

1959年来中国天山冰川资源时空变化

邢武成¹, 李忠勤^{1,2}, 张 慧², 张明军¹, 梁鹏斌¹, 牟建新¹

(1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070; 2. 中国科学院西北生态环境资源研究院
冰冻圈国家重点实验室, 兰州 730000)

摘要: 基于两期冰川编目数据与气象数据, 对天山1959年来冰川资源的时空变化特征进行研究。研究发现: ① 天山地区现有冰川7934条, 面积7179.77 km², 冰储量756.48 km³。冰川数量以面积< 1 km²的冰川居多, 面积以1~10 km²和≥ 20 km²的冰川为主, 冰川集中分布在海拔3800~4800 m之间。② 在四级流域中, 阿克苏河流域冰川面积最大为1721.75 km², 面积最小的是伊吾河流域, 为56.03 km²。在各市(州)中, 阿克苏地区冰川资源量最多, 其面积和储量分别占天山总量的43.28%和68.85%; 冰川资源量最少的市(州)是吐鲁番地区, 面积和储量仅占天山总量的0.23%和0.07%。③ 1959年来, 天山地区冰川面积减少了1619.82 km²(-18.41%), 储量亏损了104.78 km³(-12.16%), 其中数量以< 1 km²的冰川减少最多, 面积减少以< 5 km²的冰川最为严重。④ 冰川变化呈现明显的区域差异, 变化速度最快的是天山东段博格达北坡流域, 变化最慢的是中部的渭干河流域。初步分析认为夏季气温显著上升带来的消融大于年内降水带来的积累是天山冰川退缩的主要原因。

关键词: 天山冰川; 冰川变化; 冰川编目; 气候变化; 中国

DOI: 10.11821/dlxb201709005

1 引言

山岳冰川不仅是冰冻圈的重要组成部分, 是陆地表面重要的淡水资源, 也是诸多大江大河的源头, 被誉为“固体水库”^[1]。第二次冰川编目数据显示^[2], 中国现发育有冰川48571条, 总面积约 5.18×10^4 km², 占世界冰川(除南极和格陵兰冰盖外)面积的7.1%。冰川及冰川融水对水资源总量有重要贡献, 具有调节多年径流的作用, 对中国西部自然生态环境演变、灌溉农业和社会经济文明发展有着举足轻重的地位^[3-5]。因此在气候变化背景下, 研究冰川融水的年际与年内波动对西北干旱区水资源变化格局、农业可持续发展和生态系统稳定, 以及水资源管理与灾害防治等具有重要意义。

天山地处中亚内陆干旱区, 是中国现代冰川面积分布最广的地区之一, 冰川和冰川融水为新疆社会稳定、经济发展、自然资源开发以及绿洲农业发展提供了可靠的水资源保障^[6]。随着全球气候变暖的加剧, 特别是20世纪80年代以来, 中国西北干旱区大部分冰川普遍处于物质亏损状态, 呈现退缩减薄的趋势^[7-13]。Farinotti等利用重力卫星、激光测高数据以及冰川模型, 对整个天山山脉的冰川物质亏损进行了评估, 结果表明1961-

收稿日期: 2017-04-16; 修订日期: 2017-07-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41471058); 国家自然科学基金重大研究计划(91425303) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41471058; National Natural Science Foundation Research Program, No.91425303]

作者简介: 邢武成(1984-), 男, 甘肃张掖人, 硕士, 研究方向为冰川变化与地理信息技术。E-mail: gsauxing@126.com

通讯作者: 李忠勤(1962-), 男, 研究员, 主要从事冰川与环境方面的研究。E-mail: lizq@lzb.ac.cn

2012年冰川面积和物质亏损比例分别为 $18\pm 6\%$ 和 $27\pm 15\%$ ^[14]。王圣杰等^[15]运用面积权重法对冰川面积变化进行了估算,结果表明近50年来天山冰川面积缩小了11.5%。近年来众多学者利用地形图和遥感数据对天山^[16]、博格达地区^[17]、玛纳斯河流域和开都河流域^[18]、伊犁河流域^[19]等冰川开展了大量的研究,发现研究区内冰川均呈现退缩趋势,且退缩率均在11%以上。此外也有大量野外实测资料表明,乌鲁木齐河源1号^[20]、奎屯哈希勒根51号^[21]、哈密庙儿沟冰帽^[22]、四工河四号^[23]、托木尔青冰滩72号^[24]等典型参照冰川也均呈现退缩减薄趋势。

由于数据源、计算方法以及研究时段的不统一,尚缺乏对中国天山冰川时空变化特征及其分布规律的认识,因此,本文基于两期冰川编目数据、气象数据和数字高程模型,系统分析了气候变化背景下天山冰川的时空变化特征及分布规律,以期新疆地区的水资源合理开发和利用提供理论支撑决策。

2 研究区概况

中国天山,西起中国与吉尔吉斯斯坦和哈萨克斯坦边界,东至哈密以东的星星峡戈壁,东西绵延1700 km,山体总面积约 5.7×10^5 km²,占新疆总面积的34.5%以上^[25]。天山由一系列平行的山脉组成,被划分为北天山、中天山、南天山三部分。山脉海拔多处于4000~6000 m之间,其中以托木尔峰最高(海拔7435 m),山脉走向多为东西走向。天山地区的降水主要受西风气流和北冰洋气团的影响,降水的空间差异显著。降水量最高的区域为伊犁河流域,年降水量可达到1200 mm左右;年降水量最少的区域天山南脉和那拉提山东南坡地区,年降水量小于500 mm^[26]。夏季平均气温为21.2 °C,且南坡高于北坡^[26]。据中国第二次冰川编目,天山山区共发育冰川7934条,面积为7179.77 km²,数量和面积分别占中国冰川总面积的16.33%和13.87%。在西部14个山系(高原)中天山山系的冰川数量仅次于昆仑山,但其面积小于昆仑山和念青唐古拉山位于第3^[2]。在中国冰川编目中,天山山区冰川分属于东亚内流区(5Y)的塔里木内流水系(5Y6)、准噶尔内流水系(5Y7)和吐鲁番—哈密内流水系(5Y8),中亚内陆流域的伊犁河水系(5X0)^[27-30]。天山冰川属于亚大陆性冰川或大陆性冰川^[31],形态类型多样,且山谷冰川较多。

3 数据与方法

3.1 数据来源

本文所选用的冰川数据来源于中国第一次与第二次冰川编目。中国第一次冰川编目共使用了地形图1164幅,空间上涵盖中国所有冰川分布区。其中1:5万地形图共计568幅,1:10万地形图共计594幅,1:2.5万地形图2幅。航空影像成像时间在1959年、1961年、1962-1964年、1968-1971年和1980年。第二次冰川编目时位于汗腾格里河的南依诺勒切克冰川未纳入中国范围内,所以本文计算时没有考虑该冰川。中国第二次冰川编目使用的数据主要为遥感影像、地形图、数字高程模型(地形图DEM、ASTER GDEM和SRTM V4.1)数据及《中国冰川目录》12卷22册图书等文献资料。其中覆盖2004-2011年西部冰川区的Landsat TM/ETM+遥感影像142景,ASTER遥感影像563景。其中Landsat TM/ETM+影像的时间段在2006年、2007年和2010年。数字高程模型数据源来自国际农业研究磋商组织(CGIAR, <http://srtm.csi.cgiar.org>),冰川编目数据来自国家地球系统科学数据平台寒区旱区科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn/>)。

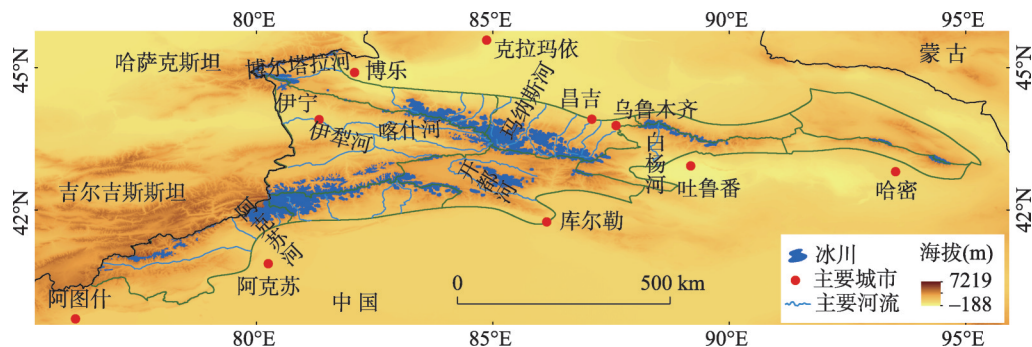


图1 中国天山冰川分布

Fig. 1 The distribution of glaciers in Chinese Tianshan Mountains

由于冰川多位于高海拔区,对天山山区气温和降水的研究多基于气象台站资料^[15],未考虑气温和降水随海拔的变化。为了进一步分析天山山区气温和降水对冰川变化的影响,本文选用的气象数据为1961-2010年月尺度的气温与降水格点数据,空间分辨率为0.5°×0.5°,由中国气象局国家气象信息中心(<http://data.cma.cn/>)提供。

3.2 方法

冰川面积的变化是通过两期冰川面积的差值反映,常用的指标有冰川面积变化速率和冰川相对变化速率,公式如下^[12]:

$$AC = \frac{A_s - A_f}{\Delta T} \tag{1}$$

$$AAC = \left[\left(\frac{A_s}{A_f} \right)^{1/\Delta T} - 1 \right] \times 100\% \tag{2}$$

式中: AC 为冰川面积变化速率 (km^2/a); AAC 为冰川面积相对变化速率 ($\%/a$); A_s 为第二次冰川编目的冰川面积 (km^2); A_f 第一次冰川编目的冰川面积 (km^2); ΔT 为两次冰川编目时所用数据源的采集时间间隔,单位为年。

为了便于与两次冰川编目结果的对比,冰川储量计算均采用天山冰川的平均厚度和相应冰川的面积关系式计算^[31-32]:

$$\bar{H} = -11.32 + 53.21F^{0.3} \tag{3}$$

$$\bar{H} = 34.4F^{0.45} \tag{4}$$

$$V = \bar{H} \times F / 1000 \tag{5}$$

式中: F 为冰川面积 (km^2); \bar{H} 为冰川的平均厚度 (m); V 为冰川储量 (km^3)。式(3)计算冰斗冰川、冰斗山谷冰川和山谷冰川,式(4)计算悬冰川。

4 结果

4.1 天山冰川现状

4.1.1 天山冰川总体分布特征 第二次冰川编目显示,天山山脉共发育冰川7934条,面积约为7179.77 km^2 ,冰储量约为756.48 km^3 ,冰川平均面积0.92 km^2 。从冰川面积和数量分布(图2)来看,此阶段天山冰川数量以面积<1 km^2 的冰川居多,冰川面积以1~10 km^2 和 $\geq 20 \text{ km}^2$ 为主。其中面积<1.0 km^2 的冰川共6805条,占天山冰川总数量的

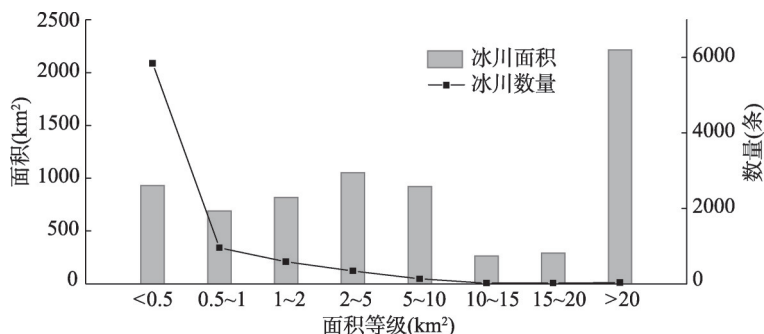


图2 2006-2010年中国天山不同面积等级冰川数量与面积

Fig. 2 Number and area of glaciers in different sizes in Chinese Tianshan Mountains during 2006-2010

85.77%, 随着面积等级的上升, 冰川数量迅速减少。面积 $\geq 20 \text{ km}^2$ 的冰川仅有32条, 在面积总量中所占比重最大, 达2213.24 km^2 , 约占冰川总面积的30.82%; 其次是2~5 km^2 的冰川, 面积为1044.19 km^2 ; 面积 $< 0.1 \text{ km}^2$ 的冰川数量多达2402条, 面积为123.28 km^2 , 但其在冰川总面积中的比例仅为1.71%。天山地区冰川面积大于100 km^2 的冰川现有6条分别分布在阿克苏河流域(3条)和渭干河流域(3条), 其中阿克苏河流域的托木尔冰川(5Y673P)面积最大, 面积为358.25 km^2 , 冰川体积为102.02 km^3 , 末端海拔为2871 m。

4.1.2 天山冰川海拔梯度特征 山脉或山峰的绝对高度及其在平衡线高度以上的相对高差是决定山地冰川数量多少和规模大小的主要地形要素^[33]。山地海拔高度越高, 冰川形成的积累空间就越大, 同时也为冰川发育提供了更多的冷储和拦截更多的大气降水。基于SRTM数据对天山冰川面积随海拔特征进行统计, 发现冰川面积的高程变化特征近似呈正态分布(图3), 峰值出现在海拔4200 m附近。其中在海拔3800~4800 m分布的冰川面积约占冰川总面积的82.3%, 为冰川集中发育区。天山冰川末端海拔的最小值为2640 m, 位于伊犁河流域; 最大值出现在阿克苏河流域的托木尔冰川, 最高为7390 m。

4.1.3 天山各流域冰川分布 根据国际冰川编目规范^[31], 天山冰川被划归于伊犁河水系(5X0)、塔里木内流水系(5Y6)、准噶尔内流水系(5Y7)和吐鲁番—哈密内流水系(5Y8)4个三级流域。从冰川数量来看, 吐鲁番—哈密内流水系的冰川数量最少(表1), 准噶尔内流水系的冰川数量最多, 其次是塔里木内流水系、伊犁河水系。从冰川面积分布来看, 塔里木内流水系的冰川面积总量最大, 其次是准噶尔内流水系、伊犁河水系, 最小的仍为吐鲁番—哈密内流水系。

在四级流域中, 伊犁河流域冰川数量最多, 阿克苏河流域冰川面积最大, 其分别占天山冰川相应总量的26.73%和23.98%。阿克苏河流域冰川数量虽少于其他流域, 但由于单条冰川的平均

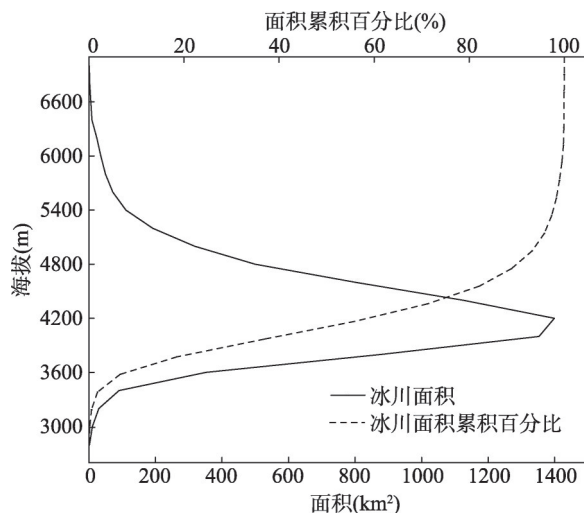


图3 中国天山冰川面积随海拔分布

Fig. 3 Hypsography of glacier area in Chinese Tianshan Mountains

表 1 第二次冰川编目中国天山各水系冰川资源

Tab. 1 Glacier resources statistics by watershed in Chinese Tianshan Mountains

三级流域	四级流域	冰川数量		冰川面积		冰川储量	
		(条)	(%)	(km ²)	(%)	(km ³)	(%)
伊犁河(5X0)	伊犁河(5X04)	2121	26.73	1554.18	21.65	113.73	15.03
	塔里木内流水系(5Y6)	773	9.74	1721.75	23.98	271.92	35.95
	渭干河(5Y68)	878	11.07	1656.97	23.08	240.67	31.81
	开都河(5Y69)	694	8.75	332.05	4.62	16.01	2.12
	合计	2345	29.56	3710.77	51.68	528.6	69.88
准格尔内流水系(5Y7)	伊吾河(5Y71)	97	1.22	56.03	0.78	2.77	0.37
	博格达北坡(5Y72)	168	2.12	58.06	0.81	2.62	0.35
	玛纳斯河(5Y73)	1825	23	1024.05	14.26	67.17	8.88
	艾比湖(5Y74)	1000	12.6	598.52	8.34	32.96	4.36
	合计	3090	38.95	1736.66	24.19	105.52	13.95
吐鲁番哈密内流水系(5Y8)	白杨河(5Y81)	270	3.4	110.47	1.54	5.05	0.67
	庙儿沟(5Y82)	108	1.36	67.69	0.94	3.58	0.47
	合计	378	4.76	178.16	2.48	8.63	1.14

面积高达 2.36 km²，使得冰川面积位居第一。冰川资源最少的流域是伊吾河流域，面积仅为 56.03 km²，也是天山山区单条冰川平均面积最小的四级流域。

4.1.4 天山地区各州(市)冰川资源分布 在行政区划上，中国天山冰川隶属于新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市、伊犁哈萨克自治州、克孜勒苏柯尔克孜自治州、博尔塔拉蒙古自治州、吐鲁番地区、哈密地区、塔城地区、巴音郭楞蒙古自治州、昌吉回族自治区和阿克苏地区 10 个自治州和市。各州(市)冰川资源分布如表 2 所示。

表 2 各州市(天山山区)冰川资源统计

Tab. 2 Glacier resources statistics by city in Chinese Tianshan Mountains

市(自治州)	冰川数量		冰川面积		冰川储量	
	(条)	(%)	(km ²)	(%)	(km ³)	(%)
伊犁哈萨克自治州	1856	23.39	1414.45	19.7	106.62	14.09
克孜勒苏柯尔克孜自治州	392	4.94	358.56	4.99	28.47	3.76
博尔塔拉蒙古自治州	391	4.93	199.38	2.78	9.57	1.27
吐鲁番地区	64	0.81	16.4	0.23	0.52	0.07
哈密地区	205	2.58	123.72	1.72	6.35	0.84
塔城地区	1154	14.54	830.09	11.56	57.17	7.56
巴音郭楞蒙古自治州	1616	20.37	868.98	12.1	47.82	6.32
昌吉回族自治区	762	9.6	266.69	3.71	11.95	1.58
阿克苏地区	1184	14.92	2988.6	41.63	483.02	63.85
合计	7934		7179.77		756.48	

新疆维吾尔自治区在天山的冰川集中分布在阿克苏地区和伊犁哈萨克自治州，阿克苏地区冰川面积和冰川储量分别占整个天山冰川总量的 41.63%和 63.85%。伊犁哈萨克自治州冰川数量多于阿克苏地区，但是阿克苏地区的平均冰川面积相对较大，冰川面积与冰储量约为伊犁哈萨克自治州的 2.3 倍与 5 倍。吐鲁番地区冰川数量仅有 64 条，其面积和

储量分别为 16.4 km²和 0.52 km³, 仅占整个天山冰川的 0.23%和 0.07%, 是天山地区冰川分布最少的市级行政单元。

4.2 1959年来天山冰川时空变化

4.2.1 天山冰川面积和条数的变化 第二次冰川编目结果显示, 2006-2010年间, 天山共有冰川 7934 条, 占中国冰川总数量的 16.33%; 冰川面积 7179.77 km², 占中国冰川总面积的 13.87%^[2]。两次冰川编目统计与分析的结果表明, 自 20 世纪 60 年代以来, 天山冰川总体上呈萎缩趋势, 面积缩减率达 18.41%, 接近于全国 18%的平均水平^[2], 冰川数量变化率较小, 为 10.84%。

由于研究区冰川数量众多, 为便于进一步分析, 按照冰川面积大小划分为 (表 3): < 0.5 km²、0.5~1 km²、1~2 km²、2~5 km²、5~10 km²、10~15 km²、15~20 km²和> 20 km² 8 个等级。结果表明 (图 4): 面积< 0.5 km²的冰川面积和条数的退缩率分别为-3.8%、-20.94%; 0.5~1.0 km²分别为-27.39%、-25.97%; 1~2 km²分别为-26.97%、-26.72%; 2~5 km²分别为-25.11%、-23.82%; 5~10 km²分别为-13.25%、-13.23%; 10~15 km²分别为-36.36%、-32.35%; 15~20 km²分别为-5.56%、-9.61%; > 20 km²分别为-21.95%、-8.54%。数量以面积< 1 km²的冰川减少最多, 面积以 1~5 km²的冰川退缩最快。

表 3 中国天山冰川面积结构统计表
Tab. 3 Statistics of glacier area in Chinese Tianshan Mountains

面积等级 (km ²)	第一次冰川编目				第二次冰川编目			
	数量	百分比	面积	百分比	数量	百分比	面积	百分比
	(条)	(%)	(km ²)	(%)	(条)	(%)	(km ²)	(%)
< 0.5	6079	68.31	1177.61	13.38	5848	73.71	930.99	12.97
0.5~1	1318	14.81	929.92	10.57	957	12.06	688.45	9.59
1~2	801	9.00	1116.97	12.69	585	7.37	818.57	11.40
2~5	458	5.15	1381.15	15.70	343	4.32	1052.19	14.65
5~10	151	1.70	1063.74	12.09	131	1.65	922.89	12.85
10~15	33	0.37	389.27	4.42	21	0.26	263.33	3.67
15~20	18	0.20	320.94	3.65	17	0.21	290.11	4.04
> 20	41	0.46	2419.99	27.50	32	0.40	2213.24	30.83

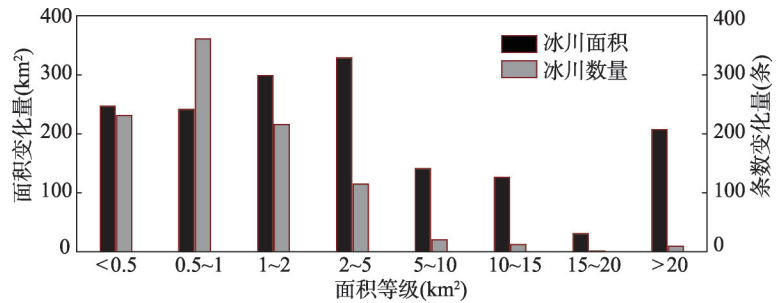


图 4 中国天山不同规模冰川退缩的数量和面积
Fig. 4 Shrinkage of glacier number and area with various size classes in Chinese Tianshan Mountains

4.2.2 天山各流域冰川变化 1959-2010 年天山各流域冰川面积均呈现缩减态势, 但变化幅度存在区域差异。变化速率方面 (图 5), 伊犁河流域 (5X04) 冰川面积减少最多, 变化速率为-10.59 km² · a⁻¹; 其次是阿克苏河流域 (5Y67) 和玛纳斯河流域 (5Y73) 冰川

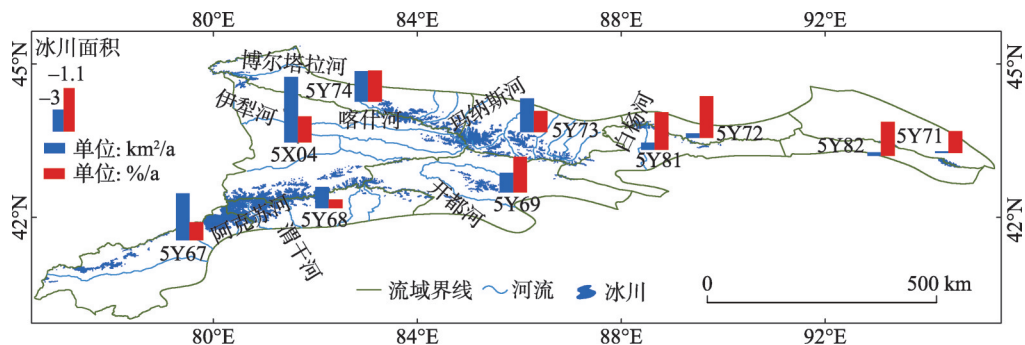


图5 1959-2010年中国天山各流域冰川面积变化

Fig. 5 Area variations of glaciers for different watersheds in Chinese Tianshan Mountains during 1959-2010

面积退缩速率分别为 $-7.59\text{ km}^2\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $-5.39\text{ km}^2\cdot\text{a}^{-1}$ 。伊吾河流域(5Y71)和博格达北坡河流域(5Y72)冰川面积相近,分别为 56.01 km^2 和 58.02 km^2 ,但是二者变化速率差异显著,分别为 $-0.3\text{ km}^2\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $-0.7\text{ km}^2\cdot\text{a}^{-1}$ 。冰川面积减少最少的流域为伊吾河流域(5Y71),变化速率为 $-0.3\text{ km}^2\cdot\text{a}^{-1}$ 。

各流域冰川面积变化相对速率方面,位于准格尔内流水系的博格达北坡河流域(5Y72)冰川面积变化最快,为 $-0.94\%/a$;其次是吐鲁番—哈密内流水系的白杨河流域(5Y81)和塔里木内流水系的开都河流域(5Y69),变化率为 $-0.84\%/a$ 和 $-0.8\%/a$;伊犁河流域(5X04)冰川面积缩减量最多,但相对变化速率却较小,为 $-0.59\%/a$;庙儿沟流域(5Y82)和伊吾河流域(5Y71)冰川面积变化速率分别为 $-0.76\%/a$ 和 $-0.49\%/a$;阿克苏河流域(5Y67)和玛纳斯河流域(5Y73)速率较为接近,介于 $-0.41\sim-0.47\%/a$ 。冰川面积变化最慢的是塔里木水系的渭干河流域(5Y68),其面积变化率为 $-0.2\%/a$ 。

研究时段内,天山冰川储量由 861.26 km^3 减至 756.48 km^3 ,储量亏损了 104.78 km^3 ,亏损率为 12.16% (表4)。其中伊犁河流域储量亏损最多,亏损量达 28.45 km^3 ,约占天山冰川总亏损量的 20.01% 。其余各流域储量亏损均低于伊犁河流域,亏损量最小的是伊吾河流域,仅为 0.49 km^3 。博格达北坡河流域冰川储量亏损率最大,为 37.62% 。其次是白杨河流域、开都河和艾比湖流域,介于 $30.68\%\sim34.59\%$ 。储量亏损率最小的是阿克苏河流域,为 5.49% 。

表4 天山各流域冰川的亏损量和亏损率

Tab. 4 Volume loss of glaciers by watershed in Tianshan Mountains

四级流域	第一次冰川编目	第二次冰川编目	亏损量 (km^3)	亏损率 (%)
	(km^3)	(km^3)		
伊犁河流域(5X04)	142.18	113.73	28.45	20.01
阿克苏河流域(5Y67)	287.71	271.92	15.79	5.49
渭干河流域(5Y68)	258.27	240.67	17.6	6.81
开都河流域(5Y69)	23.25	16.01	7.21	31.05
伊吾河流域(5Y71)	3.26	2.77	0.49	15.03
博格达北坡(5Y72)	4.20	2.62	1.58	37.62
玛纳斯河流域(5Y73)	82.21	67.17	13.25	18.41
艾比湖流域(5Y74)	47.55	32.96	14.59	30.68
白杨河流域(5Y81)	7.72	5.05	2.67	34.59
庙儿沟流域(5Y82)	4.91	3.58	1.33	27.09

5 讨论

研究时段内天山冰川整体呈现退缩趋势, 退缩幅度存在空间差异。从冰川面积相对退缩速率来看, 区域差异性显著。其中博格达北坡河和白杨河流域冰川退缩速率最为显著, 开都河流域和庙儿沟流域冰川退缩次之, 伊犁河和艾比湖流域退缩速率较为接近, 玛纳斯河、伊吾河和阿克苏河流域退缩速率较小, 渭干河流域退缩速率最小。

气温决定冰川消融, 固态降水决定冰川积累, 二者共同作用决定了冰川的形成、发育与演化^[31]。研究表明, 时间尺度愈长或空间范围愈大, 冰川进退受气温的影响愈显著; 降水量通常只对短时间尺度(如10年以下)和较小空间尺度的冰川进退有明显影响^[34]。天山地区冰川为大陆性冰川, 积累和消融主要发生在夏季, 属于夏季积累型冰川^[35]。从1961-2010年天山地区夏季气温与年降水(图6)来看, 天山地区夏季气温和年降水均呈现增加趋势, 各流域增加幅度区域差异显著。其中庙儿沟流域、伊吾河流域、博格达北坡河流域和白杨河流域, 夏季平均气温和夏季平均气温增幅均大于阿克苏河流域、玛纳斯河流域、伊犁河流域与渭干河流域。而降水受地形和水汽来源的影响, 伊犁河流域、阿克苏河流域、玛纳斯河流域的年均降水和年均降水增幅均大于庙儿沟流域、伊吾河流域、博格达北坡流域和白杨河流域且年均降水呈现由东向西递减的态势。由此可知, 天山博格达北坡流域和白杨河流域冰川快速退缩是由于气温快速上升导致的冰川加速消融。而阿克苏河流域和玛纳斯河流域虽然气温也在升高, 但是降水的增加在一定程度上弥补了气温上升造成的冰川物质亏损, 从而使该流域冰川退缩速率低于博格达北坡流域和白杨河流域。研究区气温普遍上升, 导致冰川区雪线普遍上升, 特别是2000年以后冰川区气温上升, 导致整体雪线上升, 从而使得冰川退缩加剧^[36]。

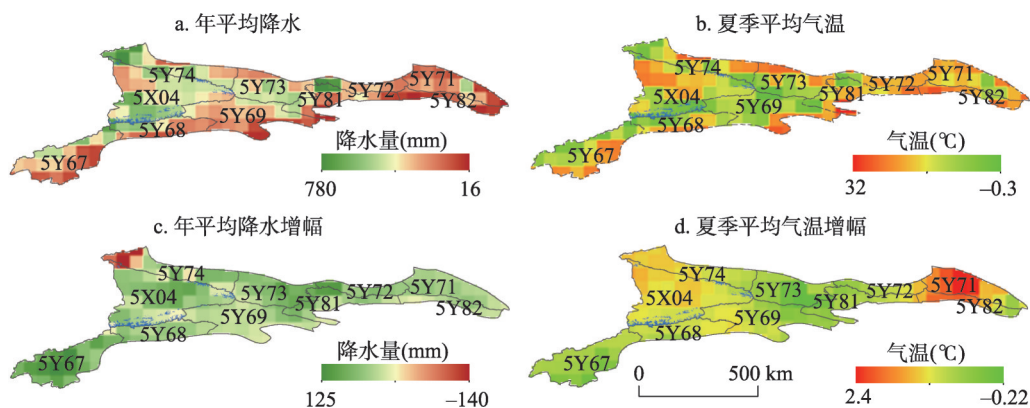


图6 1961-2010年中国天山地区夏季气温和年降水变化

Fig. 6 Variations of summer temperature and annual precipitation in Chinese Tianshan Mountains during 1961-2010

(a. average annual precipitation; b. average summer temperature; c. annual average precipitation increase; d. average summer temperature increase)

根据冰川进退与气温和降水的关系, 康尔泗对高亚洲地区12条冰川平衡线(ELA)和夏季气温关系进行分析。结果表明, 夏季平均气温升高1℃, 冰川平衡线升高可达100~160 m的高差, 如保持平衡线不变, 需要固态降水增加幅度在40%以上, 甚至需要增加约1倍^[37]。从天山气温和降水的增加幅度来看, 气温增加1℃的区域较多, 而降水均未达到相应的增幅。刘时银等以乌鲁木齐河源一号冰川为例, 研究发现当气温升高1℃时, 对应的降水量则需要增加47%^[38]。若不考虑冰川响应的滞后性, 初步认为夏季气温

的显著上升带来的消融大于年内降水带来的积累是天山冰川退缩的主要原因。由于天山是一个复杂的山地自然综合体,冰川区气候复杂多变,冰川变化与气候变化之间的响应机制复杂,且冰川变化受多方面因素的影响,据已有资料或仅从气温和降水方面难以阐释各流域冰川变化的空间差异,仍有待下一步的深入研究。

6 结论

基于冰川编目数据与气象资料,本文对1959年来天山冰川资源时空变化特征进行了分析,主要结论如下:

(1) 天山现存冰川7934条,冰川面积7179.77 km²,冰储量约为756.48 km³。数量上天山冰川以面积<1 km²的居多;面积上以1~10 km²和大于20 km²的冰川为主。冰川面积的高程变化特征近似呈正态分布,海拔3800~4800 m为冰川的集中发育区,峰值出现在4200 m左右。各流域冰川面积分布不均,塔里木河流域冰川分布最多,吐鲁番—哈密流域最少;各市州冰川分布方面,阿克苏地区冰川面积最大,吐鲁番地区最小。

(2) 50年间天山冰川数量减少了965条,数量减少明显;面积共退缩了1619.82 km²,面积退缩率为18.41%。冰川储量亏损了104.78 km³,亏损率为12.16%。

(3) 天山各流域冰川退缩存在明显的区域差异性。天山中部的伊犁河流域冰川面积减少最多,天山东段的伊吾河流域面积减少最少,其余各流域介于二者之间。博格达北坡河流域退缩速度最快,为0.94%/a,退缩最慢的是渭干河流域变化速度为0.2%/a,其余各流域退缩速度介于二者之间。气象资料分析表明,50年间天山山区整体上夏季气温增加显著,降水量上升明显。若不考虑冰川响应的滞后性,初步认为夏季气温的显著上升带来的消融大于年内降水带来的积累是天山冰川退缩的主要原因。冰川区气候复杂多变,仅从已有资料难以阐释各流域冰川变化空间分布的差异性,亟待开展进一步工作。

致谢:感谢国家地球系统科学数据平台寒区旱区科学数据中心及中国气象科学数据共享服务网提供数据支持。

参考文献(References)

- [1] Shi Yafeng, Liu Shiyin. Pre-estimation for the response of China glaciers to global warming in the 21st century. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(4): 434-438. [施雅风, 刘时银. 中国冰川对21世纪全球变暖响应的预估. *科学通报*, 2000, 45(4): 434-438.]
- [2] Liu Shiyin, Yao Xiaojun, Guo Wanqin, et al. The contemporary glaciers in China base on the Second Chinese Glacier Inventory. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(1): 3-16. [刘时银, 姚晓军, 郭万钦, 等. 基于第二次冰川编目的中国冰川现状. *地理学报*, 2015, 70(1): 3-16.]
- [3] Zhang Jiutian, He Xiaojia, Shanguan Donghui, et al. Impact of intensive glacier ablation on arid regions of northwest China and its countermeasure. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(4): 848-854. [张九天, 何霄嘉, 上官冬辉, 等. 冰川加剧消融对我国西北干旱区的影响及其适应对策. *冰川冻土*, 2012, 34(4): 848-854.]
- [4] Liu Chaohai, Kang Ersi, Liu Shiyin, et al. Study on the glacier variation and its runoff responses in the arid region of northwest China. *Science in China Series D*, 1999, 29(Suppl.1): 55-62. [刘潮海, 康尔泗, 刘时银, 等. 西北干旱区冰川变化及其径流效应研究. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 1999, 29(增刊1): 55-62.]
- [5] Yang Zhenjiang. *Glacier Water Resources in China*. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1991: 81-150. [杨针娘. *中国冰川水资源*. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1991: 81-150.]
- [6] Sorg A, Bolch T, Stoffel M, et al. Climate change impacts on glaciers and runoff in Tien Shan (Central Asia) AGU Fall Meeting. *AGU Fall Meeting Abstracts*, 2012: 725-731.

- [7] Tian Hongzhen, Yang Taibao, et al. Climate change and glacier area variations in China during the past half century. *Journal of Mountain Science*, 2016, 13(8): 1345-1357.
- [8] Yao Xiaojun, Liu Shiyin, Guo Wanqin, et al. Glacier change of Altay Mountain in China from 1960 to 2009: Based on the Second Glacier Inventory of China. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(10): 1734-1745. [姚晓军, 刘时银, 郭万钦, 等. 近50a来中国阿尔泰山冰川变化: 基于中国第二次冰川编目成果. *自然资源学报*, 2012, 27(10): 1734-1745.]
- [9] Zhu Wanwan, Shangguan Donghui, Guo Wanqin, et al. Glaciers in some representative basins in the middle of the Tianshan Mountains: Change and response to climate change. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(6): 1376-1384. [朱弯弯, 上官冬辉, 郭万钦, 等. 天山中部典型流域冰川变化及对气候的响应. *冰川冻土*, 2014, 36(6): 1376-1384.]
- [10] 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. [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.]
- [11] Shangguan Donghui, Liu Shiyin, Ding Yongjian, et al. Glacier changes at the head of Yurungkax River in the west Kunlun Mountains in the past 32 years. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(6): 855-862. [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.]
- [12] Sun Meiping, Liu Shiyin, Yao Xiaojun, et al. Glacier changes in the Qilian Mountains in the past half century: Based on the revised First and Second Chinese Glacier Inventory. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(9): 1402-1414. [孙美平, 刘时银, 姚晓军, 等. 近50年来祁连山冰川变化: 基于中国第一、二次冰川编目数据. *地理学报*, 2015, 70(9): 1402-1414.]
- [13] Li Zongxing, He Yuanqing, Wang Shijin, et al. Changes of some monsoonal temperate glaciers in Hengduan Mountains Region during 1900-2007. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(11): 1319-1330. [李宗省, 何元庆, 王世金, 等. 1900-2007年横断山区部分海洋型冰川变化. *地理学报*, 2009, 64(11): 1319-1330.]
- [14] Farinotti D, Longuevergne L, Moholdt G, et al. Substantial glacier mass loss in the Tien Shan over the past 50 years. *Nature Geoscience*, 2015, 8(9).
- [15] Wang Shengjie, Zhang Mingjun, Li Zhongqin, et al. Reponse of glacier area variation to climate change in Chinese Tianshan Mountains in the past 50 years. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(1): 38-46. [王圣杰, 张明军, 李忠勤, 等. 近50年来中国天山冰川面积变化对气候的响应. *地理学报*, 2011, 66(1): 38-46.]
- [16] Li Zhongqin, Li Kaiming, Wang Lin. Study on recent glacier changes and their impact on water resources in Xinjiang, northwestern China. *Quaternary Sciences*, 2010, 30(1): 96-106. [李忠勤, 李开明, 王林. 新疆冰川近期变化及其对水资源的影响研究. *第四纪研究*, 2010, 30(1): 96-106.]
- [17] Li Kaiming, Li Zhongqin, Gao Wenyu, et al. Recent glacial retreat and its effect on water resources in eastern Xinjiang. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(32): 2708-2716. [李开明, 李忠勤, 高闻宇, 等. 近期新疆东天山冰川退缩及其对水资源影响. *科学通报*, 2011, 56(32): 2708-2716.]
- [18] Liu Shiyin, Ding Yongjian, Zhang Yong et al. Impact of the glacial change on water resources in the Tarim River Basin. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(5): 482-490. [刘时银, 丁永建, 张勇, 等. 塔里木河流域冰川变化及其对水资源影响. *地理学报*, 2006, 61(5): 482-490.]
- [19] Glacial Area Changes in the Ili River Catchment (Northeastern Tien Shan) in Xinjiang, China, from the 1960s to 2009. *Advances in Meteorology*, 2015, 2015(4):1-12.
- [20] Li Zhongqin. Progress and Application of Research on Glacier No.1 at Headwaters of Urumqi River, Tianshan, China. Beijing: China Meteorological Press, 2011. [李忠勤. 天山乌鲁木齐河1号冰川近期研究与应用. 北京: 气象出版社, 2011.]
- [21] Zhang Hui, Li Zhongqin, Wang Puyu, et al. Variation of Haxilegen No.51 Glacier at the Headwater of Kuytun River in Tianshan Mountains and its response to climate change. *Arid Zone Research*, 2015, 32(1): 88-93. [张慧, 李忠勤, 王璞玉, 等. 天山奎屯哈希勒根51号冰川变化及其对气候的响应. *干旱区研究*, 2015, 32(1): 88-93.]
- [22] Wang Puyu, Li Zhongqin, Zhou Ping, et al. Changes of representative glaciers in Xinjiang Hami and their impact to water resources. *Advances in Water Science*, 2014, 25(4): 518-525. [王璞玉, 李忠勤, 周平, 等. 近期新疆哈密代表性冰川变化及对水资源影响. *水科学进展*, 2014, 25(4): 518-525.]
- [23] Wang Puyu, Li Zhongqin, Li Huilin, et al. Changes of ice-thickness and volume for representative glaciers in Tianshan Mountains in the past 50 years. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(7): 929-940. [王璞玉, 李忠勤, 李慧林, 等. 近50年

- 来天山地区典型冰川厚度及储量变化. 地理学报, 2012, 67(7): 929-940.]
- [24] Wang Puyu, Li Zhongqin, Cao Min, et al. Variation of Qingbingtan Glacier No.72 in Mt. Tuomuer Region during past 45 years. *Scientia Geographica Sinica*, 2010, 17(6): 962-967. [王璞玉, 李忠勤, 曹敏, 等. 近45年来托木尔峰青冰滩72号冰川变化特征. 地理科学, 2010, 17(6): 962-967.]
- [25] Hu Ruji. *Physical Geography of the Tianshan Mountains in China*. Beijing: China Environmental Science Press, 2004: 1-14, 180-198. [胡汝骥. 中国天山自然地理. 北京: 中国环境科学出版社, 2004: 1-14, 180-198.]
- [26] Liu Chaohai, Ding Liangfu. A primary calculation of temperature and precipitation in Tianshan Mountains, China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1988, 8(2): 151-159. [刘潮海, 丁良福. 中国天山冰川区气温和降水的初步估算. 冰川冻土, 1988, 8(2): 151-159.]
- [27] Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences Glacier Inventory of China (Ⅲ): Tianshan Mountains (Ili River Drain age Basin). Beijing: Science Press, 1986: 1-158. [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.]
- [28] 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. [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.]
- [29] Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences Glacier Inventory of China (Ⅲ): Tianshan Mountains (Interior Drainage Area of Scattered Flow in Southwest). Beijing: Science Press, 1986: 1-187. [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(西南塔里木内流区). 北京: 科学出版社, 1986: 1-187.]
- [30] 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 China). Beijing: Science Press, 1986. [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(西北准格内流区). 北京: 科学出版社, 1986.]
- [31] Shi Yafeng. *A Concise China Glacier Inventory*. Shanghai: Shanghai Science Popular Press, 2005. [施雅风. 简明中国冰川目录. 上海: 上海科学普及出版社, 2005.]
- [32] Su Zhen, Ding Liangfu, Liu Chaohai. The ice-thickness and volume of glaciers in Tianshan Mountains. *Xinjiang Geography*. 1984, 7(2): 37-44. [苏珍, 丁良福, 刘潮海. 天山冰川厚度及储量计算. 新疆地理, 1984, 7(2): 37-44.]
- [33] Liu Chaohai, Ding Liangfu. The glacial resources and their distributive characteristics in the Tianshan Mountains of China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1987, 9(2): 100-102. [刘潮海, 丁良福. 中国天山冰川资源及其分布特征. 冰川冻土, 1987, 9(2): 100-102.]
- [34] Gao Xiaoqing, Tang Maocang. Discussion on the relationship between glacial fluctuation and climate change. *Plateau Meteorology*, 2000, 19(1): 9-16. [高晓清, 汤懋苍. 冰川变化与气候变化关系的若干探讨. 高原气象, 2000, 19(1): 9-16.]
- [35] Xie Zichu, Liu Chaohai. *Introduction of Glaciology*. Shanghai: Shanghai Science Popularization Press, 2010: 425. [谢自楚, 刘潮海. 冰川学导论. 上海: 上海科学普及出版社, 2010: 425.]
- [36] Li Shuai, Hou Xiaogang. Monitoring and analysis of snowline on Tianshan Mountains based on remotely sensed data from 2001 to 2015. *Advances in Water Science*, 2017(3): 1-9. [李帅, 侯小刚. 基于2001-2015年遥感数据的天山山区雪线监测及分析. 水科学进展, 2017(3): 1-9.]
- [37] Kang Ersi. Energy balance characteristics and mass balance change calculation research of cryosphere in High Asia. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1996, 18(Suppl.): 12-22. [康尔泗. 高亚洲冰冻圈能量平衡特征和物质平衡变化计算研究. 冰川冻土, 1996, 18(增刊): 12-22.]
- [38] Liu Shiyin, Xie Zichu, Wang Ninglian et al. Mass balance sensitivity to climate change: A case study of Glacier No.1 at Urumqi Riverhead, Tianshan Mountains, China. *Chinese Geographical Science*, 1999, 9(2): 134-140.

Spatial-temporal variation of glacier resources in Chinese Tianshan Mountains since 1959

XING Wucheng¹, LI Zhongqin^{1,2}, ZHANG Hui², ZHANG Mingjun¹,
LIANG Pengbin¹, MU Jianxin¹

(1. College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China;

2. State Key Laboratory of Cryosphere Sciences, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, CAS, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Based on the glacier inventories and meteorological data, spatial-temporal variations of glaciers in Chinese Tianshan Mountains were analyzed systematically. The results show that: (1) 7934 glaciers with an area of 7179.77 km² and volume of 756.48 km³ were identified in the study area. The number of glaciers below 1 km² accounts for the majority part of glaciers in the Chinese Tianshan Mountains. In contrast, glaciers between 1 to 10 km² and larger than 20 km² have the largest proportions of the total glacier surface area. The glaciers in the study area are mainly distributed at elevations of 3800-4800 m. (2) In 10 watersheds, the Akesu River Basin contains the most of the glaciers with a surface area of 1721.75 km², but the Yiwu River Basin has the least glaciers whose surface area is 56.03 km². There is an obvious difference of glaciers in different regions. In the Akesu region, glacier resource is the most abundant, which accounts for 43.28% and 68.85% in total surface area and volume. In the Turpan region, glacier resource is the least, which accounts for only 0.23% and 0.07% of the total surface area and volume in this region. (3) In the past half century, the loss in glacier area and ice volume were 1619.85 km² (-18.64%) and 104 km³ (21.63%), respectively. Glaciers smaller than 1.0 km² constituted the main body of the decreased glacier number. Glaciers below 5 km² experienced a significant recession. (4) The relative rates of area change for these glaciers were different for different drainage basins. The fastest change of glacier area occurred on the northern slope of the Bogda Basin and the lowest appeared in the Weigan River Basin. The main reason for glacier retreat in this region was that glacier melting caused by rising summer temperatures is greater than glacier mass supply by increased precipitation during the study period.

Keywords: glaciers in Tianshan Mountains; glacier variation; glacier inventory; climate change; China