

doi:10.7522/j.issn.1000-0240.2013.0151

Shen Yongping, Su Hongchao, Wang Guoya, *et al.* The responses of glaciers and snow cover to climate change in Xinjiang (II): Hazards effects[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(6): 1355–1370. [沈永平, 苏宏超, 王国亚, 等. 新疆冰川、积雪对气候变化的响应(II): 灾害效应[J]. 冰川冻土, 2013, 35(6): 1355–1370.]

新疆冰川、积雪对气候变化的响应(II): 灾害效应

沈永平¹, 苏宏超², 王国亚³, 毛炜峰⁴,
王顺德⁵, 韩萍², 王宁练¹, 李忠勤¹

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃兰州 730000; 2. 新疆水文水资源局, 新疆乌鲁木齐 830000;
3. 甘肃省科学院地质自然灾害防治研究所, 甘肃兰州 730000; 4. 新疆气候中心, 新疆乌鲁木齐 830002;
5. 阿克苏水文水资源勘测局, 新疆阿克苏 843000)

摘要: 新疆地区冰川、积雪广泛分布, 在其融水补给河川径流的同时, 也常伴有冰川洪水、融雪洪水、冰湖突发洪水、冰川泥石流、冰雪崩和风吹雪等冰雪灾害发生。这些灾害对当地居民居住地以及重要国防干线的安全运营形成较大威胁。冰川、积雪变化直接影响到冰雪灾害发生的程度与影响范围, 新疆的冰川洪水和冰湖突发洪水灾害主要发生在塔里木河流域的喀喇昆仑山、昆仑山以及天山南坡西部一带, 融雪洪水灾害主要发生在新疆北部的阿勒泰地区、塔城地区 and 天山北坡一带, 冰川泥石流、冰雪崩灾害主要发生在帕米尔高原、天山西段和西昆仑山地区, 风吹雪主要在天山中、西段地区。随着全球气候变暖, 尤其是新疆从1987年开始的气候由暖干向暖湿的转型, 冰川退缩加剧, 融水量增大, 冰川洪水和冰川泥石流灾害随着冰川融水径流的增加而增多; 而融雪洪水、雪崩和风吹雪随着气候变化引起的冬季积雪增加和气温升高, 其灾害强度在增强; 冰崩灾害随着气温升高引起的高山冰体崩解而呈增加趋势。在新疆地区, 冰雪灾害主要表现为冰雪洪水, 已观测到近十几年来在气候变化影响下冰雪洪水发生的频次和强度有增加的趋势, 塔里木河流域的冰湖溃决洪水和冰川洪水及北疆春季的冰凌和融雪洪水已对当地的生命财产和社会经济发展带来巨大危害, 新疆的水资源安全、灾害等问题日益凸显。预计未来, 随着气候增温引起的冰雪融水径流的增加, 相关的冰雪灾害增多, 因而增加了冰雪灾害的危险程度, 并可能形成若干新的灾害点。面对气候变化诱发的众多冰川、积雪灾害, 目前还缺乏对灾害监测、预测预警方面的适应对策。因此, 在全球气候变化不断加速的趋势下, 冰雪灾害应引起有关方面的足够重视, 加强气候变化对冰雪灾害的影响评估和适应性管理对策研究, 使科学技术在减灾方面发挥主导作用。

关键词: 冰雪灾害; 冰雪洪水; 气候变化; 适应性对策; 新疆

中图分类号: P343.6 **文献标识码:** A

0 引言

作为水资源的冰川、积雪融水是河川径流的重要补给来源, 是我国西部干旱地区绿洲农业赖以生存和发展的生命线^[1]。与雪、冰和冰川有关的灾害, 通常不太引人注目, 但是冰雪灾害地区累计的

损失代价却相当大^[2], 预计随着气候变暖, 在今后30~50 a我国西部山地的冰川洪水和冰川泥石流灾害将随着冰川融水径流的增加而增多, 还可能形成若干新的灾害点^[3]。所以, 在新疆的重大工程区和经济开发区, 要特别重视对冰雪灾害的研究和监测, 例如: 国家重点开展的新疆塔里木河流域、伊

收稿日期: 2013-10-05; 修订日期: 2013-11-20

基金项目: 全球变化研究国家重大科学研究计划项目(2010CB951404; 2010CB951402); 国家自然科学基金项目(41201062; 41271083; 41271035)资助

作者简介: 沈永平(1961—), 男, 陕西西安人, 编审/研究员, 1985年在中国科学院兰州冰川冻土研究所获硕士学位, 现主要从事寒区水文与全球变化研究及科技期刊编辑。E-mail: shenyyp@lzb.ac.cn

犁河流域治理和开发工程,必须要搞清和评估上游冰川洪水、融雪洪水和冰凌洪水爆发的频率和强度以及对下游工程的影响^[4]。

随着气候变暖,近年来我国的极端冰雪灾害事件频繁发生^[2]。如,2010年春季发生在新疆北部的严重雪灾及融雪形成的洪水灾害等,对居民的生命财产和社会经济发展带来巨大危害。总体上讲,近年来我国的冰雪灾害发生的频率呈显著增加趋势,影响范围也逐渐扩大^[2]。近30 a来,气候变暖导致的冰川加速消融,使得新疆洪水发生频率明显增大^[5],近期新疆冰川洪水灾害发生的频率和影响程度呈加大趋势^[3-8]。随着气候的进一步变暖,冰冻圈变化对我国带来的水资源安全、灾害和工程建设等问题将会日益凸显,迫切需要建立应对这些问题的策略。因此,开展全球气候变化背景下冰冻圈变化对冰雪灾害形成机理及其变化趋势的研究,具有重要的科学和现实意义。

新疆冰川和积雪融水径流在总径流中的比例可达45%以上,是河流的主要补给来源,在其积雪和冰川融水补给河川径流的同时,也常伴有冰川洪水、融雪洪水、冰湖突发洪水、冰川泥石流、冰雪崩和风吹雪等冰雪灾害发生。在新疆地区,冰雪灾害主要表现为冰雪洪水,已观测到近十几年来在气候变化影响下冰雪洪水发生的频次和强度有增加趋势^[3],塔里木河流域的冰湖溃决洪水和冰川洪水及北疆春季的冰凌和融雪洪水已对当地的生命财产和社会经济发展带来巨大危害,给新疆带来的水资源安全、灾害等问题日益凸显。为此,我们在研究新疆冰川、积雪对气候变化响应的水文效应基础上,对气候变化影响下的冰雪灾害进行分析,研究其分布规律、形成机理,提出适应气候变化的新疆冰雪灾害防灾减灾的适应性对策,使科学技术在减灾方面发挥主导作用。

1 影响冰雪灾害的主要气象因子变化

在新疆地区,冰雪灾害的形成和变化趋势主要由产生灾害的主导气象因子控制着。因此,研究分析冰雪灾害对气候变化的响应,首先要分析引起这些变化的气候因子。为此,我们结合2013年出版的《新疆区域气候报告》^[9]的有关结论,了解这些因子的变化特征,从而为论述新疆冰川、积雪对气候变化响应的灾害效应奠定基础。

1.1 温度变化

1961—2010年,新疆全区及北疆、天山山区、

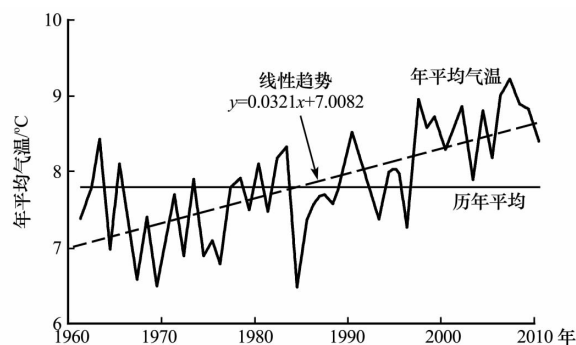


图1 1961—2010年新疆年平均气温的变化

Fig. 1 Changes in annual mean air temperature in Xinjiang during 1961—2010

南疆各分区的年和四季平均气温呈现一致的上升趋势。其中,新疆年平均气温上升趋势显著,升温速率为 $0.32\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$ (图1),高于全球近50 a升温速率 $0.13\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 和全国同期平均升温速率 $0.22\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$;北疆、天山山区、南疆各分区年平均气温变化趋势与新疆区域一致,均呈现明显的上升趋势,升温速率分别为 $0.37\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 、 $0.34\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 、 $0.26\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。1997年以后出现了明显增暖,年平均气温连续14 a持续偏高,是近50 a最暖的14 a,2000年代比1960年代升高了 $1.3\text{ }^{\circ}\text{C}$;冬季升温趋势最明显,秋季次之,夏季最弱;空间分布地区差异较小,仅南疆偏西的库车、阿克陶呈降温趋势,全疆其他绝大部分地方均呈升温趋势,且升温趋势远远大于降温趋势。新疆和北疆、天山山区、南疆各分区年和四季平均最高气温、平均最低气温均呈现显著上升趋势,其中,新疆年平均最高气温上升趋势显著,升温速率为 $0.25\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$,低于年平均气温的升温速率;年平均最低气温上升趋势显著,升温速率为 $0.54\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$,远远高于年平均气温的升温速率。

1.2 降水量变化

1961—2010年,新疆及北疆、天山山区、南疆各分区的年和四季降水量呈现一致的增多趋势。新疆年降水量增多趋势显著,增多速率为 $10.29\text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ (图2);北疆、天山山区、南疆各分区年降水量变化趋势与新疆区域一致,均呈现明显的增多趋势,增多速率分别为 $13.06\text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 、 $15.56\text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 、 $5.60\text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。1986年以前降水量变化趋势不明显,1987年以后明显增多,多数年份多于历年平均;夏季降水量增多趋势最明显,冬季和春季相当,秋季最弱;全疆绝大部

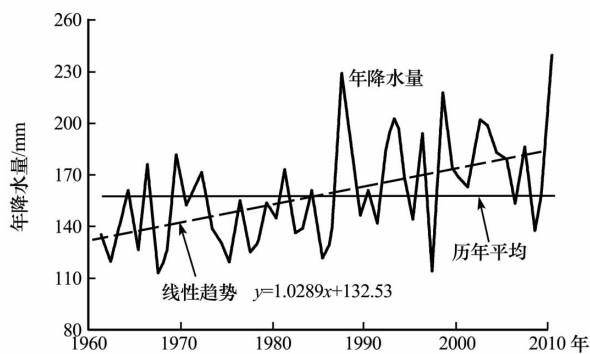


图2 1961—2010年新疆年降水量变化

Fig. 2 Changes in annual precipitation in Xinjiang during 1961—2010

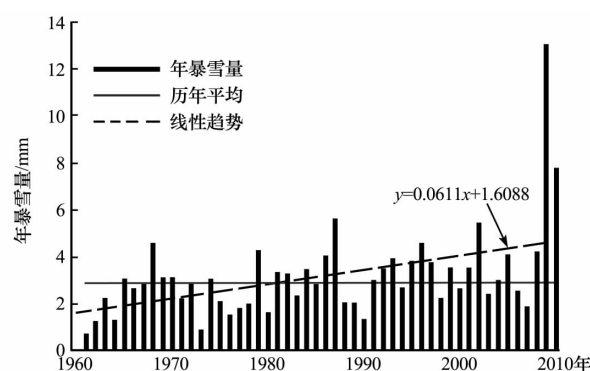


图3 1961—2010年新疆区域平均年暴雪量变化

Fig. 3 Average annual change of snow water equivalent of snow storm in Xinjiang during 1961—2010

分地方均呈现增多趋势, 空间分布地区差异较小. 新疆及北疆、天山山区、南疆各分区年日降水量 ≥ 0.0 mm 的降水日数以呈减少趋势为主, 其中新疆减少速率为 $0.42 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$; 变化趋势的空间分布地区差异明显, 北疆、天山山区和哈密以减少趋势为主, 南疆以增多趋势为主. 年日降水量 ≥ 0.1 mm 的降水日数呈显著增多趋势, 增多速率为 $1.93 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$; 全疆大部分地方呈增多趋势, 变化趋势的空间分布地区差异较小.

1961—2010年, 新疆平均日最大降水量呈明显增加趋势, 增加速率为 $0.84 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$, 说明在气候变暖的背景下, 极端强降水事件出现的概率在增大. 北疆、天山山区、南疆各分区平均日最大降水量变化趋势与新疆区域一致, 均呈现明显增加趋势, 增加速率分别为 $0.96 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 、 $1.05 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 、 $0.65 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$. 1961—2010年, 极端降水事件呈增加趋势, 其线性增加率为 $1.14 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$, 这和降水量的增加趋势是一致的. 随着年极端降水事件日数的增加, 其序列的

变率也在增加, 即极端降水事件出现的最少年为1997年, 最多年为2010年. 年代际变率也在增加, 1970年代、1980年代、1990年代、2000年代分别比上一年代极端降水事件增加了 0.5 d 、 0.8 d 、 1.2 d 、 2.2 d , 近10a的极端降水事件明显增加.

1.3 暴雪量和暴雪日数变化

在新疆区域内, 暴雪是指一昼夜24h内降雪量超过12mm或12h降雪量超过10mm. 年暴雪日数和年暴雪量指冬半年的暴雪日数和暴雪量, 例如2010年暴雪日数指2010年7月至2011年6月暴雪日数. 1961—2010年, 随着降水的增加, 新疆平均年暴雪日数呈明显增加趋势, 增加速率为 $0.03 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$. 北疆、天山山区、南疆各分区平均年暴雪日数与新疆区域一致, 均呈现增加趋势, 增加速率分别为 $0.06 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 、 $0.03 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 、 $0.01 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$. 1961—2010年, 随着降水的增加, 新疆平均年暴雪量呈明显增加趋势, 增加速率为 $0.61 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$. 北疆、天山山区、南疆各分区平均年暴雪日数与新疆区域一致, 均呈现增加趋势, 增加速率分别为 $1.07 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 、 $0.68 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 、 $0.14 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ (图3).

2 灾害的作用类型与分布

新疆地区冰川、积雪广泛分布, 在其融水补给河川径流的同时, 也常伴有冰雪灾害发生. 冰川、积雪变化直接影响到冰雪灾害发生的类型、程度与影响范围, 由于不同的气候类型和地形, 其灾害出现的类型也不同. 所以, 我们根据野外调查、文献追溯和气候记录等资料, 对新疆冰雪灾害的主要类型、成因和分布及其对气候变化的响应进行总结见表1. 新疆冰雪灾害的类型包括冰雪洪水、冰川泥石流、冰湖溃决洪水、雪灾、暴风雪、雪崩和冰崩^[2], 冰川洪水和冰湖突发洪水灾害主要发生在塔里木河流域的喀喇昆仑山、昆仑山以及天山南坡西部一带; 融雪洪水灾害主要发生在新疆北部的阿勒泰地区、塔城地区和天山北坡一带; 冰川泥石流、冰雪崩灾害主要发生在帕米尔高原、天山西段、喀喇昆仑山和西昆仑山地区, 风吹雪主要在天山中、西段地区; 冰凌洪水主要在天山北坡中段、伊犁河流域.

2.1 冰雪洪水

由冰川和积雪消融而形成的相关洪水, 我们称之为冰雪洪水, 是冰雪灾害类型中最为常见和发生地域最为广布的一类冰雪灾害^[3, 10-11], 根据成因又

表 1 新疆冰雪灾害的主要类型,成因和分布及其对气候变化的响应

Table 1 The main types, causes, and distribution of snow disasters and their response to climate change in Xinjiang

冰雪灾害类型	主要成因	分布特征	对气候变化的响应
冰雪洪水	气温上升引起的冰雪消融引发的洪水灾害	北疆大部分,冰雪分布的山地和河谷	对气候变化敏感,洪水的量和次数(强度和频次)增加
冰川泥石流	由于冰雪消融引发的泥石流灾害	在帕米尔高原,天山山区,阿尔泰山及西昆仑山	强度和频次增加,尤其人类活动加剧其强度和范围
冰湖溃决洪水	由冰川阻塞和冰川退缩形成的冰湖溃决形成的洪水	主要是在喀喇昆仑山的叶尔羌河和天山的阿克苏河源区	气温升高引起的冰川运动加速堵塞河流,及冰川冰温增加引发的冰坝变形,冰川退缩加剧冰湖库容增加,使得冰湖溃决洪水强度和频次增加
雪灾	大面积极端降雪形成的深厚积雪,引发的对牲畜食草和冻伤的灾害	主要在阿勒泰地区,北疆西部的塔城、博州,天山一带	极端降水事件在未来会增加,低温冷害事件引起的极端积雪灾害事件将会增加
暴风雪	灾害性天气事件,一般和大范围天气过程有关,造成大雪和大风天气事件	在新疆北疆,尤其是天山西段,塔城地区,帕米尔高原,喀喇昆仑山	与极端气候事件有关,气候变化可能会引起事件强度增加
雪崩	山地斜坡积雪崩解引发的雪崩事件	主要在天山西部,伊犁河谷,帕米尔高原,西昆仑山,喀喇昆仑山	急剧升温,或是积雪降温,引发深霜,可促使雪崩频发
冰崩	由于冰川在坡度较大的坡面断裂,引发冰块崩解,滚落山下引发的泥石流、滑塌和推滚石流和雪崩等灾害	天山,帕米尔高原和喀喇昆仑山	气候变化引发冰体更易脆裂和断裂,尤其冰川退缩到高山斜坡更易发生冰崩,一般灾害强度大

可以分为融雪洪水、冰川消融洪水、冰湖溃决洪水、冰凌洪水、暴雨融冰洪水等类型(表 2)。

冰雪洪水是指由冰川融水和积雪融水为主要补给来源所形成的洪水,以冰川融水为主要来源的称冰川洪水,以积雪融水为主要来源的称融雪洪水。冰雪洪水是季节性洪水,春夏当气温回升到 0°C 以上,冰与雪融化成为液态水。由冰川和积雪融化的水一部分形成地表径流直接补给河流;一部分通过下渗以浅层地下水的形式补给河流,形成春、夏季洪水。

2.1.1 融雪洪水

新疆的冬季积雪分布从覆盖率上划分为高盖度型和低盖度型^[12-13],高盖度型积雪主要分布在北疆地区,面积约占全疆的 $1/4$,平均积雪盖度高于 50% ;低盖度型积雪分布在南疆和东疆地区,平原区降雪稀少,多属于暂时性不稳定积雪,维持时间短,融化迅速。因此,新疆积雪特征就决定了很难在南疆平原区形成春季融雪洪水。北疆地区冬季积雪时间长,雪量较为丰富,融雪型洪水利弊兼具,既可造成对国民经济和人民生命财产的威胁,又对解决新疆普遍存在的春旱极为有利。新疆西北部、伊犁河谷地区、塔额盆地及天山北坡中段是新疆的主要融雪洪水区。春季由于气温急剧回升,地表土

层尚未解冻,融水入渗较少,造成前山区及冲积扇平原区的积雪急剧消融,集水汇流后形成融雪型洪水。山麓地带以上的山区,尤其是中山和低山地带,是春季融雪洪水的主要产流地区。融雪洪水发生的时间比冰川洪水早,一般在 4—6 月间,融雪洪水洪峰流量出现在 5—6 月。中国阿尔泰山区河流的融雪洪水一般出现在 4—5 月,最迟至 6 月就结束^[14-15]。

春季融雪洪水是由冬季的季节积雪消融形成的。这种春季融雪洪水灾害在新疆洪水灾害中占有一定比重。融雪洪水类型可分为浅山及山前平原融雪洪水和中低山融雪洪水。浅山及山前平原融雪洪水主要发生在阿尔泰、塔城、伊犁、天山北坡海拔 $1\,000\sim 1\,500\text{ m}$ 以下浅山及山前平原小冲洪沟和坡面上形成的融雪径流^[10]。这些地区冬季地面有稳定积雪覆盖,开春后,气温转暖,积雪由原来的累积状态转为消融状态,若遇急剧升温,大面积积雪迅速融化形成较大洪水。由于山前平原是河流径流散失区,而山区积雪尚未开始融化,因此当山前平原发生洪水时,主河道没有洪水反映。这类洪水具有出现早,来势凶猛,时间长,洪量大,范围广,洪水遍地漫流的特点,极易造成大范围灾害。新疆各大山系中低山带的积雪,随着气温上升,雪线也升

表 2 新疆冰雪洪水的基本特征、分布及其对气候变化的响应

Table 2 The basic characteristics, distribution of ice and snow floods and their response to climate change in Xinjiang

类 型	特 征	分布区域	对气候变化的响应
融雪洪水	主要发生在春季气温升温期，冬季积累大量的积雪随着春节气温的上升，开始消融，到后期大量融水集中从雪层中释放，汇流集中成洪水	主要分布在阿尔泰山，塔城地区，天山北坡，伊犁河流域及塔里木河部分流域	洪水提前，洪峰增大，洪水强度和频率增加
冰川消融洪水	一般发生在夏季，少雨时段，持续的气温上升，使得高山雪线和 0℃ 温层上升明显，冰川大部分处于消融状态，融冰水流汇集形成冰川洪水	主要是在天山地区，尤其是天上南坡的塔里木河流域，伊犁河流域，天山北坡地区，帕米尔高原和喀喇昆仑山	雪线上升明显，冰川大部分处于裸冰状态，冰面污化面发育，反照率降低，冰面消融增加，融水增加
冰湖溃决洪水	由于冰川退缩或是冰川快速前进阻塞冰川谷地，形成冰湖，当排水道打开或冰坝溃决，形成的洪水	主要分布与天山南坡的阿克苏河流域，喀喇昆仑山的叶尔羌河流域，及部分帕米尔高原	气温上升，冰川退缩加剧了冰湖的发育，冰温上升，冰强度减弱，冰坝易于变形，这些加剧了冰湖溃决洪水的强度和爆发频次
冰凌洪水	由于冰河开河的不一致，使得开春消融的冰河在下游冰块阻塞，形成阻塞型洪水，或是上游解冻，下游冰封形成的洪水	主要出现在新疆天山伊犁河流域，天山北坡奎屯到吉木萨尔一带的河流	和气温急剧升温，极端升温事件，或是局地极速降温等有关，与气候变化引起的极端天气气候事件相关，未来强度和频次加剧
暴雨-冰雪洪水	前期长期干旱、高温，使得冰川积雪全面消融，在一个大范围降水过程的突然到来，产生大暴雨，暴雨产流与冰川融水产流汇合，发生暴雨冰雪洪水事件，是新疆主要的洪水类型	主要是天山地区，重点在天山北坡、塔里木河南缘，喀喇昆仑山、西昆仑山、帕米尔高原，伊犁河谷	气温升高是关键，但极端暴雨事件是触发因素，随着气候变暖，强度增加

高，中低山积雪开始融化，发源于山区河流出现融雪洪水，这在塔城、阿尔泰、伊犁等地的河流中反映最为明显，在其他地区的河流中也有反映，只是规模大小不同。这种源于中低山季节积雪形成的洪水出现时间较晚，融雪水汇入河道形成洪峰，洪水波沿着河床向下游运动。对于大河来说由于流域面积大，洪水受到流域调节，形成的洪峰流量比暴雨形成的洪峰流量要小得多，对下游的威胁较小，而主要靠季节积雪补给为主的小河流，在中低山积雪偏厚的年份，一场升温天气会使全流域积雪融化，产生大洪水，造成灾害，受灾地区通常是沿河两岸。

2.1.2 冰川洪水

冰川洪水可以分有两种，一种是由于冰川正常的融化，形成的季节性洪水，一般出现在 7—8 月；另一种是突发性冰川洪水。正常的冰川洪水的洪峰、洪量及洪水形态在相同的地质地貌条件下，主要取决于冰川消融区面积。洪水过程线无明显暴涨暴落，而是缓慢连续上升，呈肥胖单峰型或双峰型。冰川洪水流量与气温变化具有明显同步关系，流量与降水变化是异步关系。因此，每当遇到降水天气日照减少，温度降低，河流水量就明显减少；

在无降水天气，高温持续时间长，河流水量就显著增大，这与暴雨洪水完全不同。突发性冰川洪水是冰川洪水的特例，这种冰川洪水的特点是突然暴发，历时短暂，洪峰呈指数猛涨猛落。

冰川洪水是夏季连续高温后产生的洪水，洪峰、洪量大小与气温等热量情势有密切关系，还与冰川面积、雪储量、夏季降雪大小有关。冰川洪水有如下特点^[10, 15]：1) 受气温影响大，尤其与高空气温变化一致。若用反映高山气温变化的零度层高度与次洪水点图有比较好的对应关系；2) 洪峰、洪量大小与升温幅度关系很大，与冰川面积、雪储量、夏季降雪量有关；3) 与季节积雪融水一样，冰川融水有明显日变化；4) 冰川洪水年际变幅小，洪水呈单峰型，主要河流最大洪水与最小洪水的比值在 1.54~2.80 之间。冰川洪水一般起涨慢、退水慢、历时长、洪量大、峰不高。

冰湖溃决(突发)洪水与冰川、积雪消融洪水有显著的区别。冰湖溃决(突发)洪水陡涨急落，如图 4 中曲线所示，而冰川、积雪消融洪水峰小量大，缓涨缓落，洪峰出现的时间与日最高气温基本一致或仅滞后若干小时，洪水日变化十分明显。如新疆

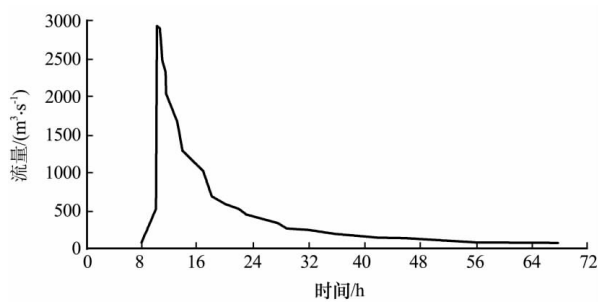


图4 叶尔羌河卡群记录的1998年11月5日

08:00—7日20:00冰湖溃决突发洪水过程

Fig. 4 Hydrograph of the glacial burst lake outburst flood in Karqun Station of the Yarkant River recorded in 08:00 on November 5 to 20:00 on the November 7, 1998

南部最大河流-叶尔羌河发源于喀喇昆仑山北坡,水量丰沛,平均年径流量达 $63.75 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。下游出口处的卡群水文站(海拔1420 m)自1953年建站以来已观测25次突发性洪水,其中1961年9月4日04:00至9月5日03:00,该站在短短20分钟内起始流量由 $80.6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 陡涨到 $6270 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 的洪峰流量。归纳起来,冰湖溃决(突发)洪水有如下特征^[8,10]: 1) 洪峰高,洪量小,尤其是发生在秋、冬季的冰湖溃决(突发)洪水远远超过当时河流流量,对下游威胁很大; 2) 洪水陡涨急落,过程线呈单峰尖瘦型。洪水历时短,只有几天,而且一般涨水历时占总历时80%左右; 3) 洪水发生的时间不确定性较大。冰湖溃决(突发)洪水,一年四季都可能出现; 4) 冰湖溃决(突发)洪水发生频率高,例如,新疆的昆马力克河每年发生这种洪水的可能性在90%以上,基本每年发生一次,甚至可在一年内连续发生两次; 5) 冰湖溃决(突发)洪水量与前期降水及冰川消融量无直接关系而仅取决于冰湖容量及溃坝规模有关。

2.1.3 冰凌洪水

冰凌洪水(冰洪)是新疆天山伊犁河谷、天山北坡中段河流冬季的一种特殊洪水,其暴发主要受气温、逆温带范围、冬季河流来水量、冰情冰厚、地势^[2,16]。河道弯曲率和河床条件等多种因素影响。“冰洪”具有随机性、规律性和不重复性三种特性,冰凌洪水的峰型类似于暴雨洪水具有陡涨陡落的特点,峰前陡峭而落峰则相对缓一些。

在天山北坡地区“冰洪”的高发区主要在乌鲁木齐以西的北疆经济带区域内,由于区域内的河流一般都具有山高谷深河流长的特点,为“冰洪”发生提

供了充分的条件^[16]。在众多河流中,四棵树河、三屯河、呼图壁河和玛纳斯河等河流,每当冬季遇到气候反常、气温变化异常年份,就会暴发1~2次的“冰洪”。四棵树河冬季“冰洪”发生次数最多的1974年达到3次。三屯河和呼图壁河发生“冰洪”的量级相对较小,玛纳斯河最近10 a内也曾发生过 $200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 量级的“冰洪”。根据野外调查,由于四棵树河中游河道曲折多弯,使之成为天山北坡经济带区域内“冰洪”现象最为突出的河流。调查分析研究表明,“冰洪”这一水文现象普遍发生在冬季11月至次年1月期间,河流封冻之前是冰凌洪水发生频次较高的时期。冬季出现异常天气及气温突变是影响冰凌洪水发生的主要因素,天山北坡中段中山区的逆温层带是冰凌洪水的高发区,“冰洪”的发生具有预见性。

近年来在伊犁流域冰凌洪水灾害发生频繁^[2],尤其是2005年12月伊犁河支流特克斯河自恰甫其海水库上游喀拉托海和喀拉达拉河段发生严重冰凌; 2006年1月伊犁河察布查尔县托布中心托海依村河段的河叉处流冰两次受阻并不断堆积,形成冰塞,发生冰凌灾情。2007年入冬以来,伊犁河谷受持续低温影响,连续发生了严重的冰凌洪水灾害,2007年12月下旬至2008年1月,伊犁河流域特克斯河喀拉托海乡段、霍城县切德克苏河上游、昭苏县阿合牙孜河上游、喀什河上游、伊犁河干流南岸察布查尔县卓霍尔段等区域相继出现了较为严重的冰凌洪水灾情。

2.2 冰川泥石流

冰川泥石流是指在高山冰川环境下由冰川洪水与冰川或其他寒冻风化沉积物所形成的特殊泥砂径流,它与其他地理环境下的泥石流现象有着类似的形成条件,即陡峭的沟谷地形、丰富的松散固体物质和充足的水源^[2]。冰川泥石流与冰湖溃决泥石流灾害发育在高山冰川分布区的外围,其灾害影响可达很远的下游河谷地带。泥石流是新疆主要的山地灾害之一,伴随洪水具有突然暴发、来势凶猛、地质地貌过程强烈的特点。泥石流主要由洪水引发,按洪水类型,泥石流主要分为暴雨泥石流、冰川泥石流、融雪泥石流等。冰川泥石流是指在冰川进退变化、积累消融所伴生的冰崩、雪崩、冰碛湖溃决等动力作用下所产生的一种泥石流,主要分布在天山山区和昆仑山-喀喇昆仑山山区。融雪泥石流是由季节性积雪消融而形成的泥石流,主要发生在天山北坡和阿尔泰山,一般出现在3月中旬至5月

初, 天山地区的冰川泥石流根据引发泥石流的补给水源, 可以把冰川泥石流划分为冰川融水型、积雪融水型、冰崩雪崩型、冰川阻塞湖排水型及冰雪融水与降雨混合型冰川泥石流^[17]。气候变暖会导致冰川发生 3 个明显的变化, 并与冰川泥石流的形成密切相关: 1) 气候变暖使得冰川消融, 大量冰碛的产生为冰川泥石流的发生提供了先决条件; 2) 气候变暖使得冰川体活动层的厚度增加, 为大规模冰块的崩塌和冰湖溃决提供了重要条件; 3) 气候变暖引起冰川侧面岩石的压力环境产生变化, 容易发生冰崩而引起冰湖溃决, 进而诱发冰川泥石流。

横穿天山的独库公路, 沿线的冰川泥石流沟具有窄而深多弯道跌水等特点, 沟内皆多处堵塞, 这些堵塞一方面来自沟床两侧崩塌和风化坡积物的下滑; 另一方面是夏季冰雪融水和降雨形成的小股泥石流因动力不足停积在沟内的堆积物^[17]。在来年天气转暖, 积雪, 冰川融水和降水大部分渗入冰硬物和堵塞的固体物质之中, 这一浸润过程可视为泥石流暴发的前期孕育过程。进入夏季当遇有连续高温天气, 增大的冰崩, 冰川融水或高强度暴雨二者叠加形成的洪水在沟内层层受阻壅高形成较大的溃坝流量, 进而诱发泥石流暴发。

中国至巴基斯坦公路线上的喀什-塔什库尔干(以下简称喀塔)路段自 1959 年正式修通以来, 冰川洪水、冰川泥石流灾害一直是个老大难问题^[18]。每逢 7、8 月份冰雪消融旺季之时, 公路常常遭到洪水和泥石流突然袭击, 酿成路基、桥涵被冲毁或淤埋等交通事故。泥石流暴发的主要原因是由于堵塞而形成的突发性冰雪消融洪水, 固体物质的主要补给来源是由岩崩和沟岸坍塌而形成的松散堆积物, 而陡峭的沟床则为泥石流运动提供了方便。新藏公路新疆段沿线共有泥石流灾害 149 处, 直接危害线路 53.05 km^[19], 其灾害集中分布于哈拉斯坦河、塞拉克河、叶尔羌河及喀拉喀什河沿溪线路段。沿线泥石流具有松散堆积物丰富, 水源不足, 暴发频率低, 规模大, 受冰川和气候变化影响大等特点。从 20 世纪 50 年代到 21 世纪初, 青藏高原大部分地区气温升高, 气候变暖, 结果导致大部分地方降水量增多, 冰雪强烈消融, 冰雪融水增加, 冰川退缩, 暴雨和洪水频繁。

2.3 雪崩与冰崩

2.3.1 雪崩

积雪的山坡上, 当积雪内部的内聚力抗拒不了它所受到的重力拉引时, 便向下滑动, 引起大量雪

体崩塌, 人们把这种自然现象称做雪崩^[2]。雪崩具有突然性、运动速度快、破坏力大等特点。雪崩能摧毁大片森林, 掩埋房舍、交通线路、通讯设施和车辆, 甚至能堵截河流, 发生临时性的涨水。同时, 它还能引起山体滑坡、山崩和泥石流等可怕的自然现象。因此, 雪崩被人们列为积雪山区的一种严重自然灾害。

雪崩主要发生在山区, 山区较厚的积雪为雪崩提供了充足的雪源^[13], 新疆雪崩主要发生在天山, 占雪崩总数的 69%, 尤以西部巩乃斯河谷为烈, 其次是阿尔泰山, 占 26%, 昆仑山也偶尔发生, 只占 5%。雪崩在新疆呈带状分布, 阿尔泰山地区的雪崩灾害地带分布高度较低, 天山地区的雪崩灾害地带居中, 而昆仑山地区则在高山带。据统计, 中、低山带的雪灾多发生于冬季至翌年 4 月, 夏季亦有高山雪崩造成灾害。在新疆伊犁天山果子沟公路 35 km 路段, 穿越将近 100 条雪崩路径, 这里不但雪崩路径稠密、雪崩频繁, 而且过往车辆很多, 成为天山北坡雪崩危害最严重的公路之一。

2.3.2 冰崩

冰崩指冰川上冰体崩落的现象, 是分布在陡急斜坡上的冰川, 在重力作用下沿着冰川内部的某一剪切破裂面或脆弱面, 脱离母体而迅速倾倒或滑塌、坠落的现象^[20]。造成冰崩的原因很多, 如冰川的前进、冰床坡度剧烈增大、遇有陡坎、冰内融水、冰湖溃决以及地震等, 由此可引起悬冰川、山顶冰川或山谷冰川末端发生断裂, 引起冰或冰水俱下、堵塞河流, 造成冰湖溃决, 甚至危及人的生命财产, 是一种灾害性自然现象。冰从陡峭的冰川崩解会引起冰崩, 如果冰崩到冰湖中, 冰冲击形成水浪可能导致冰湖溃决。

冰崩通常夹带大量岩石、冰雪块体、气浪冲击波, 并且运行一段很长的距离。有的冰川崩塌只崩落一点点冰块, 但大型冰川崩落威力可以摧毁路线上的任何物体。登山时若要通过冰川崩塌的危险区域, 将承受极高的风险。而冰川崩塌最具破坏性的事例是 2002 年 9 月在俄罗斯南方高加索山区发生的冰川崩落, 可谓史无前例的重大灾难。9 月 20 日, Karmadon 山的 Kolka 冰川冰崩触发了冰雪崩, 冰雪崩痕迹长达 24 km, 夹带数以亿吨计的冰块和石块高速冲下山, 使得北奥赛梯共和国境内的卡马顿村完全被成吨的冰雪、岩石和泥土掩埋, 造成超过百人死亡^[21-22]。2012 年 4 月 8 日, 巴基斯坦北部喀喇昆仑山的锡亚琴(Siachen)冰川地区驻扎着

巴基斯坦北方陆军兵营, 由于兵营对面山谷冰川的冰崩引发冰-岩-雪崩, 把兵营全部掩埋在 20 m 以下, 造成 139 人遇难.

新疆喀喇昆仑山 K_2 峰北坡的高山带冰雪景观与河谷地带的荒漠干谷景观形成极大的反差, 以巨大的降水和冰雪景观为特征. 高山带降水量在雪线海拔以上可达 1 000~2 000 mm 以上, 是河谷地带降水量的十几倍, 形成了中纬度高山冰川最为发育的地区. 1986 年 9 月 15 日, 在持续了 10 d 的暴风雪之后, 喀喇昆仑山的世界第二高峰乔戈里 (K_2) 峰 (海拔 8 612 m) 地区天空开始放晴, 万里无云, 一片蓝天. 第一作者参与的中国-联邦德国喀喇昆仑山科学考察队的一个小组, 当天在 K_2 北坡冰川上距离冰川末端 14 km、海拔 5 200 m 左右的前进营地夜宿, 这里离主峰的山脚约 5 km, 周围山坡披挂着冰川和积雪, 晚上周围的雪崩声轰隆不断. 到 16 日当我们在营地准备继续前进时, 北京时约 15:10 (当地时间 12:00 左右), 一声巨响从乔戈里峰的山

顶附近传来, 在海拔 7 800 m 附近的悬冰川前沿冰块突然断裂滑塌, 冰崩产生的冰体向山下海拔 5 300 m 的粒雪盆推动滚下, 不断带动山坡上的积雪, 雪崩推动的粉状雪云前沿加速扩大, 最后冲击到粒雪盆, 形成 500~600 m 的雪粉云, 一直漂浮到 4~5 km 之外, 也到达我们的前进营地 (图 5). 根据我们其后的计算^[23], 这次冰崩触发雪崩其垂直高差达 2 500 m, 崩解的冰量约 $20 \times 10^4 \text{ m}^3$, 最终的雪冰量达近 10^7 m^3 , 最大运动速度达 $124 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 冲击力达 $2.3 \times 10^6 \text{ Pa}$. 这是我们从文献记录中看到最大的雪冰崩, 其冰崩对高山科学考察和登山活动产生极大的威胁.

尽管看起来冰崩对人们的日常生活影响不大, 但越来越多的冰崩事件正在警示着我们全球气候正在发生变化, 不得不引起人们的关注和思考. 在冰崩或雪崩发生后, 或者因崩塌的固态水在运动过程中由于摩擦受热而迅速转化为液态水冲蚀沟床和岸坡; 或者因其直接崩入冰湖导致湖水溢坝或冰湖溃

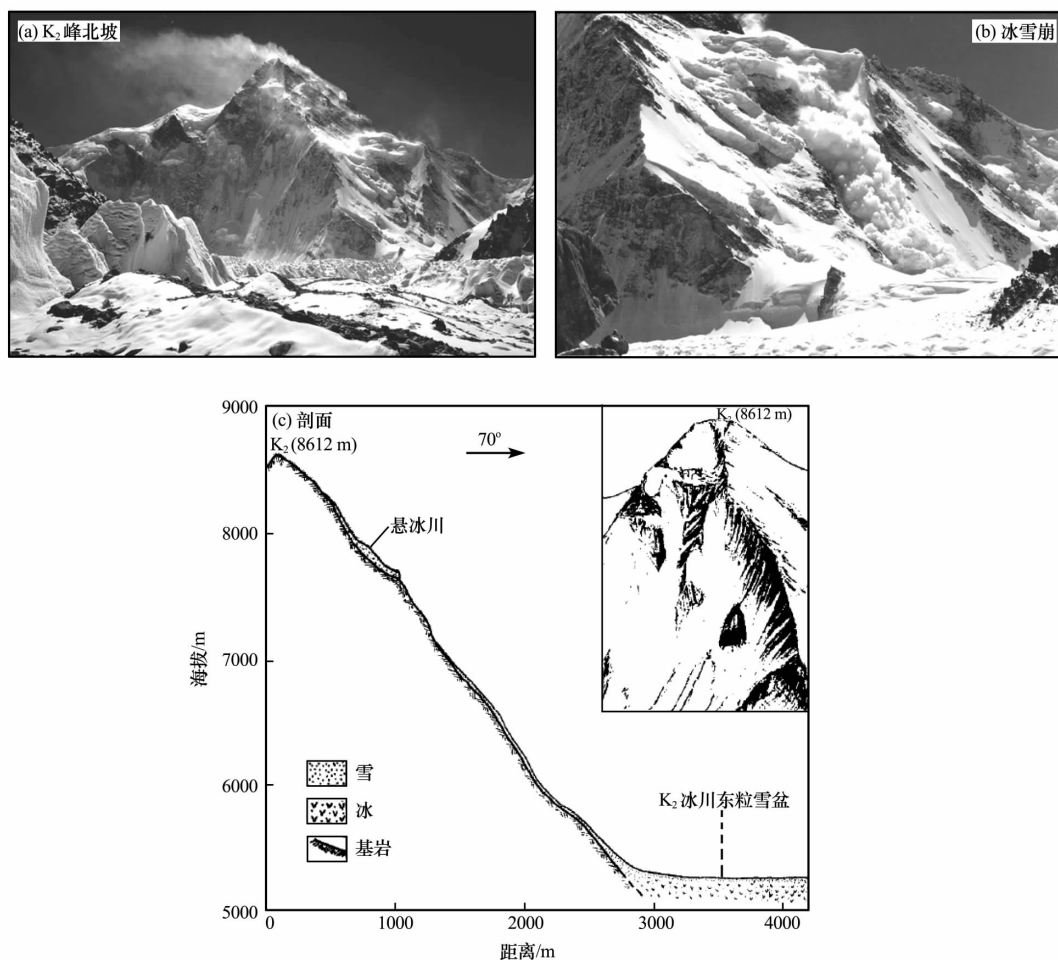


图 5 喀喇昆仑山 K_2 北坡悬冰川与冰雪崩发生坡面

Fig. 5 The hanging glacier and ice-snow avalanche on north slope of the K_2 peak in the Karakoram

决, 溢出水或溃决水强烈冲蚀沟床和岸坡, 导致泥石流暴发。由于水源不足, 泥石流在运动途中或出山口后发生堆积, 形成灾害链。同时, 当前由于气候变化引起的冰川退缩, 使得许多小的山谷和冰斗冰川变成悬冰川, 增加了坡面冰体的断裂和滑动, 极易产生冰崩的发生, 从而触发雪崩和泥石流灾害的出现, 对当地生命和财产造成威胁。所以, 应加强小冰川的监测, 编制冰川变化下的冰灾害潜在分布图, 及时为政府提出监测和评估报告; 建立冰川灾害应急响应队伍, 为防灾减灾及其应对提高技术支持, 尤其为重大工程建设和边防安全服务。

2.4 雪灾与暴风雪

雪灾是新疆的主要气象灾害之一, 而且遍及南北疆, 每年都有发生, 并有多种形式, 危害的程度也不尽相同, 给新疆的经济建设、国防建设及人民的生命、财产带来诸多损失^[2]。雪灾的发生、持续有随降雪天气过程而突然暴发的暴风雪等, 也有连阴雪和低温造成中期影响的积雪灾害, 更有整个冬季因积雪量的多少而发生的气候灾害或次生灾害等。引起雪灾的天气过程有暴雪、雪暴(风吹雪)、雪崩等, 因积雪累计产生的气候灾害有雪腐病、白灾或次生灾害等, 一次降雪天气过程有可能引起气候灾害, 气候灾害也有可能转化为突发性灾害。

新疆暴雪、暴风雪发生的频率并不高, 但它是直接对家畜造成伤亡的严重气象灾害。新疆的暴雪、暴风雪多发生在秋末初冬和初春, 随寒潮出现的情况较多, 北疆的塔城、阿勒泰、伊犁地区依次为暴风雪多发区, 由于地形的影响, 这些地区的山口、峪口、隘口等地的暴风雪强度会加强, 在秋末和初春牲畜转场路过这些地方时, 如果恰遇暴风雪, 牲畜无处躲藏, 损失巨大。风吹雪发生在积雪较大的年份, 其分布多与特定的大风区、风口位置有关, 新疆北部山区和平原的风吹雪灾害较南部地区广泛。阿勒泰和塔城地区的平原风吹雪灾害最为严重, 这是由于阿勒泰、塔城地区有诸多向西敞开的山隘口, 有助于平原风吹雪及其灾害的形成。乌鲁木齐-塔城公路的老风口、阿拉山口、乌伊公路松树头、独库公路拉尕山隘、伊焉公路艾肯山隘等都是风吹雪多发区。

新疆的山区、平原和盆地都有雪灾, 而且一年四季都可能发生^[13], 新疆雪灾的多发季节不是在隆冬, 而是在春季占 54.1%, 冬季次之占 28.4%, 秋季较少占 13.1%, 夏季则为个别事件仅 4.5%。20 世纪 50—90 年代, 雪灾的发生频率呈上升趋势,

同时, 也与降水量的变化有关, 新疆的降水量除 50 年代北疆为多降水阶段外均为增多趋势, 与雪灾的发生频率呈正相关。冬季降水多的年份发生雪灾的次数就相对多。

3 冰雪灾害对气候变化的响应

上述研究表明, 随着新疆气候向暖湿转变, 高山流域的水文过程对气候变暖和积雪增加产生明显的响应。这些变化已经使雪崩、风吹雪、冰川泥石流和冰湖洪水等冰雪灾害发生频率呈上升趋势。随着新疆地区从 1987 年开始的气候由暖干向暖湿的转型^[4], 洪水灾害发生的频次有明显增加的趋势^[3]; 冰川、泥石流阻塞、滑坡阻塞洪水成灾的频次也有明显的增加, 这是因为气温升高, 消融水增多使冰渍湖突发洪水的发生机率增大^[8]。

3.1 阿尔泰山地区典型积雪流域洪水对气候变化的响应

新疆阿尔泰山地区的洪水类型主要是春季融雪洪水, 融雪洪水发生机遇很高。一般每年 3—5 月阿勒泰地区由于气温急剧回升, 地表土层尚未解冻, 融水入渗较少, 造成前山区及冲积扇平原区的积雪急剧消融, 集水汇流后形成融雪型洪水。随着气候变暖, 阿尔泰山地区的气温升温明显, 克兰河流域年平均气温从 1950 年代的 1.4°C 上升到 1990 年代的 5.2°C ; 年降水量呈增加趋势, 降水增加主要是在冬季和开春^[24]。气温升高和冬春季积雪的增加, 导致融雪洪水增多且洪峰流量增大, 主要表现在发生洪水的时间提前, 洪峰流量增大, 破坏性加大。统计阿尔泰山地区的布尔津河群库勒站、克兰河阿勒泰站和卡依尔齐斯河库威站年最大洪峰流量变化可以看出^[25](图 6), 在 20 世纪 60 年代后期到 70 年代是一个洪水比较低的时段, 到 1980 年代后期开始洪峰流量不断增大增强。在西段的布尔津河, 洪峰流量从 1970—1980 年代的 $600\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 增加到 1990 年代的 $1\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 左右; 克兰河随着春季快速的升温, 加大了积雪融化的速率, 引起融雪洪水发生并量级加大, 洪水的发生时间有提前趋势, 且最大洪峰流量也从 1970—1980 年代的 $200\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 左右, 增加到 1990 年代以来的 $350\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 左右, 破坏性加大。例如, 2006 年 5 月下旬持续高温天气, 阿勒泰市周边高山融雪加剧, 导致克兰河水位急剧上涨, 阿勒泰市发生多起融雪性山洪, 27 日 21:00 许, 阿勒泰市突然暴发融雪性洪水, 洪水流量达 $328\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, 部分居民房屋进水,

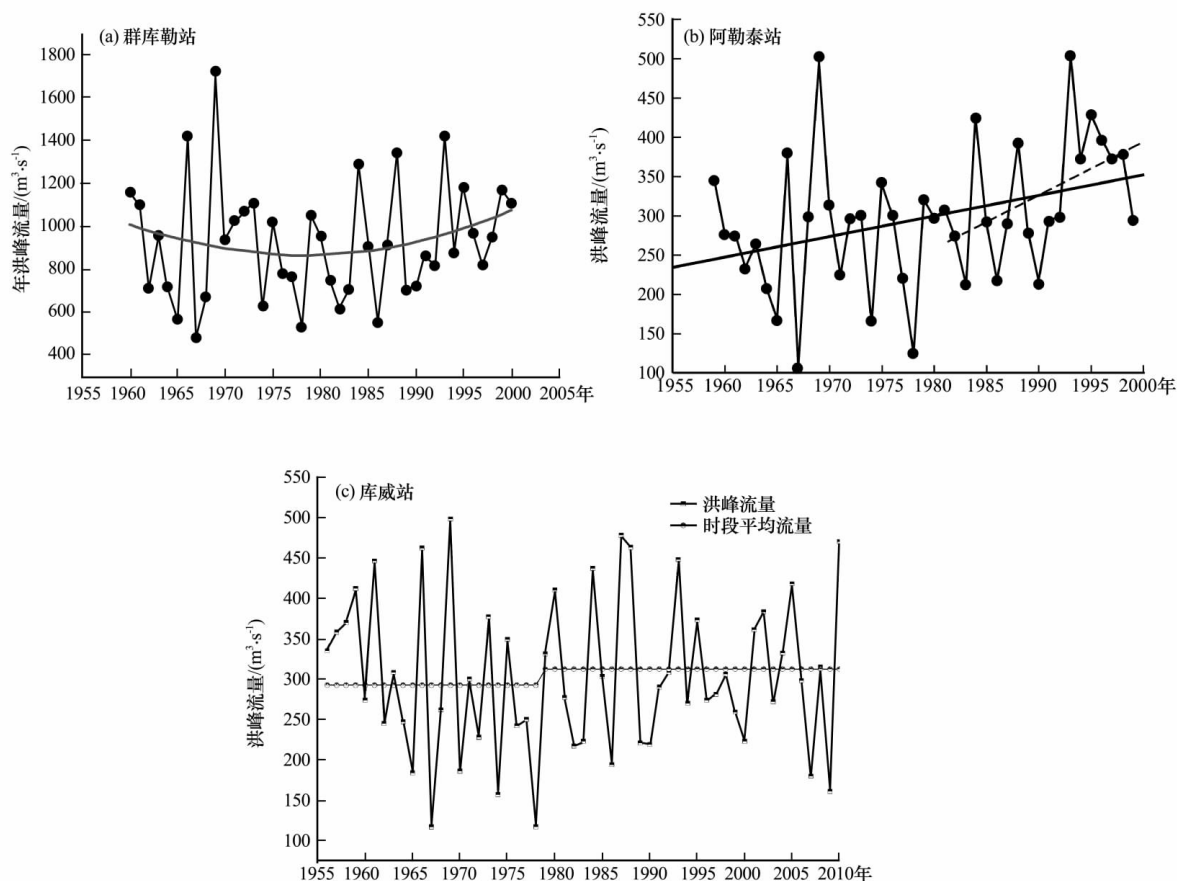


图6 布尔津河群库勒站(a)、克兰河阿勒泰站(b)和卡依尔齐斯河库威站(c)的年最大洪峰流量变化^[25]

Fig. 6 Changes in yearly peak streamflow at at Qunkul Hydrological Station of Burjin River (a), Altay Hydrological Station of Kelan River (b) and Kuwei Hydrological Station of Kayirtysh River (c)^[25]

多处桥梁、防洪坝冲毁^[24]。

3.2 天山萨雷扎兹-库玛拉克河流域冰川洪水及其冰湖溃决洪水

萨雷扎兹河为我国新疆阿克苏河主要支流库玛拉克河的境外上游河段,其入境水量和冰湖溃决洪水对我国境内阿克苏河乃至整个塔里木河的径流补给及下游的防洪安全都有着举足轻重的作用。库玛拉克河源区及主要径流形成区位于吉尔吉斯斯坦共和国境内,在河源区分布有天山地区最大的冰川——伊尔切克冰川(Inylchek Glacier,长60.5 km,总面积748.4 km²)及数量众多的冰面湖与冰川阻塞湖,其中麦茨巴赫冰川湖(Merzbacher Lake)为众多冰川湖中最大的一个,同时又是频繁发生突发性溃决洪水的冰湖。随着气温的变暖,冰川减薄后退,冰湖库容增加,洪水逐年增大,洪水频率也在不断增加^[8]。这些变化已经威胁到萨雷扎兹-库玛拉克河、阿克苏河及塔里木河水系的防洪安全。

在全球变暖情况下,冰川融水流量将增加明

显,更易引起冰川洪水发生。萨雷扎兹-库玛拉克河流域冰川融水占协合拉站控制流量的比率达58.65%^[26],冰川融水的变化对流域水资源量的影响是非常明显的。萨雷扎兹-库玛拉克河流域1957—2006年平均年径流量为 $48.64 \times 10^8 \text{ m}^3$,年径流量在1993年后急剧增加,1994—2006年的平均年径流量比1957—1993年年均增加了 $10.56 \times 10^8 \text{ m}^3$,即增加了23%。年最大洪峰流量也相应发生变化^[27],1957—1993年的平均年最大洪峰流量为 $1262.76 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,1994—2006年为 $1726.62 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,年平均增加了 $463.85 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,增加幅度为37%,且大部分超出警戒和危险流量^[28](图7)。

随着气温的变暖,冰川减薄后退,冰湖库容增加,洪水总量逐年增大(图8)。据原苏联冰川学家的观测,该湖在1932—1954年间发生溃决洪水13次;中国新疆阿克苏协合拉水文站自1956年建站到2008年共观测到溃决突发性洪水事件49次,这就是说1932—2008年的67 a内发生溃决突发性洪

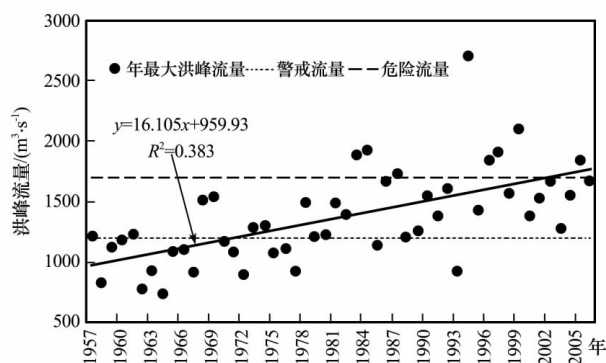


图7 协和拉站 1957—2006 年最大洪峰流量变化趋势

Fig. 7 The peak discharge variation at Shehle Hydrological Station during 1957—2006

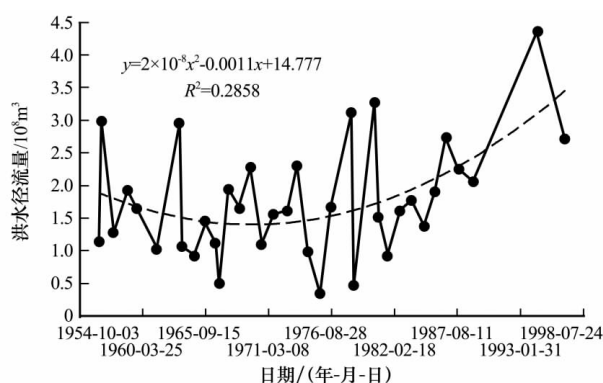
图8 协和拉站记录的冰川洪水径流量^[27]

Fig. 8 Changes in total flood volume recorded at Shehle Hydrological Station^[27]

水 62 次, 其频率达 92.5% 以上; 在 1980 年代以来的高温期表现出年年甚至一年两次溃决的势头, 而且洪峰流量与总洪水量均呈增加的趋势^[27]. 从 20 世纪 50 年代到 90 年代, 协和拉水文站记录的径流量增加了 $10 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占年径流量的 25%. 同时, 洪峰流量也从 1950 年代到 1990 年代增加了 37%, 洪水总量也从 1950 年的 $1.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 增加到 1990 年代的 $3.0 \times 10^8 \text{ m}^3$, 最大达到 $4.5 \times 10^8 \text{ m}^3$.

统计协和拉水文站的洪水记录与气温的关系发现, 随着气温变暖, 冰湖溃决的洪峰流量也在增加^[27] (图 7). 这是因为气温变暖, 冰川融化加强, 流入冰湖的融水增加, 气温也控制着湖水充填的时间, 因而也就影响着下次冰湖溃决发生的时间. 随着气温的上升, 使得冰川湖突发洪水可能变得更加危险.

近 50 a 来, 库玛拉克河流域最大径流量的变化趋势是上升的, 最大径流变化的倾向率为 $3.98 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$, 主要是气候变暖导致冰川消

融强烈和冰湖溃决所致^[27]. 1983—2006 年最大径流呈上升趋势, 增加了 16.8%, 尤其在 1994—2006 增加显著, 达 25%. 自 1990 年代中后期开始最大径流量快速的增加趋势, 说明近 10 a 洪水灾害产生的危害性增加. 在 1982 年之前, 溃坝多发生在 9 月, 目前提前到 8 月甚至 7 月, 这主要与冰川加速融化和湖盆蓄水期缩短有关. 结合最大径流出现日期, 可以看出, 阿克苏河上游最大径流出现的日期有提前的趋势^[16]. 近十几年来, 阿克苏河发生洪水灾害的可能性增加, 而且量级加大, 发生时间有所提前, 这就要求有关管理部门调整防洪规划, 不仅要在洪峰流量上, 而且要在洪水出现的时间上做好预警和预防. 因此, 要加强冰川消融观测及冰湖水位的监测, 建立预警系统, 进行冰川消融和冰湖溃决洪水预报, 为下游的防洪安全和水库安全提供科技支持.

3.3 塔里木河流域冰川洪水灾害特征

塔里木河流域河流主要以冰川和积雪融水补给为主, 塔里木盆地流域共有现代冰川 14 285 条, 面积 $23\,628.98 \text{ km}^2$, 冰储量 $2\,669.435 \text{ km}^3$. 冰川融水径流量达 $150 \times 10^8 \text{ m}^3$, 约占流域地表总径流量的 40%, 是本区最为重要的水资源^[8]. 近 50 a 来的气温升温趋势主要表现在冬春季节, 夏季小有降温, 冬春升温使得冰川冷储减少, 冰温升高, 夏季很短的升温都会使冰川大量消融. 塔里木盆地冰川分布流域, 河流流量对气候变化非常敏感, 特别是气温, 1°C 的气温变化可引起流量 127 mm 的变化^[29]. 所以, 气温升高更易引起冰川洪水发生, 对社会经济产生影响. 随着新疆地区从 1987 年开始的气候由暖干向暖湿的转型^[4], 洪水灾害发生的频次有明显增加的趋势^[3]; 冰川、泥石流阻塞、滑坡阻塞洪水成灾的频次也有明显的增加, 如冰川和泥石流阻塞洪水频次分别由 80 年代的平均 0.5、0.7 次提高到了 1.0、0.9 次, 这是因为气温升高, 消融水增多使冰渍湖突发洪水的发生机率增大^[3]. 高山冰雪洪水受气温影响大, 尤其与高空气温变化一致. 塔里木河流域的冰川洪水和冰湖突发洪水主要分布在喀喇昆仑山、昆仑山以及天山南坡西部一带.

发源于喀喇昆仑山叶尔河源的冰川洪水是上游分布在喀喇昆仑北坡一系列与克勒青河谷呈正交的冰川, 由于有 4~5 个冰川下伸到主河谷阻塞冰川融水的下排, 包括克亚吉尔冰川, 特拉木坎力冰川, 迦雪布鲁姆冰川等, 经常形成冰川阻塞湖, 当

冰坝被浮起或冰下排水道打开,就会发生冰湖溃决洪水^[30]。在经历了 1986 年的冰湖溃决洪水后,由于冰川排水道打开,直到 1996 年再没有发生溃决洪水。当时根据喀喇昆仑山冰川进退变化^[30],认为克勒青河上游的克亚吉尔冰川和特拉木坎力冰川等在 20 世 10 a 时间尺度的冰川前进脉动已经过去,冰川处于相对稳定和退缩、变薄的阶段。预计在 21 世纪初气温持续升高的情况下,多数冰川必将后退变薄,冰川阻塞湖溃决(突发)洪水的规模也相应减小,出现数千秒立米流量的溃决(突发)洪水的可能性很小,叶尔羌河流域冰川洪水的危害将日益减轻^[30]。但在 1990 年代的剧烈增温过程,冰川消融加剧,冰川融水量增加,冰温升高,冰川流速加快,冰川再次阻塞河道形成冰湖,发生频繁的大冰湖溃决洪水^[8]。根据研究^[3,8],随着全球变暖的增强,冰湖溃决洪水的洪峰流量和洪水总量将越来越大,冰川湖的规模相应扩大,溃决的危险程度也增加。喀喇昆仑山叶尔羌河冰川突发洪水在沉寂 10 a 后,近十几年又频繁发生。1999 年发生了最大洪峰流量 $6\,070\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 的特大洪水之后,2002 年又发生了 $4\,670\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 的洪水,说明叶尔羌河突发洪水可能产生了新的变化^[31]。位于克勒青河谷的特拉木坎力和克亚吉尔冰川已经部分或完全阻塞河谷,若冰川持续前进,冰舌在向下游延伸的同时也会向上游涌溢,进而可能推升冰川坝高度。2008 年 4 月新疆地矿局郝沛在进入克勒青河谷探险考察时,发现迦雪布鲁姆冰川几乎堵塞河谷,无法通行^[32]。冰川呈明显前进状态,冰舌直立,迦雪布鲁姆冰川的持续前进也即将成为堵塞河谷,产生新的冰川阻塞湖,形成冰川湖和加大冰川突发洪水的潜在威胁。

3.4 天山北坡冰雪流域洪水对气候变化的响应

乌鲁木齐河是一条冰雪融水、降雨及地下水混合补给的河流。英雄桥水文站多年平均年径流量为

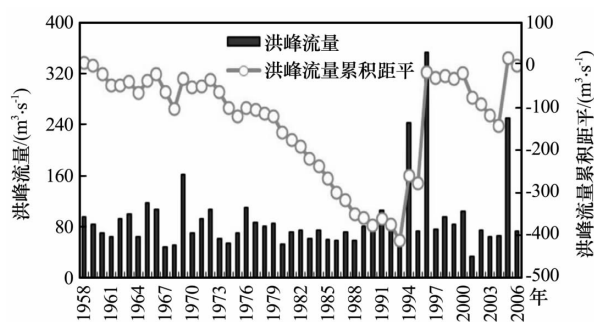


图 9 乌鲁木齐河英雄桥水文站年洪峰流量与累积距平

Fig. 9 The peak flow and accumulation anomalies at Hero Bridge Station in Ürümqi River

$2.427\times 10^8\text{ m}^3$,其径流组成大致为:冰川融水占 12%,融雪水占 37%,降雨占 36%,地下水占 15%。由此可见,乌鲁木齐河水量主要由冰雪融水和降雨补给为主。英雄桥水文站是 1958 年设立乌鲁木齐河国家基本站。乌鲁木齐河洪水一般发生在春季和夏季。春季洪水一般以冰雪消融型洪水为主,暴雨型洪水发生的概率较小;夏季洪水主要以暴雨型洪水和冰雪消融与降水形成的混合型洪水为多见。从乌鲁木齐河年最大洪峰流量年代际变化分析(图 9),分析比较 1987—2006 年年最大洪峰流量与 1958—1986 年年最大洪峰流量,也可看出乌鲁木齐河 1986 年前后年最大洪峰流量差异较大,1986 年前年最大洪峰流量较多年平均值偏少 11.29%,1986 年后河流年最大洪峰流量较多年平均值增加了 16.38%。从 1993 年乌鲁木齐河开始进入大洪水多发期,且洪水出现频次增加,洪峰集中出现。1994 年 6 月与 7 月分别出现 $142\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 与 $242\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 洪水,1996 年 7 月中旬则连续 3 日 3 个峰,后 2 次都超过 $300\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$,2005 年 7 月中旬发生 $249\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 的大洪水。

4 融雪洪水的形成机理研究

为了研究积雪消融过程,我们在新疆阿尔泰山东段的富蕴县铁买克乡大桥村段的库威水文站的观测场内($47^{\circ}20'\text{ N}$, $89^{\circ}41'\text{ E}$, $1\,370\text{ m}$),于 2011 年 8 月架设安装了雪特性观测站用于观测雪的各项特征,包括雪深、雪量、雪水含量、雪水密度、雪表面温度以及气温、降水、地温、雪层温度和土壤含水量等^[33]。采用德国 Sommer 公司研发的雪枕(Snow Pillow)用于测量积雪层中雪水当量,雪枕由一个 $3\text{ m}\times 3\text{ m}$ 水袋和一个液体压力传感器组成;SR50A 雪深传感器是 Campbell 公司新研发的利用超声波进行测距的传感器,结合 SR50A 测得的雪深,通过雪水当量=积雪密度 $\times$ 积雪深度公式计算出积雪密度。SI-111 红外表面温度探头是 Campbell 公司采用 Apogee 公司的红外探头制造的一种高精度的红外温度传感器。降水采用 T-200B 雨雪量计。从库威站雪特性进行的积雪观测,我们选择在 2013 年 3 月积雪消融期间观测的积雪深度、雪水当量、雪密度、气温和雪面温度资料,研究积雪消融的过程(图 10)。可以看出,随 3 月初开始的气温升高,积雪开始消融,但在初期的积雪消融中,上层积雪消融产生的融水主要向下层雪入渗,大部分融水保持在积雪下层,增加了积雪密实化,并不产生径流。

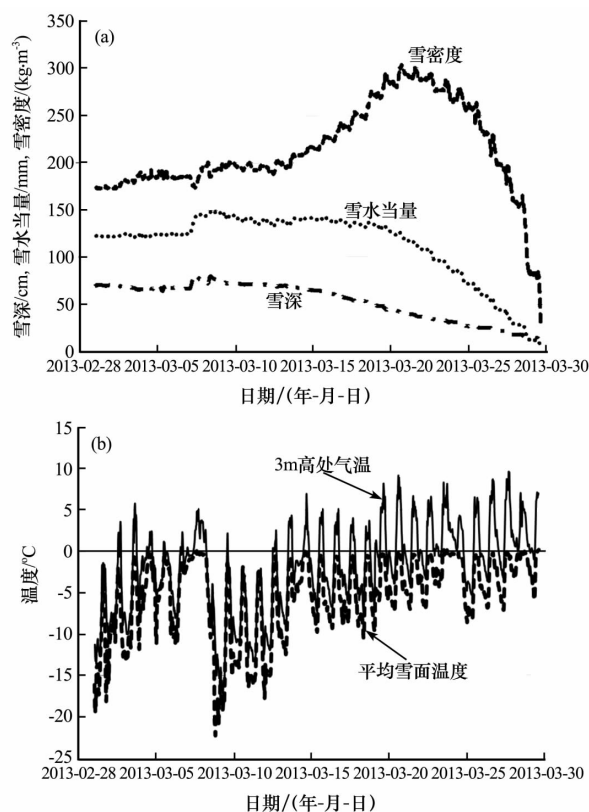


图 10 库威积雪站 2013 年 3 月 0.5 h 记录的积雪厚度、雪水当量、雪密度(a)与气温及雪面温度(b)的对比

Fig. 10 The variations of snow thickness, snow water equivalent, snow density (a), air temperatures and snow surface temperature (b) during melting period of March, 2013 in 0.5 hour inter-recording in Kuwei Snow Observation, Altay Mountains, Xinjiang

当气温继续上升, 积雪消融的融水部分依然继续保持在雪中, 当达到一定程度后, 融水大量释放, 形成融雪径流。随着持续升温消融, 从低海拔到高海拔积雪消融汇流, 并在短期集中从积雪中释放融水产生汇流, 但这时段由于土地冻结, 土壤水分大部分不能下渗, 所以极易产生地表径流, 从而汇集发生融雪径流洪水。

阿尔泰积雪过程观测发现, 融雪洪水的形成部分与冬季气温上升有关, 但主要还是与融雪期间的气温变化有密切关系。另一方面, 积雪消融期大量融水对雪层的入渗, 降低了积雪的反照率, 加速了积雪的融化。气候变化在区域性融雪中起到了重要作用。

5 适应气候变化的防灾减灾对策

新疆是我国冰川、积雪资源最为丰富的地区,

冰川和积雪融水在水资源构成中占有重要的地位, 其对气候变化的响应使得河流水文过程发生明显的变化, 对新疆干旱区的水资源利用和管理产生重大影响。在积雪为主补给的河流, 水文过程对气候变化变暖的响应表现为最大径流前移, 夏季径流减少明显; 以冰川融水补给的河流, 径流响应表现为 6—9 月汛期径流量明显增大, 汛期洪水增多, 年流量增加。由于不同补给类型河流的水文过程发生变化, 其相应对下游的水资源供给和洪水安全管理产生了重大影响, 在水资源管理方面需要适应气候变化对水文过程的调整, 减缓气候变化对水资源安全的影响。

随着全球气候变暖, 冰川退缩加剧, 融水量增大, 冰川洪水和冰川泥石流灾害随着冰川融水径流的增加而增多; 而融雪洪水、雪崩和风吹雪随着气候变化引起的冬季积雪增加和气温升高, 其灾害强度在增强; 冰崩灾害随着气温升高引起的高山冰体崩解而呈现增加趋势。但频率增大的冰雪洪水, 虽对进入荒漠区的河流生态有一定改善作用, 而有相当部分白白流失, 危害农田、道路, 如果将退缩的冰川固体水库产生的出山径流增量, 特别是以洪水形式出现的流量加以人工调蓄和资源化利用, 一方面可以提高水资源的利用效率; 另一方面可以缓解气候变化下冰川退缩消亡带来的水资源危机。因此, 要积极增建山区水库, 拦蓄洪水, 减轻水灾; 要充分考虑洪峰流量的增加特点, 设计库容与泄水量; 要加快现有病险水库治理, 增加可利用水资源的供水量, 同时开发水电增加能源。

加强气候变化对冰雪灾害的影响评估和适应性管理对策研究, 使科学技术在减灾方面发挥主导作用。尽快落实 2013 年国家发改委等部委联合发布的《国家适应气候变化战略》中关于《新疆融雪型洪水灾害综合防治适应试点示范工程》, 该示范工程是针对新疆融雪型洪水发生频次增多、洪峰流量增大等问题开展试点示范, 以融雪型洪水防治体系建设、监测预警和工程性防治措施为重点, 在气候条件相似地区推广新疆增强防汛能力的经验。未来应全面提升新疆不同季节、各重点区域的防洪抗旱气象服务水平, 为水库等水利设施运行调度提供科学依据, 减轻或避免洪水危害、合理利用水资源, 更好地发挥水利设施的蓄水调节防汛抗旱功能。

6 结论

冰川、积雪变化直接影响到冰雪灾害发生的程

度与影响范围,新疆的冰川洪水和冰湖突发洪水灾害主要发生在塔里木河流域的喀喇昆仑山、昆仑山以及天山南坡西部一带,融雪洪水灾害主要发生在新疆北部的阿勒泰地区、塔城地区 and 天山北坡一带,冰川泥石流、冰雪崩灾害主要发生在帕米尔高原、天山西段和西昆仑山地区,风吹雪主要在天山中、西段地区。随着全球气候变暖,尤其是新疆从1987年开始的气候由暖干向暖湿的转型,冰川退缩加剧,融水量增大,冰川洪水和冰川泥石流灾害随着冰川融水径流的增加而增多;而融雪洪水、雪崩和风吹雪随着气候变化引起的冬季积雪增加和气温升高,其灾害强度在增强;冰崩灾害随着气温升高引起的高山冰体崩解而呈增加趋势。在新疆地区,冰雪灾害主要表现为冰雪洪水,已观测到近十几年来在气候变化影响下冰雪洪水发生的频次和强度有增加的趋势,塔里木河流域的冰湖溃决洪水和冰川洪水及北疆春季的冰凌和融雪洪水已对当地的生命财产和社会经济发展带来巨大危害,对新疆带来的水资源安全、灾害等问题日益凸显。预计未来,随着气候增温引起的冰雪融水径流的增加,相关的冰雪灾害增多,因而增加了冰雪灾害的危险程度,并可能形成若干新的灾害点。面对气候变化诱发的众多冰川、积雪灾害,目前还缺乏对灾害监测、预测预警方面的适应对策。因此,在全球气候变化不断加速的趋势下,冰雪灾害应引起有关方面的足够重视,加强气候变化对冰雪灾害的影响评估和适应性管理对策研究,使科学技术在减灾方面发挥主导作用。

参考文献(References):

- [1] Shen Yongping, Su Hongchao, Wang Guoya, *et al.* The responses of glaciers and snow cover to climate change in Xinjiang (I): Hydrological effects[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, **35**(3): 513—527. [沈永平, 苏宏超, 王国亚, 等. 新疆冰川、积雪对气候变化的响应(I): 水文效应[J]. *冰川冻土*, 2013, **35**(3): 513—527.]
- [2] Shen Yongping, Wang Guoya, Wei Wenshou, *et al.* Ice and Snow Disasters [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2009: 1—200. [沈永平, 王国亚, 魏文寿, 等. 冰雪灾害[M]. 北京: 气象出版社, 2009: 1—200.]
- [3] Shen Yongping, Wang Shunde, Wang Guoya, *et al.* Response of glacier flash flood to global warming in Tarim River basin [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2006, **2**(1): 32—35. [沈永平, 王顺德, 王国亚, 等. 塔里木河流域冰川洪水对全球变暖的响应[J]. *气候变化研究进展*, 2006, **2**(1): 32—35.]
- [4] Shi Yafeng, Shen Yongping, Li Dongliang, *et al.* An Assessment of the Issues of Climatic Shift from Warm-Dry to Warm-Wet in Northwest China [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2003: 1—200. [施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型问题评估[M]. 北京: 气象出版社, 2003: 1—200.]
- [5] Wu Sufen, Zhang Guowei. Preliminary approach on the floods and their calamity changing tendency in Xinjiang region [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, **25**(2): 199—203. [吴素芬, 张国威. 新疆河流洪水与洪灾的变化趋势[J]. *冰川冻土*, 2003, **25**(2): 199—203.]
- [6] Mao Weiyi, Fan Jing, Shen Yongping, *et al.* Variation of extreme flood of the rivers in Xinjiang region and some typical watersheds from Tianshan Mountains and their response to climate change in recent 50 years [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, **34**(5): 1037—1046. [毛伟峰, 樊静, 沈永平, 等. 近50 a来新疆区域与天山典型流域极端洪水变化特征及其对气候变化的响应[J]. *冰川冻土*, 2012, **34**(5): 1037—1046.]
- [7] Li Yan. Change of river flood and disaster in Xinjiang during past 40 years [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, **25**(3): 342—346. [李燕. 近40年来新疆河流洪水变化[J]. *冰川冻土*, 2003, **25**(3): 342—346.]
- [8] Shen Yongping, Ding Yongjian, Liu Shiyin, *et al.* An increasing glacial lake outburst flood in Yarkant River, Karakorum in past ten years [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, **26**(2): 234. [沈永平, 丁永建, 刘时银, 等. 近期气温变暖叶尔羌河冰湖溃决洪水增加[J]. *冰川冻土*, 2004, **26**(2): 234.]
- [9] Zhang Jie. Summary for Policymakers and Executive Summary of Xinjiang Regional Assessment Report of Climate Change (2012) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2013: 1—113. [张杰. 新疆区域气候变化评估报告决策者摘要及执行摘要(2012) [M]. 北京: 气象出版社, 2013: 1—113.]
- [10] Zhou Yuchao. River Hydrology and Water Resources in Xinjiang [M]. Ürümqi: Xinjiang Science, Technology and Public Health Press, 1999: 1—445. [周聿超. 新疆河流水文水资源 [M]. 乌鲁木齐: 新疆科技卫生出版社, 1999: 1—445.]
- [11] Deng Mingjiang. Water Resources and Sustainable Utilization in Xinjiang Uyghur Autonomous Region [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2005. [邓铭江. 新疆水资源及可持续利用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.]
- [12] Cui Caixia, Yang Qing, Wang Shengli. Comparison analysis of the long-term variations of snow cover between mountain and plain areas in Xinjiang region from 1960 to 2003 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, **27**(4): 486—490. [崔彩霞, 杨青, 王胜利. 1960—2003年新疆山区与平原积雪长期变化的对比分析[J]. *冰川冻土*, 2005, **27**(4): 486—490.]
- [13] Wen Kegang, Shi Yuguang. Encyclopedia of Meteorological Disasters in China: Volume of Xinjiang [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006. [温克刚, 史玉光. 中国气象灾害大典: 新疆卷 [M]. 北京: 气象出版社, 2006.]

- [14] Wang Qiuxiang, Zhang Chunliang, Liu Jing, *et al.* The changing tendency on the depth and days of snow cover in Northern Xinjiang[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2009, **5** (1): 39—43. [王秋香, 张春良, 刘静, 等. 北疆积雪深度和积雪日数的变化趋势[J]. *气候变化研究进展*, 2009, **5**(1): 39—43.]
- [15] Yang Zhenniang. *Glacier Water Resources in China*[M]. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1991: 81—150. [杨针娘. *中国冰川水资源*[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1991: 81—150.]
- [16] Wan Jintai, Zhang Jianguo, Miao Yan. Analysis of ice jam floods in river basins on the north slope of middle section of Tianshan Mountain, Xinjiang[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, **29**(5): 819—823. [万金泰, 张建国, 苗燕. 新疆天山北坡中段河流冰凌洪水特征分析[J]. *冰川冻土*, 2007, **29**(5): 819—823.]
- [17] Zhu Shoushen, Deng Xiaofeng. Distribution and characteristics of glacier debris flow along the Dushanzi-Korla Highway[J]. *Mountains Research*, 1995, **13**(3): 147—152. [朱守森, 邓晓峰. 独库公路冰川泥石流分布及其特征[J]. *山地研究*, 1995, **13**(3): 147—152.]
- [18] Wang Jingrong. An analysis of the harm and genesis of glacial debris flows along the China-Pakistan Highway from Kashi to Tashikueran[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1987, **9**(1): 87—94. [王景荣. 中巴公路喀什至塔什库勒干路段冰川泥石流[J]. *冰川冻土*, 1987, **9**(1): 87—94.]
- [19] Ma Dongtao, Cui Peng, Yang Kun, *et al.* An approach on debris flow hazards along the Xinjiang-Tibetan Highway Line in Xinjiang[J]. *Arid Land Geography*, 2003, **26**(4): 349—354. [马东涛, 崔鹏, 杨坤, 等. 新藏公路新疆段泥石流灾害初探[J]. *干旱区地理*, 2003, **26**(4): 349—354.]
- [20] Cogley J G, Hock R, Rasmussen L A, *et al.* Glossary of Glacier Mass Balance and Related Terms[M] // IHP-VII Technical Documents in Hydrology No. 86; IACS Contribution No. 2. Paris: UNESCO-IHP, 2011: 1—124.
- [21] Kotlyakov V M, Rototaeva O V, Nosenko G A. The September 2002 Kolka glacier catastrophe in North Ossetia, Russian Federation: evidence and analysis[J]. *Mountain Research and Development*, 2004, **24**(1): 78—83.
- [22] Huggel C, Zraggen-Oswald S, Haeblerli W, *et al.* The 2002 rock/ice avalanche at Kolka/Karmadon, Russian Caucasus: assessment of extraordinary avalanche formation and mobility, and application of QuickBird satellite imagery[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2005, **5**: 173—187.
- [23] Shen Yongping. A giant avalanche on K2 Mount, Karakorum[J]. *GeoJournal*, 1991, **25**(2/3): 249—254.
- [24] Shen Yongping, Wang Guoya, Su Hongchao, *et al.* Hydrological processes responding to climate warming in the upper reaches of Kelan River basin with snow-dominated of the Altay Mountains region, Xinjiang, China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, **29**(6): 845—854. [沈永平, 王国亚, 苏宏超, 等. 新疆阿尔泰山区克兰河上游水文过程对气候变暖的响应[J]. *冰川冻土*, 2007, **29**(6): 845—854.]
- [25] He Bing, Wang Guoya, Su Hongchao, *et al.* Response of extreme hydrological events to climate change in the regions of Altay Mountains, Xinjiang[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, **34**(4): 927—933. [贺斌, 王国亚, 苏宏超, 等. 新疆阿尔泰山地区极端水文事件对气候变化的响应[J]. *冰川冻土*, 2012, **34**(4): 927—933.]
- [26] Shen Yongping, Wang Guoya, Ding Yongjian, *et al.* Changes in glacier mass balance in watershed of Sary Jaz-Kumarik Rivers of Tianshan Mountains in 1957—2006 and their impact on water resources and trend to end of the 21th century[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, **31**(5): 792—800. [沈永平, 王国亚, 丁永建, 等. 1957—2006 年天山萨雷扎兹库玛拉克河流域冰川物质平衡变化及其对河流水资源的影响[J]. *冰川冻土*, 2009, **31**(5): 792—800.]
- [27] Shen Yongping, Wang Guoya, Ding Yongjian, *et al.* Changes in Merzbacher Lake of Inylchek Glacier and glacial flash floods in Aksu River basin, Tianshan during the period of 1903—2009[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, **31**(6): 993—997. [沈永平, 王国亚, 丁永建, 等. 百年来天山阿克苏河流域麦茨巴赫冰湖演化与冰川洪水灾害[J]. *冰川冻土*, 2009, **31**(6): 993—997.]
- [28] Wang Guoya, Shen Yongping, Su Hongchao, *et al.* Runoff changes in Aksu River basin during 1956—2006 and their impacts on water availability for Tarim River[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, **30**(4): 562—568. [王国亚, 沈永平, 苏宏超, 等. 1956—2006 年阿克苏河径流变化及其对区域水资源安全的可能影响[J]. *冰川冻土*, 2008, **30**(4): 562—568.]
- [29] Shen Yongping, Wang Shunde. New progress in glacier and water resources changes in Tarim basin, Xinjiang[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, **24**(6): 819. [沈永平, 王顺德. 塔里木盆地冰川及水资源变化研究新进展[J]. *冰川冻土*, 2002, **24**(6): 819.]
- [30] Zhou Yuchao, Chen Yaning, Wang Zhichao. The runoff characteristics in the Yarkant River[M]//Study on the Glacier Lake Outburst Floods of the Yarkant River, Karakorum Mountains. Beijing: Science Press, 1990: 12—24. [周聿超, 陈亚宁, 王志超. 叶尔羌河径流特征[M]//喀喇昆仑山叶尔羌河冰川湖突发洪水研究. 北京: 科学出版社, 1990: 12—24.]
- [31] Wang Di, Liu Jingshi, Hu Linjin, *et al.* Monitoring and analyzing the glacier lake outburst floods and glacier variation in the upper Yarkant River, Karakorum Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, **31**(5): 808—814. [王迪, 刘景时, 胡林金, 等. 近期喀喇昆仑山叶尔羌河冰川阻塞湖突发洪水及冰川变化监测分析[J]. *冰川冻土*, 2009, **31**(5): 808—814.]
- [32] Hao Pei. Wonderful beauty of Karakoram[J]. *China National Geography*, 2008(11): 72—81. [郝沛. 喀喇昆仑山深处的壮美[J]. *中国国家地理*, 2008(11): 71—81.]
- [33] Wang Guoya, Mao Weiyi, He Bin, *et al.* Changes in snow covers during 1961—2011 and its effects on frozen ground in

Altay region, Xinjiang[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 33(6): 1293—1300. [王国亚, 毛伟峰, 贺斌,

等. 新疆阿勒泰地区积雪变化特征及其对冻土的影响[J]. 冰川冻土, 2012, 33(6): 1293—1300.]

The Responses of Glaciers and Snow Cover to Climate Change in Xinjiang (II): Hazards Effects

SHEN Yong-ping¹, SU Hong-chao², WANG Guo-ya³, MAO Wei-yi⁴,
WANG Shun-de⁵, HAN Ping², WANG Ning-lian¹, LI Zhong-qin¹

(1. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou Gansu 730000, China; 2. Xinjiang Hydrology and Water Resources Bureau, Ürümqi Xinjiang 830000, China; 3. Geologic Hazards Prevention Institute, Gansu Academy of Sciences, Lanzhou Gansu 730000, China; 4. Xinjiang Climate Center, Ürümqi Xinjiang 830002, China; 5. Aksu Hydrology and Water Resources Reconnaissance Bureau, Aksu Xinjiang 843000, China)

Abstract: Glacier and snow cover distributed widely in Xinjiang, when its melt water supply to the rivers often accompanied by glacial floods, snowmelt floods, glacial lake outburst floods, glacial debris, ice and snow avalanches, snowdrift and other snow disasters. There are greater threats on the local urban residence and the important defense lines because of these disasters. The extent and range of the ice and snow disasters impact subjected to the changes of glacier and snow cover. The glacier flood and glacial lake outburst floods occurred mainly in the Karakoram Mountains, Kunlun Mountains and the western of the southern slope of the Tianshan Mountains in the Tarim River Basin. The snowmelt floods occurred mainly in Altay area, Tacheng area and the northern slope of the Tianshan Mountains in North Xinjiang. The glacier debris and the ice and snow avalanches disasters occurred mainly in the Pamirs Plateau, the western of the Tianshan Mountains, the Karakoram and the West Kunlun Mountains. The snowdrift occurred mainly in the middle and western of the Tianshan Mountains regions. With global warming, especially the beginning of the climate change from warm-dry to warm-wet in 1987 in Xinjiang, the glacier retreat intensified, the melt water increases, the glacier floods and debris flows increased with the increased of glacier melt water,

and the snowmelt floods, ice and snow avalanches and snowdrift enhanced with the snow cover increased in winter and the air temperature rise, the alpine ice disintegration caused by ice avalanches with climate warming showed an increasing trend. The ice and snow disasters dominated by the glacier and snow floods in Xinjiang. The increasing trend of the frequency and intensity of glacier and snow floods under the influence of climate change have been observed in the last decade in the Xinjiang region. The water safety and disasters and other problems caused by glacial lake outburst floods and glacial floods in the Tarim Basin and the ice and snowmelt floods in spring in North Xinjiang have become increasingly prominent, and have great harm on the local lives, property and socio-economic development. With the glacier melt water increasing, some new disaster may be formed in the future. For the numerous glaciers, snow disaster induced by the climate change, there is a lack of adaptation on disaster monitoring, forecasting and early warning. So it should be keep an eye on the ice and snow disasters with the global climate change accelerating consistently, and to strengthen the study of the impact assessment and adaptation strategies of the disasters, and make the science and technology play a leading role in disaster reduction.

Key words: ice and snow disaster; ice and snow floods; climate change; adaptation strategies; Xinjiang