

文章编号 1001 - 7410(2006) 05 - 762 - 10

中国西部冰川对近期气候变暖的响应^{*}

刘时银^{①②} 永建^① 李 晶^① 上官冬辉^① 张 勇^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, 兰州 730000; ^②中国科学院青藏高原研究所, 北京 100085)

摘要 中国冰川主要分布在青藏高原及周边地区, 在这一广大的区域内分布有冰川 46377 条。研究表明, 中国西部变暖显著, 1950 年代以来平均气温上升 0.2℃/10a, 其中 1990 年代是近千年中最暖的 10 年; 同时, 1950s 以来西北各省的降水量增加了约 18%。为认识这一气候变化对中国西部冰川的影响, 利用遥感和地理信息系统方法, 获取了近 50a 来 5000 多条冰川的变化状况。结果表明, 中国西部 82.2% 的冰川处于退缩状态, 冰川面积减少了 4.5%, 也有一些冰川处于前进状态。此外, 近数十年中国西部冰川变化表现出明显的区域差异, 青藏高原中部和西北部地区的冰川相对稳定, 而高原周边山区的冰川物质亏损严重, 处于加速退缩状态。

主题词 冰川变化 气候变暖 中国西部
中图分类号 P343.6 **文献标识码** A

1 中国冰川分布

中国西部从北到南分布有阿尔泰山、天山、帕米尔山、喀喇昆仑山、昆仑山和喜马拉雅山等主要山系, 它们与青藏高原共同构成了世界上海拔最高的高山和高原。青藏高原平均海拔达 4500m, 高海拔与严酷寒冷的环境为山地冰川发育提供了有利条件。据估计, 中国和中亚其他山区的现代冰川面积约为 114800km²^[1], 其中分布在中国境内的冰川有 46377 条, 总面积为 59425km²^[2], 约占中亚地区冰川总面积的 52%^[3] (图 1)。

根据中国西部不同区域冰川温度、冰川表面流速及冰川区主要气候特征, 将中国境内的冰川分为极大陆型、亚大陆型和海洋型冰川三大类, 极大陆型冰川主要分布在昆仑山中段和西段、羌塘高原、帕米尔高原东部、唐古拉山西段和祁连山西段; 亚大陆型冰川主要分布于天山、冈底斯山部分、喜马拉雅山中 - 西段北坡和喀喇昆仑山北坡; 海洋型冰川主要分布在受季风影响, 降水丰富的西藏东南部和川西滇西北地区^[4]。在中国西部冰川中, 面积 < 1km² 的小冰川占总数量的 77%, 其面积仅占总面积的 20%; 面积 > 10 km² 的大冰川数量较少, 但占冰川总面积的 37.6%, 其中, 有 33 条冰川的面积 > 100km², 其占中国冰川总

面积和总储量的 10.4% 和 26.3%^[2]。
在中国及中亚其他地区, 冰川是重要的淡水资源^[5], 黄河、长江、雅鲁藏布江 (布拉马普特拉河)、塔里木河、湄公河、怒江 (萨尔温江) 和恒河等大江大河都发源于这些地区的不同冰川作用区, 这些河流为流域内数亿人口提供了赖以生存的淡水资源。因此, 冰川在不同时空尺度的变化势必导致以冰川融水补给为主的河流水量的丰枯变化, 从而对各流域社会经济发展、生态与环境产生重要的影响^[3]。然而, 直到目前, 我们对中国西部冰川总体变化状况仍无比较全面的认识, 还不清楚目前变暖环境下冰川退缩对水资源的影响。本文试图对近几十年来中国西部冰川变化进行综合评估, 分析中国西部冰川变化的宏观特征。

2 近期气候变化

19 世纪末以来, 全球气候显著变暖, 全球平均气温升高了 0.6 ± 0.2℃, 尤以北半球中、高纬度陆地地区最明显, 这主要是由于以化石能源大量消耗为主的人类活动导致的温室气体增加引起的^[6]。对比各类气候代用指标表明, 20 世纪的升温幅度可能是近 1000a 来最大的, 且 1990s 可能是最近千年中最暖的 10 年^[6]。随着全球变暖, 水文循环也随之

第一作者简介: 刘时银 男 43 岁 研究员 冰川资源与环境研究专业 E-mail: liusy@lzb.ac.cn
^{*} 国家自然科学基金项目 (批准号: 40371026 和 90202013)、中国科学院知识创新工程项目 (批准号: KZCX3 - SW - 345 和 KZCX3 - SW - 339) 和中国科学院寒区旱区环境与工程研究所创新前沿项目 (批准号: 2004102) 联合资助
2006 - 03 - 26 收稿, 2006 - 06 - 14 收修改稿

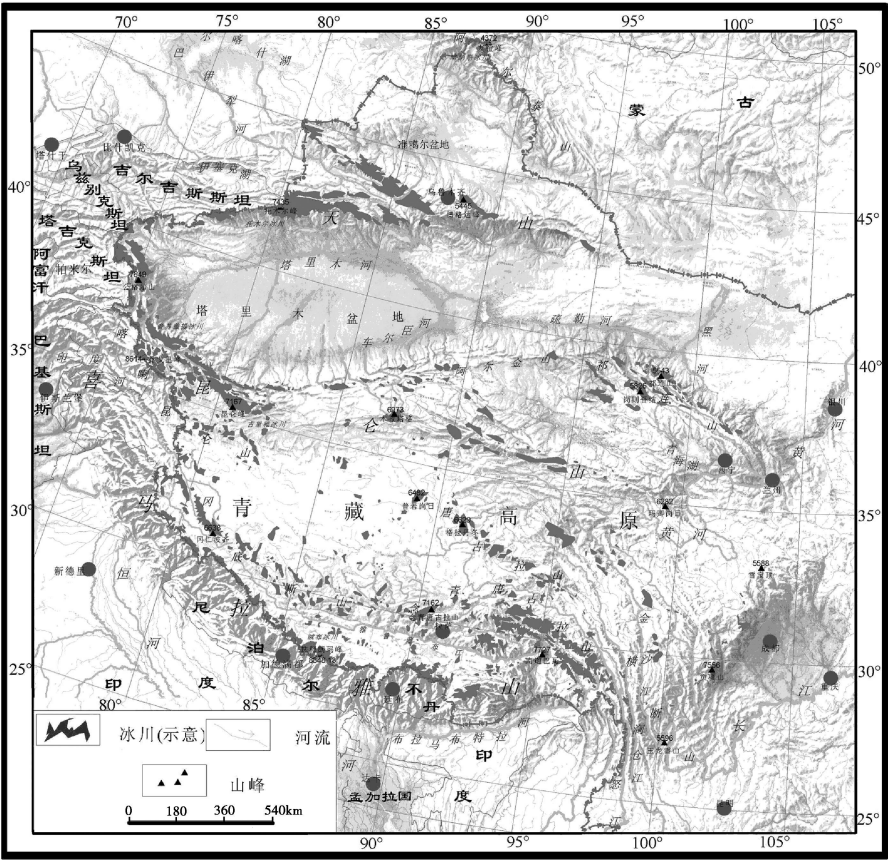


图 1 中国西部地理环境和冰川分布 (米德生提供)
Fig 1 Geographical settings and glacier distribution in Western China (data from Mi Desheng)

加快, 降水观测表明北半球中、高纬度陆地的降水量以 $0.5\% / 10a \sim 1.0\% / 10a$ 的速度增加, 但在大部分的亚热带地区, 20 世纪以来降水量呈下降趋势 (约 $0.3\% / 10a$)^[9]。

在全球变暖背景下, 20 世纪以来中国西部也处于变暖之中。近 120 年来中国西部气温上升了约 $1.2^{\circ}C$, 是全球平均升温幅度的两倍, 且最近 20a 变暖最明显^[7]。近 50 年的实测记录表明, 中国西部气温以 $0.2^{\circ}C / 10a$ 的趋势上升, 特别 20 世纪 80 ~ 90 年代升温迅速^[7], 但也有一些例外, 根据对马兰冰盖冰芯中 δO 记录^[8,9]和探空观测的 $0^{\circ}C$ 层高度变化^[10]的分析结果, 1980s 和 1990s 青藏高原中北部地区存在降温趋势。近 50a 来, 中国西部大部分地区降水有所增加, 1950s 以来西北各省 (新疆、甘肃西部、青海北部) 的降水量增加了 18% ^[11], 气象站季节积雪观测表明, 1950s 以来青藏高原季节性积雪呈增加趋势, 而新疆增加趋势并不明显^[12]。

在全球和中国西部地区升温 and 降水增加的趋势下, 中国西部冰川是如何变化的, 一直是冰川与冰川

水资源研究领域关注的问题之一。本文将通过分析典型监测冰川变化与区域冰川变化遥感监测结果, 对近数十年来中国西部的冰川变化及其特征进行评估。

3 典型监测冰川变化特征

中国境内仅有数条冰川有较长的观测数据, 分别是天山乌鲁木齐河源 1 号冰川、祁连山中段的七一冰川、贡嘎山东坡的海螺沟冰川、唐古拉山的小冬克玛底冰川和东昆仑山的煤矿冰川。此外, 20 世纪不同时段, 根据不同时期地形图、航空摄影照片及野外考察, 分别对中国西部地区有限数量冰川变化进行了分析和研究^[13~15]。下面简要介绍根据这些研究获得的中国西部典型监测冰川变化的基本特征。

乌鲁木齐河源 1 号冰川 该冰川是一条山谷冰川, 位于天山北坡乌鲁木齐河源区, 由东、西两支冰川组成。从 1950 年代末有观测记录以来, 1 号冰川物质平衡一直处于亏损状态, 1959 ~ 2002 年的 43a 间, 1 号冰川累计物质损失达 10597mm, 其中 1990s 中期以来呈加速亏损状态, 1995 / 1996 年以

来, 1号冰川累计物质损失已达 4437mm, 占整个观测时段物质损失的 42%^[16 17]。1962 ~ 2001 年间 1号冰川面积减少 0.22km², 到 2000年东支冰川末端退缩了 171m^[18], 且在 1993 年东、西两支冰川完全分离为独立冰川。

祁连山中段七一冰川 七一冰川是一条冰斗-山谷冰川, 面积 2.98km², 长 3.8km。研究表明, 20世纪 70年代七一冰川处于较大的正物质平衡, 年均 360mm; 1984 ~ 1988 年间年平均物质平衡为 4mm, 基本接近零平衡状态^[19 20], 而 2001 ~ 2003年冰川则处于加速退缩状态, 年平均物质平衡为 -563mm^[20]。同时, 1956 ~ 1975年间冰川末端以 2m/a 的速度后退, 1975 ~ 1997年间冰川末端以 1m/a 速度后退^[21]; 而最近的观测表明, 2001/2002 年冰川末端加速后退。

贡嘎山东坡海螺沟冰川 该冰川位于青藏高原东缘的贡嘎山东坡, 是一条长 13km、面积为 25.7 km² 的大型山谷冰川。自 1960年以来, 冰川一直处于持续的物质亏损状态, 尤其在 1990 ~ 1997年间海螺沟冰川处于强烈的负平衡状态^[22]。实地测量进一步证实海螺沟冰川退缩显著, 1966年以来冰川末端后退了约 545m^[21 23], 其中 1970s ~ 1980s 期间冰川末端相对稳定, 1990 ~ 1995年间末端退缩速度为 17m/a 而 1996 ~ 1998年间冰川末端加速后退, 速度达 18.3m/a

煤矿冰川和小冬克玛底冰川 煤矿冰川位于东昆仑山北坡西大滩附近, 小冬克玛底冰川为唐古拉山垭口北侧, 均为山谷冰川, 这两条冰川的观测始于 1989年。连续监测表明, 1993/1994年两条冰川均由正物质平衡向负平衡转变, 之后冰川物质损失加剧, 1993/1994年以来两条冰川的累计物质损失分别达 2200mm 和 1600mm^[24]。这种冰川负平衡变化在末端变化上也有所反映, 两条冰川末端后退出现于 1994年, 以小冬克玛底冰川为例, 该冰川 1994 ~ 2001年间累计退缩了 13m^[25]。

从中国西部典型监测冰川的物质平衡变化来看, 1970s/1980s 初开始, 尤其是 1990s 中期以来, 乌鲁木齐河源 1号冰川和其他代表性冰川处于加速退缩状态。七一冰川、海螺沟冰川、煤矿冰川和小冬克玛底冰川在 1990s 左右分别由正物质平衡转为负物质平衡状态, 这与全球冰川变化趋势趋于一致 (图 2)。20世纪 50年代以来, 全球冰川冬季积累与夏季消融均呈稳定增加的趋势^[26 ~ 28], 由图 2可以看出, 由于不同地区的气候背景及其变化幅度和过程

存在一定差异, 观测冰川的物质平衡变化过程也有所不同; 从全球尺度上看, 1960s 以来, 各监测冰川分别在不同时段由正物质平衡转为负平衡, 1990s 以来, 呈加速退缩状态^[26], 并且各观测冰川不论是简单的算术平均还是面积加权平均, 近 50 年来, 观测冰川在总体上表现为物质亏损。

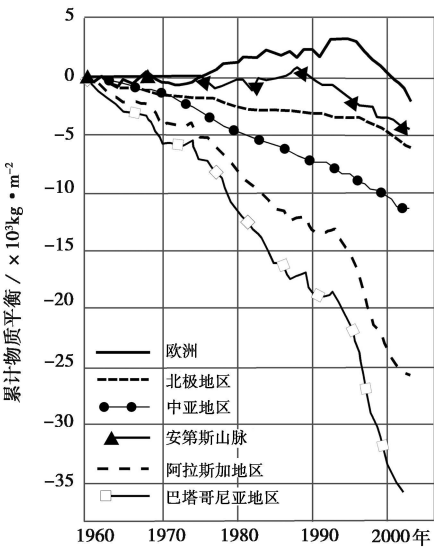


图 2 全球不同地区冰川累计物质平衡变化趋势^[26]
Fig 2 Cumulative specific mass balances of glaciers and ice caps of the globe. Specific mass balance shows the strength of climate change in the respective region

根据不同时期测量制图及不定期的实地考察观测, 研究发现^[13 ~ 15], 1950s ~ 1970s 中国西部有 55.4% 的冰川处于退缩状态; 1960s ~ 1970s 退缩冰川占 47.7%, 约 30% 的冰川处于稳定状态 (图 3); 1973 ~ 1981 年间所统计的 178 条冰川中, 有三分之二的冰川处于退缩状态, 这可能与不同规模、不同类型冰川对气候变化的响应特征和响应时间有密切的关系。由于中国西部广大区域内仅有数条典型监测冰川, 实地考察的地区和观测的冰川数量也十分有限, 中国西部冰川是否也与全球及中国典型监测冰川的变化类似, 特别是冰川变化给西部水资源变化

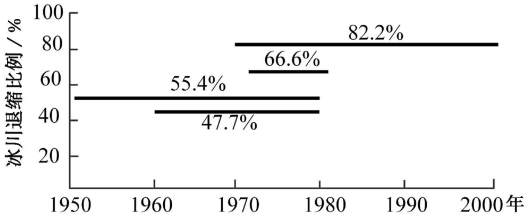


图 3 中国西部地区不同时段冰川退缩比例
Fig 3 Percentage of retreated glaciers in Western China

带来了什么样的影响, 一直是冰川研究所关注的重要内容之一。针对这一事实, 本文利用遥感和地理信息系统方法, 获取了近 50a来中国西部不同地区 5000余条冰川的变化状况, 分析中国西部冰川变化的宏观特征。

4 西部冰川遥感监测

随着遥感 (RS)和地理信息系统 (GIS)技术的飞速发展, 卫星遥感影像在中国西部冰川变化监测方面得到了广泛的应用^[29~36]。表 1列出了利用 RS 和 GIS方法进行中国西部不同区域、不同时段冰川变化监测的进展情况。在冰川变化的遥感监测过程中, 主要采用了 Landsat TM (Thematic Mapper) / ETM⁺ (Enhanced Thematic Mapper)和 Terra ASTER (Advanced Spaceborne Thematic Emission and Reflection Radiometer)影像数据。这些影像均以大比例尺地形图为参考进行几何纠正, 并采用 Krovinsky 椭球体和 Albers等面积圆锥投影变换成统一的投影系统, 同时采用 90m 分辨率的数字高程模型 (DEM)对影像进行正射纠正, 以消除山区云量的影响。采用上述纠正后的误差在 1个像元 (15~30m)左右。然后, 对上述纠正后影像中的冰川分布边界进行人工判读, 对于表碛较为发育的冰川作用区, 同时采用影像叠加 DEM 进行立体显示, 结合冰川学知识, 辅助提高冰川末端界线的识别精度, 冰川界线识别和矢量化均在 GIS支持下完成, 经拓扑变换后, 可获取冰川面积等参数。对于面积小于 0.02km²的冰川, 目视解译误差较大, 在 8%~12%之间, 而大冰川的误差小于 1%^[36]。总体而言, 由于存在纠正误差、人工识别误差 (1~2个像元)等,

导致遥感影像识别冰川变化的误差一般在 90m 左右, 因此, 在进行冰川变化分析时, 仅采用冰川长度变化幅度在 90m 以上的数据, 在此基础上获得了中国西部不同区域近 50a来 5000余条冰川的变化数据。下文以分区形式, 探讨中国西部冰川变化的宏观特征。

祁连山 比较航空照片 (获取时间分别为 1956年、1966年和 1972年)和 Landsat TM 影像 (2000年和 2001年)的冰川分布范围发现, 祁连山东段东北坡的 33条冰川全部处于退缩状态, 冰川长度退缩速度约 11.5m/a 其中 6条冰川在 1972~2001年间消失。在祁连山西段, 95%的冰川以 4.9m/a的速度退缩, 同时发现有 10条冰川在 1956~2000年间处于前进状态。研究表明, 1956~1990年祁连山西段西北坡的 170条冰川总面积减少了 4.8%; 对于面积小于 1km²的冰川来说, 其退缩更为显著, 这类冰川总面积减少了 23%^[30]。

天山 天山分布了 9000多条冰川, 总面积达 9225km²。根据天山北坡乌鲁木齐河源 1962年和 1992年、伊犁河源 1962年和 1989年的两次重复航空摄影制图, 分析发现, 量测的 251条冰川在上述时段均处于退缩状态, 但两个流域的冰川面积变化有一定差别, 乌鲁木齐河源区冰川面积减少了 13.8%, 而伊犁河源区冰川面积仅减少了 3.1%; 然而, 两个流域冰川平均厚度减薄比较一致, 乌鲁木齐河源区与伊犁河源区冰川厚度减薄分别为 5.8m 和 6.1m^[37]。天山南坡 (阿克苏河、开都河等)的冰川变化主要基于 1960s早期的航空摄影照片和 1999年、2000年的 Landsat TM 影像资料获取的, 在过去 40a间, 天山南坡量算的冰川既有退缩的, 也有处于

表 1 中国西部不同区域冰川变化监测采用的数据类型及获取时间
Table 1 Types and obtaining time of data used for analyzing glacier changes during the past decades in selected mountainous regions in China

山脉	数据类型及第一次数据获取时间 /年			数据类型及第二次数据获取时间 * /年			
祁连山	1:50K /100K 地形图, 航空照片	1956	1966	1972	Landsat TM	2000	2001
天山	1:50K /100K 地形图, 航空照片	1962	1964		Aerial photographs; Landsat TM	1992	1989; 1999 2000
昆仑山	1:100K 地形图, 航空照片	1970	1966		Landsat MSS; Landsat TM /ETM ⁺	1976	1989; 2000
喀喇昆仑山	1:50K /100K 地形图, 航空照片	1937	1968		Landsat MSS; Landsat ETM ⁺	1973	2000
东帕米尔	1:50K /100K 地形图, 航空照片	1962~1965	1975	1985	Landsat TM; ASTER	2001	2001
青藏高原内部	1:100K 地形图, 航空照片	1974			Landsat TM	2001	
青藏高原东南部	1:100K 地形图, 航空照片	1980			CBERS; Landsat TM	2001	
珠穆朗玛峰北坡	1:100K 地形图, 航空照片	1970			ASTER; CBERS	2001	2002

* CBERS 指中巴资源卫星; Landsat TM 是 Landsat Thematic Mapper数据; Landsat ETM⁺是 Landsat Enhanced Thematic Mapper数据; Landsat MSS是 Landsat Multispectral Scanner数据; ASTER是指 Advanced Spaceborne Thematic Emission and Reflection Radiometer数据; K代表 1000

前进状态的,其中退缩冰川的数量占量算冰川数量的 69.4% 而 30.4%冰川处于前进状态。前进冰川面积扩大与退缩冰川面积缩小相互抵消后,天山南坡冰川面积仍呈萎缩状态,减少的冰川面积占量算冰川总面积的 4.6%。

东帕米尔高原 1956年,一支由登山队员和冰川学家组成的联合考察队对东帕米尔地区进行了考察,并对该地区 16条冰川的末端位置进行了测量。此后,1960年、1970s末和 1987年,有关学者对其中的部分冰川又进行了观测。研究表明,除一条冰川在 1970s末转为前进外,其余冰川均处于退缩状态^[25]。据 1965年和 1975年的航摄制图及 2001年获取的 ASTER 与 Landsat TM 资料表明,虽然有 26%的冰川在前进,但东帕米尔地区的冰川总体处于冰量减少状态,冰川面积减少了 10%。

喀喇昆仑山 喀喇昆仑山拥有世界第二高峰,其北坡是中国境内海拔最高、范围最大的冰川作用中心之一。对比 1937年的实地观测资料、1968年的地形图和 1973年的 Landsat MSS (Multi-spectral Scanner)影像资料发现,1937~1968年间,K2冰川后退了 1.7km,但 1968~1973年间退缩速度有所减慢。临近的两条冰川也有类似的变化,但也发现同期有两条冰川处于前进状态^[38]。对地形图和 Landsat ETM⁺影像进行分析后发现,该地区的冰川变化情况较复杂,近几十年一些大的冰川处于稳定或前进状态,有些甚至出现冰川跃动现象(表 2)^[34]。

青藏高原 青藏高原范围广大、海拔高耸,为现代冰川发育提供了有利条件,分布于青藏高原的冰川总面积和总储量分别占中国冰川总面积和总储量的 84%和 81.6%(包括祁连山和喀喇昆仑山的冰川)。受西风和南亚季风的共同影响,青藏高原的冰川分属于季风海洋性型冰川(高原东南部和横断山脉)、亚大陆型冰川(喜马拉雅山、高原东北部)和极大陆型冰川(中部和西北部)。由于高原不同区域气候类型与气候变化差异较大,导致冰川变化也表现出较大的区域差异。昆仑山位于高原北缘,近 40a来,昆仑山冰川总体呈退缩状态,但不同区域冰川退缩幅度不同,自 1966年以来昆仑山东段的冰川面积减少了 17%^[29],而昆仑山西段自 1970年以来只减少了 0.3%^[39],昆仑山中部的冰川变化幅度介于两者之间^[31]。近 30a来,青藏高原中部地区冰川处于相对稳定状态,但也呈现出退缩的发展趋势,例如,长江源区的冰川面积减少了 1.7%^[34]。喜马拉雅

表 2 1968~2000年间喀喇昆仑山北坡一些大冰川的变化情况^[34]

Table 2 Changes of some large glaciers during 1968~2000 on the north slope of the Karakorum

冰川编号	地形图			Landsat ETM ⁺ (2000年)	
	年份	长度	末端海拔	长度变化	末端海拔
	年	km	m	/±21.3m	m
5Y654D0042	1976	29.4	4100	-478	4130
5Y654D0048	1976	6.1	4780	2050	4280
5Y654D0053	1968	42.0	4000	稳定	表碛覆盖
5Y654D0077	1968	5.3	5030	910	4920
5Y654D0078	1968	2.8	5080	140	5040
5Y654D0096	1968	17.7	4120	-2662	4460
5Y654D0097	1968	10.7	4620	1998	4580
5Y654C0081	1976	10.0	5280		稳定
5Y654C0092	1976	14.5	5014		稳定
5Y654C0116	1976	20.8	4760		稳定
5Y654C0128	1976	28.0	4520		稳定
5Y654C0145	1976	27.8	4412		稳定
5Y654C0163	1976	26.0	4250		稳定
5Y653K0072	1976	20.7	5220		稳定
5Y653Q0185	1976	4.4	5040	-278	5120

雅山北坡的冰川萎缩较为显著,近 20a有大量小冰川已经消失^[35]。

5 讨论与结论

表 3是近 50a来中国西部冰川变化的遥感监测结果,可以看出 82.2%的冰川处于退缩状态(见图 3),其余冰川处于前进状态,但这并不意味着这些前进冰川在整个观测时段都处于前进状态。1980s以来,中国西部气候变暖较为显著,在过去几十年中略有扩张的冰川已纷纷转为退缩状态。根据遥感监测结果,前进冰川面积扩大与退缩冰川面积缩小相互抵消后,1950s末至 1970s末冰川仍处于退缩状态,面积减少了 4.5%。从乌鲁木齐河源 1号冰川和其他代表性冰川的物质平衡变化来看,从 20世纪 70s末/80s初开始,特别是 1990s以来,各冰川呈加速物质亏损状态。由此可见,在全球和西部地区不断升温的趋势下,中国西部冰川未来出现大范围、强烈的物质亏损趋势将不可逆转。

从表 3可以看出,不同区域冰川变化的观测时段差别较大,这主要取决于航空摄影和遥感影像的获取时间不同。在研究不同区域的冰川变化特征时,应考虑这种时间的不一致性。为此,计算了不同

表 3 中国西部不同地区近几十年来冰川变化遥感监测结果

Table 3 Changes of glaciers in representative regions in Western China during the past few decades monitored by remote sensing method

区域	时段/年	冰川数量	第一次冰川编目时冰川面积/km ²	面积变化/km ²	面积变化比例/%	前进冰川数量	资料来源
西祁连山	1956~1990	170	162.8±3.3	-7.8±0.2	-4.8	0	刘潮海等 ^[37]
天山	1962/1963/1964~1989/1999/2000	960	2382.6±119.1	-111.3±0.6	-4.7	224	本研究和刘潮海等 ^[37]
青藏高原	1966/1968/1969/1970/1980~1999/2000/2001	2572	7282±218.5	-236±7.1	-3.2	387	本研究、刘时银等 ^[21,31,32] 、鲁安新等 ^[33] 、上官冬辉等 ^[34] 和晋锐等 ^[35]
东帕米尔	1960/1975~1999	753	1889.7±94.5	-188.1±9.4	-10.0	198	本研究
喀喇昆仑山	1968~1999	565	2707.3±243.7	-111.1±10	-4.1	85	上官冬辉等 ^[34]
总计		5020	14424.4±679	-654.3±27.2	-4.5	894	

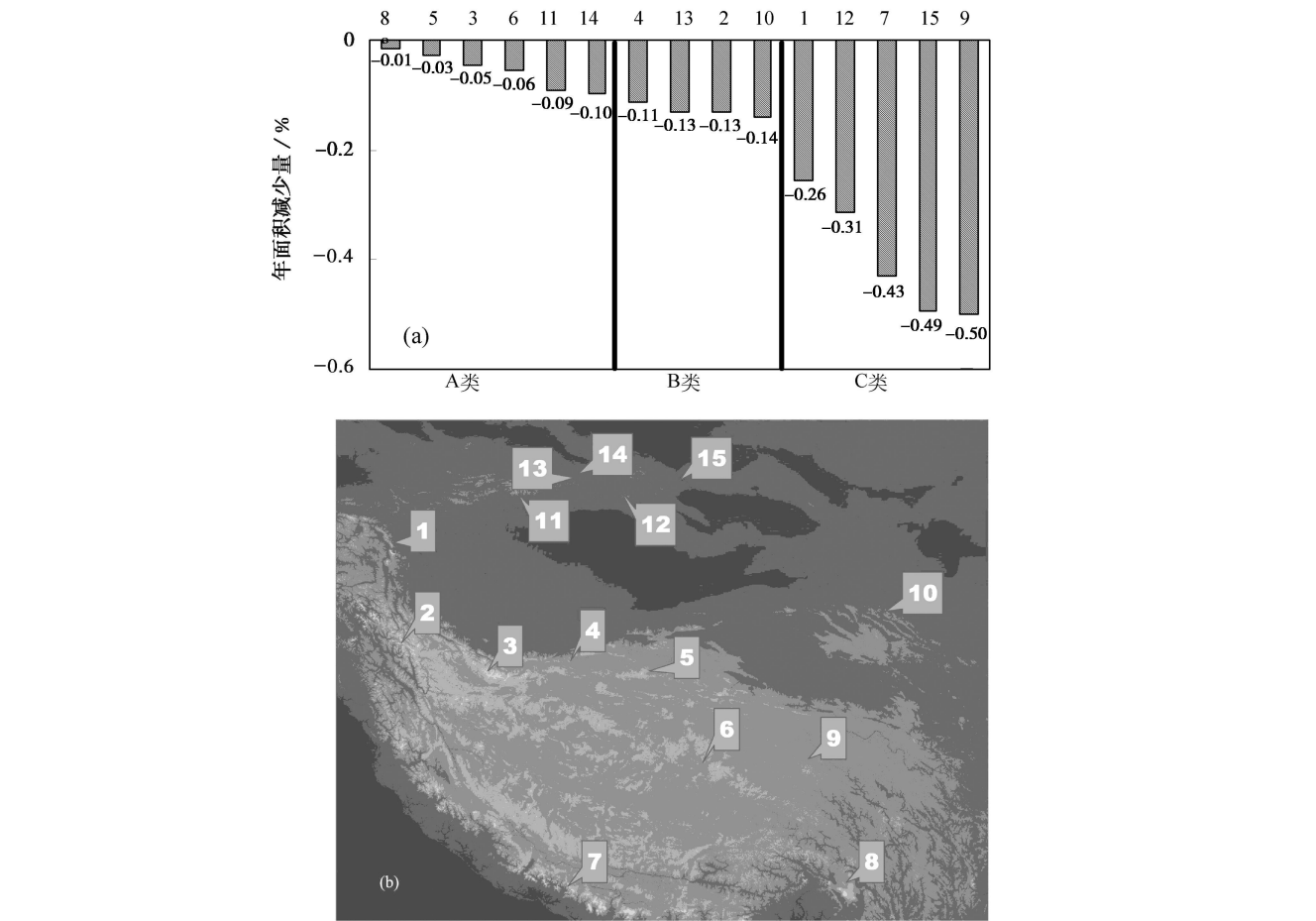


图 4 各河流源区及山区冰川面积变化比例 (a) 及各监测区分布情况 (b)

1. 盖孜河 2. 叶尔羌河 3. 和田河 4. 克里雅河 5. 新青峰冰帽 6. 格拉丹东山区 7. 朋曲河 8. 岗日嘎布山 9. 阿尼玛卿山区
10. 祁连山西部 11. 阿克苏河 12. 开都河 13. 喀什河 14. 四棵河 15. 乌鲁木齐河

Fig 4 Retreat annual percentages of glacier areas in river origin region and mountainous region (a) and the distribution of monitoring sites (b)

区域冰川面积变化的年平均速率(简称 APAC)。如图 4 所示, 15 个监测研究区冰川面积变化的 APAC 表现出很大的区域差异性, 据此将不同区域冰川划分为 3 类: A 类 ($APAC \leq 0.1\% / a$), B 类 ($0.1\% < APAC \leq 0.2\%$) 和 C 类 ($APAC > 0.2\%$)。冰川面积减少的地区差异可能与监测时段、区域气候的变

化及冰川对气候变化的响应等因素有关。在此, 本文仅以青藏高原近期气候变化为例, 探讨中国西部高海拔地区冰川变化的区域差异性。

Zhao等^[40]对 1967~1997年间青藏高原气候变化进行了系统分析, 根据高原上 50个气象站气候变化特征将青藏高原分为 4个亚区(表 4), 近 30a中 4个亚区均表现出升温趋势, 但不同地区升温变化存在较大差异。总体上看, 冷季(8~次年 3月)比暖季(4~9月)升温明显, 尤其是高原北部, 近 30a间高原北部地区冷季气温升高了约 1℃, 而高原中部和东南部冷季气温上升了约 0.4~0.5℃; 相同时段内, 高原中部和东南部暖季气温上升了约 0.35~0.65℃。同期, 高原北部年降水量减少, 而高原西北部、中部和东南部地区的降水量则有所增加。在高原的东北部, 主要是西昆仑北坡, 年降水量的最大增量约为 13mm, 占 31a(1967~1997年)来年均降水量的 35%; 高原东南部降水量年均增加约 30mm, 占 31a(1967~1997年)来平均年降水量的 5.3%; 高原内部降水年均增加约 20mm, 占 31a(1967~1997年)来平均年降水量的 4.1%; 而高原东北部的降水量年均减少约 4mm, 占 31a(1967~1997年)来平均年降水量的 2%。根据冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录和探空观测, 施雅风等^[2]认为高原北部近几十年(1961~2002年)有变冷趋势, 而 Zhao等^[40]的研究结果表明除中部地区之外高原经历了前所未有的升温。

表 4 1967~1998年间青藏高原不同地区的气候变化^[40]
Table 4 Climate change during 1967 and 1998
over the Qinghai Xizang (Tibet) Plateau

高原分区	11~次年 3月 平均气温 /℃	4~10月 平均气温 /℃	年平均 气温 /℃	年降水量 mm
西北区	1.0	0.0	0.6	13.2
东北区	1.1	0.6	0.9	-3.9
东南区	0.4	0.4	0.4	29.1
高原内部	0.5	0.5	0.5	19.8

青藏高原中部和西北部地区的冰川属极大陆型冰川, 这一类型冰川对气候变化的动力响应相对较为迟缓, 这是过去 40a来高原中部和西北部地区冰川变化较小的原因。高原南部地区以海洋型冰川为主, 这类冰川对气候变化的响应较为敏感, 同时, 高原南部地区变暖幅度较小且降水呈微弱的增加趋势, 导致该地区有一定数量的冰川处于前进状态。根据岗日嘎布山临近 2个气象站的观测记录, 岗日嘎布山地区气温变化以 1976年为转折, 之前气温呈

波动下降趋势, 之后则呈明显的波动上升趋势, 而降水变化则以 1984年为转折, 1966~1984年降水呈快速减少状态, 之后表现出显著的增加过程, 总体上 1961~2002年间降水量年均增加 20mm, 升温意味着消融增加, 有限数量的降水增加并不能表明冰川上接收的积累量会随之增加, 因此, 该地区约 60%冰川处于退缩状态; 另一方面, 由于冰川规模、几何尺寸上的差异, 同一地区不同规模冰川对类似强度的气候变化的扰动响应时间不同, 导致该地区约 40%的冰川处于前进状态。高原东北部的冰川属于亚大陆型和极大陆型冰川, 近 40a间, 特别是自 1980s末以来该地区增温明显, 而降水呈减少趋势, 导致冰川物质亏损严重, 其中, 位于黄河源区的阿尼玛卿山冰川面积年均减少比例是高原所有监测冰川中变化幅度最大的(见图 4)。

综上所述, 退缩是近 50a来中国西部地区冰川变化的总趋势, 同时也存在较大的区域差异。升温剧烈和降水减少是青藏高原东部和南部地区冰川萎缩的关键驱动因素, 与此相反, 高原西北和中部近年来的降温趋势则导致该地区冰川处于相对稳定状态; 高原东南部升温较缓且降水微弱增加, 导致该地区冰川变化相对缓慢, 且部分冰川处于前进状态。对西北地区的冰川而言, 虽然降水增加显著, 但升温起主导作用, 强烈的升温导致冰川加速退缩, 另一方面, 区域内一些大冰川的消融区为厚层表碛覆盖, 这在一定程度上抑制了冰川消融。由此可见, 不同规模、不同类型的冰川对气候变化的响应特征和响应时间不同, 加之不同区域气候变化的差异也较大, 从而导致中国西部地区冰川变化的区域差异较大。

在中国西北干旱区, 水资源是区域经济社会发展稳定的基础, 也是生态环境必要的、有机的组成部分。作为西北干旱地区河流补给重要来源的冰川, 其退缩是影响中国西北干旱区河流水资源变化的关键因素。目前这些河流流量均呈现不同程度的增加, 原因可能是冰川退缩冰量减少导致补给河流的冰川融水径流增大。尽管我们(包括其他研究者)监测的冰川仅占中国冰川总条数的 10%, 但这些监测冰川占中国冰川总面积的 1/4 因此, 本文所给出的结果至少可以反映出中国西部冰川变化的总体状况。由于本研究所选择的冰川区并未考虑空间上均匀性, 要想全面了解中国西部的冰川变化状况, 还需对更多地区的冰川实施监测, 而且需要应用更高分辨率且具备立体成像能力的遥感影像, 如 ASTER, SAR/InSAR以及激光测高等测量手段, 以监测中国

西部冰川厚度变化, 验证现有监测结果及更新中国冰川变化数据。此外, 加强野外调查以及典型流域冰川-径流过程的定位观测与模拟也是需要强化的重要研究内容之一。

参考文献 (References)

1 Dyurgerov M. Glacier mass balance and regime: Data of measurements and analysis. Occasional Paper No. 55. Institute of Arctic and Alpine Research, University of Colorado, 2002. 17~18

2 施雅风, 刘潮海, 王宗太等. 简明中国冰川编目. 上海: 上海科学普及出版社, 2005. 17~20

Shi Yafeng, Liu Chaohai, Wang Zongtai *et al*. A Concise China Glacier Inventory. Shanghai: Shanghai Science Popularization Press, 2005. 17~20

3 吴立宗, 李新编. 中国冰川信息系统. 北京: 海洋出版社, 2004. 23~78

Wu Lizong, Li Xin eds. China Glacier Information System. Beijing: China Ocean Press, 2004. 23~78

4 Shi Yafeng, Liu Shiyin. Estimation of the response of the glaciers in China to the global warming in the 21st century. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45: 668~672

5 杨钦娘, 曾群柱著. 冰川水文学. 重庆: 重庆出版社, 2001. 1~40

Yang Zhenning, Zeng Qunzhu. Glacier Hydrology. Chongqing: Chongqing Press, 2001. 1~40

6 Folland C K. Observed climate variability and change. In: Houghton J T, Ding Yihui, Griggs D J *et al* eds. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 1~98

7 王绍武, 董光荣. 中国西部环境特征及其演变. 见: 秦大河主编. 中国西部环境演变评估 (第一卷). 中国西部环境特征及其演化. 北京: 科学出版社, 2002. 49~61

Wang Shaowu, Dong Guangrong. Environmental characteristic of west China and its evolution. In: Qin Dahe ed. Evaluation of Environmental Evolution of West China (Vol. 1). Beijing: Science Press, 2002. 49~61

8 Wang Ninglian, Thompson L G, Davis M E *et al*. Influence of variations in NAO and SO on air temperature over the northern Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau as recorded by $\delta^{18}\text{O}$ in the Mani ice core. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(22): 5~12

9 王宁练. 青藏高原南部和北部暖季气温年代际变化差异的界线位置. 第四纪研究, 2006, 26(2): 165~172

Wang Ninglian. The boundary between the Northern and Southern Tibetan Plateau with different variations in the warm season air temperatures on the decadal time scale. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(2): 165~172

10 张广兴, 杨莲梅, 杨青. 新疆43a来夏季0℃层高度变化和突变分析. 冰川冻土, 2005, 27(3): 376~380

Zhang Guangxing, Yang Lianmei, Yang Qing. Changing trend and abrupt change of the 0℃ level height in summer in Xinjiang from 1960 to 2002. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, 27(3): 376~380

11 Wang Shaowu, Zhu Jinhong, Cai Jingning. Interdecadal variability of temperature and precipitation in China since 1880. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2004, 21(3): 307~313

12 Qin Dahe, Liu Shiyin, Li Peiji. Snow cover distribution variability and response to climate change in Western China. *Journal of Climatology*, 2006, 19(9): 1820~1833

13 张祥松, 王宗太. 冰川波动及趋势. 见: 施雅风总主编. 中国气候与海面变化及其趋势和影响 (4)——气候变化对西北华北水资源的影响. 济南: 山东科学技术出版社, 1995. 53~78

Zhang Xiangsong, Wang Zongtai. Glacier fluctuation and its tendency. In: Shi Yafeng ed. The Impact of Climate Change on Water Resources in Northwestern and Northern China. Jinan: Shandong Science and Technology Press, 1995. 53~78

14 苏珍, 刘时银, 王志超. 喀喇昆仑-昆仑山地区现代冰川波动与气候变化. 见: 苏珍编. 喀喇昆仑-昆仑山地区冰川与环境. 北京: 科学出版社, 1998. 83~103

Su Zhen, Liu Shiyin, Wang Zhichao. Glacier fluctuation in recent decades and its relationship with climatic change in the Karakorum-Kunlun Mountains. In: Su Zhen ed. Glaciers and Environment of the Karakorum-Kunlun Mountains. Beijing: Science Press, 1998. 83~103

15 李吉均, 郑本兴, 杨锡金等编. 西藏冰川. 北京: 科学出版社, 1986. 7~88

Li Jijun, Zheng Benxing, Yang Xijin *et al* eds. Glaciers in Tibet. Beijing: Science Press, 1986. 7~88

16 Wang Ninglian, Jing Zhefan, Jiao Keqin *et al*. Variations of the Glacier No. 1 at the source of the Ürümqi River, Tianshan Mts., China during the past 40 years. *Data of Glaciological Studies*, 2006(in press)

17 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 head water of Ürümqi River, Tianshan, China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(2): 117~123

18 焦克勤, 井哲帆, 韩添丁等. 42a来天山乌鲁木齐河源1号冰川变化及趋势预测. 冰川冻土, 2004, 26(3): 253~260

Jiao Keqin, Jing Zhefan, Han Tianding *et al*. Variation of the Glacier No. 1 at the headwaters of the Ürümqi River in the Tianshan Mountains during the past 42 years and its trend prediction. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(3): 253~260

19 刘潮海, 谢自楚, 杨惠安等. 祁连山七一冰川物质平衡的观测、插补及趋势研究. 见: 中国科学院兰州冰川冻土研究所编. 中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊 (第7号); 祁连山冰川、气候及径流变化监测与寒区水文研究专辑. 北京: 科学出版社, 1992. 21~33

Liu Chaohai, Xie Zichu, Yang Hui'an *et al*. Observation interpolation and trend study of glacial mass balance on the Qiyi Glacier in Qilian Mountains. In: Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences ed. The Monitoring of Glacier Climate, Runoff Changes and the Research of Cold Region Hydrology in Qilian Mountains. Beijing: Science Press, 1992. 21~

33
20 蒲健辰, 姚檀栋, 段克勤等. 祁连山七一冰川物质平衡的最新观测结果. 冰川冻土, 2005 27(2): 199~204
Pu Jianchen Yao Tandong Duan Keqin *et al* Mass balance of the Qiyi Glacier in the Qilian Mountains: A new observation *Journal of Glaciology and Geocryology* 2005 27(2): 199~204
21 刘时银, 谢自楚, 刘潮海等. 冰川物质平衡与冰川波动. 见: 施雅风主编. 中国冰川与环境——现在、过去和将来. 北京: 科学出版社, 2000. 101~103
Liu Shiyin Xie Zichu Liu Chaohai Glacier mass balance and fluctuations. In: Shi Yafeng ed. *Glaciers and Their Environment in China: The Present Past and Future*. Beijing: Science Press, 2000. 101~103
22 谢自楚, 苏珍, 沈永平等. 贡嘎山海螺沟冰川物质平衡、水交换特征及其对径流的影响. 冰川冻土, 2001, 23(1): 7~15
Xie Zichu Su Zhen Shen Yongping *et al* Mass balance and water exchange of Hailuoguo Glacier in Mount Gongga and their influence on glacial melt runoff *Journal of Glaciology and Geocryology* 2001, 23(1): 7~15
23 苏珍, 刘宗香, 王文梯等. 青藏高原冰川对气候变化的响应及趋势预测. 地球科学进展, 1999 14(6): 607~612
Su Zhen Liu Zongxiang Wang Wenti *et al* Glacier fluctuations responding to climate change and forecast of its tendency over the Qinghai-Tibet Plateau *Advance in Earth Sciences* 1999 14(6): 607~612
24 蒲健辰, 苏珍, 姚檀栋等. 小冬克玛底和海螺沟冰川的物质平衡. 冰川冻土, 1998 20(4): 408~412
Pu Jianchen Su Zhen Yao Tandong *et al* Mass balance on Xiaodongkemadi Glacier and Hailuoguo Glacier *Journal of Glaciology and Geocryology* 1998 20(4): 408~412
25 蒲健辰, 姚檀栋, 王宁练等. 近百年来青藏高原冰川的进退变化. 冰川冻土, 2004 26(5): 517~522
Pu Jianchen Yao Tandong Wang Ninglian *et al* Fluctuations of the glaciers on the Qinghai Tibetan Plateau during the past century. *Journal of Glaciology and Geocryology* 2004 26(5): 517~522
26 Dyurgerov M, Meier M F. Glaciers and Changing Earth Systems: A 2004 Snapshot. Occasional Paper No. 58. Institute of Arctic and Alpine Research, University of Colorado, Boulder, 2005. 13~19
27 Greene A M. A time constant for hemispheric glacier mass balance. *Journal of Glaciology* 2005 51(174): 535~562
28 Ohmura A. Cryosphere during the Twentieth Century: the state of the planet. International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG). *Monograph* 2004 15Q 239~257
29 刘时银, 鲁安新, 丁永建等. 黄河上游阿尼玛卿山区冰川波动与气候变化. 冰川冻土, 2002 24(6): 701~707
Liu Shiyin Lu Anxin Ding Yongjian *et al* Glacier fluctuations and the inferred climate changes in the A'Nyemagang Mountains in the source area of the Yellow River *Journal of Glaciology and Geocryology* 2002 24(6): 701~707
30 Liu Shiyin Sun Wenxia Shen Yongping *et al* Glacier changes since the Little Ice Age Maximum in the western Qilian Mountains Northwest China *Journal of Glaciology* 2003 49(164): 117~

124
31 刘时银, 上官冬辉, 丁永建等. 基于 RS 与 GIS 的冰川变化研究——青藏高原北侧新青峰与马兰冰帽变化的再评估. 冰川冻土, 2004 26(3): 244~252
Liu Shiyin Shangguan Donghui Ding Yongjian *et al* Variation of glaciers studied on the basis of RS and GIS: A reassessment of the changes of the Xinqingfeng and Ma Lan ice caps in the northern Tibetan Plateau *Journal of Glaciology and Geocryology* 2004 26(3): 244~252
32 刘时银, 上官冬辉, 丁永建等. 20 世纪初以来青藏高原东南部岗日嘎布山的冰川变化. 冰川冻土, 2005 27(1): 55~63
Liu Shiyin Shangguan Donghui Ding Yongjian *et al* Glacier variations since the early 20th century in the Gangriabu Range Southeast Tibetan Plateau *Journal of Glaciology and Geocryology* 2005 27(1): 55~63
33 鲁安新, 姚檀栋, 刘时银等. 青藏高原各拉丹冬地区冰川变化的遥感监测. 冰川冻土, 2002 24(5): 559~562
Lu Anxin Yao Tandong Liu Shiyin *et al* Glacier Change in the Geklandong area of the Tibetan Plateau monitored by remote sensing *Journal of Glaciology and Geocryology* 2002 24(5): 559~562
34 上官冬辉, 刘时银, 丁永建等. 中国喀喇昆仑山、慕士塔格-公格尔山典型冰川变化监测结果. 冰川冻土, 2004 26(3): 374~375
Shangguan Donghui Liu Shiyin Ding Yongjian *et al* Monitoring results of glacier changes in China Karakorum and Muztag Ata Konggur Mountains by remote sensing *Journal of Glaciology and Geocryology* 2004 26(3): 374~375
35 晋锐, 车涛, 李新等. 基于遥感和 GIS 的西藏朋曲河流域冰川变化研究. 冰川冻土, 2004 26(3): 261~266
Jin Rui Che Tao Li Xin *et al* Glacier variation in the Punqu Basin derived from remote sensing data and GIS technique *Journal of Glaciology and Geocryology* 2004 26(3): 261~266
36 Shangguan Donghui Liu Shiyin Ding Yongjian *et al* Satellite monitoring of glacier changes in the Muztag Ata and Konggur Mountains on the eastern Pamirs *Annals of Glaciology* 2006 43 (in press)
37 刘潮海, 谢自楚, 刘时银等. 冰川水资源及其变化. 见: 康尔泗, 程国栋, 董增川编. 中国西北干旱区冰雪水资源及出山径流. 北京: 科学出版社, 2002. 14~51
Liu Chaohai Xie Zichu Liu Shiyin *et al* Glacial water resources and their change. In: Kang Ersi, Cheng Guodong, Dong Zengchuan eds. *Glacier snow Water Resources and Mountain Runoff in the Arid Area of Northwest China*. Beijing: Science Press, 2002. 14~51
38 张祥松. 喀喇昆仑山音苏盖提冰川及其邻近冰川的近期变化. 冰川冻土, 1980 2(3): 12~16
Zhang Xiangsong Recent variations of the Insukati Glacier and adjacent glaciers in the Karakorum Mountains *Journal of Glaciology and Geocryology* 1980 2(3): 12~16
39 上官冬辉, 刘时银, 丁永建等. 玉龙喀什河源区 32 年来冰川变化遥感监测. 地理学报, 2004 59(6): 855~862
Shangguan Donghui Liu Shiyin Ding Yongjian *et al* Glacier changes at the head of Yumugkax River in the west Kunlun

Mountains in the past 32 years *Acta Geographica Sinica* 2004 59 (6): 855 ~862
40 Zhao L, Chen Luping, Yang Daqing *et al* Changes of climate and seasonally frozen ground over the past 30 years in Qinghai Xizang (Tibetan) Plateau, China *Global and Planetary Change* 2004 43(1~2): 19 ~31

GLACIERS IN RESPONSE TO RECENT CLIMATE WARMING IN WESTERN CHINA

Liu Shiyin^{①②} Ding Yongjian^① Li Jing^① Shangguan Donghui^① Zhang Yong^①

(^①Key Laboratory of Cryosphere and Environment, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000; ^②Institute for Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085)

Abstract

Glaciers in China are primarily located in the Qinghai Xizang (Tibet) Plateau and surrounding high mountains. The China Glacier Inventory (CGI) indicates that there are over 46377 glaciers in Western China accounting for 52 percent of the total area in Central Asia. Meteorological records indicate that air temperature in Western China has risen by 0.2°C per decade, and the 1990s is likely the warmest decade of the millennium; similarly, most of Western China also has seen an increase in precipitation during the past 50 years, for example, precipitation increased by 18% during the last half of the last century in northwestern provinces. Using remote sensing and Geographical Information System (GIS) methods, we have monitored the changes over 5000 glaciers in the past 50 years. We conclude that 82.2% of all the monitored glaciers retreated, while the remaining glaciers were enhanced. It should be mentioned that the enhanced glaciers were not necessarily enhanced over the entire observational period; in the past two decades while regional climate warming has been much evident, many of the once expanded glaciers started to retreat. As a whole, glaciers that have been monitored show a total area loss of 4.5% from the late 1950s to the late 1990s. Investigation on glacier changes over the past few decades reveals some regional differences, which is mainly attributed to different dynamical responses of glaciers with different sizes and physical properties along with climate changes of that region. For example, glaciers in central and northwestern parts of the Qinghai Xizang Plateau were relatively stable, while those in mountains surrounding the Plateau experienced extensive wastage. It is concluded that strong warming and reduced precipitation are likely key drivers for the extensive reduction of ice cover in the eastern and southern parts of the Plateau. In contrast, recent cooling in the northwestern and central parts of the Plateau may partially explain the relatively stable condition of those glaciers. The modest warming trend and increase in precipitation in the southeastern part of the Plateau could account for the modest changes in glaciers there. Although precipitation has increased in Northwest China (Tianshan, Qilian Shan, Eastern Pamirs, and so on), the strong warming may be the principal factor driving glacier retreat, although large glaciers with heavy debris covering their ablation areas may also contribute to the variations of ice extent in the region. Glacier recession is a key factor in the variability of water resources in the arid river systems of Northwest China. The recent increase in discharge of these rivers may be partially related to the increase in glacial runoff caused by loss of ice during glacier retreat. Although the glaciers that we (and others) have monitored account for only 10% of the total number and 24% of the total area of glaciers in China, our results may be extrapolated to infer glacier changes in various mountain regions of China.

Key words Glacier changes, climate warming, Western China