

文章编号: 1008-2786-(2007)4-412-07

玉龙雪山冰川崩塌成因分析

张宁宁¹, 何元庆^{1,2}, 和献中³, 庞洪喜¹, 赵井东¹

(1 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 冰冻圈与环境联合重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

2 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100029; 3 玉龙雪山省级旅游开发区管委会, 云南 丽江, 674100)

摘要: 玉龙雪山是亚欧大陆距赤道最近的海洋型冰川分布区。2004-03-12上午, 玉龙雪山东坡干河坝山谷上方漾弓江5号冰川区发生一次剧烈的崩塌, 2005年又有小规模崩塌发生。通过实地考察认为, 这是冰岩体崩塌事件。通过对气象资料的分析发现, 区域气候变暖对冰川和永冻带稳定性的干扰是崩塌发生的主要原因, 特别因为2003年和2005年为两个极端干热的年份。通过与本区其他冰川的变化对比, 说明这次冰川崩塌可能是本区一些小冰川对区域变暖响应的另一种方式。同时发现, 这次崩塌在现场留下的堆积物, 在合适的天气条件下极易形成泥石流。

关键词: 全球变暖; 玉龙雪山; 海洋型冰川; 崩塌; 泥石流

中图分类号: P931

文献标识码: A

山地覆盖了地球陆地面积的1/5。世界上接近10%的人口生存直接受助于山地, 而间接受助的人口超过50%^[1]。世界上的许多大河都发源于山地。因此, 山地环境的改变会造成巨大的社会影响。自19世纪末小冰期结束100多年来, 全球气温平均升高0.5~0.8℃^[2]。随着全球气候变暖, 高寒山区响应显著。首先, 山地冰川呈现出退缩的状态^[1,3,4]。据全球几百条冰川的观测结果显示, 20世纪80年代初退缩冰川的比例在50%左右, 而到了1995年增加到近70%左右^[4]。然后, 山地永久冻土带也出现了显著的升温现象^[3,4]。通过在欧洲高山永冻带钻取深度超过100 m的钻孔发现, 在上个世纪, 高山永冻带上部10 m左右升温达0.5~0.8℃^[5]。在这种背景下, 2002年以前发生在欧洲阿尔卑斯山冰川及冰缘地带有记录的崩塌事件就有20次^[6], 其中11次发生于1980年以后。除此之外, 还有2002-

09发生在高加索山脉中Dzhimari-Khokh山上的Koka冰川崩塌事件, 给当地带来了严重的灾害^[7]。另外, 2004-02月上旬在我国青海省玛沁县大武乡的阿尼玛卿雪山也发生过一起冰川崩塌事件^[8]。同样在2004年, 我国著名的旅游胜地玉龙雪山的冰川区发生了一起崩塌事件。据新闻报道, 2004-03-12上午, 玉龙雪山山麓干河坝发生了一次剧烈的崩塌, 在10 km余外都看得到干河坝一带的雪山冰川被四起的尘雾笼罩, 不少游客都听到雪山崩塌的巨大声响。在随后的一个月, 雪山冰川仍不断出现崩塌现象, 使得干河坝附近的雪山冰川经常雪雾弥漫。并且根据当地人反映, 在2005年还有类似的小规模崩塌发生。

由此可见, 近年来高寒山区崩塌活动加强, 对气候变暖表现出不同程度的响应, 并且有可能带来严重的山地地质灾害。因此, 加强对高寒山区山体崩

收稿日期 (Received date): 2006-12-30; 改回日期 (Accepted): 2007-05-06.

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金项目 (90511007, 40501014); 中科院重要方向项目 (kzcx2-yw-317), 中科院创新团队国际合作伙伴计划 (CXTD-Z2005-2); 国家基金委“创新群体”项目 (40121101); 玉龙雪山旅游开发管委会地方项目资助。[National Natural Science Foundation of China No. 90511007, 40501014, 40121101; the important research direction of Chinese Academy of Sciences No. kzcx2-yw-317; Innovative Research International Partnership Project (CXTD-Z2005-2), Chinese Academy of Sciences; Project of the Jade Dragon Snow Mountain Tourism Development Administrative Committee]

作者简介 (Biography): 张宁宁 (1981-), 男 (汉), 山东济宁人, 博士研究生, 主要从事冰川和气候变化研究。[Zhang Ningning male, Born in Shandong, Ph.D., Professor of glacier and climate change. Tel: 0931-4967334, E-mail: 2369234@163.com]

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

塌的监测和研究, 不仅对于研究山区对气候变化的响应具有重要意义, 而且对社会经济建设还具有指导意义。作者们于 2006-04-21 和 05-07 两次对玉龙雪山崩塌区进行了详细的实地考察, 初步判断此事件为一次冰岩体崩塌(图 1)。本文即是在考察的基础上, 对此崩塌事件进行分析讨论。



图 1 崩塌现场

Fig 1 The locale of landslips

1 崩塌区概况

玉龙雪山在纬度上处于亚热带地域, 位于云南丽江市北部 25 km 处, 属于横断山系(图 2), 是中国最南的一座雪山, 也是亚欧大陆距赤道最近的海山型冰川区^[9 10]。它西北临金沙江大峡谷——虎跳峡, 东麓是海拔约 3 000 m 的干海子高位山间盆地, 南面是丽江盆地。雪山南北长 35 km, 东西宽 13 km, 主峰扇子陡海拔 5 596 m。山上分布有 19 条冰川, 东坡 15 条, 西坡 4 条, 面积 11.61 km²(图 3)。崩塌位于玉龙雪山东麓干河坝源头的山谷内。

根据现场实测, 再加上对 1957 年航测、1966 年调绘和 1968 年出版的 1:5 万地形图的判读, 初步判断崩塌发生于漾弓江流域 5 号冰川。现场可以清楚的看到冰川断面, 并且在离冰川断面不远山体上有比较新鲜的岩石断面, 山脚下至今还残留有冰体(见图 1)。冰体表面细颗粒物含量丰富, 可以看到明显的层理, 下缘有大量粗细不等颗粒物堆积, 应该是冰体外缘融化后残留下的。冰体上方不时有飞石滚下, 非常危险, 所以没有对冰体进行详细的测量。据目测, 冰体周长大约有 800 m, 高度有 10 m

之多。初步判断为冰川塌落处。根据中国冰川目录, 漾弓江 5 号冰川为坡面悬冰川, 面积 0.72 km², 总长度 1.8 km, 雪线高度 4 620 m, 平均厚度 37 m^[11], 冰川积累区朝东南, 消融区朝南。崩塌发生的山谷为一典型的 U 型谷, 谷口朝东, 山谷两侧山势陡峭, 山体主要有泥盆系和石炭系的石灰岩构成, 人称大雪山灰岩或玉龙灰岩, 玉龙灰岩质地纯粹, 呈厚层状, 色淡灰或淡灰黑, 裸露的灰岩崖壁远望大致呈白色^[12]。在谷底两侧有大量寒土风化形成的倒石堆, 倒石堆底部生长一些植被, 谷口处谷底在崩塌之前植被良好。根据现场观测, 现存堆积物为单一的灰岩, 长度约为 2 000 m, 宽约为 250 m, 大致 WN-ES 向(图 3)。堆积物在谷口处厚约 3~5 m, 中间薄一些, 有些地方甚至可以看到崩塌时被覆盖的植被。堆积物分选不明显, 以直径 1~2 m 的石块为主。其中有一些个体比较大的岩体, 我们现场观察到的最大岩块大约高 10 m, 周长 40 m。堆积物表面普遍有碎屑物质覆盖, 没有明显的流水运动改造的痕迹。另外, 我们对堆积物边界进行了 GPS 定位采点, 然后用 Arcgis 软件进行了分析, 得出堆积物的大致形状(见图 3), 并算出它的面积有 $0.71 \times 10^6 \text{ m}^2$ 。按照对厚度的估计, 整个堆积物体积大约为 $2.13 \times 10^6 \sim 3.55 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。

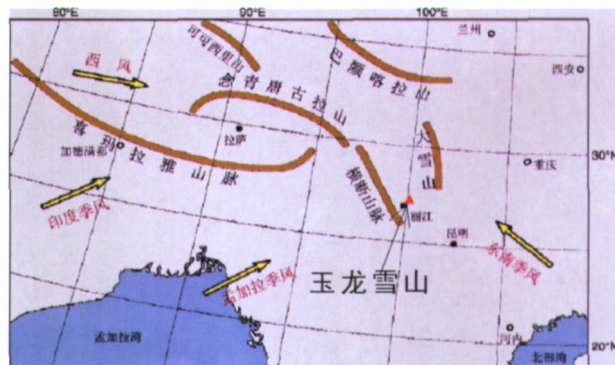


图 2 玉龙雪山位置图

Fig 2 The location of Yulong mountain

2 崩塌成因

2.1 气候条件

冰川的进退、积累和消融, 都受制于气候的干、湿、冷、暖变化, 即与温度和降水密切相关。山区的气候变化非常复杂, 不仅受大尺度大气环流影响, 还受局地环流, 如山谷风等的影响。并且高山地区人迹罕见, 条件艰苦, 缺乏基本的气象观测资料。原本

在玉龙雪山海拔 4 506 m 处有一自动气象站,但资料有限,并且有间断。张忠林^[13]通过对丽江气象站(海拔 2 393 m)与玉龙雪山区海拔 2 960 m 和 4 506 m 处的两个气象站的气象数据进行了相关分析,发现它们的相关系数分别为 0.96 和 0.89,并且通过了 0.01 的置信度检验。所以本文采用丽江气象站 1951~2005 年连续的气象资料作为参考,来说明崩塌处山区的气候情况。

由图 4 可以看出,20 世纪 50~80 年代,丽江的年降水和年均温虽然有波动,但起伏不大。到了 20

世纪 90 年代之后,不仅是年均温显著升高,年降水量也显著升高。这种现象在丽江周边的其他季风温冰川区也存在^[14]。张忠林^[13]通过对本区气象资料的统计模拟发现,当年均温上升时,冰川上的降水会增加,这与实际情况一样。同时发现,增加的主要是液态降水,固态降水不会增加,反而有所下降。而液态降水的增加则会加快冰川的消融。在这种情况下冰川则会强烈退缩,这从本区最大的白水 1 号冰川末端海拔变化可以看出(表 1)。何元庆等人^[15]的研究也指出气温升高是白水 1 号冰川强烈退缩的

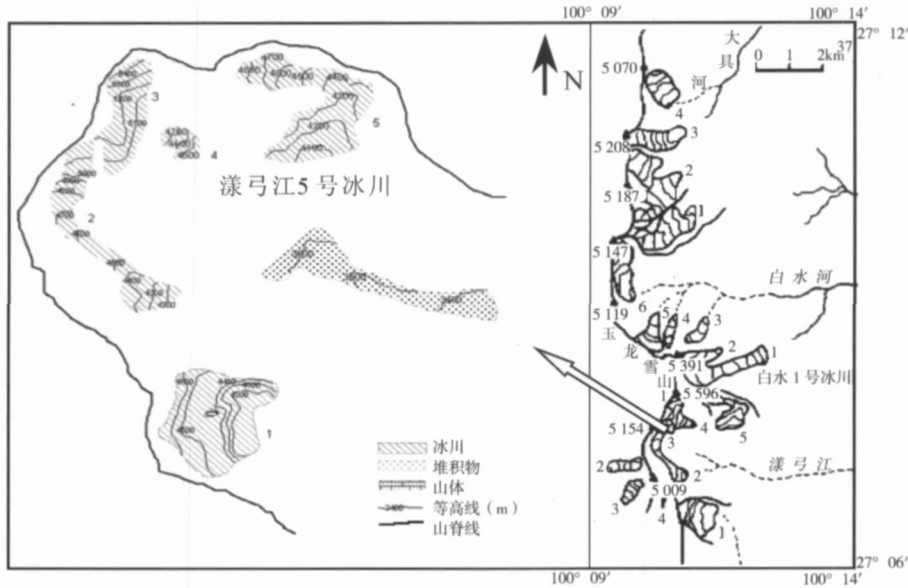


图 3 玉龙雪山和漾弓江流域冰川分布以及崩塌堆积物位置

Fig. 3 Distribution of glaciers on Mt. Yulong and the drainage basin of the Yanggongjiang River with the cumulative position of landslips

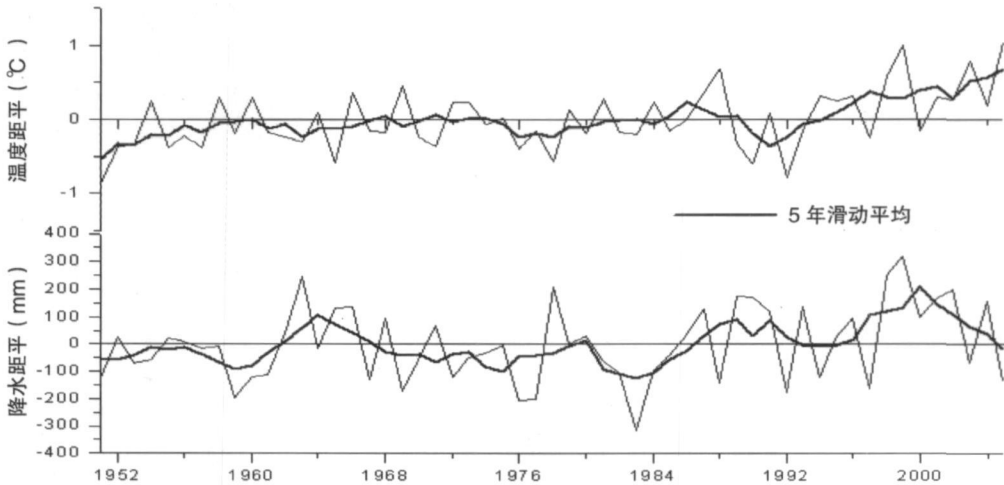


图 4 丽江 1951~2005 年年平均气温以及年降水量距平图

Fig. 4 The mean annual temperature departure and yearly precipitation departure from 1951 to 2005 at Lijiang

主要原因。

在上世纪丽江地区温度逐渐上升的背景下, 冰川的温度也慢慢升高, 冰川内部冷储随之减小, 这就使得冰川内部冻结能力减小, 冰川含水量增大, 运动加快。特别是冰川的前端和冰舌部分, 由于海拔较低, 温度较冰川上部更高, 运动速度更快。如果遇到合适的气候条件组合, 则极易发生崩塌。2000~2005年年平均气温和年降水量见表 2。可以看出, 2000~2002年丽江气温呈上升的趋势, 同期降水也

呈缓慢上升趋势。但在 2003 年, 气温不仅比 2002 年和 2004 年分别高 0.52℃和 0.60℃。同时也比 1951 年至 2005 年 55 a 的平均温度 12.69℃高了 0.8℃。不过同期降水量却比 2002 年和 2004 年分别减少了 268.2 mm 和 222.1 mm, 也比 1951 年至 2005 年 55 a 的平均年降水量 963.9 mm 减少 66.7 mm(见表 2)。特别是 2005 年, 年平均气温比 2003 年还要高 0.24℃, 年降水量却相应减少了 66.6 mm。

表 1 白水 1 号冰川末端海拔高度
Table 2 The altitude of the end of Baishui glacier No. 1

年代	1956	1982	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
末端海拔 (m)	4 500	4 100	4 150	4 200	4 215	4 225	4 230	4 245	4 255	4 270	4 300
资料来源	任美鄂等 ^[20]	苏珍等 ^[21]	郑本兴 ^[19]	实测	实测	实测	实测	实测	实测	实测	实测

以上资料表明玉龙雪山冰川区进入 21 世纪以来, 2003 和 2005 年相对于其他年份来说是两个干热的年份。特别是 2005 年, 更是极端的干热。这种干热气候条件的组合会引起冰川积雪的强烈消融, 在这种情况下, 融水流汇集于冰川前端冰舌地段, 由于水温比冰温高, 冰雪融水在冰舌地段强烈下渗, 就相当于在暖切割冰体。被切割后的冰体, 就失去了整体性的冻结力。同时, 冰雪融水下渗, 填充了冰床上的裂隙、空隙及冰下空洞, 大大减小了冰床对冰川运动的阻力, 使冰川运动加快, 这为冰崩或冰滑坡的发生准备了充足的条件^[16], 便出现了 2004 年的崩塌事件。到了 2005 年, 干热程度的加剧, 使冰川在原来崩塌的基础上, 又出现了一些塌落。

2.2 地质、地势条件

玉龙雪山海拔 4 000 m 以上的高山带长约 25 km, 宽 1~7 km。玉龙雪山主体部分为印支期滇西褶皱带内的一个复背斜, 轴向近南北, 东西两侧分别向东及向西倾斜。玉龙雪山复背斜被次一级小褶皱牵引褶皱所复杂化, 在复背斜的核部发育着近于直立的一组剪节理。主峰扇子陡为一向斜构造。本区山高势陡, 走向 NS 的复背斜控制山体的主体部分, 东西两侧为此复背斜的两翼, 分别向东及向西倾斜。另外, 在复背斜的核部发育着近于直立的一组剪节理^[12]。从地质图看, 崩塌处位于这组剪节理附近。从坡脚下残留的冰崩塌体到冰舌垂直距离有 600 m 之多, 水平距离只有 700 m, 坡度 > 40°, 如此陡峻的地形为冰崩的发生提供了极佳的场所。从上新世至

更新世, 在玉龙雪山东西两侧形成的大断层与诸多东西向的横断层的组合, 是岩崩孕育的基础。

2.3 诱发因素

这次冰川崩塌事件很可能是先岩体崩塌引起的。岩体的不稳定性可由以下原因造成。第一, 冻融作用。即在 2003 年冰川强烈消融, 融水作用使冰川变得不稳定, 并且填满了冰床和冰川两侧岩体上的裂隙。随着秋冬季气温迅速下降, 裂隙中的融水被冻结保存下来。到了 2004 年春初, 气温迅速上升, 裂隙中的融水开始融化, 而到了夜间气温又迅速下降, 降到冰点以下, 裂隙中的融水又被冻结, 在这种融化-冻结作用下, 一些岩体开始变得不稳定, 以至于出现崩塌。第二, Davies et al^[17] (2001) 通过一系列的直剪试验证明, 在岩缝里没有冰, 或者冰体处于较低的温度时, 岩体是稳定的, 当岩缝里的冰体的温度升高时, 岩体稳定性降低。同时证明, 当岩缝的冰温在 -1.5~0℃ 间时, 岩体最不稳定。且这个温度范围在冻融变化之内。最后, 本区的山体主要是石灰岩类, 容易受流水化学侵蚀。并且碳酸钙的溶解度随温度降低而升高, 根据对白水 1 号冰川样品的分析发现, 该区冰雪 pH 值平均小于 7, 低于碳酸钙饱和溶液的 pH 值 (8.0~8.6)。在这种情况下, 冰雪融水对岩石的溶蚀作用不容忽视。上面 3 个造成岩石不稳定的原因, 并不是 2004 年春天才开始的, 而是长期存在, 只不过随着冰川的退缩, 越来越多的岩体出露, 使原本冻结稳定的岩体, 开始变得不稳定。终于在 2004 年春天超出它的临界值, 便发生

了崩塌。

另外, 云南省是我国著名的地震区之一, 1996-02-03 玉龙雪山北 15 km 处发生了 7 级强烈地震, 这次地震曾经诱发了至少 420 处中小型崩塌和 30 处大中型滑坡^[18], 可能也对本区冰体和岩体的稳定性造成了影响。

3 讨论

3.1 玉龙雪山冰川区对气候变暖的响应

表 2 2000~2005 年年平均气温和年降水量表

Table 1 The mean annual temperature and yearly precipitation from 2000 to 2005

年份 (a)	2000	2001	2002	2003	2004	2005	1951~2005
平均气温 (℃)	12.53	13	12.97	13.49	12.89	13.73	12.69
年降水量 (mm)	1 063.6	1 130.7	1 165.4	897.2	1 119.3	830.6	963.9

这与近百年来横断山区冰川变化的趋势基本一致^[22]。这说明在全球变暖的背景下, 随着区域气温的升高, 玉龙雪山的冰川开始强烈退缩, 由于玉龙雪山冰川区的冰川规模普遍较小, 最大的白水 1 号冰川面积仅为 1.52 km²。因此, 它们对气候的变化更为敏感, 退缩也就更厉害。漾弓江 5 号冰川的这次崩塌, 可能是本区海洋型冰川退缩的另一种方式, 即由于消融强烈, 冰川开始破裂, 失去整体性, 从而以分块消融的形式结束自己的生命。Koka 冰川的崩塌虽然有气候变暖的原因, 但它在 1902 和 1969 年也发生过两次冰崩, 冰川跃动也是它发生崩塌的主要原因之一^[8]。根据对当地人的调查, 玉龙雪山区近几十年来没有发生过类似的冰川崩塌事件, 这也说明这次冰川崩塌事件是在区域升温的背景下, 冰川强烈消融的表现形式, 而不是冰川周期性的运动加快造成的。对于这种形式的冰川退缩应该引起重视, 它可能使一些小冰川几年之间完全消失, 并且在崩塌后可能会带来冰川泥石流以及冰湖溃决之类的自然灾害。冰川消失后, 又会对当地的水资源和生态环境造成影响。不过, 在玉龙雪山区, 目前为止还没发现其他的冰川出现这种情况。IPCC 第 3 次评估报告中指出, 在充分考虑排放情景特别报告 (SRES) 里面的各种情景下, 1990~2100 年全球平均地表温度升高 1.4~5.8℃^[23], 在这种背景下, 冰川会继续退缩, 不排除冰川以崩塌消融的形式会增

玉龙雪山属于海洋型冰川区。海洋型冰川对气候变化极为敏感, 小幅度的气温升降就会引起冰川大幅度的后退和前进。据前人研究^[19], 本区最大的冰川——白水 1 号冰川在上世纪 50 年代曾强烈退缩过, 从 20 世纪 50~80 年代, 冰川出现过短暂的前进, 20 世纪 80 年代以后, 冰川基本稳定, 并有小幅退缩。但到了 1990 年代末期, 白水 1 号冰川开始强烈退缩。自 1998~2006 年, 其末端海拔平均每年约升高 16.7 m (见表 1)。

加。

随着冰川的退缩, 一些原本被冰川覆盖的山体出露表面, 以及随着气候变暖, 永冻带下限海拔的升高。这些都会使原来山体的外部环境发生变化, 从而影响其内部结构, 增加不稳定性。事实上本区山体崩塌事件在最近几年多有发生, 目前我们还没有确切的数据, 但这些现象引起了当地人的注意, 他们普遍反应是由于游客过多引起的, 并且还有一些迷信的说法。但造成冰川退缩, 山体崩塌的主要原因还是气候变化。

3.2 未来暴发泥石流的可能性

这次崩塌在山谷中留下大约 $2.13 \times 10^6 \sim 3.55 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的固体堆积物, 在适合的天气条件下, 这些堆积物有没有可能暴发泥石流, 冲出谷口, 造成更大的危害? 在这里, 我们结合前人对西藏冰川泥石流研究得出的冰川泥石流沟的判别标志, 来说明这个问题 (表 3)。对于表中标志的计算, 本文根据 1957 年航测、1966 年调绘和 1968 年出版的 1:5 万地形图。

在表 3 备注栏中, “是”表示符合最有利于冰川泥石流暴发, “否”代表不符合。可以看出, 本次崩塌区的标志参数有 5 个指标符合最有利于冰川泥石流暴发, 其他 5 个不符合, 但除了全流域相对高差外, 都符合冰川泥石流沟判别标志的变化范围。说明本区在合适的天气条件下, 发生泥石流的可能性

表 3 冰川泥石流沟的判别标志

Table 3 The differentiation mark of glacier debris flow gully

标 志	标志变化范围	最有利于冰川泥 石流暴发的标志	本区标志	备注
全流域面积 (含堆积扇)	7~ 90 km ²	15~ 32 km ²	12 km ² 左右	否
全流域相对高差	2 500~ 3 858 m	> 3 000 m	< 2 000 m	否
基岩坡地、高山灌丛、草甸面积 (不含堆积扇)	12% ~ 86%	> 35%	> 80%	是
不含泥石流扇形地在内的森林面积比率	5% ~ 60%	14% ~ 52%	< 10%	否
冰雪水源区平均纵坡	0 196 6~ 0 814 5	> 0 500 0	< 0 5	否
冰雪水源区以下主沟床平均纵比降值	80‰ ~ 361‰	100‰ ~ 220‰	150‰	是
沟床纵剖面形状	直线形、阶梯形、凸形、凹凸形、下凹形	下凹形	下凹形	是
流域形状	瓢形、栎叶形、柳叶形、长条形	瓢形、栎叶形	瓢形	是
现代冰川、积雪面积比率	9% ~ 36%	> 10%	40% 左右	是
流域内松散固体物质储量	1× 10 ⁸ ~ 10× 10 ⁸ m ³	> 1× 10 ⁸ m ³	< 1× 10 ⁷ m ³	否

很大。这对在干河坝一带进行开发建设极为不利。

4 小结

通过上面的分析可以看出, 在全球和区域变暖的背景下, 玉龙雪山的海洋型冰川强烈退缩。这次发生在玉龙雪山的冰川崩塌事件就是在气候变暖的背景下, 冰川强烈消融, 运动加快, 突然出现干热年份的诱发, 再加上有利的地形条件, 发生的一起冰川和其周围岩体崩塌事件。通过分析其相邻的白水 1 号冰川的近期变化, 发现这次冰体崩塌可能是本区冰川强烈消融的另一种形式。

另外, 冰川的变化也带动冰缘环境以及高山永冻带的变化, 这些变化可能对山体的稳定性造成影响, 目前对这方面的研究还比薄弱, 今后在本区应加强这方面的观测。

最后, 这次冰岩体崩塌在干河坝源头的山谷内留下了长度约为 2 000 m, 宽约为 250 m, 体积大约为 $2.13 \times 10^6 \sim 3.55 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的固体堆积物。这些物质堆积在谷底, 没有冲出谷口。通过对冰川泥石流沟判别标志的判断, 发现这些堆积物在合适的天气条件下很容易发生泥石流, 因此, 对本区的开发建设应该慎重考虑。

参考文献 (References)

[1] W Haerberli and M Beniston Climate change and its impacts on glaciers and permafrost in the Alps[J]. *AMBIO*, 1998, 27(4): 258~ 265

[2] Jones P D, New M, Parker D E, *et al* Surface air temperature and its changes over the past 150 year[J]. *Review of Geophysics*, 1999, 37(2): 173~ 199

[3] Ding Yongjian, Response of cryosphere to climatic warming since

1980 over the Northern Hemisphere[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1996, 18(8): 131~ 137[丁永建. 1980 年以来冰冻圈对气候变暖响应的若干证据 [J]. 冰川冻土, 1996, 18(8): 131~ 137]

[4] Wang Ninglian, Yao Tandong. Evidences for global warming in the 20th century from cryosphere[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2001, 16(1): 98~ 105[王宁练, 姚檀栋. 20 世纪全球变暖的冰冻圈证据 [J]. 地球科学进展, 2001, 16(1): 98~ 105]

[5] Charles Harris, Daniel V onder M uhl, Ketil Isaksen, *et al* Warming permafrost in European mountain[J]. *Global and Planetary Change*, 2003, 39: 215~ 225

[6] J Noetzi, M Hoelzle and W Haerberli Mountain permafrost and recent Alpine rock-fall events a GIS-based approach to determine critical factors[J]. *Geophysical Research Abstracts*, 2003, 5: 10169

[7] Kotlyakov V M, Rotshcheva O V, and Nosenko G A. The September 2002 Kolka glacier catastrophe in North Ossetia, Russian Federation: evidence and analysis[J]. *Mt Res and Dev.*, 2004, 24(1): 78~ 83

[8] Wei Haixia. The analysis of meteorologic cause of A, nyanqen mountain icefall[J]. *Guo Luo Science and Technology*, 2006, 1: 1~ 7[卫海霞. 阿尼玛卿雪山冰崩自然灾害气象成因分析 [J]. 果洛科技. 2006, 1: 1~ 7]

[9] He Yuanqing, Yao Tandong, Yang Meixue, *et al* Contemporary significance of snow and ice indicated by the record in a shallow ice core from a temperate glacier in southwestern monsoon region[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2000, 22(3): 235~ 242 [何元庆, 姚檀栋, 杨梅学, 等. 玉龙雪山温冰川浅冰芯记录现代指示意义 [J]. 冰川冻土, 2000, 22(3): 235~ 242]

[10] Zhao Xiaojiao. Pleistocene glaciation at the eastern foot of Mountain Yulong[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1999, 21(3): 242~ 248[赵希涛. 玉龙雪山东麓更新世冰川作用 [J]. 冰川冻土, 1999, 21(3): 242~ 248]

[11] Pu Jianchen (ed). Glacier Inventory of China(V III): The Yangtze River Drainage Basin[M]. Lanzhou: Gansu Culture Press, 1994. [蒲健辰编. 中国冰川目录 VIII——长江水系 [M]. 兰州: 甘肃文化出版社, 1994]

[12] Zhao Xiaojiao, Zheng Benxing, Xiao Zerong, *et al* Report of Tour Resource Planning and the In-depth Development of Glacier Park in

- Yulong Snow Mountain [R]. Beijing: Institute of Geology and Geophysics Chinese Academy of Sciences, 1998 [赵希涛, 郑本兴, 肖泽榕, 等. 玉龙雪山冰川公园旅游资源调查、规划和深层次开发研究报告 [R]. 北京: 中国科学院地质研究所, 1998]
- [13] Zhang Zhonglin. Numerical simulation and sensitivity analysis of representative temperate-glacier to climatic change in China [D]. Lanzhou: A dissertation submitted to Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute (CAREERI) Chinese Academy of Sciences (CAS) for the degree of Doctor of Philosophy, 2005: 69~74 [张忠林. 中国代表性海洋型冰川对气候变化的数值模拟与敏感度分析 [D]. 兰州: 中国科学院寒区寒区环境与工程研究所, 2005: 69~74]
- [14] He Yuanqing, Zhang Zhonglin, Yao Tandong, *et al.* Modern changes of the climate and glaciers in China's monsoon temperate glacier region [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58 (4): 550~558 [何元庆, 张忠林, 姚檀栋, 等. 中国季风温冰川区近代气候变化与冰川动态 [J]. 地理学报, 2003, 58 (4): 550~558]
- [15] He Yuanqing, Zhang Dian. Climatic warming is the major reason for glacier retreat on Mt Yulong, China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26 (2): 230~231 [何元庆, 章典. 气候变暖是玉龙雪山冰川退缩的主要原因 [J]. 冰川冻土, 2004, 26 (2): 230~231]
- [16] Lü Ruren, Tang Bangxing and Zhu Pingyi (ed.). *Debris Flow and Environment in Tibet* [M]. Chengdu: Chengdu Science and Technology University Press, 1999: 91~92 [吕儒仁, 唐邦兴, 朱平一主编. 西藏泥石流与环境 [M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1999: 91~92]
- [17] Michael C R Davies, Omar Hamza and Charles Harris. The effect of rise in mean annual temperature on the stability of rock slopes containing ice-filled discontinuities [J]. *Pemforst and Periglacial Processes*, 2001, 12: 137~144
- [18] Tang Chuan, Huang Chuxin, Wang Ye. Lijiang earthquake and the induced rock falls and slumps in Yunnan [J]. *Journal of Natural Disasters*, 1997, 6 (3): 76~84 [唐川, 黄楚兴, 万晔. 云南省丽江大地震及其诱发的崩塌滑坡灾害特征 [J]. 自然灾害学报, 1997, 6 (3): 76~84]
- [19] Zheng Benxing. Quaternary glaciation and glacier evolution in the Yulong Mountain, Yunnan [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2000, 22 (1): 53~61 [郑本兴. 云南玉龙雪山第四纪冰期与冰川演化模式 [J]. 冰川冻土, 2000, 22 (1): 53~61]
- [20] Ren Meifei. Geomorphology in Lijiang and Mt Yulong [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Yunnan*, 1957, 4: 9~18 [任美镛. 丽江和玉龙雪山地貌的初步研究 [J]. 云南大学学报 (自然科学版), 1957, 4: 9~18]
- [21] Su Zhen, Zhu Guocai, Pu Jianchen *et al.* Prospect of fluctuation and utilization of resources of glaciers in the Hengduan Mountain region [A]. In: Li Jijun, Su Zhen (ed.), *Glaciers in the Hengduan Mountains* [C]. Beijing: Science Press, 1996: 125~133 [苏珍, 朱国才, 蒲健辰, 等. 横断山冰雪资源和冰川变化预测 [A]. 见: 李吉均, 苏珍 主编, 横断山冰川 [C]. 北京: 科学出版社, 1996: 125~133]
- [22] Su Zhen, Liu Shiyin, Wang Ninglian. Glacier changes on the Hengduan Mountain and their response to climatic fluctuations [J]. *Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition)*, 2000, 23 (4): 203~210 [苏珍, 刘时银, 王宁练. 横断山冰川变化及其对气候波动的响应 [J]. 南京师范大学 (自然科学版), 2000, 23 (4): 203~210]
- [23] Houghton JT, Ding YH, Griggs D *et al.* *Climate Change 2001: The Scientific Basis* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001: 554~557

The Analysis of Icefall at Mt Yulong

ZHANG Ningning¹, HE Yuanqing^{1, 2}, HE Xianzhong³, PANG Hongxi¹, ZHAO Jingdong¹

(¹ Key Laboratory of Cryosphere and Environment, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS,

Lanzhou 730000, China; ² Institute of Tibetan Plateau Research, CAS, Beijing 100029, China;

³ The Jade Dragon Snow Mountain Tourism Development Administrative Committee, Lijiang 674100, China)

Abstract On 12 Mar. 2004, a violent natural landslide happened at the east slope of Mt Yulong Lijiang region Yunnan province. And at 2005 the similar landslide happened again. In order to realize what caused this landslide, we got to the locale of landslide on 21 Apr. and 7 May 2006 for two times and found it was a ice-rock avalanche event. Based on meteorological observations from Lijiang, it can be easily found that the mean annual temperature in Lijiang region was rose gradually. In this case, the stability of glacier and rock wall is likely destroyed, especially at 2003 and 2005, the average temperature is 0.8°C and 1.04°C higher than the average temperature from 1951 to 2005 respectively, but at the same time, the precipitation at 2003 and 2005 is 66.7 mm and 133.3 mm less than the mean yearly precipitation from 1951 to 2005. That is to say, 2003 and 2005 are two extremely hot-dry years in Lijiang region. At last, this event remained about $2.13 \times 10^6 \sim 3.55 \times 10^6 \text{ m}^3$ solid mass, if there is a suitable weather condition, the solid mass will run off as debris flow.

Key words climatic warming; landslide; debris flow; Mt Yulong temperate glacier