

分类号_____

密级_____

UDC _____

编号 10736

西北师范大学

硕士学位论文

基于 Landsat 和 ICESat 数据的中国天山
冰川资源时空变化研究

研究生姓名: 邢武成

指导教师姓名、职称: 李忠勤 教授

一级学科、专业名称: 地理学 地图学与地理信息系统

研究方向: 环境遥感与 GIS 应用

二〇一八年四月

硕士学位论文
M.D.Thesis

基于 Landsat 和 ICESat 数据的中国天山 冰川资源时空变化

Based on Landsat and ICESat data spatial-temporal
variation of glacier resources in Chinese Tianshan
Mountains

邢武成

Xing Wucheng

西 北 师 范 大 学
Northwest Normal University

二〇一八年四月

郑 重 声 明

本人的学位论文是在导师指导下独立撰写并完成的，学位论文没有剽窃、抄袭、造假等违反学术道德、学术规范和侵权行为，否则，本人愿意承担由此而产生的法律责任和法律后果，特此郑重声明。

学位论文作者（签名）：

年 月 日

学位论文使用授权书

本论文作者完全了解学校关于保存、使用学位论文的管理办法及规定，即学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅，接受社会监督。本人授权西北师范大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入学校有关数据库和收录到《中国博士/硕士学位论文全文数据库》进行信息服务，也可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存或汇编本学位论文。

本论文提交☐当年/☐一年/☐两年/☐三年以后，同意发布。

若不选填则视为一年以后同意发布。

注：保密学位论文，在解密后适用于本授权书。

作者签名：

导师签名：

年 月 日

西北师范大学研究生学位论文作者信息

论文题目	基于 Landsat 和 ICESat 数据的中国天山冰川资源时空变化研究		
姓 名	邢武成	学 号	2015211693
专业名称	地图学与地理信息系统	答辩日期	2018/5
联系电话	15101240229	E-mail	gsauxing@126.com
通信地址(邮编): 甘肃省兰州市安宁区西北师范大学新校区研究生院 (730070)			
备注:			

目 录

摘 要	I
Abstract.....	III
1 绪论	1
1.1 选题背景与意义.....	1
1.2 国内外研究进展.....	3
1.2.1 冰川变化.....	3
1.3 研究内容.....	5
1.4 技术路线.....	6
2 研究区概况与资料方法.....	7
2.1 研究区概况.....	7
2.1.1 自然地理概况.....	7
2.1.2 气候状况.....	7
2.1.3 冰川状况.....	8
2.2 数据资料与方法.....	9
2.2.1 第二次冰川编目	9
2.2.2 Landsat MSS/TM/ETM+/OLI	9
2.2.3 SRTM DEM	10
2.2.4 ICESat-GLAS	11
2.2.5 气象数据.....	11
2.3 研究方法.....	11
2.3.1 冰川边界提取.....	11
2.3.2 冰川面积变化.....	12
2.3.3 ICESat-GLAS 数据处理	13
2.2.4 不确定性评估.....	14
3 1989-2017 年中国天山冰川资源分布及变化	15
3.1 中国东天山冰川资源分布及变化.....	15
3.1.1 东天山冰川资源分布	15
3.1.2 东天山冰川面积变化.....	18
3.1.3 东天山冰川变化的地形作用	19
3.2 北天山冰川分布及变化.....	21
3.2.1 北天山西段冰川分布	21
3.2.2 北天山西段冰川面积变化.....	23
3.3 南天山冰川分布及变化.....	25
3.3.1 南天山冰川分布	25
3.3.2 南天山冰川面积变化.....	27
3.4 中天山冰川分布及变化.....	30
3.4.1 中天山冰川分布现状.....	30
3.4.2 中天山冰川变化.....	31
3.5 典型山地冰川变化对比.....	33
3.6 小结.....	34

4 中国天山冰川高程变化	35
4.1 东天山冰川高程变化.....	35
4.1.1 冰面高程变化计算.....	35
4.2 东天山冰川高程变化.....	36
4.2.1 研究结果.....	36
4.3 北天山西段冰川高程变化.....	37
4.3.1 研究结果.....	38
4.4 南天山冰川冰量变化.....	39
4.4.1 研究结果.....	40
4.5 小结.....	41
5 中国天山冰川变化特征及原因	42
5.1 天山冰川变化特征.....	42
5.2 冰川变化原因.....	42
6 结论与展望	46
6.1 主要结论.....	46
6.2 不足与展望.....	47
参考文献	48
附 录	V
致 谢	VI

摘 要

根据 IPCC 第六次评估报告,全球增暖 1.5℃,随着全球气候的变暖引发的资源环境问题日益严重。冰川作为“固体水库”对气候变化最为敏感,而且在水资源利用、海平面上升、冰川灾害防治等方面有重要作用。天山位于新疆中部,是新疆众多河流的发源地。因此加强天山地区冰川变化监测研究,对新疆和天山地区的水资源的合理利用和社会经济的可持续发展具有重要意义。

本文利用 Landsat TM/ETM 遥感影像,先后运用比值法与人工修订,提取了两期中国天山地区的冰川编目数据,并利用该数据分析中国天山近 28 年来冰川资源变化特征。其次利用 2003-2009 年 ICESat 数据和 SRTM DEM 数据分析了中国天山冰川近 10 年的高程变化特征。主要得到以下结论:

(1) 在过去 28 年中中国天山冰川,总体上处于退缩状态,冰川面积减少 879.73 km²,退缩速率达到-0.52% a⁻¹。在北天山、南天山、东天山和中天山四个区域中冰川面积年均变化速率具有一定的差异性,其中东天山冰川面积变化最快,冰川面积减少了 55.66 km²,退缩速率达到-0.64% a⁻¹;其次是中天山,冰川面积减少了 66.58 km²,退缩速率为-0.55% a⁻¹;北天山冰川面积减少了 316.03 km²,年均退缩速率为-0.52% a⁻¹;南天山冰川面积变化幅度最慢,面积减少了 441.46 km²,退缩速率仅为-0.41% a⁻¹。在不同海拔高度上冰川面积变化呈正态分布;冰川面积的变化与冰川朝向有关,其中北朝向冰川变化最大,南和东南朝向冰川面积变化最小。

(2) 在不同区域的不同流域,冰川面积变化也具有较大差异。通过对比不同时期的冰川编目数据,天山冰川呈现持续退缩的趋势。其中天山东段从 1989-2000 年冰川面积年减少率为 0.62% a⁻¹,2000-2009 年冰川面积年减少率为 0.71% a⁻¹,2009-2017 年冰川面积年减少率为 0.67% a⁻¹。天山南部地区从 1989-2009 年冰川面积年减少率为 0.41% a⁻¹,2009-2017 年冰川面积年减少率为 0.40% a⁻¹。

(3) 对比中国西部典型山地冰川变化情况发现,中国天山山脉冰川面积年均退缩速率为-5.23% a⁻¹,是 14 个山系中退缩较为强烈的山脉之一,仅次于阿尔泰山。而祁连山冰川面积的退缩速率为-0.47% a⁻¹,东帕米尔、青藏高原内陆流域和贡嘎山冰川面积退缩速率较为接近介于-0.25% a⁻¹--0.28% a⁻¹之间,西昆仑冰川面积退缩速率最小为-0.09% a⁻¹

(4) 天山 2003-2009 年冰川表面高程在不同研究时期内均出现了明显下降, 平均下降了 3.99 m。天山东段冰川表面高程在 2003-2009 年间平均下降了 5.02 m, 天山北部冰川表面高程在 2003-2009 年间平均下降了 4.16 m, 天山南部地区冰川表面高程在 2003-2009 年间平均下降了 2.8 m。在不同高度海拔上, 天山冰川高程变化有所差异, 可能的原因是表碛的存在, 对冰川消融有加速或抑制作用。

(5) 气象资料分析表明, 近 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。

关键词: 天山冰川; 遥感; 冰川变化; 气候变化

Abstract

According to the IPCC Sixth Assessment Report, the global warming is 1.5 °C, and the resource and environmental problems caused by the global climate warming are increasingly serious. As a "solid reservoir", glaciers are the most sensitive to climate change, and play an important role in the use of water resources, rising sea levels, and prevention of glacial disasters. Tianshan is located in the middle of Xinjiang and is the birthplace of many rivers in Xinjiang. Therefore, strengthening the monitoring of glacial changes in the Tianshan area is of great significance to the rational use of water resources in Xinjiang and the Tianshan area and the sustainable development of the social economy.

This paper uses Landsat TM/ETM remote sensing images, successively uses ratio method and artificial revision to extract the glacial catalogue data of two phases of China's Tianshan area, and uses this data to analyze the characteristics of glacial resources in Tianshan area in the past 28 years. Second, using the ICESat data of 2003-2009 and SRTM DEM data, the characteristics of elevation changes in the Tianshan area in the past 10 years were analyzed. The main conclusions are as follows:

(1) In the past 28 years, the glaciers of the Tianshan Mountains in China have generally retreated. The area of glaciers has decreased by 879.73 km², and the retreat rate has reached -0.52% a⁻¹. The average annual rate of change of glaciers in the four regions of the North Tianshan, South Tianshan, East Tianshan and Central Tianshan Mountains is somewhat different. Among them, the Glacier area of the East Tianshan Mountain has the fastest change, the glacial area has decreased by 55.66 km², and the retreat rate has reached -0.64% a⁻¹; followed by Zhongtianshan, the glacier area was reduced by 66.58 km² and the retreat rate was -0.55% a⁻¹; the northern Tianshan glacier area was reduced by 316.03 km², and the average annual retreat rate was -0.52% a⁻¹; the South Tianshan glacier The area of change was the slowest, the area decreased by 441.46 km², and the withdrawal rate was only -0.41% a⁻¹. At different altitudes, the area of glaciers is normally distributed; the area of glaciers is related to the orientation of glaciers, with the glaciers in the north facing the greatest changes,

and the glaciers in the south and southeast facing the smallest change.

(2) In different watersheds in different regions, the change in glacier area also has large differences. By comparing the glacial inventory data of different periods, the Tianshan glacier has continued to shrink. The annual reduction rate of the glacier area in the eastern part of the Tianshan Mountains from 1989 to 2000 was $0.62\% \text{ a}^{-1}$, the annual reduction rate of the glacier area from 2000 to 2009 was $0.71\% \text{ a}^{-1}$, and the annual reduction rate of the glacier area from 2009 to 2017 was $0.67\% \text{ a}^{-1}$. The annual reduction rate of glacier area in the southern part of Tianshan Mountain from 1989 to 2009 was $0.41\% \text{ a}^{-1}$, and the annual decrease rate of glacier area in 2009-2017 was $0.40\% \text{ a}^{-1}$.

(3) Comparing the changes of glaciers in typical mountainous regions in western China, it is found that the average annual retreat rate of glaciers in the Tianshan Mountains in China is $-5.23\% \text{ a}^{-1}$, which is one of the 14 mountainous regions that retreat more strongly than the Altai Mountains. The retreat rate of the glacier area in Qilianshan is $-0.47\% \text{ a}^{-1}$. The retreat rates of the eastern Pamir, the inland basin of the Qinghai-Tibet Plateau, and the Gongga Mountain glaciers are close to $-0.25\% \text{ a}^{-1}$ - $-0.28\% \text{ a}^{-1}$. The minimum retreat rate of the West Kunlun Glacier area was $-0.09\% \text{ a}^{-1}$.

(4) The glacial surface elevation of Tianshan Mountain in 2003-2009 has significantly decreased in different research periods, with an average decrease of 3.99 m. The elevation of the glacier surface in the eastern part of the Tianshan Mountains decreased by an average of 5.02 m between 2003 and 2009. The elevation of the glacier surface in the northern part of the Tianshan Mountains decreased by an average of 4.16 m between 2003 and 2009. The average elevation of the glacier surface in the southern part of the Tianshan Mountains fell by 2.8 m between 2003 and 2009. At different altitudes, there are differences in elevation changes of Tianshan Glacier, possibly due to the presence of surface ridges, which accelerates or inhibits glacial melting.

(5) The analysis of meteorological data shows that in the past 50 years, the temperature in summer in the Tianshan Mountains has increased significantly and the precipitation has increased significantly. If we do not consider the lag of the glacial

response, it is presumed that the ablation caused by the significant increase in summer temperature is greater than the accumulation caused by precipitation during the year is the main reason for the retreat of the Tianshan glacier.

Keywords: Tianshan Glacier; remote sensing; glacial change; climate change.

1 绪论

1.1 选题背景与意义

冰川是指在寒冷地区，经过多年降雪积累、变质作用形成的自然冰体，它以冰为主体，并包含一定数量的空气、液体物质和岩屑。在热力和动力的作用下，冰川从降雪积累、重力作用下的运动，到逐渐融化为液态水的过程中，热量和水分不断地发生变化，冰川与大气圈、岩石圈的相互作用，构成了一个复杂的冰川系统^[1,2]。在一定低温条件下，各种自然冰体由固态水组成，包括有地下冰掺杂的冻土在内，在地球上有很大范围的分布，形成一个特殊圈层，称为冰冻圈（Cryosphere）^[1]。冰冻圈主要指瞬时的、短期的、季节的和多年的（或永久的）冰体^[3]，包括冰川（含冰帽）、冰盖、冻土、积雪、海冰和冰架、河（江、湖）冰，大气圈内的雪花、冰晶、冰雹、霰等固态水体也是冰冻圈的组成部分^[4]。它和大气圈、水圈、岩石圈及生物圈共同组成地球表层和气候系统的五个圈层，他们相互作用，构成了全球变化的复杂系统^[1]。作为地球气候系统五大圈层之一，冰冻圈具有表面高反射率、巨大的冷储和相变潜热、温室气体的源汇和地球气候环境的灵敏指示器，以及巨大的淡水资源储存量等特点^[4]。冰冻圈的物质和能量平衡过程及其变化对地区、区域以及全球气候系统变化有重要的影响，并对陆地水循环、海洋环流和海平面变化有重要作用。近百年来，气候变暖显著，升温趋势加剧^[5,6]，冰冻圈各要素处于持续退缩状态^[6,7]，并威胁水资源安全、引起海平面上升、导致突发性洪水灾害等一系列重大环境问题^[8-11]。冰冻圈动态变化过程和趋势、与其他圈层的相互作用和影响，已成为气候系统变化科学和可持续发展研究的领域之一，受到国际科学界广泛关注和重视。

作为冰冻圈系统的重要组成部分，冰川与区域气候、自然环境演化、海平面变化、地球表面过程等有着密切联系^[2,6,12-15]。全球范围的冰川/冰盖总面积为 $14.51 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，冰储量为 $27.6 \times 10^6 \text{ km}^3$ ，约占地球陆地面积的 10%，总储水量占全球淡水资源的 75%^[6]。位于格陵兰和南极之外的山地冰川，其冰储量占全球总冰储量的比率不足 1%，但是在全球气候变化的影响下，冰量损失成为海平面上升的主要贡献者，1993-2010 年间达到了 24%，高于格陵兰冰盖（10%）和南极冰盖（7%）^[6]。在未来气候持续变暖的背景下，山地冰川的物质变化对海平面上升的贡献量将进一步增加^[6,8,13,14,16,17]。另一方面，山地冰川是重要的淡水资源，其消融积累变化对调节河川径流、土地利用、水资源调配、灌溉、社会经济发展等产生重要的影响

冰川作为气候变化的产物，对气候变化具有指示作用，也是气候变化良好的代用指标。冰川退缩留下冰碛石等遗迹，有利于我们重建过去冰川规模及气候状况。新疆地处中国西北内陆干旱区，由于特殊的“三山夹两盆”地形，使阿尔泰山、天山、昆仑山和喀喇昆仑山发育的冰川为准噶尔盆地和塔里木盆地提供了不可缺少的水源。而横亘新疆的天山山脉以其高大的山体拦截了大量的水汽，成为干旱区中的湿岛，成为众多内陆河流的发源地。近百年来全球正经历着以升温为主要特征的显著变化，温度升高及降水变化造成冰川在近 50 年来大幅退缩^[20]。

据编目数据，中国现有 48571 条冰川，冰川面积为 $5.18 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，占全球冰川总面积的 6.95%，是世界上冰川资源较为丰富的国家之一^[21]。联合国政府间气候变化专门委员会第五次评估报告指出全球地表温度升高 0.85°C ^[22]，增温幅度明显，全球变暖幅度自 1990 年以来明显加速。中国西部近 120 年来气温上升了约 1.2°C ，是全球平均升温幅度的两倍，且最近 20a 变暖最明显^[23]。已有研究表明，近 54 年来中国西北地区气温呈波动上升的态势，气温倾向率为 $0.42^\circ\text{C}/10\text{a}$ ，上升趋势明显^[24]。而新疆的气温在 1960-2013 年升高 1.2°C ，气温倾向率为 $0.32^\circ\text{C}/10\text{a}$ ，高于全国的 $0.22^\circ\text{C}/10\text{a}$ ^[25]。在全球变暖的背景下，除南极冰盖以外全球冰川呈现不同的退缩幅度，退缩趋势明显。冰川的加速退缩在中国也是十分显著^[26-28]，特别是在中国西北部，主要表现为冰川面积的缩小和冰川末端的后退，使得冰川融水径流剧增加，粒雪线的升高，而且使得许多小冰川已消亡或接近消亡的边缘。天山由于分布着数量众多的小冰川，对升温响应比较敏感，对水资源影响比较重大。

冰川对区域气候升温的响应主要表现在冰川厚度的减薄、冰川面积的缩小和冰川末端的退缩。冰川退缩以消耗固态冰体为代价，因而从长远看，冰川快速消融将会危及以冰川融水为主要补给特征的干旱区水资源安全以及山麓绿洲的存续。天山地处中亚内陆干旱区，是我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^[29]。随着全球气候的变暖的加剧，特别是 20 世纪 80 年代以来，我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^[30-33]。因此，本文选择天山地区为研究对象，对近 28 年来该区域的冰川变化情况进行分析并对其变化原因展开探讨，为进一步认识天山地区的冰川变化情况及

其对水资源的影响提供基础数据。

1.2 国内外研究进展

根据世界冰川编目(Randolph Glacier Inventory, 简称 RGI)第五版数据^[34], 全球共发育山地冰川 212136 条, 总面积达 745795 km², 单条冰川平均面积为 3.52 km², 冰川主要发育于亚洲中部、西南部和阿拉斯加及格陵兰岛四个区域, 但南极大陆与次南极群岛、格陵兰岛及加拿大北极北部地区冰川面积占比大。冰川面积最大的区域在南极大陆与次南极群岛、格陵兰岛, 面积均在 100000 km² 以上。亚洲中部地区是冰川分布数量最多的区域, 占全球冰川总条数的 25.7%, 但是冰川面积较小。中国现存冰川 42370 条, 面积为 43012.58 km², 单条冰川平均面积约为 1 km²。在各山系中昆仑山冰川数量最多(8922 条), 面积最大(11524.13 km²), 其数量和面积分别占全国冰川总条数与总面积的 18.4%和 22.3%。其次是天山、念青唐古拉山、喜马拉雅山和喀喇昆仑山。这 5 座山系共分布冰川 35104 条, 面积达 41072.75 km², 约占中国冰川总条数与总面积的 3/4 和 4/5^[21]。

1.2.1 冰川变化

冰川变化通常包括: 冰川末端、面积、厚度和体积的变化。冰川末端一般是指冰川边缘最低位置的变化, 对于山谷冰川而言一般是指冰舌末端的变化, 它是反映冰川变化的重要监测指标之一。冰川末端的变化通过: (1) 冰川末端位置的直接测量。(2) 利用遥感的方法测量冰川的长度。(3) 依据文献中标注日期的数据, 进行冰川末端变化的反推和重建^[35]。1894 年成立国际冰川监测委员会, 20 世纪 80 年代改为世界冰川监测服务中心, 该中心目前共有 42000 条冰川的信息。Zemp M 等^[35]根据全球冰川末端变化数据绘制了 19 个区山地冰川 1535-2013 年冰川末端变化情况。国内监测时间最长的冰川是天山乌源 1 号冰川, 根据中科院天山冰川站观测资料, 1980 年以来, 天山乌源 1 号冰川末端退缩速率总体呈加快趋势。在 1993 年分裂为东、西两支。监测结果表明, 在冰川分裂之前的 1980-1993 年, 冰川末端平均退缩速率为 3.6 m a⁻¹; 1994-2016 年, 东、西支平均退缩速率分别为 4.4 m a⁻¹ 和 5.8 m a⁻¹。近年来不同学者分别对天山^[36], 祁连山^[37]、阿尔泰山^[38]、昆仑山^[39]、横断山^[40]等山地冰川的末端做了大量研究, 其研究结果表明该山地冰川的末端均出现不同程度的退缩, 其退缩幅度空间差异性显著。冰川面积的变化: 是反映冰川变化的另一重要监测指标之一, 也是山地冰川对区

域气候变化的综合和滞后的反应。而冰川面积变化的数据主要来自遥感卫星、航空和地面上的观测，重复这些测量可得到其变化信息。从 IPCC 第五次报告中有关全球 16 个冰川区域冰川面积变化资料来看^[34]，全球统计范围内的冰川面积总体上处于退缩状态，但各区域间存在差异。大体上从赤道到两极退缩幅度与速率呈减少趋势。中国近 50 年冰川面积也呈现退缩趋势，退缩速率为 18%，但各区域退缩速度均不相同，退缩速率最快的是阿尔泰山为 35.7%，最慢的是羌塘高原为 4.1%^[21]。冰川厚度的变化：也是反映冰川变化的重要指标之一，厚度的变化主要通过实地测量、地形图和遥感数据获得。近年来众多学者通过两期高分辨率遥感影像^[41-42]和 ICESat、SAR 等^[43-44]遥感数据来计算冰川表面高程的变化。

冰川体积变化：是冰川变化所有指标中获取最难的指标之一，目前对冰川体积的测量一般通过探地雷达来获得冰川底部的地形从而计算冰川体积，或者是通过面积与厚度的经验公式来计算冰川体积^[45]。

作为“固体水库”的冰川，首先自身能以固态的形式储存一定数量的水资源，其次冰川融水是河川径流的重要来源之一，且对径流的季节、年际或年代变化具有调节作用。因此流域冰川变化对水资源的影响主要体现在两个方面：一是冰川储量盈亏引起的净冰川资源变化；二是冰川进退引发的末端产流面积增减，进而对冰川径流变化产生影响^[46] 特别 20 世纪 80 年代以来，亚洲山地冰川加速消融退缩，造成水资源和水循环深刻变化，引起政府和众多学者的广泛关注^[47-50]。

天山地区冰川变化，D Farinotti 等^[51]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 1961-2012 年冰川面积和物质亏损比例分别为 $18 \pm 6\%$ 和 $27 \pm 15\%$ 。王圣杰等^[52]利用文献数据，运用面积权重法对中国天山冰川面积变化进行了估算，结果表明近 50 年来中国天山冰川面积退缩了 11.5%。近年来众多学者利用地形图和遥感数据对天山^[27]，博格达地区^[53]，玛纳斯河流域和开都河流域^[54]，伊犁河流域^[55]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^[56]，奎屯哈希勒根 51 号^[57]，哈密庙儿沟冰帽^[58]，四工河四号^[59]，托木尔青冰滩 72 号^[60]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，因此本文基于最新的 Landsat、实测数据、两次的冰川编目数据、气象数据和数字高程模型及 ICESat 数据，系统分析了气候变化背景下天山冰川资源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了理论支撑。

1.3 研究内容

基于上述的研究背景与研究现状，本研究拟选取中国天山冰川作为研究对象，分析中国天山冰川面积变化及冰川高程变化，并结合中国气象气温和降水数据分析中国天山冰川对区域气候变化的响应。本文研究的内容，主要围绕以下几个方面展开：

（1）利用第二次冰川编目数据和 Landsat 遥感影像，更新最新一期的冰川编目，对中国天山冰川面积变化进行分析，包括不同冰川规模、不同海拔高度、不同朝向的冰川变化。

（2）基于 2003-2009 年 ICESat 数据和 2000 年 SRTM DEM，对中国天山过去 10 年冰川表面高程变化分析，包括不同季节的、不同海拔高度带的冰川高程变化。

（3）对比分析中国天山冰川变化及其原因，利用气象站点数据与格网数据分析冰川变化与气候变化的耦合关系。

1.4 技术路线

通过对大量文献的阅读和总结,本文以中国天山为研究对象,利用遥感影像运用波段比值法及人工修订法提取中国天山区两期冰川编目数据,分析了该地区冰川变化特征。其次利用 ICESat 数据和 SRTM DEM 数据分析了该地区 2003-2009 年冰川高程变化。具体技术路线如下图所示。

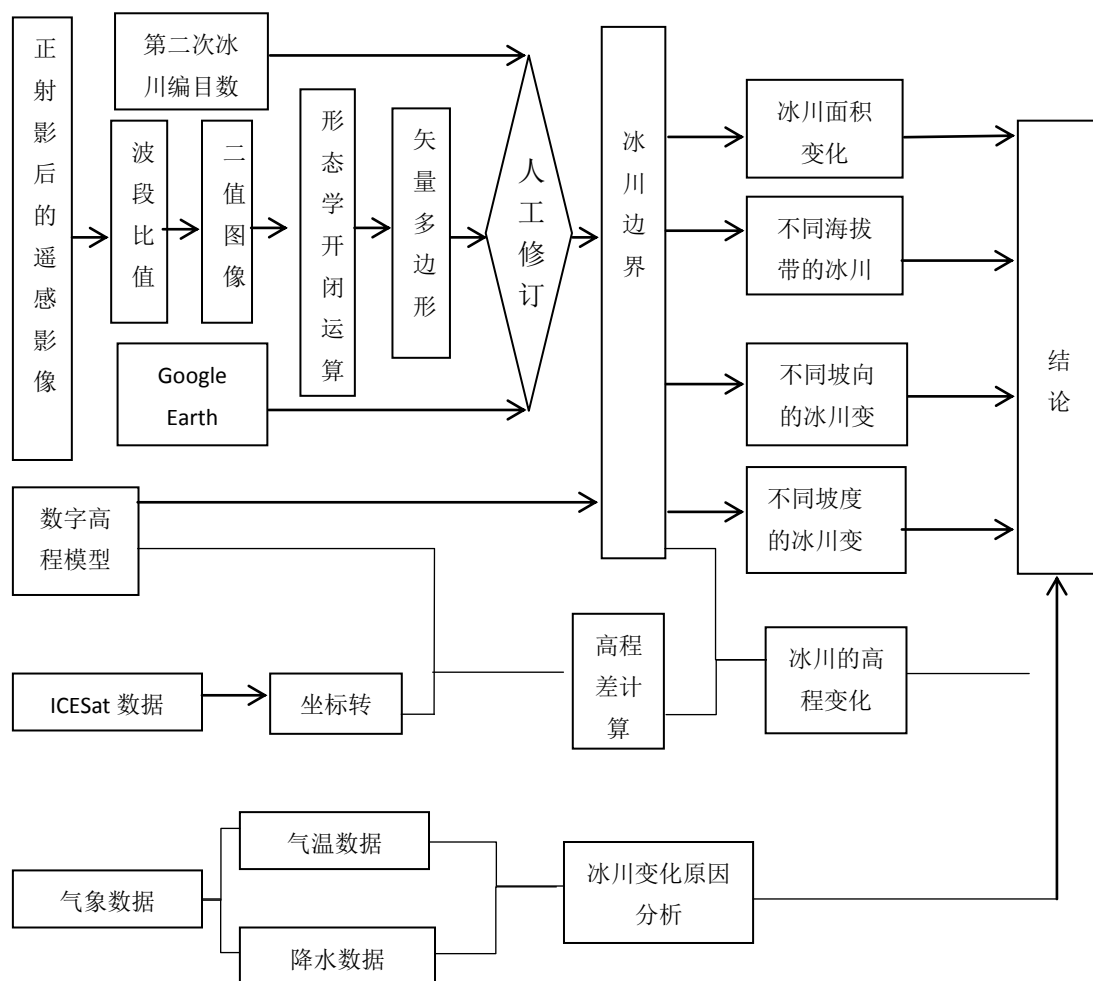


图 1-1 研究技术路线图

Fig.1-1 Map of technological route in the study

2 研究区概况与资料方法

2.1 研究区概况

2.1.1 自然地理概况

天山(69°-95°E, 40°-45°N)是亚洲中部最大的山脉,也是世界上山地冰川数量和规模较大的山系之一。它西起图兰平原,向东穿越哈萨克斯坦和吉尔吉斯斯坦进入中国新疆境内,全长 2100 km,南北最大宽度达 300 km,由 36 条西北-东南走向的山脉组成。天山共发育有现代冰川 18117 条,覆盖面积为 14321 km²,主要分布在托木尔-汗腾格里山汇以及阿克什腊克山汇两大冰川作用中心,形成了楚河、锡尔河、伊犁河和塔里木河等河流。

中国天山,西起中国与吉尔吉斯斯坦边界和哈萨克斯坦边界,东至哈密是以东的星星峡戈壁,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^[61]。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。

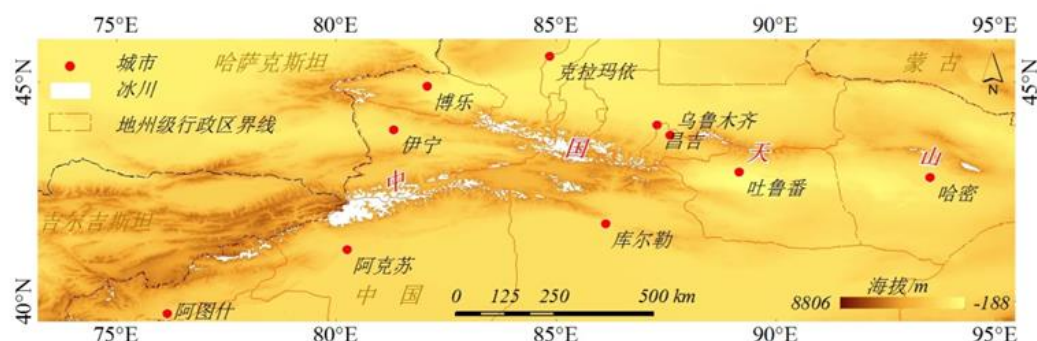


图 2-1 天山区冰川分布

Fig 2-1 Glacier distribution in Tianshan Mountains

2.1.2 气候状况

天山地区的降水主要受西风气流和北冰洋气团的影响,降水的空间差异性显著。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^[62]。夏季平均气温为 21.2 °C,且南坡高于北坡。

2.1.3 冰川状况

天山是横亘亚洲中、吉、哈三国境内的巨大山系，由一系列北西-南东走向的山脉和山间盆地组成，中国境内部分称之为东天山。据一次编目数据显示，中国天山共发育冰川 9081 条，其面积和冰储量分别为 9236 km^2 和 1012 km^3 。是世界上山地冰川数量最多和规模较大的山系之一。中国天山冰川集中分布在汗腾格里-托木尔峰山区。

托木尔峰海拔 7435 m 是天山的最高峰，与中国和吉尔吉斯斯坦边界的汗腾格里峰（海拔 6995 m）等 40 余座 6000m 以上的山峰组成天山的最高区，即汗腾格里-托木尔峰山汇。汗腾格里-托木尔峰区发育有冰川 1357 条，面积为 4093 km^2 ，冰储量约为 424 km^3 ，分别占整个天山相应总数的 8.5%，26.5%和 40.5%，冰川平均面积高达 3.02 km^2 。汗腾格里-托木尔峰山汇的最大冰川作用差为 4760 m，高出雪线高度（冰川作用正差）最大可达 3160 m 为冰川发育提供了很大的积累空间和较低的温度条件，同时也能拦截大气中的水汽而形成较多的降水，从而发育了规模巨大的冰川，成为天山最大的冰川作用中心。面积大于 100 km^2 的冰川均分布在该中心。

巨大的树枝状山谷冰川上下高差十分悬殊，粒雪盆丰富的固态降水和冰舌区强烈的消融决定了这类冰川具有很大的冰川作用能和较快的运动速度，冰川具有极强的侵蚀搬运能力。雪崩夹带大量的岩屑物质崩落在冰面上，冰川磨蚀和刨蚀作用破坏下覆基岩，并通过冰舌区的上升流将其搬运到冰面上，从而在各支冰流或支冰川上形成条带状的中碛或侧碛，它们在冰川雪线以下的冰舌区汇合而形成连片覆盖的表碛层。这种类型的冰川因最早发现于塔吉克斯坦境内的土耳其斯坦山而命名，中国各山地中面积超过 50 km^2 的复式山谷冰川或树枝状山谷冰川均属于这种类型的冰川。在天山托木尔峰区发现的这类冰川的规模更大更典型，故又称为托木尔型冰川。托木尔冰川长 41.5 km，其中 18.4 km 的冰面厚度达 10-40 cm 的表碛层所覆盖，是中国最典型和规模最大的托木尔型冰川。

发源于汗腾格里-托木尔峰区的库马里克河、台兰河和木扎尔特河有数量众多和规模巨大的山地冰川，因而冰川融水补给量占河川径流量的份额估计在库马里克河和台兰河超过 50%，木扎尔特河高达 64%，为天山各河之首。夏季期间，这些河流的水量集合全靠冰川融水补给，是塔里木河的主要源泉。汗腾格里-托

木尔峰区发育的大量冰川及其丰富的融水是生活在该区各族人民赖以生存和工农业持续发展的重要命脉。

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,但其面积低于昆仑山和念青唐古拉山而位于第 3^[21]。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)^[63-66]。天山冰川属于亚大陆性冰川或大陆性冰川^[67],形态类型多样,且山谷冰川较多。

2.2 数据资料与方法

2.2.1 第二次冰川编目

中国第二次冰川编目使用的数据主要包括卫星遥感影像、地形图、数字高程模型数据及《中国冰川目录》12 卷 22 册图书等文献资料^[21]。二次冰川编目中的遥感影像数据,选取波段比值法(TM3/TM5)和人工交互式方法确定阈值从而得到裸冰川二值图像边界,并在 arcgis 软件中将得到二值图像转换为矢量多边形,并将面积小于 0.01 km² 为小冰川剔除,然后利用 ASTER 影像、Google Earth 及一次冰川编目资料对冰川矢量边界进行检查和修订。根据郭万钦等提出的山脊线自动提取方法,对修订后的冰川边界进行分割,从而得到各单条冰川的矢量数据^[56]。参考中国第一次冰川编目和世界冰川编目工作指南,中国第二次冰川编目属性数据集共包含 29 个数据项,包括冰川名称、冰川编码、冰川几何特征、冰川高程特征、数据源及工作人员等信息。编目属性的提取利用遥感和 GIS 技术,结合 SRTM4.1 进行提取^[21,68]。

2.2.2 Landsat MSS/TM/ETM+/OLI

Landsat 是 NASA 于 1972 年 7 月 23 日发射的第一颗陆地卫星,目前已经发射了 8 颗。本文选用的 Landsat 数据有 TM 影像和最新的 Landsat 8 遥感影像共 35 景,覆盖整个中国天山山区。数据列表如下

表 2.1 研究区使用的遥感影像

Tab 2.1 Remote Sensing Images Used in the Study Area

行列号	1989 编目时间	2017 年编目时间	分辨率
138/30	19890823	20170905	30
139/30	19880811	20170811	30
141/30	19910811	20170809	30
142/30	19890819	20170901	30
143/30	19940824	20170722	30
144/30	19940828	20170729	30
145/29	19940822	20160818	30
145/30	19940822	20160810	30
146/30	19900802	20160809	30
146/31	19900802	20170828	30
147/29	19890822	20170904	30
147/30	19890822	20170904	30
148/29	19910819	20170908	30
147/31	19890822	20170904	30

2.2.3 SRTM DEM

SRTM 数字高程模型数据，由美国太空总署（NASA）和国防部国家测绘局（NIMA）以及德国与意大利航天机构共同合作完成联合测量，SRTM 搭载在“奋进”号航天飞机从 2000 年 2 月 11 日开始至 22 日结束，共进行了 11 天，总计 222 小时 23 分钟完成数据采集，获取了覆盖地球 80%以上的陆地表面（60°N-56°S）雷达干涉数据^[60]。美国地质勘探局提供的 SRTM 数据高程模型数据按精度可以分为 SRTM1 和 SRTM3，分别对应的分辨率为 30 m 和 90 m，SRTM3 是由 SRTM1 经过重采样进行降分辨率处理。

由于雷达信号受到一定的干扰或受镜面反射、雷达阴影、回波滞后等影响，SRTM 在获取的过程中存在一定的“空洞”。SRTM3 由美国国际农业研究咨询顾问集团空间信息协会（CGIAR-CSI）进行了“空洞”填补处理，而 SRTM1 的部分数据未做“空洞”填补处理。由于填补数据的时间无法确定，不能代表某一时刻的地面高程，因此在冰川冰量变化研究时不能选择填补“空洞”的 SRTM 产品。本研究选择空间分辨率较高的未填补“空洞”的 SRTM1 数据产品。SRTM1 数据所用坐标系为 WGS84（the World Geodetic System 1984）平面坐标和 EGM96（the 1996 Earth Gravitational Model）高程系。在 90%的置信区间内，SRTM 垂直精度优于 16 m，其高程精度受地形的影响较大，在平坦区域的高程精度可达 10 m，且随

地表坡度变化^[70,71]。

2.2.4 ICESat-GLAS

ICESat GLAS 是一种单光束星载激光高度计，可在 2003 年 2 月至 2009 年 10 月期间运行，在每年约两个至三个观测周期内抽取地球表面高度约 70 米的足迹，每个观测周期约 1 个月。激光足迹沿轨道间距为 172 米，在 61° 纬度处的 91 天重复参考轨道间的轨道间隔约 42 公里^[73-75]。按照 Kaab 等人的规定，2012 被发现是最适合山地冰川分析的产品，所使用的 ICESat 数据集是 GLAS/ICESat L2 Global Land Surface Altimetry HDF5 数据 (GLAH14)，第 33 版。对于 GLAH14，高度值在版本 33 和 34 之间没有变化。数据包含每个覆盖区的质量属性和高程更正，这些属性包括波形饱和度标志，用于指示记录返回脉冲时传感器的饱和度，以及从这些饱和波形中提取的标高中的潜在偏差的校正值（属性平均标志）。标志和校正用于提高标高精度在冰层上（这是任务的最初主要目的），并不一定在崎岖的山地上有效。该数据由美国国家雪冰数据中心提供，本研究使用的是最新发布的 GLA14 数据产品 (Release 633)，为全球陆地地面高程数据。

2.2.5 气象数据

本研究在分析冰川变化差异时所用的气候数据主要为中国气象局 (China Meteorological Administration, CMA) 提供的中国 1961-2015 年月尺度的气温与降水格点数据，空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 。

2.3 研究方法

2.3.1 冰川边界提取

1 冰川分类和边界提取

冰川识别或冰川分类的目的是将冰川与周围地物区分出来，在可能情况下进一步区分冰川表面的不同分区，冰川的识别结果最终需要转化为矢量图层，并进一步统计冰川的其他特征参数。目前没有比较完善适合大范围冰川自动提取的方法，根据国际上基于遥感进行较大范围的冰川编目经验，一般采用自动分类+人工解译的综合方法。其中，冰川自动分类采用波段比值法对冰川边界进行提取，然后采用手工的方法将自动识别出来的栅格化冰川边界进行数字化，将其转换为

矢量图层，并利用解译者冰川雪知识，将自动分类无法识别的部分识别出来。

（1）采用波段比值法对冰川进行自动识别

针对不同传感器，Landsat TM、ETM 第 3 波段与第 5 波段的比值效果最好，对于 ASTER 而言，第 1 波段和第 4 波段比值效果最好。波段比值法仅仅是为了增强冰川区的信息，要将冰川区提取出来还需要经过一个关键的步骤，即阈值的设定。受辐射传输的影响，采用波段比值法获得的冰川区比值会在一定范围内浮动，因此选取阈值需要针对具体影像分析确定。

（2）冰川自动识别结果的栅格转矢量过程及后续处理

冰川识别结果经过阈值处理后，得到的是二值化的图像数据，这种结果需要通过栅格转矢量的处理才能获得在 GIS 软件中编辑的数据。这种栅格转矢量的过程通常是通过找到所有具有不同取值相邻像元，让后逐个提取不同取值相邻像元的角点，并依次将其存入矢量多边形的边界拐点序列，以此来构成冰川边界多边形，并输出为矢量文件，供后续人工修订过程使用。

（3）受遥感影像中云、雪、阴影等的影响，很多情况下经过上述两个步骤后的冰川边界还需要对剩余的冰川边界进行细致的检查和人工修订，才能直接作为冰川编目中的冰川边界使用冰川边界修订过程和手工数字化类似。冰川边界的人工修订通常是有经验丰富的冰川学者来进行，通过将遥感影像与自动提取的冰川边界相叠加，仔细检查边界不同区段对应的遥感影像特征，同时参考谷歌地球等高分辨率遥感影像和地形信息，对冰川边界进行仔细的修订。对于 1989 年和 2017 的冰川编目，采用的数据源为 Landsat 遥感影像，冰川边界提取方法与中国第二次冰川编目采用的方法一致，以 0.01 km^2 为最小冰川面积来进行编制。根据郭万钦等提出的山脊线自动提取方法，对修订后的冰川边界进行分割，从而得到各单条冰川的矢量数据^[56]。

2.3.2 冰川面积变化

中国天山冰川面积变化研究主要是通过比较中国第二次冰川编目数据和基于遥感影像数据提取的冰川编目数据。对于冰川编目依据影像获取时间，按面积加权法计算一个平均年份，代表冰川编目的现状年。公式如下：

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i * A_i)}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (3-1)$$

式中：Y 为平均时间（年），n 为冰川的数量，Y_i 表示第 i 条冰川对应的影像时间（年），A_i 表示第 i 条冰川的面积。冰川面积变化百分比（Percent Change of Area, PCA）可以表示为：

$$PAC = \frac{A_s - A_f}{A_s} * 100\% \quad (3-2)$$

式中：A₁ 和 A₂ 分别为不同时期的冰川面积。

冰川面积年变化率（Annual Percent Change of Area, APCA）可以表示为：

$$APAC = \left[\left(\frac{A_s}{A_f} \right)^{\frac{1}{\Delta T}} - 1 \right] \times 100\% \quad (3-3)$$

式中：A_s 和 A_f 分别为不同时期的冰川面积，n 为两期冰川编目间隔的时间（年）。

2.3.3 ICESat-GLAS 数据处理

从美国国家雪冰数据中心（National Snow and Ice Data Center, NSIDC）可以获得二进制和 HDF5 格式的两种数据，本研究获取的是 HDF5 格式的数据文件，通过 NSIDC 提供的程序从 HDF5 格式文件中提取 GLAS14 光斑点（footprint）的属性信息，并且对于光斑进行了饱和校正。ICESat-GLAS 数据的坐标系是 TOPEX/Poseidon，NSIDC 提供的程序在提取光斑点属性信息的同时，将 GLAS14 数据的地理坐标从 TOPEX/Poseidon 转为 WGS1984，水准模型转换为 EGM96。在 Arcgis 10.0 中导入读取的 ICESat-GLAS 属性文件，生成可视化的矢量文件，可以清晰的看见 ICESat 光斑在研究区地面上的运行轨迹（图 3.2）

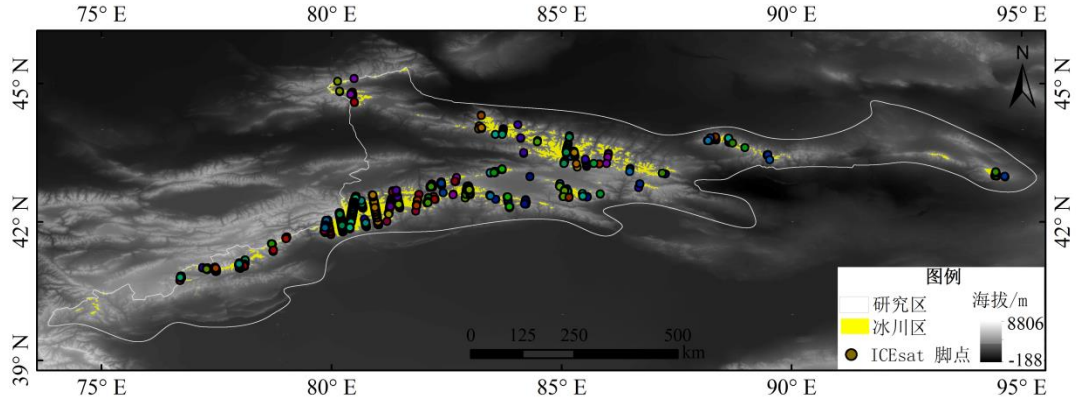


图 2.2 研究区 ICESat-GIAS 轨迹图

Fig 2.2 ICESat-GIAS trace of the study area

2.2.4 不确定性评估

冰川面积误差由系统误差和偶然误差组成。由于不同因素造成的误差多样性，很多研究仅考虑遥感影像分辨率造成的误差^[21,76, 77]，主要表现在冰川边缘和冰川内部的裸露岩石区，其误差可通过冰川最边缘的像元数量计算获得：

$$E_A = n * \lambda^2 / 2 \quad (3-21)$$

式中： E_A 为面积不确定性， n 为冰川轮廓线（主要指冰川边缘和冰川内部裸露岩石区的边界）所经过的像元数， λ 为空间分辨率。这种误差估算的方法，决定性的因素为遥感影像分辨率。Landsat 数据是 USGS 采用 GLS2005 全球陆地控制点系统进行正射校正的产品，没有发现明显的平面偏移^[78]。

冰川编目的面积不确定性估算的公式如下：

$$E_A = L_c E_{pc} + L_d E_{pd} \quad (3-22)$$

式中： E_A 为面积不确定性， L_c 和 L_d 分别为裸冰区和表碛覆盖区的冰川边界长度（主要指冰川边缘和冰川内部裸露岩石区的边界）， E_{pc} 和 E_{pd} 分别为裸冰区和表碛覆盖区的冰川边界定位精度。

冰川面积变化的不确定性 E_{AC} 估算公式如下：

$$E_{AC} = \sqrt{(E_{A1})^2 + (E_{A2})^2} \quad (3-23)$$

式中： E_{A1} 和 E_{A2} 分别为两期冰川面积的不确定性。

3 1989-2017 年中国天山冰川资源分布及变化

3.1 中国东天山冰川资源分布及变化

3.1.1 东天山冰川资源分布

2017 年的冰川编目表明，东天山共分布有现代冰川 542 条，冰川面积 253.37 km²(图 3.1, 表 3.1)。其中博格达地区分布冰川 342 条，冰川面积达 133.45 km²，哈密地区分布冰川 200 条，冰川面积为 119.92km²，占东天山冰川总面积的 52.6%。北坡分布有现代冰川 226 条，冰川面积 92 km²，其中数量占天山东段的 41.8%，面积占总面积的 35%，是南坡的二倍左右。南坡的冰川平均面积 1.0 km²，大于平均面积 0.41 km² 的北坡。东天山有 5 条冰川面积大于 5 km²，占有总面积的 1/5，其中最大冰川面积为 9.62 km² 位于东北坡。

表 3.1 东天山 1989-2017 年冰川分布及变化

Tab.3.1 The distribution and change of glaciers in the east of Tianshan during 1989-2017

年份	博格达地区			哈密地区			整个天山东部		
	数量	面积 (km ²)	冰川面积 变化 (%a ⁻¹)	数量	面积 (km ²)	冰川面积 变化 (%a ⁻¹)	数量	面积 (km ²)	冰川面积 变化 (%a ⁻¹)
1989	389	162.78		239	146.25		628	309.03	
2000	376	154.07	-0.54	218	133.75	-0.85	594	287.82	-0.69
2007	360	144.62	-0.76	205	123.71	-0.94	565	268.33	-0.67
2017	342	133.45	-0.77	200	119.92	-0.31	552	253.37	-0.58

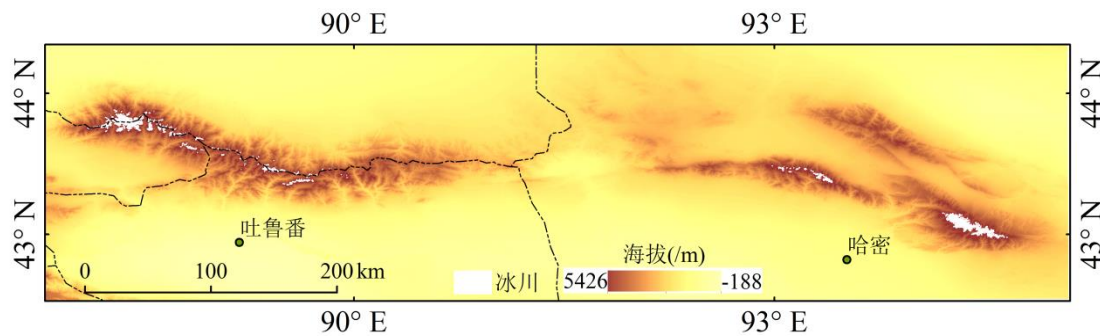


图 3.1 天山东部冰川分布

Fig.3.1 The distribution of glacier in East Tianshan Mountains

将东天山的冰川分为 6 个不同面积等级 (图 3.2)，可以看出冰川面积小于 0.5 km² 的冰川数量占总数量的 88.9%，其面积仅占总面积的 21.8%，可见东天山小冰川数量较多，尤其是小于 0.1 km² 面积等级内的数量最多。1-5 km² 的冰川数量仅占总数量的 22.6%，而面积比重较大，占总面积的 63.6%。面积大于 5 km² 的冰川仅有 5 条，占总面积的 14.5%。

根据不同海拔面积分布(图 3.3), 东天山 93.4%的冰川面积位于 3600-4600 m 海拔高度范围内, 仅有 3.9%位于 4600 m 海拔以上, 2.6%位于 3600 m 海拔以下。平均最低海拔和最高海拔分别为 3358 m 和 5426 m, 中值面积海拔为 3977.6 m。本研究得到的中值面积海拔高度, 高于平均物质平衡线, 说明该地区冰川积累区面积比率 (Accumulation-area ratio, AAR) 小于 0.5, 不利于冰川发育。

东天山冰川表面平均坡度为 22.01°, 大部分冰川表面平均坡度在 21-33°之间, 数量占总数量的 80%, 面积占总面积的 87.3% (图 3.4)。面积较大的冰川平均坡度较小, 其中大于 5 km² 的五条冰川, 平均坡度分别为 26.3°、16.70°、23.8°、22.2°和 22.4°。平均坡度较大的地区不适于冰川发育, 因此平均坡度大于 40°的冰川仅有 11 条, 面积均小于 0.2 km², 其中最小的一条冰川面积仅有 0.01 km²。

从不同朝向上看 (图 3.5), 北和东北坡向的冰川数量较多, 占总数量的 61.8%, 而东北坡向的单条冰川面积较大于北坡向的单条冰川面积。北、东北和西北坡向的冰川面积占天山东部冰川总面积的 75.6%, 而南、西南和东南坡向的冰川面积仅占总面积的 13.3%。

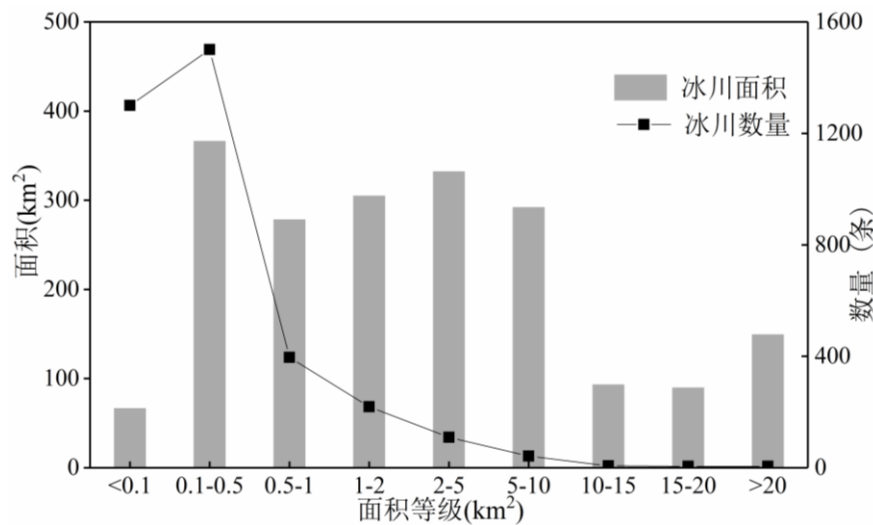


图 3.2 东天山不同面积等级的冰川数量和面积

Fig 3.2 Number and area of glaciers in different sizes in the eastern part of Tianshan Mountains

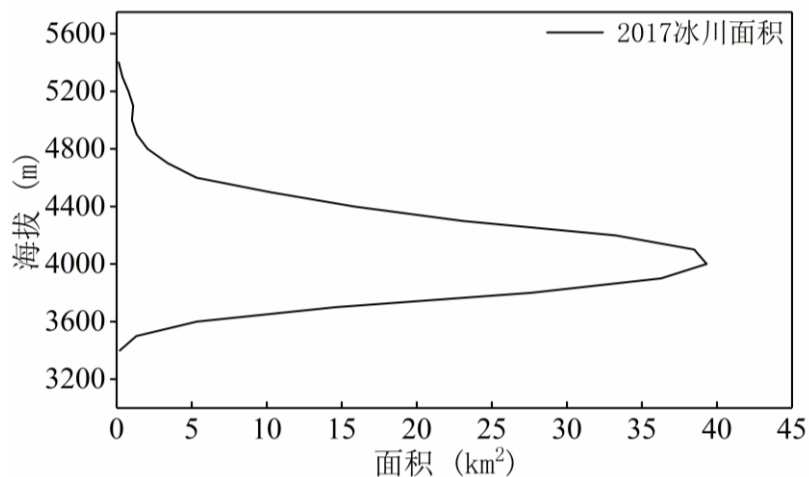


图 3.3 东天山冰川面积随海拔分布

Fig 3.3 Hypsography of glacier area in east of Tianshan Mountains

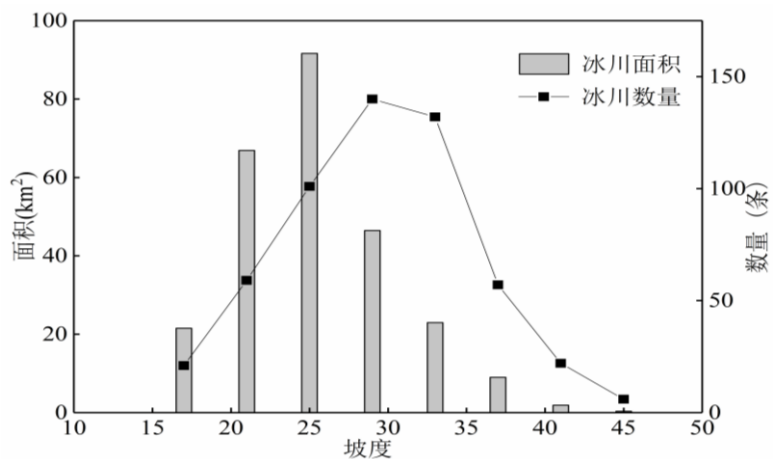


图 3.4 东天山不同坡度的冰川数量和面积

Fig 3.4 Number and Area of Glaciers with different size in the East of the Tianshan Mountains

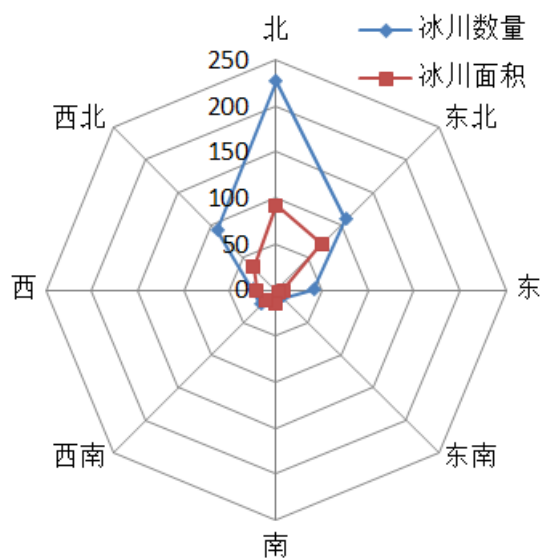


图 3.5 东天山不同朝向的冰川数量和面积

Fig 3.5 Number and area of glaciers with different orientations in the east of Tianshan Mountains

3.1.2 东天山冰川面积变化

通过对比 1989 年和 2017 年冰川编目数据（表 3.1），可以发现，东天山冰川面积共减少了 55.66 km²，占 1989 年天山东部冰川总面积的 18.06%，年减少率为 0.64% a⁻¹。由于小冰川的消失和大冰川分裂，从 1989-2017 年，冰川数量减少了 76 条。冰川平均面积从 0.55 km² 缩减到 0.48 km²。不同面积等级的冰川变化具有差异性（图 3.6）。将冰川面积划分为 6 个不同的面积等级，结合 1989 年和 2017 年冰川编目，可以看出小冰川的面积减少率较高，大冰川的面积减少率较低。面积等级小于 0.1 km² 的冰川，数量增加了 43 条，主要原因是面积等级在 0.1-0.5 km² 内的冰川快速退缩，冰川面积减小至 0.1 km² 面积等级范围内。面积等级小于 1.0 km² 的冰川，面积减少了 36.57%；面积等级大于 5 km² 的冰川，面积仅减少了 19.38%。而面积等级 1.0-5.0 km² 内的冰川，面积减少了 30.46 km²，占 1989 年该面积等级范围内的 19.96%（图 3.7）。大冰川在高海拔地区拥有较大的冰川积累区，而小冰川海拔较低，在气候变暖的影响下，冰川消融比较强烈，而物质补给又较少，因此小冰川退缩可能加剧。

利用 2000/2001 年的 Landsat TM/ETM+遥感影像，通过波段比值法与人工修订，并结合第二次冰川编目数据得到 2000 年和 2009 年天山东部两期冰川编目。通过对比分析显示（表 3.1）从 1989-2017 年天山东部冰川面呈现持续退缩的态势。从 1989-2000 年冰川总面积减少了 21.21 km²，占 1989 年冰川总面积的 6.86%，年减少率为 0.68% a⁻¹。2000-2009 年，冰川面积减少了 19.49 km²，占 2000 年冰川总面积的 6.72%，年减少率为 0.67% a⁻¹。2009-2017 年，冰川面积减少了 14.96 km²，占 2009 年冰川总面积的 5.58%，年减少率为 0.58% a⁻¹。

冰川平衡线高度（Equilibrium line altitude, ELA）、冰川积累区面积比率（Accumulation-area ratio, AAR）与冰川物质平衡有较强的线性关系^[70-72]。冰川最高海拔与雪线高度差，称之为冰川作用区正差（Positive difference of glaciation, PDG），与冰川积累区面积比率相似，具有较好的指示作用。冰川作用区正差体现了冰川积累区的面积比率，冰川作用区正差越大，冰川面积变化的弹性越强。在本研究中，将冰川平均中值面积海拔高度视为雪线高度，在此基础上计算冰川作用区正差。从 1989-2017 年，天山东部平均冰川作用区正差从 209 m 减少到

178 m，表明在气候变暖的背景下，本研究区不适宜于冰川发育。

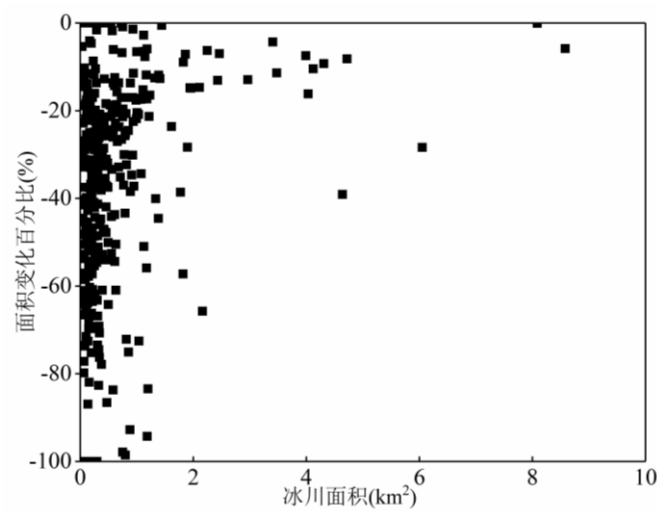


图 3.6 东天山不同面积等级冰川面积变化速率

Fig 3.6 Area Change of Glaciers with different size in Eastern of Tianshan Mountains

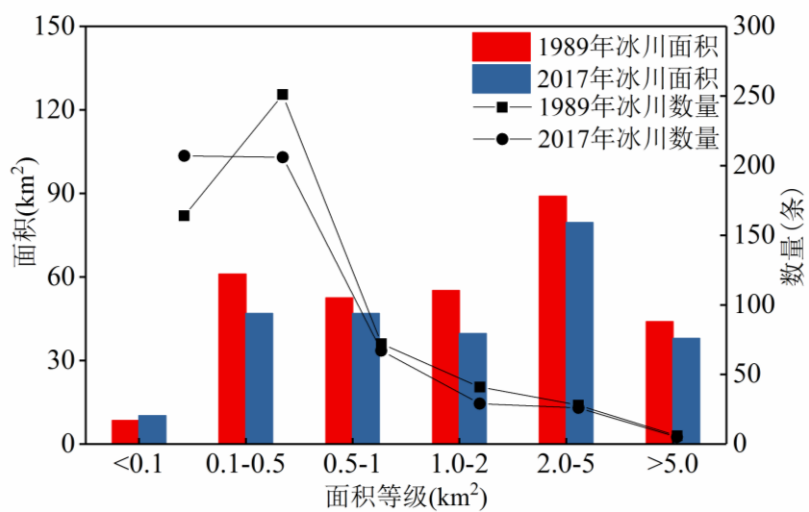


图 3.7 东天山不同面积等级的冰川数量和面积变化

Fig 3.7 Change in the number and area of glaciers of different sizes in eastern of Tianshan Mountains

3.1.3 东天山冰川变化的地形作用

局部地形参数，如海拔高度、坡度坡向、表碛覆盖，对冰川变化有重要影响。冰川变化最直接的表现表现为冰川末端海拔的上升。1989-2017 年东天山冰川高程变化表明，冰川平均中值面积海拔高度上升了 36 m，而冰川平均最低海拔从 3384 m 升高至 4434 m，上升 50 m。在海拔 4500-5000 m 之间，冰川面积退缩速率大于其他海拔高度带，与冰川在不同海拔高度分布相一致。在海拔 4200-4400 m 之间，冰川面积呈现较小的退缩，可能的原因是表碛覆盖，对冰川具有保温作用，阻碍了冰川消融。随着海拔高度的增加，冰川退缩速率逐渐增大。在海拔 4200 m 以

下，冰川全部消融，而海拔 4900 m 以上，冰川仅退缩了 0.19%。

坡度对冰川变化趋势有重要影响。冰川面积减少速率与平均坡度呈正相关，表面坡度较小的冰川，其面积减小速率较小；表面坡度较大的冰川，其面积减小速率较大。95.7%的面积减少均发生在坡度 14-24 °之间。平均坡向对冰川变化趋势也有重要作用。北、东北、东坡向的冰川面积减少速率最大，而西南、西和南坡向的冰川经历最小的面积减少速率。表碛覆盖对冰川具有保温作用，阻碍冰川加速消融，表碛覆盖型冰川面积减小速率均小于裸冰面积减小速率。

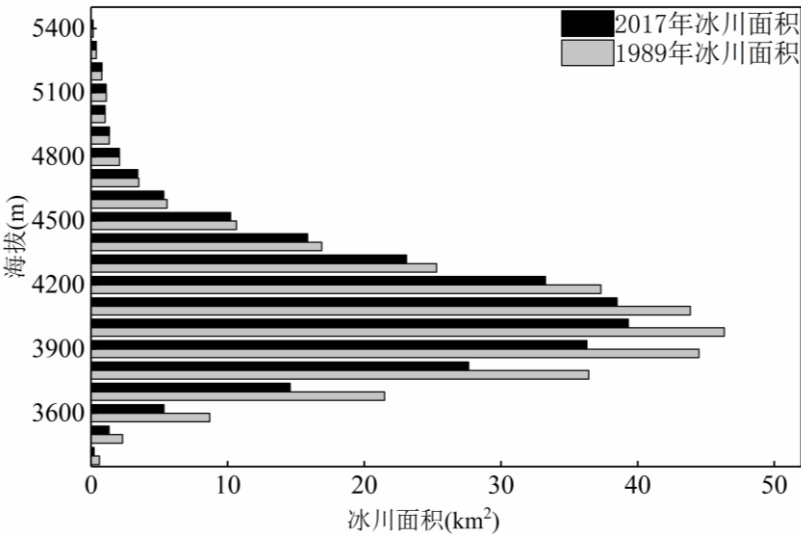


图 3.8 1989-2017 年东天山不同海拔的冰川面积变化

Fig 3.8 Changes of Glaciers at Different Altitudes in Eastern of Tianshan Mountains during 1989-2017

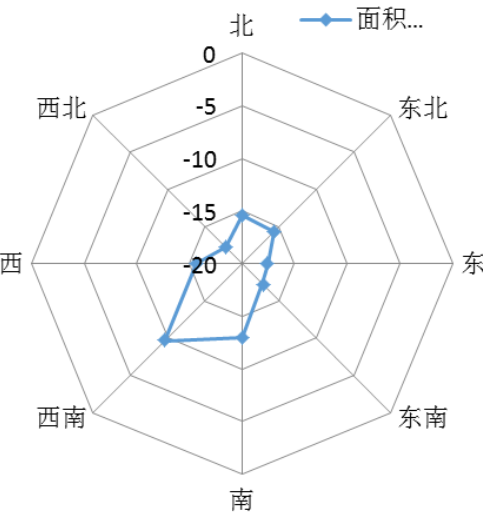


图 3.9 1989-2017 年东天山不同坡向的冰川面积变化

Fig 3.9 Change of Glacier Area with Different Aspects in the East of Tianshan Mountain from 1989 to 2017

3.2 北天山冰川分布及变化

3.2.1 北天山西段冰川分布

研究表明，2017 年北天山共有冰川 3584 条，面积 1854.52 km²，平均冰川规模 0.55 km²（图 3.11）。从冰川面积看（图 3.11），北天山冰川数量以面积小于 1 km² 的冰川为主，面积以大于 1 km² 的冰川为主。其中面积小于 1.0 km² 的冰川共有 3197 条，占北天山冰川总数量的 89.2%；随着面积等级的上升，面积大于 1.0 km² 的冰川数量迅速减少，面积大于 15 km² 的冰川有 5 条，而大于 20 km² 的冰川也仅有 5 条。面积大于 1 km² 的冰川面积为 1262.69 km²，占北天山冰川总面积的 63.4%。面积小于 0.5 km² 的冰川数量尽管多达 2801 条，占冰川总数量的 78.2%，但总面积仅 433.29km²，占北天山冰川总面积的 21.94%。

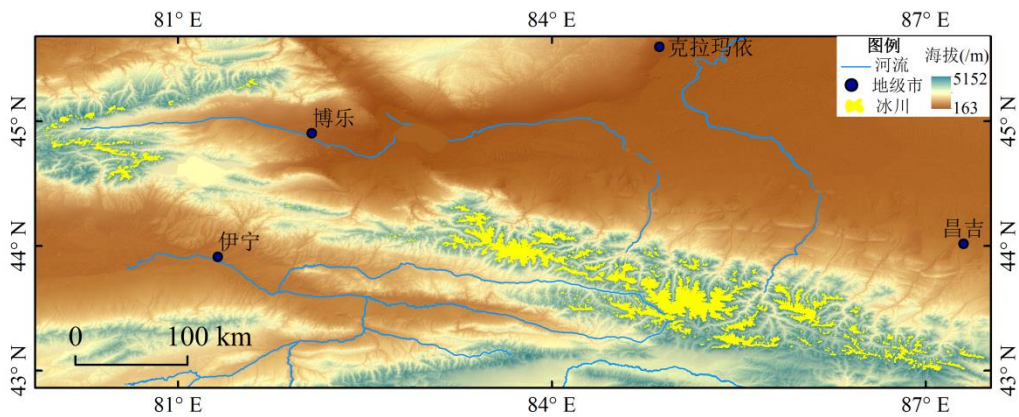


图 3.10 北天山地区冰川分布

Fig 3.10 The distribution of Glacier in the Northern Tianshan Mountains

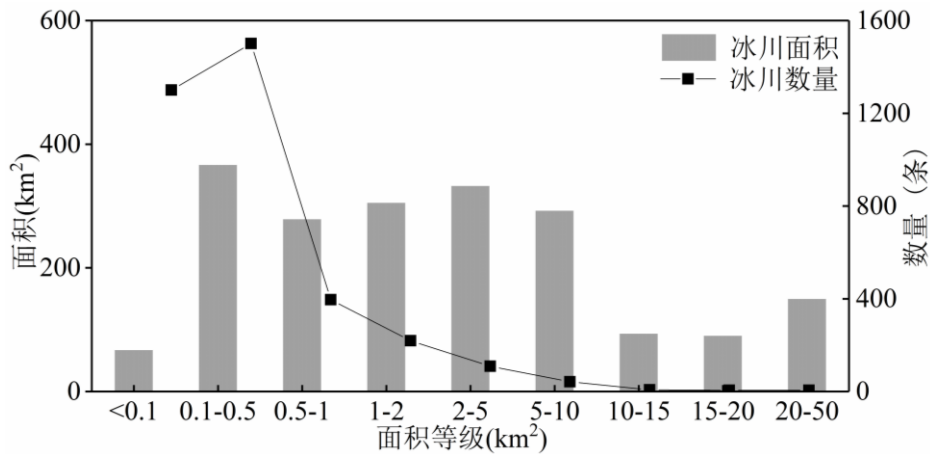


图 3.11 北天山不同面积等级的冰川数量和面积

Fig 3.11 Number and area of glaciers of different sizes in the northern part of the Tianshan Mountains

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 数据对北天山冰川面积随海拔特征进行统计，发现冰川面积的高程分布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 3700-4300 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。仅有 15.12% 位于 4300 m 海拔以上，10.16% 位于 3700 m 海拔以下。冰川分布的最低海拔和最高海拔分别为 2968 m 和 5130 m，中值面积海拔为 3977.5 m。末端海拔最低的冰川为 5Y741B0038，其末端下伸到 2968 m。

从冰川分布的不同朝向来看（图 3.14），北天山冰川数量以北坡向最多，其次是东北、西北坡向，占冰川总数量的 71.82%；冰川面积以北坡向最大，而东北和东坡向的冰川分布次之，冰川面积占总面积的 68.48%。在冰川面积和冰川数量上南、西南和东南坡向均很小，南坡向条数和面积都是最小的，冰川数量仅为 110 条，面积为 102.49 km²；东坡向、西坡向和西北坡向的冰川面积相当，但西北向的冰川数量较多。

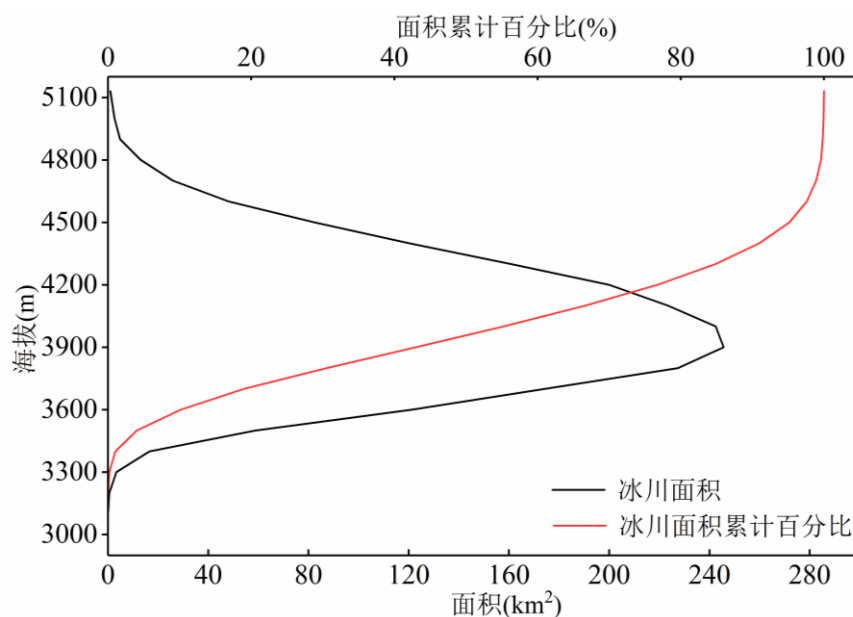


图 3.12 天山北部地区冰川海拔分布

Fig 3.12 Hypsography of glacier area in north of Tianshan Mountains

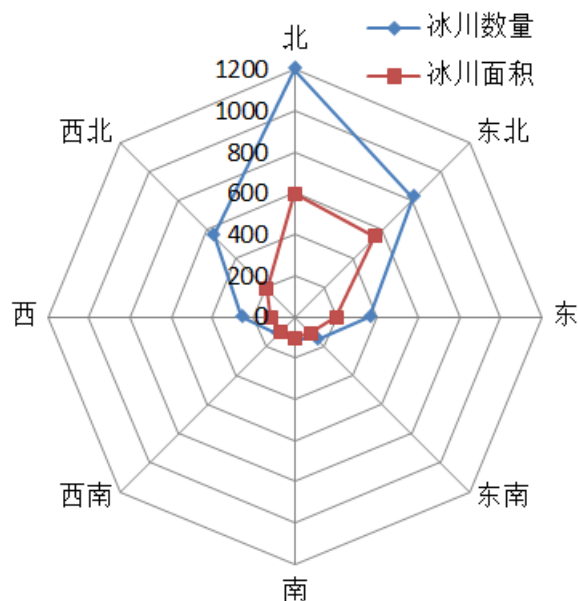


图 3.14 天山北部不同朝向的冰川数量和面积

Fig 3.14 Number and area of different oriented glaciers in the northern part of the Tianshan Mountains

3.2.2 北天山西段冰川面积变化

通过对北天山区两次冰川编目对比表明，1989-2017 年期间，冰川面积减少 316.03 km^2 (14.56%)，年平均面积退缩率为 $0.52\% \text{ a}^{-1}$ ，末端海拔平均抬升了 258 m。从冰川面积相对减少速度来看，以面积大于 1 km^2 的冰川减少最快。

不同面积等级的冰川变化具有差异性（图 3.15 和图 3.16）。将冰川面积划分为 9 个不同的面积等级，结合 1989 年和 2017 年冰川编目，可以看出天山北部地区冰川面积变化以面积大于 1 km^2 的冰川为主。面积等级小于 0.1 km^2 的冰川，数量呈增加状态，主要原因是面积等级在 $0.1\text{-}5 \text{ km}^2$ 内的冰川快速退缩，单条冰川分裂至较多的小斑块，面积在小于 0.1 km^2 面积等级范围内。面积等级小于 1.0 km^2 的冰川，数量有 3197 条，但这些小冰川面积减少了 45.98 km^2 ，占该山区冰川总损失面积的 14.23%；而面积大于 1 km^2 的冰川，面积减少了 271.04 km^2 ，占 1989 年该面积等级范围内的 19.17%。天山北部地区面积大于 20 km^2 的冰川，从 1989 年的 7 条变为 2017 年的 5 条，主要的原因是气候变化导致的冰川退缩，成为了小于 20 km^2 的冰川。

从近 28 年北天山各个海拔带冰川面积退缩变化来看，北天山冰川在各个海拔带内均呈现退缩趋势，但是各个海拔带退缩幅度却不相同。在海拔 2800 m 以下，冰川已经全部消失，消失的面积为 0.32 km^2 ，退缩幅度最大。其次是在 3000-3100 m，冰川退缩幅度为 90%，冰川面积减少 1.09 km^2 。随着海拔的上升，

冰川在各个海拔的退缩幅度逐渐减小，其中在海拔 5000 m 左右退缩幅度最小。从面积变化来看，在 3500-3900m 之间，冰川面积减少最多，减少面积为-133.1 km²，减少面积占总减少面积的 42.08%。面积减少最少的在海拔 5000 m 以上，冰川面积基本没有变化。冰川面积变化的最大值出现在海拔 4200 m 附近，面积减小了 66.25 km²（图 3.17）。

坡向通过影响降水量和热量条件而使冰川规模发生变化^[1]。从不同朝向来看，变化规律与其分布规律一致。其中东北朝向冰川面积变化幅度最大为 32%，冰川面积减少为-80.62 km²。其次是北和西坡向，面积退缩幅度次之，减少面积分别为-30.43 km²和-19.81 km²。

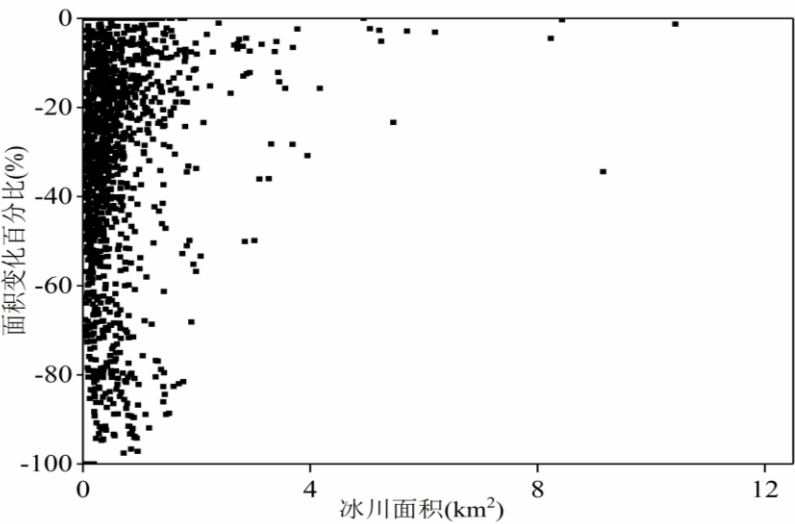


图 3.15 北天山不同面积等级冰川面积变化速率

Fig 3.15 Rate of change of glacier area in different areas of northern Tianshan Mountains

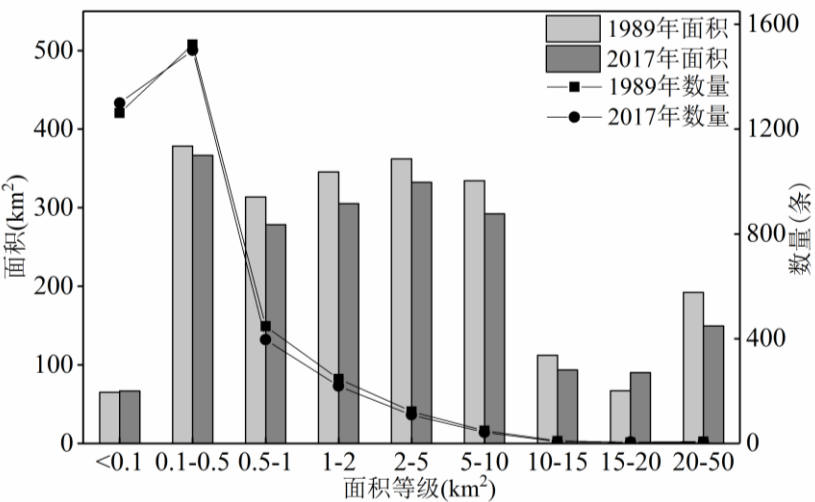


图 3.16 北天山不同面积等级的冰川数量和面积变化

Fig 3.16 Change in the number and area of glaciers in different areas of northern Tianshan Mountains

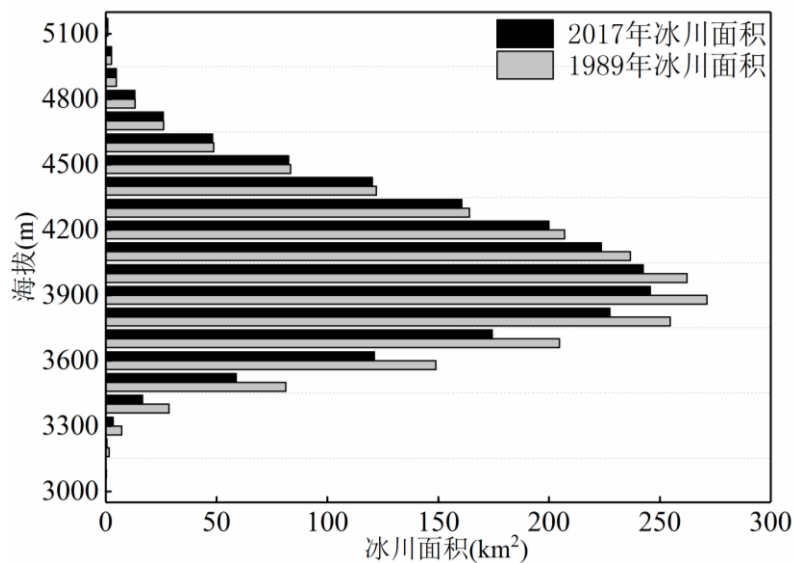


图 3.17 1989-2017 年北天山不同海拔的冰川面积变化

Fig 3.17 Change of Glacier Area at Different Altitudes in the Northern Tianshan Mountains from 1989 to

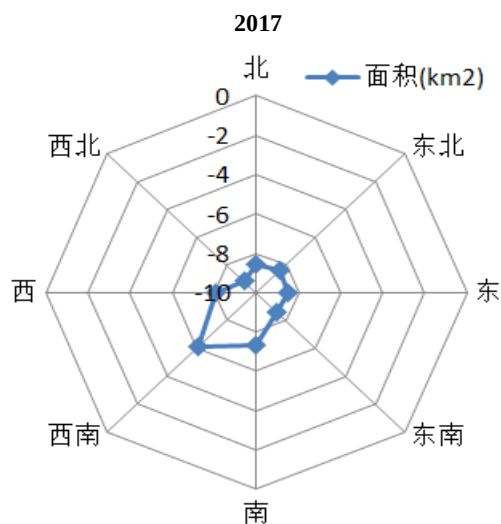


图 3.18 1989-2017 年北天山不同坡向的冰川面积变化

Fig 3.18 Change of Glaciers in Different Aspects in the Northern Tianshan Mountains from 1989 to 2017

3.3 南天山冰川分布及变化

3.3.1 南天山冰川分布

研究表明, 2017 年南天山共有冰川 2807 条, 面积 4443.25 km^2 , 平均冰川规模 1.58 km^2 (表 3.2)。从冰川面积看 (图 3.18), 南天山冰川数量以面积小于 5.0 km^2 的冰川为主, 面积以 $1-50 \text{ km}^2$ 的冰川为主。在冰川数量方面, 以面积小于 0.5 km^2 的冰川为主, 冰川数量为 1856 条, 占天山南部冰川总数量的 66.12%; 随着面积等级的增大, 面积大于 5.0 km^2 的冰川数量迅速减少, 而面积等级大于 100 km^2 的冰川仅有 6 条。面积大于 1 km^2 而小于 50 km^2 的冰川面积为 2379.84

km²，其冰川面积占南天山部冰川总面积的 53.55%。虽然面积小于 1 km² 的冰川数量为 2242 条，冰川数量占南天山冰川总数的 79.87%，但总面积却为 614.99 km²，占天山南部冰川总面积的 13.84%。

表 3.2 南天山 1989-2017 年冰川分布与变化

Tab 3.2 Distribution and Change of Glaciers in the Southern Tianshan Mountains from 1989 to 2017

时间	冰川数量	冰川面积	退缩量	年均退缩百分比
1989 年	2912	4904.6		
2009 年	2857	4652.8	251.8	-0.418
2017 年	2807	4443.2	209.6	-0.402

基于数字高程模型数据，以 100m 为间距对南天山冰川进行海拔统计分析，发现南天山冰川分布在 2680-7000 m 之间，冰川分布呈正态分布。其中在海拔 3800-5000 m 分布的冰川面积约占冰川总面积的 88.07%，为冰川集中发育区。冰川最低海拔为 2681 最高海拔为，末端海拔最低的冰川为 5X046G0048，其末端下伸到 2681 m。南天山冰川平均中值面积海拔为 4334.85 m。

从不同朝向的冰川分布图来看，北坡向的冰川无论在数量上还是面积上冰川都是最多的。其次是东北坡向和西北坡向的冰川，其数量和面积分别为 325、425，分别占总数量和总面积的 65.22%、48.57%；最少的是南、东南和西南坡向，冰川面积为 132 km²。

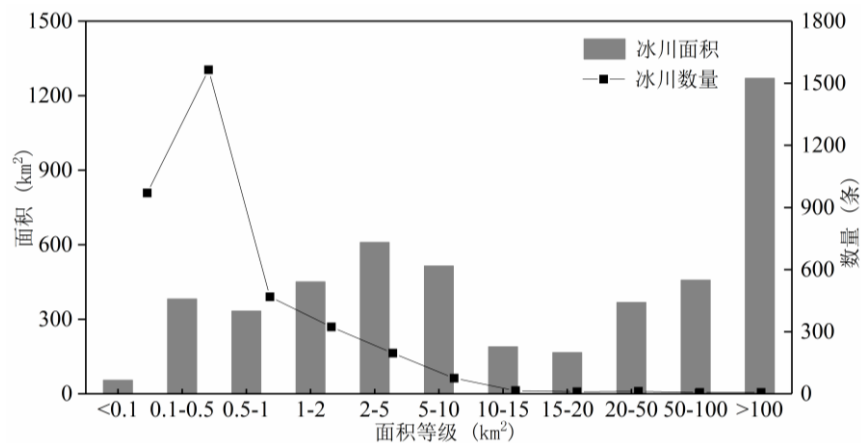


图 3.19 南天山面积等级的冰川数量和面积

Fig 3.19 The number and area of glaciers of different sizes in the southern the Tianshan Mountains

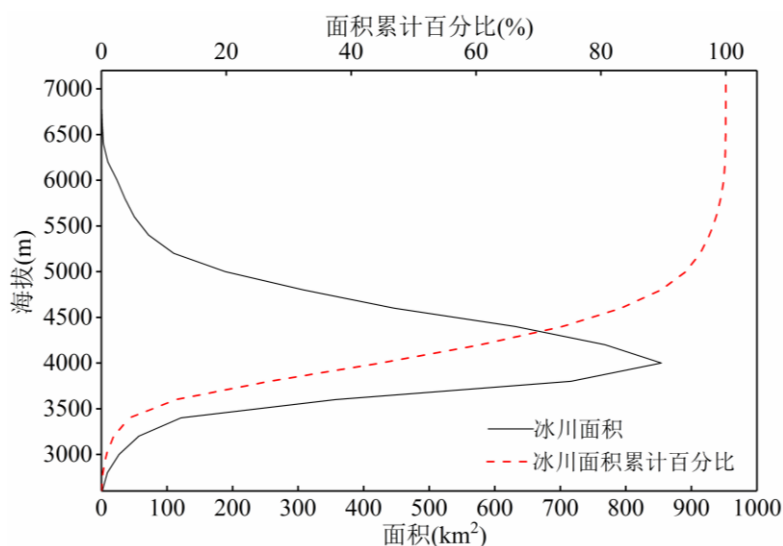


图 3.20 南天山冰川海拔分布

Fig 3.20 Glacier Altitude Distribution in Southern Tianshan Mountains

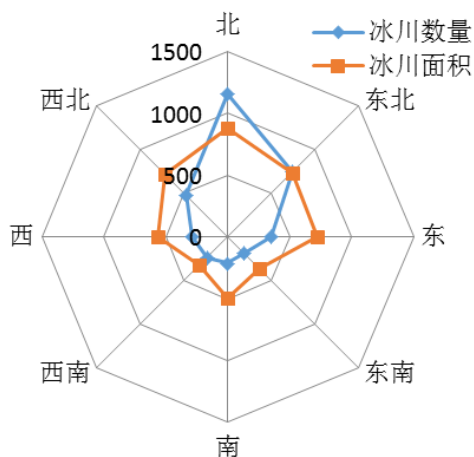


图 3.21 南天山不同坡向冰川数量和面积

Fig 3.21 Number and area of glaciers at different slopes in southern Tianshan Mountains

3.3.2 南天山冰川面积变化

南天山两次冰川编目对比表明,1989-2017 年期间,冰川面积减少 441.46 km^2 (9.42%), 年平均面积退缩率为 $0.41\% \text{ a}^{-1}$ 。从冰川面积变化的相对退缩速度来看,南天山冰川在各个面积等级内均有退缩,但退缩幅度差异较大,而且冰川面积变化以大于 1 km^2 的冰川为主。南天山冰川面积介于 $1\text{-}5 \text{ km}^2$ 的冰川变化幅度较大,冰川面积减少了 206.72 km^2 ,减少面积占中减少面积的 46.82%。面积等级大于或等于 10 km^2 的冰川面积变化较小,冰川面积共减少了 115.26 km^2 ,虽然面积等级小于 1 km^2 的冰川多达 2242 条,但冰川面积减少了 69.12 km^2 ,占该山区冰川面积总损失的 15.69% (图 3.23)。南天山面积大于 100 km^2 的冰川,冰川数量没有发生变化,但面积退缩较大。主要的原因是大冰川面积大,但所处海拔

较低，气候变化导致的冰川面积退缩较多。

从近 28 年南天山各个海拔带冰川面积退缩变化来看，南天山冰川在各个海拔带内均呈现退缩趋势，但是各个海拔带退缩幅度却不相同。在海拔 2700 m 以下，冰川已经全部消失，消失的面积为 0.74 km^2 ，退缩幅度最大。其次是在 2800-3300 m，冰川退缩幅度为 80%，冰川面积减少 120.09 km^2 。随着海拔的上升，冰川在各个海拔的退缩幅度逐渐减小，其中在海拔 4800 m 左右退缩幅度最小。从面积变化来看，在 4400-4800m 之间，冰川面积减少最多，减少面积为 -323.1 km^2 ，减少面积占总减少面积的 54.3%。面积减少最少的在海拔 5000 m 以上，冰川面积基本没有变化。冰川面积变化的最大值出现在海拔 4700 m 附近，面积减小了 69.95 km^2 （图 3.17）。

坡向通过影响降水量和热量条件而使冰川规模发生变化^[1]。从不同朝向来看，变化规律与其分布规律一致。其中东北朝向冰川面积变化幅度最大为 32%，冰川面积减少为 -123.62 km^2 。其次是东朝向和西朝向，面积退缩幅度次之，减少面积分别为 -54.79 km^2 和 -36.27 km^2 。西南朝向最小，仅 -6.53 km^2 。

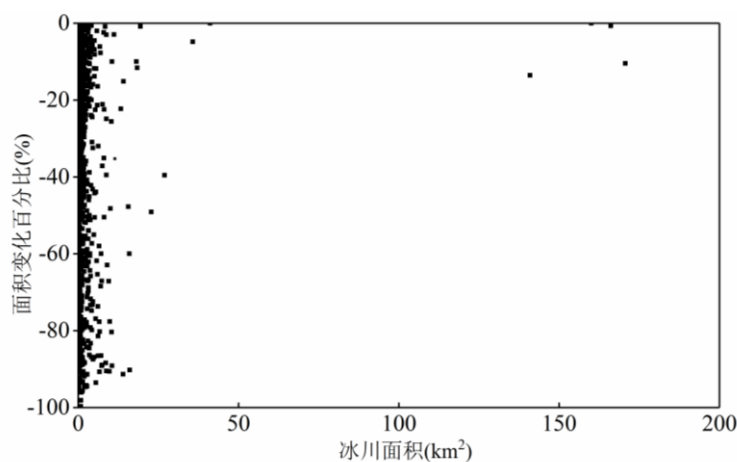


图 3.22 南天山 1989-2017 年冰川面积变化

Fig 3.22 Glacial area change in southern Tianshan Mountain from 1989 to 2017

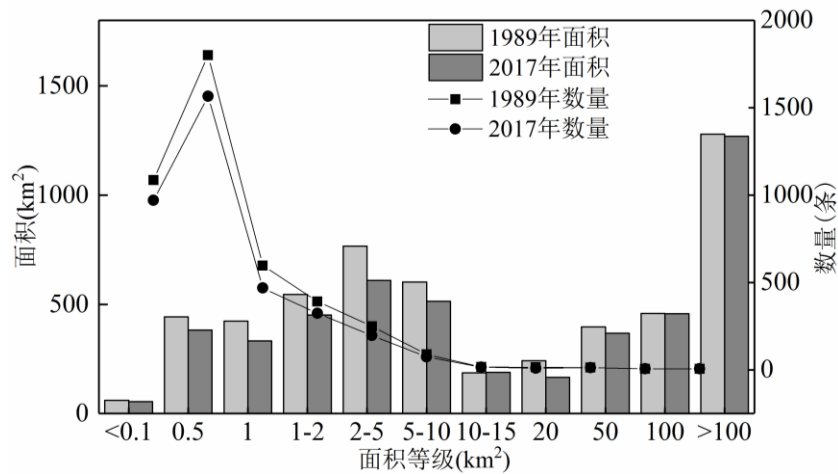


图 3.23 南天山不同面积等级的冰川数量和面积变化

Fig 3.24 Change in the number and area of glaciers in different area sizes in southern Tianshan Mountains

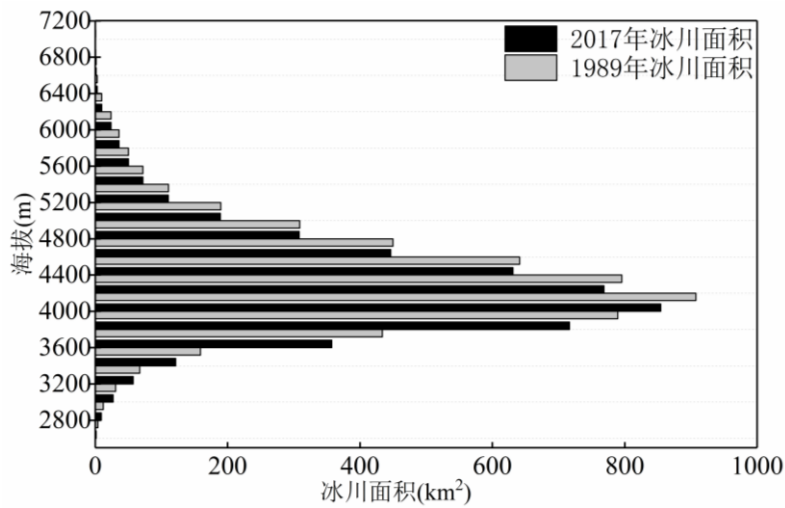


图 3.24 南天山 1989-2017 年各海拔冰川面积变化

Fig 3.24 Glacier Area Change at Various Altitudes in the Southern Tianshan Mountains from 1989 to 2017

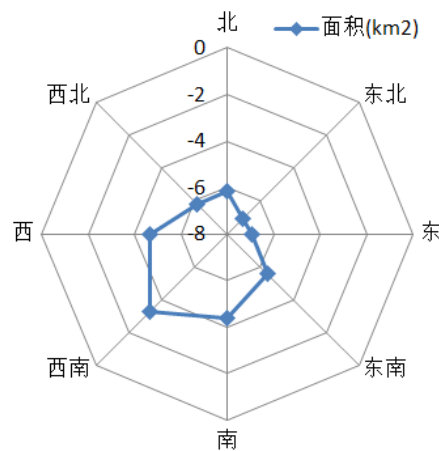


图 3.25 1989-2017 年南天山不同朝向冰川面积变化百分比

Fig 3.25 Percentage change of different facing glaciers in southern Tianshan Mountains from 1989 to 2017

利用第二次冰川编目数据对天山南部 1989-2017 年冰川变化进行分析（表 3.2）。对比结果表明，从 1989-2017 年，天山南部地区冰川持续退缩，1989-2009 年的冰川退缩速率比 2009-2017 年冰川退缩速率相当，冰川退缩趋势趋于缓和。从 1989-2009 年，天山南部冰川总面积减少了 251.8 km²，占 1980 年冰川总面积的 5.16%，年均减少率为 0.418% a⁻¹。2009-2017 年，冰川面积减少了 209.6 km²，占 2009 年冰川总面积的 4.51%，年减少率为 0.402% a⁻¹。

3.4 中天山冰川分布及变化

3.4.1 中天山冰川分布现状

研究表明，2017 年中天山共有冰川 844 条，面积 355 81 km²，平均冰川规模 0.42 km²。从冰川面积看（图 3.18），中天山冰川数量以面积小于 0.5 km² 的冰川为主，面积以 1-5 km² 的冰川为主。在冰川数量方面，以面积小于 0.5 km² 的冰川为主，冰川数量为 681 条，占中天山冰川总数量的 80.68%；随着面积等级的增大，面积大于 1.0 km² 的冰川数量迅速减少，而面积等级大于 15 km² 的冰川仅有 1 条。面积大于 1 km² 而小于 5 km² 的冰川面积为 206.34 km²，其冰川面积占中天山部冰川总面积的 57.99%。虽然面积小于 1 km² 的冰川数量为 764 条，冰川数量占中天山冰川总数量的 90.52%，但总面积却为 614.99 km²，占天山南部冰川总面积的 43.77%。

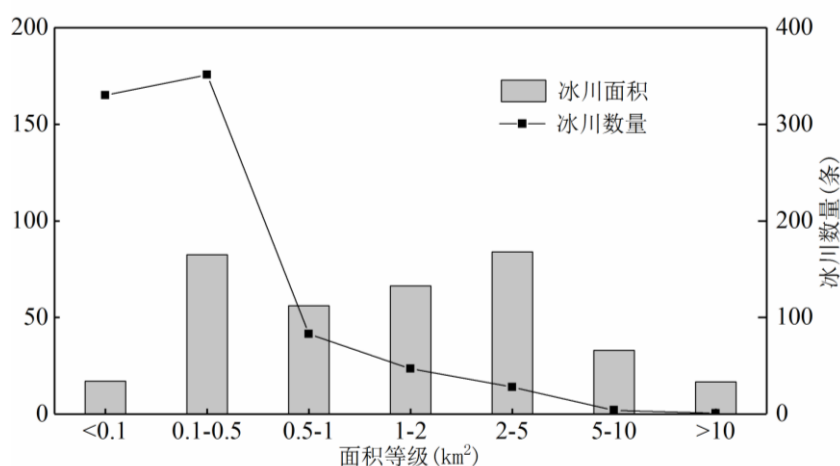


图 3.26 中天山不同面积等级的冰川数量和面积

Fig 3.26 The number and area of glaciers of different sizes in the Central Tianshan Mountains

基于数字高程模型数据，以 100m 为间距对中天山冰川进行海拔统计分析，发现中天冰川分布在 3400-4800 m 之间，冰川分布呈正态分布。其中在海拔

3800-4200 m 分布的冰川面积约占冰川总面积的 74.85%，为冰川集中发育区。冰川最低海拔为 3385 m 最高海拔为 4798 m，中天山冰川平均中值面积海拔为 4055.52 m。

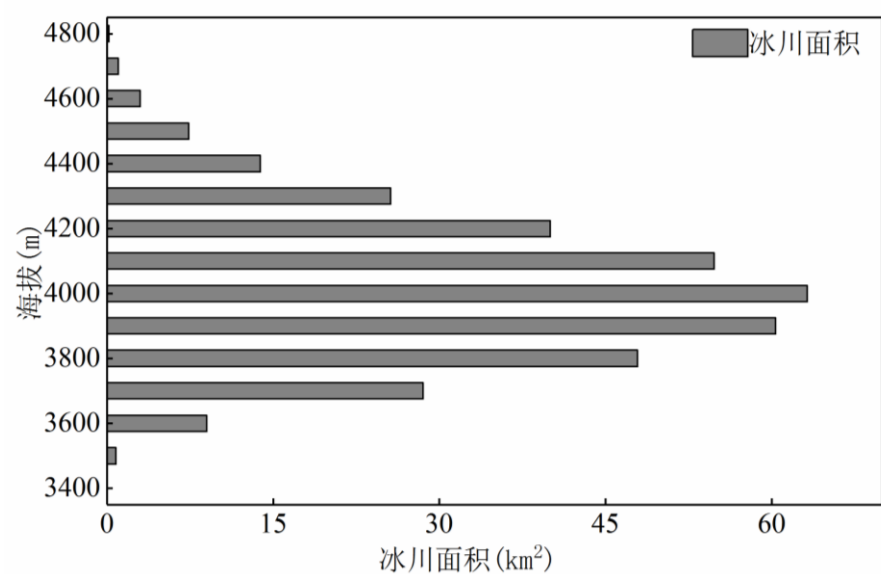


图 3.27 中天山不同海拔冰川分布

Fig 3.27 Distribution of Glaciers at Different Altitudes in the Middle Tianshan Mountains

3.4.2 中天山冰川变化

中天山两次冰川编目对比表明，1989-2017 年期间，冰川面积减少 66.58 km² (16.53%)，年平均面积退缩率为 0.55% a⁻¹。从冰川面积变化的相对退缩速度来看，中天山冰川在各个面积等级内均有退缩，但退缩幅度差异较大，而且冰川面积变化以大于 0.5 km² 的冰川为主。中天山冰川面积介于 0.5-2 km² 的冰川变化幅度较大，冰川面积减少了 34.34 km²，减少面积占总减少面积的 54.58%。面积等级大于或等于 10 km² 的冰川面积变化较小，冰川面积共减少了 5.26 km²，虽然面积等级小于 0.5 km² 的冰川多达 681 条，但冰川面积减少了 7.12 km²，占该山区冰川面积总损失的 10.69% (图 3.23)。中天山面积大于 10 km² 的冰川，冰川数量没有发生变化，但面积退缩较大。主要的原因是大冰川面积大，但所处海拔较低，气候变化导致的冰川面积退缩较多。

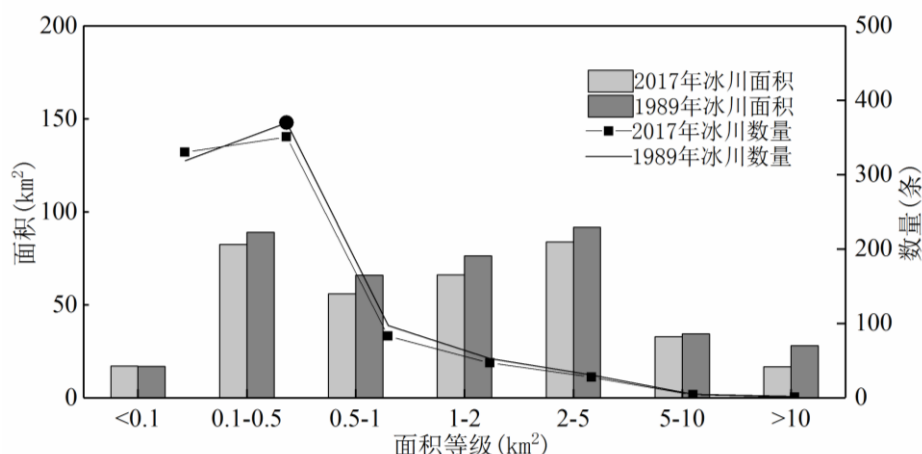


图 3.28 中天山不同面积等级的冰川数量和面积变化

Fig 3.28 Variations in the number and area of glaciers of different sizes in the Central Tianshan Mountains

从近 28 年中天山各个海拔带冰川面积退缩变化来看，中天山冰川在各个海拔带内均呈现退缩趋势，但是各个海拔带退缩幅度却不相同。在海拔 3300 m 以下，冰川已经全部消失，消失的面积为 0.008 km^2 ，退缩幅度最大。其次是在 3400-3500 m，冰川退缩幅度为 80%，冰川面积减少 2.24 km^2 。随着海拔的上升，冰川在各个海拔的退缩幅度逐渐减小，其中在海拔 4600 m 左右退缩幅度最小。从面积变化来看，在 3600-4100m 之间，冰川面积减少最多，减少面积为 -41.8 km^2 ，减少面积占总减少面积的 62.81%。面积减少最少的在海拔 4700 m 以上，冰川面积基本没有变化。冰川面积变化的最大值出现在海拔 3800 m 附近，面积减小了 9.95 km^2 （图 3.17）。

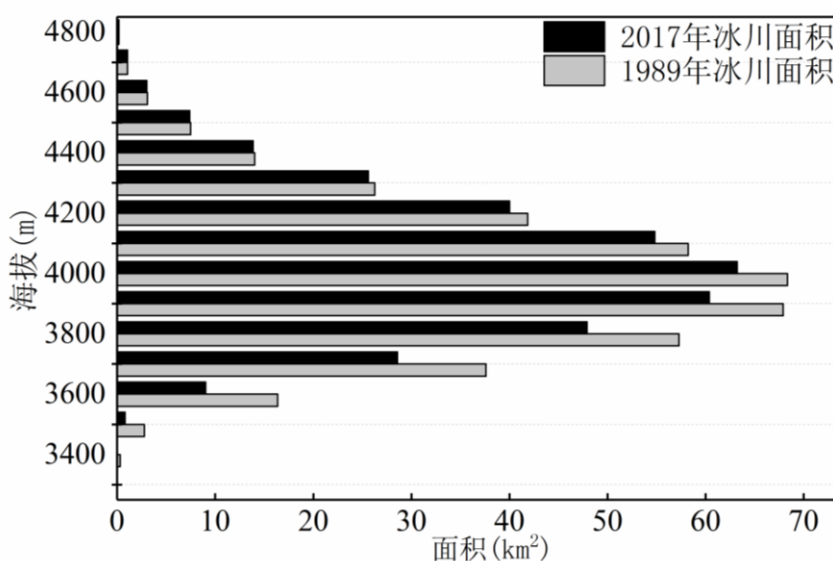


图 3.29 中天山不同海拔冰川变化

Fig 3.29 Glacier Changes at Different Altitudes in the Middle Tianshan Mountains

坡向通过影响降水量和热量条件而使冰川规模发生变化^[1]。从不同朝向来
看，变化规律与其分布规律一致。其中东北朝向冰川面积变化幅度最大为 32%，
冰川面积减少为-23.62 km²。其次是东朝向和西朝向，面积退缩幅度次之，减少
面积分别为-6.79 km²和-8.27 km²。西南朝向最小，仅-4.53 km²。

3.5 典型山地冰川变化对比

随着遥感技术的提高，更高分辨率的遥感影像数据在冰川调查的大区域中应
用^[79-81]。中国西部自北向南依次分布有阿尔泰山、天山、帕米尔高原、喀喇昆仑
山、昆仑山和喜马拉雅山 14 座山系，这些山系山体高大，有利于冰川发育的水
热条件，从而发育了众多冰川。本研究选取了西部典型山地冰川的变化与本研究
的天山冰川做了对比。（表 3-3）研究表明，天山在 14 个山系中冰川面积的退缩
速率仅次阿尔泰和念青唐古拉山，退缩速率为 0.52% a⁻¹。而祁连山冰川面积的退
缩速率为-0.47% a⁻¹，东帕米尔、青藏高原内陆流域和贡嘎山冰川面积退缩速率
接近为-0.25% a⁻¹--0.28% a⁻¹之间，西昆仑冰川面积退缩速率最小为-0.09% a⁻¹

天山冰川较大的面积退缩率，主要受气温和降水的影响，但也与冰川平均规
模也有关。研究区域中南天山平均冰川规模最大为 1.58 km²，东天山平均冰川规
模最小为 0.54 km²，研究表明冰川越小，对气候变化更敏感。因此，东天山面积
减少、末端退缩率越快。

表 3-3 中国西部典型山地冰川变化对比

Tab 3-3 Comparison of glacier changes in typical mountainous regions in western China

山系	时间段	面积变化	面积退缩率	退缩速率	资料来源
阿尔泰山	1960-2009	-104.61	-36.91	-0.75	[30]
祁连山	1956-2005	-417.15	-20.7	-0.47	[27]
东帕米尔	1963-2009	-248.7	-10.8	-0.25	[79]
西昆仑	1970-2010	-95.06	-3.37	-0.09	[80]
念青唐古拉 山	1970-2014	-679.5	-24.91	-0.71	[81]
天山东	1989-2017	-55.66	-18.01	-0.64	本研究
北天山	1989-2017	-316.03	-14.56	-0.52	本研究
南天山	1989-2017	-441.46	-9.42	-0.41	本研究
中天山	1989-2017	-66.58	-16.53	-0.55	本研究

3.6 小结

通过利用比值法和人工修订法对遥感影像数据提取了 1989-2017 年中国天山冰川数据, 认为从 1989/90~2016/17 年, 总体上处于退缩状态, 冰川面积减少 879.73 km^2 , 退缩速率达到 $-0.52\% \text{ a}^{-1}$ 。在北天山、南天山、东天山和中天山四个区域中冰川面积年均变化速率具有一定的差异性, 其中东天山冰川面积变化最快, 冰川面积减少了 55.66 km^2 , 退缩速率达到 $-0.64\% \text{ a}^{-1}$; 其次是中天山, 冰川面积减少了 66.58 km^2 , 退缩速率为 $-0.55\% \text{ a}^{-1}$; 北天山冰川面积减少了 316.03 km^2 , 年均退缩速率为 $-0.52\% \text{ a}^{-1}$; 南天山冰川面积变化幅度最慢, 面积减少了 441.46 km^2 , 退缩速率仅为 $-0.41\% \text{ a}^{-1}$ 。在不同海拔高度上冰川面积变化呈正态分布; 冰川面积的变化与冰川朝向有关, 其中北朝向冰川变化最大, 南和东南朝向冰川面积变化最小。通过对比不同时期的冰川编目数据, 天山冰川持续退缩并呈加速退缩的趋势。对比中国西部典型山地冰川变化情况发现, 中国天山冰川面积年均退缩速率在中国 14 个山系中处于第三, 面积退缩速率为 $-0.52\% \text{ a}^{-1}$, 仅次于阿尔泰山和念青唐古拉山, 是山地冰川中退缩较为强烈的山脉之一。

4 中国天山冰川高程变化

4.1 东天山冰川高程变化

本研究以 SRTM 为基准数据, 通过 ICESat-GLAS 2003-2009 年每期任务的高程数据与对应的 SRTM 高程相减, 得到每期 GLAS 相对于 SRTM (2000 年) 的高程变化 (Δh), 计算在 GLAS 采集任务期间 (2003-2009 年) 冰川高程随时间的变化趋势 ($\Delta h/\Delta t$)。要得到真实准确的地形高程变化, 需要将 ICESat 数据和数字高程模型数据进行转换^[82], 转换公式如下:

$$\text{ICESat}_{\text{WGS84}} = \text{ICESat}_{\text{TOPEX}} - \text{ICESat}_{\text{geoid}} - \text{Offset} \quad (4-1)$$

式中: $\text{ICESat}_{\text{TOPEX}}$ 和 $\text{ICESat}_{\text{geoid}}$ 以及 Offset 都可以在 ICESat 元数据中获取, 其中 Offset 为 TOPEX 椭球体与 WGS84 椭球体的垂直偏差, Offset 采用常数 0.7 m ^[75,76]。为了消除季节降雪对 GLAS 高程变化趋势的影响, 本研究将 GLAS 任务期的 2-4 月划为冬季, 10-12 月划为秋季, 本研究只考虑了冬季或者秋季两个季节, 虽然在高程配准时保留了 6-9 月 (夏季) 的光斑点, 但是夏季的光斑点不参与高程变化的分析。为了减小不确定性, 本研究只考虑坡度小于 50° 的 GLAS 光斑点。本研究利用 2007 年冰川编目数据提供的中值面积高程作为物质平衡线高度, 将研究区冰川划为积累区和消融区。

4.1.1 冰面高程变化计算

首先将 2003-2009 年 ICESat 轨迹点的高程值与 2000 年的 SRTM 高程值相减, 得到 ΔH , 为 2003—2009 年期间冰川表面的高程变化。计算如式 (4-2) 所示。

$$\Delta H = H_{\text{ICESat}} - H_{\text{SRTM}} + P_{\text{SRTM}} \quad (4-2)$$

式中: ΔH 为冰面高程变化, H_{ICESat} 为 ICESat 脚点转换后的高程; H_{SRTM} 为 SRTM 高程; P_{SRTM} 表示 SRTM 对冰雪的穿透率。然后利用式 (4-3) 计算冰川厚度的年均高程变化速率

$$\bar{V} = \frac{\Delta H}{Y_{\text{ICESat}} - Y_{\text{SRTM}}} \quad (4-3)$$

其中: $\bar{V}$ 为冰川厚度高程年均变化速率 $\bar{V}$ 为 ICESat 卫星扫描轨迹当年的年份; Y_{SRTM} 为年份为 2000 年。

4.2 东天山冰川高程变化

4.2.1 研究结果

通过对东天山地区不同年份的 ICESat 高程数据和数字高程模型数据的计算,得到 2003—2008 年间 ICESat 每条轨迹上脚点在东天山冰川表面的高程变化信息(表 4.1)。ICESat 2003-2008 年冰川区域的高程点信息。

表 4.1 ICESat 2003-2008 年东天山冰川高程变化

Tab 4.1 ICESat Changes in Glacier Heights in Eastern Shandong Province, 2003-2008

日期	Icesat 点数	海拔分布 /m	冰面高程 变化 (m)	变 率 (m/a)	季节
2003-02-27--2003-03-27	61	3592-4338	-6.46	-1.62	冬季
2003-10-01--2003-11-17	82	3616-4730	-5.46	-1.36	秋季
2004-02-17--2003-03-31	26	3598-4266	-5.16	-1.03	冬季
2004-10-05--2004-11-03	11	3736-4230	-4.46	-0.89	秋季
2005-02-20--2005-03-20	12	3508-4059	-4.44	-0.74	冬季
2005-10-23--2005-11-12	18	3742-4300	-5.19	-0.86	秋季
2006-03-12--2003-03-18	12	3740-4240	-3.16	-0.45	冬季
2006-10-26--2006-11-16	19	3574-4212	-4.3	-0.61	秋季
2007-03-13--2007-04-10	30	3533-4265	-6.48	-0.81	冬季
2007-10-04--2007-11-01	28	3483-4130	-5.7	-0.71	秋季
2008-02-18--2008-03-14	19	3532-4025	-3.36	-0.37	冬季
2008-10-05--2008-12-10	26	3736-4180	-6.06	-0.67	秋季

根据 ICESat 不同轨迹的时间,获取了 2003—2009 年东天山秋季和冬季 ICESat 斑点的冰川厚度高程变化数据。研究结果显示(表 4.1),东天山地区冰川表面高程在不同研究时期内均出现了明显下降,且冰川退缩趋势显著。天山东部地区冰川表面高程在 2003-2008 年间平均下降了 5.02 ± 0.31 m,年平均下降 0.84 ± 0.07 m a⁻¹。东天山冰川区域的冰川高程年均变化速率介于 (-0.37 ± 0.79) m/a- (-1.62 ± 0.36) m/a 之间,但在各个研究时段内冰川高程变化速率均不相同,其中 2003 年和 2004 年冰川厚度变化速率最大,分别为 -1.62 ± 0.36 m/a 和 0.89 ± 0.31 m/a。2008 年和 2006 年冰川厚度变化速率最小,2000-2008 年和 2000-2006 年冰川高程变化速率分别为 -0.37 ± 0.47 和 -4.5 ± 0.36 m/a。

由图 4.2 所示东天山冰川高程变化速率在各季节的变化,秋季和冬季高程变

化速率呈减小趋势。其中冬季的年均变化速率在 -0.84 ± 0.53 m/a，秋季的年均变化速率在 0.85 ± 0.47 m/a，两者变化速率较为接近。在 2000-2007 年冰川高程变化速率突然呈现增高趋势。研究区 2007 年冰川面积为 261.07 km^2 ，将冰川表面高程变化转换为冰川体积变化或冰川物质平衡变化，东天山冰川近 2003-2009 年体积减少 $5.73\pm0.28\text{ km}^3$ ，年物质变化为 $-0.12\pm0.01\text{ km}^3\text{ w.e. a}^{-1}$ ，年平均冰川物质平衡为 $-0.14\pm0.04\text{ m w.e. a}^{-1}$ 。根据天山东部庙儿沟地区榆树沟 6 号冰川的观测数据显示 1972-2011 年该冰川均减薄 20 m，年均减薄 $0.51\text{ m}^{[47]}$

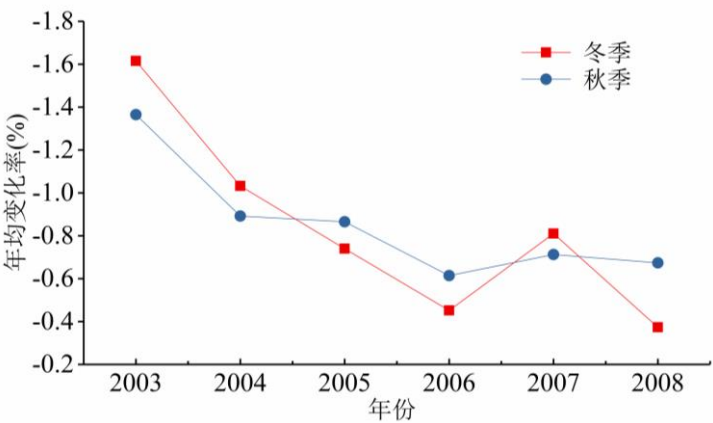


图 4.1 2003—2008 年东天山冰川不同季节高程年均变化率

Fig4.1 Annual average rate of change of elevation of different glaciers in the eastern part of the Tianshan Mountains, 2003-2008

4.3 北天山西段冰川高程变化

第四章研究显示，在 1989-2017 年间北天山西段地区的冰川面积持续减小，采用两期冰川编目融合反映研究区内 1989 年以来的最大冰川面积。根据陈安安等人研究结果显示^[83]，SRTM 数据 C 波段在北天山西段平均穿透 0.8 m。

通过对北天山西段 2003-2009 年 ICESat 高程数据和数字高程模型数据的计算，得到 2003—2009 年间 ICESat 每条轨迹上脚点在北天山西段冰川表面的高程变化信息（表 4.1）。ICESat 2003-2009 年冰川区域的高程点信息。

表 4.2 ICESat 2003-2009 年北天山西段冰川区域的高程变化

Tab 4.2 Changes in elevation of the glacier area in the northern Tianshan Mountains, ICESat, 2003-2009

日期	Icesat 点数	海拔分布 /m	冰面高 程变化 (m)	变 率 (m/a)	季节
2003-02-21--2003-03-28	241	3623-4815	-1.26	-0.32	冬季
2003-10-03--2003-11-18	156	3333-4609	-4.41	-1.1	秋季

2004-02-20--2003-03-21	123	3180-4539	-4.32	-0.86	冬季
2004-10-04--2004-11-08	80	3410-4730	-4.36	-0.87	秋季
2005-02-21--2005-03-23	137	3355-4623	-4.84	-0.81	冬季
2005-10-24--2005-11-23	150	3317-4630	-4.17	-0.7	秋季
2006-02-25--2003-03-27	133	3294-4708	-3.19	-0.46	冬季
2006-10-27--2006-11-27	155	3275-4612	-4.94	-0.71	秋季
2007-03-15--2007-03-31	84	3426-4633	-4.88	-0.61	冬季
2007-10-05--2007-11-04	211	3314-4554	-5.36	-0.67	秋季
2008-02-19--2008-03-21	103	3347-4575	-4.27	-0.47	冬季
2008-10-06--2008-12-16	193	3140-4630	-5.58	-0.62	秋季
2009-03-12--2009-04-05	113	3227-4187	-1.16	-0.12	冬季
2009-10-04--2009-10-07	55	3371-4097	-5.58	-0.56	秋季

4.3.1 研究结果

根据 ICESat 不同轨迹的时间, 获取了 2003-2009 年北天山西段秋冬季节 ICESat 斑点的冰川厚度高程变化数据。研究表明 (表 4.2), 北天山西段冰川表面高程在不同研究时期内均出现了明显下降, 且冰川退缩趋势显著。天山北部地区冰川表面高程在 2003-2009 年间平均下降了 4.16 ± 0.31 m, 年平均下降 0.63 ± 0.07 m a⁻¹。北天山西段冰川区域的冰川高程年均变化速率介于 (-0.12 ± 0.29) m/a- (-1.10 ± 0.46) m/a 之间, 2003 年冰川厚度变化速率最大, 2000-2003 年冰川平均高程变化速率为 -1.10 ± 0.46 m/a。2009 年冰川厚度变化速率最小, 2000-2009 年冰川高程变化速率为 -0.12 ± 0.27 m/a。

由图 4.2 所示北天山西段冰川高程变化速率在各季节的变化, 秋季和冬季高程变化速率均呈现减小趋势。其中冬季的年均变化速率在 -0.52 ± 0.33 m/a, 秋季的年均变化速率在 -0.74 ± 0.27 m/a。在 2000-2007 年冬季冰川高程变化速率突然呈现增高趋势。研究区 2007 年冰川面积为 1974.5 km², 将冰川表面高程变化转换为冰川体积变化或冰川物质平衡变化, 北天山西段冰川在 2003-2009 年间冰川体积减少 5.73 ± 0.28 km³, 将减少的体积转换为年物质变化, 该地区 2003 -2009 年年均物质变化为 -0.12 ± 0.01 km³ w.e. a⁻¹。根据天山北部乌鲁木齐河源一号冰川的观测数据显示 1972-2011 年该冰川均减薄 20 m, 年均减薄 0.51 m

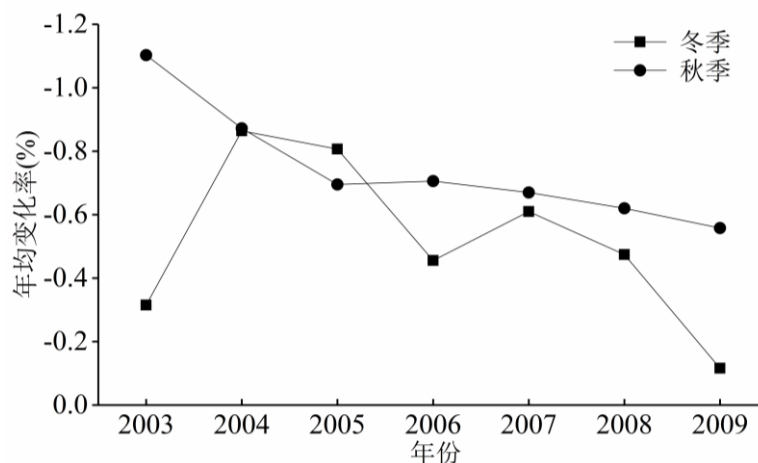


图 4.2 2003—2008 年天山北部冰川不同季节高程年均变化率

Fig 4.2 Annual average rate of change in elevation of glaciers in northern Tianshan Mountains, 2003-2008

4.4 南天山冰川冰量变化

第四章研究显示，在 1989-2017 年间南天山地区的冰川面积持续减小，但有部分冰川呈前进状态，因此采用三期冰川编目融合反映研究区内 1980 年以来的最大冰川面积，详细研究区最大冰川面积为 788.28 km²。SRTM 数据 C 波段南天山地区平均穿透 1.8 m^[83]。

表 4.3 ICESat 各期任务南天山冰川区域的高程变化信息

Tab 4.3 Elevation changes in the glacier area in southern Tianshan Mountains during 2003-2009 ICESat

日期	Icesat 点数	海拔分布/m	冰面高程 变化 (m)	变率 (m/a)	季节
2003-02-24--2003-03-26	119	3555-4602	-2.46	-0.62	冬季
2003-10-07--2003-11-18	420	3191-5830	-1.15	-0.29	秋季
2004-02-18--2003-03-18	326	2671-6046	-2.58	-0.52	冬季
2004-10-05--2004-11-08	244	2736-5372	-2.32	-0.46	秋季
2005-02-17--2005-03-23	370	2936-5194	-3.54	-0.59	冬季
2005-10-22--2005-11-23	230	3561-5833	-2.14	-0.36	秋季
2006-02-23--2003-03-27	242	2667-5257	-3.62	-0.52	冬季
2006-10-26--2006-11-27	199	2685-5583	-3.41	-0.49	秋季
2007-03-12--2007-04-13	357	3325-5265	-4.48	-0.56	冬季
2007-10-06--2007-11-04	257	3505-5272	-4.07	-0.51	秋季
2008-02-18--2008-03-21	366	3496-5500	-2.78	-0.31	冬季
2008-10-05--2008-12-17	417	2836-5590	-3.17	-0.35	秋季
2009-03-09--2009-04-10	165	3328-5289	-1.86	-0.19	冬季
2009-10-01--2009-10-06	31	3378-4935	-1.72	-0.17	秋季

4.4.1 研究结果

根据 ICESat 不同轨迹的时间, 获取了 2003—2009 年南天山地区秋冬季节 ICESat 斑点的冰川厚度高程变化数据。研究结果表明 (表 4.3), 南天山地区冰川表面高程在不同研究时期内均出现了明显下降, 且冰川退缩趋势显著。天山南部地区冰川表面高程在 2003-2009 年间平均下降了 2.8 ± 0.61 m, 年平均下降 $0.42 \pm 0.17 \text{ m a}^{-1}$ 。南天山地区冰川区域的冰川高程年均变化速率介于 $(-0.17 \pm 0.39) \text{ m/a}$ - $(-0.62 \pm 0.56) \text{ m/a}$ 之间, 2003 年冰川厚度变化速率最大, 2000-2003 年冰川平均高程变化速率为 $-0.62 \pm 0.56 \text{ m/a}$ 。2009 年冰川厚度变化速率最小, 2000-2009 年冰川高程变化速率为 $-0.17 \pm 0.39 \text{ m/a}$ 。

由图 4.3 所示南天山地区冰川高程变化速率在各季节的变化, 秋季和冬季高程变化速率均呈现减小趋势。其中冬季的年均变化速率在 $-0.47 \pm 0.13 \text{ m/a}$, 秋季的年均变化速率在 $-0.37 \pm 0.27 \text{ m/a}$ 。在 2000-2007 年冬季冰川高程变化速率突然呈现增高趋势。研究区 2017 年冰川面积为 4793.2 km^2 , 将冰川表面高程变化转换为冰川体积变化或冰川物质平衡变化, 南天山冰川在 2003-2009 年间冰川体积减少 $5.73 \pm 0.28 \text{ km}^3$, 将减少的体积转换为年物质变化, 该地区 2003 -2009 年年均物质变化为 $-0.11 \pm 0.01 \text{ km}^3 \text{ w.e. a}^{-1}$ 。根据南天山托木尔峰地区青冰滩 72 号冰川的观测数据显示 1964-2008 年该冰川冰舌平均减薄 9.59 m, 年均减薄 $0.22 \text{ m}^{[59]}$

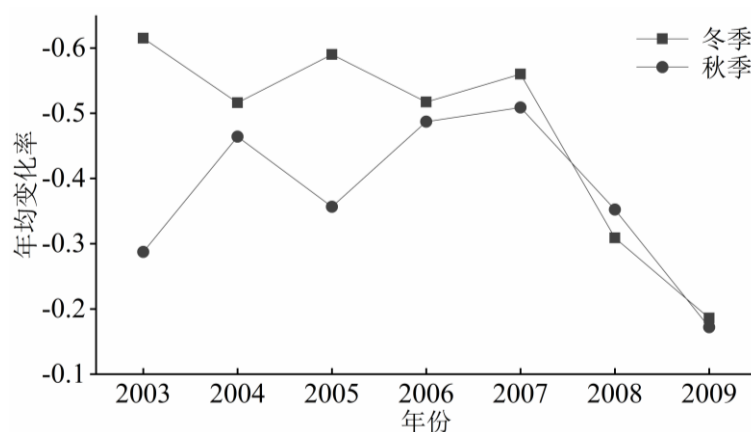


图 4.3 2003—2009 年天山南部冰川不同季节高程年均变化率

Fig 4.3 Annual average rate of change in elevation of glacier in southern Tianshan Mountains from 2003 to 2009

南天山地区, 在不同高度海拔上, 冰川高程变化有所差异, 在海拔 3800 m 以下, 冰川高程变化随着海拔的上升呈增加趋势, 在海拔 4000-5000 m, 高程的年均变化率随着海拔的上升呈减小趋势, 在海拔 5000 m 以上, 高程年均变化率

为正值。

对于南天山地区，在不同高度海拔上，冰川高程变化有所差异（图 4.4），可能的原因是表碛的存在，对冰川消融有加速或抑制作用。根据前人的研究结果可知[]，表碛对冰川消融具有双重作用：（1）当表碛较厚时，向下传导的热量很大程度上被表碛所吸收从而抑制冰川消融^[84,85]；（2）表碛可以减少表面发射和促进辐热量的吸收。当冰川表碛厚度小于 3-8 cm 时，其具有非常小的热容，内部水分具有很高传导率，从而促进冰川消融^[86-88]。另一方面，由于冰川表面强烈运动或者跃动造成的物质重新分配，弥补了该海拔范围内的物质损失；另一方面，由于相同海拔的裸冰区面积较小，可能带来一定的误差。

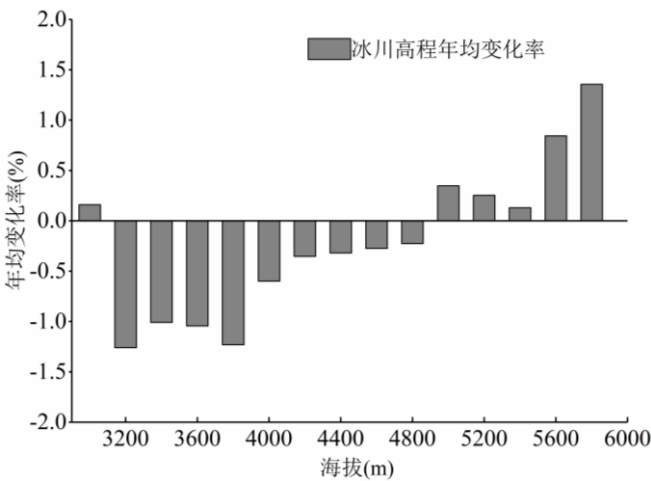


图 4.4 天山南部冰川高程年均变化率随海拔的变化

Figure 4.4 Annual average change rate of elevation of glaciers in the southern Tianshan Mountains

4.5 小结

本研究以 SRTM 为基准数据，通过 ICESat-GLAS 2003-2009 年每期任务的高程数据与数字高程模型数据相减，得到冰川表面相对于 2000 年的高程变化(dh)，计算在 GLAS 采集任务期间(2003-2009 年)冰川高程随时间的变化趋势(dh/dt)，进而估算该时间段的冰面高程的变化趋势。冰川表面高程在不同研究时期内均出现了明显下降，平均下降了 6.42 m。研究区内冰川高程变化空间差异特征明显，其中南天山冰川高程变化最小，仅为 $-0.42 \pm 0.17 \text{ m a}^{-1}$ ，北天山冰川高程年均变化居中，为 $-0.63 \pm 0.07 \text{ m a}^{-1}$ ，东天山冰川高程变化最大，达到 $-0.84 \pm 0.07 \text{ m a}^{-1}$ 。在不同高度海拔上，天山冰川物质平衡有所差异，可能的原因是表碛的存在，对冰川消融有加速或抑制作用。

5 中国天山冰川变化特征及原因

5.1 天山冰川变化特征

综上所述，可以把中国天山冰川变化特征总结如下：

(1) 在过去 28 年中中国天山冰川，总体上处于退缩状态，冰川面积减少 879.73 km^2 ，退缩速率达到 $-0.52\% \text{ a}^{-1}$ 。在北天山、南天山、东天山和中天山四个区域中冰川面积年均变化速率具有一定的差异性，其中东天山冰川面积变化最快，冰川面积减少了 55.66 km^2 ，退缩速率达到 $-0.64\% \text{ a}^{-1}$ ；其次是中天山，冰川面积减少了 66.58 km^2 ，退缩速率为 $-0.55\% \text{ a}^{-1}$ ；北天山冰川面积减少了 316.03 km^2 ，年均退缩速率为 $-0.52\% \text{ a}^{-1}$ ；南天山冰川面积变化幅度最慢，面积减少了 441.46 km^2 ，退缩速率仅为 $-0.41\% \text{ a}^{-1}$ 。在不同海拔高度上冰川面积变化呈正态分布；冰川面积的变化与冰川朝向有关，其中北朝向冰川变化最大，南和东南朝向冰川面积变化最小。

(2) 在不同区域的不同流域，冰川面积变化也具有较大差异。通过对比不同时期的冰川编目数据，天山冰川呈现持续退缩的趋势。其中天山东段从 1989-2000 年冰川面积年减少率为 $0.62\% \text{ a}^{-1}$ ，2000-2009 年冰川面积年减少率为 $0.71\% \text{ a}^{-1}$ ，2009-2017 年冰川面积年减少率为 $0.67\% \text{ a}^{-1}$ 。天山南部地区从 1989-2009 年冰川面积年减少率为 $0.41\% \text{ a}^{-1}$ ，2009-2017 年冰川面积年减少率为 $0.40\% \text{ a}^{-1}$ 。

(3) 对比中国西部典型山地冰川变化情况发现，中国天山山脉冰川面积年均退缩速率为 $-0.52\% \text{ a}^{-1}$ ，是 14 个山系中退缩较为强烈的山脉之一，仅次于阿尔泰山和念青唐古拉山。而祁连山冰川面积的退缩速率为 $-0.47\% \text{ a}^{-1}$ ，东帕米尔、青藏高原内陆流域和贡嘎山冰川面积退缩速率接近为 $-0.25\% \text{ a}^{-1}$ -- $-0.28\% \text{ a}^{-1}$ 之间，西昆仑冰川面积退缩速率最小为 $-0.09\% \text{ a}^{-1}$ 。

(4) 天山 2003-2009 年冰川表面高程在不同研究时期内均出现了明显下降，平均下降了 3.99 m 。天山东段冰川表面高程在 2003-2009 年间平均下降了 5.02 m ，天山北部冰川表面高程在 2003-2009 年间平均下降了 4.16 m ，天山南部地区冰川表面高程在 2003-2009 年间平均下降了 2.8 m 。在不同高度海拔上，天山冰川高程变化有所差异，可能的原因是表碛的存在，对冰川消融有加速或抑制作用。

5.2 冰川变化原因

冰川区的气候变化直接影响着冰川的物质消融和积累，而气温和降水两个气

候要素与冰川变化关系最为密切。分析表明：从 1960-2013 年，整个新疆地区气温变化在 6.2-9.0℃ 气候倾向率 0.32℃/10a，年降水量变化在 93.2-205.8 mm，整体呈现上升趋势，气候倾向率为 8.23 mm/10a^[25]。在中天山一带 2003-2014 年间气温升温速率达到 0.4-0.8℃/10a，而西天山温度升高不明显，温度的快速升高加速了冰川的消融^[89]。

气候变化的空间和时间特征对冰川变化的区域差异特征有着重要影响^[90-92]。对乌鲁木齐一号冰川物质平衡模拟显示，气温变化 $\pm 1^\circ\text{C}$ 或降水变化 $\pm 35\%$ ，对物质平衡线高度产生 $140\pm 125\text{ m}$ 的影响^[93]。对扎当冰川的能量与物质平衡模拟表明，冰川物质平衡对降水的变化更加敏感，降水变化 20%引起的物质平衡变化大于气温变化 1 K 引起的物质平衡变化^[94]。

冰川对气候变化的反应涉及一系列复杂的过程，大气条件，太阳辐射、气温、降水、风和云量等影响冰川表面的质量和能量平衡。由于气温与辐射平衡，湍流热有关，因此气温起主导作用交换，并控制固体与液体沉淀。经过数年至数十年的时间，冰川物质平衡的变化会导致体积和厚度的变化，从而通过内部变形和基底滑动影响冰的流动。这种动态反应最终导致冰川长度的变化，冰川舌的前进或后退以及冰的变厚或变薄。冰川属性，如坡度和高度测量（冰面积或质量随海拔分布）影响响应时间，通过它们影响不同海拔高度的冰流响应速度和体积。总冰川的物质除以年总积累（高于平衡线）的时间单位是合理的特征响应时间。响应时间的变化是观测冰川变化在空间和时间对气候变化的反应，区域气候变化的异质性是另一个主要原因。天山地区年降水的增加量无法弥补气温快速上升所导致的冰川物质损失量，是冰川退缩的主要原因，因此，气温升高也是该地区冰川面积快速退缩的主要因素。

为进一步分析中国天山冰川变化特征与气候变化的耦合性，本文选用 1961-2016 年月尺度的气温与降水格点数据，空间分辨率为 $0.5^\circ\times 0.5^\circ$ ，作为研究区冰川变化气候背景参考。本研究选取其中气温和降水，分析天山地区气温和降水的空间变化特征。

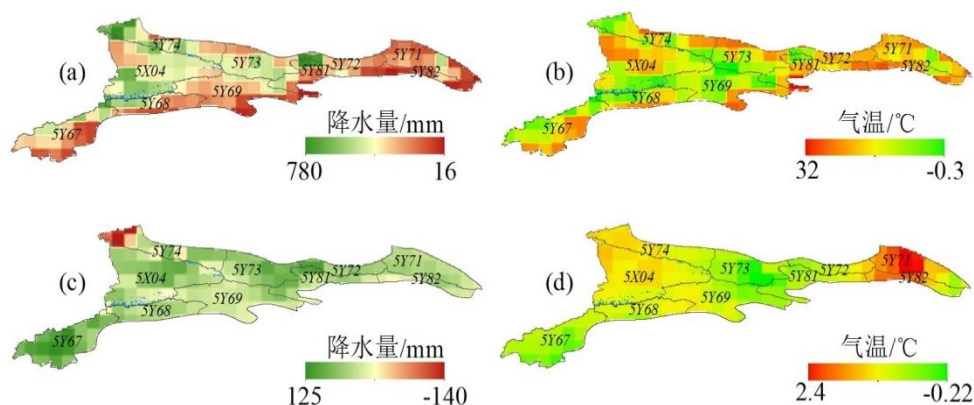


图 5.1 1961-2016 年天山地区气温与降水

(a) 年降水量; (b) 夏季年气温; (c) 年降水量增幅; (d) 夏季年气温增幅

Fig 5.1 Temperature and Precipitation in Tianshan Mountain from 1961 to 2016

已研究表明,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^[95]。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。从 1961-2016 年天山地区夏季气温与年降水(图 5.1)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。其中天山东部,夏季平均气温和夏季平均气温增幅均大于天山北部和天山南部地区。而降水受地形和水汽来源的影响,天山北部年均降水和年均降水增幅均大于天山东部地区且年均降水呈现由东向西递减的态势。这与天山东部冰川面积变化、冰川表面高程变化有较好的耦合性,天山北部冰川面积变化较小,表面高程减薄较小,而天山南部 1961-2016 年降水的增加显著,气温也较为稳定;天山东部冰川面积变化最大,表面高程减薄最大,而天山东段 1961-2016 年降水的增加速率最小,气温升温也最为明显。由此可知,天山东部冰川快速退缩是由于气温快速上升导致的冰川加速消融。而天山南部虽然气温也在升高,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,从而使该区域冰川退缩速率低于天山东部地区。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^[96]。

受局部气候、地形的影响,以及冰川规模、形态等综合作用,不同的冰川表现为不同的变化特征,即使在同一个局部地区或同一条冰川,不同的冰川或同一冰川的不同分支也可能表现为不同的物质损失。具体的原因较为复杂,但从冰川对区域气候变化的情况来看,气温的升高加速了该地区冰川的快速消融,降水增

多对冰川的补给会抵消一部分消融。不同的冰川由于规模、形态等的不同，导致冰川动力特征和物质平衡分布梯度存在差异，从而产生不同的变化结果。比如，风吹雪、雪崩、冰崩、跃动等对冰川的物质进行重新分配，会产生特殊的物质平衡现象，并且对冰川面积、长度等变化可能会产生一定的影响。

6 结论与展望

6.1 主要结论

本研究利用两次冰川编目数据分析了中国天山的冰川面积变化特征；基于 ICESat 和 SRTM DEM 数据对天山三个区域的冰川表面高程变化进行分析。本文获得的主要结论如下：

(1) 在过去 28 年中中国天山冰川，总体上处于退缩状态，冰川面积减少 879.73 km^2 ，退缩速率达到 $-0.52\% \text{ a}^{-1}$ 。在北天山、南天山、东天山和中天山四个区域中冰川面积年均变化速率具有一定的差异性，其中东天山冰川面积变化最快，冰川面积减少了 55.66 km^2 ，退缩速率达到 $-0.64\% \text{ a}^{-1}$ ；其次是中天山，冰川面积减少了 66.58 km^2 ，退缩速率为 $-0.55\% \text{ a}^{-1}$ ；北天山冰川面积减少了 316.03 km^2 ，年均退缩速率为 $-0.52\% \text{ a}^{-1}$ ；南天山冰川面积变化幅度最慢，面积减少了 441.46 km^2 ，退缩速率仅为 $-0.41\% \text{ a}^{-1}$ 。在不同海拔高度上冰川面积变化呈正态分布；冰川面积的变化与冰川朝向有关，其中北朝向冰川变化最大，南和东南朝向冰川面积变化最小。

(2) 在不同区域的不同流域，冰川面积变化也具有较大差异。通过对比不同时期的冰川编目数据，天山冰川呈现持续退缩的趋势。其中天山东段从 1989-2000 年冰川面积年减少率为 $0.62\% \text{ a}^{-1}$ ，2000-2009 年冰川面积年减少率为 $0.71\% \text{ a}^{-1}$ ，2009-2017 年冰川面积年减少率为 $0.67\% \text{ a}^{-1}$ 。天山南部地区从 1989-2009 年冰川面积年减少率为 $0.41\% \text{ a}^{-1}$ ，2009-2017 年冰川面积年减少率为 $0.40\% \text{ a}^{-1}$ 。

(3) 对比中国西部典型山地冰川变化情况发现，中国天山山脉冰川面积年均退缩速率为 $-5.23\% \text{ a}^{-1}$ ，是 14 个山系中退缩较为强烈的山脉之一，仅次于阿尔泰山。而祁连山冰川面积的退缩速率为 $-0.47\% \text{ a}^{-1}$ ，东帕米尔、青藏高原内陆流域和贡嘎山冰川面积退缩速率接近为 $-0.25\% \text{ a}^{-1}$ -- $-0.28\% \text{ a}^{-1}$ 之间，西昆仑冰川面积退缩速率最小为 $-0.09\% \text{ a}^{-1}$ 。

(4) 天山 2003-2009 年冰川表面高程在不同研究时期内均出现了明显下降，平均下降了 3.99 m 。天山东段冰川表面高程在 2003-2009 年间平均下降了 5.02 m ，天山北部冰川表面高程在 2003-2009 年间平均下降了 4.16 m ，天山南部地区冰川表面高程在 2003-2009 年间平均下降了 2.8 m 。在不同高度海拔上，天山冰川高程变化有所差异，可能的原因是表碛的存在，对冰川消融有加速或抑制作用。

6.2 不足与展望

本文基于两次冰川编目和卫星遥感影像对中国天山冰川面积进行了分析，同时利用 ICESat 数据对天山冰川冰面高程变化进行了分析。但还存在以下问题需要做进一步的补充研究：

（1）引入高质量、高分辨率的数据。对于冰川面积、冰川长度变化研究，可以利用高分辨率遥感卫星影像，如资源卫星、高分卫星数据进行冰川边界的识别提取，对现有的冰川编目进行评估，完成最新一期的冰川编目数据；利用美国解密的间谍卫星数据（Corona 和 Hexagon 卫星数据等）对第一次冰川编目进行评估，并完成历史时期的冰川编目，获取更长时间序列冰川变化。对于冰川冰量变化研究，可引入更多高水平分辨率和垂直精度的 DEM，还需要大力开展野外物质平衡监测、雷达测厚、以及机载 Lidar 地形测绘等，探讨小规模冰川的冰量变化情况。

（2）希望能用 ASTER 数据和 InSAR 数据分析天山近年来冰面的高程变，以期更好的研究天山近年来冰川高程变化。

（3）希望能用能量平衡模型来模拟冰川变化的物理过程，更好的理解冰川与气候之间的关系，使得对其进行深入的冰川变化的机制。

参考文献

- [1] 施雅风,黄茂恒, 姚檀栋,等. 中国冰川与环境:现在、过去和未来[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [2] 施雅风, 刘朝海,王宗太, 等. 简明中国冰川目录[M]. 上海: 上海科学普及出版社, 2005.
- [3] 谢自楚, 刘潮海. 冰川学导论[M]. 上海: 上海科学普及出版社, 2010.
- [4] 秦大河, 姚檀栋, 丁永健,等. 冰冻圈科学辞典[M]. 北京: 气象出版社, 2014.
- [5] Oerlemans J. Extracting a climate signal from 169 glacier records[J]. Science, 2005, 308(5722): 675-677.
- [6] Stocker T, Qin D, Plattner G, et al. Summary for Policymakers. [M]. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [7] Mernild S H, Lipscomb W H, Bahr D B, et al. Global glacier retreat: a revised assessment of committed mass losses and sampling uncertainties[J]. Cryosphere, 2013, 7(5): 1565-1577.
- [8] Gardner A S, Moholdt G, Cogley J G, et al. A reconciled estimate of glacier contributions to sea level rise: 2003 to 2009[J]. Science, 2013, 340(6134): 852-857.
- [9] Immerzeel W W, Van Beek L P, Bierkens M F. Climate change will affect the Asian water towers[J]. Science, 2010, 328(5984): 1382-1385.
- [10] Jacob T, Wahr J, Pfeffer W T, et al. Recent contributions of glaciers and ice caps to sea level rise[J]. Nature, 2012, 482(7386): 514-518.
- [11] Mirza M M Q, Warrick R A, Ericksen N J. The Implications of Climate Change on Floods of the Ganges, Brahmaputra and Meghna Rivers in Bangladesh[J]. Climatic Change, 2003, 57(3): 287-318.
- [12] Kaser G, Barry R G. Contribution potential of glaciers to water availability in different climate regimes[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2010, 107(47): 20223-20227.
- [13] Radić V, Bliss A, Beedlow A C, et al. Regional and global projections of twenty-first century glacier mass changes in response to climate scenarios from global climate models[J]. Climate Dynamics, 2014, 42(1-2): 37-58.
- [14] Radić V, Hock R. Glaciers in the Earth's Hydrological Cycle: Assessments of Glacier Mass and Runoff Changes on Global and Regional Scales[J]. Surveys in Geophysics, 2013, 35(3):

813-837.

- [15] 施雅风, 崔之久, 苏珍. 中国第四纪冰川与环境变化[M]. 河北: 河北科学技术出版社, 2006.
- [16] Cogley J G. A more complete version of the World Glacier Inventory[J]. *Annals of Glaciology*, 2010, 50(53): 32-38.
- [17] Kaser G, Cogley J G, Dyurgerov M B, et al. Mass balance of glaciers and ice caps: Consensus estimates for 1961–2004[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(19): 318-372.
- [18] Huss M. Present and future contribution of glacier storage change to runoff from macroscale drainage basins in Europe[J]. *Water Resources Research*, 2011, 47(7): 332-338.
- [19] Jansson P, Hock R, Schneider T. The concept of glacier storage: a review[J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 282(1): 116-129.
- [20] Stearns L A, Hamilton G S. Rapid volume loss from East Greenland outlet glaciers quantified using repeat stereo satellite imagery[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(5):247-260.
- [21] 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[J].*地理学报*, 2015, 70(1): 3-16
- [23] 秦大河,Thomas Stocker.IPCC 第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论[J].*气候变化研究进展*,2014,10(01):1-6.
- [23] Vaughan D G, Comiso J C, Allison I et al. Observations: Cryosphere//Stocker T F, Qin D, Plattner G K et al. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [24] 商沙沙,廉丽姝,马婷,张琨,韩拓.近 54 a 中国西北地区气温和降水的时空变化特征[J].*干旱区研究*,2018,35(01):68-76.
- [25] 热孜宛古丽 麦麦提依明,杨建军,等.新疆近 54 年气温和降水变化特征[J].*水土保持研究*,2016,23(02):128-133.
- [26] 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[J].*地理学报*, 2004, 59(6): 855-862.
- [27] 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[J].*地理学报*, 2015, 70(9):1402-1414.
- [28] 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[J].*地理学报*,2009, 64(11): 1319-1330.

- [29] 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.
- [30] 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[J].自然资源学报, 2012, 27(10): 1734-1745.
- [31] 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[J].冰川冻土, 2014,36(6) : 1376-1384.
- [32] 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[J].冰川冻土, 2004, 26(3):374-375.
- [33] Tian Hongzhen, Yang Taibao, et al. Climate change and glacier area variations in China during the past half century[J]. Journal of Mountain Science, 2016, 13(8):1345-1357.
- [34] Andreassen L, Paul F, K b A, Hausberg J. Landsat-derived glacier inventory for Jotunheimen, Norway, and deduced glacier changes since the 1930s[J]. The Cryosphere. 2008, 2(2):131-145.
- [35] Zemp M, Frey H, G ätnerroer I, et al. Historically unprecedented global glacier decline in the early 21st century[J]. Journal of Glaciology, 2015, 61(228):745-762.
- [36] 李珊珊,张明军,李忠勤,等. 1960-2009 年中国天山现代冰川末端变化特征[J].干旱区研究, 2013, 30(2): 378-384.
- [37] 陈辉,李忠勤,王璞玉,等.近年来祁连山中段冰川变化[J].干旱区研究, 2013, 30(4): 588-593.
- [38] 怀保娟,李忠勤,王飞腾,等.萨吾尔山木斯岛冰川厚度特征及冰储量估算[J].地球科学, 2016, 41(5): 757-764.
- [39] 姜珊. 基于遥感的东昆仑山冰川和气候变化研究[D].兰州大学, 2012.
- [40] 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[J].冰川冻土, 2007, 29(6): 869-873.
- [41] Shangguan D H, Bolch T, Ding Y J, et al. Mass changes of Southern and Northern Inylchek Glacier, Central Tian Shan, Kyrgyzstan, during ~1975 and 2007 derived from remote sensing data[J]. Cryosphere, 2015, 9(2):703-717.
- [42] Pieczonka T, Bolch T, Wei J, et al. Heterogeneous mass loss of glaciers in the Aksu-Tarim Catchment (Central Tien Shan) revealed by 1976 KH-9 Hexagon and 2009 SPOT-5 stereo imagery[J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 130(4):233-244.
- [43] Ke L, Ding X, Song C. Heterogeneous changes of glaciers over the western Kunlun

- Mountains based on ICESat and Landsat-8 derived glacier inventory[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 168:13–23.
- [44] Neckel N, Kropáček J, Bolch T, et al. Glacier mass changes on the Tibetan Plateau 2003–2009 derived from ICESat laser altimetry measurements[J]. *Environmental Research Letters*, 2014, 9(9):468-475.
- [45] Farinotti D, Huss M. An upper-bound estimate for the accuracy of volume-area scaling[J]. *Cryosphere*, 2013, 7(6):1707-1720.
- [46] 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[J].*地理学报*, 2006, 61(05): 482-490.
- [47] Pritchard H D. Asia's glaciers are a regionally important buffer against drought.[J]. *Nature*, 2017, 545(7653):169.
- [48] Bolch T. Hydrology: Asian glaciers are a reliable water source[J]. *Nature*, 2017, 545(7653):161.
- [49] Chen Y, Li W, Deng H, et al. Changes in Central Asia's Water Tower: Past, Present and Future[J]. *Sci Rep*, 2016, 6.
- [50] Huss M, Bookhagen B, Huggel C, et al. Towards mountains without permanent snow and ice[J]. *Earths Future*, 2017.
- [51] Farinotti D, Longuevergne L, Moholdt G, et al. Substantial glacier mass loss in the Tien Shan over the past 50 years[J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8(9).
- [52] 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[J].*地理学报*, 2011, 66(1): 38-46.
- [53] 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[J].*科学通报*, 2011, 56(32): 2708-2716.
- [54] 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[J].*地理学报*, 2006, 61 (5) : 482-490.
- [55] Glacial Area Changes in the Ili River Catchment (Northeastern Tien Shan) in Xinjiang, China, from the 1960s to 2009[J]. *Advances in Meteorology*, 2015, 2015(4):1-12.
- [56] 李忠勤. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川近期研究与应用[M]. 北京: 气象出版社, 2011.
- [57] 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[J].*干旱区研究*, 2015, 32(1):88-93.
- [58] 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[J].*水科学进*

- 展, 2014, 25(4):518-525.
- [59] 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[J].地理学报, 2012, 67(7):929-940.
- [60] 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[J].地理科学, 2010, 17(6):962-967.
- [61] 胡汝骥. 中国天山自然地理[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004: 1-14, 180-198.
- [62] 刘潮海, 丁良福. 中国天山冰川区气温和降水的初步估算[J]. 冰川冻土, 1988, (02):151-159
- [63] 中国冰川目录 (III) 天山山区 (伊犁河流域区) [M]. 北京: 科学出版社, 1986 1-158
- [64] 中国冰川目录 (III) 天山山区 (东部散流内流区) [M]. 北京: 科学出版社, 1986 1-83
- [65] 中国冰川目录 (III) 天山山区 (西南塔里木内流区) [M]. 北京: 科学出版社, 1986 1-187
- [66] 中国冰川目录 (III) 天山山区 (西北准格尔内流区) [M]. 北京: 科学出版社, 1986 1-206
- [67] 施雅风. 简明中国冰川目录[M]. 上海: 上海科学普及出版社, 2005.
- [68] 郭万钦, 刘时银, 余蓬春, et al. 利用流域边界和坡向差自动提取山脊线[J].测绘科学, 2011, 36(6): 210-212.
- [69] Guo W, Liu S, Xu J, et al. The second Chinese glacier inventory: data, methods and results[J]. Journal of Glaciology, 2015, 61(226): 357-372.
- [70] Zyl J J V. The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM): a breakthrough in remote sensing of topography[J]. Acta Astronautica, 2001, 48(5): 559-565.
- [71] Farr T G, Rosen P A, Caro E, et al. The shuttle radar topography mission[J]. Reviews of geophysics, 2007, 45(2).
- [72] Kolečka N, Kozak J. Assessment of the Accuracy of SRTM C- and X-Band High Mountain Elevation Data: a Case Study of the Polish Tatra Mountains[J]. Pure and Applied Geophysics, 2014, 171(6): 897-912.
- [73] Zwally H J, Schutz B, Abdalati W, et al. ICESat's laser measurements of polar ice, atmosphere, ocean, and land[J]. Journal of Geodynamics, 2003, 34(1): 337-341.
- [74] Schutz B E, Zwally H J, Shuman C A, et al. Overview of the ICESat Mission[J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32(21): 97-116.
- [75] Wang X, Cheng X, Gong P, et al. Earth science applications of ICESat/GLAS: a review[J]. International Journal of Remote Sensing, 2011, 32(23): 8837-8864.

- [76] Zhang Z, Xu J-l, Liu S-y, et al. Glacier changes since the early 1960s, eastern Pamir, China[J]. Journal of Mountain Science, 2016, 13(2): 276-291
- [77] Xu J, Liu S, Zhang S, et al. Recent changes in glacial area and volume on Tuanjiefeng peak region of Qilian Mountains, China[J]. Plos One, 2013, 8(8): e70574-e70574.
- [78] Bolch T, Yao T, Kang S, et al. A glacier inventory for the western Nyainqentanglha Range and the Nam Co Basin, Tibet, and glacier changes 1976–2009[J]. The Cryosphere, 2010b, 4: 419-433.
- [79] Zhang Z, Xu J-l, Liu S-y, et al. Glacier changes since the early 1960s, eastern Pamir, China[J]. Journal of Mountain Science, 2016, 13(2): 276-291.
- [80] Bao W, Liu S, Wei J, et al. Glacier changes during the past 40 years in the West Kunlun Shan[J]. Journal of Mountain Science, 2015, 12(2): 344-357.
- [81] 吴坤鹏,刘时银,鲍伟佳,王荣军.1980-2015 年青藏高原东南部岗日嘎布山冰川变化的遥感监测[J].冰川冻土,2017,39(01):24-34.
- [82] Bhang K J, Schwartz F W, Braun A. Verification of the Vertical Error in C-Band SRTM DEM Using ICESat and Landsat-7, Otter Tail County, MN[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2007, 45(1): 36-44
- [83] 陈安安,李真,贺建桥,等.高亚洲冰川区 SRTMC 波段 DEM 数据透射深度研究[J/OL].冰川冻土:1-11[2018-03-27]
- [84] Scherler D, Bookhagen B, Strecker M R. Spatially variable response of Himalayan glaciers to climate change affected by debris cover[J]. Nature Geoscience, 2011, 4(3): 156-159.
- [85] 韩海东, 丁永建, 刘时银. 科奇喀尔冰川夏季表碛区热量平衡参数的估算分析[J]. 冰川冻土, 2005, 27(1): 88-94
- [86] 丁光熙, 陈彩萍, 谢昌卫,等. 西天山托木尔峰南麓大型山谷冰川冰舌区消融特征分析[J]. 冰川冻土, 2014, 36(1): 20-29.
- [87] 刘伟刚, 效存德, 刘景时, 等. 喜马拉雅山珠穆朗玛峰北坡绒布冰川消融速率特征分析[J]. 冰川冻土, 2013, 35(4): 814-823.
- [88] Wang l, Li Z, Wang F. Spatial Distribution of the Debris Layer on Glaciers of the Tuomuer Peak, Western Tian Shan[J]. Journal of Earth Science, 2011, 22(4): 528-538.
- [89] 陈亚宁,李稚,方功焕等.气候变化对中亚天山山区水资源影响研究[J].地理学报,2017,72(01):18-26.

- [90] Shahgedanova M, Nosenko G, Khromova T, et al. Glacier shrinkage and climatic change in the Russian Altai from the mid-20th century: An assessment using remote sensing and PRECIS regional climate model[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2010, 115(D16): 751-763.
- [91] Ye B, Ding Y, Liu F, et al. Responses of various-sized alpine glaciers and runoff to climatic change[J]. *Journal of Glaciology*, 2003, 49(164): 1-7.
- [92] Wiltshire A J. Climate change implications for the glaciers of the Hindu-Kush, Karakoram and Himalayan region[J]. *Cryosphere*, 2014, 8(3): 941-958.
- [93] Oerlemans J. Extracting a climate signal from 169 glacier records[J]. *Science*, 2005, 308(5722): 675-677
- [94] Zhang G, Kang S, Fujita K, et al. Energy and mass balance of Zhadang glacier surface, central Tibetan Plateau[J]. *Journal of Glaciology*, 2013, 59(213): 137-148.
- [95] 高晓清,汤懋苍,冯松.冰川变化与气候变化关系的若干探讨[J].*高原气象*,2000(01):9-16.
- [96] 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.

附 录

一、个人简介

邢武成（1984-），甘肃张掖人，男，汉族，西北师范大学地图学与地理信息系统专业硕士研究生，研究方向为环境遥感与 GIS 应用。E-mail: gsauxing@126.com

二、硕士期间参与的科研项目

1. 参与国家自然科学基金委重大研究计划“黑河流域水-生态-经济系统的集成模拟与预测”
- 2 国家自然科学基金面上项目（批准号：41471058）

三、发表的学术论文

- 1.邢武成,李忠勤,张慧,张明军,梁鹏斌,牟建新.1959 年来中国天山冰川资源时空变化[J].地理学报,2017,72(09):1594-1605.

致 谢

岁月如歌，光阴似箭，三年的研究生生活即将结束。经历了找工作的喧嚣与坎坷，我深深体会到了写作论文时的那份宁静与思考。回首三年的求学历程，对那些引导我、帮助我、激励我的人，我心中充满了感激。

首先要感谢导师李忠勤研究员，论文定题到写作定稿，倾注了李老师大量的心血。在我攻读硕士研究生期间，深深受益于许老师的关心、爱护和谆谆教导。他作为老师，点拨迷津，让人如沐春风；作为长辈，关怀备至，让人感念至深。能师从李老师，我为自己感到庆幸。在此谨向许老师表示我最诚挚的敬意和感谢！

同时，我要感谢所有教导过我、关心过我的老师。特别是地理与环境科学学院的赵军教授、潘竟虎教授、李净副教授、姚晓军副教授、党国锋副教授等老师。你们为我的学业倾注了大量心血，你们为人师表的风范令我敬仰，严谨治学的态度令我敬佩。

感谢一直关心与支持我的同学和朋友们！我的朋友，张慧，张昕，黄康刚、李晓锋、孙世翼，感谢你们的鼓励和帮助及地环学院 2015 级全体研究生同学。两年来，我们朝夕相处，共同进步，感谢你们给予我的所有关心和帮助。同窗之谊，我将终生难忘！

在此要感谢我生活学习了三年的母校——西北师范大学，母校给了我一个宽阔的学习平台，让我不断吸取新知，充实自己。

需要特别感谢的是我的父母。父母的养育之恩无以为报，他们是我十多年求学路上的坚强后盾，在我面临人生选择的迷茫之际，为我排忧解难，他们对我无私的爱与照顾是我不断前进的动力。

邢武成

2018 年 4 月于西北师范大学