

新疆叶尔羌河冰川湖突发洪水研究*

张祥松 李念杰 由希尧 王万祥

(中国科学院兰州冰川冻土研究所) (新疆水利厅水文总站)

摘 要

叶尔羌河的突发性洪水,系冰川阻塞湖的突然排水所致,排水方式为冰下水道的迅速扩大,克勒青河上游克亚吉尔冰川与特拉木坎力冰川是这种洪水的主要策源地。到本世纪末,随着全球性的气候变暖,冰川后退变薄,冰川阻塞湖及其爆发洪水的规模将日益变小。从而揭开了新疆叶尔羌河突发性洪水之谜。

关键词: 叶尔羌河,冰川湖突发洪水,冰川进退变化,冰川湖排水方式,数值模拟计算

冰川湖突发洪水在科技文献中通常称 Jokulhlaups,又叫冰川湖突发洪水,简称 GLOF (Glacier Lake Outburst Flood 的缩写)。GLOF 的问题,在冰岛、秘鲁、瑞士、加拿大、苏联、美国、尼泊尔等国所引起的灾害均得到重视。新疆叶尔羌河与西藏地区冰川湖突发洪水危害之烈,发生之频繁,世界上只有美国阿拉斯加地区可与之相比。本文论述叶尔羌河冰川洪水成因与趋势预测及有关问题。

一、洪水灾害及特征分析

新疆南部叶尔羌河主要发源于喀喇昆仑山北坡,塔里木盆地南侧,是南疆喀什地区最大河流(图 1),水量丰沛,正常年径流 $63.75 \times 10^9 \text{m}^3$ 。下游出山口处卡群水文站(海拔 1420m),多年平均流量为 $202 \text{m}^3/\text{s}$,径流深 132.6mm。

自 1953 年卡群水文站建站至今,先后发生过突发性洪水 15 次,洪水发生的时间及其洪峰流量如图 2 所示。

1961 年 9 月 4 日 4 时至 9 月 5 日 3 时,卡群水文站,在短短的 20min 内,由 $806 \text{m}^3/\text{s}$ 的起始流量陡急的上升到 $6270 \text{m}^3/\text{s}$ 的洪峰流量(图 3)。这种突发性洪水以起涨快、涨率大,洪峰高、洪量小,洪水时间短暂,水文过程线呈尖瘦单峰型,多为后发性洪水,故危害更大等为其主要特点。它与冰雪融水型洪水及暴雨洪水相比,无论在洪水发生的气象状况,流量过程线特点,洪水总量及洪峰流量关系等等方面均有明显差别(表 1)。

叶尔羌河突发性洪水的上述特点,使我们很自然地将其成因与冰川湖泊的突发洪水联系

本文 1988 年 8 月 9 日收到,1989 年 3 月 23 日收到修改稿。

* 国家自然科学基金资助项目与新疆维吾尔自治区下达任务的研究成果之一,由张祥松执笔。参加野外科学考察与提供研究资料的还有:冯清华、王彦龙、王文梯、马秋华、何元庆、丁良福、俞昕治、杨长泰、刘正、尤根祥、施维林、刘景时(中国科学院兰州冰川冻土研究所);龚方润(新疆水利厅叶尔羌河管理处);章曙明、凯色尔(新疆水利厅水文总站);王志超、陈亚宁、陈锡飞(中国科学院新疆地理研究所);李江凤、马力(新疆气象局)等。

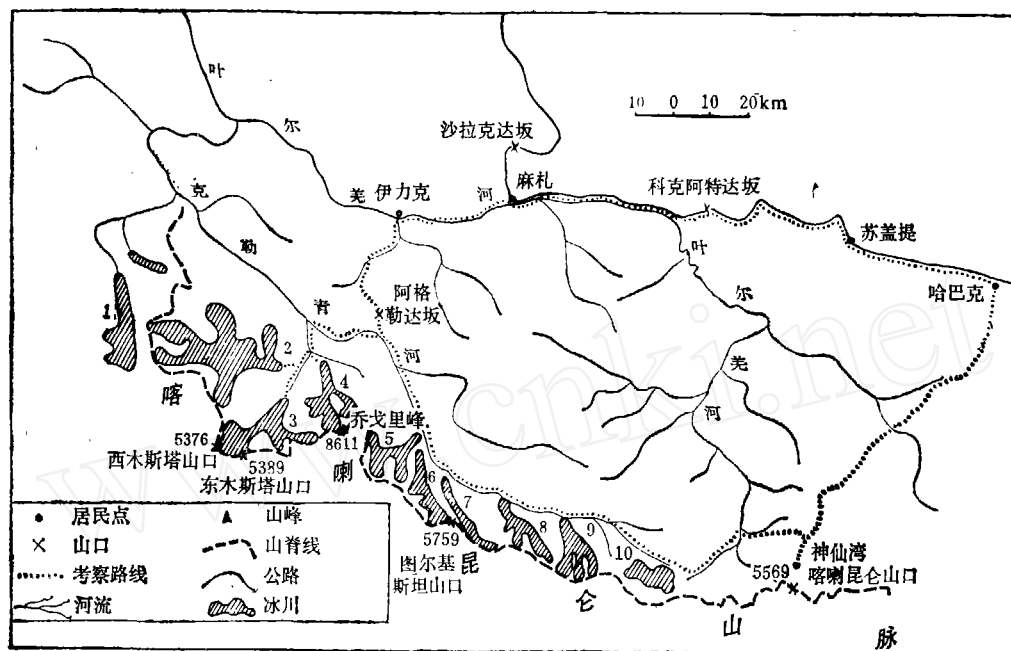


图 1 叶尔羌河上游大冰川分布示意图

(1——布拉尔杜冰川, 2——音苏盖提冰川, 3——萨波拉戈冰川, 4——乔戈里冰川, 5——迦雪布鲁姆冰川, 6——乌尔多克冰川, 7——斯坦格尔冰川, 8——特拉木坎力冰川, 9——克亚吉尔冰川, 10——胜利南大坂冰川)

表 1 不同成因洪水的特征比较

成因类型	冰川湖突发洪水	冰川融水型洪水	暴雨型洪水
特征			
与气象条件关系	持续的高温晴朗天气, 有利于冰川湖泊的突然排水	夏季持续的高温天气促使冰雪强烈消融, 降水过程反而不利	短暂而猛烈的降雨
流量过程线特点	起涨初期平缓, 以后迅速变陡直到峰值, 洪峰过后迅猛退落, 瞬时流量过程线和日平均流量过程线完全一致	流量有明显的日变化规律, 每天最大值与最小值出现时间基本不变, 随着气温升高流量逐渐增大, 涨落缓慢, 过程线肥胖, 持续时间长	出现的时间、强度与暴雨出现的时间、强度相对应, 尖锐的洪峰, 洪水起涨和落平几乎相等的迅速, 突然发生和结束
洪峰流量与洪水总量之间的关系	洪峰流量大, 但洪水总量却不一定很大	洪峰流量小于冰川湖有关洪水, 但洪水总量却远大于后者	因地面冻结与否, 暴雨在流域内位置、强度与持续时间差异, 使洪峰流量与洪水总量关系有很大差异, 兼具冰川湖排水与冰雪融水量两者情况
洪水发生时间	主要发生在晚夏和初秋非地区性, 多为后发性洪水, 故危害更大	盛夏冰川强烈消融期, 表现为明显地区性的特点	主要发生在夏秋, 在中小型流域范围内

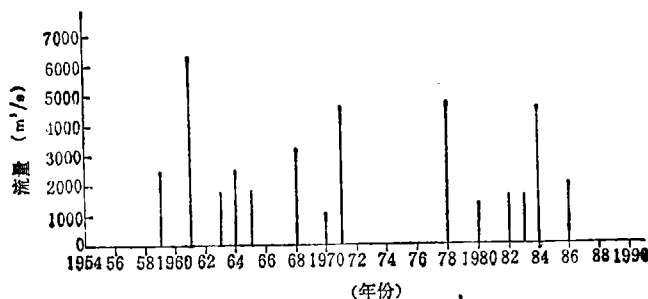


图 2 叶尔羌河卡群站突发洪水的洪峰流量及发生年份图

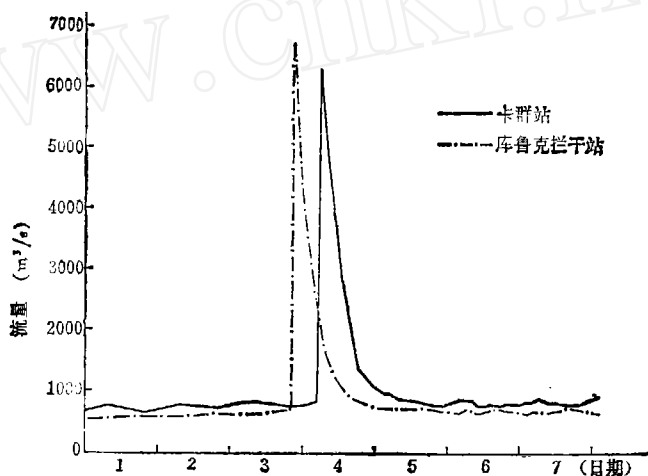


图 3 叶尔羌河 1961 年 9 月突发洪水过程线

起来。

二、突发性洪水的成因

突发性洪水,除暴雨成因外,还包括任何天然坝(如山崩、滑坡和泥石流形成的阻塞坝)和人工坝溃决所引起的洪水^[1]。

通过 1985—1987 年连续三年的野外实地调查证明,造成叶尔羌河流域突发性洪水灾害的成因是:克勒青河上游克亚吉尔冰川和特拉木坎力冰川的阻塞湖突然排水所致,其他成因的突发性洪水可以基本排除。历次突发洪水均源自克勒青河,而与叶尔羌河上流干流及其西部支流——塔什库尔干河无关,克勒青河上游的冰川阻塞湖是突发洪水的主要策源地。其主要证据如下:

1. 1986 年 8 月 14 日和 1987 年 8 月 5 日,叶尔羌河均发生突发性洪水,其洪峰流量分别为 $1980\text{m}^3/\text{s}$ (在卡群站) 和 $1500\text{m}^3/\text{s}$ (在特拉木坎力冰川末端附近水文断面)。洪水后进行考察证实,克亚吉尔冰川阻塞湖均已排空,证明洪水确实源自该冰川阻塞湖;

2. 地貌调查证实: 叶尔羌河岔河口以下 10km 及其支流克勒青河中段,谷地宽达 $1\sim 2\text{km}$,山崩、坍方、滑坡难以阻塞如此宽阔的谷地;谷地中降水稀少,年降水量不足 200mm ,呈

现荒漠景观,谷坡上无暴雨冲刷形成的冲沟发育;

3. 据冰川地貌特征鉴别,所有大小冰川均为常态冰川,没有短期内快速前进的跃动冰川发育。虽然存在冰内、冰下湖泊及冰川边缘湖泊的突然排水现象,但在夏秋之间只能形成数百个流量的洪水;

4. 洪水调查及洪水在冰川上与植被上的表现证实,大洪水亦源自克勒青河谷地上游。克勒青河谷地(自源头至与干流汇合处)洪水遗迹保存良好,为进行洪水调查提供了有利条件。特别是斯坦格尔冰川冰舌末端的一段长约 400m 的峡谷,控制条件良好,计算洪峰流量最为理想。1985 年 5 月,我们选择并测量了四个洪痕断面,各断面间的洪峰流量,应用谢才-曼宁公式计算结果分别为: $Q_{1-2} = 8483\text{m}^3/\text{s}$, $Q_{2-3} = 7613\text{m}^3/\text{s}$, $Q_{3-4} = 8153\text{m}^3/\text{s}$, 取其平均值为 $8080\text{m}^3/\text{s}$ 。考虑到洪峰流量的沿程削减,基本上可以和 1984 年 8 月 30 日卡群水文站(相距约 500km)的洪峰流量 $4570\text{m}^3/\text{s}$ 相对应。此外,根据不同时期拍摄的航空像片、地形图和考察者记述发现,克勒青河上游五条大冰川: 克亚吉尔冰川、特拉木坎力冰川、斯坦格尔冰川、乌尔多克冰川和迦雪布鲁姆冰川的“小冰期”终碛,均为历次突发洪水冲刷破坏,仅在谷地中留下众多呈半掩埋的大漂砾;洪水后,在伸入克勒青河谷地的大冰川末端出现直立的冰崖,冰崖脚下无任何岩屑堆积,冰崖附近谷地上有大小不一的沉陷坑,并分布着巨大的冰川冰块;大漂砾表面洁净,无尘埃堆积,大漂砾后缘出现巨大的回水坑。谷地两边有大批倒伏的红柳灌丛,均表明新近经受过大洪水的冲刷。

叶尔羌河上游干流的洪水调查表明,历史上最大洪峰流量仅 $1000\text{m}^3/\text{s}$ 左右,说明数千个流量的洪水不可能源于上游干流。而且,历次大洪水,从库鲁克拦干水文站至卡群水文站之间传播的时间大致相等,表明在此区段内洪水无出无入,证明突发性洪水均来自克勒青河,而与塔什库尔干河无关。

三、冰川湖突发洪水与冰川进退变化关系 (图版 I, 图版 II)

克勒青河为纵向谷地,流向大致与喀喇昆仑山主山脊平行。因此,源于喀喇昆仑山主山脊北坡的冰川多为横向冰川,冰川前进阻塞主谷形成冰川阻塞湖。冰川退缩或冰川坝的局部破坏就会发生冰川湖突发洪水。所以,冰川进退变化对冰川阻塞湖的形成与破坏有直接的关系。克勒青河上游有五条大冰川,有可能阻塞主谷形成冰川阻塞湖,从而有发生突发洪水潜在威胁。这些冰川的若干特征如表 2。

表 2 克勒青河上游可能阻塞谷地的冰川若干特征

冰川名称	长 度 (km)	面 积 (km^2)	末端海拔 (m)	粒雪线海拔 (m)	最高点海拔 (m)	冰舌下伸空间 (m)	冰川作用高差 (m)
克亚吉尔	22	105.6	4700	5400	7220	700	2520
特拉木坎力	24	124.5	4550	5400	7250	850	2700
斯坦格尔	24	83.5	4430	5200	6460	770	2030
乌尔多克	23	97.6	4370	5350	8068	980	3698
迦雪布鲁姆	20	119.8	4350	5350	8047	1000	4137

对上述冰川的进退变化研究结果,以及对比不同时期的文献资料和图件,我们发现:

1. 自本世纪 20 年代以来克亚吉尔冰川至少有两次前进时期，一次在 20 年代有 Mason^[2] 和 Desio^[3] 的记述及地形图为证；另一次是 70 年代，为 1976 年拍摄的航空像片、1978 年航测地形图，以及 1978 年 7 月 18 日的陆地卫星影像所证实^[4]。克亚吉尔冰川本世纪内的两次前进均阻塞克勒青河谷地形成冰川阻塞湖，从而造成一系列洪水灾害。这与喀喇昆仑山南坡印度河上游协约克河的冰川洪水情况时间上是一致的^[4,5]。

2. 克亚吉尔冰川阻塞湖的规模有明显的季节变化。随着盛夏到来，冰川消融强烈，冰雪融水大量补给，使冰川阻塞湖迅速扩大，水位升高。如 1986 年 7 月 20 日至 7 月 25 日间，每日湖水位平均上升 1.34m，湖泊长度增加 75m。

3. 克亚吉尔冰川与特拉木坎力冰川上游侧的克勒青河谷地两侧谷坡上发育了不同时期形成的古湖水位线。以前者为例，自最高水位线至谷底，高差为 74.5m，其间有 134 条湖水位线，自高处往下，湖水线逐渐变密。湖水位线坎宽平均 1—1.4m，最宽达 4m 以上。古湖水位线绝大部分由松散的湖相堆积物所组成，但高处的有些古湖水位线在基岩（矽质页岩）上显现，最宽的可达 1.5m。众多而规模巨大的古湖水位线，不仅反映古冰川阻塞湖的长期反复形成与消失的历史，而且也间接证明冰川频繁的进退变化和冰川厚度即冰川坝高度的变化。

4. 兰州大学地理系 ¹⁴C 实验室对特拉木坎力冰川上游侧的克勒青河谷地北侧，古湖水位线上沉积物的 ¹⁴C 绝对年代测定结果如表 3 所示。从表 3 以及乌尔多克冰川末端高 60—72m 的羊背岩残丘、斯坦格尔冰川末端高 80—90m，长 400—500 的峡谷、特拉木坎力冰川末端的冰下峡谷等等，无不证明：至少从晚更新世冰期以来，这些冰川长期紧靠对岸谷壁，古冰川阻塞湖就早已存在，形成长期的冰川湖突发洪水灾害。

表 3 特拉木坎力冰川古冰川阻塞湖湖水位线的 ¹⁴C 年代测定

样品编号	标本物质	离谷底的高度 (m)	测定年代(距公元 1950 年)
13	砾石、砂土混合物	12	29720±590 年
17	砾石、砂土混合物	50	24420±310 年
11	砾石、砂土混合物	52	19795±170 年
14	钙膜	54	5975±65 年
16	粉砂	64	19045±365 年

四、克亚吉尔冰川阻塞湖的排水方式(图版 I, 图版 I_I)

不同成因的冰川阻塞湖，其排水方式不同，即使同一成因的冰川阻塞湖，也可因具体条件的差异而有明显区别。1985—1987 年的野外调查表明，克亚吉尔冰川阻塞湖的排水方式为冰下水道的迅速扩大所致，全部湖水从冰下水道迅速外泄，直到排空。洪水过后，冰川坝完好保存，冰下水道出、入口变成清晰可见，以后，由于冰川冰的塑性变形或上覆冰层的坍塌而重新堵塞湖水。它与喜马拉雅山的冰碛阻塞湖^[6,7]由于冰碛坝溃决而快速排水截然不同。亦和冰岛伐特纳冰帽的冰下湖泊的排水明显有异^[8]，其主要原因是：克亚吉尔冰川下段的冰川冰，上覆于克勒青河谷地，冰床上广泛存在着与冰川阻塞湖走向一致而大小不一的奈氏水道(Nye-Channels，系切入基岩或岩块的一种冰下水道类型，比较稳定，不易阻塞)有利于阻塞湖的冰下排水。1976 年 10 月拍摄的航片及 1981 年出版的 1:50000 航摄地形图上清晰可见，在克亚吉尔

冰川冰舌下段的主谷地上游侧,有一条长 850m 左右,高 73m 的冰崖,显系较长时期的冰下排水,在重力作用下引起的断裂。从地形图上冰面等高线的形态也清晰地表现了冰下水道的大致位置。

根据 50 年代以来,叶尔羌河历次冰川湖突发洪水发生前后的气象状况分析,我们认为:有利于冰下水道迅速扩大的气象条件是夏秋之间强烈消融期末持续较长时间的高温。冰川湖突发洪水的发生与降水却无直接关系。

五、冰川湖突发洪水的数值模拟计算

从本世纪 70 年代晚期以来,随着冰川湖突发洪水研究的日益深入,模拟突发性洪水事件的数值计算模型已有非常可观的进展。研究者们根据不同成因的洪水,已提出了不少模型。我们根据克亚吉尔冰川阻塞湖和特拉木坎力冰川阻塞湖的具体情况,选用 Clarke 的模型^[9],模拟计算两湖共同作用下,1984 年 8 月 30 日突发洪水,在特拉木坎力冰坝下泄流的坝后出流过程线。

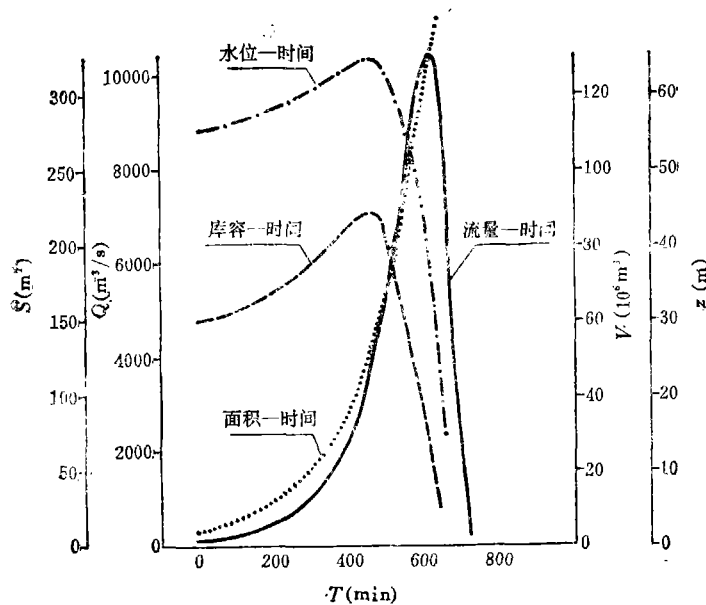


图 4 数值模拟计算的 1984 年 8 月 30 日洪水时,特拉木坎力冰川阻塞湖处的水文过程线

水温度为 2.2℃,冰温度取 0℃。模拟计算结果见图 4。

数值模拟结果表明:在克亚吉尔冰川阻塞湖和特拉木坎力冰川阻塞湖共同作用下,以冰下水道不断扩大的方式排水,可形成最大洪峰流量为 10420m³/s,排水管道最大直径 20m。这与 1985 年 4 月在特拉木坎力冰川末端处洪水调查计算当时的最大洪峰流 10480m³/s 非常接近。从图 4 可见,洪水流量(Q)、排水道截面积(S)、湖水量(V)以及湖水位(z)在排水过程中随时间的变化。水文过程线的形态比较确切的反映了突发性洪水的全过程。上述计算表明 Clarke^[9] 的洪水模型有一定的普遍意义。应用 Clarke 模型的关键在于模拟计算有关输入数据的精确测量,以及边界条件和参数的选择(如冰下排水道的糙率和初始截面积的选

模拟计算中假设克亚吉尔特索湖排水进入特拉木坎力冰川阻塞湖后,特拉木坎力冰川坝即开始排水,1985 和 1987 年调查,该次洪水为冰坝下泄流,因此以湖水位不超过坝高的 $\frac{9}{10}$ 控制。并假设冰下排水道为直而圆的,与河床坡度一致的排水管道。计算中输入的基本参数为:冰坝高度 70m,在排水初始,水深 55m,最大水深为冰坝高度的 $\frac{9}{10}$,等于 63m。排水道长度取 800m,糙率取 0.02,入湖水量 $Q = f(t)$,湖

择)。

六、冰川湖突发洪水的变化趋势预测

根据到本世纪末全球性气候变化的趋势推测,喀喇昆仑山冰川进退变化动态,以及气候变化与冰川进退之间的相互关系分析,可以对本区冰川湖突发洪水的未来趋势作如下预测:随着全球性气候变暖,冰川消融量不断增加,引起冰川末端后退,厚度变薄。 10^2 — 10^3 年时间尺度的冰川变化均处于退缩的总背景下,本世纪内 10 年计的冰川小的前进脉动刚刚过去。现以克亚吉尔冰川和特拉木坎力冰川而言,正处于前进高潮已过,相对稳定和已开始后退变薄的情况。由于冰川对气候变化时间上的滞后,使到本世纪末冰川末端所反映的可能是本世纪 60—70 年代印度洋季风降水近百年来最少的时段。预期在本世纪末下世纪初气温日益升高的气候条件下,冰川必将后退变薄。而冰川湖突发洪水的规模又取决于冰坝高度,即冰川厚度。因此,我们认为:

1. 到本世纪末,冰川湖突发洪水的规模将日益变小,可以有把握的说,发生高达数千流量的突发性洪水将不大可能再出现;

2. 冰下空穴储水,不因冰川后退变薄而减少。相反,在冰川作用衰减的情况下,消融量变大,冰雪融水增多,冰川运动速度变慢,冰内,冰下空穴储水将明显扩展。储水空穴的突然释放引起数百个流量的小洪水将会比以前频繁些;

3. 克勒青河流域有冰川湖突发洪水潜在威胁的五条冰川:克亚吉尔冰川、特拉木坎力冰川、斯坦格尔冰川、乌尔多克冰川和迦雪布鲁姆冰川,主要均由规模大致相仿的两大冰流组成。即使今后相当长时间内冰川不断退缩,预测不会出现北美洲阿拉斯加那样的湖^[10],即冰川阻塞湖是由于支冰川退缩后出现空谷地,主冰川的冰阻塞支冰川空谷地所形成;

4. 喀喇昆仑山主山脊与克勒青河谷地的流向大致平行的地形格局,不因冰川退缩或气候变化而发生根本改变。因此,无论什么时候,发育于喀喇昆仑山主山脊北坡的横向冰川前进阻塞克勒青河谷地,形成冰川阻塞湖而造成冰川湖突发洪水的潜在威胁将长期存在;

5. 根据周期性快速前进的跃动冰川的地貌特征分析,本区的冰川均属于常态冰川,无需担心因冰川跃动而突然前进,形成谷地阻塞,造成冰川湖突发洪水。而常态冰川的进退变化受气候变化所制约。

七、结 论

综上所述,关于喀喇昆仑山叶尔羌河突发性洪水问题,可获如下结论:

1. 新疆叶尔羌河的冰川湖突发洪水以起涨快、涨率大、洪峰高、洪量小,洪水时间短暂,水文过程线呈尖瘦单峰型,多为后发性洪水,故危害更大等特点。它与其它成因的突发性洪水均有明显差别;

2. 本区突发性洪水的成因是克勒青河上游冰川阻塞湖的突然排水,其方式为冰下水道的迅速扩大。故可以称为冰川湖突发洪水,简称为 GLOF;

3. 1985—1987 年洪水调查发现,叶尔羌河流域 GLOF 的策源地为克勒青河上游冰川阻塞湖,而与叶尔羌河上游干流及塔什库干河无直接关系;

4. 源于喀喇昆仑山北坡的五条横向冰川的进退变化与 GLOF 问题关系非常密切,大量的

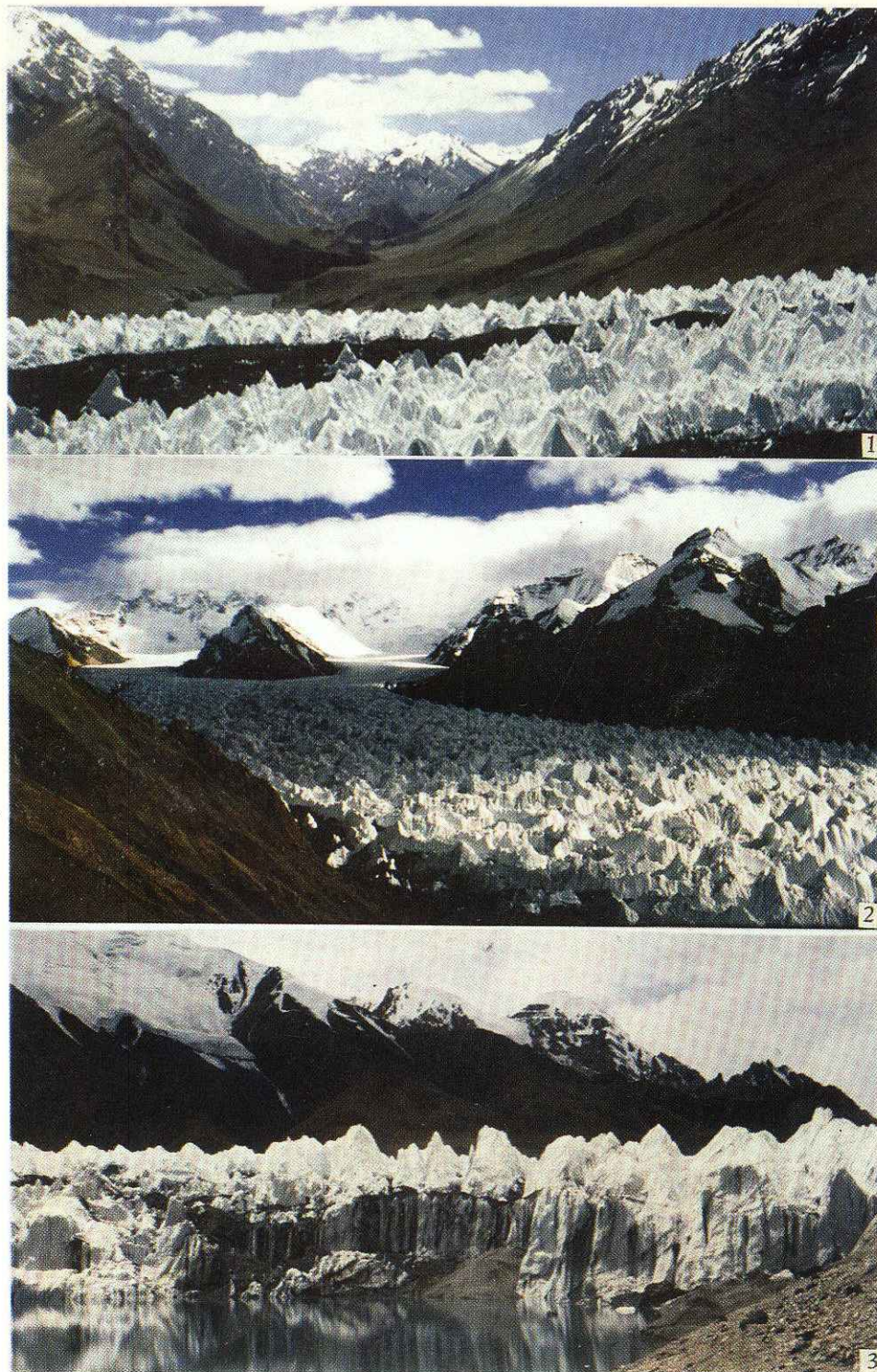
地貌现象及沉积物 ^{14}C 测年证实, 至少从第四纪末次冰期以来, 叶尔羌河流域 GLOF 问题长期反复出现。本世纪内至少有两次冰川阻塞湖形成时期, 即 20—30 年代以及 60—70 年代以来;

5. 计算机数值模拟结果表明, 应用 Nye^[11] 所提出, 以后又为 Clarke^[9] 所发展的理论模型, 可预报克亚吉尔冰川阻塞湖和特拉木坎力冰川湖共同作用下的突发性洪水的水文过程线和最大洪峰流量;

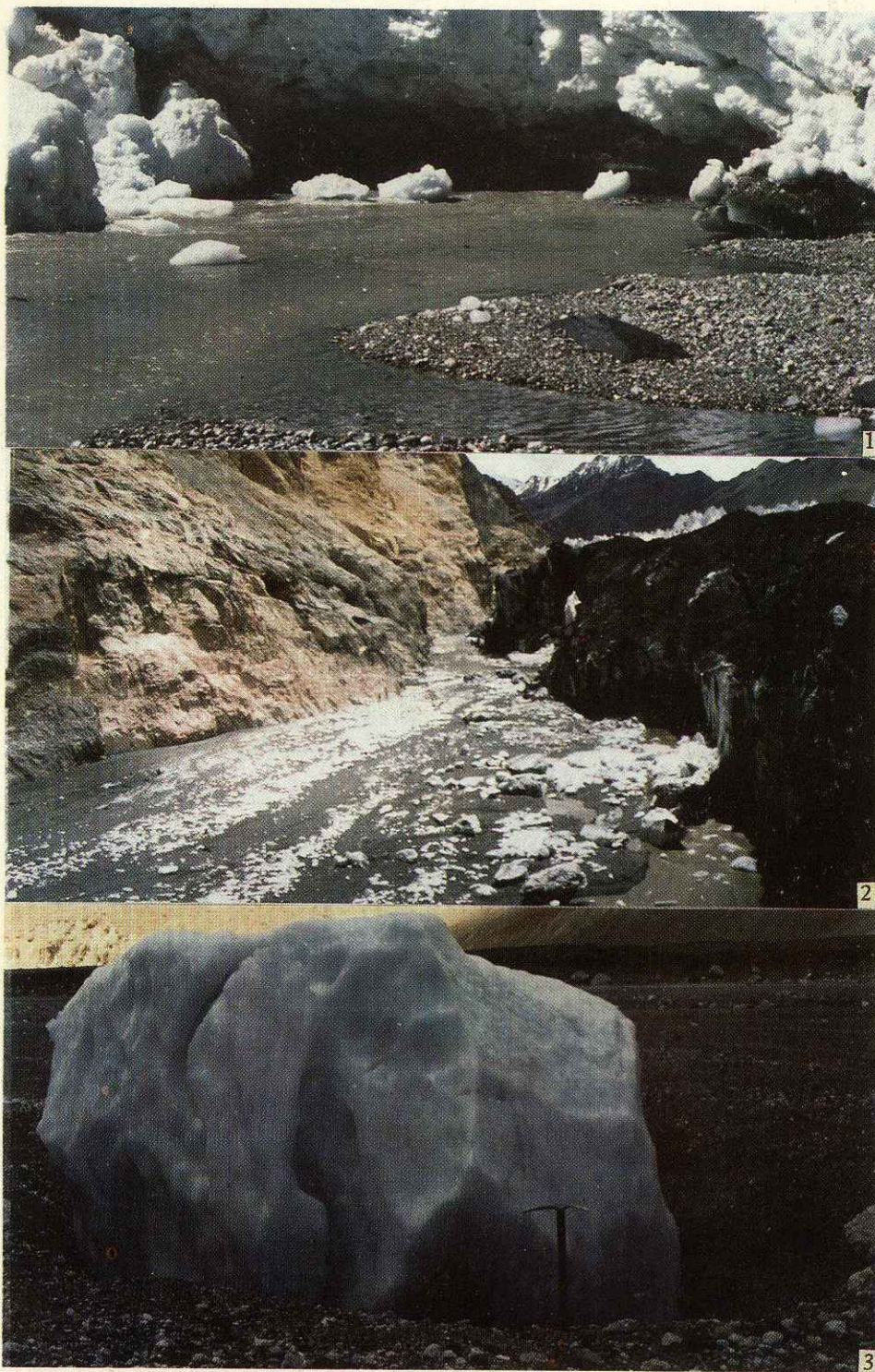
6. 至少到本世纪末, 随着气候变暖, 冰川不断后退变薄, 冰坝高度将逐渐降低, 甚至消失。因此, 叶尔羌河流域 GLOF 的危害将日益减小。

参 考 文 献

- [1] IAHS-UNESCO-WMO, *Flash floods, Proc. Paris Symposium*, Bartholomew Press, Dorking, Surrey, U. K., 1974.
- [2] Mason, K., *Record Surv., India*, 22(1927), 182.
- [3] Desio, A., *Geogr. J.*, 75(1930), 402—411.
- [4] Hewitt, K., *IAHS, Publ.*, 138(1982), 259—269.
- [5] Mason, K. et al., *Himalaya J.*, 2(1930), 35—47.
- [6] Vvichard, D. & Zimmermann, M., *Mountain Research & Developments*, 6(1986), 90—94.
- [7] Ives, J. D., *ICIMOD, Occasional Paper*, No.5, Kathmandu, Nepal, 1986.
- [8] Thorarinsson, S., *Jökull, Ar.*, 4(1954), 34—37.
- [9] Clarke, G. K. C., *J. Glacio*, 28(1982), 3—21.
- [10] Stone, K. H., *Ann. Ass. Am. Geogr.*, 53(1963), 332—349.
- [11] Nye, J. F., *J. Glacio*, 17(1976), 101—207.



1. 横拦克勒青河谷地的特拉木坎力冰川下段, 2. 克亚吉尔冰川全景, 3. 克亚吉尔冰川阻塞湖及其部分冰坝。



1. 1987年8月5日洪水后，克亚吉尔冰川湖基本排干，冰下排水道入口清晰可见，2. 1987年8月5日洪水爆发时，在特拉木坎力冰川末端处洪水挟带了大量的冰川冰块，3. 1986年8月12日洪水在克勒青河谷地遗留的巨大冰川冰，直到1987年6月10日考察时还没有消融完。