

1970-2016年冈底斯山冰川变化

刘 娟¹, 姚晓军¹, 刘时银^{2,3}, 郭万钦², 许君利⁴

(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
冰冻圈科学国家重点实验室, 兰州 730000; 3. 云南大学国际河流与生态安全研究院, 昆明 650091;
4. 盐城师范学院, 盐城 224051)

摘要: 基于修订后的中国两次冰川编目数据及2015-2016年Landsat OLI遥感影像,对冈底斯山1970-2016年的冰川时空变化特征进行分析,并利用相应时段的气温和降水数据,对冰川变化原因进行探讨,为全面认识冈底斯山在气候变暖背景下冰川的响应规律及区域水资源合理利用提供科学依据。结果表明:① 2015-2016年冈底斯山共有冰川3953条,面积1306.45 km²,冰储量约58.16 km³;冰川数量以面积<0.5 km²的冰川为主,面积则以介于0.1~5 km²的冰川为主。② 1970-2016年冈底斯山冰川面积共减少854.05 km²(-39.53%),冰川面积变化相对速率高达-1.09%/a,消融期气温升高是导致该山区冰川退缩的最主要原因。与中国西部其他山系冰川变化相比,冈底斯山是冰川退缩最为强烈的地区,且近年来冰川退缩呈加快趋势。③ 冈底斯山冰川面积减少主要集中在海拔5600~6100 m之间,海拔6500 m以上区域基本没有变化。除南朝向和东南朝向外,冈底斯山其他朝向冰川数量和面积均呈减少趋势,其中北朝向冰川面积减少最多,西北朝向冰川面积变化最快。④ 冈底斯山冰川面积变化自西向东呈加快趋势,其中东段冰川面积变化相对速率高达-1.72%/a,中段次之(-1.67%/a),西段仅为-0.83%/a。

关键词: 冰川变化;冰川编目;气候变化;冈底斯山

DOI: 10.11821/dlxb201907005

1 引言

冰川是冰冻圈的重要组成部分^[1],作为一种固体淡水资源,冰川对山区社会经济发展、生态系统和环境有重要影响^[2-3]。冰川进退与气候变化关系密切,被视作气候变化的灵敏指示器^[4]。在全球气候变暖背景下,冰川持续退缩不仅对流域水资源利用和海平面上升产生重要影响^[5-6],而且加剧了冰湖溃决洪水和泥石流等自然灾害的发生^[7-8]。因此,探讨冰川进退与区域气候变化间关系,认识冰川水资源变化及其灾害演化趋势,日益成为全球变化和可持续发展研究领域关注的热点^[9]。

青藏高原被誉为世界第三极,是地球上中低纬度地区最大的现代冰川和第四纪冰川分布区,冰川十分发育,且主要分布于昆仑山、喜马拉雅山、喀喇昆仑山、祁连山、横

收稿日期: 2018-05-14; 修订日期: 2019-05-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(41561016, 41861013, 41801052); 科技部科技基础性工作专项(2013FY111400); 西北师范大学青年教师科研能力提升计划项目(NWNU-LKQN-14-4) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41561016, No.41861013, No.41801052; National Basic Work Program of MST, No.2013FY111400; Youth Scholar Scientific Capability Promoting Project of Northwest Normal University, No.NWNU-LKQN-14-4]

作者简介: 刘娟(1993-), 女, 甘肃定西人, 硕士生, 研究方向为环境科学与地理信息系统。E-mail: liujuan_qx@163.com

通讯作者: 姚晓军(1980-), 男, 山西夏县人, 博士, 教授, 研究方向为地理信息技术与冰冻圈变化。

E-mail: yaoxj_nwnu@163.com

断山、唐古拉山、帕米尔高原以及念青唐古拉山等高山、极高山地区^[10-11]。20 世纪以来,青藏高原冰川明显退缩,且近年来呈加剧态势^[12]。冰川退缩不仅改变了青藏高原地表环境,而且直接影响雅鲁藏布江及其他河流中下游地区数十亿人的用水供应,甚至会改变半球尺度的大气环流^[10]。目前,青藏高原冰川变化研究主要集中于喜马拉雅山^[13-14]、岗日嘎布^[9, 15]、念青唐古拉山西段^[16-17]、唐古拉山^[18]和喀喇昆仑山^[19-21]等地区。已有研究表明,青藏高原冰川退缩具有较大的区域差异性,退缩幅度从高原内部向边缘山区逐渐增大,表明青藏高原边缘山区冰川对气候变化的响应较其腹地更为敏感^[22-23]。

冈底斯山作为中国季风区与非季风区分界线的一部分和青藏高原南北重要地理界线,认清其冰川变化及对气候变化的响应有着重要意义。冰川编目是指各国按统一的规范逐条登记冰川(包括冰川的位置、高度、体积以及活动情况等)并编排成册的记录。本文基于修订后的中国第一次、第二次冰川编目数据和 2015-2016 年冰川矢量数据,对 1970-2016 年来冈底斯山冰川变化规律进行探讨,以期补充冈底斯山冰川变化的基础资料,为全面认识冈底斯山在气候变暖背景下冰川的响应规律及区域水资源合理利用提供科学依据。

2 研究区概况

冈底斯山(29°14′~33°42′N、78°52′~90°03′E)横贯西藏自治区西南部,西起喀喇昆仑山东南部的萨色尔山脊,东至纳木错西南与念青唐古拉山西段衔接,山体呈西北—东南走向,大致与喜马拉雅山平行,是青藏高原和欧亚大陆南缘最为醒目的构造单元之一^[24]。冈底斯山东西延伸长约 1600 km,平均宽度 100 km 左右,平均海拔约 6000 m,主峰为冈仁波齐峰,最高峰罗波峰(又名冷布岗日)海拔达 7095 m。冈底斯山不仅是青藏高原重要的南北地理分界线,而且是高原年均温 0 °C 和最冷月均温 -10 °C 的分界线,也是高原外流水系与内流水系的重要分水岭^[25]。

冈底斯山现代冰川规模较小,主要集中于高山地区,但古冰川规模巨大^[26]。从冰川发育条件来看,冈底斯山西段属极大陆型冰川分布区,东段属亚大陆型冰川分布区^[27]。从冰川类型来看,冈底斯山冰川以冰斗冰川和悬冰川为主,山谷冰川较少^[26]。在中国冰川编目中^[28],冈底斯山冰川分属于青藏高原内流区(5Z)的色林错流域(5Z2)、扎日南木错流域(5Z3)以及班公湖流域(5Z4),印度河流域(5Q)的森格藏布等流域(5Q1)和朗钦藏布等流域(5Q2)以及恒河流域(5O)的雅鲁藏布江流域(5O2)(图 1)。

3 数据与方法

3.1 数据来源

冈底斯山第一次冰川编目所采用的数据源为基于 1970-1980 年航空摄影测量技术制作的地形图,其中 1:5 万 33 幅,1:10 万 56 幅。这些地形图的航测时间较为集中,大致可分为 3 个时段:1970-1972 年、1974 年和 1980 年,其中 1970 年的地形图数量(46 幅)占研究区地形图总数的一半以上,冰川面积约占第一次冰川编目总面积的 65.67%。为便于描述,以 1970 年作为第一次冰川编目的年份。第二次冰川编目所采用的数据源为 2004-2010 年 20 景质量较好的 Landsat TM/ETM+ 遥感影像。2015-2016 年冈底斯山冰川矢量数据所采用的数据源为 13 景 Landsat OLI 遥感影像(表 1),其中 11 景遥感影像采集时间为 2016 年,2 景为 2015 年。

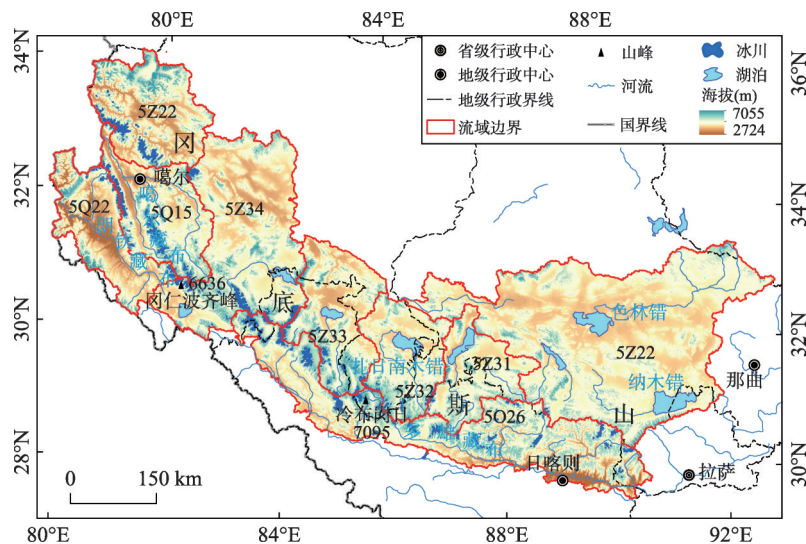


图1 冈底斯山冰川分布
Fig. 1 The distribution of glaciers in the Gangdisê Mountains

表1 2015-2016年冈底斯山冰川数据解译所采用的Landsat OLI遥感影像
Tab. 1 Landsat OLI images used to obtain glacier data in the Gangdisê Mountains during 2015-2016

序号	轨道号		获取日期	序号	轨道号		获取日期
	Path	Row			Path	Row	
1	138	39	2016-04-27	8	143	38	2016-10-07
2	138	40	2016-04-27	9	143	39	2016-09-05
3	139	39	2016-03-17	10	144	38	2016-06-24
4	140	39	2016-10-18	11	145	37	2016-10-15
5	141	39	2016-05-18	12	145	38	2016-09-03
6	141	40	2015-10-07	13	146	37	2016-09-10
7	142	39	2015-09-28				

冈底斯山两次冰川编目所用的数字高程模型 (DEM) 数据分别为地形图和 SRTM V4.1^[29]。2016 年冰川矢量数据所用 DEM 是 ASTER GDEM 数据, 空间分辨率为 30 m。研究区降水和气温数据为中国地面降水和气温月值 0.5°×0.5°格点数据集 (V2.0), 该数据由国家气象科学数据共享服务平台 (<http://data.cma.cn>) 提供。

3.2 研究方法

已有研究表明, 中国第一次冰川编目数据集存在少量冰川的边界绘制不正确、小冰川被遗漏或部分季节性雪斑被误判为冰川等错误^[15]。为提高冰川数据质量, 利用冈底斯山两次冰川编目数据进行交叉验证, 重点检查形状差异较大的冰川、消失冰川 (即仅在第一次冰川编目数据集中存在的冰川) 和新生冰川 (即仅在第二次冰川编目数据集中存在的冰川), 并在尊重事实前提下对这些冰川的形状进行人工修订。其中, 冈底斯山第一次冰川编目数据修订采用的数据源为 1:5 万和 1:10 万地形图, 采用屏幕数字化方法对存在错误的冰川边界进行修正; 冈底斯山第二次冰川编目数据修订采用的数据源为 2009 年 3 景质量较好的 Landsat TM 遥感影像, 并参考中国第二次冰川编目方法对存在错误的冰川边界进行修正。2015-2016 年冈底斯山冰川矢量数据的采集与处理亦选用中国第二次冰川编目方法^[30]。

冰川边界提取的精度主要受传感器和图像配准误差的影响^[31-32],对于冰川边界遥感解译结果的检验可以通过地面实况调查或甚高空间分辨率的遥感数据分类结果作为参考数据^[33]。本文仅考虑遥感影像空间分辨率造成的误差,可由下式计算得出:

$$\varepsilon = N \times A \quad (1)$$

式中: ε 为影像空间分辨率造成的冰川面积误差; N 为冰川轮廓的周长; A 为半个像元的边长(Landsat TM/ETM+/OLI为15 m)。结果表明,2015-2016年由Landsat OLI遥感影像空间分辨率造成的冰川面积误差为 $\pm 116.89 \text{ km}^2$,占冰川总面积的 $\pm 8.95\%$;Landsat TM/ETM+遥感影像空间分辨率造成的误差为 $\pm 122.97 \text{ km}^2$,占冈底斯山第二次冰川编目总面积的 $\pm 8.29\%$ 。

冰川冰储量是评估全球海平面上升的重要指标^[22],目前对于冰储量的计算大多采用体积—面积经验公式^[34]:

$$V = c \times A^\gamma \quad (2)$$

式中: V 为冰川冰储量(km^3); A 为冰川的面积(km^2); c 和 γ 为经验系数,本文采用Radic等^[35]、Grinsted^[36]和Liu等^[37]提出的数值计算冈底斯山冰川冰储量,即以上述3种方法计算的平均值作为参考。

4 结果分析

4.1 冈底斯山冰川现状

4.1.1 冈底斯山冰川总体特征 2015-2016年,冈底斯山共有冰川3953条,面积为 1306.45 km^2 ,冰储量约 58.16 km^3 。将冰川按照面积大小分为8个等级,统计各等级的冰川面积与数量(图2),结果表明冈底斯山冰川的显著特点是面积以介于 $0.1 \sim 5 \text{ km}^2$ 的冰川为主,数量以 $< 0.5 \text{ km}^2$ 的冰川为主,共3375条,占冈底斯山冰川总数的85.38%,表明冈底斯山冰川以小冰川为主,这主要是由于冈底斯山雪线较高($5800 \sim 6000 \text{ m}$),且山体陡峭,地形破碎,不利于大冰川的发育。随着冰川面积等级的增大,冰川数量迅速减少,面积 $> 20 \text{ km}^2$ 的冰川仅有1条(GLIMS编码为G083478 E31014N),面积为 21.14 km^2 ;面积介于 $0.1 \sim 5 \text{ km}^2$ 的冰川面积为 1067.85 km^2 ,占冈底斯山冰川总面积的81.74%;面积 $< 0.1 \text{ km}^2$ 的冰川数量尽管最多,但面积仅为 79.34 km^2 ,占冈底斯山冰川总面积的6.07%。

4.1.2 冈底斯山各流域冰川分布 在《简明中国冰川目录》^[28]中,按照国际冰川编目规范,冈底斯山被划归于印度河(5Q)、恒河(5O)和青藏高原高原内流区(5Z)3个一级流域。由表2可知,青藏高原内流区的冰川数量、面积及冰储量最多(最大),恒河流域次之,印度河流域最少。冈底斯山南坡的印度河和恒河流域冰川总数尽管多于北坡的青藏高原内流区,共有冰川2302条(58.22%),但冰川面积略小,为 626.10 km^2 (47.92%),相应冰川平均面积(0.27 km^2)亦小于北坡冰川平均面积(0.41 km^2)。在三级流域中,多雄藏布等流域不仅冰川面积最大,而且数量最多;色林错流域仅有冰川43条,面积 15.46 km^2 ,是冈底斯山冰川资源最少的流域;昂仁拉错流域的冰川面积和数量虽位居第2和第3,但平均面积和冰储量最大(0.65 km^2 和 19.47 km^3);尽管班公湖流域

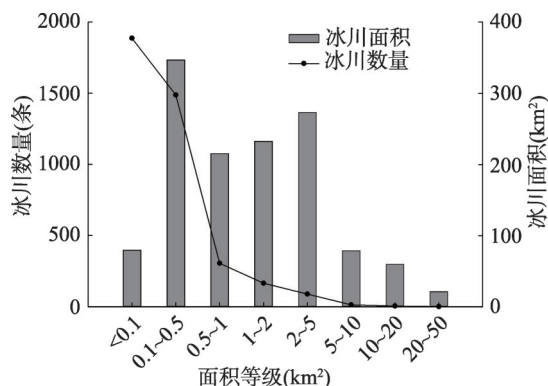


图2 2015-2016年冈底斯山不同面积等级冰川数量与面积

Fig. 2 Number and area of glaciers in different sizes in the Gangdisê Mountains during 2015-2016

表2 2015-2016年冈底斯山各流域冰川资源统计

Tab. 2 Glacier statistics in different basins in the Gangdisê Mountains during 2015-2016

一级流域 (编码)	二级流域 (编码)	三级流域 (编码)	冰川数量		冰川面积		冰储量	
			(条)	(%)	(km ²)	(%)	(km ³)	(%)
恒河(SO)	雅鲁藏布江(SO2)	多雄藏布等(SO26)	1372	34.71	413.65	31.66	16.63	28.65
印度河(SQ)	森格藏布等(SQ1)	森格藏布等(SQ15)	703	17.78	172.36	13.19	7.54	12.99
		朗钦藏布等(SQ2)	227	5.74	40.09	3.07	1.30	2.24
		合计	930	23.52	212.45	16.26	8.84	15.23
青藏高原 内流区(SZ)	色林错流域(SZ2)	色林错(SZ22)	43	1.09	15.46	1.18	0.66	1.14
	扎日南木错流域 (SZ3)	当惹错等(SZ31)	104	2.63	27.28	2.09	0.93	1.60
		扎日南木错(SZ32)	182	4.61	61.48	4.71	2.52	4.34
		塔惹错等(SZ33)	301	7.61	157.64	12.07	6.80	11.71
		昂仁拉错(SZ34)	531	13.43	343.12	26.26	19.47	33.54
	班公湖流域(SZ4)	班公湖(SZ42)	490	12.40	75.37	5.77	2.20	3.79
合计			1651	41.78	680.35	52.08	29.72	51.19

冰川数量较多, 但平均面积仅0.15 km², 是冈底斯山冰川平均面积最小的流域。

4.1.3 冈底斯山地区各市(地区)冰川分布

在行政区划上, 冈底斯山冰川隶属于西藏自治区的拉萨、日喀则、那曲和阿里4个市(地区)。由表3可知, 阿里地区冰川数量、面积和冰储量最多(最大), 其次是日喀则市, 二者冰川数量、面积和冰储量占冈底斯山地区冰川相应总量的97.72%、97.44%及97.47%。拉萨市和那曲地区冰川数量之和仅占冈底斯山冰川总数量的2.28%, 冰川面积及冰储量也仅占相应总量的2.56%和2.52%。拉萨市的冰川数量和面积较少(小), 但平均面积最大, 为0.50 km²。

4.2 1970-2016年来冈底斯山冰川变化

4.2.1 冈底斯山冰川数量、面积及冰储量变化 对冈底斯山第一次冰川编目数据进行检查时, 发现有436条冰川被遗漏, 面积244.97 km², 占冈底斯山冰川总面积的11.34%。修订后, 冈底斯山共有冰川4654条, 面积2160.50 km², 平均面积0.46 km², 冰储量约96.06 km³。冈底斯山第二次冰川编目遗漏的冰川有313条, 面积187.01 km², 占冈底斯山冰川总面积的12.61%。冈底斯山第二次冰川编目数据经修订后, 共有冰川4207条, 面积1483.28 km², 平均面积0.35 km², 冰储量约66.01 km³。

1970-2009年, 冈底斯山冰川数量减少446条(-9.58%), 其中914条冰川消失, 面积106.52 km²; 171条冰川分裂为375条, 面积由142.26 km²减少为80.99 km²。39年间冈底斯山冰川面积减少677.22 km²(-31.35%), 面积变化相对速率为-0.96%/a, 冰储量损失30.05 km³(-0.77 km³/a)。2009-2016年, 冈底斯山冰川数量减少254条(-6.04%), 其中298条冰川消失, 面积11.93 km²; 25条冰川分裂为53条, 面积由8.08 km²减少为4.81 km²。近7年间冈底斯冰川面积减少176.83 km²(-11.92%), 面积变化相对速率为-1.78%/a, 冰储量损失7.85 km³(-1.12 km³/a)。1970-2016年, 冈底斯山冰川数量减少701条(-15.06%), 面积减少854.05 km²(-39.53%), 面积变化相对速率为-1.09%/a; 冰储量损失约37.90 km³, 损失率为-0.82 km³/a和-0.86%/a。显然, 1970-2009年和2009-2016年冈底斯山冰川数

表3 2015-2016年冈底斯山各市(地区)冰川统计

Tab. 3 Glacier statistics in different administrative divisions in the Gangdisê Mountains during 2015-2016

市(地区)	冰川数量		冰川面积		冰储量	
	(条)	(%)	(km ²)	(%)	(km ³)	(%)
拉萨	46	1.17	22.83	1.75	1.13	1.94
日喀则	1603	40.55	607.87	46.53	27.09	46.58
阿里	2260	57.17	665.13	50.91	29.60	50.89
那曲	44	1.11	10.62	0.81	0.34	0.58

量、面积及冰储量均呈减少趋势,且2009-2016年冰川面积退缩速率和冰储量损失程度较1970-2009年呈加快趋势。

统计1970-2016年冈底斯山不同规模冰川的数量与面积变化(图3)发现,冈底斯山除面积 $< 0.1 \text{ km}^2$ 的冰川数量和面积有所增加外,其余各规模的冰川数量和面积均呈减少趋势。其中面积介于 $0.1 \sim 0.5 \text{ km}^2$ 之间的冰川面积减少最多(-255.8 km^2),其次是面积介于 $0.5 \sim 1 \text{ km}^2$ 的冰川(-181.05 km^2),二者面积的减少直接导致面积 $< 0.1 \text{ km}^2$ 冰川数量和面积的增加(812 条 和 11.31 km^2);面积介于 $1 \sim 2 \text{ km}^2$ 、 $2 \sim 5 \text{ km}^2$ 及 $5 \sim 10 \text{ km}^2$ 之间的冰川面积减少介于 $-163.40 \sim -121.53 \text{ km}^2$ 之间,面积介于 $10 \sim 20 \text{ km}^2$ 和 $20 \sim 50 \text{ km}^2$ 之间的冰川数量保持不变,但后者的面积减少最少(-2.06 km^2)。从各规模等级冰川面积变化相对速率来看,冰川规模越小其退缩速率越快。具体而言,面积 $< 0.1 \text{ km}^2$ 的小冰川退缩最快($-3.88\%/a$),其次是面积介于 $0.1 \sim 0.5 \text{ km}^2$ 之间的冰川($-2.03\%/a$)和 $0.5 \sim 1 \text{ km}^2$ 的冰川($-1.28\%/a$),面积介于 $1 \sim 10 \text{ km}^2$ 的冰川面积变化相对速率介于 $-0.88\%/a \sim -0.42\%/a$ 之间, $10 \sim 20 \text{ km}^2$ 和 $> 20 \text{ km}^2$ 的冰川退缩速率基本相当($-0.18\%/a \sim -0.20\%/a$)。

4.2.2 冈底斯山冰川海拔梯度变化

山脉或山峰的绝对海拔高度及平衡线以上的相对高差,是决定山地冰川数量多少及规模大小的主要地形要素^[34]。以 100 m 高差为间隔对冰川覆盖区海拔进行统计,结果表明冈底斯山冰川面积随海拔呈正态分布(图4)。在20世纪70年代,冈底斯山冰川发育在海拔 $5100 \sim 7100 \text{ m}$ 之间,其中 $5600 \sim 6200 \text{ m}$ 之间冰川面积为 1964.17 km^2 ,占总面积的 90.90% ,是冰川分布最为集中的区域。第二次冰川编目和2015-2016年冰川矢量数据结果显示,冈底斯山冰川主要集中分布于 $5700 \sim 6200 \text{ m}$ 之间,面积分别为 1266.66 km^2 (85.40%)和 1120.42 km^2 (85.74%)。1970-2016年冈底斯山冰川退缩主要集中于 $5600 \sim 6100 \text{ m}$ 之间,面积减少 745.48 km^2 ,占总减少量的 87.29% ;海拔 6500 m 以上的区域冰川面积基本没有变化, 5850 m 附近出现冰川面积减少的最大值;冰川平均中值面积海拔由 5895.23 m 上升到 5936.51 m 。

4.2.3 冈底斯山冰川朝向变化 冰川朝向指冰川所面对的方向,通常按北(N)、东北(NE)、东(E)、东南(SE)、南(S)、西南(SW)、西

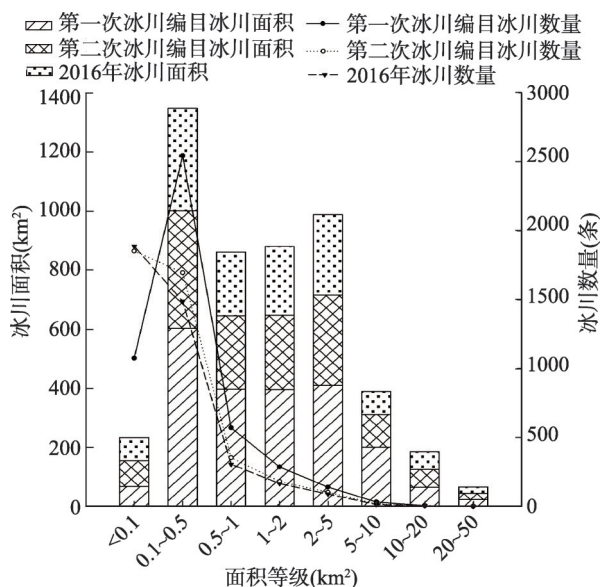


图3 1970-2016年冈底斯山不同规模冰川数量与面积变化
Fig. 3 The changes of the number and area of glaciers in different sizes in the Gangdisê Mountains from 1970 to 2016

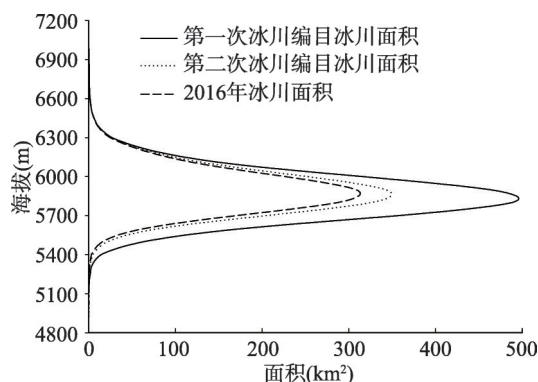


图4 1970-2016年冈底斯山各海拔冰川面积变化
Fig. 4 Altitudinal characteristics of glacier area changes in the Gangdisê Mountains from 1970 to 2016

(W)、和西北(NW) 8个方位进行统计^[28]。由图5可知, 冈底斯山北朝向的冰川面积和数量最大(最多), 其次是东北朝向; 西北和南朝向的冰川数量基本相当, 西北朝向的冰川面积较大; 其他朝向冰川数量和面积均较小。1970-2016年, 除南和东南朝向外, 其他各朝向冰川数量与冰川面积均呈减少趋势, 其中北朝向冰川面积减少最多(-431.03 km^2), 其次是东北朝向(-259.78 km^2), 西南朝向最少(-24.53 km^2)。由于冰川退缩导致支冰川分离, 部分冰川朝向发生改变, 使得南和东南朝向的冰川面积分别增加 103.03 km^2 和 29.69 km^2 。统计各朝向的冰川面积变化百分比发现, 西北朝向的冰川面积变化最快(-70.31%); 其次是北朝向, 南、东北和西南3个朝向的冰川面积变化百分比介于 $-41.61\% \sim -39.84\%$ 之间; 西朝向最慢, 为 -33.53% 。

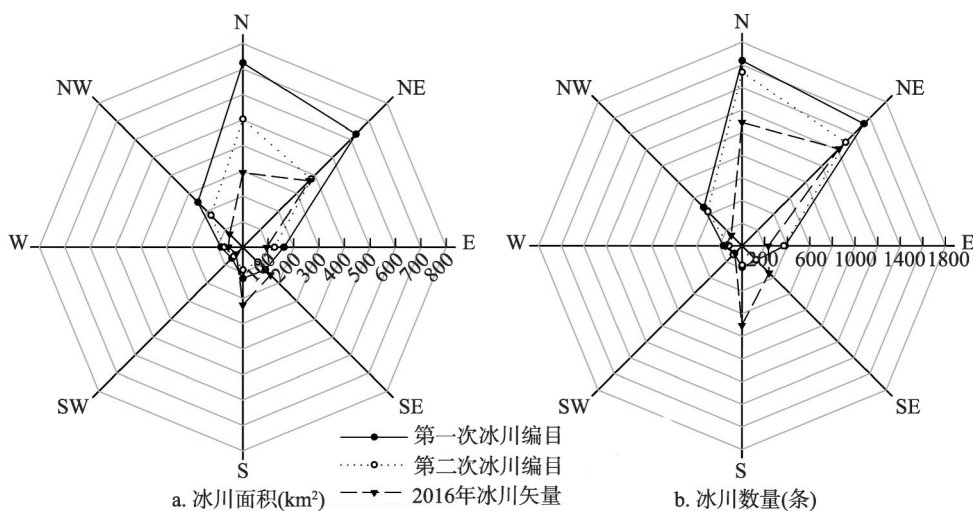


图5 1970-2016年冈底斯山不同朝向冰川数量与面积变化

Fig. 5 Orientational characteristics of glacial changes in the Gangdisê Mountains from 1970 to 2016

4.2.4 冈底斯山冰川变化的区域分异规律 冈底斯山东西狭长, 分为西段(萨嘎—措勤公路以西)、中段(萨嘎—措勤公路至中尼公路)和东段(措勤公路至中尼公路以东)3部分^[26]。为明确冈底斯山冰川变化的区域分异规律, 以经度 1° 为间隔统计冈底斯山1970-2016年的冰川面积, 并计算各区域冰川的面积变化及面积变化相对速率(图6a), 结果表明除最西段($79.5^\circ\text{E} \sim 80.5^\circ\text{E}$)冰川面积有所增加外, 其余各区域的冰川面积均呈减少趋势。其中, $84.5^\circ\text{E} \sim 85.5^\circ\text{E}$ 之间冰川面积退缩最多(-157.77 km^2), 其次是 $82.5^\circ\text{E} \sim 83.5^\circ\text{E}$ 之间的冰川(-149.13 km^2), $88.5^\circ\text{E} \sim 89.5^\circ\text{E}$ 之间最少(-21.84 km^2)。由冰川面积变化相对速率可知, 冈底斯山冰川自西向东呈加快退缩趋势, 其中东段最快($-1.72\%/a$), 中段次之($-1.67\%/a$), 西段最慢($-0.83\%/a$)。由2015-2016年各区域冰川中值面积海拔分布(图6b)可知, 冈底斯山冰川中值面积海拔受山脉走势的影响, 自西向东逐渐降低。冈底斯山西段海拔较高, 且受喜马拉雅山的屏障作用, 降水较少, 冰川主要靠高海拔的低温条件得以存在, 退缩较慢; 东段地势较低, 降水较多, 且冰川面积较小, 对气候变化响应较敏感, 退缩较快。

5 讨论

5.1 冈底斯山冰川变化对气候变化的响应

水(降水)热(气温)及其组合是影响冰川发育的主要地形因子, 降水决定冰川的

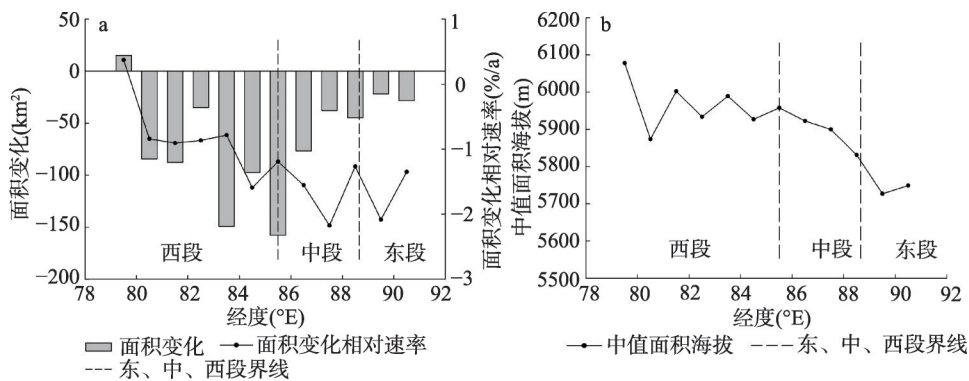


图6 1970-2016年冈底斯山东、中、西段冰川面积变化
Fig. 6 Area changes of glaciers in the Gandisê Mountains from west to east from 1970 to 2016

积累，气温则决定冰川的消融，它们的组合共同决定冰川的性质、发育和演化^[38]。当时时间尺度越长或空间范围越大时，冰川的进退受气温影响越显著；短时间尺度和较小空间尺度的冰川进退主要受降水影响^[39]。为认识冈底斯山冰川对气候变化的响应，利用中国地面降水和气温月值 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 格点数据对冈底斯山的降水和冰川消融期^[40]气温年际变化进行分析（图7），结果表明冈底斯山自1970年以来，6-9月气温持续升高，增温率为 $0.37\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ，这与青藏高原1970年以来气温总体上升趋势相一致^[41]，而同时段年降水量则呈下降趋势，变率为 $-6.74\text{ mm}/10\text{a}$ 。通常情况下，气温在气候变化过程中对冰川的物质平衡起主导作用^[13]，气温每升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 需要降水增加25%才能弥补气温上升所造成的冰川消融^[42]。因此，在气候变暖背景下，消融期气温升高是导致冈底斯山冰川面积退缩的主要原因。

冈底斯山冰川的强烈退缩除受区域气温和降水影响外，也与冰川的平均规模有关。冈底斯山海拔较高，地势陡峭且地形破碎，小冰川大量发育。根据中国第二次冰川编目^[29]，

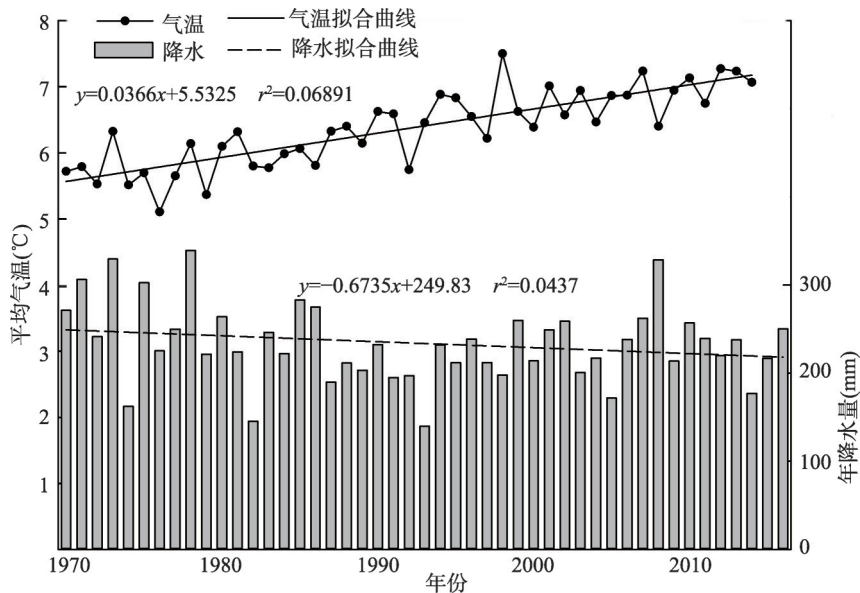


图7 1970-2016年冈底斯山气温和年降水变化

Fig. 7 The change of temperature in ablation period and annual precipitation in the Gandisê Mountains from 1970 to 2016

冈底斯山是中国冰川平均规模最小的山系。冰川规模小, 对气候变化的响应较敏感, 退缩较快。此外, 该地区冰川的快速退缩可能与南亚黑炭排放有关^[43]。

5.2 与西部典型山区冰川变化比较

已有研究表明, 中国西部地区冰川以退缩为主^[22]。由于不同研究选用的数据源和研究时段差异以及不同山系冰川资源拥有量的不同, 冰川面积变化速率(冰川面积之差/时间间隔)很难真实反映冰川退缩速率, 为便于比较, 本文选用Sun等^[44]提出的方法计算冰川面积变化相对速率。与近60年来中国西部各山区冰川变化(表4)相比, 冈底斯山冰川面积变化速率虽不及天山和岗日嘎布, 这不仅与冰川退缩速率有关, 而且在很大程度上受各山系拥有的冰川资源量影响。从各山区的冰川面积变化相对速率来看, 冈底斯山冰川面积减少相对速率(-1.09%/a)不仅快于其南侧的喜马拉雅山, 而且亦快于中国冰川分布纬度最高的阿尔泰山, 即冈底斯山是中国西部地区冰川退缩最为快速的地区。

表4 近60年来中国西部冰川变化比较
Tab. 4 Statistics of glacier changes in western China in recent decades

名称	时间段	面积变化 (km ²)	面积变化 速率(km ² /a)	面积变化相对 速率(%/a)	资料来源
阿尔泰山	1960-2009年	-104.61	-2.13	-0.94	[45]
天山	1959-2010年	-1619.82	-31.76	-0.40	[46]
阿尼玛卿山	1966-2000年	-21.70	-0.64	-0.56	[47]
阿尔金山	1973-2010年	-54.22	-1.47	-0.46	[48]
祁连山	1956-2010年	-417.15	-7.73	-0.43	[44]
唐古拉山中段	1990-2015年	-115.46	-4.62	-1.00	[18]
羌塘高原中西部	1970-2000年	-5.07	-0.17	-0.03	[49]
冈底斯山	1970-2016年	-854.05	-18.57	-1.09	本研究
念青唐古拉山西段	1970-2000年	-52.10	-1.74	-0.19	[16]
岗日嘎布	1980-2015年	-679.50	-19.41	-0.82	[9]
喜马拉雅东段洛扎地区	1980-2007年	-80.77	-2.99	-0.66	[13]
贡嘎山	1974-2010年	-30.20	-0.84	-0.35	[50]

6 结论

(1) 冈底斯山第一次冰川编目数据经修订后, 共有冰川4654条, 面积2160.50 km², 冰储量约96.06 km³; 第二次冰川编目数据经补充后, 共有4207条冰川, 面积1483.28 km², 冰储量约66.01 km³。2015-2016年, 冈底斯山共有冰川3953条, 面积1306.45 km², 冰储量约58.16 km³; 冰川数量以< 0.5 km²的冰川为主, 面积以介于0.1~5 km²之间的冰川为主。

(2) 冈底斯山一级流域中, 青藏高原内流区的冰川数量、冰川面积及冰储量最多(最大), 恒河流域居中, 印度河流域最少; 在三级流域中, 多雄藏布等流域冰川面积和数量最多(最大), 昂仁拉错流域冰川的平均面积和冰储量最大, 色林错流域冰川资源最少, 班公湖流域冰川平均面积最小。

(3) 1970-2016年, 冈底斯山冰川面积共减少854.05 km² (-39.53%); 冰川退缩主要集中于海拔5600~6100 m之间, 海拔6500 m以上的区域冰川面积基本没有变化, 冰川平均中值面积海拔由5895.23 m上升到5936.51 m; 北朝向冰川面积减少最多(-431.03 km²), 西北朝向冰川面积变化最快(-70.31%), 西朝向变化最慢(-33.53%)。

(4) 与中国西部山区的冰川变化相比,冈底斯山是退缩最为强烈的地区 ($-1.09\%/a$),且近年来退缩幅度呈增加趋势。冈底斯山冰川退缩速率自西向东呈加快趋势,东段冰川面积变化相对速率高达 $-1.72\%/a$,中段次之 ($-1.67\%/a$),西段仅为 $-0.83\%/a$ 。在气候变暖背景下,消融期气温升高是导致冈底斯山冰川面积退缩的最主要原因。

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] Shi Yafeng. Estimation of the water resources affected by climatic warming and glacier shrinkage before 2050 in west China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2001, 23(4): 333-341. [施雅风. 2050年前气候变暖冰川萎缩对水资源影响情景预估. 冰川冻土, 2001, 23(4): 333-341.]
- [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] Oerlemans J. Quantifying global warming from the retreat of glaciers. *Science*, 1994, 264(5156): 243-244.
- [5] Immerzeel W W, Van Beek L P, Bierkens M F. Climate change will affect the Asian water towers. *Science*, 2010, 328(5984): 1382-1385.
- [6] Church J A, White N J, Konikow L F, et al. Revisiting the Earth's sea-level and energy budgets from 1961 to 2008. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(15): 4066-4066.
- [7] Benn D I, Bolch T, Hands K, et al. Response of debris-covered glaciers in the Mount Everest region to recent warming, and implications for outburst flood hazards. *Earth-Science Reviews*, 2012, 114(1): 156-174.
- [8] Wang W, Xiang Y, Gao Y, et al. Rapid expansion of glacial lakes caused by climate and glacier retreat in the Central Himalayas. *Hydrological Processes*, 2015, 29(6): 859-874.
- [9] Wu K P, Liu S Y, Bao W J, et al. Recent glacier mass balance and area changes in the Kangri Karpo Mountains from DEMs and glacier inventories. *Cryosphere*, 2018, 12(1): 103-121.
- [10] Qiu J. China: The third pole. *Nature*, 2008, 454(7203): 393-396.
- [11] 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.]
- [12] Pu Jianchen, Yao Tandong, Wang Ninglian, et al. Fluctuations of the glaciers on the Tibetan Plateau during the Past Century. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(5): 517-522. [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.]
- [13] Li Zhiguo, Yao Tandong, Ye Qinghua, et al. Monitoring glacial variations based on remote sensing in the Luozha region, eastern Himalayas, 1980-2007. *Geographical Research*, 2011, 30(5): 939-953. [李治国, 姚檀栋, 叶庆华, 等. 1980-2007年喜马拉雅东段洛扎地区冰川变化遥感监测. 地理研究, 2011, 30(5): 939-953.]
- [14] Ye Qinghua, Chen Feng, Yao Tandong, et al. Tuptu of glacier variations in the Mt. Naimona Nyi region, western Himalayas, in the last three decades. *Journal of Remote Sensing*, 2007, 11(4): 511-520. [叶庆华, 陈锋, 姚檀栋, 等. 近30年来喜马拉雅山脉西段纳木那尼峰地区冰川变化的遥感监测研究. 遥感学报, 2007, 11(4): 511-520.]
- [15] Liu Shiyin, Shanguan Donghui, Ding Yongjian, et al. Glacier variations since the early 20th century in the Gangrigabu Range, southeast Tibetan Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, 27(1): 55-63. [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的冰川变化. 冰川冻土, 2005, 27(1): 55-63.]
- [16] Shanguan Donghui, Liu Shiyin, Ding Liangfu, et al. Variation of glaciers in the western Nyainqentanglha range of Tibetan Plateau during 1970-2000. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(2): 204-210. [上官冬辉, 刘时银, 丁良福, 等. 1970-2000年念青唐古拉山脉西段冰川变化. 冰川冻土, 2008, 30(2): 204-210.]
- [17] Kang Shichang, Chen Feng, Ye Qinghua, et al. Glacier retreating dramatically on the Mt. Nyainqentanglha during the last 40 years. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(6): 863-873. [康世昌, 陈锋, 叶庆华, 等. 1970-2007年西藏念青唐古拉峰南、北坡冰川显著退缩. 冰川冻土, 2007, 29(6): 863-873.]
- [18] Wang Congqiang, Yang Taibao, Ji Qin, et al. Remote sensing monitoring of glacier changes in the middle region of Tanggula Mountain. *Arid Land Geography (Chinese Version)*, 2016, 39(3): 504-512. [王聪强, 杨太保, 冀琴, 等. 1990-2015年唐古拉山中段冰川变化遥感监测. 干旱区地理(汉文版), 2016, 39(3): 504-512.]
- [19] Gardelle J, Berthier E, Arnaud Y. Slight mass gain of Karakooram glaciers in the early twenty-first century. *Nature Geoscience*, 2012, 5(5): 322-325.
- [20] Kääb A, Treichler D, Nuth C, et al. Brief communication: Contending estimates of 2003-2008 glacier mass balance over the Pamir-Karakoram-Himalaya. *Cryosphere*, 2015, 7(4): 1263-1286.

- [21] Gardelle J, Berthier E, Arnaud Y, et al. Region-wide glacier mass balances over the Pamir-Karakoram-Himalaya during 1999-2011. *The Cryosphere*, 2013, 9(2): 557-564.
- [22] 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.]
- [23] Yao T, Thompson L, Yang W, et al. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings. *Nature Climate Change*, 2012, 2(9): 663-667.
- [24] Xu Qiang, Ding Lin. Paleoelevation research on Gangdisê Mountains and Tibetan Plateau. *China Science Foundation*, 2015(1): 54-59. [许强, 丁林. 冈底斯山的隆升过程与青藏高原古高度研究. 中国科学基金, 2015(1): 54-59.]
- [25] Yang Qinye, Zheng Du. On the significance of the boundary line-The Gandisi-Nyainqentanglra Range. *Geographical Research*, 1985, 4(2): 36-44. [杨勤业, 郑度. 冈底斯山—念青唐古拉山线自然地理意义的探讨. 地理研究, 1985, 4(2): 36-44.]
- [26] Li Jijun, Zheng Benxing, Yang Xijin, et al. *Tibet Glacier*. Beijing: Science Press, 1986. [李吉均, 郑本兴, 杨锡金, 等. 西藏冰川. 北京: 科学出版社, 1986.]
- [27] 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.]
- [28] 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.]
- [29] 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.]
- [30] Guo W, Liu S, Xu J, et al. The second Chinese glacier inventory: Data, methods and results. *Journal of Glaciology*, 2015, 61(226): 357-372.
- [31] Hall D K, Bayr K J, Schnöer W, et al. Consideration of the errors inherent in mapping historical glacier positions in Austria from ground and space (1893-2001). *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86(4): 566-577.
- [32] Williams R S, Hall D K, Sigurðsson O. Comparison of satellite-derived with ground-based measurements of the fluctuations of the margins of Vatnajökull, Iceland, 1973-92. *Annals of Glaciology*, 1997, 24(3): 72-80.
- [33] Shangguan Donghui. Glacier changes in Tarim Interior River Basin using 3S [D]. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute. Lanzhou: Chinese Academy of Science, 2007. [上官冬辉. 基于3S的塔里木河流域冰川应用研究[D]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2007.]
- [34] Gärtner-Roer I, Naegeli K, Huss M, et al. A database of worldwide glacier thickness observations. *Global and Planetary Change*, 2014, 122: 330-344.
- [35] 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.
- [36] Grinsted A. An estimate of global glacier volume. *Cryosphere*, 2013, 7: 141-151.
- [37] 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.
- [38] 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.]
- [39] 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.]
- [40] Beedle M J, Menounos B, Wheate R, et al. Glacier change in the Cariboo Mountains, British Columbia, Canada (1952-2005). *Cryosphere*, 2014, 9(1): 65-80.
- [41] Liu W, Guo Q H, Wang Y X. Temporal-spatial climate change in the last 35 years in Tibet and its geo-environmental consequences. *Environmental Geology*, 2008, 54(8): 1747-1754.
- [42] Oerlemans J. Extracting a climate signal from 169 glacier records. *Science*, 2005, 308(5722): 675-677.
- [43] Xu B Q, Cao J J, Hansen J, et al. Black soot and the survival of Tibetan glaciers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2009, 106(52): 22114-22118.
- [44] Sun M P, Liu S Y, Yao X J, et al. Glacier changes in the Qilian Mountains in the past half century: Based on the revised first and second Chinese glacier inventory. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, 28(2): 206-220.
- [45] 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.]

- [46] Xing Wucheng, Li Zhongqin, Zhang Hui, et al. Spatial-temporal variation of glacier resources in Tianshan Mountains since. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(9): 1594-1605. [邢武成, 李忠勤, 张惠, 等. 1959年以来中国天山冰川资源时空变化. *地理学报*, 2017, 72(9): 1594-1605.]
- [47] Zhu Heyong, Yang Taibao, Tian Hongzhen. Glacier variation in the Altun mountains from 1973 to 2010. *Geographical Research*, 2013, 32(8): 1430-1438. [祝合勇, 杨太保, 田洪阵. 1973-2010年阿尔金山冰川变化. *地理研究*, 2013, 32(8): 1430-1438.]
- [48] Liu Shiyin, Lu Anxin, Ding Yongjian, et al. Glacier fluctuations and the inferred climate changes in the Anymaqn Mountains in the source area of the Yellow River. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(6): 701-707. [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.]
- [49] Li Deping, Wang Liping, Liu Shiyin, et al. Tupu analysis of the spatio-temporal glacier variations in the central and western Qangtang Plateau since the Little Ice Age. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(1): 40-47. [李德平, 王利平, 刘时银, 等. 小冰期以来羌塘高原中西部冰川变化图谱分析. *冰川冻土*, 2009, 31(1): 40-47.]
- [50] Li Xia, Yang Taibao, Tian Hongzhen, et al. Response of glacier in Gongga Mountain to climate change during the last 40 years. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, 20(6): 125-129. [李霞, 杨太保, 田洪阵, 等. 贡嘎山近40年冰川对气候变化的响应. *水土保持研究*, 2013, 20(6): 125-129.]

Glacier changes in the Gangdisê Mountains from 1970 to 2016

LIU Juan¹, YAO Xiaojun¹, LIU Shiyin^{2,3}, GUO Wanqin², XU Junli⁴

(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; 3. Institute of International Rivers and Eco-Security, Yunnan University, Kunming

650091, China; 4. Yancheng Teachers University, Yancheng 224051, Jiangsu, China)

Abstract: Based on the revised First and Second Chinese Glacier Inventory and Landsat OLI remote sensing images during 2015-2016, we analyzed the spatial-temporal variation characteristics of glaciers in the Gangdisê Mountains during 1970-2016. The results of this study provide a scientific basis for the rational use of water resources in this region. The results showed that there were 3953 glaciers with a total area of 1306.45 km² and ice volume of ~58.16 km³ in the Gangdisê Mountains during 2015-2016. The glaciers in sizes of 0.1-5 km² and < 0.5 km² had the largest area and the greatest number of glaciers in the Gangdisê Mountains, respectively. In the past five decades, the area of glaciers decreased by 854.05 km² (-1.09%/a), accounting for 39.53% of the total area of glaciers in the region in 1970. The increase of temperature in the ablation period was the most important cause of glacier retreat. Compared to other mountains in western China, the Gangdisê Mountains was the region with the strongest glacier retreat and had an accelerating tendency in recent years. The decrease of glacier area was mainly concentrated at elevations of 5600-6100 m a.s.l. and there was no change in elevation above 6500 m a.s.l. in the Gangdisê Mountains. Except for the south and southeast orientations, the number and area of glaciers were decreasing in all the orientations. Specifically, the north orientation suffered the largest area loss of glaciers and the northwest orientation witnessed the fastest retreat of glacier area. A significant feature of spatial variation showed that the rate of glacier retreat was faster from west to east in the Gangdisê Mountains. The relative change of glacier rate in the eastern section was high at -1.72%/a, followed by the middle section (-1.67%/a), and that in the western section was only -0.83%/a.

Keywords: glacier change; glacier inventory; climate change; Gangdisê Mountains