

# 帕隆藏布流域然乌 - 培龙段冰湖溃决危险性评估

柳金峰<sup>1 2</sup> 程尊兰<sup>1 2</sup> 陈晓清<sup>1 2</sup>

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

2. 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)

**摘 要:** 西藏帕隆藏布流域内发育了我国境内最大的海洋性冰川群,冰湖星罗棋布,是遭受冰湖溃决危害的典型区域。以帕隆藏布流域然乌 - 培龙段的冰湖为研究对象,在分析其环境背景的原则上,通过遥感解译,分析研究区冰湖的分布现状;在基于指标容易获取的基础上,从冰川特征、冰湖特征和下游沟道特征 3 个类别选取了 8 个冰湖溃决危险性评估指标,并利用模糊物元可拓性理论对研究区的冰湖溃决危险性进行综合评估。通过评估,研究区 130 个冰湖中,高度危险的有 18 个,占总数的 13.85%;中度危险的有 36 个,占总数的 27.69%;低度危险的有 76 个,占总数的 58.46%;高度危险的冰湖主要集中分布在然乌 - 松宗区段内。

**关键词:** 帕隆藏布;然乌 - 培龙段;冰湖溃决;危险性

**中图分类号:** P642.23

**文献标识码:** A

冰湖一般指末次冰期冰川后退形成的最新湖泊,它主要分布在河源冰川作用范围附近地区。在世界上主要分布于低纬度山谷冰川区,以南美科迪勒拉山和我国喜马拉雅山、念青唐古拉山最为集中<sup>[1]</sup>。近 50 年来,我国喜马拉雅山区至少发生过 20 余次较大的冰湖溃决事件,造成了巨大的人员伤亡和财产损失<sup>[2]</sup>。如 1988 - 07 - 14,波密县川藏公路中坝路段米堆沟上游光谢错冰湖发生溃决,溃决洪水激发了大型泥石流,造成河道局部堵塞,水位上升超过 10 m,并沿河下泻,摧毁了路基 42 km,其中 21 km 全部被冲毁,中断交通 200 d。泥石流还冲毁了大小桥梁 18 座,民房 5 间,造成 5 人死亡,直接经济损失达亿元<sup>[3]</sup>。

从 1970 年代初起,中科院青藏高原综合考察队收集了喜马拉雅山区冰湖溃决历史资料,并讨论了危险性冰湖及其溃决原因<sup>[4]</sup>,由此展开了国内学者在此领域的研究工作。徐道明等通过对溃决冰湖的考察,总结出冰湖溃决的特征、主要因素和暴发周期等<sup>[5]</sup>;吕儒仁提出了判别冰碛湖溃决可能性的 7 个

指标,并分析出冰湖溃决与气候背景的关系等<sup>[6]</sup>;刘淑珍等依据冰湖类型、规模、后方现代冰川与冰湖的距离及冰湖离居民地、公路等设施的距离等,对西藏自治区洛扎县冰湖溃决危险度进行了评价<sup>[7]</sup>;黄静莉等选择海拔、冰湖面积、距现代冰川冰舌前端距离等 8 个因素作为冰湖溃决危险度划分的主要因素<sup>[8]</sup>;陈晓清等使用直接判别法和冰湖溃决危险性指数对喜马拉雅山中段波曲流域近期冰湖溃决进行了危险性评价<sup>[9]</sup>;郭国和等分析了典型冰湖的形态特征和影响冰湖溃决的主导因素,探讨了川藏公路南线典型冰湖溃决的危险性<sup>[10]</sup>。在国外,Richardson 等通过对喜马拉雅山区 26 个冰湖溃决的研究,提出 5 种导致冰湖溃决的激发因素以及所占的比例<sup>[11]</sup>;Huggie 等将冰湖特征、冰坝特征、外在诱发因素及流域地形地貌特征等指标融为一体,提出了包括 3 个主要指标及 18 个次级指标的冰湖溃决评价指标体系<sup>[12]</sup>;McKillop 等针对英国哥伦比亚省西南部地区分布的终碛湖,提出一套比较完善的冰湖危险性评估方案<sup>[13]</sup>。

收稿日期( Received date ): 2011 - 06 - 27; 改回日期( Accepted ): 2012 - 02 - 27。

基金项目( Foundation item ): 国家科技支撑计划课题( 2008BAB42B06 - 03 ) 和国家科技支撑计划课题( 2009BAK56B05 )。[Supported by the State Key Project of China ( 2008BAB42B06 - 03 and 2009BAK56B05 ) . ]

作者简介( Biography ): 柳金峰( 1979 - ) ,男,安徽泾县人,助理研究员,主要从事山地灾害实验与防治工程研究。[Liu Jinfeng ( 1979 - ) , male , research assistant , engaged in the experiment and mitigation research of mountain hazards. ] E - mail: liujf@imde. ac. cn

西藏帕隆藏布流域内发育了我国境内最大的海洋性冰川群,冰湖星罗棋布,是遭受冰湖溃决危害的典型区域。本文以帕隆藏布流域然乌-培龙段的冰湖为研究对象,在分析其环境背景的基础上,通过遥感解译,分析冰湖的分布现状;在基于指标容易获取的原则上,选取冰湖溃决危险性的评估指标,并利用模糊物元可拓性理论对冰湖溃决危险性进行综合评估。

## 1 研究区环境背景概况

### 1.1 流域概况

帕隆藏布流域位于西藏东南部,雅鲁藏布江大拐弯东北侧,在 $92^{\circ}53' \sim 97^{\circ}07'E$ 、 $29^{\circ}07' \sim 31^{\circ}03'$ 之间,是雅鲁藏布江最大的支流。帕隆藏布流域呈北西-南东向延伸的纺锤形(图1),发源于阿扎贡拉冰川北坡的冰舌末端。源头海拔4 900 m,汇入雅鲁藏布江处海拔1 540 m,流域面积28 630.9 km<sup>2</sup>。国道318线自流域东南的横断山脉西侧伯舒拉岭上的安久拉垭口(海拔4 668 m)进入,沿干流下行,再沿拉月曲翻色齐拉垭口(海拔4 556 m)出流域,全长296 km。行政上帕隆藏布流域属波密、嘉黎、边坝、林芝和八宿5县管辖。

帕隆藏布是西藏东南部顺构造线发育的线性河流。大支流多呈树枝和羽毛状,而干流多呈格子状(图1)。河谷上下游落差大。如干流然乌-通麦间高差>1 700 m,通麦-河口间落差500 m;易贡藏布嘉黎(气象站)和通麦落差近2 300 m。岭谷高差1

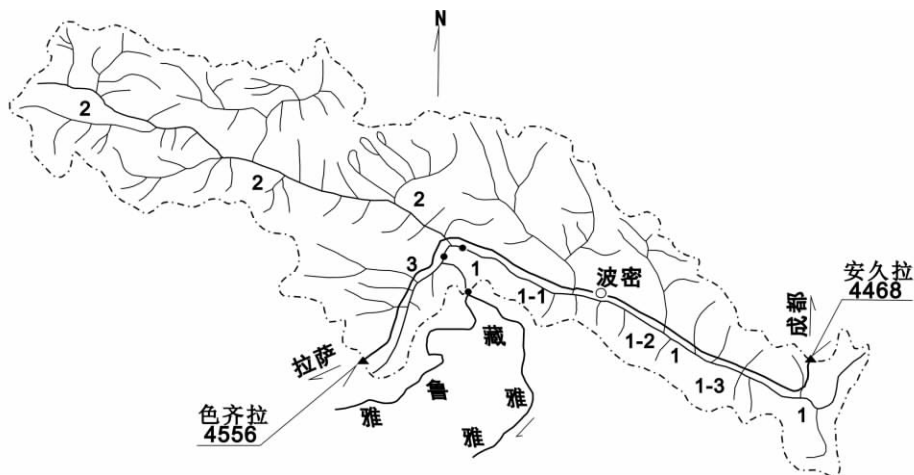
500~4 000 m。流域内多6 000 m以上高峰,最高峰是西南雅鲁藏布江左岸的加拉白垒峰(7 257 m),它和河口(1 540 m)间的高差达5 717 m<sup>[14]</sup>。

### 1.2 地形

帕隆藏布流域是青藏高原南部出口低处附近的一个流域。青藏高原西和西北部最先隆起成陆,挤压抬升,而东部和南部最后隆起成陆,挤压抬升,而东部和南部最后隆起成陆,但后来居上,抬升最快<sup>[15]</sup>。

帕隆藏布流域内,无论是干流,还是大支流,都呈宽狭相间,盆地众多的特点。干流自上游向下有然乌、松宗、卡达等3个盆地。右(北)岸波堆藏布内有育仁和倾多盆地。易贡藏布内有阿扎、易贡等盆地。拉月曲内有鲁朗、拉月盆地。盆地之间多由狭谷或宽谷联结。如然乌-松宗狭谷,波密-松宗宽谷,索通-通麦狭谷,通麦-排龙-河口狭谷等。宽谷内一般有2~3级河流阶地,I级阶地高出河水位3~15 m,II级则有60~80 m,阶面较宽,III级为高阶地,一般高地河水位300~350 m,沿河很少见到,多为侵蚀残留平地,如102台地,老培龙山台地等。波密县城位于宽谷I级河流阶地上<sup>[16]</sup>。

帕隆藏布流域不是均一抬升的地块,各地差异很大。前述狭谷地段就代表着强烈挤压隆升的地段,而宽谷和盆地,尤其后者代表着相对较弱的抬升地段。河谷阶地、台地和高谷肩的发育,表明了地块的隆升还是脉动式进行着的。中强地震多个频发地点的出现,表明了帕隆藏布流域确实是一个新构造运动的强烈活动区<sup>[17]</sup>。



1. 帕隆藏布干流 1-1. 波都藏布河段 1-2. 尤里藏布河段 1-3. 玉璞藏布河段; 2. 易贡藏布; 3. 拉月曲;

图1 帕隆藏布流域水系图

Fig. 1 The water system of the Palongzangbu region

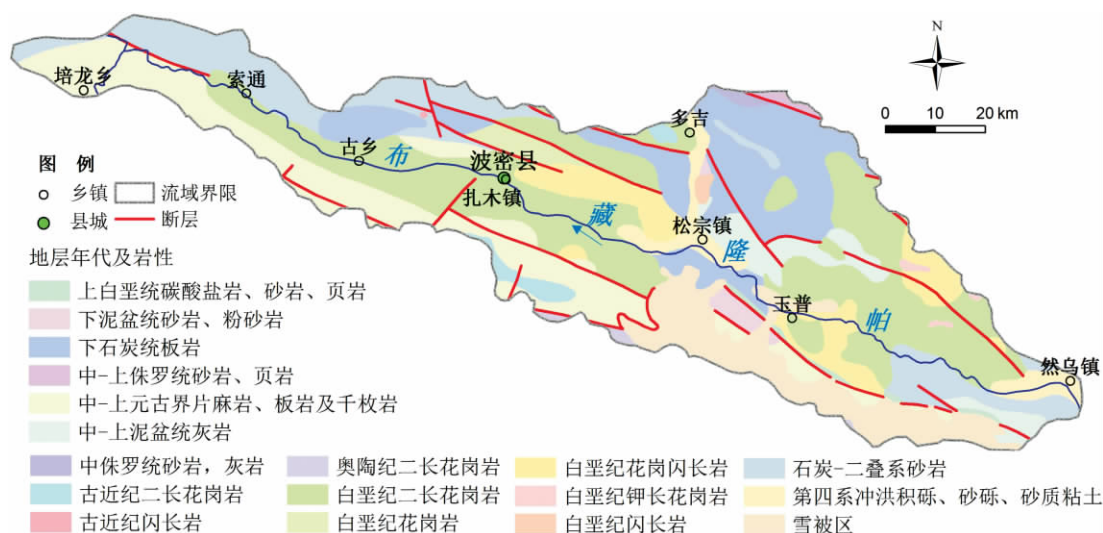


图2 帕隆藏布然充-培龙段区域地质简图

### 1.3 地质

帕隆藏布流域是一个地质构造上各种作用的交汇区。呈 SE - NW 向近于一条直线延伸的帕隆藏布干流和易贡藏布南岸的区域性大断层也是一条构造界线,其东北一侧,即念青唐古拉山东段属北冈底斯燕山期弧后盆地,生成时类似今日日本海、黄海和东海那样的环境;西南一侧(即冈底斯山东段和岗日嘎布)属冈底斯喜马拉雅期岛弧,是一条后来居上的岛弧式山脉。围绕着南迦巴瓦峰回转的雅鲁藏布江大拐弯地区是由印度板块分裂出来的高喜马拉雅基底推覆地体,由于它的伸进、强烈推挤作用,使岩层直立,节理发育,断层交切<sup>[6]</sup>。

研究区内最老的基岩地层是中-上元古界片麻岩、板岩及千枚岩,分布最广泛的为白垩纪的二长花岗岩,主要分布在帕隆藏布右岸。最新的沉积地层是第四系冲洪积砾、砂砾、砂质粘土(图2)。

#### 1.4 气候

研究区气候主要受控于青藏高原总的环流形势。气候上干湿季分明。冬季一般始于10月下旬,由高原西风环流南支控制,晴天多、干燥、日照时间长、太阳辐射较强。雨季始于5月下旬—6月初,来自印度洋孟加拉湾的暖湿气流使当地气候变得湿润多雨。波密—易贡一带成为雨季长、降水量最多的藏东南舌状多雨带<sup>[18]</sup>。

研究区内各温度指标变化较大,并且比高原同纬度地区偏高,包括气温和地温两个方面。根据波密县扎木镇气象站的资料,区内年平均气温  $8.9^{\circ}\text{C}$ ,

最冷月(12—1月)平均气温 $0.3^{\circ}\text{C}$ ,最热月(7月)平均气温 $16.6^{\circ}\text{C}$ (图3),年平均最高气温 $15.9^{\circ}\text{C}$ ,年平均最低气温 $3.5^{\circ}\text{C}$ ,月平均最高气温(8月)为 $23.5^{\circ}\text{C}$ ,月平均最低气温(1月、12月)同为 $-5.9^{\circ}\text{C}$ ,极端最高气温 $31.2^{\circ}\text{C}$ ,极端最低气温 $-20.3^{\circ}\text{C}$ <sup>[1]</sup>。

研究区的水分状况变化与热量条件变化相似,各地间变幅较大,差异显著,总的变化趋势是从南向北,从西向东水分状况变差。研究区降水年内分布不均匀,降水量月际变化为“三峰”型(扎木镇气象站资料)<sup>[19]</sup>,主雨峰在6月,降雨量高达162.0 mm,占全年的18.1%,年次降雨峰在4、9月,全年各月降雨几与6月为对称轴呈对称分布(见图3)。

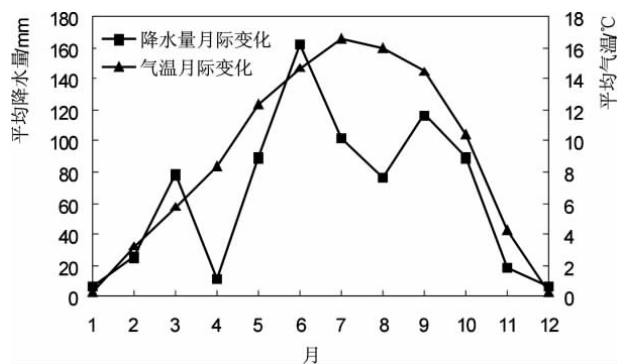


图3 降水量、气温月际变化曲线(扎木镇气象站资料)

近几十年来,全球气候变化总趋势表现为逐渐变干变暖,我国也不例外。通过对西藏北部地区上世

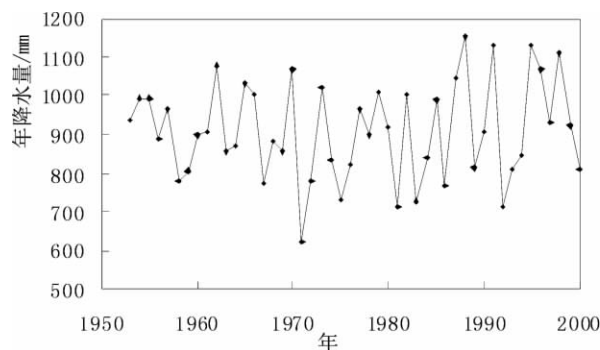


图4 研究区降水年变化曲线图

Fig. 4 The yearly change of rainfall

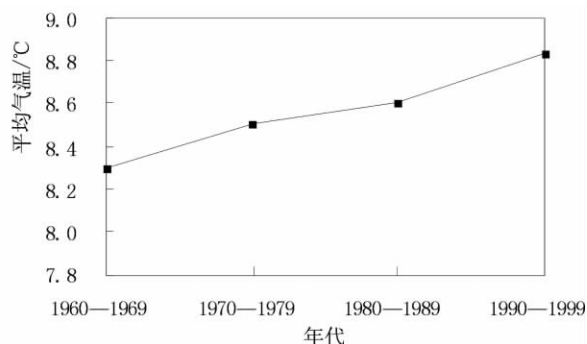


图5 研究区年平均气温变化曲线

Fig. 5 The mean annual temperature change

纪末期的气候趋势进行分析,总变化趋势与全球和全国其他区域一致。青藏高原是全球气候变化的敏感区和先兆区<sup>[20]</sup>。本文利用扎木镇气象站 1953—2000 年 48 a 的年降水资料(图 4)和 1960 年代、1970 年代、1980 年代、1990 年代,每 10 a 平均气温(图 5)对区域内的气候变化作趋势分析。

由图 4 和图 5 可以看出,研究区年平均降雨量变化趋势不明显,年平均气温在 1960—1999 年 40 a 间,每 10 a 间隔年平均气温呈上升趋势,幅度为 0.2~0.23℃。年均温的升高,特别夏季气温升高,造成冰川融化,河水上漲,或发生洪水,这是研究区内的特殊现象。即晴天河水水位有时较雨天河水水位高。1988 年米堆冰湖溃决,其触发因素之一为气温升高导致冰川融化加剧,增加了冰湖的蓄水量<sup>[17]</sup>。

## 2 冰湖分布

研究区冰湖成因类型分 2 大类,即冰川侵蚀湖和冰碛堰塞湖。冰川侵蚀湖主要是历史上冰川作用于基岩中或河槽内挖掘形成的。它又分为冰斗湖、冰川槽谷湖及冰蚀湖 3 种。这一类冰湖其出口多为基岩或有少量薄层冰碛。湖泊通常比较稳定,大多数为外流型冰湖。冰碛堰塞湖又分 2 种,即由终碛垄阻塞形成的终碛湖和在侧碛堤与山坡之间围成的侧碛湖<sup>[21-22]</sup>。

本文收集了帕隆藏布流域不同时相的 TM 卫星遥感影像,包括 1973-10(分辨率 79 m)、1988-10(分辨率 30 m)、1999-09(分辨率 30 m)、2005-05-08(分辨率 30 m),由于这些资料时相和分辨率的不同,因此,本文以 2005 年的影像资料为主要依据,其他时相的影像作为参考来判读研究区冰湖的个数和面积。对于冰湖的蓄水量,有野外考察资料的,按

平均水深进行计算( $V = D \times A$ ,  $V$  为蓄水量,  $D$  为平均水深,  $A$  为冰湖面积;没有平均水深资料的,按文献[23]中蓄水量和面积的经验公式( $V = 0.104A^{1.42}$ )进行计算。

通过判读,帕隆藏布然乌至培龙段共有冰湖 130 个,总面积 7.98 km<sup>2</sup>,总蓄水量  $138.54 \times 10^6$  m<sup>3</sup>。其中以终碛湖数量最多,为 57 个,占 43.85%;冰湖面积 5.10 km<sup>2</sup>,占 63.86%;蓄水量  $100.52 \times 10^6$  m<sup>3</sup>,占 72.56%。其次为冰斗湖,为 45 个,占 34.62%;冰湖面积 1.91 km<sup>2</sup>,占 23.92%;蓄水量  $25.63 \times 10^6$  m<sup>3</sup>,占 18.50%(表 1)。研究区内冰湖的分布也不均匀,帕隆藏布上游然乌至松宗段(图 6、图 7),分布有冰湖 101 个,占 77.7%;冰湖面积 6.71 km<sup>2</sup>,占 84.10%;蓄水量  $121.30 \times 10^6$  m<sup>3</sup>,占 87.56%,而且此段的冰湖多分布在干流的右侧。帕隆藏布上游松宗至培龙段,分布有冰湖 29 个,占 22.3%;冰湖面积 1.27 km<sup>2</sup>,占 15.90%;蓄水量  $17.24 \times 10^6$  m<sup>3</sup>,占 12.44%,此段的冰湖多分布在松宗至古乡段,集中分布在松宗至扎木段,古乡至培龙段没有冰湖分布(见图 6、图 7)。

## 3 冰湖溃决危险性综合评估

### 3.1 评估方法

本文采用模糊物元可拓性理论对研究区的冰湖溃决危险性进行综合评估。模糊物元模型是从定性和定量两个角度去研究解决问题的规律和方法,在许多领域得到了成功应用<sup>[24-25]</sup>。模糊物元模型通过引进物元,并对其进行变换和运算,从而从定性和定量两个角度去研究和解决不相容问题。可拓集合和关联函数是可拓学定量化工具,可拓方法的理论基础是物元理论和可拓集合理论<sup>[26-27]</sup>。

表1 研究区冰湖数量、面积、蓄水量统计

Table 1 The amount area water retention capacity of the glacier-lakes in the study area

| 区段    | 冰湖类型 | 数量  |    |       | 面积/km <sup>2</sup> |      |       | 蓄水量/(10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> ) |      |        |
|-------|------|-----|----|-------|--------------------|------|-------|---------------------------------------|------|--------|
|       |      | 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 | 冰川侵  | 冰斗湖 | 39 |       | 1.80               |      |       | 24.87                                 |      |        |
|       | 槽谷湖  | 8   |    |       | 0.49               |      |       | 7.78                                  |      |        |
|       | 蚀湖   | 冰蚀湖 | 4  | 101   | 77.7               | 0.06 | 6.71  | 84.10                                 | 0.38 | 121.30 |
|       | 冰碛阻  | 终碛湖 | 44 |       | 4.28               |      |       | 87.71                                 |      |        |
|       | 塞湖   | 侧碛湖 | 6  |       | 0.09               |      |       | 0.56                                  |      |        |
| 松宗至培龙 | 冰川侵  | 冰斗湖 | 6  |       | 0.11               |      |       | 0.76                                  |      |        |
|       | 蚀湖   | 冰蚀湖 | 9  | 29    | 22.3               | 0.24 | 1.27  | 15.90                                 | 2.46 | 17.24  |
|       | 冰碛阻  | 终碛湖 | 13 |       | 0.82               |      |       | 12.81                                 |      | 12.44  |
|       | 塞湖   | 侧碛湖 | 1  |       | 0.09               |      |       | 1.21                                  |      |        |

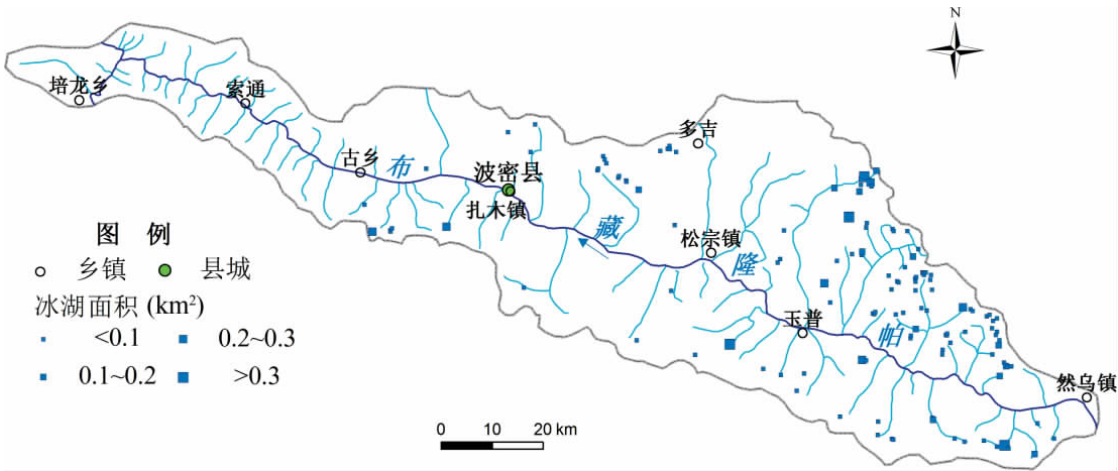


图6 研究区冰湖分布

Fig. 6 The distribution of the glacier-lakes in the study area

1. 物元分析

物元分析是用来处理在某些条件下,用通常的方法无法达到预期目标的不相容问题的规律的一种分析方法。在物元分析中,物元的表达形式为

$$R=(M,C,X) \tag{1}$$

式中  $R$ : 物元;  $M$ : 所描述的事物;  $C$ : 所描述的事物的特征;  $X$ : 量值。

2. 物元矩阵

如果一个事物  $M$  需要  $n$  个特征  $c_1, c_2, \cdots, c_n$  及其相应的量值  $x_1, x_2, \cdots, x_n$  来描述,则称  $M$  为  $n$  维物元,并可用物元矩阵来表示

$$R=\begin{bmatrix} M & c_1 & x_1 \\ & c_2 & x_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & x_n \end{bmatrix} \tag{2}$$

3. 节域对象物元矩阵

节域对象物元矩阵可表示为

$$R=\begin{bmatrix} M_p & c_1 & [a_{p1} & b_{p1}] \\ & c_2 & [a_{p2} & b_{p2}] \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & [a_{pn} & b_{pn}] \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中  $M_p$ : 由标准事物加上可转化为标准的事物组成的节域对象;  $x_{pi}$ : 节域对象关于特征  $c_i$  的量值范围  $x_{pi}=[a_{pi} & b_{pi}]$ 。

经典域对象物元矩阵可表示为

$$R=\begin{bmatrix} M_B & c_1 & [a_{B1} & b_{B1}] \\ & c_2 & [a_{B2} & b_{B2}] \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & [a_{Bn} & b_{Bn}] \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中  $M_B$ : 标准对象;  $x_{Bi} = [a_{Bi}, b_{Bi}]$  表示标准对象  $M_B$  关于特征  $c_i$  的量值范围。显然有  $x_{Bi} \subset x_{pi}$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )。

#### 4. 关联函数

在物元评价中, 关联函数使解决不相容问题的结果量化。若区间  $x_0 = [a, b]$ ,  $x_1 = [c, d]$ , 且  $x_0 \subset x_1$ , 则关联度为

$$k_j(x_i) = \begin{cases} -\frac{\rho(x_i, x_{ij})}{|x_{ij}|} & x_i \in x_{ij} \\ \frac{\rho(x_i, x_{ij})}{\rho(x_i, x_{pi}) - \rho(x_i, x_{ij})} & x_i \notin x_{ij} \end{cases} \quad (5)$$

式中  $x_{ij}$ : 为第  $i$  个评价指标的第  $j$  个评价类的取值区间;  $\rho(x_i, x_{ij})$ : 为  $x_i$  到第  $i$  个评价指标的第  $j$  个评价类取值区间端点的距离。

### 3.2 评估指标

影响冰湖溃决的因素有很多, 本文根据相关的文献资料, 在选取指标容易获取的原则上, 从上游冰川特征、冰湖特征和下游沟道特征 3 个方面进行评估指标的选取。

#### 1. 上游冰川特征

冰湖后方冰川的规模、冰川作用特征、冰舌段的纵比降、冰舌下段裂隙的发育程度等, 都是诱发冰湖溃决的重要因素。研究区发育的冰川属季风海洋性冰川。由于纬度低, 温度高, 加上降水丰沛, 冰川的积累与消融量都很大, 引起冰川的前进与后退的变化大; 另外, 因为该区域的冰川属温性冰川, 加之冰川运动摩擦使冰川底部的温度增高, 冰舌部分往往消融强烈, 大多数冰舌下段裂隙纵横, 冰内、冰面、冰下的水道发育, 同时, 冰舌段的坡度较大, 容易形成冰川崩滑。因此, 冰川的快速前进、跃动或崩滑堕入

冰湖, 产生巨大涌波, 容易致使终碛堤溃决, 这是冰碛湖溃决及形成溃决型泥石流的重要诱发因素<sup>[7]</sup>。因此, 本文选取现代冰川面积、冰舌与冰湖距离和冰川积雪区平均坡度 3 个易获取的指标来反映上游冰川的特征(表 2)。

#### 2. 冰湖特征

冰湖的类型、规模、海拔及稳定程度是评价冰湖溃决的重要指标。一般情况下, 终碛湖比冰斗湖溃决的可能性大, 因为终碛湖的湖堤为古冰川后退时形成终碛垄, 物质松散、稳定性差, 在外力作用下易产生溃坝。特别是新冰期和小冰期的冰碛物, 物质新, 胶结差, 稳定性低, 容易溃决。而冰斗湖是由冰川刨蚀作用形成的冰斗积水而成, 湖堤多为基岩, 稳定性较好, 只有在冰湖规模较大、水量较多, 后缘作用力较大时, 湖水翻过堤坝形成洪水或泥石流<sup>[7]</sup>。冰湖规模是决定灾害大小的重要因子, 冰湖规模越大, 溃决后的水量大, 其形成的灾害的规模和影响范围相应增大, 容易形成大的灾害<sup>[22]</sup>。因此, 本文选取冰湖蓄水量、类型和海拔 3 个容易获取的指标来反映冰湖的特征(见表 2)。

#### 3. 下游沟道特征

冰湖溃决最直接的灾害性结果就是溃决洪水和洪水形成的泥石流。冰湖溃决所导致的泥石流, 具有突发性强、频率低、洪峰高、流量大、流量过程暴涨暴落和破坏力强及灾害波及范围广等特点<sup>[9]</sup>。因此, 本文选取下游沟道纵比降和下游沟道松散物质丰富程度 2 个容易获取的指标来反映下游沟道的特征(表 2)。

综上, 本文从冰川特征、冰湖特征和下游沟道特征 3 个类别选取冰湖蓄水量( $x_1$ )、冰湖类型( $x_2$ )、海

表 2 冰湖溃决危险性评估指标分级

Table 2 The factor classification for the hazard assessment of Glacier-lake outburst

| 指标     |                                  | 冰湖溃决危险性    |               |        |
|--------|----------------------------------|------------|---------------|--------|
|        |                                  | 低          | 中             | 高      |
| 上游冰川特征 | 冰湖蓄水量 $x_1 / (10^6 \text{ m}^3)$ | <0.5       | 0.5 ~ 1       | >1     |
|        | 冰湖类型 $x_2$                       | 冰斗湖<br>冰蚀湖 | 槽谷湖<br>侧碛湖    | 终碛湖    |
|        | 海拔 $x_3 / \text{m}$              | <4 000     | 4 000 ~ 5 000 | >5 000 |
| 冰湖特征   | 现代冰川面积 $x_4 / \text{km}^2$       | <1         | 2 ~ 1         | >2     |
|        | 冰舌与冰湖距离 $x_5 / \text{m}$         | >1 000     | 500 ~ 1 000   | <500   |
|        | 冰川积雪区平均坡度 $x_6 / ^\circ$         | <5         | 5 ~ 7         | >7     |
| 下游沟道特征 | 下游沟道纵比降 $x_7 / \%$               | <150       | 150 ~ 250     | >250   |
|        | 下游沟道松散物质丰富程度 $x_8$               | 不丰富        | 中等丰富          | 丰富     |



拔( $x_3$ )、现代冰川面积( $x_4$ )、冰舌与冰湖距离( $x_5$ )、冰川积雪区平均坡度( $x_6$ )、下游沟道纵比降( $x_7$ )和下游沟道松散物质丰富程度( $x_8$ ) 8个指标来综合评估研究区冰湖溃决的危险性。由于各个指标的作用不同,需要确定各个因子的权重。本文采用层次分析法确定各个因子的权重,首先构造判断矩阵如下

$$y_1 = X_{ij} = \begin{bmatrix} & x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 & x_6 & x_7 & x_8 \\ x_1 & 1 & 2 & 2 & 3 & 3 & 4 & 4 & 5 \\ x_2 & 1/2 & 1 & 2 & 2 & 3 & 3 & 4 & 4 \\ x_3 & 1/2 & 1/2 & 1 & 2 & 2 & 3 & 3 & 4 \\ x_4 & 1/3 & 1/2 & 1/2 & 1 & 2 & 2 & 3 & 3 \\ x_5 & 1/3 & 1/3 & 1/2 & 1/2 & 1 & 2 & 2 & 3 \\ x_6 & 1/4 & 1/3 & 1/3 & 1/2 & 1/2 & 1 & 2 & 2 \\ x_7 & 1/4 & 1/4 & 1/3 & 1/3 & 1/2 & 1/2 & 1 & 2 \\ x_8 & 1/5 & 1/4 & 1/4 & 1/3 & 1/3 & 1/2 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

式中  $X_{ij}$  表示元素  $x_i$  对  $x_j$  的相对重要性的判断值。 $X_{ij}$  取值 1~9,如  $x_i$  比  $x_j$  更重要,  $X_{ij}$  的取值越小,元素  $x_i$  和  $x_j$  比较时为  $X_{ij}$ ,则  $x_j$  和  $x_i$  比较时为  $1/X_{ij}$ 。通过计算检验,各个判断因子的权重( $W_1$ )可确定如下

$$W_1 = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6 \ x_7 \ x_8] \\ = [0.255 \ 0.205 \ 0.116 \ 0.088 \ 0.184 \ 0.050 \ 0.065 \ 0.037]$$

### 3.3 评估结果

本文以帕隆藏布然乌-培龙段分布的 130 个冰湖为评价单元,根据上述评估指标,建立冰湖溃决危险性评估的标准物源模型如表 3。

根据上述建立的标准物源模型,利用 Matlab7.0 软件编程进行计算,对研究区的冰湖溃决的危险性进行评估。通过评估,研究区 130 个冰湖中,高度危险的有 18 个,占总数的 13.85%;中度危险的有 36 个,占总数的 27.69%;低度危险的有 76 个,占总数的 58.46%;从图 7 中可以看出,高度危险的冰湖主要位于然乌-松宗区段内,该区段内高度危险的冰湖有 16 个,占该区段冰湖总数的 15.84%。根据野外实地考察结果,帕隆藏布然乌-培龙段曾溃决过的冰湖,包括郭奶弄巴流域的康窄错、莫如弄巴流域的错下湖、多依弄巴的多依错和米堆弄巴光谢错都分布在然乌-松宗区段内。

表 3 冰湖溃决危险性评估的标准物元模型表

Table 3 Standard matter element model for assessing the hazard of the glacier-lake outburst

| 冰湖溃决危险性 | 低度危险                                                                                                                                                            | 中度危险                                                                                                                                                                                                       | 高度危险                                                                                                                                                         |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 标准物元模型  | $R = \begin{bmatrix} \text{低} & x_1 < 0.5 \\ & x_2 < 1.5 \\ & x_3 < 4000 \\ & x_4 < 1 \\ & x_5 > 1000 \\ & x_6 < 5 \\ & x_7 < 150 \\ & x_8 < 1.5 \end{bmatrix}$ | $R = \begin{bmatrix} \text{中} & 0.5 < x_1 < 1 \\ & 1.5 < x_2 < 3.5 \\ & 4000 < x_3 < 5000 \\ & 2 < x_4 < 1 \\ & 500 < x_5 < 1000 \\ & 5 < x_6 < 7 \\ & 150 < x_7 < 250 \\ & 1.5 < x_8 < 2.5 \end{bmatrix}$ | $R = \begin{bmatrix} \text{高} & x_1 > 1 \\ & x_2 > 3.5 \\ & x_3 > 5000 \\ & x_4 > 2 \\ & x_5 < 500 \\ & x_6 > 7 \\ & x_7 > 250 \\ & x_8 > 2.5 \end{bmatrix}$ |

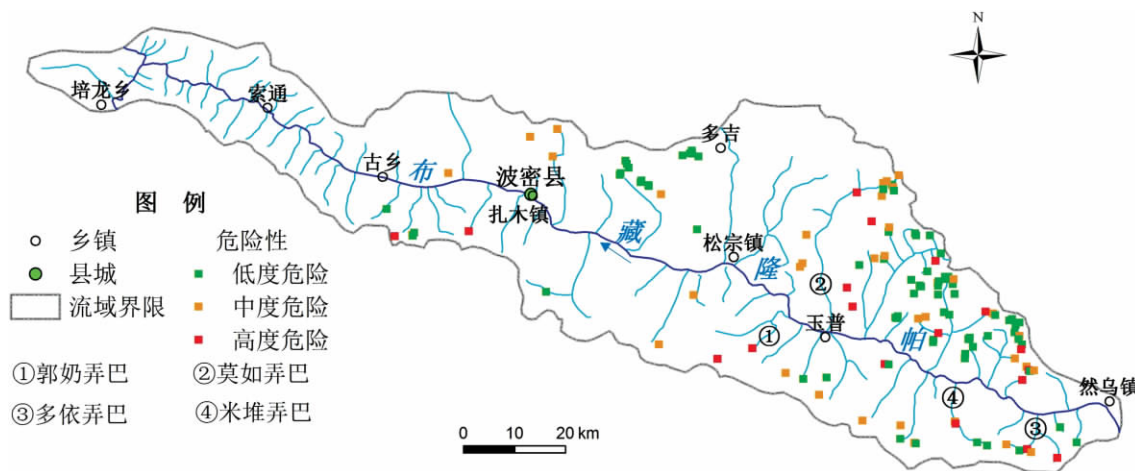


图 7 研究区冰湖溃决危险性评估结果

Fig. 7 The assessment result for the hazard of the glacier-lakes in the study area

## 4 结论

1. 帕隆藏布流域在 1960—1999 年 40 a 间年平均气温呈现上升趋势,幅度为  $0.2 \sim 0.23^{\circ}\text{C}$ 。因此,随着全球气候变暖和冰川退缩,冰湖溃决及由此引发的次生灾害将会对研究区经济社会的可持续发展产生很大的危害。

2. 研究区冰湖包括冰川侵蚀湖(冰斗湖、槽谷湖、冰蚀湖)和冰碛堰塞湖(终碛湖、侧碛湖)两种类型,通过卫星遥感影像判读,研究区共分布有冰湖 130 个,其中 43.85% 为终碛湖,34.62% 为冰斗湖,冰湖主要集中分布在然乌—松宗段流域内。

3. 在基于指标容易获取的原则上,从冰川特征、冰湖特征和下游沟道特征 3 个类别选取现代冰川面积、冰舌与冰湖距离、冰川积雪区平均坡度、冰湖蓄水量、冰湖类型、海拔、下游沟道纵比降和下游沟道松散物质丰富程度 8 个指标来综合评估研究区冰湖溃决的危险性。通过评估,研究区 130 个冰湖中,高度危险的冰湖有 18 个,占总数的 13.85%;中度危险的冰湖有 36 个,占总数的 27.69%;低度危险的冰湖有 76 个,占总数的 58.46%;高度危险的冰湖主要集中分布在然乌—松宗区段内。

## 参考文献(References)

- [1] Cheng Zunlan, Tian Jinchang, Zhang Zhengbo et al. Debris flow induced by glacial-lake break in Southeast Tibet [J]. *Earth Science Frontiers* 2009, 16(6): 207–214 [程尊兰, 田金昌, 张正波, 等. 藏东南冰湖溃决泥石流形成的气候因素与发展趋势 [J]. *地质前缘* 2009, 16(6): 207–214]
- [2] Liu Jiankang, Cheng Zunlan, Guo Fenfen et al. Analysis on Risk of Glacier-Lake Outburst in Southeastern Tibet [J]. *Journal of Catastrophology* 2011, 26(02): 45–49 [刘建康, 程尊兰, 郭芬芬, 等. 藏东南典型冰湖溃决危险性分析 [J]. *灾害学* 2011, 26(02): 45–49]
- [3] 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. [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]
- [4] Xu Daoming, Feng Qinghua. Study of ice debris flow and Glacier lake Outburst Disasters [J]. 1988, 10(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, 10(3): 284–289]
- [5] Xu Daoming, Feng Qinghua. Dangerous glacial lake and outburst features in XiZang Himalayas [J]. *Acta Geographical Sinica*, 1989, 44(3): 343–352 [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]
- [6] LÜ Ruren, Tang Bangxing, Zhu Pingyi. Debris flow and environment in Tibet [M]. Chengdu Technology 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]
- [7] Liu Shuzhen, Li Huixia, Yan yan et al. Assessment of bursting hazards of the ice lakes in Luozha County, Tibet [J]. *Journal of Mountain Science* 2003, 21(Suppl.): 128–132 [刘淑珍, 李辉霞, 鄢燕, 等. 西藏自治区洛扎县冰湖溃决危险度评价 [J]. *山地学报* 2003, 21(增刊): 128–132]
- [8] Huang Jingli, Wang Changming, Wang Gangcheng et al. Application of fuzzy comprehensive evaluation method in risk degree determination for glacier-lake outburst: An example of Luozha County in Tibet [J]. *Earth and Environment* 2005, 33(S1): 109–114 [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(增刊): 109–114]
- [9] Chen Xiaoqing, Cui Peng, Yang Zhong et al. Risk assessment of glacial lake outburst in the Poiqu River basin of Tibet Autonomous Region [J]. *Journal of glaciology and geocryology* 2007, 29(4): 509–516 [陈晓清, 崔鹏, 杨忠, 等. 喜马拉雅山中段波曲流域近期冰湖溃决危险性分析与评估 [J]. *冰川冻土* 2007, 29(4): 509–516]
- [10] Guo Guohe, Cheng Zunlan, Wu Guoxiong et al. Risk assessment of glacial-lake outburst along the south section of Sichuan-Tibet Highway [J]. *Research of Soil and Water Conservation* 2009, 16(02): 50–55 [郭国和, 程尊兰, 吴国雄, 等. 川藏公路南线典型冰湖及其溃决危险性评价 [J]. *水土保持研究* 2009, 16(02): 50–55]
- [11] Richardson S D, Reynolds J M. An overview of glacial hazards in the Himalayas [J]. *Quaternary International* 2000, 65(6): 31–47
- [12] Huggel C, Haeberli W. An assessment procedure for glacier hazards in Swiss Alps [J]. *Can Geotech* 2004, 41(6): 1068–1083
- [13] 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]. *Nat Hazards* 2007, 41: 131–157
- [14] Luo Defu, Feng Qinghua, Zhu Pingyi et al. The mountain hazards and prevention in the south line of Sichuan-Tibet Highway (in Tibetan) [M]. Beijing: Science Press, 1995: 120–135 [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: 120–135]
- [15] Jiang Zhongxin. Differential distribution regularity of collapse landslides and debris flows along Palong Zangbu River Valley in Tibet [J]. *Geographical Research* 2002, 21(4): 495–503 [蒋忠信. 西藏帕隆藏布河谷崩塌滑坡、泥石流的分布规律 [J]. *地理研究* 2002, 21(4): 495–503]
- [16] Liang Guangmo, Cheng Zunlan. The study of water damage in Tibetan highway [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 2005: 12–13 [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: 12–13]



- [17] 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: 35 - 52 [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: 35 - 52]
- [18] The comprehensive scientific expedition on Tibetan Plateau of the Chinese Academy of Sciences. Tibetan climate [M]. Beijing: Science Press, 1984: 90 - 94 [中国科学院青藏高原综合科学考察队. 西藏气候 [M]. 北京: 科学出版社, 1984: 90 - 94]
- [19] Cheng Zunlan, Hong Yong, Li Xiaoyu. The warning technology of debris flow caused by Glacier-lake outburst in Qinghai - Tibet Plateau [J]. Journal of mountain science, 2011, 29(3): 369 - 377 [程尊兰, 洪勇, 黎晓宇. 青藏高原典型冰湖溃决泥石流预警技术 [J]. 山地学报, 2011, 29(3): 369 - 377]
- [20] Qin Dahe. Assessment on Environmental Changes in West China [M]. Beijing: Science Press, 2002: 61 - 65 [秦大河. 中国西部环境演变评估综合报告 [M]. 北京: 科学出版社, 2002: 61 - 65]
- [21] Shi Yafeng. Introduction of Chinese Glacier [M]. Beijing: Science Press, 1988: 21 - 22 [施雅风. 中国冰川概论 [M]. 北京: 科学出版社, 1988: 21 - 22]
- [22] 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, 宫怡文. 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]
- [23] Christian H, Andreas K, Wilfried H, et al. Remote sensing based assessment of hazards from glacier lake outbursts: a case study in the Swiss Alps [J]. Can. Geotech. J. 2002, 39: 316 - 330
- [24] Fu Jing, Liu Guodong, Zhang Zhen, et al. Application of Fuzzy Matter Element Modeling to classification of soil erosion [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2008, 28(3): 138 - 140 [付静, 刘国东, 张贞, 等. 模糊物元模型在土壤侵蚀等级划分中的应用 [J]. 水土保持通报, 2008, 28(3): 138 - 140]
- [25] Zhang Huiying, Zeng Jianmin. Improvement of matter-element extension model and its application to classification of expansive soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(6): 1681 - 1684 [张慧颖, 曾建民. 物元可拓模型的改进及其在膨胀土分类中的应用 [J]. 岩土力学, 2008, 29(6): 1681 - 1684]
- [26] Hao Hangcheng, Zhu Fanghai. Recognition method of potential failure mode of slope based on Extensics Theory [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(4): 698 - 702 [郝航程, 朱方海. 基于可拓学理论的边坡潜在破坏模式识别方法 [J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(4): 698 - 702]
- [27] Liu Yongjian, Zhang Lijuan, Yang Xueqiang. Application of extension classified prediction method for risk assessment on geological hazards [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2009, 20(3): 108 - 119 [刘勇健, 张丽娟, 杨雪强. 可拓聚类预测方法在地质灾害危险性评价中的应用 [J]. 地质灾害与环境保护, 2009, 20(3): 108 - 119]

## The Hazard Assessment of Glacier-lake Outburst in Palongzangbu River from Ranwu to Peilong

LIU Jinfeng<sup>1,2</sup>, CHENG Zunlan<sup>1,2</sup>, CHEN Xiaoqing<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Mountain Surface Process and Hazards, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** The biggest maritime glacier area in China is developed in the Palongzangbu drainage area of Tibet. The glacier-lakes are widely distributed in the area. It is also a typical region suffered from the hazards of glacier-lake outburst. The Palongzangbu River from Ranwu to Peilong is selected as study area in this paper. Based on the introduction of the environment backgrounds and through remote sensing interpretation, the distribution of the glacier-lakes in the study area is analyzed firstly. Then 8 factors easy to be got are selected for assessing the glacier-lake outburst hazard from three characteristics including glacier, glacier-lake and downstream channel. At last, the fuzzy matter-element extension theory is used for comprehensively assessing the glacier-lake outburst hazard in the study area. Through the hazard assessment, 18 glacier-lakes are high hazardous accounting for 13.85% of the total 130 glacier-lake; 36 glacier-lakes are medium hazardous accounting for 27.69% and 76 glacier-lakes are low hazardous accounting for 58.46%. The high hazardous glacier-lakes are mostly distributed in the section from Ranwu to Songzong.

**Key words:** Palongzangbu River; Ranwu to Peilong; glacier-lake outburst; hazard assessment