

分类号_____

密级_____

UDC _____

编号 10736

西北师范大学

硕士学位论文

1959~2008 年新疆布尔津河
上游河源区冰川储量变化

研究生姓名：骆书飞

指导教师姓名、职称：李忠勤 教授

专业名称：地图学与地理信息系统

研究方向：资源环境遥感

二〇一四年五月

硕士学位论文

M .D .Thesis

1959～2008 年新疆布尔津河

上游河源区冰川储量变化

Glacier Volume Change of Burqin Headwater
Region in Xinjiang from 1959 to 2008

骆书飞

Luo Shufei

西北师范大学

Northwest Normal University

二〇一四年五月

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

目 录

摘要.....	I
ABSTRACT.....	III
1 绪论.....	1
1.1 研究背景和意义.....	1
1.2 国内外研究进展.....	3
2 研究区概况.....	6
2.1 阿尔泰山概况.....	6
2.2 布尔津河上游河源区地理概况.....	7
2.3 布尔津河上游河源区冰川概况.....	8
3 数据与研究方法.....	11
3.1 数据源.....	11
3.2 数据预处理.....	13
3.3 技术路线.....	17
3.4 不确定分析.....	17
4 布尔津河上游河源区冰川变化特征.....	18
4.1 厚度变化.....	18
4.2 海拔与平均厚度变化.....	20
4.3 冰川规模与平均厚度变化.....	20
4.4 冰川面积与储量变化.....	21
4.5 气候变化对冰川变化的影响.....	22
5 对比分析.....	24
6 结论与展望.....	25
参考文献.....	27
硕士期间发表的科研成果目录.....	34
致 谢.....	35

摘 要

冰川是气候变化最灵敏的指示器，气候变化是冰川进退的主要驱动因素。在全球气候变暖的大背景下，我国西北内陆地区乃至全球范围内大部分冰川快速大面积退缩，20 世纪 80 年代以来出现加速消融趋势，进一步影响到冰川融水径流，从而对下游水资源的变化和利用产生影响，这势必对我国西部干旱区长远社会经济发展、生态与环境产生深远的影响。因此，开展冰川时空尺度变化研究，尤其是冰川厚度及储量变化研究对今后新疆地区水资源的合理利用、社会经济可持续发展具有重要的意义。

新疆冰川研究主要集中在天山地区，对于分布着我国纬度最高的冰川区的阿尔泰山脉地区，由于复杂恶劣的地理环境等原因研究甚少。本研究选取阿尔泰山腹地的新疆布尔津河上游河源区作为研究区，以 1959 年航拍的航片调绘而成的地形图和 2008 年消融期 ASTER 影像为数据源，结合 RS 和 GIS 技术，基于两期数字高程模型对该区 1959~2008 年间 50 年冰川厚度变化进行了定量综合评价分析，讨论了不同海拔、不同规模冰川区厚度变化特征，结合冰川区面积评估了由于气候变暖引起的冰川面积和储量损失情况及对于水资源的贡献，并与西部其他区域冰川变化进行对比。

结果显示：在全球气候变暖的情况下，新疆布尔津河上游河源区冰川整体呈强烈退缩趋势。所选取的 201 条冰川 1959~2008 年厚度平均变化-20.17m，年均达-0.412m/年；储量减少了 5.649km^3 ，冰川冰融水年径流量为 $7.776 \times 10^7 \text{m}^3$ ；总面积共减少 65.11km^2 ，退缩率 30.42%（平均每条冰川缩小约 0.324km^2 ）；共有 58 条冰川消失，集中于冰川面积小于 0.5km^2 独立发育的冰川，消失冰川总面积达 9.55km^2 ，占 1959 年面积的 4.46%；随着冰川退缩，大冰川向小冰川过度，小冰川趋于消失，小冰川对气候变化的响应更为敏感。冰川消融量在空间分布上具有一致性，即在低平冰舌处冰川消融极其强烈，厚度减薄最大值超过了 100 m，随着海拔的升高，距冰川末端越远，消融减弱。小冰川受气候变暖影响主要以面积的形式在后退，而较大冰川尤其是大于 5km^2 的冰川，厚度变化较为突出，与托木尔峰地区相似，遵循“减薄后退”的规律。

气温和年降水是导致冰川变化的根本因素，气温的升高导致了冰川零平衡线的上升，使得冰川消融区面积增大，降水中雨雪的比例也影响冰川的物质平衡。从哈巴河气象站数据分析得知尽管研究区降水量增加，但年均降水量较少且增加不是很明显，冰川消融剧烈，很重要原因是升温导致冰川消融量在冬季的积累不足以弥补，冰川物质平衡收入小于支出，冰川退缩更加显著，因此冰川退缩主要是由于气候变暖造成的。除此之外，冰川所处位置、末端海拔、冰川类型、形态特征、运动速度、表碛覆盖等因素也有直接关系。

将新疆布尔津河上游河源区冰川变化与中国西部部分地区冰川面积、厚度及储量变化进行对比，结果表明，布尔津河上游河源区冰川变化趋势与其它冰川所表现的趋势相吻合，即面积变小，厚度减薄。但冰川退缩幅度较大，对气候变化较敏感。

关键词：布尔津河；冰川储量变化；数字高程模型；ASTER

Abstract

Glaciers are widely recognized as one of the most sensitive indicators to global climate change, climate change is a main driving factor of the accumulation and ablation of glaciers. Most of glaciers of the inland area in northwest China and worldwide were in a state of rapid shrinkage against the background of climatic warming since the 1980s, directly influencing changes of river runoff, which would inevitable have the profound influence over the arid areas in northwest china. Therefore, studies of glacier changes, especially the ice-thickness and volume changes have important significance for not only the enhancement of understanding glacier changes, but also the analysis on changes of glacial water resources. Furthermore, it has an impact on the establishment of social economic development program in Xinjiang Uyger Autonomous Region.

The study of glaciers of Xinjiang has been largely concentrated in the Tianshan Mountains, but poor little in Altai Mountain which is the highest latitude distribution of China, due to the complex and harsh geographical environment and so on. Combined with remote sensing technology and GIS technology. The spatial variability (mainly different elevations and different elevations) of glacier elevation changes in Burqin headwater region in the Altay Mountain of China are obtained from two digital elevation models (one is from 1:50 000 topographic map which was based on the aerial photographs of 1959 and the other is from ASTER remote sensing data in 2008.). Elevation changes are converted to volume changes by multiplication with the respective glacier area. This research presents volume and area changes from 1959 to 2008 for about 201 glaciers in Burqin headwater region, assesses the contribution of water resources, and compares with the changes of the other western glacier regions.

The results showed the glaciers of Burqin Headwater Region were in a state of rapid shrinkage against the background of climatic warming. This research presents elevation changes from 1959 to 2008 for about 201 glaciers were -24.12m (-0.412m/a). The volume has reduced 25.649km^3 , and the annual glacier runoff were $7.776 \times 10^7 \text{m}^3$. The area of the glaciers has reduced 65.11km^2 (30.42%), The average area of individual glaciers has reduced 0.324km^2 . 58 glaciers had melted away, mainly concentrated in those less than 0.5km^2 , the area of which was 9.55km^2 , a rate of 4.46%. With the retreat of glaciers, the absolute variation of the

smaller glaciers was small, but the relative rate of changes are much bigger, and the sensitivity to climate change was much stronger. The glacial ablation had consistency of the extreme thinning (locally exceeding -100 m) at several flat and/or low lying glacier tongues. With the increase of altitude, the farther away from the ends of glaciers, ablation the less rapid shrinkage. Small glaciers were influenced by climate warming, mainly in the form of area in the back, and large glacier, especially more than 5 km², thickness change was more outstanding, similar to the area of Tumor mountain.

Temperature and annual precipitation are the key factors in the cause of glacier change, and The rise of temperature caused the the equilibrium line altitude (ELA) up, Temperature determines, The precipitation in the study area increases but the glaciers remains severe ablation, the main reason is because summer warming causes strong glacier ablation, and winter accumulation is not sufficient to compensate for the loss of material balance caused by rising temperature, which accelerate the glacier retreat. Moreover the average annual precipitation is less in the study area and no significant increase, and warming induces the reduction of the glacial accumulation area, so that the glacier mass balance income decreases, but the spending on the rise, which makes further exacerbating the retreat of glaciers, so the glacial retreat is mainly due to the climate warming caused. In addition, elevation of glacier terminus, glacier types, debris-cover and other factors were also the direct factor.

compared with the changes with other western regional glaciers, Glaciers in Burqin headwater region have the same changes trends with other regions in western China: reducing of the area and elevation is becoming smaller. Glacial rate of change in the study area is slightly bigger than that in other regions in western China and more sensitive to climate change.

Key words: Burqin river; ice volume changes; Digital Elevation Model; ASTER

1 绪论

1.1 研究背景和意义

1.1.1 研究背景

联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）于 2007 年发表的第四次正式“气候变迁评估报告”指出：近 100 年（1906 年～2005 年）以来，全球地表温度上升约 0.74°C （ $0.52\sim 0.92^{\circ}\text{C}$ ），陆地区域的变暖速率比海洋快，全球气候环境呈现以变暖为主要特征的显著变化。而近 50 年来全球变暖趋势愈加明显，大部分观测资料表明很可能是人为温室气体浓度增加所导致^[1-4]。在全球变暖不断加剧背景下，气候变化对全球以内陆、海岸线为首的自然生态系统和人类社会经济系统产生了重大深远的影响，全球出现冰冻圈萎缩、水资源短缺、生态系统退化、森林干扰体系变更、土壤侵蚀加剧、生物多样性锐减、臭氧层耗损、大气化学成分改变、粮食供需紧张、人口转移、人舒适度降低等现象^[5-10]。全球气候变化已不仅仅是一个科学问题，而且日渐成为各国政府，乃至普通民众共同关注的热点问题^[11]。

区域气候变化与全球气候变化关联密切。我国西北地区，特别是河西走廊以西的新疆地区，与前 100 年比较，气温继续上升，降水明显增加，气候正由暖干向暖湿转换^[12,13]。近 50 年尤其是最近 10 年（1998～2007 年）增温显著，平均年气温升高约 0.9°C ，高于全球平均增温幅度，是新疆近 50 多年中最暖的时期^[6,14]。预测本世纪前期（2011～2030 年），温度增加幅度在 1.2°C 左右，到本世纪中后期气温将进一步增高^[13]。同时，新疆地区降水趋势明显增加、冰川加速消融、冰川融水量持续增加、河川年径流量增加、湖泊水位上升、洪水灾害频繁、沙尘暴日数趋于减少等现象反映了西北地区出现了气候由暖干向暖湿转变的信号^[15-18]。

冰冻圈又称冰雪圈，是指具有负温或零温条件下，含冰的云层、山地冰川、积雪、冻土、海冰、极地冰盖等固态水或过冷水组成的圈层，与大气圈、水圈、岩石圈和生物圈一起，并称为地球系统中的五大圈层^[19,20]。其上界可达平流层 100km 的高度，下界可达地表以下 4～5km。当前冰冻圈在全球分布范围广泛，全球陆地面积的 11%、海洋面积的 7% 被多年冰雪覆盖。季节性冻土和多年冻土分别占陆地面积的三分之二和四分之一，分布更为广泛^[21,22]。全球气候变暖与全球分布最广的冰冻圈的减少是相一致的，表现为南北两极冰盖消融加速，南北半球的山地冰川和积雪面积呈现退缩减少趋势，甚至有大量小冰川在 21 世纪都会消失^[23,24]。

1.1.2 研究意义

冰川是寒冷地区多年降雪积累,经过变质作用形成冰,具有一定的形态且在重力作用下能自行流动的冰体^[19]。冰川是最为敏感的气候变化响应指标,是全球气候变化的天然指示剂^[25,26]。冰川是气候作用的产物,冰川的积累和消融强度主要受气温和降水的控制。小冰期以后,以全球变暖为主导的气候变化导致全球绝大多数冰川出现消融现象^[27-29],20世纪特别是最近30年有加速趋势,未来这种加速消融趋势还将持续^[30,31],至2100年估计冰川和冰帽消融所造成海平面上升约0.097m^[32]。

冰川资源是人类赖以生存的淡水资源的重要组成部分。全球现代冰川面积约为 $1.59\times 10^7\text{km}^2$,约占地球表面积的11%。其中山地冰川面积占全球冰川的2%,面积的98%、冰量的99%为南极大陆和格陵兰两大冰盖所占有,约85%的淡水资源储存于冰川之中^[21,22]。气候的变化影响冰川积累消融,进而影响融水径流大小,从而对下游水资源的变化和利用产生影响,对水资源总量有重要贡献^[33-35]。

冰川还是调节河川径流的“固体水库”。在降水丰沛的低温年份,冰川区热量不足,冰川收入大于冰川支出,水资源以固体的形式存储于冰体中,冰川融水径流减少;在降水较少的高温年份,晴朗天气增多,冰川收入小于支出,固体冰川释放大量液态水。冰川对干旱区流域水资源的年内分配亦具有重要的调节作用,夏季干旱少雨,冰川成为河川径流的源源不断的补给源,减免河道断流现象;遇到暴雨强降水,冰川上保留部分降水,从而减小洪水危害程度,冰川融水补给在调节多年河川径流方面占有重要地位^[6]。准确评估冰川面积及其储量变化,在水资源、供水和水电的评估等方面具有广泛的应用^[32,36]。同时,气温的上升和冰川的强烈消融对于干旱半干旱区沙漠化、洪旱、泥石流等自然灾害有着重要的影响,危及居民生命财产安全^[37-42]。

中国阿尔泰山位于阿尔泰山脉的中段南坡,该区气候严寒,交通闭塞,地处偏远,人迹罕至,开展冰川实地考察异常困难。传统冰川监测主要针对典型冰川研究,难度大,监测范围有限且选取监测冰川不一定具有代表性^[43]。随着航空遥感光学图像、数字高程模型、雷达等新技术数据陆续出现和更新,借助RS(遥感, Remote Sensing)与GIS(地理信息系统, Geographic Information System)手段研究冰川的特征、监测冰川三维动态变化成为冰川学研究发展的重要趋势,也有效解决了现代冰川研究中高山区资料受限等问题^[44]。

2009年8月,中国科学院天山冰川观测试验站对新疆布尔津河上游河源区喀纳斯冰川进行实地考察,开展了冰川的物质平衡、冰川温度、冰川运动、雪冰化学及第四纪古冰川等相关研究。基于本次考察,开展了冰川面积和长度变化的监测研究。如李

忠勤等^[6]对喀纳斯河源喀纳斯冰川的考察表明, 喀纳斯冰川的面积自 1959 年的 30.13km² 缩小到 2009 年的 28.74km², 损失了 4.6%, 冰川末端退缩速率为 16.4m/a。白金中等^[45]利用地形图和 ASTER 高分辨率卫星影像, 对比得出阿尔泰山友谊峰区冰川面积整体呈强烈退缩趋势。此外, 王淑红等^[46]应用冰川系统模型预测了阿尔泰山的冰川水资源, 认为本世纪末阿尔泰山冰川将趋近完全消失。这些研究成果在不同程度上反映了冰川面积与长度的变化及其对于气候变化的响应情况, 但缺少对冰川近期情况的深入认识。鉴于此, 本研究基于两期数字高程模型, 对布尔津河上游河源区的冰川 1959~2008 年的厚度、面积和储量变化进行评价分析, 重点探讨冰川储量的变化, 旨在揭示该地区近期的冰川空间变化特征和成因, 以为流域水资源评估提供可靠数据。

在全球变暖的气候背景下, 冰川的加速消融直接影响水资源的时空演化和利用^[47,48]。冰川储量变化反映冰川水资源变化及其对河川径流的贡献, 直接决定了干旱区绿洲生态环境。因此, 在全球气候变暖背景下开展阿尔泰山地区冰川厚度测量及储量分析显得十分必要。

1.2 国内外研究进展

1.2.1 国际冰川储量变化监测进展

国外冰川监测研究较早, 研究涉及面相对较广。1840 年瑞士科学家 J.L.R.阿加西 (Jean Louis Rodolphe Agassiz, 1807~1873) 在阿尔卑斯山现代冰川上创立了第一个冰川站“浓霞台宾馆”, 开创了对冰川结构、厚度等要素的系统观测^[49]。随着观测仪器的不断出现和更新, 冰川学家对冰川有了进一步的认识和研究。直到 21 世纪初, 由美国航空航天局 (NASA, National Aeronautics and Space Administration) 及地质调查局 (USGS, United States Geological Survey) 发起、多个冰川大国共同参与联合实施了“全球陆地冰空间监测计划” (GLIMS, Global Land Ice Measurements from Space Project)。该计划利用地球卫星 (EOS-Terra) 平台搭载的高级星载热发射与反射辐射计 (ASTER, Advanced Spaceborne thermal Emission and reflection Radiometer) 及陆地资源卫星 (Landsat) 测量为主要数据源, 在数字高程模型 (DEM, Digital Elevation Model) 及地理信息系统的配合下进行全球最新的三维冰川编目及动态监测, 在瑞士应用取得成功经验^[50,51]。

常规的冰川遥感监测可获取冰川条数、边界范围、面积形态及冰川特征界线 (冰舌末端、雪线) 等二维参数^[52]。其中, 长度和面积是长期以来冰川遥感监测的最主要参数。而冰川变化的三维参数 (如厚度、体积等) 早期由于技术限制未能开展研究。对直接反映冰川水资源的冰储量的研究, 对其进行估算的核心问题就是冰川厚度的确

定。20 世纪初 Waite 和 Schmidt (1962)^[53]以及 Evans (1963)^[54]应用无线电技术测量南极和格陵兰冰盖的厚度,指出由于冰川冰具有对无线电波衰减小、冰体成层性和均质性好的优点,因此无线电回波探测方法极有可能成为冰川学研究领域中一种有用的试验技术方法。随后,雷达无线电回波探测研究方法应用于冰川学研究领域的逐渐广泛,大大的推动冰川三维数据的观测与获取。在冰川和冰盖研究方面,探地雷达(GPR, Ground Penetrating Radar)已经成为了最为广泛的测定冰川及冰盖厚度的工具。与此同时,随着雷达技术的发展,激光高度计的广泛应用,摄影测量技术与遥感科学相结合,使得冰川三维变化研究取得突破性进展。利用多源地形数据和遥感数据相结合获取冰川变化的三维参数,成为当前冰川遥感技术热点研究方向之一。Berthier 等^[55]用 SPOT25 立体像对和 ASTER 立体像对生成冰川表面 DEM 数据以研究其厚度和储量变化。K3434b 等^[56]与地形相结合,计算不同高程下 DEM 数据的差值,按高程与厚度变化的关系计算得到总体厚度变化值,与早期面积相乘得到冰川体积的变化。Vladimir B 等^[37]综合运用测距仪,航拍影像和 ASTER 立体相对分析了吉尔吉斯斯坦天山地区冰川厚度、储量等变化。Frank 等^[43]用 SRTM 和航空摄影测量获取的 DEM 相结合,得到瑞士阿尔卑斯山脉地区冰川厚度变化。Khalsa 等^[57]通过生成 DEM 模型得到每个冰川表面的高程分布函数,按面积加权得到体积;Jeffrey 等^[58]用探地雷达数据与航空摄影测量获取的 DEM 相结合获取加拿大 British Columbia 西南部冰川厚度、储量和面积的变化,并进行了详细的误差评估与误差来源分析。ICESat 卫星上搭载的激光高度计 GLAS (地球科学激光测高系统, Geoscience Laser Altimeter System) 数据测高精度可达分米级^[59],在研究冰川变化方面有着很强的应用前景。

1.2.2 国内冰川储量变化监测进展

20 世纪以来,在全球变暖的背景下,我国西部冰川呈强以“变薄后退”的模式退缩^[60],且退缩加剧,这体现了冰川厚度对气候变化的敏感性。因此,研究冰川的厚度和储量及其变化,能够为冰川对气候变化的响应研究提供定量科学依据,为各种冰川水文模型提供重要的输入参数,而且又可估算冰川的冰储量的多少,为区域水资源的调查评估提供研究基础^[61]。

冰储量是冰川变化研究中不可或缺的重要参数。对其获取较为复杂,需要在搞清楚冰川厚度的基础上,通过计算间接得到。因此,有关冰储量的研究在国内比较有限,更缺乏对大范围地区冰川储量变化规律的认识。在无法直接获取大范围冰川厚度条件下,常常根据冰川面积或长度与储量之间的统计关系来估算冰川储量^[62-65]。雷达探测技术在冰川厚度数据精确获取的广泛应用,为冰储量的计算提供了可靠的数据支持。

我国冰川厚度研究较晚，80 年代以前研究较为简单，方法和技术较为落后。20 世纪 80 年代初，中国科学院寒区旱区环境与工程研究所研制了 B-1 型冰川测厚雷达，分别在南极 Nelson 和 Collins 冰帽^[67]、天山中部的乌鲁木齐河源 1 号冰川^[66]、以及天山东部哈密地区的庙尔沟平顶冰川^[68]成功地开展了冰川厚度测量。近 10 年来，随着高精度雷达测厚技术的发展与应用的普及^[69]，以及雷达冰川学研究理论成果的不断丰富^[70,71]，我国陆续使用新型雷达设备对冰川厚度等三维参数测量，取得了丰厚的成果^[72-74]。尽管有些研究在部分地区已经得到了冰川储量，也应用统计模型给出了不同参量变化因子之间的关系^[60,75]。但是，这些关系并不是一成不变的，存在显著的时间和空间差异性，尤其在气候变暖响应机制下冰川不同阶段会有不同的变化。最近 20~30 年，随着温度的变暖加速，冰川消融趋势出现加速，引起了这些参量关系的明显变化。由此，亟待对长时间序列冰储量的变化及其各形态参量变化之间的关系开展进一步系统的研究。

随着技术手段的不断进步，更为合理、有效地开展冰川厚度、冰储量及其变化研究显得十分迫切与必要。而 GPR、GPS 和 GIS 技术的不断成熟和完善，给我们提供了解决问题的新思路。GPR 采用微波的方式对于冰体具有良好穿透能力，数据损失小，在冰川学领域越来越多的应用可以获取高精度冰厚数据^[76]；GPS（全球定位系统，Global Positioning System）凭其全球全天候定位、定位精度高、观测时间短、测站间无需通视、高效等优点，可以对雷达探测提供全球统一的三维地心坐标，进而实时定位^[77]；GIS 又是采集、储存、管理、运算、分析、显示和描述地理空间数据的计算机信息系统，具有独特的地理空间信息处理优势的人机交互式的空间决策支持系统^[78,79]。这三种技术的高效的结合，可以高效的推动冰川厚度、储量分析及其变化特征研究。

在冰川测厚技术更新的同时，通过两期或多期高分辨率 DEM 来确定冰川厚度时空变化方面也取得快速发展。这些研究充分将冰川储量的变化和冰川物质平衡及水资源研究紧密地结合在一起。随着 RS 技术发展，可使用的高分辨率 DEM 数量不断增加，例如高精度差分全球定位系统（RTK—GPS）冰川应用中垂直精度已达厘米量级，大大提高了冰川表面高程变化测量的精度。因此，将 GPR、RS 和 GPS 技术与 GIS 结合起来集成为 GPR-3S 技术，对冰川厚度及储量的研究，是目前国际上的趋势和热点。天山冰川站运用 GPR-3S 技术，对天山和祁连山的 11 条冰川进行了观测研究，取得了大量资料。王璞玉等^[80]分析研究了包括乌鲁木齐河源 1 号冰川、博格达峰地区的黑沟 8 号冰川和四工河 4 号冰川以及托木尔峰地区的青冰滩 72 号冰川在内的厚度和储量。与此同时，王伟婷等^[81]利用多源 DEM 和多时相遥感影像监测冰川体积变化。姚晓军等^[82]

利用经验模型估算我国阿尔泰山地区冰川储量。

2 研究区概况

2.1 阿尔泰山概况

阿尔泰山是亚洲中部的宏伟山系之一，山脉形态呈长扇形（图 2.1），西北——东南走向，东西总长 1650km，西段平均宽约 360km，中段和东段平均宽 150~200km。山脉自西向东海拔逐渐降低，斜跨中国、哈萨克斯坦、俄罗斯、蒙古国境。南端以哈尔乌苏湖断裂为界，东南部与戈壁阿尔泰构造带相连，北端以特勒特斯库湖为界，东北部与西萨彦岭相接。山脉以东区域平均海拔(>1000m)高于以西区域海拔(<1000m)，其发育的盆地海拔(1000~1500m)也高于以西区域海拔(<600m)。如新疆准噶尔、哈萨克斯坦东部与俄罗斯东南部的盆地高程低于 500m，而蒙古境内杭爱断裂以南盆地高程均大于 1000m。

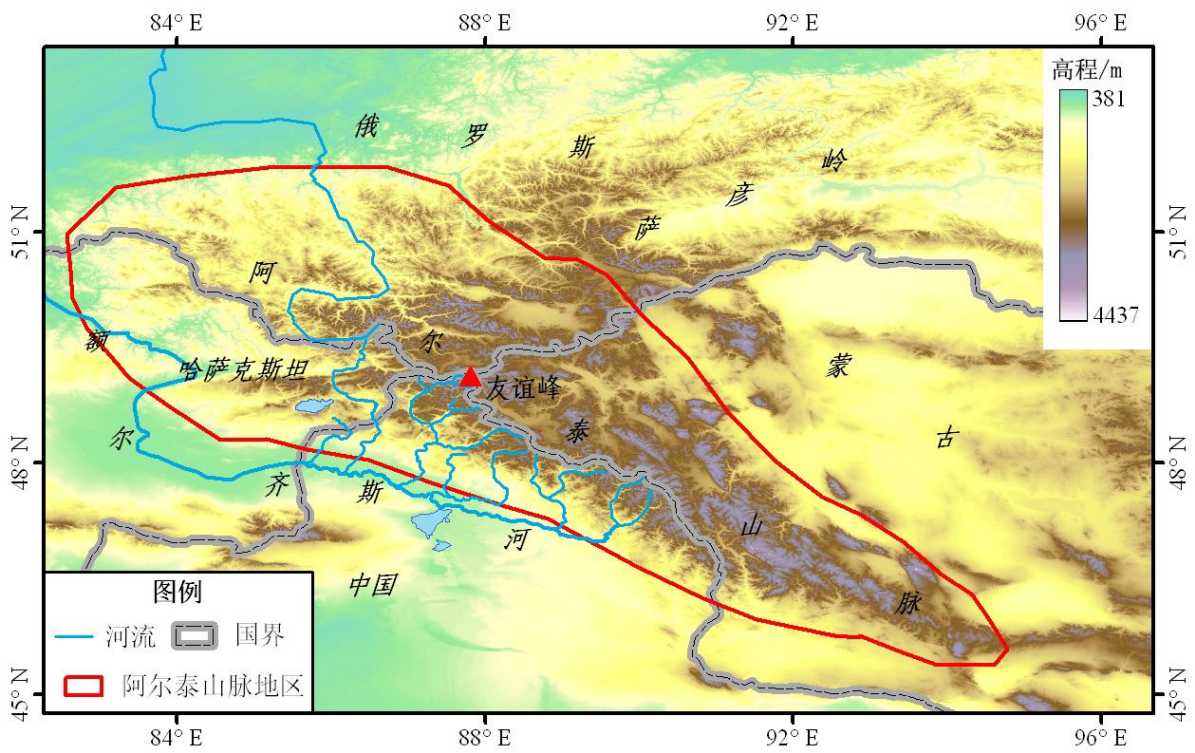


图 2.1 阿尔泰山山脉位置图
Fig.2.1 The map of Altay Mountains region

阿尔泰山地质构造上属阿尔泰地槽褶皱断块山。由古生代地槽隆起的反复褶皱，在现代地形上有一定反映，表现在纵谷走向上大体符合于岩层走向。二迭纪末期形成的古阿尔泰山的基本轮廓，在三迭纪再度隆起。以后经过漫长的剥蚀时期，山势降低，趋于准平原化。准平原地形在现代阿尔泰山有强烈的反映，不少山段都保留有台原形态，对第四季和现代冰川作用有着深刻的影响。新第三纪和第四纪的喜马拉雅构造运

动，使被夷平的阿尔泰山断块隆起，成为现代高峻的山脉。在断块隆起过程中，由山脊向额尔齐斯河谷形成了3~4个梯级断裂，对阿尔泰山层状地形的形成以深刻的影响。阿尔泰山地西北上升量高于东南，山地河流顺坡南注，而山麓平原断裂带自东南倾向西北，是额尔齐斯河主源和乌伦古河出山后急剧转折向西北方向流去^[83]。

阿尔泰山径流较丰富，是额尔齐斯河与乌伦古河发源地，两河皆构成典型不对称的梳状水系。额尔齐斯河是新疆唯一外河流，自东南向西北奔流出国，一路上将喀拉额尔齐斯河、克兰河、布尔津河、哈巴河等北岸支流汇入后，注入哈萨克斯坦境内斋桑泊，再向北经俄罗斯的鄂毕河注入北冰洋。全长4248km，中国境内546km，流域面积 $5\times 10^4\text{km}^2$ ，多年平均径流量 $10\times 10^9\text{m}^3$ ，占中国阿尔泰山地区总径流量89%，仅次于伊犁河居新疆第二位。河水补给来源主要为降水、积雪融水和冰川融水等。乌伦古河支流在山区，山前为散失区，全长573km，最后归宿于福海县境内的乌伦古湖，在二台站以上，流域面积为 $2.2\times 10^4\text{km}^2$ ，补给来源亦以冬季积雪为主，多年平均径流量 11km^3 。两河上游多峡谷和断陷盆地，落差大^[84]。

2.2 布尔津河上游河源区地理概况

2.2.1 地理区域

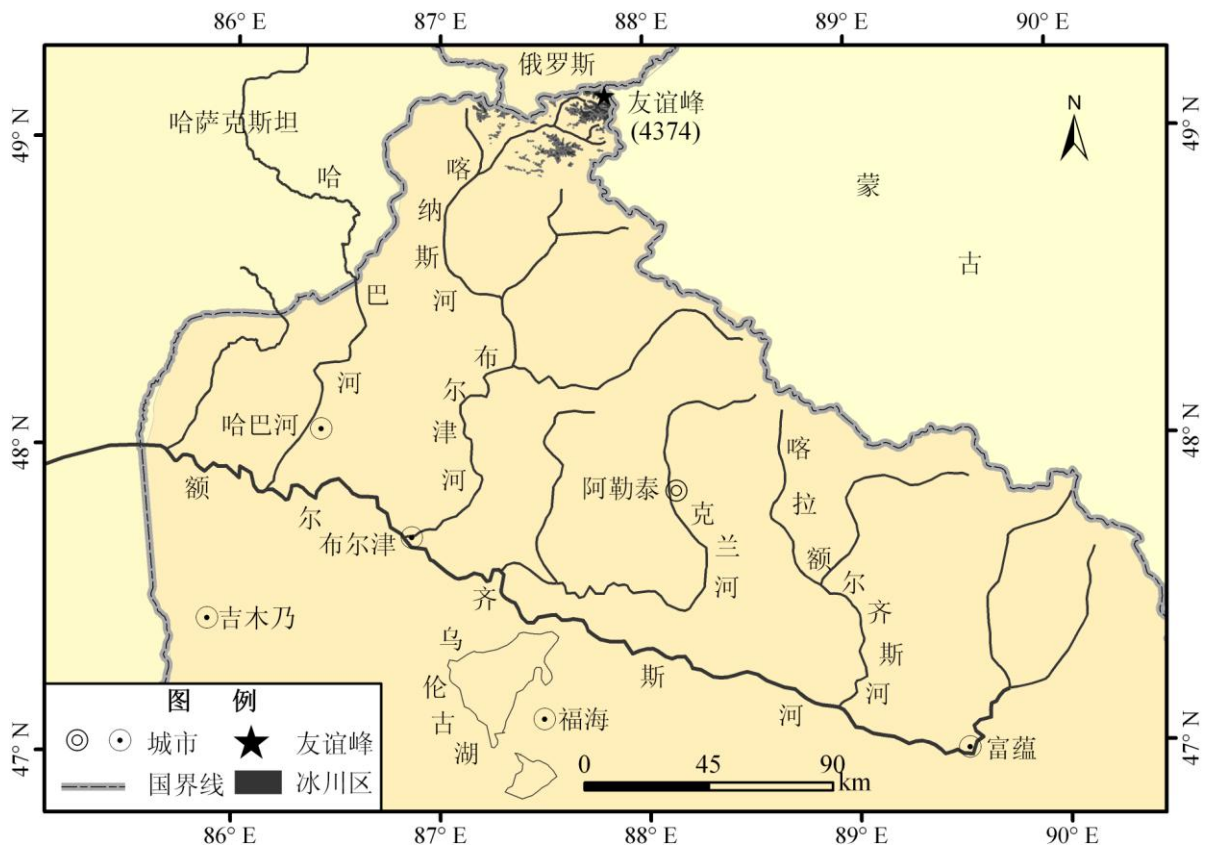


图 2.2 布尔津河上游河源区冰川图

Fig.2.2 The glaciers of Burqin Headwater Region

新疆布尔津河上游河源区位于阿尔泰山腹部的高山区，中国阿尔泰山区北部，西起哈巴河上游，沿国境线东抵大青河河源，东北接蒙古人民共和国的科布多大湖盆地，南邻准噶尔盆地北部的额尔齐斯河谷，介于 $47^{\circ}00' \sim 49^{\circ}10'N$ 与 $86^{\circ}50' \sim 90^{\circ}30'E$ 之间，是我国纬度最高、惟一属于北冰洋水系的现代冰川分布区(图 2.2)。海拔在 2240~4374m 之间，4000m 以上的高峰数座，其中友谊峰海拔 4374m 为我国阿尔泰山最高峰，位于布尔津河上游中蒙交界处，与其北侧的奎屯峰(4104m)及邻近几座 4000m 左右的山峰，构成一个冰川作用中心。

2.2.2 气候特征

新疆布尔津河上游河源区位于亚洲腹部的干旱荒漠和干旱半荒漠地带中心区。夏季，西风环流带着大西洋的水汽，沿着额尔齐斯河谷地和哈萨克斯坦斋桑谷地长驱直入，向北遇到阿尔泰山高山区被迫抬升，为布尔津河流域上游地区带来多云和丰富的降水，气团的西风输送是该区域气候形成的主要因子。冬季，处于强大的亚洲反气旋的影响之下，以晴朗而严寒的天气为主。同时，来自北冰洋的温度较低的极地气团，沿额尔齐斯河谷入侵布尔津河地区，带来了低温和降雪天气。在上述气团影响下，该区全年气温低且年较差较大；随海拔增高降水量增多，使该区域降水比临近区域丰富，且年内分配均匀。根据哈巴河气象站(海拔 532.6m)资料分析，该区近 50 年来年均温在 $4.7^{\circ}C$ 以下，气温年较差在 $40^{\circ}C$ 以上。按 $0.65^{\circ}C/100m$ 的垂直温度递减计算，年均 $0^{\circ}C$ 等温线在 1200 米左右，由此可知该冰川区常年平均气温皆为负温。与此同时，阿尔泰山山区山麓地带降水量一般在 150mm 以上，较临近准格尔地区丰富。高山带对水汽的阻挡作用使降水量明显增加，按照降水梯度 $19 \sim 22mm/100m$ 推算，冰川区年降水量在 350mm 以上，冬半年(10~4 月)降水量占全年降水量的 45~50%，降水年内分配较为均匀^[84]。

2.3 布尔津河上游河源区冰川概况

根据冰川编目资料^[84]，本研究区共选取布尔津河上游河源区冰川 201 条，总面积 $214.04km^2$ ，平均冰川面积 $1.05km^2$ ，大于中国阿尔泰山地区冰川平均面积 $0.70km^2$ 。估计储冰量 $13.785km^3$ ，折合储水量 $12.145km^3$ ，冰川面积约占中国阿尔泰山地区冰川面积的 89.48%，是我国较小的冰川作用区。由于气候条件和山地海拔高度等因素的综合影响，冰川分布在地域上有明显的差异。

2.3.1 冰川规模

本研究区的冰川平均面积 $1.06km^2$ ，其中冰川面积小于 $2km^2$ 的冰川占总数的 89.5%，

估计冰储量 2.892km^3 ，冰川面积和储量分别占该区冰川总面积和储量的 41.79%和 20.96%，冰川面积和储量主要集中在面积大于 2km^2 的冰川上。友谊峰海拔 4374m，为我国阿尔泰山的最高峰。友谊峰及其左侧的奎屯峰构成了高大的山结，为我国阿尔泰山现代冰川集中发育的地区，且大于 10km^2 的三条冰川全集中在此，是该山区最大的冰川作用中心^[46]。

2.3.2 冰川类型

表 2.1 布尔津河上游河源区冰川类型统计表

Tab.2.1 Statistics of morphologic types of glaciers of Burqin headwater region

冰川类型	冰川数量		冰川面积		冰储量		平均面积 /km ²
	冰川数量	所占比率	冰川面积	所占比率	冰川储量	所占比率	
	/条	/%	/km ²	/%	/km ³	/%	
悬冰川	111	55.22	27.87	13.02	0.69	5.03	0.25
冰斗-悬冰川	26	12.94	20.11	9.40	0.76	5.48	0.77
冰斗冰川	47	23.38	70.77	33.06	3.51	25.45	1.51
山谷冰川	17	8.46	95.29	44.52	8.83	64.04	5.61
总计	201	100	214.04	100	13.80	100	1.06

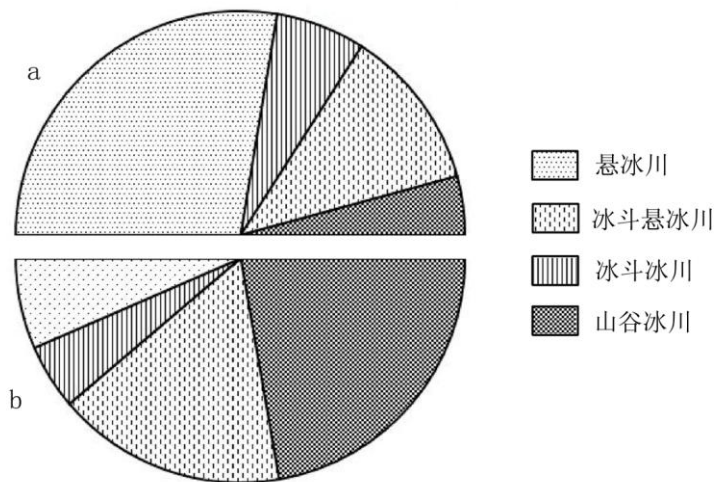


图 2.3 各类冰川条数 (a) 和面积比例图 (b)

Fig.2.3 The ratio of numbers and area of glciar of different types of glaciers

本研究区冰川有悬冰川、冰斗-悬冰川、冰斗冰川、山谷冰川等类型（表 2.1）。在上述的类型中，以大型山谷冰川占优势，数量虽然只占冰川总条数的 8.46%（17 条），但面积却占冰川总面积的 44.52%（ 95.29km^2 ），是布尔津河上游河源区冰川面积的主体类型。其次是中等大小类型的冰斗冰川，数量与面积分别占 23.38%和 33.06%，在本区冰川类型中也占有相当重要的位置。小型的悬冰川所占比列较大，占总条数的

55.22%，比祁连山（50.9%）和瑞士阿尔卑斯山脉（42.0%）要大，比天山（57.9%）略小，加上冰斗-悬冰川，占山区冰川总数的 68%以上。由此可见，悬冰川是本研究区冰川条数最多的冰川类型。从而使该山区具有冰川规模小、平均面积小等特点。陡壁陡峭，山脊至冰斗底部的垂直高差一般都在 200~300m 以上，以至于积雪难以停留，基岩终年裸露。

2.3.3 冰川朝向

表 2.2 布尔津河上游河源区冰川朝向统计表

Tab.2.2 Statistics of orientations of glaciers of Burqin headwater region							
冰川类型	冰川数量		冰川面积		冰储量		平均面积 /km ²
	冰川数量	所占比率	冰川面积	所占比率	冰川储量	所占比率	
	/条	/%	/km ²	/%	/km ³	/%	
NW	64	31.84	82.87	38.72	6.68	48.42	1.29
N	23	11.44	8.13	3.80	0.22	1.59	0.35
NE	40	19.90	24.08	11.25	1.02	7.36	0.60
E	10	4.98	6.96	3.25	0.26	1.89	0.70
SE	32	15.92	37.47	17.51	1.95	14.15	1.17
S	2	1.00	5.39	2.52	0.35	2.56	2.70
SW	19	9.45	40.68	19.01	2.85	20.65	2.14
W	11	5.47	8.46	3.95	0.47	3.38	0.77
总计	201	100	214.04	100	13.80	100	1.06

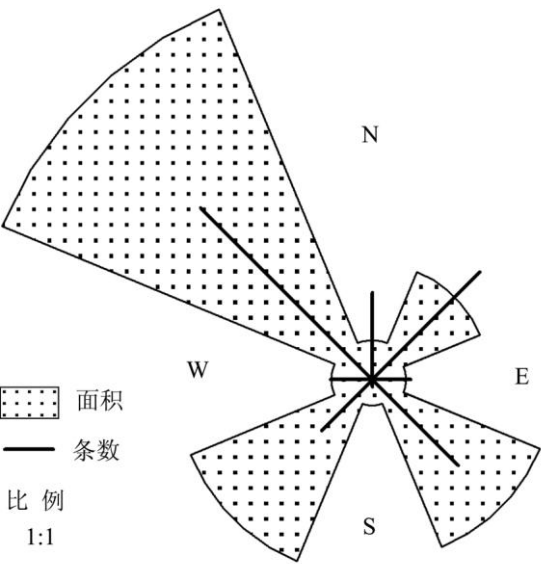


图 2.4 冰川朝向玫瑰图

Fig.2.2 The glaciers toward roses

冰川朝向是指冰川所在的山坡面对的方向，通常按 8 个方位（北（N）、北东（NE）、

东 (E)、东南 (SE)、南 (S)、南西 (SW)、西 (W) 和北西 (NW)) 进行统计^[21]。据阿尔泰山区冰川编目统计 (表 2.2, 图 2.2), 从表中可以看出, 偏向北 (北西、北和北东) 朝向冰川共 127 条, 面积 115.08km², 分别占冰川总条数和总面积的 63.18% 和 53.77%; 偏向南 (南东、南、南西) 朝向冰川共 53 条, 面积 83.54km², 分别占冰川总条数和总面积的 26.37% 和 39.03%。偏北向与偏南向冰川条数和面积的比值 (S/N) 分别为 2.41:1 和 1.38:1, 显示布尔津河上游河源区冰川朝向分布具有明显的不对称性, 即朝北向冰川数量多于朝南向冰川。这主要是由于北坡接受太阳日照射时间短, 接收太阳辐射少, 有利于冰川发育。但从冰川规模上看, 北西、北和北东朝向冰川平均面积分别为 1.29km², 0.35km² 和 0.60km², 南东、南、南西朝向冰川平均面积分别为 1.17km², 2.70km² 和 2.14km², 偏南向冰川明显高于偏北向冰川规模, 可能是由于偏北向适宜冰川发育, 较小的冰川较于容易依靠低温存留下来, 从而使总条数增多, 而冰川面积相对较小^[21]。

3 数据与研究方法

3.1 数据源

地形图: 1959 年航拍的航片调绘而成的比例尺 1:5 万地形图。用高精度扫描仪对地形图进行扫描, 进行几何精纠正并重采样, 几何纠正的均方根误差小于 1 个像元, 满足精度要求。

冰川编目: 《中国冰川目录 II—阿尔泰山区》。

遥感影像: 2008 年 8 月获取的 ASTER_L1B 数据影像 1 幅, 云量覆盖较少, 冰川处于消融末期。

气象数据: 由于研究区没有直接的气象观测站, 选取与之最近的哈巴河气象台站观测资料作为研究区冰川变化气候背景参考, 数据由中国气象科学数据共享服务网 (<http://cdc.cma.gov.cn>) 提供。

ASTER 是一种高分辨率多光谱获取仪器, 由美国航空航天局 (NASA) 与日本国际经贸商业部 (METI, Ministry of Economy, Trade and Industry) 联合发布。是 GLIMS 用于对全球冰川的长度、面积、表面高程、运动速度、冰川物质平衡以及平衡线高度等进行监测的主要传感器^[85]。

表 3.1 ASTER 相关参数特征

Tab.3.1 Characteristics of ASTER parameters

光学子系统	波段号	光谱范围（μm）	空间分辨率（m）	辐射分辨率（%）	绝对精度（%）	量化级（bits）
可见光 近红外 （VNIR）	1	0.52~0.60	15	NEΔρ≤0.5	≤±4	8 bits
	2	0.63~0.69				
	3N	0.78~0.86				
	3B	0.78~0.86				
短波红外 （SWIR）	4	1.600~1.700	30	NEΔρ≤0.5	≤±4	8 bits
	5	2.145~2.185		NEΔρ≤1.3		
	6	2.185~2.225		NEΔρ≤1.3		
	7	2.235~2.2.365		NEΔρ≤1.3		
	8	2.295~2.365		NEΔρ≤1.0		
	9	2.360~2.430		NEΔρ≤1.3		
热红外 （TIR）	10	8.125~8.475	90	NEΔρ≤0.3K	≤3K（200~240K）	12 bits
	11	8.475~8.825			≤2K（240~270K）	
	12	8.925~9.275			≤1K（270~340K）	
	13	10.25~10.95			≤2K（340~370K）	
	14	10.95~11.65				
幅宽			60km			
侧视角			±8.55 °			
VNIR			±24 °			
B/H			0.6			
立体成像后视角			27.6 °			

ASTER 是搭载在对地观测系统 EOS-Terra 卫星上的星载热量散发和反辐射仪, 是大范围冰川动态监测的主要光学传感器之一。该数据由 14 个波段组成, 包括 3 个独立的光学系统: 可见光/近红外辐射计 (VNIR, Visible and Near Infrared), 短波红外辐射计 (SWIR, Short Wave Infrared) 和热红外辐射计 (TIR, Thermal Infrared), 其相应的基本性能见表 3.1。可见光和近红外波段包括 1、2、3 波段, 空间分辨率为 15m; 4~9 波段为短波红外波段, 空间分辨率为 30m, 10~14 波段为热红外波段, 空间分辨率为 90m (表 3.1)。同现阶段其他主流遥感平台传感器相比, ASTER 数据具有数据质量稳定、较高空间分辨率高, 波谱更细、波谱组合形式更多、价格低, 重复周期短, 覆盖面广、具有立体观测能力等优势^[86,87] (表 3.2)。

表 3.2 ASTER 传感器与其他传感器比较

Tab.3.2 Comparison of ASTER sensor and other sensors

传感器及波段范围		空间分辨率 (m×m)	幅宽 (km)	波段数	立体像对	价格 (元)
ASTER	Multi/VNIR	15×15	60	4	有 (沿轨)	600
	Multi/SWIR	30×30	60	6	无	
	Multi/TIR	90×90	60	5	无	
MODIS	Multi/VNIR	250×250	2330	3	无	免费
	Multi/SWIR	500×500	2330	5	无	
	Multi/TIR	1000×1000	2330	29	无	
LandSat7/ETM+	Multi	30×30	185	7	无	4000
	Pan	15×15	185	1	无	
SPOT5/HRG	Pan	5×5	60	1	无	15000
	Multi/VNIR	10×10	60	3	有 (交轨)	
	Multi/SWIR	20×20	60	1	有 (交轨)	
SPOT5/HRS	Pan	10×10	120	1	有 (沿轨)	80/km ²

3.2 数据预处理

3.2.1 统一坐标系

首先对地形图、ASTER 影像进行坐标归一化处理。由于航测绘制的地形图采用的是高斯-克吕格投影, 1954 北京北京坐标系, 而影像数据采用的是 UTM (通用横轴墨卡托投影, Universal Transverse Mercator) 投影和 WGS84 坐标系。地形图、ASTER 影像的投影坐标信息不同, 在不同数据层叠合分析、空间运算时会有矛盾, 所以先统一投影方式, 进行坐标变换, 将 ASTER 影像和 1:5 万的地形图数据统一为相同坐标系。根据《冰川编目规范》所阐述的技术规程要求, 均采用统一的 UTM (45N 带) 投影和 WGS84 椭球体建立坐标系统。

3.2.2 地形图数据处理

对几何纠正后的地形图拼接, 作为地理地图。

冰川信息由地形图直接数字化取得。在 ArcGIS9.3 软件下对冰川边界, 冰川区等高线, 高程特征点、河流水系等进行矢量化处理, 利用空间分析功能计算矢量化后冰川区面积、长度等相关数据, 并参考《中国冰川编目》获取冰川的名称、朝向、类型等属性信息。本文为了估算冰川储量变化情况, 采用《中国冰川编目-祁连山区》所使

用的经验公式^[88]得到 1959 年冰川储量（公式 3-2）。

$$\bar{H} = 34.4 \times F^{0.45} \quad (3-1)$$

$$V = \bar{H} \times F \quad (3-2)$$

式中 $\bar{H}$ 是冰川平均厚度； F 是冰川面积；冰川面积大于 10km² 的冰川，厚度采用分级估算（表 3.3）

表 3.3 大于 10 km²冰川厚度估算表

Tab.3.2 Gciar Elevation estimation table of more than 10 km²

冰川面积 (km ²)	冰川平均厚度 (m)
10~15	100
15~20	110
≥30	130

在 ArcGIS 9.3 软件下应用的 3D Analyst 模块中提供了由点、线、面等共同插值成 TIN（不规则三角网，Triangulated Irregular Network）的方法。将等高线和高程特征点作为 mass points，河流水系作为硬断线（hard line），用 Create TIN 命令生成不规则三角网，由于规则格网 DEM 相对于不规则三角网 DEM 计算简单，存储量小，便于管理，复杂地形反映清晰，所以具体操作中还需要通过 TIN to Raster 命令将 TIN 转换为规则格网 DEM。用该方法生成的 DEM 的插值数据不会超出采样点的高程值范围，是目前生成 DEM 的常用方法。

3.2.3 遥感影像处理

生成 ASTER DEM。ASTER 影像在天底方向的空间分辨率为 15m，另外在近红外通道有一个后视点波段，可以由天底方向近红外波段（Band_3n）和后视方向近红外波段（Band_3b）沿轨迹方向形成立体像对，进行立体观测，用于 DEM 的生产。利用 ENVI4.7 软件 DEM Extraction Wizard 模块对 ASTER 立体像对数据提取 DEM，在 1:5 万地形图选取 40 地面控制点(GCPs)，根据地物的明显程度提取了 49 个连接点(TIEs)点，进行空间三角测量，重采样为 30m，使其与地形图 DEM 具有相同分辨率。最终生成 DEM 并进行编辑，采用三角网内插填补无效值区域和代替高程误差在阈值以外的点^[89]。

冰川识别的方法主要分为两类：人工目视解译的信息提取、计算机辅助分类方法。虽然人工目视解译费时费力，但解译精度高，现阶段仍然是分辨冰川形态的最佳方法^[90-92]。而且本研究区表碛覆盖较广，计算机解译分类容易出现表碛覆盖冰川区与岩体难以区分的现象，参照冰川编目资料、地形图，结合冰川学知识对冰川边界进行了准

确的判读和勾画，尽量减小误差^[93,94]。为了更好的进行冰川区的判别，需要对遥感影像做以下处理：

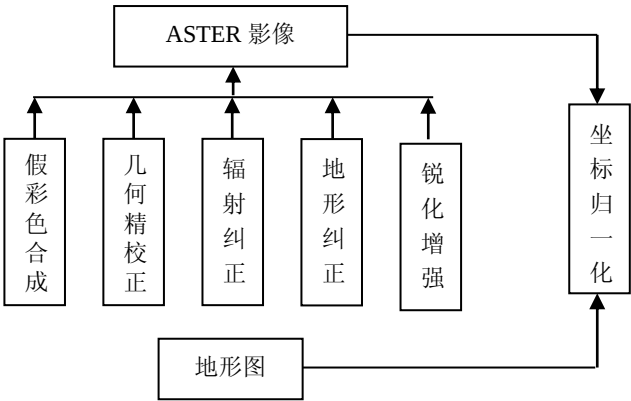


图 3.1 遥感图像处理流程图

Fig.3.1 The technology route of RS image processing

3.2.3.1 假彩色合成

假彩色合成又称彩色合成。根据减色法或加色法原理，将多波段单色影像合成为假彩色影像的一种彩色增强技术。本研究利用 ERDAS9.3 软件中 Interpreter 模块的 Layer Stack 功能，选取较高分辨率的可见光/近红外波段 Band1、Band2、Band3N 按 B（蓝）、G（绿）、R（红）顺序进行假彩色合成。合成后影像色阶丰富、对比度高、色彩鲜明、轮廓突出，更利于冰川区提取。

3.2.3.2 辐射校正

受太阳位置条件、大气吸收、散射、传感器性能不完备等因素的影响，传感器得到的目标物光谱辐射亮度值与目标物的光谱辐射亮度值不一致，造成影像像元灰度值失真，这些失真直接导致多时相影像上同一目标的光谱特征差异很大,从而影响遥感数据的应用和遥感技术的进一步应用，所以辐射校正是遥感数据处理不可缺少的步骤之一。遥感数据经过辐射校正后，图像的亮度增强，冰川区与周围非冰川区对比度加强。辐射校正方法主要有利用辐射传输方程求解、基于地面场地数据或辅助数据进行辐射校正及利用波段特性进行大气辐射校正等方法。

3.2.3.3 几何精校正

遥感图像在成像过程中，由于地球的旋转、传感器几何成像方式、传感器位置和姿态角变化、传感介质的不均匀、大气的折射、地球曲率、地形起伏等因素的影响，使获得的遥感图像上各地物的几何位置、形状、尺寸、方位等特征与在参照系统中的表达要求不一致，使图像产生了几何形状或位置的失真^[95]。变形规律为平移、缩放、旋转、偏扭、弯曲以及更高次的基本变形的综合作用结果。因此要进行遥感图像的应

用研究就必须先进行几何校正。几何校正就是针对成像过程中造成的各种几何畸变，改变原始影像的几何变形，将含有畸变的图像纳入到在应用过程中某种地图投影或者图形表达的新图像中。几何校正的模型有很多种，例如图像仿射变换（Affine）模型、多项式变换（Polynomial）模型、投影变换（Reproject）模型、非线性变换（Rubber Sheeting）模型等。本文中选择二元多项式模型进行几何校正（公式 3-3）。在 ERDAS Imagine9.1 中的 Data Preparation 模块的 Imagine Geometric Correction 中进行，将地形图作为参考图层，在 ASTER 图像上采集地面控制点（GCP, Ground Control Point），建立影像与参考图层之间的坐标函数关系（公式 3-4），从而达到对研究区 ASTER 遥感影像进行几何校正的目的。地面控制点为 24~30 个，尽可能均匀覆盖整个冰川所在研究区。控制点采集尽量在非冰雪区的山顶、道路交叉点等固定点。

$$x = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} a_{ij} u_i v_j \quad = (1, 2, 3, \dots) \quad (3-3)$$

$$y = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} b_{ij} u_i v_j$$

$$x = f_x(u, v)$$

$$y = f_y(u, v) \quad (3-4)$$

均方根误差（RMSe, Root Mean Square error）根据公式：

$$RMSe = \sqrt{(x_r - x_i)^2 + (y_r - y_i)^2} \quad (3-5)$$

式中 x_i 和 y_i 是输入的影像的坐标； x_r 和 y_r 是参考影像的坐标。

3.2.3.4 正射校正

正射校正是借助地面高程模型对图像中的每个像元进行地形畸变的校正过程，使图像符合正射投影的要求。平原地区微弱的起伏对影像的变形影响不大，只需进行几何纠正不需要正射校正，而在中国阿尔泰山布尔津河上游河源区地处南阿尔泰山的中心地区，地形起伏变化较大，引起的图像变形误差超过限差，除了正常的几何位置的纠正外还需要对影像正射校正。该区选择地面 25 个地面控制点，利用 ASTER DEM 对影像采取倾斜和投影差改正，然后重采样成为 15m 米的正射影像。正射影像消除了因成像方式造成的误差，消除了地形影响，具有地形图特性和影像特性，信息相对丰富，适用于不同来源数据。

3.2.3.5 图像锐化

为了进一步突出 ASTER 影像冰川区的边缘部分，可采用图像锐化增强方法。其实质是通过卷积函数对图像进行运算，使整幅影像的亮度变化率较大的冰体部分得以增

强，图像变得清晰，而影像专题内容不改变，有利于目视解译的进行。分空间域处理和频率域处理两类。

3.2.3.6 归一化处理

以纠正后的地形图为底图，控制点选择布尔津河上游河源区内地形图和 ASTER 影像上均可明显识别的地物点，对遥感影像和地形图进行配准，处理过程在 ERDAS 9.3 软件进行。以地形图为参考坐标建立坐标系统，统一投影为 UTM/WGS84，建立坐标转换方程进行几何精纠正和坐标归一化处理。

3.3 技术路线

国内外当前大规模监测冰川变化的常规方法是通过多时相多波段遥感影像来提取冰川信息，比较得出各时期冰川空间分布情况^[81]。而多源 DEM 数据的出现，使冰川厚度变化的获取成为可能。本研究采取 Berthier 等^[55]的方法，以 1959 年冰川面积为基础，两期 DEM 作差得到厚度变化，通过 1959 年冰川面积与厚度变化相乘得到储量变化。技术路线如图 3.2：冰川范围提取、冰川轮廓图层的叠置分析、冰川厚度变化计算、冰川储量变化计算。与此同时，给出了对应的结果分析。

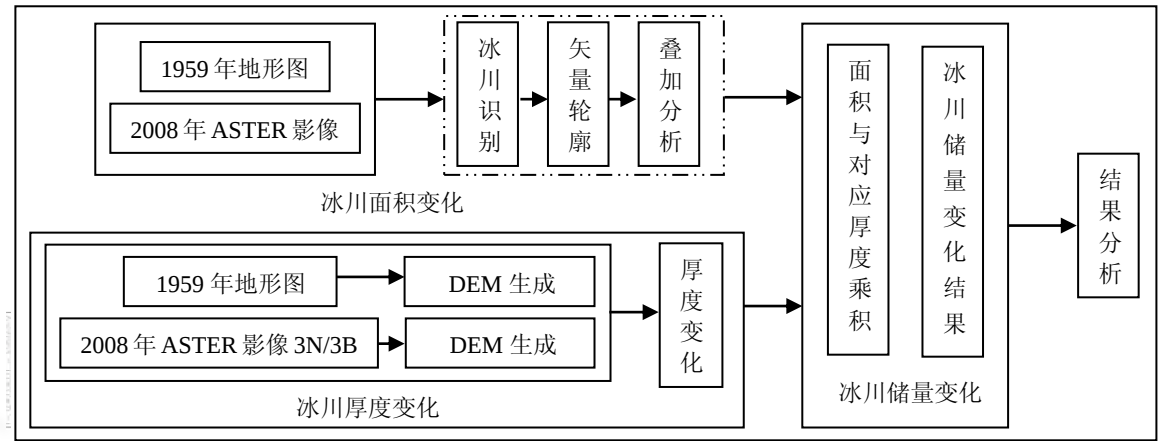


图 3.2 技术路线

Fig.3.2 The technology route

3.4 不确定分析

冰川变化遥感研究中不同数据源的不确定性影响因素不一。本研究主要包括地形图 DEM，ASTER DEM 和 ASTER 遥感影像冰川区面积判读等。地形图 DEM 的误差来源主要是原始资料的误差、采点设备误差、人为误差、坐标转换误差、高程内插误差。其精度评价采用唐新明等^[96]所述的方法，其最大高程差为+14.21m。符合国家测绘局 1：5 万数字高程模型生产精度要求。对于 ASTER DEM 精度评估采用“检查点法”^[97,98]，在海拔大于 2350m（森林上限）^[99]的非冰川区选择 60 个高程同名点与地形图比较，来

评价生成 ASTER DEM 的精度，结果表明，布尔津河上游河源区 ASTER DEM 的最大高程差为+13.45m。

由于受高山区地形复杂，高大山体在冰川上产生的阴影、积雪和云等气象要素、表碛物等因素影响，此外遥感影像空间分辨率、影像质量以及影像校正、配准时均会产生误差，准确界定遥感影像中冰川边界是一项重要而又相对困难的工作。由于遥感影像的空间分辨率与均方根误差都影响到冰川边界提取的准确性^[100]，据 Hall、Silvreo、Ye 等计算面积变化不确定性的公式^[101,102]：

$$U_A = 2 \left(\sqrt{\sum \lambda^2} + \sqrt{\sum \lambda \varepsilon^2} \right) \sqrt{\sum \lambda^2} + \sqrt{\sum \lambda \varepsilon^2} \quad (3-6)$$

式中 λ 为影像分辨率； ε 为配准误差； U_A 为面积不确定性。计算得单条冰川面积的最大误差为 $\pm 0.0024\text{km}^2$ 。

4 布尔津河上游河源区冰川变化特征

4.1 厚度变化

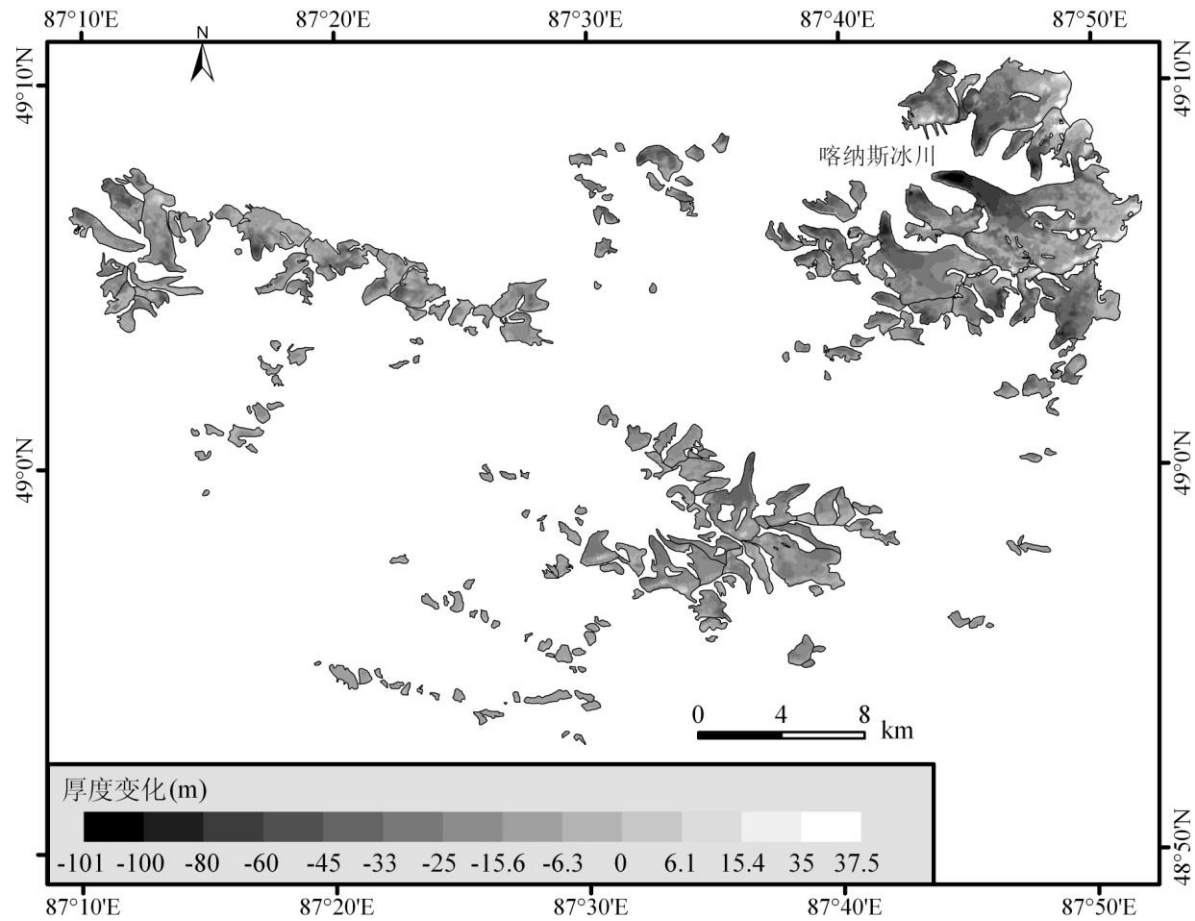


图 4.1.1959 ~ 2008 年冰川区厚度变化图

Fig.4.1 Surface elevation changes of glaciers in the study area from 1959 to 2008

通过计算，冰川区 1959~2008 年 50 年间厚度平均变化-20.17m，年均达-0.412m/年。图 4.1 显示了 1959~2008 年新疆布尔津河上游河源区 201 条冰川 DEM 差值结果及 1959 年冰川轮廓线（黑色）。分析显示，冰川区整体处于消融状态，仅仅在高海拔积累区有少量的积累；消融量在空间分布上具有一致性，即在低平冰舌处冰川消融极其强烈，最大值超过了 100m，随着海拔的升高，距冰川末端越远，消融减弱，除了温度随着高度的增加递减外，其很重要的一个原因是在坡度较陡的区域无法形成稳定的表碛覆盖，末端附近表碛较厚，沿冰川上游表碛厚度变薄，在高海拔地区基本以裸冰的形势存在。

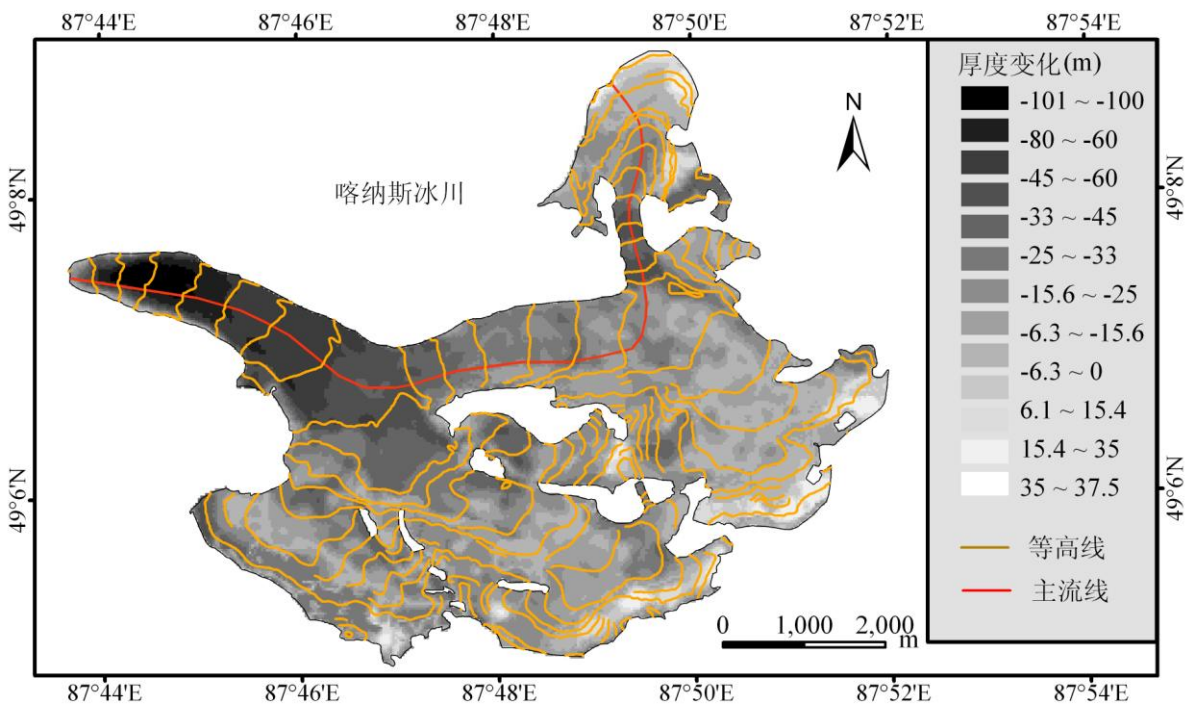


图 4.2.1959~2008 年喀纳斯冰川厚度变化图

Fig.4.2 Surface elevation changes of Kanas glacier from 1959 to 2008

喀纳斯冰川（也叫做哈拉斯冰川）为本研究区面积最大 N-W 向复式山谷冰川，长 10.8km，面积 30.13km²，末端海拔 2416m，为我国现代冰川末端海拔最低的冰川。冬春积雪厚达 1.5~2.0m，冷季补给较大，夏季消融较强，具有冰温较高、运动速度较快的特点，为冷季补给占优势的亚大陆性冰川^[46]，具有良好的代表性，是科学考察、研究及旅游最佳基地。图 4.2 为喀纳斯冰川近 50 年冰川厚度变化特征，该冰川冰舌厚度变化总体呈中部深厚、上下两端浅薄的格局，自冰川末端向上，冰川厚度变化呈现阶梯状变化过程，沿主流线方向冰体厚度变化最大。

4.2 海拔与平均厚度变化

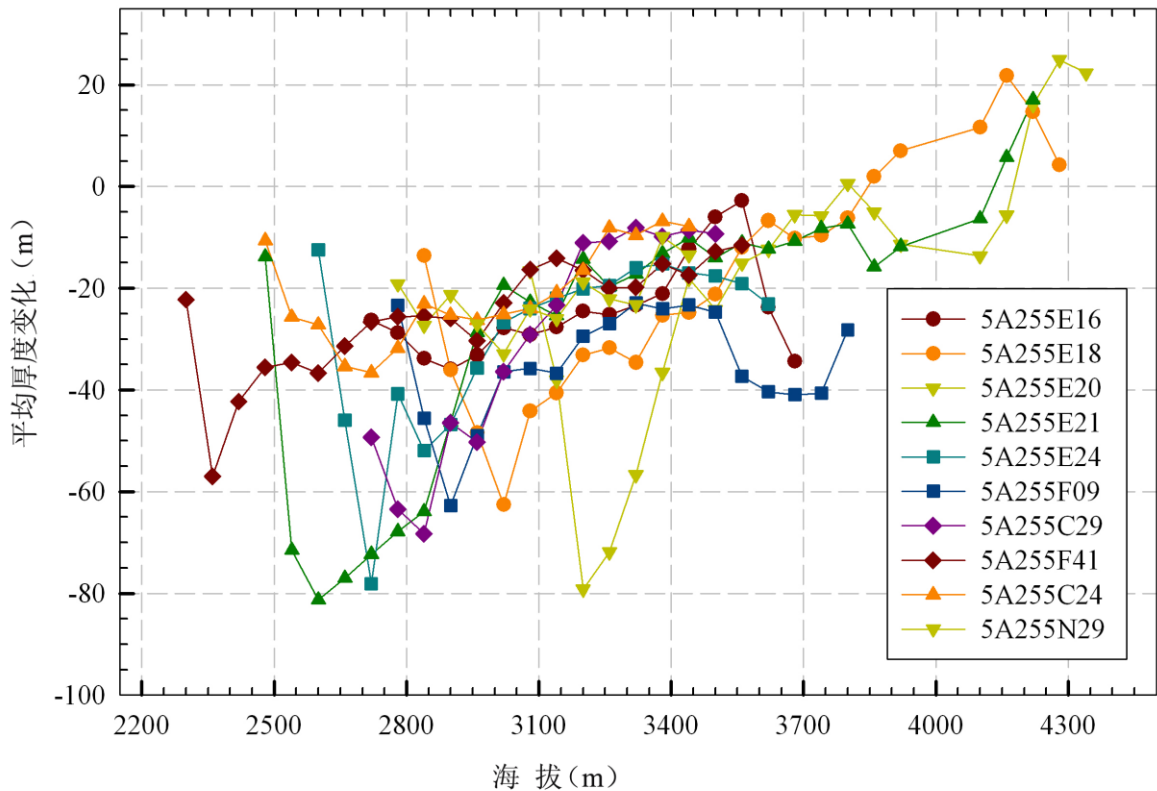


图 4.3.1959 ~ 2008 年不同海拔区间内 6 条典型冰川平均厚度变化

Fig.4.3 Elevation changes from different elevation region for six larger glaciers from 1959 to 2008

图 4.3 显示了本研究区面积大于 3 km^2 的 10 条冰川随着海拔升高平均厚度变化情况，低海拔地区厚度损失明显增加，冰川末端平均厚度损失最大值在 60m 以上，尽管对于不同的冰川有不同的地理位置和地形环境，但它们在相应的不连续区间趋势是类似的。在海拔超过 3400m 以上冰川整体趋于平稳，区域波动开始变小，均在 $0 \sim -40\text{m}$ 之间变化。然而在各自冰川的最高处，又因为山坡陡峭和 ASTER 生成的 DEM 的精度等因素导致出现波动。

4.3 冰川规模与平均厚度变化

图 4.4 显示了 201 条冰川不同面积大小对应均值高程变化趋势，发现面积小于 1km^2 的冰川有 150 条，占该区冰川数量的 74.6%，其厚度变化集中分布于 $-20\text{m} \sim -10\text{m}$ 之间，厚度变化平均值为 -15.25m ；小于 10km^2 的冰川有 48 条，占冰川总数的 23.9%，其均值厚度变化介于 $-30\text{m} \sim -20\text{m}$ 之间，厚度变化平均值为 -20.68m ；而大于 10km^2 的 3 条冰川之间的厚度变化幅度较小，厚度变化平均值为 -23.48m 。该图还反映了冰川面积与厚度变化有一定的相关性，冰川面积大小对厚度变化影响显著。与托木尔峰地区相似，大冰川是以减薄的形势消融，遵循“减薄后退”的规律^[6]。

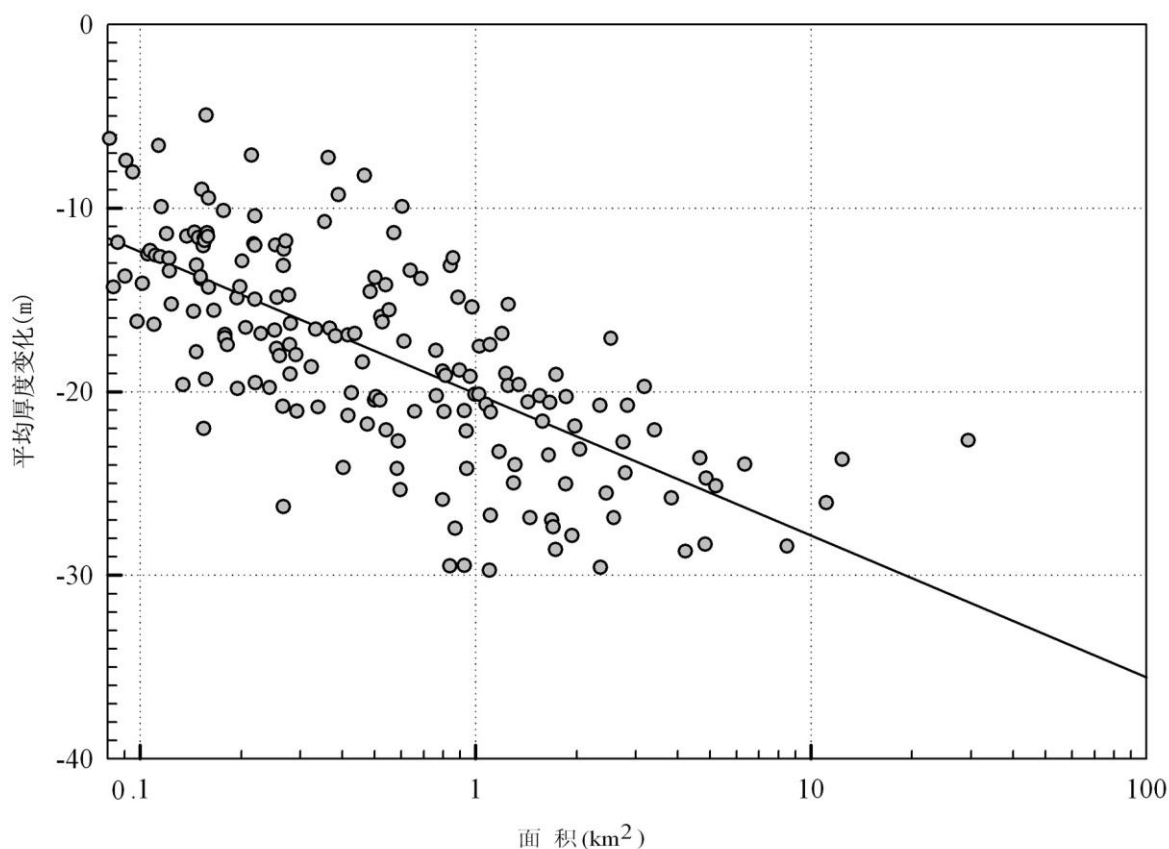


图 4.4 1959~2008 年不同等级冰川的平均厚度变化

Fig.4.4 Glacier size vs.mean elevation change from 1959 to 2008

4. 4 冰川面积与储量变化

表 4.1 1959~2008 年不同规模冰川面积、储量及其变化率

Table 4.1 Volume,area and its rate in different size of glaciers from 1959 to 2008

分类	1959 年			2008 年			面积变 化率	储量 变化	储量变 化率
	条数	面积	面积比例	条数	面积	面积比例			
/km ²	/条	/km ²	/%	/条	/km ²	/%	/%	/km ³	/%
<0.5	114	21.70	10.14	87	16.08	10.80	-51.82	-0.277	-69.76
0.5~1	36	26.33	12.30	27	18.22	12.23	-44.91	-0.456	-57.04
1~4	41	74.54	34.83	26	51.51	34.58	-35.72	-1.467	-41.76
4~10	7	38.60	18.03	4	24.75	16.62	-24.72	-0.872	-29.90
>10	3	52.87	24.70	2	38.38	25.77	-10.71	-1.248	-20.12
总计	201	214.04	100	174	148.94	100	-30.42	-4.320	-31.32

通过对遥感影像（2008）和地形图（1959）两期资料进行分析和整理，研究区冰川共 201 条，近 50 年来储量减少了 4.320km³，冰川冰融水年径流量为 7.776×10⁷m³。1959 年、2008 年的冰川总面积分别 214.04km²、148.94km²，平均面积分别为 1.06km²，1.03km²，面积共减少了 65.11km²；近 50 年来，共有 58 条冰川消失，集中于冰川面积

小于 0.5km^2 独立发育的冰川。消失冰川总面积达 9.55km^2 ，占 1959 年面积的 4.46%。

为了更好的体现冰川发育与冰川规模良好的一致性，将冰川按照面积大小分成 4 个等级(如表 4.1)，小于 1km^2 的冰川数量占总数的 74.6%，但面积不足总面积的 23%；其中小于 0.5km^2 的冰川数量又占总数的 55%以上，面积仅为总面积的 10.14%，面积变化和储量变化分别为-51.82%和-69.76%。而大于 10km^2 的冰川所占比例不足 1.5%，面积占总数的 24.70%，面积变化和储量变化分别为-10.71%和-20.12%。随着面积的增大，储量变化在逐渐的增多，且增幅越来越大。综上所述，本研究区内小冰川数量占绝大多数，小冰川较之大冰川变化量小，变化率大；而面积与储量主要分布于大于 1km^2 的冰川，且集中于几条较大的冰川，大冰川的变化决定了区域平均变化的趋势。比较相同规模冰川储量和表面积的变化比例不难发现，冰储量变化大于冰川面积变化，符合冰川体积变化大于冰川面积变化这一认识。

4.5 气候变化对冰川变化的影响

近 50 年来新疆地区气温普遍升高，近 10 年尤为显著。降水量增多，气候由暖干向暖湿转变^[60]，受气候变暖的影响，导致冰川处于消融状态。气候变化是冰川变化的驱动因素，气候变化引起冰川积累和消融的变化，导致零平衡线和冰川高度的升降等一系列复杂变化。在气象要素中，水（降水）、热（气温）及其组合是影响冰川生存、发育和规模演化的主要气候因子。而夏季气温和年降水是冰川变化的两个主要的关键因素，夏季气温决定冰川消融量，年降水影响冰川积累量。经考察发现，布尔津河上游河源区冰川消融期一般在夏季 6~8 月，冰川积累期在冬季的 11 月至翌年 3 月。为分析气温和降水对冰川变化的影响，这里选取与研究区相邻近的哈巴河气象站($48^{\circ}03'\text{N}$, $86^{\circ}24'\text{E}$)观测数据作为冰川变化气候背景参考。据统计，1958~2009 年间年平均温度上升约 2.6°C ，合 $0.44^{\circ}\text{C}/10$ 年，大于天山区的 $0.34^{\circ}\text{C}/10$ 年^[103]，符合新疆地区“北大南小”的降水增幅趋势，明显高于全国平均值 $0.22^{\circ}\text{C}/10$ 年^[104]。从线性关系看(图 4)，消融期和积累期的平均气温都呈现增加的趋势，特别是 80 年代后期(20 世纪后期)以来，温度上升趋势更加明显。消融期年均温增加较大，促使消融期冰川表面温度升高，加剧了冰川消融。积累期升温幅度较显著，使得冰川活动层开始升温的时间提前，温度保持较高状态持续时间较长，导致冰川表面消融增加。

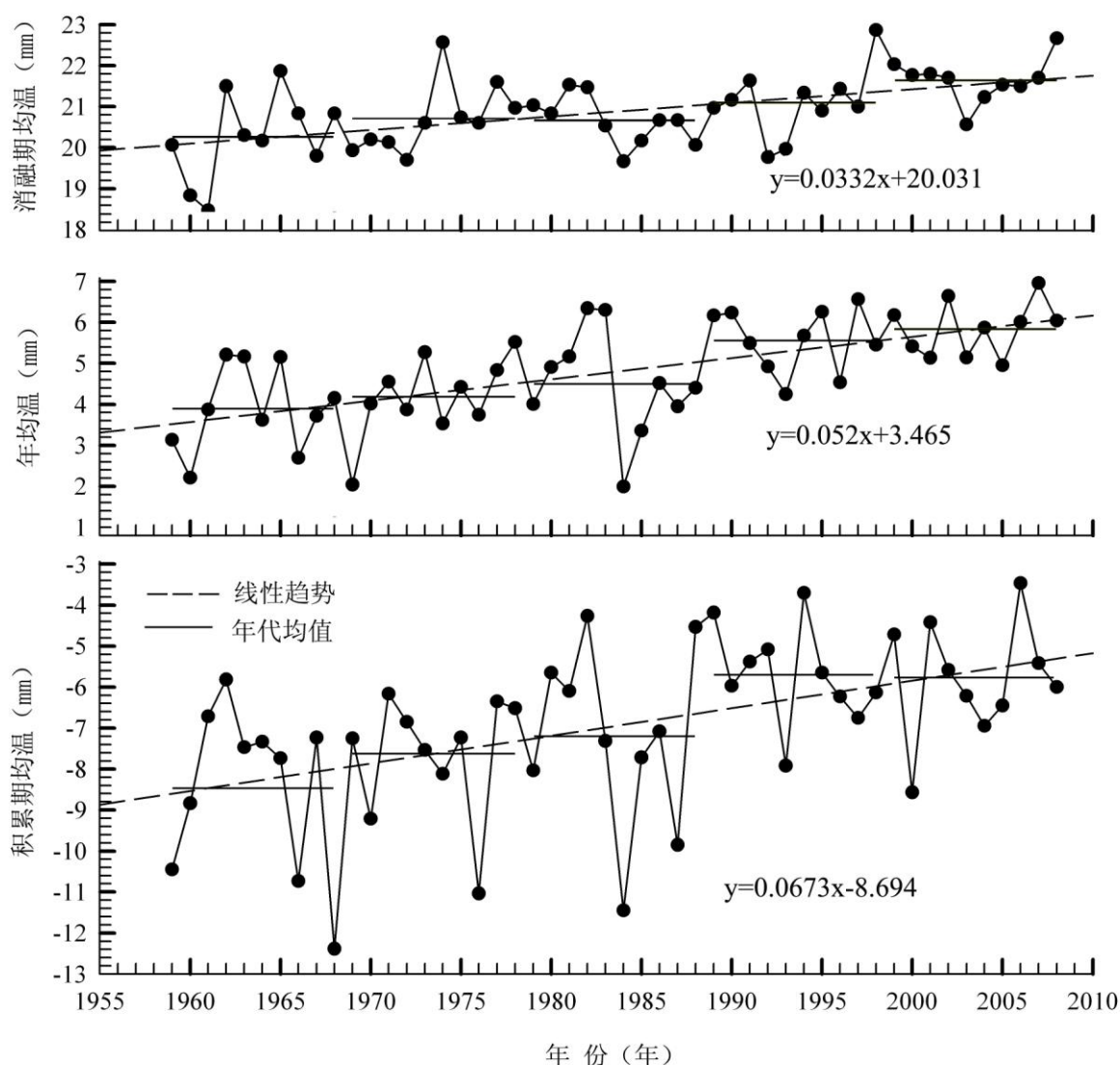


图 4.5.1958~2009 哈巴河气象站消融期、积累期及年平均温度

Fig .4.5 The average temperature of ablation period、accumulation period and annual
at Habahe meteorological station between 1958 and 2009

分析 1959~2008 年哈巴河气象站降水数据, 自 1959 年以来, 降水量介于 90~300mm 之间, 1959~2008 年间年降水量呈现增加趋势, 年降水量增加约 479.17mm, 合 9.8mm/10 年, 略小于天山区的 11 mm/10 年^[103]。符合新疆地区“北小南大”的降水增幅趋势。特别是 20 世纪后期以来, 该区降水增加趋势更为明显, 与施雅风提出的中国新疆地区从由暖干向暖湿转变一致^[12]。降水增加有利于冰川积累, 但是冰川消融依然剧烈, 主要原因是升温导致冰川消融较强, 降水量增加带来的物质的积累不足以弥补气温升高造成的亏损, 冰川呈现消融状态。研究区相对年降水量依然较少, 虽然年均降水量有增加的趋势, 上升幅度不足以抵消冰川的加速退缩, 因此布尔津河上游河

源区冰川退缩主要是由于气温升高气候变暖造成的。

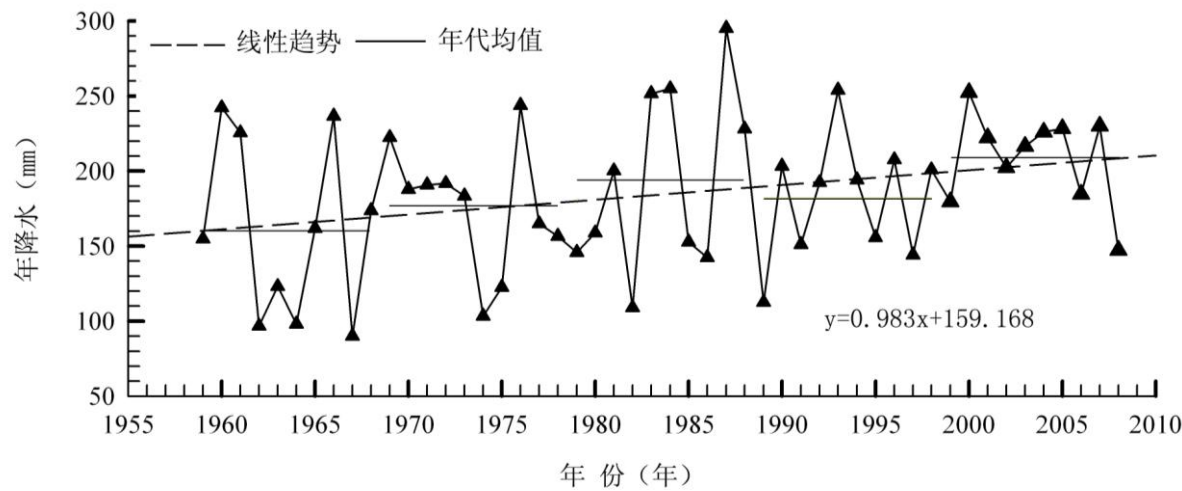


图 4.6.1958~2009 哈巴河气象站年降水

Fig.4.6 The mean values of annual precipitation at Habahe meteorological station

5 对比分析

为了进一步研究新疆布尔津河上游河源区冰川的变化特征，与中国其他山系冰川面积变化相比（表 5.1），阿尔泰山地区冰川面积年平均减少率是最大的，是冰川面积退缩最强烈的地区。同时，与天山不同区域冰川厚度变化比较（表 5.2），布尔津河上游河源区冰川消融明显强烈。

随着全球气候的波动变暖，本研究区与其它区域冰川变化呈现同样的趋势，即面积退缩、厚度减薄。但由于区域间气候及位置等差异，其变化特征又不尽相同。布尔津河上游河源区由于冬季和夏季的平均气温都呈现明显的增加趋势，且夏季升温幅度较大，冰川表面温度升高，冬季积累不足以弥补气温升高造成的物质平衡的亏损，使得冰川加速退缩。且该地区是中国冰川雪线分布最低的流域，冰川区平均海拔相对较低，冰川平均面积小，导致该区面积变化较大，厚度减薄十分明显^[6]，对气候变化较敏感，应该加强该区域冰川的监测，密切关注冰川退缩后对该地区的生态及水资源方面的影响。虽然该地区冰川融水在径流中的份额不是太大，短期内冰川退缩将使河流水量呈增加态势，但冰川的急速退缩亦会加大以冰川融水补给为主的河流或河段的不稳定性，随着冰川的持续退缩，冰川融水将锐减，以冰川融水补给为主的河流特别是中小支流将面临逐渐干涸的威胁。

表 5.1 近几十年来中国西部冰川面积变化比较

Table 5.1 Statistics of the glacier area changes in western china in recent decades

位置	时间段	数量	总面积	消失条数	面积变化率	资料来源
	/年	/条	/km ²	条	/%	
布尔津河上游河源区	1959~2008	201	214.04	58	-30.42	本研究
中国阿尔泰山	1960~2009	389	283.39	116	-36.91	[82]
朋曲流域	1980~2001	999	1 461.84	99	-8.98	[105]
昆仑山北坡	1970~2001	372	1776.96	-	-0.3	[106]
祁连山西段	1956~1990	1731	1229.4	-	-10.3	[107]
乌鲁木齐河	1964~1992	155	48.04	0	-13.8	[94]
喜马拉雅东段洛扎地区	1980~2007	335	491.64	27	-16.40	[108]
伊犁河	1963~2004	293	265.81	11	-18.9	[6]
托木尔峰地区	1964~2003	483	2267.71	-	-8.8	[6]

表 5.2 与天山不同区域冰川厚度变化比较

Table5.2 Comparison of elevation changes of the glaciers in different areas of Tianshan Mountains in recent decades

研究区域	位置	数量	时间段	冰川厚度年均减薄	资料来源
		/条	/年	m/年	
布尔津河上游河源区	49°00'~49°11'N, 87°36'~87°53'E	201	1959~2008	0.412	本研究
Akshiirak	41°43'~41°59'N, 78°15'~78°22'E	178	1943~2000	0.4±0.10	[37]
青冰滩 72 号冰川	41°45'N, 79°54'E	1	1964~2008	-0.22 (冰舌)	[14]
乌鲁木齐河源 1 号冰川	43°06'N,86°49'E	1	1962~2006	0.15	[14]
黑沟 8 号冰川	43°46'N,88°23'E	1	1986~2009	0.57 (冰舌)	[14]
四工河 4 号冰川	43°49'N,88°21'E	1	1962~2009	0.32 (冰舌)	[14]
哈密庙尔沟冰川	43°03'N,94°19'E	1	1981~2005	0.21 (海拔 4 295~4357m)	[109]

6 结论与展望

本文在前人研究的基础上，通过 1959 年地形图和 2008 年遥感影像数据，结合 RS 和 GIS 技术，对新疆布尔津河上游河源区部分冰川近 50 年来冰川变化进行了分析，结果表明：

厚度变化：本研究区是阿尔泰山地区冰川集中分布的区域，平均面积达 1.06km²，明显大于整个山脉冰川平均规模 0.70km²。冰川区厚度普遍下降，在积累区有少量积累；随着海拔的升高，相对温度的下降和表碛物的减少等因素影响下冰川均值厚度变化呈

现平缓的趋势，在低平的冰舌处厚度变化达最大值（达-101m），主要原因是冰川的后退和末端冰下河出水口的坍塌所致；冰川的规模一定程度上影响了冰川厚度的变化。

面积和储量变化：在全球气候变暖的情况下，研究的 201 条冰川在 1959~2008 年面积退缩率为 30.42%，储量退缩率为 31.31%，冰川数目减少了 58 条，集中于冰川面积小于 0.5km^2 独立发育的冰川。研究区冰川整体呈退缩趋势，随着冰川的退缩，大冰川向小冰川过度，小冰川趋于消失。小冰川较大冰川对气候变化的响应更为敏感。

主要受气温和降水的影响，冰川变化趋势与中国西部其它区域一致，都呈现消融的趋势，该区域面积年均减小率大，厚度减薄十分明显。但冬季和夏季的平均气温都呈现明显的增加趋势，且夏季升温幅度较大，冰川表面温度升高。除此之外，与冰川所处位置、末端海拔、冰川类型、形态特征、运动速度、表碛覆盖等因素也有直接关系。

本研究在实地考察的基础上对新疆布尔津河上游河源区 1959~2008 年部分冰川的面积和储量进行了估算评价，但由于该地区缺乏实测冰川厚度资料，两期 DEM 只是以地形图为准针对性做了误差的评估，难以得到进一步的修正完善。对于典型冰川缺乏相应气候规律的研究，对未来冰川储量估算、过程和时间尺度上的变化需要进一步把握。因此，未来有必要对该地区进行针对性的观测研究，建立针对不同规模、不同类型冰川的定位观测体系，从而实现遥感和实测相结合的冰川变化完整研究。

参考文献

- [1] IPCC.HoughtonJT, Ding Y, Griggs D J, et al.Climate Change 2001:The Scientific Basis[A].Contributionof Working Group I to the Third Assessment Report[C].Cambridge University.Press, Cambridge, UK, 2001.
- [2] 秦大河, 丁一汇等. 中国气候与环境演变评估(1): 中国气候与环境变化及未来的趋势[J].气候变化研究进展, 2005, 1(1): 4-9.
- [3] 沈永平.IPCC WGI 第四次评估报告关于全球气候变化的科学要点[J].冰川冻土, 2007, 29(1).
- [4] Saltzman B.Climatic system analysis[J].Advances in Geophysics, 1983, 25: 173-233
- [5] 秦大河, 丁一汇, 苏纪兰, 王苏明.中国气候与环境演变(上卷气候与环境的演变及预测)[M].北京: 科学出版社, 2005: 25-26.
- [6] 李忠勤, 李开明, 王林.新疆冰川近期变化及其对水资源的影响研究[J].第四纪研究, 2010, 30(1): 96-106.
- [7] 王宁, 张利权, 袁琳.气候变化影响下海岸带脆弱性评估研究进展[J].生态学报, 2012, 32(7): 2248-2258.
- [8] Ellison J C, Stoddart D R.Mangrove ecosystem collapse during predicted sea-level rise: holocene analogues and implications[J].Journal of Coastal Research, 1991, 7(1): 151-165.
- [9] Lovelock J E.Air pollution and climatic change.Atmospheric[J] Environment, 1971, 5(6): 403-411.
- [10] 周启星, 黄国宏.环境生物地球化学及全球环境变化[M].北京: 科学出版社, 2001.
- [11] 张强, 韩永翔, 宋连春.全球气候变化及其影响因素研究进展综述[J].地球科学研究进展, 2005, 20(9): 991-997.
- [12] 施雅风, 沈永平.西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初探[J].科技导报, 2003(2): 54-57.
- [13] 黄小燕, 张明军, 王圣杰等.中国西北地区近 50 年夏季 0℃层高度及气温时空变化特征[J].地理学报, 2011, 66(9): 1191-1199.
- [14] 王璞玉.天山不同地区典型冰川厚度及储量变化分析 [D].兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2011:
- [15] 施雅风, 沈永平, 李栋梁等.中国西北地区气候由暖干向暖湿转型问题的评估[M].北京: 气象出版社, 2003.
- [16] 张国威, 吴素芬, 王志杰.西北气候环境转型信号在新疆河川径流变化中的反映[J].冰川冻土, 2003, 25(2): 183-187.
- [17] 汤懋苍, 高晓清, 朱德琴.本世纪西北气候可能转型的依据和原因分析[J].冰川冻土, 2003, 25(2): 170-172.

- [18] 张广兴.新疆夏季 0℃层高度变化对河流年径流量的影响[J].地理学报, 2007, 62 (3) : 279-290.
- [19] 谢自楚, 刘潮海.冰川学导论[M].上海: 上海科学普及出版社, 2009.
- [20] 秦大河, 丁永健.冰冻圈变化及其影响研究——现状、趋势及关键问题[J].气候变化研究进展, 2009, 5 (4) : 187-195.
- [21] 施雅风.简明中国冰川目录[M].上海科学普及出版社, 2005.
- [22] 王宗太, 苏宏超.世界和中国的冰川分布及其水资源意义[J].冰川冻土, 2003, 25 (50) : 498-503.
- [23] Dyurgerov MB, Meier M F.Twentieth century climate change: evidence from small glaciers [J].Proceedings of the National Academy of Sciences, 2000, 97 (4) : 1406-1411.
- [24] Oerlemans J, Fortuin J P F.Sensitivity of glaciers and small ice caps to greenhouse warming[J].Science, 1992, 258: 115-117.
- [25] 施雅风.中国冰川与环境[M].北京: 科学出版社, 2000.
- [26] 施雅风, 黄茂桓, 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.
- [27] Dyrgerov M B and Meier M F.Twentieth century climate change: Evidence from small glaciers[J].Proceedings of the National Academy of Sciences of USA, 2000, 97 (4) : 1406-1411.
- [28] Van de Wal, RS, Wild M.Modelling the response of glaciers to climate change by applying the volume-area scaling in combination with a high resolution GCM[J].ClimDyn.2001, (18) : 359-366.
- [29] Oerlemans J.Extracting a climates signal from 169 glacier records[J].Science, 2005, 308: 675-677.
- [30] Haeberli W, Hoelzle M.Application of inventory data for estimating characteristics and regional climate change effects on mountain glaciers: a pilot study with the European Alps [J].Annals of Glaciology, 1995, 21: 206 - 212.
- [31] Barry RG.The status of research on glaciers and global glacier recession: a review[J].Progress in Physical Geography 2006, 30 (3) : 285-306.
- [32] Huggel C, Kääb A, Haeberli W, et al.Remote sensing based assessment of hazards from glacier lake outbursts: A case study in the Swiss Alps[J].Can Geotech J, 2002, 39: 316-330
- [33] 姚檀栋, 刘时银, 蒲健辰等.高亚洲冰川的近期退缩及其对西北水资源的影响[J].中国科学 (D 辑), 2004, 34 (6) : 535-543.
- [34] 李治国, 姚檀栋.国内外冰川变化对水资源影响研究进展[J].自然资源学报, 2008, 23 (1) : 1-8.
- [35] 叶佰生, 韩添丁, 丁永建.西北地区冰川径流变化的某些特征[J].冰川冻土, 1999, 21 (1) : 54-58.
- [36] Ding Yongjian, Liu Jingshi.Glacier lake outburst flood disasters in China[J]. Annals of Glaciology, 1992, 16: 180-184.
- [37] Vladimir B. Aizen, Valeriy A, et al. Glacier changes in the Tien Shan as determined from topographic

- and remotely sensed data[J]. *Global and Planetary Change*, 2007, 56: 328–340.
- [38] Kang Ersi. Review and prospect of hydrology studies in cold and arid regions of China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2000, 22 (2) : 178-188.
- [39] Huggel C, Kääb A, Haeberli W, et al. Remote sensing based assessment of hazards from glacier lake outbursts: a case study in the Swiss Alps[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2002, 39: 316-330.
- [40] 徐道明, 冯清华. 冰川泥石流与冰湖溃决灾害研究[J]. *冰川冻土*, 1988, 10 (3) : 284-289.
- [41] 车涛, 晋锐, 李新, 等. 近 20a 来西藏朋曲流域冰湖变化及潜在溃决冰湖分析[J]. *冰川冻土*, 2004, 26 (4) : 397-402.
- [42] 铁永波, 李宗亮. 冰川泥石流形成机理研究进展[J]. *水科学进展*, 2010, 21 (6) : 861-866.
- [43] Paul F, Haeberli W. Spatial variability of glacier elevation changes in the Swiss Alps obtained from two digital elevation models[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35: 1–, doi10: 1029/2008GL03471
- [44] Paul F, Kaab A, Maisch M, et al. The new remote sensing derived Swiss glacier inventory: Methods[J]. *Annals of Glaciology*, 2000, 34: 355-361.
- [45] 白金中, 李忠勤, 张明军, 等. 1959—2008 年新疆阿尔泰山友谊峰地区冰川变化特征[J]. *干旱区地理*, 2012, 35 (1) : 116-124.
- [46] 王淑红, 谢自楚, 戴亚南, 等. 阿尔泰山冰川系统结构、近期变化及趋势预测[J]. *干旱区地理*, 2011, 34 (1) : 115-123.
- [47] 刘潮海, 康尔泗, 刘时银, 等. 西北干旱区冰川变化及其径流效应研究[J]. *中国科学 (D 辑)*. 1999, 29 (增 1) , 55-62.
- [48] 康尔泗, 程国栋, 董增川. 中国西北干旱区冰雪水资源与出山径流[M]. 北京: 科学出版社. 2002.
- [49] 施雅风. J.L.R. 阿伽西——近代冰川学说的奠基人[J]. *冰川冻土*, 1986, 8 (2) : 179-182.
- [50] Raup B H, Racoviteanu A, Khalsa S J S et al. The GLIMS geospatial glacier database: a new tool for studying glacier change[J]. *Global and Planetary Change*, 2007, 56: 101-110.
- [51] Bruce Raup, Andreas Kääb, Jeffrey S. Kargel, et al. Remote sensing and GIS technology in the Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS) Project[M]. *Computers & Geosciences* 2007, 33: 104–125.
- [52] Gao J, Liu Y. Applications of remote sensing, GIS and GPS in glaciology: a review[J]. *Progress in Physical Geography*, 2005, 25 (4) : 520- 540.
- [53] Waite A, Schmidt S. Gross errors in height indication from pulsed radar altimeters operating over thick ice or snow[J]. *Proceedings of the IRE*, 2007, 50 (6) : 1515-1520.
- [54] Evans S. Radio techniques for the measurement of ice thickness[J]. *Polar Record*, 1963, 11 (73) :

406-410.

- [55] Berthier E, Arnaud Y, Kumar R, et al.Remote sensing estimates of glacier mass balances in the Himachal Pradesh (Western Himalaya, India) [J].Remote Sensing of Environment, 2007, 108: 327-338.
- [56] Kyrle A.Glacier volume changes using ASTER optical stereo.A test study in Eastern Svalbard[C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2007: 3994-3996.
- [57] Khalsa S J S, Dyurgerov M B, Khromova T, et al.Space2 based mapping of glacier changes using ASTER and GIS tools[J] IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 2004, 42 (10) : 2177- 2183.
- [58] Jeffrey A.V ANLOOY, Richard R.FORSTER.Glacial changes of five southwest British Columbia icefields, Canada, mid-1980s to 1999[J].Journal of Glaciology, 2007, 54, 469-478.
- [59] Arzhan B S, Aizen V B.Estimating volume change of mountain glaciers using SR TM and Map2 based topographic data[J].IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 2006, 44 (10) : 2991- 2995.
- [60] 施雅风.2050 年前气候变暖冰川萎缩对水资源影响情景预估[J].冰川冻土, 2001, 23 (4) : 333-341
- [61] 孙波, 何茂兵, 张鹏, 等.天山 1 号冰川厚度和冰下地形探测与冰储量分析[J].极地研究, 2003, 15 (1) : 35-44
- [62] 王宗太, 刘潮海, 尤根祥, 等.中国冰川目录 I (祁连山区) [M].甘肃: 中国科学院兰州冰川冻土研究所, 1981: 4-5.
- [63] Bahr D B, Meier M, Peckman S.The physical basis of glacier volume area scaling[J].Journal of Geophysical Research, 1997, 102 (B9) : 20355-20362.
- [64] Liu S Y, Sun W X, Shen Y P, 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[J].Journal of Glaciology, 2003, 49 (164) : 117-124.
- [65] 赵林, 丁永建, 刘广岳.青藏高原多年冻土层中地下冰储量估算及评价[J].冰川冻土, 2010, 32(1): 1-9.
- [66] 张祥松, 朱国才, 钱嵩林, 等.天山乌鲁木齐河源 1 号冰川雷达测厚[J].冰川冻土, 1985, 7 (2) : 153-162
- [67] 朱国才, 井晓平, 韩建康, 等.柯林斯冰帽雷达测厚和冰下地形研究[J].南极研究, 1994, 6 (2) : 40-45
- [68] 李忠勤, 沈永平, 王飞腾.天山乌鲁木齐河源 1 号冰川消融对气候变化的响应[J].气候变化研究

- 进展, 2007, 3 (3) : 132-137.
- [69] Annan A P. Ground penetrating radar workshop notes. Sensors and Software Inc[J]. Mississauga, Ontario, 1992, 1-128
- [70] Plewes L A, Hubbard B. A review of the use of radio-echo sounding in glaciology[J]. Progress in Physical Geography, 2001, 25 (2) : 203-236
- [71] 孙波, 温家洪, 何茂兵, 等. 北冰洋海冰厚度穿透雷达探测与下表面形态特征分析[J]. 中国科学: D 辑, 2002, 32 (11) : 952-958
- [72] 马凌龙, 田立德, 杨威, 等. 青藏高原南部羊八井古仁河口冰川 GPR 测厚及冰川体积估算[J]. 冰川冻土, 2008, 30 (5) : 783-788
- [73] 王宁练, 蒲健辰. 祁连山八一冰川雷达测厚与冰储量分析[J]. 冰川冻土, 2009, (3) : 431-435
- [74] 武震, 刘时银, 张世强. 祁连山老虎沟 12 号冰川冰下形态特征分析[J]. 地球科学进展, 2009, 24 (10) : 1049-1158
- [75] 姚檀栋, 施雅风. 乌鲁木齐河气候、冰川、径流变化及未来趋势[J]. 中国科学 (B 辑), 1988, (6) : 657-666.
- [76] Vaughan D, Anderson P, King J, et al. Imaging of firn isochrones across an Antarctic ice rise and implications for patterns of snow accumulation rate[J]. Journal of Glaciology, 2004, 50 (170) : 413-418
- [77] 李天文. GPS 原理及应用[M]. 科学出版社, 2003, 9:
- [78] 吴信才. 地理信息系统的基本技术与发展动态[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 1998, 23 (004) : 329-333
- [79] 汤国安, 杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M]. 2006, 科学出版社
- [80] 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.
- [81] 王祎婷, 陈秀万, 柏延臣, 等. 多源 DEM 和多时相遥感影像监测冰川体积变化——以青藏高原那木纳尼峰地区为例[J]. 冰川冻土, 2010, 32 (1) : 126-132.
- [82] 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.
- [83] 洪顺英, 申旭辉, 荆凤, 等. 基于 SRTM-DEM 的阿尔泰山构造地貌特征分析[J]. 国土资源遥感, 2007, 3 (73) : 62-66
- [84] 中国科学院兰州冰川冻土研究所. 中国冰川目录 (II) 阿尔泰山区[M]. 北京: 科学出版社, 1986, 1-83
- [85] D. Poli, F. Remondino, C. Dolci. Use of satellite imagery for DEM Extraction, Landscape modeling

and GIS applications[J].Photogrammetry.ethz.ch

- [86] <http://terra.nasa.gov/Events/FirstImages/aster.html>[OL].
- [87] 郭亚东, 史舟. 先进星载热发射和反射辐射仪(ASTER)的特点及应用[J]. 遥感技术与应用, 2003, 18 (5), 346-351.
- [88] 王宗太, 刘潮海, 尤根祥, 等. 中国冰川目录 I (祁连山区) [M]. 甘肃: 中国科学院兰州冰川冻土研究所, 1981: 4-5.
- [89] Goncalves J, Fernandes J C. Assessment of SRTM-3 DEM in Portugal with Topographic Map Data[EB/OL].www.ipi.uni-hannover.de/html/aktivitaeten/EARSeL-Workshop2005_Paper/Goncalves.pdf, 2006-10-08
- [90] 王璞玉, 李忠勤, 高闻宇, 等. 气候变化背景下近 50 年来黑河流域冰川资源变化特征分析[J]. 资源科学, 2011, 33 (3): 399-407.
- [91] Raup B, Racoviteanu A, Jodha S, et al. The GLIMS geospatial glacier database: A new tool for studying glacier change[J]. Global and Planetary Change, 2007, 56 (1-2): 101-110.
- [92] 高闻宇, 李忠勤, 李开明, 等. 基于遥感与 GIS 的库克苏河流域冰川变化研究[J]. 干旱区地理, 2011, 34(2): 1-10.
- [93] Kulkarni A V, ahuguna I M, Rathore B P, et al. Glacial retreat in Himalaya using Indian Remote Sensing satellitedata[J]. Current Science, 2007, 92(1): 69-74.
- [94] 陈建明, 刘潮海, 金明燮. 重复航空摄影测量方法在乌鲁木齐河流域冰川变化监测中的应用[J]. 冰川冻土, 1996, 18 (4): 331-336.
- [95] 汤国安, 张友顺, 刘咏梅, 等. 遥感数字图像处理[M]. 北京: 科学出版社. 2007. 60-107.
- [96] 唐新明, 林宗坚, 吴岚. 基于等高线和高程点建立 DEM 的精度评价方法探讨[J]. 遥感信息, 1999, 55 (3): 7-10.
- [97] 惠凤鸣, 田庆久, 李应成. Aster 数据的 DEM 生产及精度评价[J]. 遥感信息, 2004, (1): 14-18.
- [98] 王贵林, 姚鑫, 杨艳明, 等. ASTER 立体像对提取山地 DEM 精度研究[J]. 矿山测量, 2008, (2): 34-37.
- [99] 康兴成. 阿尔泰山区树木年轮与气候、冰川变化相互关系探讨[J]. 冰川冻土, 1983, 5 (4): 57-62.
- [100] Hall DK, Bayr KJ, Schnier W, Bindschadler RA, Chien JYL. Consideration of the errors inherent in mapping historical glacier positions in Austria from the ground and space (1893-2001) [J]. Remote Sensing of Environment. 2003, 86 (4): 566-577.
- [101] Silverio W, Jaquet JM. Glacial cover mapping(1987-1996) of the Cordillera Blanca(Peru) using satellite imagery[J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 95(3): 342-350.
- [102] Ye Q H, Kang S C, Chen F, et al. Monitoring glacier variation on Geladandong mountain, central

- Tibetan Plateau, from 1969 to 2002 using remote sensing and GIS technologies[J].Journal of Glaciology, 2006, 52 (179) : 537-545.
- [103] 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.
- [104] 刘波.1960~2005 年新疆气候变化的基本特征[J].气候与环境研究, 2009, 14 (4) : 414-426.
- [105] 晋锐, 车涛, 李新, 等. 基于遥感和 GIS 的西藏朋曲河流域冰川变化研究[J]. 冰川冻土, 2004, 26(3):261-266.
- [106] 上官冬辉, 刘时银, 丁永建, 等. 利用 ASTER 影像对慕士塔格-公格尔山冰川解译与目录编制 [J]. 冰川冻土, 2005, 27(3):344-351.
- [107] 刘时银, 沈永平, 孙文新, 等. 祁连山西段小冰期以来的冰川变化研究[J]. 冰川冻土, 2002, 24(3):227-233.
- [108] 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和冰湖变化研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(7):47-52.
- [109] 李忠勤, 王飞腾, 朱国才, 等. 天山庙尔沟平顶冰川的基本特征和过去 24a 间的厚度变化 [J]. 冰川冻土, 2007, 29(1):61-65.

硕士期间发表的科研成果目录

[1] 骆书飞, 李忠勤, 王璞玉等. 近 50 年中国阿尔泰友谊峰地区冰川储量变化[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28 (5) :180-185.

致 谢

时光老人催促着我走到了研究生生活的末端，让我忆起了过往几年难忘的经历，伴随着几分感慨，心里有万分的激动，难于言表！学习的滋味是盐加醋，有些咸涩有些酸楚；生活的味道是黄连加辣椒，有些苦涩有些辛辣。成功后的喜悦，失败后的泪水，都融化成了过去几年奋斗的岁月之中，历历在目。回望我难以忘怀的三年研究生时光，始终陪伴我的是各位老师的悉心指导，家人的嘘寒问暖，同学及朋友的支持帮助，为感谢他们，感激他们为我做的点点滴滴。

我的硕士论文是在我的导师李忠勤研究员的悉心指导下完成的，论文的选题、思路、修改，指导最后的完稿，李老师都倾注着大量的精力和时间。衷心感谢李老师在这三年在学习、生活及工作的宽容和关怀。李老师严肃的科学态度，严谨的治学精神，精益求精的工作作风，深深地感染和激励着我。一日为师，终身为师。在此，谨向我的恩师致以最诚挚的敬意和最衷心的感谢，祝愿李老师工作顺利，身体健康。

感谢西北师范大学的所有老师，我本科的四年时间就在这儿度过，您们的带头表率作用，您们所营造的活跃而严谨的氛围，您们给予我成长的机会和成长的空间。没有您们，我将难以顺利完成学业。

感谢与我一起并肩战斗的所有师兄姐妹，感谢你们在生活上的关心与帮助，感谢你们在论文写作中的支持与建议。中国科学院天山冰川观测试验站是我生活和学习过的地方，那儿有太多我的回忆，大伙一起在会议室学习探讨，一起接待来自远方的客人，同吃同喝一起出野外，在那儿有我的苦闷与乏味，有痛苦与艰辛，有喜悦与欢乐，这些种种都将让我受益终生。我很庆幸曾经是这个大家庭的一员，能够在这样一个温暖而温馨的地方得以成长是我最大的荣耀，感谢那儿的所有工作人员，感谢你们给了我们学习和生活的尽可能最好的环境，感谢你们在我成长道路上的关心与帮助。

感谢我在西北师范大学的好友，由衷的感谢你们多年来给我的快乐和帮助。在我生病的时候是你们陪着我去医院，是你们帮我送饭倒水；在我伤心失意的时候你们鼓励我让我重拾信心；在我成功时候你们和我一起分享；谢谢你们，拥有你们我感到无限的自豪。

父母在倾注了一生的心血来培育我长大成人，您们关心我的吃住行，您们教我怎么做做人怎么处事，您们是我最脆弱的时候仍然坚强的唯一理由，谢谢你们给我的爱，给了我无限的光环。

再次向我的导师及各位老师、同学、朋友以及家人表示我最真挚的敬意、感激和祝福！