

新疆冰川近期变化及其对水资源的影响研究^{*}

李忠勤 李开明 王 林

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰冻圈科学实验室/中国科学院天山冰川站, 兰州 730000)

摘要 新疆的冰川水资源居全国第一, 在新疆水资源构成和河川径流调节方面占有重要地位。最近 30 多年来, 随着气温升高, 冰川出现了剧烈的消融退缩, 冰川融水径流量普遍增加, 并对气温的依赖性增强。文章基于最新冰川观测研究资料, 阐述新疆冰川的近期变化, 分析对水资源的影响。研究表明, 所研究的 1800 条冰川, 在过去 26~44 年间, 总面积缩小了 11.7%, 平均每条冰川缩小 0.243km^2 , 末端退缩速率 5.8m/a 。冰川在不同区域的缩小比率为 $8.8\% \sim 34.2\%$, 单条冰川的平均缩小量为 $0.092 \sim 0.415\text{km}^2$, 末端平均后退量为 $3.5 \sim 10.5\text{m/a}$ 。由于新疆各流域中冰川的分布、变化特征, 以及融水所占河川径流的比例不同, 因此, 未来气候变化对新疆各个区域水资源的影响程度和表现形式是不同的。分析表明, 在塔里木河流域, 冰川水资源具有举足轻重的作用, 但是, 一旦冰川消融殆尽, 对该地区将产生灾难性影响, 现今该区冰川消融正盛, 估计在今后 30~50 年, 只要保持升温, 冰川融水量仍会维持。未来 20~40 年, 天山北麓水系中, 1km^2 左右的小冰川趋于消失, 大于 5km^2 冰川消融强烈, 因此, 以小冰川居多的河流受冰川变化的影响较大。东疆盆地水系中的冰川数量少, 并处在加速消融状态, 河川径流对冰川的依赖性强, 冰川的变化已经对水资源量及年内分配产生影响, 水资源已经处在不断恶化之中。对于伊犁河与额尔齐斯河流域, 未来冰川变化对水资源的影响在数量上可能有限, 但会大大削弱冰川融水径流的调节功能。而气候变化对积雪水资源的影响和可能造成的后果应该予以特别关注。

主题词 新疆 冰川变化 水资源 气候变化

中图分类号 P343.6, P641 **文献标识码** A

1 引言

1.1 新疆冰川水资源及其研究的重要性

新疆地处西北内陆干旱区, 水资源是制约社会经济发展的主要因素。在新疆的水资源构成中, 冰川和积雪形成的冰川水资源和积雪水资源占有重要地位。根据《简明中国冰川目录》^[1]和《中国冰川目录》资料^[2-5], 新疆共发育冰川 18311 条, 面积 24721.93km^2 , 冰储量 2623.4711km^3 , 折合成水储量 (即冰川固态水资源量) 为 $23611.2 \times 10^8\text{m}^3$, 约占全国冰川总储量的 46.8%, 位居第一。冰川分布在阿尔泰山、天山、帕米尔、喀喇昆仑山和昆仑山, 包含在额尔齐斯河、准噶尔内流河、中亚细亚内流河和塔里木内流河等水系中。

冰川消融释放出来的水体称为冰川融水径流, 包括两部分: 1) 降落在冰川表面的固态和液态降水

所产生的降水径流; 2) 冰川冰融化所产生的冰川径流。非冰川区季节性积雪形成的径流, 称为积雪径流, 不属于冰川融水径流。冰川融水径流参与河川径流循环, 是冰川所属流域的动态水资源, 体现冰川对流域水资源的贡献量。冰川融水径流量可以通过冰川物质平衡法、冰川融水径流模数法、流量与气温关系法、对比观测实验法、冰川系统法^[6]和径流分割法等计算。根据 20 世纪 80 年代中期以前的冰川资料推算, 全国冰川径流总量大约为 $563.3 \times 10^8\text{m}^3$ (后修正为 $604.65 \times 10^8\text{m}^3$)^[6-8], 其中, 新疆为 $188 \times 10^8\text{m}^3$ 。近 30 年以来, 新疆由于气温升高而造成冰川融水径流量显著增加, 根据新疆定位冰川观测资料 and 不同地区的径流变化情况^[9,10], 保守估计平均增幅大于 10%, 由此推算目前冰川融水径流在 $200 \times 10^8\text{m}^3$ 以上, 占新疆多年平均地表水资源量 $789 \times 10^8\text{m}^3$ 的 25% 以上。

冰川还是调节河川径流的“固体水库”。在湿

第一作者简介: 李忠勤 男 47 岁 研究员 冰川学专业 E-mail: lizq@lzb.ac.cn

^{*} 国家重点基础研究发展规划项目 (973 项目) (批准号: 2007CB411501)、中国科学院知识创新工程重要方向项目 (批准号: KZCX2-YW-127)、中国工程院重大咨询项目“新疆可持续发展中有关水资源的战略研究”和国家自然科学基金重点项目 (批准号: 40631001) 共同资助

2009-10-17 收稿, 2009-11-25 收修改稿

润低温年份,热量不足,冰川消融微弱,冰川积累增加,冰川融水径流减少;在干旱少雨年份,晴朗天气增多,冰川消融加剧,释放出大量冰川融水。冰川对流域水资源的年内分配亦具有重要的调节作用,干旱少雨的夏季,有冰川融水补给河流,就不会发生河道断流干枯的现象;遇到暴雨,部分降水会以固态的形式保留在冰川上而减少洪水危害。新疆多数河流水资源稳定,径流年际变化幅度小,变差系数(C_v 值)一般为 0.1~0.5,随冰川融水比例的增加而减小,最小为 0.1~0.2^[7]。

冰川对气候变化的响应十分敏感。过去百年间气候变暖导致全球平均气温升高了 0.74℃(IPCC, 2007 评估报告^[11])。根据新疆气象局观测数据,近 50 年新疆气温呈现升高趋势,尤其是最近 10 年(1998~2007 年)增温显著,是全疆 50 多年中最暖的时期,平均年气温升高了 0.9℃,高于全球平均增温幅度。受气温升高的影响,新疆大多数冰川自 20 世纪 50 年代以来,一直处于退缩状态,80 年代以前,退缩速度较为缓慢,之后呈加速退缩趋势。那些面积小,海拔低的冰川对气候变暖的响应最为敏感,目前处在迅速缩小甚至消亡之中。气候变暖对新疆水资源的影响,首先使冰川融水径流增大,而径流增加是以消耗冰川固体冰为代价的,随着冰川储量的迅速减少,冰川融水径流也会随之急剧减少,冰川水资源及其对河流的调节作用也随之消失。在冰川剧烈消融期,大量冰川融水径流常造成冰川阻塞湖溃决,产生突发性洪水灾害,需要特别关注和防范。

根据 IPCC 2007 评估报告^[11]和新疆气象局的预测,在未来百年尺度,全球气温还将升高 1.2~3.8℃,新疆地区 21 世纪初期(2001~2020 年)年平均温度增加幅度在 0.5~0.9℃;21 世纪前期(2021~2030 年),温度增加幅度在 1.2℃左右;到 21 世纪中后期气温将进一步增高。如此剧烈的升温,无疑会造成冰川、积雪水资源的更大变化,而这一变化对新疆水文、水资源产生的影响,关系到国家的安全,新疆的稳定和社会经济的可持续发展,是一个亟待搞清的科学问题。本研究基于最新冰川观测研究资料,阐述新疆冰川近 30 年来的变化,分析对水资源的影响。

有关新疆冰川的变化,国内曾开展过一些研究^[12~19],但由于受到资料的限制,反映近期大范围冰川剧烈消融变化的有限,也不能形成对新疆冰川变化的整体认知。国际上,有学者对中国境外中亚地区的冰川变化进行了研究^[20,21]。但从整体上看,

尽管人们对中亚干旱区水资源变化及其对生态环境的影响十分关注,但对冰川的研究仍然十分有限。

1.2 本研究的基本理论和方法

冰川变化信息,包括冰川面积、长度(末端变化)和体积(储量)等变化量,主要依靠地面或遥感观测获取。而预测未来新疆冰川水资源变化,则复杂得多,首先是搞清冰川对气候变化的响应机理,建立相应的冰川学模式,对已知的响应过程进行模拟验证,然后将气候变化的预测情景引入模式,模拟冰川对未来气候变化的动态响应过程 and 在不同时间尺度的状态。冰川对气候变化的响应包括直接响应和间接响应。直接响应是冰川表面物质、能量平衡对气候变化的响应,由此可以造成冰川积累和消融的即时变化,这种变化可以通过观测或物质平衡模式的计算得到。间接响应是冰川的动力学特性对气候变化的响应。冰川是运动的巨大冰体,运动造成了冰川形态的变化,改变了冰川各部分所处的水热条件,因此,冰川动力学特性的改变会间接影响到冰川各部分的积累和消融特征。间接响应所引起的冰川积消变化是一个缓慢的过程,这一过程也造成冰川变化显著地滞后于气候变化。对这一过程模拟需要通过冰川物理模式来实现,难度较大,对观测参数的要求也高。虽然有几种方法可以预测冰川的变化,例如,基于统计模式的“时间外延法”和物质平衡模式法等,但是这些方法对于长时间尺度预测和非稳定态冰川(例如处在快速消融过程中的冰川)的预测,误差较大,也不能预测冰川变化的动态过程。国际上比较通行的方法是使用冰川动力学模式来进行间接响应的预测。该模式是基于物质、能量和动量守恒而建立的物理学模式,不仅能够预测冰川在气候发生变化时详细的几何形状响应过程,而且可以预测冰川在给定气候情景下的最终退缩状况,实现由气候变化—冰川物质平衡变化—冰川动力学响应—冰川形态体积变化(冰川融水资源变化)的完整推算^[22~24]。

由于冰川动力学模式对观测参数的要求高^[24],研究工作主要针对资料完备的新疆天山乌鲁木齐河源 1 号冰川(1 号冰川)及其所处的乌鲁木齐河流域。此外,对于塔里木盆地阿克苏河上游另一长期观测的冰川——托木尔峰青冰滩 72 号冰川(72 号冰川),也进行了初步的模拟分析。有了模拟预测结果,便可以进行参数的敏感性试验,研究参数变化与模拟结果之间的关系。这些参数包括冰川形态参

数、冰川的热学、力学参数和冰川所处的水热条件参数等,尽可能多地囊括新疆其他冰川的相关参数范围。因此,通过参数敏感性试验,可以对更多的冰川进行变化预估。

本研究基于上述理论和方法,通过新疆冰川资料的分析研究,一方面提供新疆冰川在过去 30~50 年间变化的事实,另一方面以 1 号冰川和 72 号冰川的模拟预测结果和参数敏感性试验为参照,阐述目前我们对新疆冰川的变化及其对水资源影响的认知。

需要说明的是,新疆的冰川平均面积为 1.35km^2 。虽然大冰川($\geq 100\text{km}^2$)较全国其他地区多,但所占比例很小。而面积为 1km^2 以下的小冰川占冰川总数的 70% 以上^[1]。1 号冰川面积为 1.7km^2 ,研究结果对于我们认知小冰川变化规律具有十分重要的参考价值。72 号冰川面积要大一些,为 5.62km^2 ,但研究模拟工作仍处在探索阶段,由于缺乏对大型冰川的研究模拟,本文还难以在量值、过程和时间尺度上对新疆冰川水资源的未来变化进行定量地分析阐述。

在新疆各水系中,冰川的分布和融水径流所占的比例是不同的,因此,未来气候变化对其影响程度和表现形式有较大差异。人们最为关心的是未来由气候变化引发的水资源变化对新疆各个经济区域的影响,因此,本文将所研究的冰川归入 5 个经济地理单元的水系,予以分别讨论,包括塔里木河流域、天山北麓诸河、东疆盆地水系、伊犁河和额尔齐斯河流域。

2 资料

本文的研究基于 3 个方面的资料,一是 4 条定位观测冰川的观测研究资料,包含长期冰川变化观测序列,其模拟及敏感性试验结果,对于其他冰川的认知也有帮助(表 1);二是 8 条冰川的近期野外考察资料(表 1),结合过去的考察记录,可以详细地研究这些冰川的变化细节;三是通过遥感影像和地形图提取的不同时期冰川形态资料,用以研究大范围冰川的变化。新疆各区域固态、动态冰川资源基本情况源于《简明中国冰川编目》^[1]、《中国冰川编目Ⅲ》^[2-5]、谢自楚等^[6]和《中国冰川水资源》^[7]等文献资料。

2.1 冰川定位观测研究和野外考察资料

长期定位的冰川学观测研究十分有限。位于新疆天山乌鲁木齐河源的 1 号冰川是我国观测时间最

长的冰川,已有 50 年观测研究历史。1959 年我国建立的第一个冰川站——中国科学院天山冰川站,就坐落于此。为研究新疆不同区域冰川的变化情况,天山冰川站于 1998 年开始建立“新疆冰川观测网络”。截至 2009 年,已将定位观测冰川的数量增加到 6 个,除了乌鲁木齐河源 1 号冰川外,增加了奎屯河哈希勒根 51 号冰川、哈密庙尔沟冰帽、托木尔峰青冰滩 72 号冰川、博格达扇形分流冰川和友谊峰喀纳斯冰川,形成了中国境内天山和阿尔泰山较为完整的冰川观测网络。定位冰川观测研究最大优势在于资料序列长,观测内容系统而详尽,除了定期对冰川本身进行观测外,还增设了其他相关内容,例如冰川区水文气象观测,冰川动力学参数观测、雪冰物理化学过程观测等,旨在建立冰川与气候环境之间的定量关系。本研究所选取的定位观测冰川为 4 条(表 1),这些冰川有较长时间的观测资料序列,对其研究和未来变化模拟预测也构成了对新疆冰川响应气候变化的基本认知。

表 1 观测研究的单条冰川
Table 1 The investigated glaciers

水系名称	4 条定位观测冰川和时间序列(年)	8 条考察的冰川和考察年代(年)
天山北麓诸河	乌鲁木齐河源 1 号冰川, 1959 ~ 2009; 奎屯河哈希勒根 51 号冰川, 1998 ~ 2009	奎屯河哈希勒根 48 号冰川, 2005; 博格达峰北坡扇形分流冰川、四工河 4 号冰川, 2009
塔里木河流域	青冰滩 72 号冰川, 2007 ~ 2009	克其克库孜巴依冰川, 2007; 青冰滩 74 号冰川, 2008; 2009; 托木尔冰川, 2009
东疆盆地水系	哈密庙尔沟冰帽, 2004 ~ 2009	博格达峰南坡黑沟 8 号冰川, 2009
额尔齐斯河流域		友谊峰喀纳斯冰川, 2009
伊犁河流域	(无)	

冰川考察在新疆地区始于 1959 年,到目前为止,考察冰川共有 30 余条,遍及新疆各个山系^[26-29]。尽管野外考察时间通常比较短,但不同时期野外考察取得的单条冰川数据,为研究冰川变化提供了可靠依据。本文使用的 8 条冰川现状资料,均来自于笔者近年来组织实施的冰川学考察(见表 1),包括考察冰川的边界位置、物质平衡、冰川厚度、冰川表面运动速度、冰川温度和冰川区水文气象等。这些冰川大部分在以前曾被考察过,将冰川现状与以前考察的冰川状况相比较,即可获得这些冰川的变化情况。

2.2 遥感、地形图分析资料

利用近期遥感影像与早期影像或地形图的比较,可以得到区域尺度冰川面积、长度和末端位置变化等信息,是对单条冰川观测的重要补充,在国际上也被普遍采用。为使研究与野外观测验证结合起来,本研究购置了定位观测冰川所在的区域和其他几个重要区域的高分辨率卫星遥感影像,通过遥感影像和地面验证相结合的方法,获取到大范围冰川现状的信息。为了获得早期冰川信息,同时收集购买了相应冰川区 1962 ~ 1976 年期间的航空照片和 1:50000 地形图。影像解译分析工作严格按照国际冰川监测服务处(WGMS)提供的方法^[30]进行。

新疆地区卫星遥感资料中积雪覆盖普遍严重,许多冰川的末端还有表碛覆盖,给冰川边界提取造成很大困难。反复试验与野外验证表明,如果使用分辨率较低的遥感影像,如 Landsat 等影像,提取的冰川面积较实际的面积大许多,最多可多达 25% 以上。因此,本研究选择了 SPOT-5 高分辨率遥感影像,辅之以少量的 ASTER 影像(表 2),并结合数字高程模型(DEM)进行冰川边界的界定。为了得到积雪覆盖较少的影像,将卫星图像选择的时间范围扩大到 2000 年。为验证结果的可靠性,每年都进行有目的的实地考察,针对冰碛物的影响,专门进行了观测研究。

表 2 卫星遥感资料信息

Table 2 Information of remote-sensing images

水系名称	研究区域	影像类型	影像分辨率	影像时间 /年·月
天山北麓诸河	乌鲁木齐河流域	SPOT5;多光谱	5m	2005.10
	头屯河流域	SPOT5;多光谱	5m	2005.9
	奎屯地区	SPOT5;多光谱	10m	2004.10
	博格达峰地区	ASTER	15m	2006.9
塔里木盆地水系	托木尔峰地区	SPOT5;全色	5m	2003.9
	叶尔羌河流域	ASTER	15m	2002.9
东疆盆地水系	庙儿沟地区	SPOT5;全色	5m	2005.8
额尔齐斯河	(无)			
伊犁河	库克苏河地区	ASTER	15m	2004.9

本研究共提取分析了 1800 条冰川在过去 26 ~ 44 年间的变化。其中,天山地区有 1543 条,面积 2979.63km²,占中国境内天山冰川总数(9035 条)的 17%,总面积(9225km²)的 32%。

3 结果与讨论

3.1 新疆冰川近期变化的空间特征

根据 1962 ~ 1976 年和 2002 ~ 2006 年两期影像,对比研究的 1800 条冰川显示,在过去 26 ~ 44 年间,总面积缩小了 11.7%,平均每条冰川缩小 0.243km²,末端退缩速率 5.8m/a。冰川在不同区域的缩小比率为 8.8% ~ 34.2%,单条冰川的平均缩小量为 0.092 ~ 0.415km²,末端平均后退量为 3.5 ~ 10.5m/a。

冰川的面积缩小比率(反映冰川的相对变化)和单条冰川平均面积变化量(反映冰川的绝对变化量)在各个区域的分布见图 1。从图 1 看出,两种变化指标的空间分布特征大不相同,分析表明与各区的冰川规模有着密切的关系。由于小冰川对气候变化的响应敏感,因而以小冰川为主的区域,如乌鲁木齐河流域和头屯河流域,面积变化的相对值较大,但绝对值反而小;大冰川多的区域,如托木尔地区和叶尔羌河上游则相反,冰川面积相对变化较小,绝对变化量大。冰川绝对变化量的大小也反映了对河川径流贡献的多寡。事实上,冰川在不同区域的变化特征,不仅取决于冰川的规模,还取决于冰川所在区域的水热变化(气候变化)以及单条冰川的形态、地形条件及朝向等。即便是在同一个区域,水热条件相似,但其他条件不同,仍会造成单条冰川之间变化上的差异。同样道理,定位观测冰川的变化,与其所在区域内其他单条冰川的变化以及冰川的平均变化之间也会出现较大差异。

由于冰川末端变化在野外观测中容易获取,是一个有效描述冰川变化的参数。各研究区域的冰川末端退缩速率存在明显差异,在 3.5 ~ 10.5m/a 之间,显然与冰川面积缩小比率和冰川长度分布有关。同样的面积变化,长度大的冰川,末端退缩量也大,反之亦然。另外,尽管通过两个时期冰川参数比较来研究冰川变化时,会由于时间跨度不同而受到影响,但由于在 20 世纪 80 年代以前,冰川变化是比较缓慢的,所以,研究时段只要涵盖了最近 30 年,其结果便具有良好的可比性。

通过冰川面积变化,可以利用冰川面积-体积公式估算出冰川体积(储量)的变化。但由于这类公式通常为流域尺度的经验公式,在计算大范围冰川储量时,误差较大,因此,本研究未进行面积-体积转换。

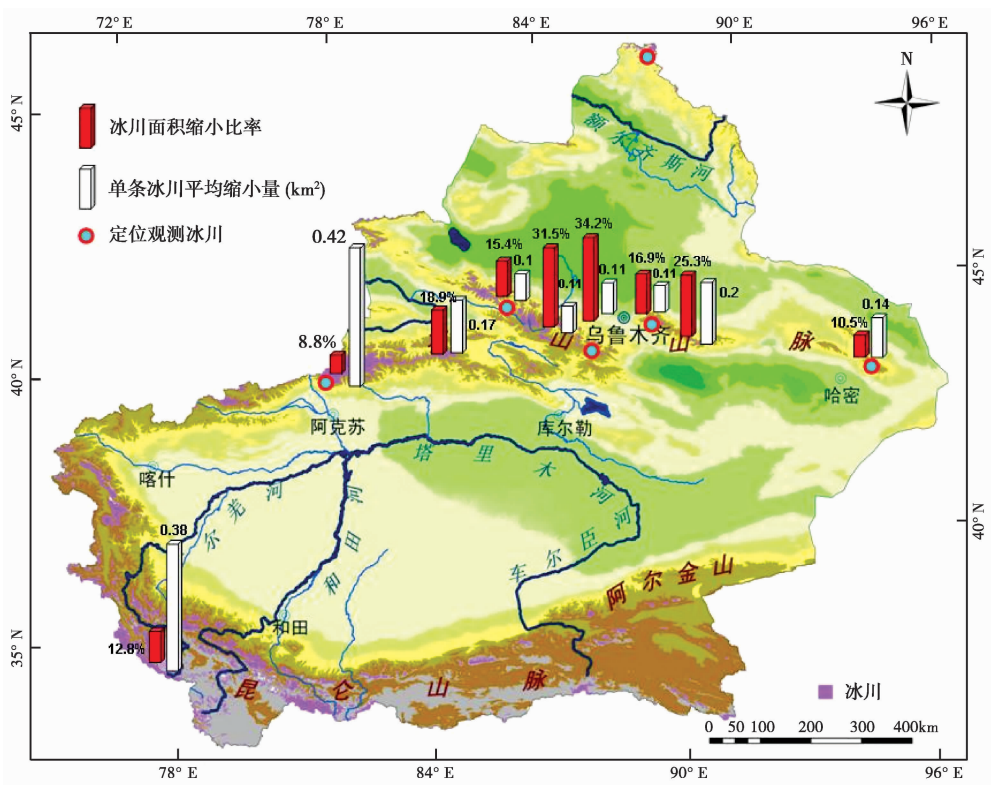


图 1 新疆冰川变化的空间特征

Fig. 1 Spatial characteristics of glacier variations in Xinjiang, North Western China

下文将对图 1 显示的冰川变化分布特征及其对水资源的影响,按区域加以讨论。而有关冰川变化与各种影响参数的定量分析结果需由另外专文论述,本文不加赘述。

3.2 天山北麓诸河

天山北麓准噶盆地水系共包含冰川 3399 条,面积 2251km²,冰储量 137.35km³,推算的冰川融水年径流量为 16.89×10⁸ m³,约占河川径流量 125×10⁸ m³ 的 13.5%。该区河流按冰川融水多少可分两类,一类是以小于 1km² 的小冰川为主,个别冰川面积达到 2~5km²,冰川融水占河川径流量 6%~20% 的流域,包括博格达山北坡河流、乌鲁木齐河、头屯河、三屯河、塔西河、精河等;另一类为玛纳斯河、霍尔果斯河、安集海河等,流域冰川面积均在 200km² 以上,冰川融水量占河川径流量的 35%~53%^[1,5-7]。

该区定位观测的冰川为 1 号冰川和奎屯河哈希勒根 51 号冰川。1 号冰川自 1959 年观测以来一直处于退缩状态,20 世纪 80 年代以后,退缩出现了加速趋势。冰川面积在 1962~2006 年期间减少了 14%,由 1.95km² 缩小到 1.68km²,平均缩小速率为 0.0061km²/a。冰川退缩导致 1 号冰川末端在 1993

年发生分离,成为东、西两支独立的冰川。1 号冰川末端 1959~1993 年的平均退缩速率为 4.5 m/a,1994~2004 年,东支为 3.5 m/a,西支为 5.8 m/a。1981~2006 年间,冰川厚度在东支主流线上减薄 0~30m,冰川下部减薄量大于上部。与冰川缩小相应的是冰川融水径流量大幅增加。1 号冰川平均融水径流深为 508.4 mm/a,而 1986~2001 年间为 936.6mm/a,增加了 84.2%^[9,10,14]。1 号冰川的观测研究结果表明,20 世纪 80 年代以来的快速升温,已使冰川融水径流对河川径流的贡献量大大增加。

通过定位监测和考察的结果表明,奎屯河哈希勒根 51 号冰川自 1998 年开始观测以来,消融程度尽管没有 1 号冰川大,但消融加速的趋势十分明显。该冰川面积由 1964 年的 1.558km² 缩小到 2004 年的 1.356km²,缩小了 0.202km²,或 13.0%,末端退缩率平均为 3.9m/a。冰川末端在 1964~2006 年间的平均退缩速率为 2m/a,而在 1999~2006 年则达到了 5.1m/a,增加了 1.5 倍。冰川表面运动速度也有减缓趋势,表明厚度的减薄。考察发现,与之相邻的 48 号冰川,在冰川末端退缩速率方面与 51 号冰川比较接近,而面积的变化相对较小,可能是由于 48 号冰川面积相对较大的缘故。该冰川积累区 10m

以下的粒雪层内,在 10 月份还存在大量的未冻结冰川融水,表明冰川冷储量低,对气候变暖的抵御力弱,处在迅速消融中。从这两条冰川下游将军庙水文站资料看,冰川融水径流自 20 世纪 90 年代后有显著增加。

博格达北坡扇形分流冰川和四工河 4 号冰川,在 1962~2006 年间,面积分别缩小了 7.1% 和 10.6%,末端平均退缩速率分别为 8.7 m/a 和 7.5 m/a。2009 年考察发现,冰川末端与 1981 年考察时^[12]相比,出现大量冰川湖泊,冰面消融量有增大的趋势。

该区通过遥感和地面验证的方法研究的冰川有 588 条,分布在 4 个区域:乌鲁木齐河流域、头屯河流域、奎屯河流域及博格达峰地区。乌鲁木齐河流域共有 150 条冰川,总面积由 1964 年的 48.667 km² 缩小到 1992 年的 41.965 km²,减少了 13.8%^[13],到 2005 年,冰川面积已经锐减到 32.052 km²,与 1964 年相比,减少了 34.2%,平均每条冰川缩小 0.111 km²,末端退缩速率 5.0 m/a。其中,有 11 条冰川因消融而完全消失。头屯河流域冰川是紧邻乌鲁木齐河流域,也是以小冰川为主的流域,研究区在 1964 年时有 172 条冰川,到 2005 年有 5 条小冰川消失;41 年间冰川面积损失了 31.5%,平均每条冰川缩小 0.092 km²,末端退缩速率 4.8 m/a。奎屯河流域研究区在 1964 年包含有 167 条冰川,到 2004 年,有 11 条冰川消失,面积损失了 15.4%,平均每条冰川缩小 0.095 km²,末端退缩速率 3.5 m/a。博格达峰北坡研究区在 1962 年包含有 99 条冰川,1962~2006 年期间,面积减小 16.9%,平均每条冰川缩小 0.107 km²,末端退缩速率 3.6 m/a。

根据冰川动力学模式对 1 号冰川的模拟预测研究结果,即便在目前气候条件不变的情况下,1 号冰川仍将继续退缩,直至 2180 年。而冰川融水径流在未来百年尺度上不断减少,到 2075 年左右削弱至目前水平的一半。在 IPCC 2007 评估报告^[11]提供的几种气候变化情景下,1 号冰川将在未来 70~90 年消失,极端升温条件下可在 50 年左右消失。冰川径流将在未来 40 年间保持相对稳定,而后发生急速下降,这种下降趋势一直持续到冰川消失。冰川融水径流是否会继续增加,取决于升温速率。如果采用冰川附近的气象站实测资料为基础所作气候预测情景,未来的 30 年,冰川融水径流将增加,幅度最高至目前水平的 21% 左右,而后急剧下降,直至冰川消失。将这一预估在乌鲁木齐河流域 150 条冰川上实

施,发现在各种气候变化情景下,乌河流域的融水径流在未来 20~30 年间有微弱增加趋势,而后也发生急剧衰弱,直至所有冰川消失。乌河流域冰川融水径流的变化快于 1 号冰川,原因是 1 号冰川是流域中冰川面积最大的冰川之一。

通过模式的敏感性分析,发现整个天山共有 7250 条冰川很可能比 1 号冰川变化、消失的更快。这些冰川的数量、面积(2133 km²)和体积(60.27 km³),各占中国天山所有冰川的 80%、23% 和 6%。引起这些冰川消融强于 1 号冰川的因素,例如,冰川的规模小于 1 号冰川,海拔高度低于 1 号冰川等等,若按照更加严格的参数进行敏感性分析,变化较 1 号冰川快的冰川数量会少一些,但可信度会提高一些。

尽管天山北麓诸河流域冰川的相对变化有所差别,但单条冰川平均变化量却相差无几,为 0.1 km² 左右。根据 1 号冰川的研究结果和敏感性试验,我们推测,未来 20~40 年内,天山北麓诸河流域中小于 1 km² 的冰川趋于消失,大于 5 km² 的冰川萎缩仍然强劲。因此,气候变化对冰川水资源的影响,在这一地区不同流域,差别较大。对于冰川覆盖度小的流域,如乌鲁木齐河和头屯河流域,冰川融水径流的贡献会变得微不足道,而对于冰川覆盖度大的流域,冰川融水径流在未来仍会保持一定份额。

3.3 塔里木河水系

塔里木盆地为我国最大的内流区,周围高山径流注入塔里木河水系中,我国境内有冰川 11665 条,面积 19878 km²,冰储量约为 2313 km³,吉尔吉斯斯坦境内冰川 613 条,面积 2120 km²,冰储量 260 km³。估算的冰川融水总量占河川总径流量 40% 以上,其中塔河源头的叶尔羌河、玉龙喀什河、库马力克河等大河冰川融水量比例更高,达 50%~80%^[1,4,6-8]。

该区定位观测冰川为托木尔峰青冰滩 72 号冰川,位于阿克苏河上游。阿克苏河是目前塔里木河的主要支流,供水量约占塔里木河地表径流量的 70%。根据观测,72 号冰川面积在 1964~2008 年间减少了 22.7%,由 7.27 km² 缩小到 5.62 km²。末端的退缩速率达到了 41.0 m/a。冰川下部厚度薄,温度高(接近 0℃),末端表碛厚度与消融关系密切。但整个冰川的运动补给强烈,冰川表面运动速度最高达到了 70 m/a,动力学作用不可忽视。与乌源 1 号冰川的观测资料相比,该冰川的消融和运动补给要强得多,具有海洋型冰川的某些特征,对气候的

变化十分敏感。

近期在这一地区考察的冰川有 3 条,青冰滩 74 号冰川 (9.55km^2)、克其克库孜巴依冰川 (42.83km^2) 和托木尔冰川 (310.14km^2)。1964 ~ 2009 年间,3 条冰川面积的缩小比率分别为 14.7%, 4.1% 和 0.3%; 末端平均退缩率分别为 30.0m/a , 22.9m/a 和 3.0m/a 。冰川处于剧烈消融的不稳定状态,冰川下部冰舌的厚度已变得很薄,在其他流域所建立的冰川面积-厚度经验公式已经无法适用。托木尔冰川是这一地区一条巨大的冰川,考察发现,由于受表碛覆盖的影响,该冰川面积和末端位置的变化相对较小,但厚度减薄十分显著。

在这一地区,通过遥感和地面验证的方法研究的冰川有 740 条,分布在两个地区,阿克苏河上游的托木尔峰地区和叶尔羌河上游。托木尔峰地区的冰川 483 条,分布在哈尔克他乌山南北坡,冰川规模差异很大,最大的在 300km^2 以上。冰川总面积由 1964 年的 2267.708km^2 缩小到 2003 年的 2067.412km^2 ,缩小了 8.8%,平均每条冰川缩小 0.415km^2 ,末端退缩速率 6.2m/a 。叶尔羌河上游研究区包含冰川 257 条,总面积在 1976 年为 768.633km^2 ,到 2002 年缩小为 670.328km^2 ,缩小了 12.8%,平均每条冰川缩小 0.383km^2 ,末端退缩速率 10.5m/a 。

观测研究发现,托木尔峰地区的冰川对气候变化的响应具有 4 个特征:1) 消融强烈,尽管该区冰川面积缩小的相对量较小,但每条冰川损失的绝对量大;2) 许多大冰川是以减薄的形式迅速消融,一般情况下,冰川消融遵循“减薄后退”的规律,但由于这一地区冰川末端有表碛覆盖,一定程度上延缓了冰川的后退。这一结论可以从冰川厚度已变得很薄得以证实;3) 气温升高对海拔相对较低的复式山谷冰川有很大影响。复式山谷冰川在这一地区的大冰川中占有绝对优势,其冰舌部分大都分布在山谷底部,海拔低,观测研究表明,冰舌部分消融强烈,对气候变化十分敏感,而其体积一般占整个冰川体积的 70% 以上,是冰川融水径流产生的主体。根据 72 号冰川动力学模拟研究推测,如果保持目前的升温速率,这类冰川的冰舌会在十几年的尺度消融殆尽,导致该地区冰川径流量的大大减少,而剩余的少量冰体,分布在高海拔处,尽管得以长期存在,但产生的冰川融水有限;4) 冰川表碛对于冰川末端退缩起到了延缓作用,但对于减少冰川表面消融的作用十分有限。以前的观点认为,该区冰川属于“托木尔

型”冰川,表碛分布广泛,对冰川具有很强的保护。而高分辨率遥感影像解译表明,这一地区冰川表碛覆盖度仅占冰川面积的 14.9%,主要分布在冰川末端。实地观测发现,只有很少一部分表碛厚度超过 $6\sim 10\text{cm}$,对冰川消融有较强抑制作用,大部分表碛的厚度都很薄,对冰川的消融起着促进作用。以上 4 个特征表明,托木尔峰地区冰川正在剧烈消融,其消融速度,比预期快得多。

叶尔羌河流域由于缺乏冰川实地考察,尚不能对冰川消融整体特征做出准确判断。遥感分析显示该区单条冰川面积减少量略大于托木尔地区的冰川,说明冰川的消融也是十分强烈。与托木尔地区不同的是,该区冰川末端表碛覆盖较少,这可能是导致冰川面积缩小幅度的原因。

根据冰川分布特征和消融变化情况,结合对典型冰川的模式预估,我们推测今后 30 ~ 50 年,如果继续保持升温,塔里木河的冰川融水径流仍会维持一定水平,但是,随着固态水资源量减少,融水径流量对气温变化的敏感性会逐步加大,在低温年份,枯水程度加剧。在此之后,由于大部分冰川固态资源消融殆尽,导致冰川径流锐减,最终处在一个较低的水平。由于观测资料系统性不足,时间序列较短,对变化过程时间尺度的预测,存在着不确定性,还需继续观测研究。总之,塔里木河流域冰川水资源具有举足轻重的作用,目前消融正盛,但是,一旦冰川消融殆尽,对该地区水资源将产生灾难性影响。

3.4 东疆盆地水系

东疆吐鲁番-哈密盆地属资源性缺水地区。冰川分布在哈尔里克山、巴里坤山、博格达山南坡和天格尔山,共 446 条,面积 252.7km^2 ,冰储量 11.4km^3 ,是乌鲁木齐市和吐鲁番盆地的重要水资源。过去 40 年以来,该区域冰川面积减小约 11%。估计目前的冰川年融水径流量为上述河川径流量的 25% 以上。

分布在博格达山南坡的冰川属于吐鲁番盆地水系。2009 年 8 月对博格达峰南坡的黑沟 8 号冰川进行了实地考察,对比根据 1962 年航摄绘制的地形图和 1981 年的考察资料,发现该冰川自 1962 年以来,面积由 5.71km^2 减小到 5.63km^2 ,缩小了 1.3%,末端平均退缩率为 11.0m/a 。由于该冰川冰舌狭长,末端海拔低,变化主要发生在冰川末端,以厚度减薄和末端退缩为主。1981 ~ 2009 年,冰川主流线厚度平均减少了 $10\text{m}^{[31]}$ 。

通过遥感和地面验证的方法,在博格达南坡研究的冰川 104 条。结果表明,1962~2006 年间,总面积缩小了 25.3%,平均每条冰川缩小 0.198km^2 ,末端退缩速率 4.5m/a 。同一时期博格达峰北坡冰川的变化较南坡小,南北坡共有 12 条冰川消失。这一带坎儿井水量减少与冰川冰川面积减少显然有密切的关系。

哈密盆地水系中,定位观测冰川为庙儿沟冰帽,观测从 2004 年开始^[15]。观测研究表明,该冰川在 1972~2005 年间,面积由 3.64km^2 缩小到 3.28km^2 ,缩小了 0.36km^2 或 9.9%。冰帽末端最大退缩速率平均为 2.3m/a 。2005 年以来,冰帽末端最大退缩速率平均增至为 2.7m/a 。物质平衡观测显示顶部的消融微弱。从钻取的冰芯资料来看,冰川在最近 20~30 年消融加快。冰帽的厚度在 1981~2007 年间减薄了 0~20m,主要发生在冰帽的中下部,顶端减薄不明显。冰川温度比较低,在冰帽底部 60m 处,冰川温度为 -8°C 。

通过遥感和地面验证的方法,在庙尔沟-伊吾河流域共研究了 75 条冰川,分属于哈尔里克山南坡和北坡,其中,南坡 50 条冰川,北坡 25 条冰川,南坡冰川平均面积较北坡略大。75 条冰川在 1972~2005 年间面积由 98.252km^2 缩小到 87.964km^2 ,损失了 10.5%,平均每条冰川缩小 0.137km^2 ,末端退缩速率 5.0m/a 。有 4 条冰川在这一时期消失。

庙尔沟地区冰川变化在新疆各区域当中相对来说比较小,原因是该区目前能够保存下来的冰川一般海拔都比较高,平均面积比较大。但是,该区水资源体系脆弱。对冰川融水的依赖性很强。最近 20 多年的快速变化,表明冰川处在消融急剧增强的阶段。根据哈密水文局的观测资料,在近年气温升高、降水稍有增加的背景下,该地区无冰川融水补给的河流,如头道沟河等,出现了径流量减少的趋势,表明降水的增加未能补偿蒸发的加剧;对于冰川融水补给较少的河流,如故乡河等,径流量在 2000 年以前是增加的,之后出现了减少或增加减缓的趋势,而且径流的变幅加大,洪枯季节水量悬殊,枯水季节延长,这些很可能缘于冰川调节作用的减弱;对于冰川融水补给较大的河流,如榆树沟河等,径流量虽仍然维持着增加趋势,但增幅已开始减小。这些径流变化过程反映了该区冰川变化对水文、水资源的影响及这种影响的不同阶段,且以冰川水资源的减少为主要特征。

简而言之,处在吐鲁番盆地水系博格达峰地区

的冰川,无论南坡还是北坡都在处于快速退缩减少状态,对其下游的乌鲁木齐市和吐鲁番盆地水资源有重大影响。而处在哈密盆地水系庙尔沟地区的冰川,消融呈增强趋势,对水资源量及年内分配已经造成显著影响。总体上看,东疆盆地水系的冰川处在加速消融状态,水资源处在不断恶化之中。

3.5 伊犁河与额尔齐斯河流域

伊犁河是新疆最大的河流之一。流域内共有冰川 2373 条,面积 2022.66km^2 ,冰储量 142.18km^3 。伊犁河流域冰川径流量约 $37.14\times 10^8\text{m}^3$,占总径流量的 19.2%。伊犁河流域单条冰川平均面积为 0.85km^2 ,与新疆其他地区冰川相比,属中等规模,对气候的响应亦较为敏感。

通过遥感方法,研究了该流域上游库克苏河地区的 293 条冰川。结果显示,在 1963~2004 年间,冰川总面积由 265.812km^2 缩小到 215.510km^2 ,损失了 18.9%,平均每条冰川缩小 0.172km^2 ,末端退缩速率 7.0m/a 。有 11 条冰川消失。尽管这一结果缺乏实地考察验证,但足以表明该区冰川的变化处在新疆各区域中等水平,冰川对径流的贡献和影响不容忽视。

额尔齐斯河位于新疆阿尔泰山南麓,共有冰川 403 条,冰川面积为 289.29km^2 。额尔齐斯河河川径流量约为 $100.0\times 10^8\text{m}^3$,其中冰川融水径流量约为 $7.73\times 10^8\text{m}^3$,占总径流量比重为 7.7%。平均冰川面积为 0.72km^2 ,是中国冰川雪线分布最低的流域。

冰川的分布主要集中在阿尔泰山脉的主峰——友谊峰四周。1980 年曾对友谊峰附近最大的冰川,喀纳斯冰川进行过冰川学考察^[26],2009 年 8 月进行了第二次考察。考察发现,由于这一带冰川的海拔高度相对较低,对气候变暖的响应也是十分敏感。喀纳斯冰川自 1980 年以来发生了很大变化,冰川积累区积雪明显减薄,雪线海拔高度上升至少 30m。冰川下部表面形成了多个消融洞穴,冰川末端出现了巨大冰洞,融水汹涌而出。对比以前的地形图发现,该冰川面积从 1959 年的 30.13km^2 缩小到 2009 年的 28.74km^2 ,损失了 4.6%,冰川末端退缩速率为 16.4m/a 。

尽管伊犁河与额尔齐斯河中有相当比例的冰川融水补给,但积雪径流占有主导地位,气候变化的影响已有所表现,例如,在额尔齐斯河流域中以融雪径流为主的克兰河,气温上升使得最大径流月由 20 世纪 50~60 年代的 6 月份提前至目前的 5 月份。融

雪的提前可能改善春季供用水,尤其是农业的春灌和农作物生长的需水。但夏季径流减少,尤其是在7~8月份的径流减少,对下游的农业生产、渔业等有很大影响。

总体上看,未来冰川变化对这两个流域水资源的影响在数量上有限,但会大大削弱冰川融水径流的调节功能。而气候变化对积雪径流的影响和可能造成的后果应该予以特别关注。

4 结论与展望

新疆的冰川资源居全国第一。冰川的存在对于新疆水资源构成和河川径流的调节具有十分重要的作用。过去30年以来,新疆冰川退缩显著。同期冰川融水径流增加显著,估计目前全疆冰川融水径流量在 $200\times 10^8\text{ m}^3$ 以上,约占新疆多年平均径流量的25%。气候变暖使得新疆冰川固态水资源量迅速减少,动态水资源量呈总体上升趋势,并对气温的依赖性增强。但未来会因冰川储量的枯竭而急剧减少,冰川水资源及其对河流的调节作用也随之消失,使水资源状况恶化。

气候变化对新疆各个区域水资源的影响程度和表现形式是不同的,应该分别进行研究,对于冰川径流比重大的河流,应该予以特别关注;积雪径流也是新疆水资源的重要组成部分,气候变化对积雪径流的影响和可能造成的后果也应该加以重视。另外,冰川、积雪的大量消失和减少,必然会改变其对气候系统的反馈作用,造成局地降水量的变化,影响山区水资源的形成,应该加强这方面的监测与研究。

对于塔河流域,由于冰川大量消融,冰川储量迅速减少,亟待建立冰川观测与预警体系,对该区冰川变化和冰雪洪水灾害进行监测,对冰川未来变化预测提供急需数据。因为该区冰川的消融变化不仅关系到南疆未来水资源配置和水利工程设计,而且对整个南疆社会经济的可持续发展具有深远的影响。

东疆庙尔沟地区的冰川退缩,已经对该区水文、水资源产生了明显影响,有必要对这种影响过程及其机理开展深入研究,以揭示冰川和水资源变化的普遍规律,弄清一些基本问题,包括降水、蒸发、冰川变化等要素对水资源的影响程度等。

新疆的冰川,在数量上以小冰川为主,小冰川抵御气候变化的能力差,处在不断消亡之中,所引起的景观变化将会十分明显;在冰川体积(储量)上,却是以大冰川为主,大冰川的变化对河川径流影响是主要的。本研究由于缺乏对大型冰川响应气候变化

规律的研究,对未来冰川动态水资源主体在量值、过程和时间尺度上的变化,还不能完全把握,因此,未来有必要进行针对性的观测研究。

本研究对新疆冰川过去的变化提供了丰富而可信的资料,但对其未来变化及其水资源影响还限于定性或半定量的分析推断,造成了对新疆各区未来冰川水资源变化评估的不确定性。进一步研究,应建立针对不同类型/不同规模冰川的定位观测体系,开展更为详细的流域尺度的冰川模拟预测研究。

致谢 本研究基于中国科学院天山冰川站观测研究人员的长期工作;研究和论文撰写过程中得到许多专家的建议;气候变化相关数据来自新疆气象局史玉光的研究,在此一并感谢。

参考文献 (References)

1 施雅风. 简明中国冰川目录. 上海:上海科学普及出版社, 2005. 17~188
Shi Yafeng. Concise Chinese Glacier Inventory. Shanghai: Shanghai Scientific Popularization Press, 2005. 17~188

2 中国科学院兰州冰川冻土研究所. 中国冰川目录(Ⅲ)天山山区(伊犁河流域区). 北京:科学出版社, 1986. 1~158
Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences. Glacier Inventory of China(Ⅲ): Tianshan Mountains (Ili River Drainage Basin). Beijing: Science Press, 1986. 1~158

3 中国科学院兰州冰川冻土研究所. 中国冰川目录(Ⅲ)天山山区(东部散流内流区). 北京:科学出版社, 1986. 1~83
Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences. Glacier Inventory of China(Ⅲ): Tianshan Mountains (Interior Drainage Area of Scattered Flow in East). Beijing: Science Press, 1986. 1~83

4 中国科学院兰州冰川冻土研究所. 中国冰川目录(Ⅲ)天山山区(西南部塔里木内流区). 北京:科学出版社, 1986. 1~187
Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences. Glacier Inventory of China(Ⅲ): Tianshan Mountains (Interior Drainage Area of Tarim Basin in Southwest). Beijing: Science Press, 1986. 1~187

5 中国科学院兰州冰川冻土研究所. 中国冰川目录(Ⅲ)天山山区(西北部准葛尔内流)区. 北京:科学出版社, 1986. 1~206
Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences. Glacier Inventory of China(Ⅲ): Tianshan Mountains (Interior Drainage Area of Junggar Basin in Northwest). Beijing: Science Press, 1986. 1~206

6 谢自楚,王欣,康尔泗等. 中国冰川径流的评估及其未来50a变化趋势预测. 冰川冻土, 2006, 28(4): 457~466
Xie Zichu, Wang Xin, Kang Ersi et al. Glacial runoff in China: An evaluation and prediction for the future 50 years. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(4): 457~466

7 杨针娘著. 中国冰川水资源. 兰州:甘肃科学技术出版社, 1991. 81~150
Yang Zhenliang. Glacier Water Resources in China. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1991. 81~150

8 康尔酒,杨针娘,赖祖铭等. 冰雪融水径流和山区河流. 见: 施雅风主编. 中国冰川与环境——现在、过去和未来. 北京: 科学出版社,2000. 190 ~ 233
Kang Ersi, Yang Zhenjiang, Lai Zuming *et al.* Runoff of snow and ice meltwater and mountainous rivers. In: Shia Yafeng ed. *Glaciers and Their Environments in China——The Present, Past and Future.* Beijing: Science Press, 2000. 190 ~ 233

9 Li Zhongqin, Wang Wenbin, Zhang Mingjun *et al.* Observed changes in streamflow at the headwaters of the Ürümqi River, Eastern Tianshan, Central Asia. *Hydrological Processes*, 2009, doi: 10. 1002/hyp. 7431

10 李忠勤, 韩添丁, 井哲帆等. 乌鲁木齐河源区气候变化和 1 号冰川 40a 观测事实. 冰川冻土, 2003, **25**(2): 117 ~ 123
Li Zhongqin, Han Tianding, Jing Zhefan *et al.* A summary of 40-year observed variation facts of climate and glacier No. 1 at headwater of Urumqi River, Tianshan, China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, **25**(2): 117 ~ 123

11 Solomon S, Qin D, Manning M *et al.* Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). United Kingdom, Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 235 ~ 336

12 伍光和, 张顺英, 王仲祥. 天山博格达峰现代冰川的进退变化. 冰川冻土, 1983, **5**(3): 143 ~ 152
Wu Guanghe, Zhang Shunying, Wang Zhongxiang. Retreat and advance of modern glaciers in Bogda, Tianshan. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1983, **5**(3): 143 ~ 152

13 陈建明, 刘潮海, 金明燮. 重复航空摄影测量方法在乌鲁木齐河流域冰川变化监测中的应用. 冰川冻土, 1996, **18**(4): 331 ~ 336
Chen Jianming, Liu Chaohai, Jin Mingxie. Application of the repeated aerial photogrammetry to monitoring glacier variation in the drainage area of the Ürümqi River. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1996, **18**(4): 331 ~ 336

14 李忠勤, 沈永平, 王飞腾等. 冰川消融对气候变化的响应——以乌鲁木齐河源 1 号冰川为例. 冰川冻土, 2007, **29**(3): 333 ~ 342
Li Zhongqin, Shen Yongping, Wang Feiteng *et al.* Response of glacier melting to climate change——Take Ürümqi glacier No. 1 as an example. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, **29**(3): 333 ~ 342

15 李忠勤, 王飞腾, 朱国才等. 天山庙尔沟平顶冰川的基本特征和过去 24a 间的厚度变化. 冰川冻土, 2007, **29**(1): 61 ~ 65
Li Zhongqin, Wang Feiteng, Zhu Guocai *et al.* Basic features of the Miaogou flat-topped glacier in East Tianshan Mountains and its thickness change over the past 24 years. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, **29**(1): 61 ~ 65

16 沈永平, 刘时银, 丁永建等. 天山南坡台兰河流域冰川物质平衡变化及其对径流的影响. 冰川冻土, 2003, **25**(2): 124 ~ 129
Shen Yongping, Liu Shiyin, Ding Yongjian *et al.* Glacier mass balance change in Tailanhe River watersheds on the south slope of the Tianshan Mountains and its impact on water resources. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, **25**(2): 124 ~ 129

17 谢昌卫, 丁永建, 刘时银等. 近 30a 来托木尔峰南麓科其喀尔冰川舌区变化. 冰川冻土, 2006, **28**(5): 672 ~ 677
Xie Changwei, Ding Yongjian, Liu Shiyin *et al.* Variation of Keqikaer glacier terminus in Tomur peak during last 30 years. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, **28**(5): 672 ~ 677

18 Liu Shiyin, Ding Yongjian, Shanguan Donghui *et al.* Glacier repeat as a result of climate warming and increased precipitation in the Tarim River basin, North West China. *Annals of Glaciology*, 2006, **43**, 91 ~ 96

19 Li Baolin, Zhu A-xing, Zhang Yichi *et al.* Glacier change over the past four decades in the middle Chinese Tien Shan. *Journal of Glaciology*, 2006, **52**(178): 425 ~ 432

20 Aizen V B, Kuzmichenok V A, Surazakov A B *et al.* Glacier changes in the Tien Shan as determined from topographic and remotely sensed data. *Global and Planetary Change*, 2007, **56**: 328 ~ 340

21 Bolch T. Climate change and glacier retreat in Northern Tien Shan (Kazakhstan/Kyrgyzstan) using remote sensing data. *Global and Planetary Change*, 2007, **56**: 1 ~ 12

22 Oerlemans J, Anderson B, Hubbard A *et al.* Modeling the response of glaciers to climate warming. *Climate Dynamics*, 1998, **14**(4): 267 ~ 274

23 Aðalgeirsdóttir G, Jóhannesson T, Björnsson H *et al.* Response of Hofsjökull and Southern Vatnajökull, Iceland, to climate change. *Journal of Geophysical Research*, 2006, **111**: F03001, doi: 10. 1029/2005JF000388

24 李慧林, 李忠勤, 沈永平等. 冰川动力学模式及其对中国冰川变化预测的适应性. 冰川冻土, 2007, **29**(2): 201 ~ 208
Li Huilin, Li Zhongqin, Shen Yongping *et al.* Glacier dynamic models and their applicability for the glaciers in China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, **29**(2): 201 ~ 208

25 李慧林, 李忠勤, 秦大河主编. 冰川动力学模式基本原理和参数观测指南. 北京: 气象出版社, 2009. 1 ~ 56
Li Huilin, Li Zhongqin, Qin Dahe eds. *Basic Principles of Glacial Dynamic Models and Observation Guide for Corresponding Parameters.* Beijing: China Meteorological Press, 2009. 1 ~ 56

26 王立伦, 刘潮海, 康兴成等. 我国阿尔泰山现代冰川的基本特征——以哈拉斯冰川为例. 冰川冻土, 1983, **5**(4): 27 ~ 38
Wang Lilun, Liu Chaohai, Kang Xingcheng *et al.* Fundamental features of modern glaciers in the Altay Shan of China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1983, **5**(4): 27 ~ 38

27 苏 珍. 喀喇昆仑山——昆仑山地区冰川与环境. 北京: 科学出版社, 1998. 10 ~ 123
Su Zhen. *Glaciers and Environment of the Karakorum-Kunlun Mountains.* Beijing: Science Press, 1998. 10 ~ 123

28 曹真堂. 西昆仑山南坡郭扎冰川水文特征的分析. 冰川冻土, 1993, **15**(4): 582 ~ 589
Cao Zhen tang. Glacio-hydrological characteristics of Gozha glacier on south slope of the West Kunlun Mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1993, **15**(4): 582 ~ 589

29 中国科学院登山科学考察队. 天山托木尔峰地区的冰川与气象. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1985. 32 ~ 98
Mountaineering and Expedition Term of Chinese Academy of Sciences. *Glacial and Weather in Mt. Tuomuer District, Tianshan.* Ürümqi: Xinjiang People's Publishing House, 1985. 32 ~ 98

30 Rau F, Mauz F, Vogt S *et al.* Illustrated GLIMS glacier classification manual. 2005, <http://nsidc.org/>

31 王宗太. 博格达峰黑沟 8 号冰川发育若干问题浅析. 冰川冻土, 1991, **13**(2): 141 ~ 158
Wang Zongtai. A discussion on the questions of development of Heigou Glacier No. 8 at Bogda-peak region. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1991, **13**(2): 141 ~ 158

STUDY ON RECENT GLACIER CHANGES AND THEIR IMPACT
ON WATER RESOURCES IN XINJIANG, NORTH WESTERN CHINA

Li Zhongqin Li Kaiming Wang Lin

(*State Key Laboratory of Cryospheric Sciences/Tianshan Glaciological Station, Cold and Arid Regions Environmental
and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000*)

Abstract

Xinjiang, the Uyger Autonomous Region in North Western China, possesses the biggest ice volume of the glaciers in China, which plays an extremely important role both on water resource and stabilization of river runoff in this vast arid and semi-arid region. During the past several decades, due to climate warming, the most glaciers in Xinjiang are in a state of rapid retreating. Therefore, the impact of the glacier recession on water resource has drawn a wide attention. Based on field observation and remote sensing data, this study has revealed the variations of 1800 glaciers during the past four decades and analyzed the potential influence of the glacier variations on the water resource in Xinjiang. As a result, the total area of the investigated glaciers has reduced 11.7%. The average area of individual glaciers has reduced by 0.243km², and the average retreat rate of that is 5.8m/a. The glacier area reductions in different drainage areas range between 8.8% ~ 34.2% for the total area, and 0.092 ~ 0.415km² for the individual glacier. The potential impact of the glacier recession on water resource in future is spatially different. For the Tarim River, the glacier runoff is estimated to maintain its current level in next 30 ~ 50 years if the air temperature continually increases. Because the glacial runoff accounts for a large amount of the river's runoff, at the beginning, the increasing in glacier melt would enrich the river runoff. However, once the ice volume reduced to a certain value, a shortage of water resource in Tarim River Basin is inevitable. In the north slop of Tianshan, the glaciers with a size smaller than 1km² are most likely to be melted away in next 20 ~ 40 years, and those larger than 5km² are melting intensively. The impact of which on different river basins in this region would be different depending on the proportion of glacial runoff to the river runoff. In Eastern Xinjiang, because the number of the glaciers is small and also because the climate is extremely dry, the glacier retreating are causing the water shortage problem. For Ili River and Irtysh River, because the river runoff are dominant by snow melt runoff, the impact of the glacier shrinkage and temperature rise would be limited with respect to the quantity of the river runoff, but significant on the annual distribution of the river runoff. The snow melt is important for these two river systems and needed to be particularly study.

Key words Xinjiang, glacier variation, water resources, climate change