'09"	28°15'53"	5154	1.72
10	85°31'36"	28°36'58"	5115	1.02	43	89°53'15"	28°13'49"	4927	1.44
11	85°27'24"	28°34'05"	4502	0.24	44	89°59'36"	28°16'48"	5090	0.29
12	84°18'01"	28°55'43"	5439	0.20	45	90°11'07"	28°14'47"	5461	0.56
13	82°53'03"	29°45'44"	5121	0.40	46	96°48'23"	29°13'47"	4268	1.39
14	82°46'56"	29°50'23"	5064	2.89	47	96°30'07"	29°27'55"	3811	0.29
15	82°51'08"	29°47'46"	5164	0.49	48	96°48'56"	29°17'54"	3957	2.54
16	86°34'56"	28°11'57"	5101	1.34	49	94°43'33"	31°44'11"	4328	0.85
17	87°2'49"	28°4'05"	5589	0.80	50	94°38'44"	31°45'40"	4210	0.73
18	82°12'30"	30°15'18"	5057	1.16	51	94°45'34"	31°51'25"	4603	0.86
19	82°20'31"	30°4'42"	4849	0.84	52	94°41'16"	31°53'06"	4615	0.69
20	82°16'09"	30°6'12"	4877	1.82	53	90°7'22"	36°10'06"	5038	0.22
21	90°36'07"	28°3'34"	4867	0.38	54	89°12'32"	33°58'50"	5349	0.29
22	95°12'58"	30°39'37"	4682	0.57	55	90°59'55"	35°58'32"	4975	0.38
23	96°51'55"	29°10'17"	4451	0.19	56	89°19'01"	33°55'58"	5397	0.36
24	90°6'16"	28°14'10"	5324	5.46	57	91°2'45"	36°7'33"	5085	0.22
25	91°4'37"	28°21'03"	4794	0.92	58	91°0'27"	36°8'04"	5065	0.20
26	92°20'42"	27°49'52"	5038	0.22	59	96°13'27"	38°13'42"	4613	0.25
27	95°10'54"	30°36'06"	4289	1.11	60	97°15'47"	38°43'26"	4608	0.29
28	94°57'49"	30°38'48"	4345	0.94	61	96°10'51"	38°12'34"	4642	0.23
29	93°28'45"	30°17'15"	4572	0.17	62	96°16'40"	38°12'35"	4575	0.31
30	93°27'22"	30°16'01"	4092	0.73	63	80°34'26"	35°17'42"	5440	3.28
31	93°38'15"	30°14'29"	4187	1.05	64	80°22'19"	35°24'17"	5456	0.29
32	94°16'11"	30°5'53"	3905	0.63	65	81°25'28"	35°26'27"	5473	0.17
33	94°29'20"	30°39'18"	3921	4.79	66	91°12'41"	33°22'51"	5322	0.14

流域:冰湖溃决隐患点主要分布在雅鲁藏布江流域,数量为 258 个,占总数的 69.92%。该流域范围内不同危险等级的冰湖占各等级冰湖溃决隐患总量的

比例分别是:高危险性等级占比 66.67%,中危险等级占比 74.58%,低危险等级占比 64.08%(图 13-c)。

山脉:青藏高原地区包含 18 条主要山脉,喜马

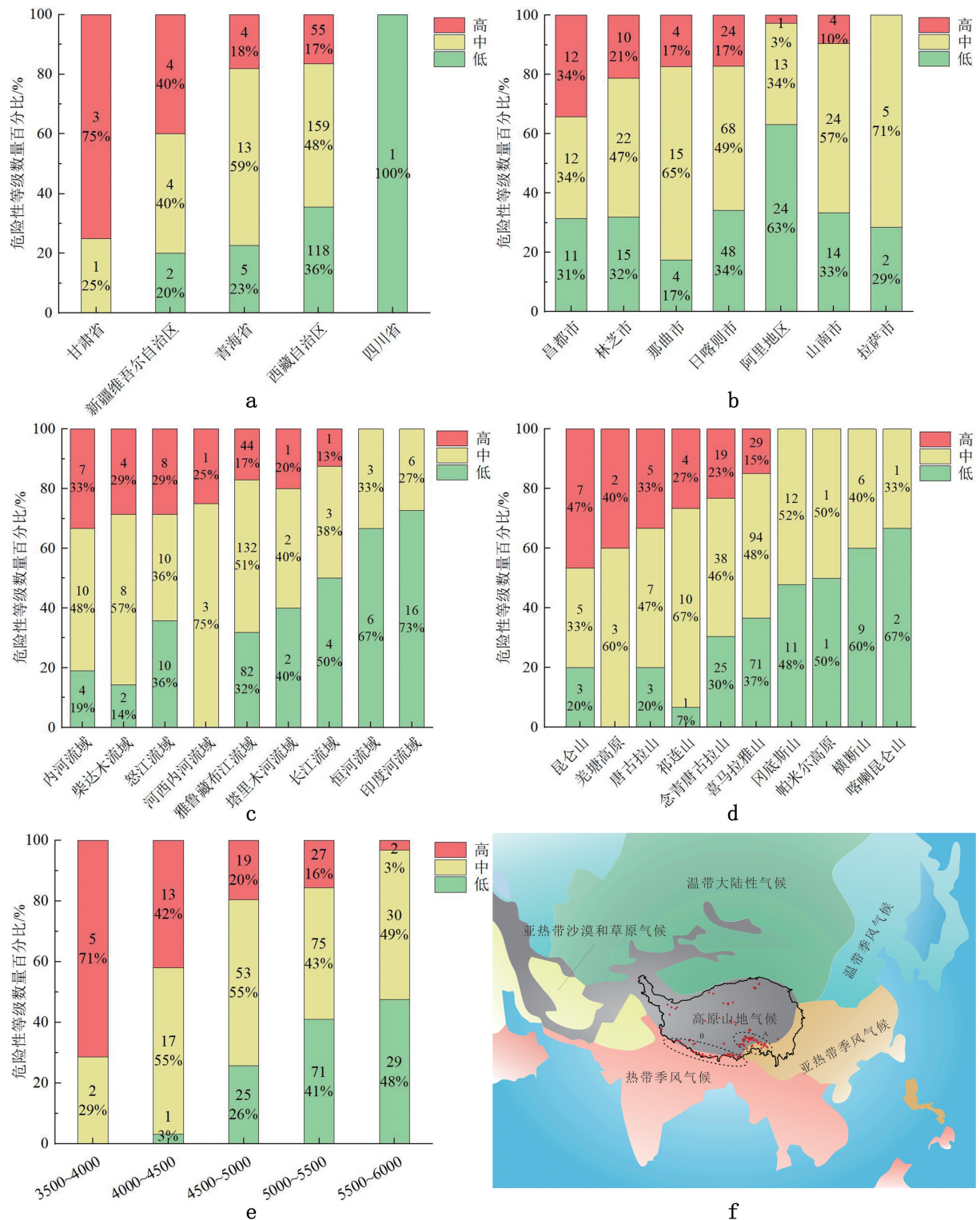


图 13 隐患点空间分布

Fig. 13 Regional distribution of hidden danger points

a—冰湖溃决隐患行政区划分布(省);b—冰湖溃决隐患行政区划分布(西藏自治区);

c—冰湖溃决隐患流域分布;d—冰湖溃决隐患山脉分布;e—冰湖溃决隐患海拔分布;f—冰湖溃决隐患气候分布

拉雅山脉的冰湖溃决隐患点数量最多,共 194 处,高、中危险性冰湖隐患点较集中;其次为念青唐古拉山脉,共 82 处;上述两者占全区隐患点总数的 74.80%。之后为冈底斯山,发育冰湖溃决隐患点 23 处,占总数的 6.23%;祁连山、昆仑山、唐古拉山、横断山均发育冰湖溃决隐患点 15 处,各自占比 4.07%;而羌塘高原、喀喇昆仑山及帕米尔高原总共仅发育 10 处冰湖溃决,占隐患点总数的 2.71% (图 13-d)。

海拔:冰湖溃决隐患点数量随高程呈现先增加后减少的趋势。主要分布在海拔 5000~5500 m 之间,占总数的 46.88%。高危险性冰湖有 27 处,占其分类总数的 40.91%;中危险冰湖有 75 处,占其分类总数的 42.37%;低危险冰湖有 71 处,占其分类总数的 56.35% (图 13-e)。

气候区:从地理分布可以看出,冰湖溃决隐患点多分布在青藏高原南部。具体看,首先亚欧板块与印度洋板块的挤压带,强烈的构造运动使得这个地区的山体不断抬升,海拔高、冰川分布多,为冰湖溃决隐患的形成提供了地形地貌条件;其次由于位于高原山地气候与热带、亚热带季风气候的交汇处,气候多变使冰川积累和消融速度加剧,为冰湖溃决隐患发育提供了水源条件 (图 13-f)。

(2) 冰湖溃决隐患发育特征

面积:冰湖溃决隐患点面积多位于 0.1~0.2 km²之间,有 157 处,占总数的 42.55%,但是绝大多数为中低危险性;位于 0.2~0.3 km²之间的冰湖溃决隐患有 78 处,占总数的 21.14%;面积大于 0.3 km²的冰湖溃决隐患较少,但是危险性高的占比却较大 (图 14-a)。

距母冰川距离:绝大部分冰湖溃决隐患距母冰川距离都小于 100 m,有 243 个,占到冰湖溃决隐患点总数的 65.85%,距离大于 100 m 之后的冰湖溃决隐患点逐渐减少 (图 14-b)。

冰碛坝指标:冰湖溃决隐患点冰碛坝背水坡坡度多小于 50°,有 321 个,占总数的 86.99%;冰碛坝坝顶宽度多小于 300 m,有 310 个,占总数的 84.01% (图 14-c)。

冰舌端坡度:母冰川冰舌端坡度主要分布在 10°~20°之间,有 160 处,占总量的 43.36%。其

中高危险性冰湖母冰川冰舌端坡度较缓,主要分布在 0°~20°之间;中危险性冰湖的母冰川冰舌端坡度则相对稍陡,集中在 10°~20°之间;低危险性冰湖冰舌段坡度则在 10°~30°之间均有分布 (图 14-d)。

溃决朝向:冰湖溃决方向与冰川流动方向、沟谷下游朝向有关,因此这里的溃决朝向指的是冰湖溃决隐患点冰碛坝背水坡朝向。统计显示,冰湖溃决朝向主要分布在朝北方向。朝向 0°~90°的有 134 个隐患点,90°~180°的有 49 个隐患点,180°~270°的有 54 个隐患点,270°~360°的有 132 个隐患点 (图 14-e、f)。

4 结 论

(1) 以 Landsat 8 OLI、高分二号遥感影像等数据为基础,人机交互解译出青藏高原冰川 10 km 范围内面积大于 900 m²的冰湖 16481 个。空间分布西藏自治区、雅鲁藏布江流域占比最多,发育特征方面主要分布在距离母冰川 2000 m 范围之内,面积主要在 0.01~0.05 km²之间,高程主要在海拔 5000~5500 m 之间。

(2) 通过建立冰湖溃决隐患识别指标体系,识别出 369 个具有溃决可能的冰湖隐患点。采用突变级数法 (CPM) 评价得到:低危险性的冰湖溃决隐患点 126 个,中危险性的 177 个,高危险性的 66 个。

(3) 冰湖溃决隐患点多位于高原山地气候与热带、亚热带季风气候的交汇处。冰碛坝宽度多小于 300 m,背水坡坡度多小于 50°。高危险性冰湖溃决隐患点的母冰川冰舌端坡度分布在 10°~20°之间,绝大多数冰湖溃决朝向为北向。

(4) 现阶段的评估结果初步显现了冰湖溃决隐患点分布,圈定靶区。后续可结合冰川融水径流,河道水文观测数据、下游人口暴露度评估冰湖溃决灾害链动态风险,利于在筹、在建重大工程项目的决策、实施。

致谢:衷心感谢“国家地球系统科学数据中心” (<http://www.geodata.cn>)、“寒区旱区科学数据中心” (<http://data.casnw.net>)、“国家青藏高原科学数据中心” (<http://data.tpdac.ac.cn>)、“美国地质勘探局 (USGS)” (<http://earthexplorer.usgs.gov/>) 等科技基

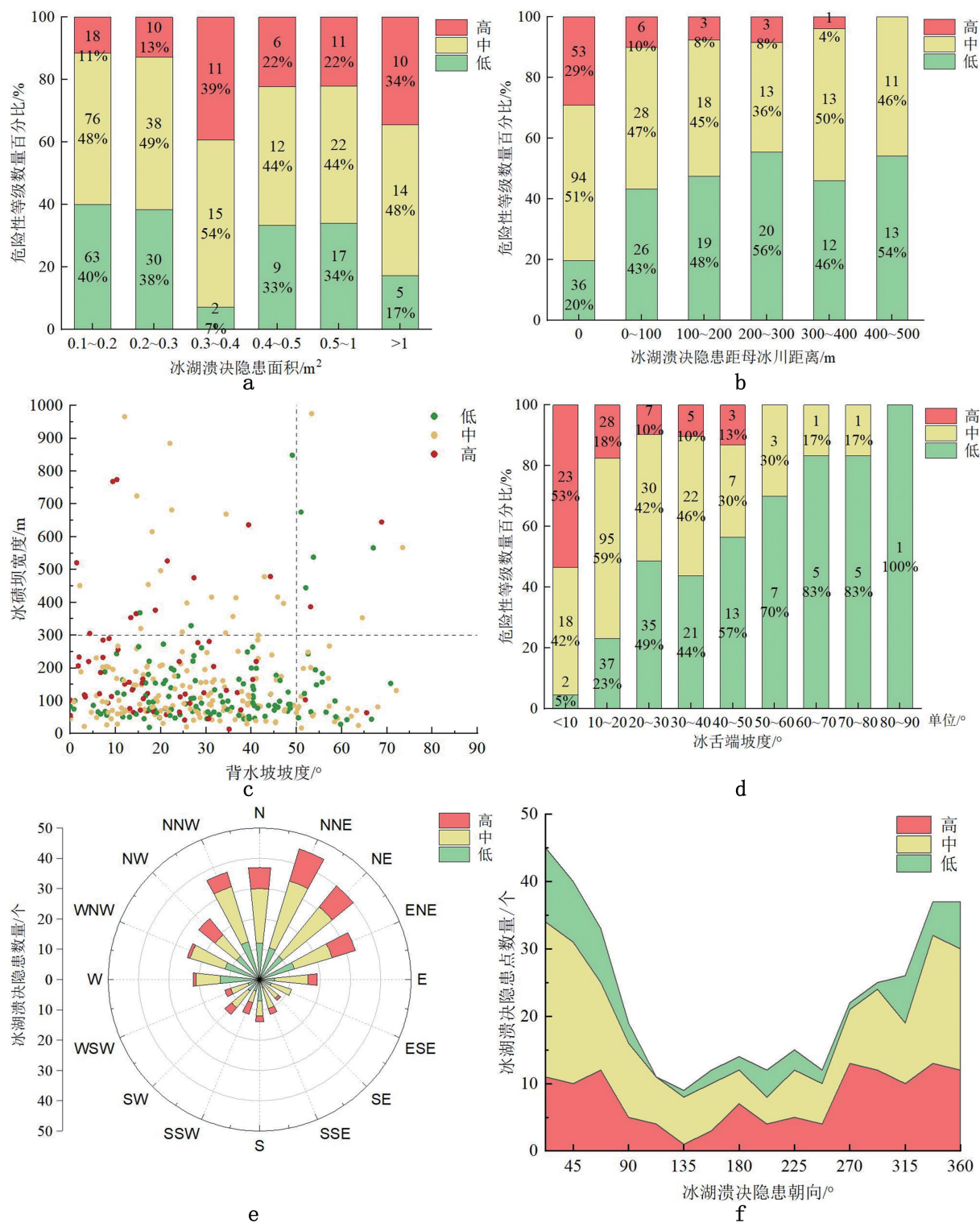


图 14 隐患点发育特征

Fig. 14 Development characteristics of hidden danger points

a—冰湖溃决隐患面积分布; b—冰湖至冰舌距离; c—冰碛坝指标; d—母冰川冰舌端坡度; e—冰湖溃决隐患朝向; f—冰湖溃决隐患朝向

础条件平台提供的数据支撑。

参考文献

- Bajracharya S R, Mool P. Glaciers, glacial lakes and glacial lake outburst floods in the Mount Everest region, Nepal [J]. *Annals of Glaciology*, 2009, 50(53): 81–86.
- Beniston M, Diaz H F, Bradley R S. Climatic change at high elevation sites: an overview [J]. *Climatic Change*, 1997, 36(3): 233–251.
- Clague J C, Evans S G. A review of catastrophic drainage of moraine-dammed lakes in British Columbia [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2000, 19(17/18): 1763–1783.
- Cook K L, Andermann C, Gimbert F, et al. Glacial lake outburst floods as drivers of fluvial erosion in the Himalaya [J]. *Science*, 2018, 362(6410): 53–57.
- Huggel C, Kääb A, Haeberli W, et al. Remote sensing based assessment of hazards from glacier lake outbursts: a case study in the Swiss Alps [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2002, 39(2): 316–330.
- Liu C H, Sharmal C K. Report on first expedition to glaciers and glacier lakes in the Pumqu(Arun) and Poiqu(Bhote-Sun Kosi) River Basins, Xizang(Tibet) [M]. Beijing: Science Press, 1988.
- McKillop R J, Clague J J. A procedure for making objective preliminary assessments of outburst flood hazard from moraine-dammed lakes in southwestern British Columbia [J]. *Natural Hazards*, 2007, 41: 131–157.
- Osti R, Egashira S. Hydrodynamic characteristics of the Tam Pokhariglacial lake outburst flood in the Mt. Everest region, Nepal [J]. *Hydrological Processes*, 2009, 23(20): 2943–2955.
- 阿诺德. 突变理论(周燕华译) [M]. 北京: 高等教育出版社, 1990.
- 车涛, 晋锐, 李新, 等. 近 20a 来西藏朋曲流域冰湖变化及潜在溃决冰湖分析 [J]. *冰川冻土*, 2004, 26(4): 397–402.
- 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(6): 621–628.
- 郭万钦, 许君利, 刘时银, 等. 中国第二次冰川编目数据集(版本 1.0) [DB/OL]. 兰州: 寒区旱区科学数据中心, 2014. doi: 10.3972/glacier.001.2013.
- 黄静莉, 王常明, 王钢城, 等. 模糊综合评判法在冰湖溃决危险度划分中的应用——以西藏自治区洛扎县为例 [J]. *地球与环境*, 2005, 33(S1): 109–114.
- 雷内·托姆. 结构稳定性与形态发生学(中国科学院译) [M]. 成都: 四川教育出版社, 1992.
- 李思平, 孙连英. 基于非线性理论的边坡稳定性评价模型 [J]. *水文地质工程地质*, 2002, (2): 11–14.
- 刘春玲, 童立强, 祁生文, 等. 喜马拉雅山地区冰川湖溃决灾害隐患遥感调查及影响因素分析 [J]. *国土资源遥感*, 2016, 28(3): 110–115.
- 刘建康, 周路旭, 李元灵, 等. 西藏波密丹卡弄巴冰湖发育特征与潜在风险 [J]. *地质通报*, 2021, 40(12): 2080–2088.
- 柳金峰, 程尊兰, 陈晓清. 帕隆藏布流域然乌—培龙段冰湖溃决危险性评估 [J]. *山地学报*, 2012, 30(3): 369–377.
- 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.
- 吕儒仁, 唐邦兴, 朱平一, 等. 西藏泥石流与环境 [M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1999.
- 裴希琛. 基于 GIS 的冰湖溃决灾害风险评估 [D]. 中国地质大学(北京) 硕士学位论文, 2019.
- 桑博得. 突变理论入门(凌复华译) [M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1988.
- 史志富, 张安, 刘海燕, 等. 基于突变理论与模糊集的复杂系统多准则决策 [J]. *系统工程与电子技术*, 2006, 28(7): 1010–1013.
- 舒有锋. 西藏喜马拉雅山地区冰碛湖溃决危险性评价及其演进数值模拟 [D]. 吉林大学硕士学位论文, 2011.
- 铁永波, 唐川. 冰湖溃决评价体系研究进展 [J]. *水科学进展*, 2009, 20(3): 448–452.
- 王欣. 中国西部冰湖编目数据(2015) [DB/OL]. 北京: 国家青藏高原科学数据中心, 2018. doi: 10.11922/sciencedb.615.
- 王雪冬, 张超彪, 王翠, 等. 基于 Logistic 回归与随机森林的和龙市地质灾害易发性评价 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2022, 52(6): 1957–1970.
- 邹光剑, 姚檀栋, 王伟财, 等. 青藏高原及周边地区的冰川灾害 [J]. *中国科学院院刊*, 2019, 34(11): 1285–1292.
- 徐道明, 冯清华. 西藏喜马拉雅山区危险冰湖及其溃决特征 [J]. *地理学报*, 1989, 44(3): 343–352.
- 闫帅营. 基于突变级数法的帕隆藏布冰湖溃决灾害危险性评价 [D]. 中国地质大学(北京) 硕士学位论文, 2020.
- 杨成德, 王欣, 魏俊峰, 等. 2015 年中国西部冰湖编目数据集 [DB/OL]. 北京: 中国科学数据, 2018. doi: 10.11922/csd.2018.0038.zh.
- 杨成德, 王欣, 魏俊峰, 等. 基于 3S 技术方法的冰湖编目 [J]. *地理学报*, 2019, 74(3): 544–556.
- 杨宗佑, 董悟凡, 柳金峰, 等. 川西藏东地区冰湖主要成因类型与分布规律 [J]. *地质通报*, 2021, 40(12): 2071–2079.
- 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.
- 姚晓军, 刘时银, 韩磊, 等. 冰湖的界定与分类体系——面向冰湖编目和冰湖灾害研究 [J]. *地理学报*, 2017, 72(7): 1173–1183.
- 张国庆. 青藏高原湖泊变化遥感监测及其对气候变化的响应研究进展 [J]. *地理科学进展*, 2018, 37(2): 214–223.
- 张力. 基于预分类方法的西藏聂拉木区域冰湖易溃性评估 [D]. 吉林大学硕士学位论文, 2012.
- 张德铨, 李炳元, 郑度. 论青藏高原范围与面积 [J]. *地理研究*, 2002, 21(1): 1–8.
- 朱海波. 冰碛湖泥石流灾害: 危险性评价与数值模拟 [D]. 吉林大学博士学位论文, 2016.
- 庄树裕. 西藏喜马拉雅山地区冰湖溃决非线性预测研究 [D]. 吉林大学博士学位论文, 2010.