

冰湖溃决评价体系研究进展

铁永波, 唐 川

(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)

摘要: 受全球气候变暖及人类活动的影响, 冰川环境正在发生着巨大的变化, 冰湖溃决灾害已成为当前山区经济可持续发展中的突出问题。为能综合地对冰湖溃决进行科学的评价, 文章回顾了国内外冰湖溃决评价体系的研究现状, 系统总结了国内外现有冰湖溃决评价方法及研究的主要内容, 对各评价方法的优缺点进行了讨论, 并对冰湖溃决评价的未来研究方向做了探讨, 可为冰湖溃决评价的系统方法研究提供参考。

关键词: 冰湖溃决; 评价方法; 指标体系; 洪水演进

中图分类号: P343. 6; G353. 11 文献标识码: A 文章编号: 1001-6791(2009)03-0448-05

冰湖是冰川运动的产物, 在世界各国山区都有广泛分布, 如喜马拉雅山区^[1~3]、中亚^[4]、阿尔卑斯山区^[5]、北美^[6~8]、英国^[9]、秘鲁^[10,11]等。是高海拔山区常见的冰川地貌之一^[12,13]。近半个世纪以来, 全球变暖对冰川环境产生巨大的影响, 冰川加速后退、冰湖数量和规模增大、冰湖溃决灾害发生的频率增高。鉴于冰湖溃决灾害所造成的损失在逐年增加, 因此, 冰湖溃决所引发的灾害越来越受到人们的关注^[14~16]。中国西藏地区冰川遍布, 冰湖发育数量众多, 是中国冰湖发育最多、受冰湖溃决危害最严重的地区。据统计, 喜马拉雅山区近 50 年来至少有 20 余次较大的冰湖溃决事件, 其中有 3/4 的溃决灾害发生在中国西藏境内^[16]。目前中国西藏地区现已查明的冰湖共有 14 个(皆为冰碛湖), 共发生过 17 次溃决^[13]。冰湖溃决后形成的洪水或泥石流往往是瞬间爆发, 规模大、危害范围广, 常波及下游河谷数百公里处, 成为影响西藏地区社会经济发展和工程建设的主要地质灾害之一。因此, 开展冰湖溃决评价研究对中国西藏地区经济建设与发展具有重要的实践意义。

1 国内外研究进展

通过近几十年的努力, 国内外学者在冰湖溃决评价方面取得了长足的进展, 目前, 对冰湖溃决评价体系研究主要包括以下几方面的内容:

1.1 冰湖溃决评价方法

至 20 世纪 70 年代以来, 国外学者在冰湖溃决危险性评价、风险评价等方面都取得了较多的成果^[7,9,10,17], 对冰湖的评价主要采用在实地调查的基础上综合一些新的技术方法所开展的定性与半定量相结合的方法, 如遥感(RS)、地理信息系统(GIS)等^[17~19]。瑞士的 Huggle 等根据水体和非水体影像在不同波段下色彩的差异, 应用遥感(RS)技术与地理信息系统(GIS)建立数字高程模型(DEM), 自动提取冰湖的特征指标, 解决了冰湖野外调查困难的问题^[20,21]。目前, 国内外学者所提出的冰湖评价方法将传统的野外调查和 RS、GIS 相结合, 形成了一套较为成熟的评价体系, 主要包括三个层次的内容: 野外调查(结合遥感) → 评价方法(结合 GIS) → 评价模型(结合 GIS)^[18,20,22,23]。

中国学者所开展的冰湖评价研究是以西藏地区的冰碛湖为主要对象, 采用定性与定量相结合的评价方法^[24]。从 20 世纪 70 年代以来, 中国学者在对西藏地区开展大量冰碛湖溃决事件调查的基础上, 结合 RS 和

收稿日期: 2008 09 26

基金项目: 国土资源部公益性行业科研资助项目(2008334006)

作者简介: 铁永波(1979-), 男, 云南大关人, 博士研究生, 主要从事环境地质、地质灾害防治及评价研究。

E-mail: 229883592@qq.com

GIS对冰湖的空间分布、数量、面积等特征进行遥感解译和识别,并根据不同时期的冰川面积、冰湖数量及面积的变化对冰湖的溃决成因进行分析^[25,26]。此外,还对冰湖溃决开展了数值模拟等研究工作^[27]。对中国西藏地区冰碛湖的空间分布特征、溃决机制、影响溃决的主要因素等进行了研究,并提出了影响冰碛湖溃决的7个主要评价指标,为中国冰湖评价研究奠定了基础^[28,29]。

1.2 冰湖溃决评价的指标体系

鉴于影响冰湖溃决的因素众多且具有极大的不确定性,如极端气候事件、冰崩、冰滑坡等往往具有突发性,使评价指标体系的确定较为困难。国外学者中最具代表性的研究成果是由Huggle等提出的冰湖溃决评价指标体系,该体系主要包括3个主要指标及18个次级指标,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,所选取的评价指标体系范围广、分类详细,在一定程度上提高了评价的精度^[29,30]。国内学者在对西藏地区多次冰湖溃决统计的基础上,通过冰湖溃决与冰湖参数特征的关系式提出了冰碛湖溃决评价的7个指标,并根据7个评价指标的分级进行了相应的量化判定(表1),提出了基于统计的冰碛湖溃决评价方法,为冰碛湖溃决的危险性评价提供了基础^[28]。

表1 国内冰碛湖溃决评价指标的危险性分级

Table 1 Classification of moraine lakes outburst hazards assessment in China

| 指标 | 溃决指标取值范围 | 有利于溃决的指标值 |
|----------------------------|----------|-----------|
| 现代冰川和积雪的面积/km ² | 2~30 | >2 |
| 冰川积雪区平均坡度/(°) | 7~12 | >7 |
| 邻近冰湖冰舌段坡度/(°) | 3~20 | >8 |
| 冰舌与冰湖的距离/m | 8~500 | <500 |
| 冰湖蓄水量/亿m ³ | 0.03~2.5 | >0.01 |
| 终碛堤顶宽/m | 3~1000 | <60 |
| 终碛堤背水坡坡度/(°) | 25~33 | >20 |

1.3 冰湖溃决洪水的演进

冰湖溃决后的成灾过程主要表现为洪水或泥石流。当下游沟道内没有固体物质补给时,溃决水流就会形成洪水,而一旦下游沟道内有足够的松散固体物质参与时,就会演化成泥石流,其规模及危害往往是一般洪水、泥石流的数十倍^[31,32]。因此,对冰湖溃决后洪水的演进进行评价也是冰湖溃决评价研究中的一个重要内容。如1977年9月和1985年8月尼泊尔Everest山区的两个冰湖发生溃决,溃决洪水最大流量为1900m³/s,是通常情况下流量的十几倍^[33]。早在1983,Haerberli首先提出了冰湖溃决最大流量的计算公式,将冰湖溃决的最大流量(Q_{max})表示为冰湖湖水体积(V)与时间(t)的函数关系^[5]:

表2 国外学者提出的冰湖溃决洪水规模的计算公式

$$Q_{max} = V/t \quad (1)$$

Table 2 Magnitude equations of glacier lakes outburst flood in abroad

| 作者 | 公式 | 参数含义 | 适用区域 |
|------------------------|-------------------------------|---|--------|
| Huggel ^[29] | $Q_{max} = 0.0007 V^{1.017}$ | 冰湖水体体积 V , m ³ ; 溃决洪水最大流量 Q_{max} , m ³ /s; | 阿尔卑斯地区 |
| Popov ^[4] | $Q_{max} = 0.0048 V^{0.896}$ | | 天山北部 |
| Walder ^[34] | $Q_{max} = 46(V/10^6)^{0.66}$ | 冰湖势能 P_E | 加拿大 |
| Evans ^[35] | $Q_{max} = 0.72V^{0.53}$ | | 北美 |
| Costa ^[36] | $Q_{max} = 0.00013P_E^{0.60}$ | | |

式中 时间 t 的取值为 1000 s, 是根据瑞士阿尔卑斯山区的经验统计值确定, 取值范围为 1000~2000 s 之间。此外, 国外其他学者也做了大量的相关研究, 提出了相应的经验公式(表2)。公式建立在大量溃决资料统计的基础上, 具有较强的代表性, 能解决一些调查难以实现的问题。但由于

于区域冰湖发育背景及影响因素的差异, 导致各经验公式的局限性较大。此外, 国内学者在对西藏地区冰湖溃决洪水(泥石流)调查的基础上, 探讨了冰碛湖溃决洪水的演化机理, 提出了相应的经验评价公式, 对冰湖溃决口的扩大随时间的变化关系做了探究, 提出了冰湖瞬时溃决时不同溃决模式的洪水或泥石流流量的计算公式, 为冰湖溃决洪水的演进提供了理论依据^[16,24,31]。

2 冰湖溃决评价的未来研究方向

虽然国内外学者在冰湖溃决的空间分布特征、影响因素、溃决机制等方面有了较大的进展, 但对于冰湖溃决的内在机理等仍不明确。因此, 今后对冰湖溃决的评价研究还需要从以下几方面开展。

2.1 冰湖溃决机理研究

目前虽然明确了冰滑坡和冰崩造成的水位上涨和涌浪是冰湖溃决的主要诱导因素, 但对冰滑坡引起涌浪的

机理研究尚少,如冰滑坡在与水的比重及它在入水后运动方式方面都与滑坡存在本质的不同,因此,要研究冰湖溃决机理应重点研究以下几点:一是研究冰滑坡的体积与冰湖水体体积比值为多大时容易引起溃决;二是研究冰滑坡滑入冰湖时与湖面的夹角多大时容易溃决;三是找到控制管涌溃决和漫顶溃决的关键参数,可通过土力学试验来完成。此外,研究冰坝在某个极限长度或厚度时容易发生溃决也是亟需解决的问题。

2.2 RS 和 GIS 技术的应用

以往的冰湖遥感调查都是基于 TM/ETM 中低分辨率影像,只能提取冰湖空间分布特征和面积等有限信息,而对影响冰湖稳定性的主要因素信息无法提取,因而很难对冰湖溃决进行定量评价。如冰湖的水体体积就是一个较难获取的数据,今后可利用 SPOT 5、CARTOSAT、QUICKBIRD 等高精度卫星影像和其立体对生成高精度的数字高程模型(DEM),通过提取冰湖湖岸的坡度及冰坝迎水坡/背水坡的坡度,从而根据坡度的变化特征对冰湖水体体积进行估算。

2.3 建立系统的评价指标体系及评价模型

由于影响冰湖溃决的因素较为繁杂,除了气象、地形、冰川环境外,还跟冰湖的自身特征有很大关系,因此,要确定其评价指标体系较为困难。要建立起冰湖溃决的评价指标体系应主要解决两个难点:一是在众多繁杂的相关指标中提取出主要指标,建立指标体系;二是如何将选取的评价指标量化分级,即通过相关的数学方法确定各个指标的影响权重并将指标进行级别分类,找出评价指标在哪个分级类易造成冰湖溃决。虽然目前已有学者对一些指标进行了分级,如背水坡坡度在 $25^{\circ} \sim 33^{\circ}$ 之间最易造成冰碛湖溃决等,但对冰湖溃决评价这样一个庞大的指标体系而言,还远远不够。

2.4 冰湖溃决堵河模式研究

冰湖溃决后往往伴随着下游沟道内的松散固体物质,形成大规模的高含沙洪水或泥石流,其危害的极端表现形式是完全堵塞主河并长时间形成堵塞坝,待主河水位上升到很危险的高度后溃决,形成巨大洪水,造成灾害。就目前的研究现状而言,研究冰湖溃决后堵河模式、堵河机理并对其危害开展评价研究是今后研究的重点。而要达到这一目标需要开展以下几个方面的研究:一是冰湖溃决后何种性质的流体会导致堵河,是洪水还是泥石流;二是溃决后的洪水、泥石流进入主河时与主河的夹角在什么范围内容易导致堵河并找出临界角度,这需要通过室内模拟试验来完成;三是针对不同可能堵河的条件,采取相应的引流等工程措施,将堵河的危险性降低到最小。因此,不同溃决条件下堵河模式及机理将是今后研究的重点内容,同时,开展野外调查与室内模拟试验相结合将是解决相关问题的重要途径。

3 结 论

虽然目前在冰湖溃决的空间分布、危害特征、影响因素等方面取得了一定的进展,但对冰湖溃决的形成机理、溃决口的形成机制、溃决洪水的演进特征、溃决灾害的数值模拟等问题的研究仍亟待解决。冰湖溃决的复杂性不仅体现在其影响因素的多样性,还表现为溃决时内在机理的复杂性,其溃决的动力学机制还不清楚,而研究这些问题需要应用到土力学、水力学等学科的相关理论才能得以解决。从冰湖评价的复杂性可以看出,要对冰湖溃决进行系统的评价需将冰湖的成因、冰川环境、溃决影响因素、冰湖和冰坝自身的特性、下游地形地貌特征等作为一个评价的整体,方能实现为防灾减灾提供科学依据的目的。

参考文献:

- [1] RICHARDSON S D, REYNOLDS J M. An overview of glacial hazards in the Himalayas[J]. Quaternary International, 2006, 66(5): 31- 47.
- [2] VUICHARD J M, ZIMMERMAN M. The 1985 catastrophic drainage of a moraine dammed lake Khumbu Himal, Nepal: Cause and consequences[J]. Mt Res. and Dev., 1987(7): 91- 110.
- [3] YAMADA T. Glacier lake and its outburst flood in the Nepal Himalaya, data center for glacier research, japanese society of snow and ice[M].

Tokyo, 1998.

- [4] POPOVN. Glacial debris flows mitigation in Kazakstan: assessment, prediction and control, in: Debris flow hazard mitigation: mechanics[C] // 1st international conference, San Francisco, California, August, American Society of Civil Engineers, 1997: 113– 122.
- [5] HAEBERLI W. Frequency and characteristics of glacier floods in the Swiss Alps[J]. *Ann Glaciol.* 1983(4): 85– 90.
- [6] OCONNOR J E, COSTA J E. Geologic and hydrologic hazards in glacierized basins in North America resulting from 19th and 20th century global warming[J]. *Nat Hazards*, 1993(8): 121– 140.
- [7] EDWARD G N. Hydrology, Glacier Lake Outburst floods (1987– 2004) and water quality (1998– 2003) of the Taku River near Juneau, Alaska[C] // Survey Scientific Investigations Report, 2007– 5027.
- [8] 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. (XU Daoming, FENG Qinghua. Study of ice debris flow and Glacier Lake Outburst Disasters[J]. 1988, 10(3): 284– 289. (in Chinese))
- [9] CLAGUE J J, EVANS S G. A review of catastrophic drainage of moraine dammed lakes in British Columbia[J]. *Quat Sci Rev*, 2000, 19: 1763– 1783.
- [10] AMES A A. Documentation of glacier tongue variations and lake development in the Cordillera Blanca[J]. *Peru Z Gletscherkd Glazialgeol*, 1998(34): 1– 36.
- [11] REYNOLDS J M. The identification and mitigation of glacier related hazards: examples from the Cordillera Blanca, Peru[C] // London: Geographical Hazards natural and man made, London: Chapman and Hall, 1992: 143– 157.
- [12] 左建. 地质地貌学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001. (ZUO Jian. Geological and Geomorphology[M]. Beijing: Irrigational Hydroelectric Press, 2001. (in Chinese))
- [13] 崔鹏, 马东涛, 陈宁生, 等. 冰湖溃决泥石流的形成、演化及减灾对策[J]. *第四纪研究*, 2003, 23(6): 621– 628. (CUI Peng, MA Dongtao, CHEN Ningsheng, et al. The initiation, motion and mitigation of debris flow caused by glacier lake outburst[J]. *Quaternary Science*, 2003, 23(6): 621– 628. (in Chinese))
- [14] REYNOLDS J M. On the formation of supra glacial lakes on debris covered glaciers[C] // Debris covered Glaciers. International Association of Hydrological Sciences (IAHS), Publication 264, 2000: 153– 161.
- [15] CLAGUE J J, EVANS S G. Formation and failure of natural dams in the Canadian Cordillera[M]. Geological Survey of Canada Bulletin, 1994.
- [16] 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. (XU Daoming, Feng Qinghua. Dangerous glacial lake and outburst features in Xi Zang Himalayas[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1989, 44(3): 343– 352. (in Chinese))
- [17] LIBOUTR Y L, MORALE S B. Glaciological problems set by the control of dangerous lakes in Cordillera Blanca, Peru: I. historical failures of morainic dams, their causes and prevention[J]. *J Glaciol*, 1977, 18(79), 239– 254.
- [18] GAMM A P. Dwalk-Ein Murgang Simulationsprogramm zur Gefahrenzonierung[R]. Bern: Geographisches Institut der Universität Bern, 2000.
- [19] WEI C S. Study of Glacier Lake outburst floods in Nepal Himalaya, Phase I: interim report[R]. Kathmandu, Nepal, 1987: 3– 36.
- [20] HUGGEL C, HAEBERLI W, MOELZLE M. Assessment of glacier Hazards and Glacier runoff for different climate scenarios based on remote sensing data: Case study for a hydropower plant in The Peruvian Andes[C] // Observing our cryosphere from space. 2002.
- [21] HUGGEL C, KÄÄB A, HAEBERLI W. Regional scale GIS models for assessment of hazards from glacier lake outbursts: evaluation and application in the Swiss Alps[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, (2003) 3: 647– 662.
- [22] WESSELS R L, KARGEL J S, KIEFFE R H. Aster measurement of supraglacial lakes in the Mount Everest region of the Himalaya[J]. *Ann Glaciol*, 2002, 34: 399– 408.
- [23] QUINCEY D J, RICHARDSON D, LUCKMAN A, et al. Early recognition of glacial lake hazards in the Himalaya using remote sensing datasets[J]. *Global and Planetary Change*, 2007, 56(1– 2): 137– 152.
- [24] 吕儒仁. 西藏的冰川终碛湖泥石流[C] // 滇藏铁路线勘测选线讨论会论文选辑. 1981. (LÜ Ruren. Moraine dammed outburst debris flow in Tibet[C] // symposium proceeding of Yunnan-Tibet Railway Route Selection Survey, 1981. (in Chinese))
- [25] 魏红, 马金珠, 马明国, 等. 基于遥感与GIS的朋曲流域冰川及冰湖变化研究[J]. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2004, 40(2): 97– 100. (WEI Hong, MA Jinzhu, MA Mingguo, et al. Study on changes of glaciers and glacial lakes in the Pumqu basin based on RS and GIS[J]. *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences*, 2004, 40(2): 97– 100. (in Chinese))
- [26] 陈晓清, 崔鹏, 杨忠, 等. 近15a喜马拉雅山中段波曲流域冰川和冰湖变化[J]. *冰川冻土*, 2005, 27(6): 793– 800. (CHEN Xiaqing, CUI Peng, YANG Zhong, et al. Changes of glaciers and glacial lakes in the middle section of the wave-curved basin of the Himalayas in the last 15 years[J]. *冰川冻土*, 2005, 27(6): 793– 800. (in Chinese))

- qing, CUI Peng, YANG Zhong, et al. Change in glaciers and glacier lakes in Boiqu river basin, middle Himalayas during last 15 years[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(6): 793–800. (in Chinese)
- [27] 岳志远, 曹志先, 车涛, 等. 冰湖溃决洪水的二维水动力学数值模拟[J]. 冰川冻土, 2007, 29(5): 756–763. (YUE Zhi yuan, CAO Zhi xian, CHE Tao, et al. Two dimensional mathematical modeling of glacier lake outburst flood[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(5): 756–763. (in Chinese))
- [28] 吕儒仁. 西藏泥石流与环境[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1999: 69–112. (LÜ Ru ren. Debris flow and environment in Tibet[M]. Chengdu: Chengdu Science and Technology University Press, 1999: 69–112. (in Chinese))
- [29] HUGGEL C, HAEBERLI W, KÄÄB A, et al. An assessment procedure for glacial hazards in the Swiss Alps[J]. Can Geotech, 2004, 41(6): 1068–1083.
- [30] MCKLIPO R J, CLAG U E. A procedure for making objective preliminary assessments of outburst flood hazard from moraine dammed lakes in southwestern British Columbia[J]. Nat Hazards, 2006, 11(6): 28–34.
- [31] 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. (CHENG Zun lan, ZHU Ping yi, GONG Yi wen. The conform mechanical analyses of typical glacier lake debris flow[J]. Journal of Mountain Science, 2003, 21(6): 716–720. (in Chinese))
- [32] 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]. Hydrology Geology and Engineering Geology, 2006(3): 88–92. (in Chinese))
- [33] DANIE L A, CENDEREL L I, ELLEN E. Peak discharge estimates of glacial lake outburst floods and “normal” climatic floods in the Mount Everest region, Nepal[J]. Geomorphology, 2001, 40: 57–90.
- [34] WALDER J S, OCONNER J E. Methods for predicting peak discharge of floods caused by failure of natural and constructed earthen dams[J]. Water Resources Research, 1997, 33: 2337–2348.
- [35] EVANS S G. The maximum discharge of outburst floods caused by the breaching of man made and natural dams[J]. Canada Geotechnical Journal, 1986, 23: 385–387.
- [36] COSTA J E, SCHUSTER R L. The formation and failure of natural dams[J]. Geological Society of America Bulletin, 1988, 100: 1054–1068.
- [37] 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 Xiao qing, CHEN Ning sheng, CUI Peng. Calculation of discharge of debris flow induced by glacier lake outburst[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(3): 357–362. (in Chinese))

Progress in glacier lake outburst assessment system*

TIE Yong bo, TANG Chuan

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The accelerated change of the glacial environment due to the global warming and human activity is significant. Glacier lakes outburst has become a serious disaster in mountainous areas. In order to understand the glacier lake outburst and find a reasonable assessment way for the glacier lake outburst assessment, this article summarizes these main methods for glacier lake outburst assessment developed by the researchers from all over the world, explains some problems existing in current studies and analyzes the advantages and disadvantages of each methods. Finally, some new ways in the future research are discussed, which gives some information and suggestions for the future study.

Key words: glacier lake outburst; assessment method; index system; flood routing

* The study is financially supported by the China Ministry of Land and Resources(No. 2008334006).