

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

孙美平^{1,2}, 刘时银², 姚晓军¹, 郭万钦², 许君利²

(1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070;

2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 冰冻圈科学国家重点实验室, 兰州 730000)

摘要: 基于修订后的祁连山区第一次冰川编目(1956-1983年)和最新发布第二次冰川编目数据(2005-2010年), 对祁连山区冰川变化进行分析。结果表明: ① 祁连山区现有冰川2684条, 面积 $1597.81 \pm 70.30 \text{ km}^2$, 冰储量约 84.48 km^3 。其中, 甘肃省和青海省各有冰川1492条和1192条, 面积分别为 760.96 km^2 和 836.85 km^2 。② 祁连山区冰川数量和面积分别以面积 $< 1.0 \text{ km}^2$ 的冰川和面积介于 $1 \sim 5 \text{ km}^2$ 的冰川为主; 冰川平均中值面积海拔为4972.7 m, 并自东向西由4483.8 m逐渐上升为5234.1 m。③ 疏勒河流域冰川面积和冰储量最大, 占祁连山冰川总量的31.91%和35.11%; 其次是哈尔腾河流域, 巴音郭勒河流域冰川面积最小, 为 2.20 km^2 ; 黑河流域是祁连山区冰川平均面积最小的四级流域, 冰川平均面积仅 0.21 km^2 。④ 近50年间祁连山冰川面积和冰储量分别减少 420.81 km^2 (-20.88%)和 21.63 km^3 (-20.26%)。面积 $< 1.0 \text{ km}^2$ 的冰川急剧萎缩是该区冰川面积减少的主要原因, 海拔4000 m以下山区冰川已完全消失, 海拔4350~5100 m区间冰川面积减少量占冰川面积总损失的84.24%。冰川数量和面积在各个朝向均呈减少态势, 其中朝北冰川面积减少最多, 朝东冰川面积减少最快, 而西北朝向冰川变化最为缓慢。⑤ 祁连山冰川变化呈现明显的经度地带性分异, 东段冰川退缩较快, 中西段冰川面积减少较慢。

关键词: 冰川; 编目; 冰储量; 气候变化; 祁连山

DOI: 10.11821/dlxb201509004

1 引言

山地冰川不仅是冰冻圈的重要组成部分^[1], 而且是反映气候变化的天然记录器和预警器^[2-3], 素有“高山固体水库”之称^[4]。中国是世界上中低纬度山地冰川最发育的国家, 第二次中国冰川编目表明, 中国共有冰川48571条, 总面积约 $5.18 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占世界冰川(除南极和格陵兰冰盖外)面积的7.1%^[5]。冰川及其融水是中国西部地区, 尤其是西北干旱区最重要的水资源, 对维系本区脆弱的生态平衡及社会经济可持续发展具有重要意义^[6-7]。祁连山冰川融水哺育的河西走廊是欧亚大陆重要的贸易和文化交流通道, 冰川变化对于甘肃、青海乃至全国都意义重大。

收稿日期: 2015-04-26; 修订日期: 2015-06-19

基金项目: 科技部科技基础性工作专项(2013FY111400); 国家重大科学研究计划项目(2010CB951401); 国家科技支撑计划项目(2012BAC19B07); 国家自然科学基金(41261016); 甘肃省高等学校科研项目(2014A-001, 2013A-018) [Foundation: National Basic Work Program of MST, No.2013FY111400; National Major Sciences Research, No.2010CB951401; National Science-technology Support Plan Project, No.2012BAC19B07; National Natural Science Foundation of China, No.41261016; Scientific Research Project of Higher Learning Institution in Gansu Province, No.2014A-001, No.2013A-018]

作者简介: 孙美平(1981-), 女, 辽宁沈阳人, 博士, 副教授, 主要从事寒区水文过程与气候变化影响评估研究。

E-mail: sunmeiping1982@163.com

通讯作者: 刘时银(1963-), 男, 河南信阳人, 研究员, 博士生导师, 主要从事冰川变化及其影响研究。E-mail: liusy@lzb.ac.cn

中国西北干旱区冰川处于物质亏损状态,普遍退缩减薄^[6, 8-9],祁连山区冰川也不例外。如刘时银等^[10-11]的研究表明,自小冰期最盛时至1990年,祁连山西段冰川总体上表现为萎缩状态,冰川面积和储量减少幅度呈山地南坡大于北部、东侧大于西侧的特征;1956-2000年期间,祁连山西段95%的冰川以419 m/a的速率退缩。陈辉等^[12]对祁连山中段冰川变化结果显示,1956-2003年该区域冰川面积共减少21.7%,其中黑河流域冰川面积缩小了29.6%,北大河流域冰川面积缩小了18.7%。别强等^[13]对黑河流域1960-2010年期间冰川变化研究结果表明,50年间该流域冰川面积共减少138.90 km² (-35.6%),并认为祁连山中段冰川属于强烈退缩型。曹泊等^[14]和张华伟等^[15]发现祁连山东段冷龙岭地区部分冰川完全消失,冰川整体处于退缩状态。Tian等^[16]认为祁连山冰川自1990s以来呈加快退缩趋势。王玉哲等^[8]利用SRTM和ICESat数据反演了祁连山冰川变量变化,结果表明21世纪初祁连山冰川处于物质亏损状态,估算祁连山冰川年均冰量损失 $(534.2 \pm 399.5) \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ w.e.}$,但该结果不确定性很大。由于不同学者所用数据源及其采集时间存在的差异,加之第一次冰川编目人工计算面积的误差^[17]及冰川遥感解译的复杂性^[18],对于整个祁连山冰川变化及其区域分异规律有待于进一步认识。本文基于最新发布的中国第二次冰川编目数据^[5]和第一次冰川编目修订后的矢量数据,系统分析近50年祁连山冰川变化特征,为认识该地区冰川变化规律及水资源合理利用提供数据支撑和理论依据。

2 研究区概况

祁连山地处青藏高原东北缘,由一系列NW走向的平行山脉与谷地组成(图1),东起乌鞘岭,西至当金山口,南靠柴达木盆地,北临河西走廊,长约800 km,宽约300 km^[19]。以青海湖和哈拉湖为界,祁连山被划分为东(武威—拉脊山)、中(酒泉—德令哈)、西(鹰咀山—大柴旦)3段,地势由东北向西南逐渐升高,最高峰为团结峰(又名岗则吾结,5826 m)^[20]。祁连山区属高原大陆型气候,西段受西风环流控制,东段受东南季风和翻越青藏高原的西南季风的影响,年平均气温5℃,年降水量250 mm,降水主要集中在夏季,冬季降水量较少,年降水量由东向西逐渐减少。

据中国第二次冰川编目^[5],祁连山区共发育冰川2683条,面积1597.81 km²,占中国冰川总面积的3.09%,在14个山系(高原)中居第9位,属中小规模。从冰川类型来看,祁连山中、东段冰川属亚大陆型冰川,西段属极大陆型冰川^[3]。在中国冰川编目中,

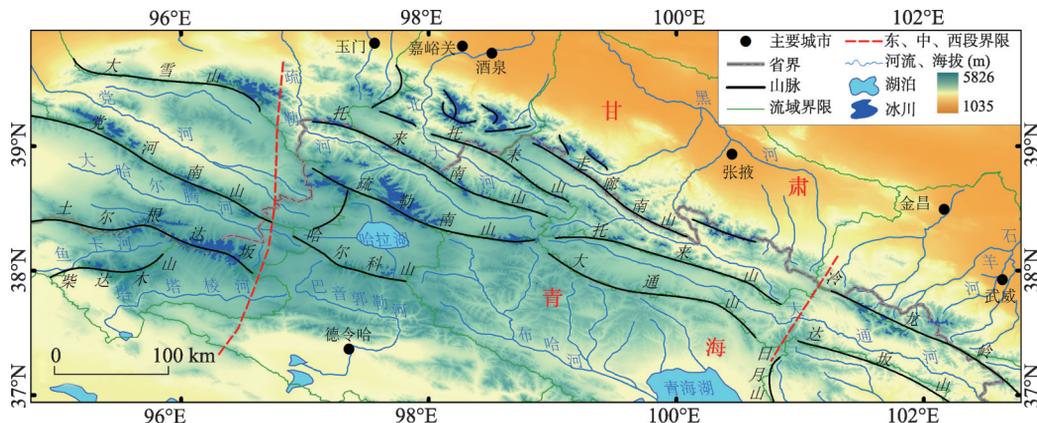


图1 祁连山冰川分布

Fig. 1 The distribution of glaciers in the Qilian Mountains

祁连山区冰川分属于东亚内流区(5Y)的河西内流水系(5Y4)和柴达木内流水系(5Y5)、黄河流域(5J)的大通河水系(5J4)^[21]。其中,河西内流水系包括祁连山北坡的石羊河、黑河、北大河、疏勒河和党河;柴达木内流水系包括祁连山南坡的哈尔腾河、鱼卡河、塔塔棱河、巴音郭勒河和布哈河等。

3 数据与方法

3.1 数据源

祁连山地区第一次冰川编目所用数据主要为1960s的航测地形图^[20],本文对第一次冰川编目数据的修订除采用与此相同的地形图外,并搜集整理了其他时段航测地形图。经统计,对第一次冰川编目数据修订共使用1:10万地形图46幅,1:5万地形图18幅。这些地形图航测时间较为分散,大致可划分为3个时段:1956-1957年、1966-1978年和1983年,其中1956年、1957年、1966年、1973年和1975年地形图上的冰川面积约占第一次冰川编目总面积的90%。祁连山区第二次冰川编目所用数据源为16景少云少雪且质量较好的Landsat TM/ETM+遥感影像,轨道号分别为132034、133033、134033、134034、135033、135034、136033、136034和137033,在USGS网站(<http://glovis.usgs.gov>)下载获得,这些影像获取时间集中在2005-2009年期间,月份为6-9月。

两次冰川编目所用的数字高程模型数据为地形图和SRTM V4.1,后者由国际农业研究磋商组织(CGIAR, <http://srtm.csi.cgiar.org>)提供。研究区1961-2010年气温和降水数据为中国地面降水和气温月值 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 格点数据集(V2.0),该数据集基于全国国家级台站(基本、基准和一般站)资料,并利用GTOPO30数字高程模型进行空间插值,数据由中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>)提供。

3.2 冰川编目

1979-1980年中国科学家首次按照国际冰川编目规范完成了祁连山区冰川编目工作^[20]。受当时技术条件限制,此次冰川编目对冰川面积的量算采用方格法或求积仪方法^[20],较之目前普遍采用的利用GIS软件量算误差较大^[17]。为提高冰川面积精度并与第二次冰川编目结果相比较,首先对第一次冰川编目采用人工数字化方法进行修订,具体步骤包括地形图扫描、几何纠正、屏幕矢量化、参考《中国冰川目录I祁连山区》^[20]核对及属性计算与录入等。其中,地形图几何纠正选择北京1954坐标系、 6° 带高斯-克吕格横轴等角切椭圆柱投影,并选择方里网交叉点作为控制点。冰川矢量数据属性除冰川WGI编码和名称人工录入外,其它冰川参数均利用GIS技术自动提取。修订后的第一次冰川编目表明,祁连山区共有冰川3000条,面积2014.96 km²,均大于之前的统计数字(分别为2815条和1931 km²)。祁连山第二次冰川编目方法详见文献[5]和[22],在此不再赘述。

3.3 误差评估

对冰川遥感解译结果的检验可通过两种途径达到,一种是通过地面野外调查获得;另一种是用更高空间分辨率的遥感数据分类结果作为参考数据^[23]。由于冰川地区地形复杂、气候险恶,难以对所有冰川实地测量验证,因此大多采用第二种方法进行精度评估^[1, 24]。中国第二次冰川编目在遥感影像自动分类结果基础上进行了人工修订,且工作人员具有丰富专业知识和野外考察经验^[5],尽管人工目视结果可作为真值,但仍存在一定的误差,比如像元位置偏移。本文仅考虑地形图和遥感影像分辨率造成的误差,可由下式计算出:

$$\varepsilon = N \cdot A / 2 \quad (1)$$

式中: ε 为影像分辨率造成的误差(m²); N 为冰川轮廓线经过的像元个数; A 为地形图冰

川轮廓线划符号大小或遥感影像单个像元的面积(1:10万地形图为729 m², Landsat TM/ETM+遥感影像为900 m²)。结果表明,由地形图分辨率造成的误差为±105.90 km²,占祁连山区第一次冰川编目时期冰川面积的±5.26%;由Landsat TM/ETM+遥感影像分辨率造成的误差为±70.30 km²,占祁连山区第二次冰川编目时期冰川面积的±4.40%。

3.4 冰川面积变化计算方法

冰川面积变化即为两次冰川编目中冰川面积的差值。由于祁连山区第一次冰川编目所用数据源时间跨度较大,为便于不同流域冰川变化比较,本文采用冰川面积变化速率和冰川面积变化相对速率两种方式,计算方法如下:

$$V_{GAC} = \frac{GA_s - GA_f}{Y_{f-s}} \quad (2)$$

$$PV_{GAC} = \left[\left(\frac{GA_s}{GA_f} \right)^{1/Y_{f-s}} - 1 \right] \times 100\% \quad (3)$$

式中: V_{GAC} 为冰川面积变化速率(km²/a); PV_{GAC} 为冰川面积变化相对速率(%/a); GA_s 和 GA_f 分别为第二次冰川编目和第一次冰川编目时的冰川面积(km²); Y_{f-s} 为两次冰川编目时所用数据源的采集时间间隔,单位为年,可由式(4)计算得到:

$$Y_{f-s} = \frac{\sum_{i=1}^m A_i \cdot Y_i}{\sum_{i=1}^m A_i} - \frac{\sum_{j=1}^n A_j \cdot Y_j}{\sum_{j=1}^n A_j} \quad (4)$$

式中: A_i 和 Y_i 分别为第二次冰川编目时某流域第*i*条冰川的面积和数据源年份; A_j 和 Y_j 分别为第一次冰川编目时该流域第*j*条冰川的面积和数据源年份; m 和 n 分别为第二次和第一次冰川编目时该流域的冰川总数量。

4 结果与讨论

4.1 祁连山冰川现状

4.1.1 祁连山冰川总体特征 2005-2010年间,祁连山共有冰川2684条,面积1597.81 km²,冰储量约84.48 km³。从冰川面积看(图2),祁连山冰川的一个显著特点是数量以面积<1.0 km²的冰川为主,面积以介于1~5 km²的冰川为主。其中,面积<1.0 km²的冰川共2299条,占祁连山冰川总数量的85.66%;随着面积等级上升冰川数量迅速减少,面积≥20 km²的冰川仅有1条,即老虎

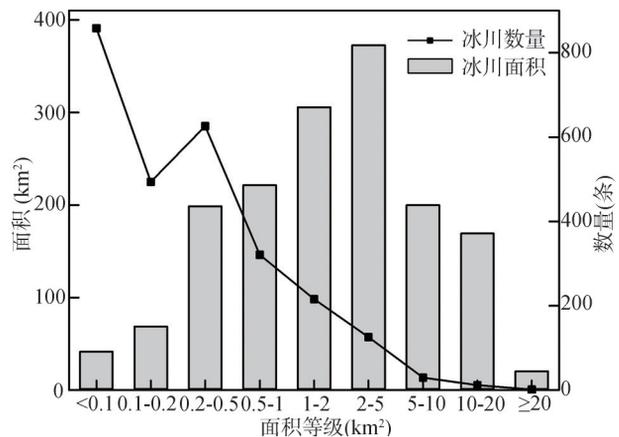


图2 2005-2010年间祁连山不同面积等级冰川数量与面积
Fig. 2 Number and area of glaciers in different sizes
in the Qilian Mountains from 2005 to 2010

沟12号冰川(又名透明梦柯冰川,编码为5Y448D0012,面积20.42 km²)。冰川面积近似正态分布,其中面积介于2~5 km²的冰川面积最大,为372.37 km²;其次是1~2 km²的面积等级,冰川面积为305.67 km²,二者占祁连山冰川总面积的42.44%。面积<0.1 km²的冰川数量尽管多达858条,但总面积仅41.50 km²,约等于2条老虎沟12号冰川的面积,在祁连

山冰川总面积中的比例也仅为2.60%。

4.1.2 祁连山冰川海拔梯度特征 山脉或山峰的绝对海拔高度及冰川平衡线以上的相对高差是决定山地冰川数量和规模的主要地形要素^[25]。祁连山受地质构造影响,地势由西南向东北逐渐降低,海拔4000 m以上的面积占山地总面积的30%,而冰川面积仅占海拔4000 m以上山地面积的1.29%,可见祁连山区冰川发育地形条件较差。根据地形发育特征,祁连山可划分为北部祁连山深切高山峡谷区、疏勒河—党河上游深切高山谷区、南部祁连山中等切割高山谷区、青海湖—哈拉湖中等切割高山盆地区和湟水深切割中山谷区5个区域^[20]。其中,北部祁连山深切高山峡谷区由于山地薄、相对高差大,侵蚀切割强烈,坡面破碎,冰川面积普遍较小;疏勒河—党河上游深切高山谷区和南部祁连山中等切割高山谷区因山体宽厚,海拔高,坡面比较完整,有些地区还保存有较好的高山夷平面,冰川面积较大,并在大雪山、疏勒南山和土尔根达坂等山脉主峰地区形成祁连山冰川作用中心;湟水深切割中山谷区因地势较低,没有发育冰川的条件。

以50 m为间距对祁连山冰川进行统计分析(图3),祁连山冰川面积高程特征为正态分布,冰川发育在海拔4000~5800 m之间,其中海拔4800~5200 m的冰川面积占冰川总面积的58.15%,为冰川集中分布区。末端海拔最低(4017.8 m)的冰川出现在祁连山中段托来山北侧的潘家河流域(5Y422F),该条冰川质心地理坐标为38°17'N、100°19'E。祁连山冰川平均中值面积海拔为4972.7 m,受北西走向的平行山脉和地势影响,沿冷龙岭—走廊南山—托来山自东向西冰川中值面积海拔逐渐升高,由4483.8 m增加为4820.2 m,这与苏珍等计算的祁连山冰川平衡线变化趋势基本一致^[26];从大雪山—疏勒南山—一线向西南经党河南山—哈尔科山至吐尔根达坂山冰川中值面积海拔缓慢上升,高程值介于5003.7~5097.2 m;冰川中值面积海拔最大值出现在柴达木山,为5234.1 m。

4.1.3 祁连山各水系冰川分布 在《简明中国冰川目录》^[21]中,按照国际冰川编目规范,祁连山冰川被划归于河西内流水系(5Y4)、柴达木内流水系(5Y5)和大通河(5J4)3个三级流域。无论是冰川数量还是冰川面积和冰储量,河西内流水系冰川资源总量最多(表1),其次是柴达木内流水系,大通河流域最少。在四级流域中,疏勒河流域冰川面积和冰储量最大,分别占祁连山冰川相应总量的31.91%和35.11%;哈尔腾河流域冰川数量少于位于祁连山北坡的北大河、黑河和党河水系,但冰川平均面积高达1.06 km²,致使冰川面积和冰储量均高于后者而位居第2;冰川资源最少的流域是巴音郭勒河水系,仅有10条冰川,面积2.20 km²。黑河流域共有冰川375条,面积78.33 km²,冰川资源拥有量仅高于石羊河、大通河、布哈河—青海湖和巴音郭勒河4个水系,流域内冰川平均面积为0.21 km²,是祁连山区冰川平均面积最小的四级流域。

4.1.4 祁连山地区各省(市)冰川资源分布 在行政区划上,祁连山冰川隶属于甘肃省酒

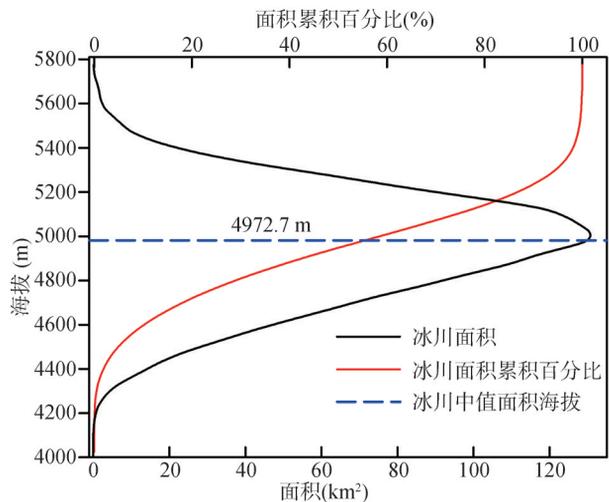


图3 祁连山冰川面积随海拔分布

Fig. 3 Hypsography of glacier area in the Qilian Mountains

泉、张掖、武威3市和青海省海西、海北2个自治州(表2)。其中,位于甘肃省境内的冰川共1492条,面积760.96 km²,冰储量37.94 km³。就甘肃省冰川资源而言^[5],祁连山区冰川占有绝对主导地位,冰川面积和冰储量所占比重高达94.99%和95.09%。甘肃省祁连山区冰川集中分布在酒泉和张掖两市,尽管张掖市冰川数量多于酒泉市,但后者冰川面积约为前者的1倍以上,冰储量也约为后者的3倍。武威市仅有冰川35条,面积和冰储量分别为6.32 km²和0.17 km³,是祁连山地区有冰川分布最少的市(自治州)级行政单元。由于祁连山主分水岭与甘青两省省界不相吻合,祁连山北坡的冰川融水径流全部汇入河西内流水系的5大河流和党河南山与土尔根达坂之间的哈尔腾河外,冰川融水径流补给的大通河下游部分河段(连城—红古)也位于甘肃境内,如按此计算,甘肃省可利用冰川水资源的冰川达2363条(88.04%),面积1351.53 km²(84.59%),冰储量70.74 km³(83.74%)。

青海省祁连山冰川数量(1192条)不及甘肃省,但冰川面积和冰储量都高于甘肃省,分别为836.85 km²和46.54 km³。海西蒙古族藏族自治州的冰川数量约为海北藏族自治州的一倍以上,但前者面积和冰储量都远高于后者。除了祁连山,青海省境内昆仑山、唐古拉山、巴颜喀拉山等地区均有冰川发育,青海省祁连山冰川数量、面积和冰储

表1 祁连山各水系冰川资源

Tab. 1 Glacier statistics by watershed in the Qilian Mountains

三级流域(编码)	四级流域(编码)	冰川数量		冰川面积		冰储量*	
		(条)	(%)	(km ²)	(%)	(km ³)	(%)
大通河(5J4)	大通河(5J42)	68	2.53	20.83	1.30	0.73	0.86
	石羊河(5Y41)	97	3.61	39.94	2.50	1.55	1.83
	黑河(5Y42)	375	13.97	78.33	4.90	2.39	2.83
	北大河(5Y43)	577	21.50	215.27	13.47	8.75	10.36
	疏勒河(5Y44)	660	24.59	509.87	31.91	29.66	35.11
河西内流水系(5Y4)	党河(5Y45)	318	11.85	203.77	12.75	10.08	11.93
	合计	2027	75.52	1047.18	65.54	52.43	62.07
	布哈河—青海湖(5Y51)	24	0.89	10.27	0.64	0.42	0.50
	哈尔腾河(5Y56)	268	9.99	283.52	17.74	17.58	20.81
	柴达木内流水系(5Y5)	哈拉湖(5Y57)	108	4.02	78.73	4.93	4.56
鱼卡河—塔塔棱河(5Y58)	179	6.67	155.08	9.71	8.69	10.29	
	巴音郭勒河(5Y59)	10	0.37	2.20	0.14	0.06	0.07
	合计	589	21.94	529.8	33.16	31.31	37.07

注:冰川冰储量为根据Radić和Hock^[27]、Grinsted^[31]提出的冰川冰储量计算公式得到的结果平均值。

表2 甘肃省与青海省(祁连山区)冰川统计

Tab. 2 Glacier statistics by province in the Qilian Mountains

省	市(自治州)	冰川数量		冰川面积		冰储量	
		(条)	(%)	(km ²)	(%)	(km ³)	(%)
甘肃	酒泉	718	26.75	508.99	31.86	28.17	33.35
	张掖	739	27.53	245.65	15.37	9.60	11.36
	武威	35	1.31	6.32	0.40	0.17	0.20
	合计	1492	55.59	760.96	47.63	37.94	44.91
青海	海西	825	30.74	729.79	45.67	42.79	50.65
	海北	367	13.67	107.06	6.70	3.75	4.44
	合计	1192	44.41	836.85	52.37	46.54	55.09

量分别占该省冰川相应总量的31.35%、21.26%和16.94%。

4.2 近50年祁连山地区冰川变化

4.2.1 祁连山地区冰川数量、面积及冰储量变化 祁连山区两次冰川编目结果对比表明, 1956-2010年期间, 祁连山冰川面积共减少420.81 km² (-20.88%)。其中, 509条冰川消失, 面积为55.12 km²; 122条冰川分离为262条, 面积由241.35 km²减少为193.90 km²。在第二次冰川编目中发现第一次冰川编目有55条冰川被遗漏, 但这些冰川面积均较小, 共3.67 km²。Tian等^[6]研究表明, 1990s和2010s祁连山区冰川面积分别为2041.5 km²和1575.82 km², 面积减少465.68 km² (-22.81%)。根据不同学者对祁连山东、中、西段和部分流域冰川变化研究结果^[13-15, 28-29], 1950s、1970s至1990s祁连山区冰川处于退缩状态, 而Tian等^[6]研究结果中的1990s冰川面积显然大于祁连山第一次冰川编目统计的面积(2014.96 km²), 即其高估了1990s-2010s祁连山地区冰川面积减少量。从行政区划来看, 近50年甘肃省和青海省祁连山冰川面积分别减少了218.97 km² (-22.39%)和198.44 km² (-19.17%)。钻孔或冰雷达(GPR)测量冰川厚度仅在少数冰川开展, 目前对冰储量的计算大多采用体积—面积经验公式^[30]:

$$V = cA^\gamma \quad (5)$$

式中: V 为冰川冰储量(km³); A 为冰川面积(km²); c 和 γ 为经验系数, 本文分别采用Radić等^[27]、Grinsted^[31]和Liu等^[32]提出的数值。

基于Radić等^[27]的方法计算的冰川冰储量及其变化最大, 基于Grinsted^[31]方法结果则最小, 基于Liu等^[32]采用的方法计算结果居中(表3)。本文取上述3种方法的平均值进行分析, 表明近50年来祁连山地区冰川冰储量损失21.63 km³, 其损失率为-5.38 km³/10 a和-5.67%/10 a。

表3 不同方法计算的祁连山冰川储量变化

Tab. 3 Glacier volume changes in the Qilian Mountains by three methods

第一次冰川 编目冰储量(km ³)	第二次冰川 编目冰储量(km ³)	冰川储量变化			冰川冰储量 估算经验公式	公式出处
		km ³	km ³ /10 a	%/10 a		
101.90	81.30	-20.60	-5.12	-5.65	$V=0.0365A^{1.375}$	Radić和Hock ^[27]
109.86	87.52	-22.34	-5.56	-5.69	$V=0.0433A^{1.29}$	Grinsted ^[31]
108.44	86.49	-21.95	-5.46	-5.66	$V=0.04A^{1.35}$	Liu等 ^[32]

4.2.2 祁连山地区冰川变化特征 从各条冰川面积相对变化(图4a)来看, 祁连山地区面积< 5.0 km²的冰川变化幅度较大, 而面积≥ 5.0 km²的冰川面积减少小于20%, 其中面积< 0.5 km²且面积损失大于50%的冰川共999条, 占该山区冰川总数的33.32%, 表明祁连山区冰川退缩以面积< 0.5 km²的冰川为主。面积变化绝对值小于0.5 km²的冰川相对集中(图4b), 面积< 1.0 km²的冰川面积共减少271.01 km², 占冰川损失面积的64.40%; 尽管部分面积≥ 5.0 km²的冰川退缩幅度超过1.0 km², 但因冰川数量很少, 冰川面积变化总量尚不足整个祁连山地区冰川面积减少的5%。因此, 在祁连山地区, 冰川面积无论是相对变化还是绝对变化面积< 1.0 km²的冰川都占绝对主导地位。

近50年来祁连山地区各海拔高度带冰川面积相对变化与绝对变化表明, 海拔4000 m以下山区冰川已完全消失(图5a), 海拔4500 m以下冰川损失率均大于50%。随着海拔上升, 冰川面积变化百分比逐渐下降, 海拔5500 m以上区域冰川面积基本上没有变化。尽管海拔4250 m以下冰川退缩惊人(大于80%), 但该海拔以下冰川面积减少仅占冰川面积总变化的2.10%。冰川面积减少最大值出现海拔4650 m附近(图5b), 海拔4350~5100 m各区间冰川面积减少量均大于15 km², 减少量占冰川面积总损失的84.24%。

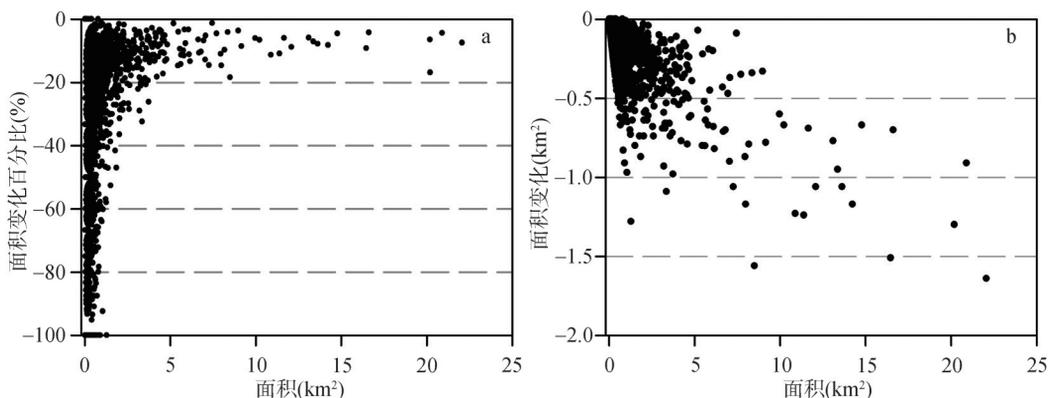


图4 1956-2010年祁连山冰川面积变化

Fig. 4 Percentage and area changes of glaciers in the Qilian Mountains from 1956 to 2010

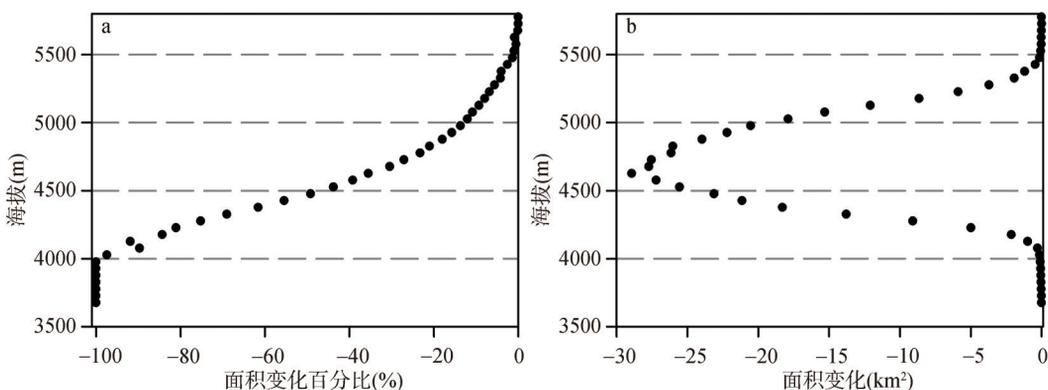


图5 1956-2010年祁连山各海拔冰川面积变化

Fig. 5 Altitudinal characteristics of glacial changes in the Qilian Mountains from 1956 to 2010

从冰川朝向来看(图6),祁连山地区无论是冰川数量还是冰川面积朝北冰川最多(大),其次是东北向和西北向;南、东南和西南朝向冰川数量基本相当,但西南朝向冰川面积较大;朝西冰川数量高于朝东冰川,但后者面积大于前者。统计表明,除西北朝向冰川外,冰川数量与面积变化基本上与各朝向冰川规模相一致,即朝北冰川面积减少最多(-210.34 km^2),其次是东北朝向(-83.62 km^2),朝南最小,仅 -5.03 km^2 。从冰川面积变化百分比来看,朝东冰川面积减少最快,为 -32.72% ;其次是西南、东南、西和北四个朝向,面积变化百分比介于 -29.91% ~ -23.73% 之间。比较特殊的是,西北朝向冰川面积减少最小,仅为 -1.85 km^2 (-0.95%),这可能与处于增强的西风环流迎风坡有关。

4.2.3 祁连山地区冰川变化区域分异规律 从1956-2010年祁连山各流域冰川面积变化速率看(图7),疏勒河流域(5Y44)冰川面积减少最多,为 $-24.5 \text{ km}^2/10 \text{ a}$;其次是北大河流域(5Y43)和黑河流域(5Y42),分别为 $-21.7 \text{ km}^2/10 \text{ a}$ 和 $-17.0 \text{ km}^2/10 \text{ a}$ 。尽管哈尔腾河流域(5Y56)冰川面积仅次于疏勒河流域(5Y44),但其冰川面积减少速率为 $-9.7 \text{ km}^2/10 \text{ a}$,低于上述3个流域。冰川面积年变化速率最低的流域为巴音郭勒河流域(5Y59),仅为 $-0.2 \text{ km}^2/10 \text{ a}$,这与该流域冰川面积最少有关。

从各流域冰川面积变化相对速率看,位于祁连山东中段南坡的大通河流域(5J42)冰川面积变化最快,为 $-19.97\%/10 \text{ a}$;其次是中段北坡的黑河流域(5Y42)和东段北坡的石羊河流域(5Y41),分别为 $-15.67\%/10 \text{ a}$ 和 $-14.21\%/10 \text{ a}$ 。中段的北大河流域

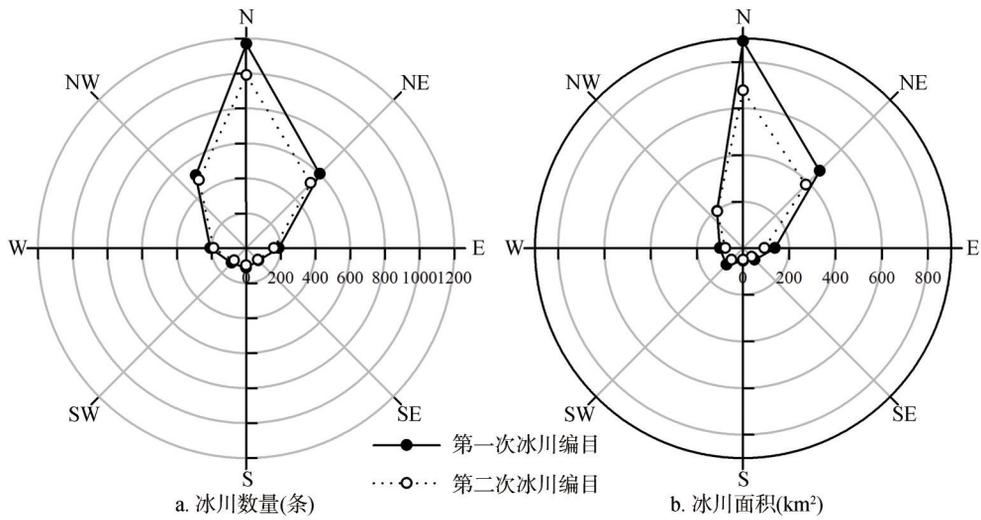


图6 1956-2010年祁连山地区不同朝向冰川数量与面积变化

Fig. 6 Orientational characteristics of glacial changes in the Qilian Mountains from 1956 to 2010

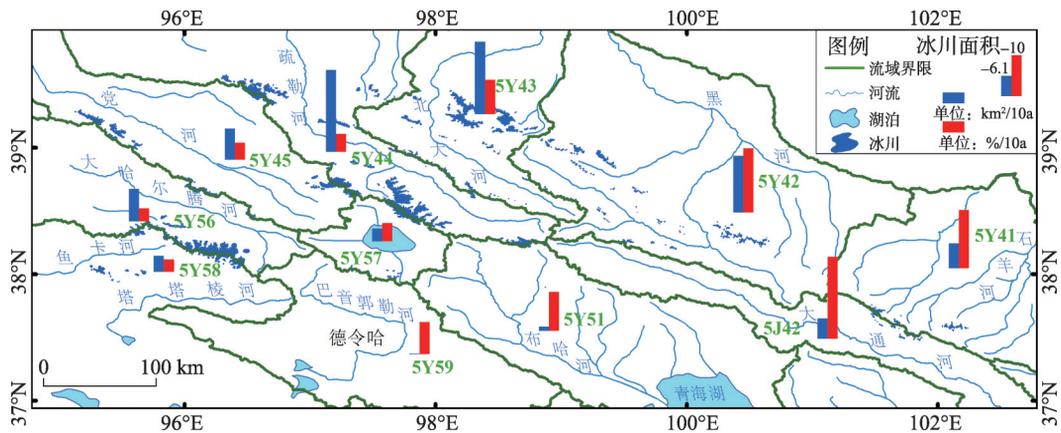


图7 1956-2010年祁连山各流域冰川面积变化

Fig. 7 Area change of glaciers in different watersheds in the Qilian Mountains from 1956 to 2010

(5Y43)、布哈河—青海湖流域(5Y51)和巴音郭勒河流域(5Y59)冰川面积变化较为接近,介于-9.49~-7.81%/10 a之间。哈拉湖以西的5个流域冰川面积变化相对速率绝对值均小于4.45%/10 a,最低值出现在最西段吐尔根达坂山以南的鱼卡河—塔塔棱河流域(5Y58),为-2.96%/10 a。如自西向东按经度来计算冰川面积变化百分比,其变化速率为-2.43%/经度,说明祁连山冰川面积减少有自西向东呈现加快趋势。

冰川的生存、发育及规模变化均取决于气候变化,具有周期波动特征,并受区域性及地区性气候的约束^[33-35]。在长时间尺度和较大空间范围上,冰川受气温的影响越显著;降水量一般只对短时间尺度和较小空间尺度的冰川进退有明显影响^[6]。近50年来,祁连山区气温呈显著上升趋势,升幅基本在0.5 °C/10 a左右,1990s中期以后气温上升最为明显,变幅最大超过1 °C/10 a^[37];年降水量呈增加趋势,但降水主要集中在夏季(即冰川消融期),且强降水过程对降水区域分布有较大影响^[37-38]。最新研究表明,整个河西走廊春、秋、冬3季仍有暖湿化倾向,而夏季暖干化趋势明显^[37, 39]。上述关于祁连山气温与降水变化研究主要基于某几个气象台站资料或采用空间插值方法,大多没有考虑高程影

响。本文基于中国地面气温与降水月值 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 格点数据集,分析祁连山区夏季气温和年降水年代际变化。1961-2010年期间祁连山地区夏季气温上升明显(图8),大部分区域增温速率超过 $0.2^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,其中中段的黑河流域(5Y42)在夏季各月增温最大;年降水量变化呈现自东向西逐渐增加趋势,除大通河流域(5J42)部分区域降水略有减少外,以托来南山、疏勒南山、党河南山和吐尔根达坂为中心的西段高山区降水增加速率介于 $10\sim 20\text{mm}/10\text{a}$ 之间。由此可知,祁连山东中段冰川大规模减退是气温快速上升的结果,而祁连山西段气温增幅虽较大,但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,使其冰川面积减少速率低于祁连山东中段地区。就整个祁连山而言,降水量的增加远不能比拟气温升高给冰川物质平衡带来的影响,从而导致冰川面积普遍减少。

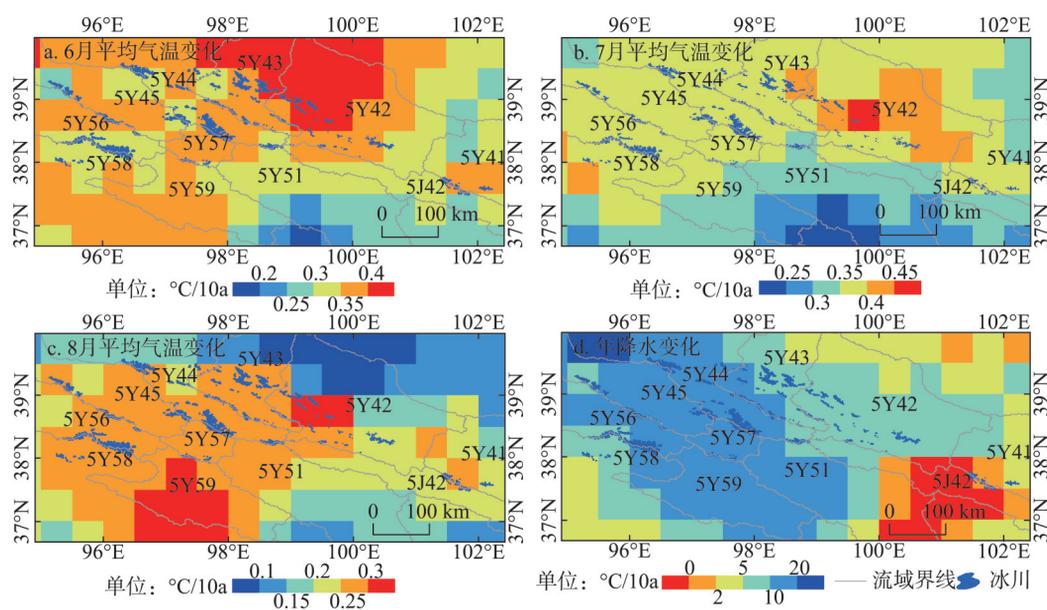


图8 1961-2010年祁连山地区夏季气温和年降水变化

Fig. 8 The change of temperature in summer and annual precipitation in the Qilian Mountains from 1961 to 2010

5 结论

(1) 祁连山区第一次冰川编目经修订后,共有冰川3000条,面积 2014.96 km^2 ,冰川数量和面积均多于之前公开的冰川数据。第二次冰川编目表明,2005-2010年期间祁连山区共有冰川2684条,面积 $1597.81\pm 70.30\text{ km}^2$,冰储量约 84.48 km^3 。其中,甘肃省境内冰川共1492条,面积 760.96 km^2 ,冰储量 37.94 km^3 ;青海省境内冰川共1192条,面积 836.85 km^2 ,冰储量 46.54 km^3 。

(2) 祁连山区冰川数量以面积 $< 1.0\text{ km}^2$ 的冰川为主,面积以介于 $1\sim 5\text{ km}^2$ 的冰川为主。面积最大的冰川为老虎沟12号冰川,面积为 20.42 km^2 (2009年)。海拔 $4800\sim 5200\text{ m}$ 为冰川集中分布区,发育在该海拔带的冰川面积约占冰川总面积的一半以上。祁连山冰川平均中值面积海拔为 4972.7 m ,受山脉走势和地势影响,冰川中值面积海拔自东向西逐渐升高,由 4483.8 m 上升为 5234.1 m 。

(3) 在祁连山区冰川编目四级流域中,疏勒河流域冰川面积和冰储量最大,分别占祁连山冰川相应总量的 31.91% 和 35.11% ;其次是哈尔腾河流域,冰川资源最少的流域是

巴音郭勒河水系, 冰川面积为 2.20 km^2 。中国西北地区第二大内陆河——黑河流域是祁连山地区冰川平均面积最小的四级流域, 冰川平均面积仅 0.21 km^2 。

(4) 1956-2010年祁连山区冰川面积和冰储量分别减少 420.81 km^2 (-20.88%)和 21.63 km^3 (-20.26%)。面积 $< 1.0\text{ km}^2$ 的冰川急剧萎缩是该山区冰川面积减少的主要原因。由于冰川退缩, 海拔 4000 m 以下山区冰川已完全消失, 海拔 4500 m 以下冰川面积损失均大于 50% , 海拔 $4350\sim 5100\text{ m}$ 区间冰川面积减少量占冰川面积总损失的 84.24% 。冰川数量和面积在各个朝向均呈减少态势, 其中朝北冰川面积减少最多 (-210.34 km^2), 朝东冰川面积减少最快 (-32.72%), 而西北朝向冰川变化最为缓慢。

(5) 祁连山冰川变化呈现明显的经度地带性分异规律, 东段冰川退缩较快, 而中西段则较慢, 且东西段冰川面积减少速率差异极大。位于祁连山东段的大通河流域、石羊河流域冰川面积相对变化速率介于 $-14.21\sim -19.97\%/10\text{ a}$, 而位于西段的鱼卡河—塔塔棱河流域仅为 $-2.96\%/10\text{ a}$ 。在气候变暖大背景下, 尽管降水增加在一定程度上弥补了冰川物质亏损, 但仍无法比拟气温升高给冰川物质平衡带来的影响, 从而导致冰川面积减少。

参考文献(References)

- [1] Kargel J S, Leonard G J, Bishop M P, et al. *Global Land Ice Measurements from Space*. Heidelberg: Springer, 2014.
- [2] Orelemans J. Modelling the response of glaciers to climate warming. *Climate Dynamics*, 1998, 14(4): 267-274.
- [3] 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.]
- [4] Xie Zichu, Feng Qinghua, Wang Xin, et al. Modeling the response of glacier system to climate warming: Taking glaciers in China as an example. *Research of Soil and Water Conservation*, 2005, 12(5): 77-82. [谢自楚, 冯清华, 王欣, 等. 中国冰川系统变化趋势预测研究. *水土保持研究*, 2005, 12(5): 77-82.]
- [5] 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.]
- [6] 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(S1): 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.]
- [7] Zhang Jiutian, He Xiaojia, Shangguan 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.]
- [8] Wang Yuzhe, Ren Jiawen, Qin Dahe, et al. Regional glacier volume changes derived from satellite data: A case study in the Qilian Mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(3): 583-592. [王玉哲, 任贾文, 秦大河, 等. 利用卫星资料反演区域冰川冰量变化的尝试: 以祁连山为例. *冰川冻土*, 2013, 35(3): 583-592.]
- [9] Zhang Mingjun, Wang Shengjie, Li Zhongqin, et al. Variation of glacier area in China against the warming in the past 50 years. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(9): 1155-1165. [张明军, 王圣杰, 李忠勤, 等. 近50年气候变化背景下中国冰川面积状况分析. *地理学报*, 2011, 66(9): 1155-1165.]
- [10] Liu Shiyin, Shen Yongping, Sun Wenxin, et al. Glacier variation since the Maximum of the Little Ice Age in the western Qilian Mountains, northwest China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(3): 227-233. [刘时银, 沈永平, 孙文新, 等. 祁连山西段小冰期以来的冰川变化研究. *冰川冻土*, 2002, 24(3): 227-233.]
- [11] Liu Shiyin, Ding Yongjian, Li Jing, et al. Glaciers in response to recent climate warming in western China. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(5): 762-771. [刘时银, 丁永建, 李晶, 等. 中国西部冰川对近期气候变暖的响应. *第四纪研究*, 2006, 26(5): 762-771.]
- [12] Chen Hui, Li Zhongqin, Wang Puyu, et al. Change of glaciers in the central Qilian Mountain. *Arid Zone Research*, 2013, 30(4): 588-593. [陈辉, 李忠勤, 王璞玉, 等. 近年来祁连山中段冰川变化. *干旱区研究*, 2013, 30(4): 588-593.]
- [13] Bie Qiang, Qiang Wenli, Wang Chao, et al. Monitoring the glacier variation in the upper reaches of the Heihe River based on remote sensing in 1961-2010. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(3): 574-582. [别强, 强文丽,

- 王超,等. 1960-2010年黑河流域冰川变化的遥感监测. 冰川冻土, 2013, 35(3): 574-582.]
- [14] Cao Bo, Pan Baotian, Gao Hongshan, et al. Glacier variation in the Lenglongling Range of eastern Qilian Mountains from 1972 to 2007. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32(2): 242-248. [曹泊, 潘保田, 高红山, 等. 1972-2007年祁连山东段冷龙岭现代冰川变化研究. 冰川冻土, 2010, 32(2): 242-248.]
- [15] Zhang Huawei, Lu Anxin, Wang Lihong, et al. Glacier change in the Lenglongling Mountain monitored by remote sensing. *Remote Sensing Technology and Application*, 2010, 25(5): 682-686. [张华伟, 鲁安新, 王丽红, 等. 基于遥感的祁连山东部冷龙岭冰川变化研究. 遥感技术与应用, 2010, 25(5): 682-686.]
- [16] Tian H, Yang T, Liu Q. Climate change and glacier area shrinkage in the Qilian Mountains, China, from 1956 to 2010. *Annals of Glaciology*, 2014, 55(66): 187-197.
- [17] 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.]
- [18] Paul F, Barry R G, Cogley J G, et al. Recommendations for the compilation of glacier inventory data from digital sources. *Annals of Glaciology*, 2010, 50(53): 119-126.
- [19] You Lianyuan, Yang Jingchun. *Geomorphology in China*. Beijing: Science Press, 2013. [尤联元, 杨景春. 中国地貌. 北京: 科学出版社, 2013.]
- [20] Wang Zongtai, Liu Chaohai, You Genxiang, et al. *Glacier Inventory of China I Qilian Mountains*. Lanzhou: Lanzhou Institute of Glaciology and Cryopedology, CAS, 1981. [王宗太, 刘潮海, 尤根祥, 等. 中国冰川目录I祁连山区. 兰州: 中国科学院兰州冰川冻土研究所, 1981.]
- [21] 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.]
- [22] Guo W, Liu S, Xu J, et al. The second Chinese glacier inventory. *Journal of Glaciology*, 2015, 61(226): 357-372.
- [23] Yan Lili, Wang Jian. Study of extracting glacier information from remote sensing. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(1): 110-118. [彦立利, 王建. 基于遥感的冰川信息提取方法研究进展. 冰川冻土, 2013, 35(1): 110-118.]
- [24] Racoviteanu A E, Paul F, Raup B, et al. Challenges and recommendations in mapping of glacier parameters from space, Boulder, Colorado, USA. *Annals of Glaciology*, 2009, 50(53): 53-69.
- [25] Shi Yafeng. *Glaciers and their Environments in China: The Present, Past and Future*. Beijing: Science Press, 2000. [施雅风. 中国冰川与环境: 现在、过去和未来. 北京: 科学出版社, 2000.]
- [26] Su Zhen, Zhao Jingdong, Zheng Benxing. Distribution and features of the glaciers' ELAs and the decrease of ELAs during the Last Glaciation in China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(1): 9-19. [苏珍, 赵井东, 郑本兴. 中国现代冰川平衡线分布特征与末次冰川平衡线下降值研究. 冰川冻土, 2014, 36(1): 9-19.]
- [27] Radić V, Hock R. Regional and global volumes of glaciers derived from statistical upscaling of glacier inventory data. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115, F01010. doi: 10.1029/2009JF001373.
- [28] Ding Yihui. *Assessment of Environmental Evolution in Western China (Volume II)*: Science Press, 2002. [丁一汇. 中国西部环境演变评估(第二卷). 北京: 科学出版社, 2002.]
- [29] Zhang Huawei, Lu Anxin, Wang Lihong, et al. Glacier change in the Shulenan Mountain monitored by remote sensing. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(1): 8-13. [张华伟, 鲁安新, 王丽红, 等. 祁连山疏勒南山地区冰川变化的遥感研究. 冰川冻土, 2011, 33(1): 8-13.]
- [30] Gärtner-Roer I, Naegeli K, Huss M, et al. A database of worldwide glacier thickness observations. *Global and Planetary Change*, 2014, 122: 330-344.
- [31] Grinsted A. An estimate of global glacier volume. *The Cryosphere*, 2013, 7: 141-151.
- [32] Liu S, Sun W, Shen Y, et al. Glacier changes since the Little Ice Age maximum in the western Qilian Shan, northwest China, and consequences of glacier runoff for water supply. *Journal of Glaciology*, 2003, 49(164): 117-124.
- [33] Duan Jianping, Wang Lili, Ren Jiawen, et al. Progress in glacier variations in China and its sensitivity to climatic change during the past century. *Progress in Geography*, 2009, 28(2): 231-237. [段建平, 王丽丽, 任贾文, 等. 近百年来中国冰川变化及其对气候变化的敏感性研究进展. 地理科学进展, 2009, 28(2): 231-237.]
- [34] 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.]
- [35] Xie Zichu, Liu Chaohai. *Introduction to Glaciology*. Shanghai: Shanghai Science Popular Press, 2010. [谢自楚, 刘潮海.]

- 冰川学导论. 上海: 上海科学普及出版社, 2010.]
- [36] Gao Xiaoqing. Discussion on the relationship between glacial fluctuation and climate change. *Plateau Meteorology*, 2000, 19(1): 9-16. [高晓清. 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.]
- [37] Wang Haijun, Zhang Bo, Jin Xiaohua, et al. Spatio-temporal variations analysis of air temperature and precipitation in Qilian mountainous region based on GIS. *Journal of Desert Research*, 2009, 29(6): 1196-1202. [王海军, 张勃, 靳晓华, 等. 基于GIS的祁连山区气温和降水的时空变化分析. *中国沙漠*, 2009, 29(6): 1196-1202.]
- [38] Zhang Liang, Zhang Qiang, Feng Jianying, et al. A study of atmospheric water cycle over the Qilian Mountains (I): Variation of annual water vapor transport. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(5): 1079-1091. [张良, 张强, 冯建英, 等. 祁连山地区大气水循环语句(I): 空中水汽输送年际变化分析. *冰川冻土*, 2014, 36(5): 1079-1091.]
- [39] Lin Shu, Li Hongying, Dang Bing, et al. The latest evidences of a warm-wet climatic shift in Hexi Corridor, Gansu. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(5): 1111-1121. [林纾, 李红英, 党冰, 等. 甘肃河西走廊地区气候暖湿转型后的最新事实. *冰川冻土*, 2014, 36(5): 1111-1121.]

Glacier changes in the Qilian Mountains in the past half century: Based on the revised First and Second Chinese Glacier Inventory

SUN Meiping^{1,2}, LIU Shiyin², YAO Xiaojun¹, GUO Wanqin², XU Junli²

(1. College of Geography and Environment Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China;

2. State Key Laboratory of Cryosphere Sciences, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China)

Abstract: According to the Second Chinese Glacier Inventory (SCGI) that were mostly compiled based on Landsat TM/ETM+ images, the Qilian Mountains contained 2684 glaciers covering an area of $1597.81 \pm 70.30 \text{ km}^2$ and ice volume of $\sim 84.48 \text{ km}^3$ from 2005 to 2010. While most glaciers are small (85.66% are smaller than 1.0 km^2), some larger ones (12.74%, with each having 1.0 and 5.0 km^2) cover 42.44% of the total glacier area. The Laohugou No.12 Glacier (20.42 km^2) located on the north slope of the Daxue Range is the only one larger than 20 km^2 in the Qilian Mountains. The average median altitude of glacier was 4972.7 m a.s.l. and gradually rose from east to west. Glaciers in the Qilian Mountains are mostly distributed in Gansu and Qinghai provinces, which have 1492 glaciers (760.96 km^2) and 1192 glaciers (836.85 km^2), respectively. In 11 watersheds, the Shule River contains most of the glaciers in either area or volume. However, the Heihe River, the second longest interior river in China, has the minimum average area of glacier. Comparison of glaciers from the SCGI and the revised glacier inventory based on topographic maps and aerial photos taken from 1956 to 1983 indicated that all the glaciers in the Qilian Mountains were receding, which is consistent with other mountains and plateaus in western China. In the past half century, the area and volume of glaciers decreased by 420.81 km^2 (-20.88%) and 21.63 km^3 (-20.26%), respectively. The glaciers which are smaller than 1.0 km^2 constituted the main body of glacier number depression and area recession. Due to shrinkage, the glaciers below 4000 m a.s.l. completely disappeared.

Keywords: glacier; glacier inventory; glacier volume; climate change; Qilian Mountains