

分类号：
学 号：20232018025

密 级：公开
单位代码：10759

石河子大学

硕 士 学 位 论 文



基于冰川编目的准噶尔盆地内流区冰川现状及 变化研究

学 位 申 请 人	陈 炜
指 导 教 师	李忠勤教授 徐丽萍教授
申请学位门类级别	理学硕士
学 科 、 专 业 名 称	地 理 学
研 究 方 向	冰川遥感
所 在 学 院	城市与环境学院

中国·新疆·石河子
2026 年 05 月

分类号：
学 号：20232018025

密 级：公开
单位代码：10759

石河子大学
硕士学位论文



基于冰川编目的准噶尔盆地内流区冰川现状及
变化研究

学 位 申 请 人	陈 炜
指 导 教 师	李忠勤教授
	徐丽萍教授
申 请 学 位 类 别	理学硕士
专 业 名 称	地理学
研 究 领 域	冰川遥感
所 在 学 院	城市与环境学院

中国·新疆·石河子
2026 年 5 月

**Glacier Distribution and Changes in the Junggar Inland Basin Based
on Glacier Inventories**

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Natural Science

By

Chen Wei

(Geography)

Dissertation Supervisor: Prof. Li Zhongqin and Xu Liping

May, 2026

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明

本人所呈交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：陈炜

时间： 2026 年 05 月 27 日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：陈炜

时间： 2026 年 05 月 27 日

导师签名：李忠勤 陈丽萍

时间： 2026 年 05 月 27 日

摘要

在气候变暖背景下,干旱区山地冰川持续退缩,其变化不仅关系区域水资源供给和生态安全,也影响山地灾害风险识别与适应性管理。准噶尔盆地内流区位于新疆北部,是北疆重要的冰川发育区和冰雪融水补给区。冰川编目是认识冰川资源本底、开展变化监测和长期比较的重要基础。目前,可用于准噶尔盆地内流区区域尺度长期冰川变化研究的基础编目资料,主要为中国第一次和第二次冰川编目(CGI-1和CGI-2),但其所用影像数据多早于2010年,存在资料更新相对滞后、影像分辨率较低等问题,难以及时反映研究区冰川变化的新特征。基于此,本文以准噶尔盆地内流区为研究对象,围绕冰川现状编目、长期变化分析和典型冰川变化过程研究展开。基于GF-1、GF-6和ZY-3影像,并结合COP-DEM等数据,采用人工目视解译与GIS分析方法,建立了准噶尔盆地内流区2020年冰川编目数据集(GI-JIB2020)。在此基础上,分析研究区冰川分布现状,并基于修订后的CGI-1、CGI-2及冰川编码匹配结果,对1960–2020年冰川变化特征进行比较分析;同时结合天山冰川站长期监测资料和代表性气象站资料,对典型冰川变化过程及其气候背景进行分析。主要结论如下:

(1) 基于国产高分辨率遥感影像和COP-DEM数据,建立了准噶尔盆地内流区2020年冰川编目数据集(GI-JIB2020)。结果表明,2020年研究区共发育冰川3174条,总面积 1645.69 km^2 ,冰储量 73.77 km^3 ,其中表碛型冰川74条,面积 319.45 km^2 。研究区冰川总体以中小冰川为主,面积小于 0.5 km^2 的冰川有2502条,占冰川总数的78.90%,但其面积仅占总面积的21.20%。空间上,冰川主要集中于依连哈比尔尕山、玛纳斯河流域和艾比湖流域;地形上,冰川主要分布于3800–4200 m高程带,并以北(N)向冰川最为发育。整体来看,研究区冰川分布具有明显的高山源区集聚特征,其空间格局主要受山系海拔、地形条件、坡向差异和区域水汽输送共同影响。

(2) 通过对CGI-1、CGI-2和GI-JIB2020进行统一修订、融合处理和编码匹配,降低了不同时期编目在数据源、空间分辨率、边界判读和分冰岭划分等方面差异对变化分析的影响。在此基础上,采用编码匹配法对1960–2020年冰川变化进行统计。结果表明,研究区冰川面积由1960年的 2343.03 km^2 减少至2020年的 1635.39 km^2 ,累计减少 707.64 km^2 ,退缩幅度为30.2%,年均退缩率为 $0.50\%/a$;其中1960–2007年冰川面积减少 596.02 km^2 ,年均退缩率为 $0.54\%/a$,2007–2020年进一步减少 111.62 km^2 ,年均退缩率为 $0.49\%/a$ 。60年间共有878条冰川消失,消失冰川面积为 95.95 km^2 ,表明准噶尔盆地内流区冰川自1960年以来总体处于持续退缩状态。

(3) 研究区冰川变化具有明显的规模差异、空间差异和地形差异。小冰川相对退缩更强,更易发生消失;大冰川相对退缩幅度较低,但绝对面积损失更大。山脉尺度上,依连哈比尔尕山、婆罗科努山和天格尔山冰川面积减少最为显著,1960–2020年分别减少 360.56 km^2 、 120.81 km^2 和 96.62 km^2 ;流域尺度上,玛纳斯河流域(5Y73)和艾比湖流域(5Y74)冰川面积减少最为明显,分别减少 376.72 km^2 和 257.18 km^2 。相比之下,边缘山脉和小流域冰川面积减少量较小,但相对退

缩比例更高。地形上，冰川退缩主要集中在 3400~3900 m 高程带，偏北朝向冰川绝对减少量较大，而偏南和偏西朝向冰川相对退缩更强。这表明，区域冰川退缩不仅受气候变暖影响，也与冰川规模组成、末端海拔和局地地形条件密切相关。

（4）结合代表性气象站资料和典型监测冰川变化过程分析可知，研究区冰川持续退缩与近几十年来明显的气候变暖密切相关。大西沟气象站 1959–2018 年年平均气温上升速率为 $0.254\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ，肯斯瓦特水文站 1980—2023 年年平均气温上升速率为 $0.381\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ，增温信号较降水变化更为突出，说明气候变暖是推动研究区冰川持续退缩的主要气候因素，降水变化主要起调节作用。4 条典型监测冰川均表现为持续退缩，但阶段过程存在差异：乌鲁木齐河源 1 号冰川表现为前期缓慢退缩、20 世纪 90 年代初明显减小、近年持续增强；哈希勒根 51 号冰川和扇形分流冰川近年退缩有所加快；四工河 4 号冰川则经历了前期较快、中期减缓、近年再度加快的过程。区域编目结果能够揭示研究区冰川长期总体变化及空间差异，典型监测冰川资料则有助于补充单条冰川的阶段变化过程，二者结合可更全面地认识准噶尔盆地内流区冰川退缩特征。

关键词：准噶尔盆地内流区；冰川编目；冰川变化；遥感；GIS

Abstract

Against the background of climate warming, mountain glaciers in arid regions have continued to retreat. These changes are closely related not only to regional water supply and ecological security, but also to mountain-hazard risk assessment and adaptive management. Located in northern Xinjiang, the Junggar Inland Basin is an important glacierized area and a key source region for glacier and snow meltwater in northern Xinjiang. Glacier inventories provide a fundamental basis for documenting glacier resources, monitoring glacier change, and conducting long-term comparative studies. At present, regional-scale studies of long-term glacier change in the Junggar Inland Basin mainly rely on the First and Second Chinese Glacier Inventories (CGI-1 and CGI-2). However, most of the imagery used for these inventories was acquired before 2010, and the datasets are therefore limited by relatively outdated temporal coverage and comparatively low spatial resolution. As a result, they are insufficient for capturing the latest characteristics of glacier change in the study area.

In this study, the Junggar Inland Basin was selected as the study area to investigate the current glacier inventory, long-term glacier change, and the evolution of representative glaciers. Based on GF-1, GF-6, and ZY-3 imagery, together with COP-DEM and other auxiliary data, glacier boundaries were delineated through manual visual interpretation and GIS-based analysis, and the Glacier Inventory of the Junggar Inland Basin in 2020 (GI-JIB2020) was established. On this basis, the current glacier distribution in the study area was analyzed. Glacier changes during 1960–2020 were then comparatively examined using the revised CGI-1 and CGI-2 datasets and glacier-code matching results. In addition, long-term monitoring data from the Tianshan Glaciological Station and records from representative meteorological stations were used to analyze the evolution of typical glaciers and their climatic background. The main conclusions are as follows:

(1) Based on domestic high-resolution remote-sensing imagery and COP-DEM data, the Glacier Inventory of the Junggar Inland Basin in 2020 (GI-JIB2020) was established. The results show that, in 2020, there were 3,174 glaciers in the study area, with a total area of 1,645.69 km² and an estimated ice volume of 73.77 km³. Among them, 74 were debris-covered glaciers, covering an area of 319.45 km². The glaciers in the study area were generally dominated by small and medium-sized glaciers. A total of 2,502 glaciers were smaller than 0.5 km², accounting for 78.90% of the total number, but only 21.20% of the total glacier area. Spatially, glaciers were mainly concentrated in Eren Habirga Mountain, the Manas River Basin, and the Ebinur Lake Basin. Topographically, they were mainly distributed within the 3,800–4,200 m elevation band, and north-facing (N) glaciers were the most developed. Overall, glacier distribution in the study area shows a clear pattern of concentration in high-mountain source regions, controlled mainly by

mountain elevation, topographic conditions, slope aspect, and regional moisture transport.

(2) Through the consistent revision, fusion processing, and code matching of CGI-1, CGI-2, and GIB2020, the influence of differences in data sources, spatial resolution, boundary interpretation, and ice-divide delineation among different inventories was reduced. On this basis, glacier changes during 1960–2020 were quantified using the glacier-code matching method. The results indicate that glacier area in the study area decreased from 2,343.03 km² in 1960 to 1,635.39 km² in 2020, representing a cumulative loss of 707.64 km², a total retreat of 30.2%, and a mean annual retreat rate of 0.50%/a. Specifically, glacier area decreased by 596.02 km² during 1960–2007, with a mean annual retreat rate of 0.54%/a, and further decreased by 111.62 km² during 2007–2020, with a mean annual retreat rate of 0.49%/a. Over the past 60 years, 878 glaciers disappeared, corresponding to an area loss of 95.95 km². These results indicate that glaciers in the Junggar Inland Basin have undergone sustained retreat since 1960.

(3) Glacier change in the study area showed clear differences related to glacier size, spatial location, and topographic setting. Small glaciers experienced stronger relative retreat and were more likely to disappear, whereas large glaciers showed lower relative retreat but greater absolute area loss. At the mountain-range scale, the largest glacier-area losses occurred in Eren Habirga Mountain, Borohoro Mountain, and Tengger Mountain, where glacier area decreased by 360.56 km², 120.81 km², and 96.62 km², respectively, during 1960–2020. At the basin scale, glacier-area loss was most pronounced in the Manas River Basin (5Y73) and the Ebinur Lake Basin (5Y74), with decreases of 376.72 km² and 257.18 km², respectively. In contrast, marginal mountain ranges and small basins showed smaller absolute area losses but higher relative retreat rates. In terms of topography, glacier retreat was mainly concentrated within the 3,400–3,900 m elevation band. North-facing glaciers had larger absolute area losses, while glaciers on south- and west-facing slopes showed stronger relative retreat. These findings suggest that regional glacier retreat was influenced not only by climate warming, but also by glacier size composition, terminus elevation, and local topographic conditions.

(4) Analysis of representative meteorological records and typical monitored glaciers indicates that sustained glacier retreat in the study area was closely associated with pronounced climatic warming in recent decades. The annual mean air temperature increased at a rate of 0.254 °C per decade at Daxigou Meteorological Station during 1959–2018 and at a rate of 0.381 °C per decade at Kenswat Hydrological Station during 1980–2023. The warming signal was more prominent than changes in precipitation, suggesting that climate warming was the main climatic factor driving sustained glacier retreat in the study area, while precipitation change mainly played a moderating role. All four representative monitored glaciers showed continuous retreat, but their stage-specific evolution differed. Urumqi Glacier No. 1 was characterized by slow retreat in the early stage, marked shrinkage in the early 1990s, and intensified retreat in recent years. Haxilegen Glacier No. 51 and the Fan-Shaped Glacier both showed accelerated retreat in

recent decades, whereas Sigong River Glacier No. 4 experienced relatively rapid retreat in the early stage, slower retreat in the middle stage, and renewed acceleration in recent years. Regional glacier inventories are effective for revealing long-term overall glacier change and spatial differences across the study area, while monitored glacier records help characterize the stage-specific evolution of individual glaciers. The combination of these two types of evidence provides a more comprehensive understanding of glacier retreat in the Junggar Inland Basin.

Key words: Junggar Inland Basin; Glacier inventory; Glacier change; Remote sensing; GIS

目录

摘要	I
Abstract	III
第 1 章 绪论	1
1.1 研究意义及背景	1
1.2 国内外研究进展	2
1.2.1 RS 和 GIS 在冰川变化研究中的应用	3
1.2.2 多期冰川编目对比方法研究进展	4
1.2.3 准噶尔盆地内流区冰川研究进展	6
1.3 研究内容	8
1.4 技术路线	9
第 2 章 研究区概况	11
2.1 地理位置	11
2.2 地质地貌	12
2.3 气候水文	13
2.4 植被土壤	13
2.5 冰川分布概况	14
2.5.1 准噶尔盆地内流区冰川分布概况	14
2.5.2 监测冰川概况	15
第 3 章 数据与方法	17
3.1 数据	17
3.1.1 遥感影像数据	17
3.1.2 冰川编目数据	18
3.1.3 数字高程模型	19
3.1.4 野外验证资料	19
3.1.5 气象数据	20
3.1.6 其他数据	21
3.2 CGI-1 修正与 CGI-2 交叉验证	21
3.3 GI-JIB2020 编制	22
3.3.1 冰川边界提取	22

3.3.2 冰川分冰岭划定	25
3.3.3 冰川属性计算	25
3.4 冰川面积变化及误差评估	27
3.4.1 冰川面积变化	27
3.4.2 误差评估	28
第 4 章 基于 GI-JIB2020 的 2020 年冰川分布特征	30
4.1 GI-JIB2020 数据集总体特征	30
4.2 不同面积等级冰川分布特征	30
4.3 不同山脉冰川分布特征	31
4.4 不同子流域冰川分布特征	34
4.5 不同行政区冰川分布特征	38
4.6 不同地形因素冰川分布特征	39
4.7 冰川分布特征分析	41
4.8 本章小结	42
第 5 章 1960–2020 年准噶尔盆地内流区冰川变化	43
5.1 准噶尔盆地内流区冰川总体变化	43
5.2 不同面积等级冰川变化特征	44
5.3 不同山脉冰川变化特征	46
5.4 不同子流域冰川变化特征	47
5.5 不同地形因素冰川变化特征	48
5.6 冰川变化空间特征分析	49
5.7 气候变化驱动及区域对比分析	51
5.8 本章小结	53
第 6 章 监测冰川变化特征	54
6.1 乌鲁木齐河源 1 号冰川变化特征	54
6.2 哈希勒根 51 号冰川变化特征	57
6.3 四工河 4 号冰川变化特征	58
6.4 扇形分流冰川变化特征	59
6.5 监测冰川与区域编目冰川变化对比分析	61
第 7 章 结论与展望	63
7.1 主要结论	63
7.2 主要贡献	64
7.3 不足及展望	65
参考文献	66

致谢	74
作者简介	76
石河子大学硕士研究生学位论文导师评阅表	77

第1章 绪论

1.1 研究意义及背景

冰冻圈是由山地冰川、极地冰盖、积雪、冻土和海冰等多种固态水体组成的地表圈层系统。冰冻圈对气候变化响应敏感，同时又通过能量交换和水文过程对气候系统产生反馈作用，因此一直是全球变化研究的重要内容（秦大河和丁永建，2009）。在冰冻圈诸要素中，山地冰川对气温和降水波动的响应尤为迅速，是识别区域乃至全球气候变化的重要自然指示体（Oerlemans, 2005; Bojinski et al., 2014）。近几十年来，受全球气候持续变暖影响，世界多数山地冰川普遍表现出退缩与消融增强的趋势，冰体物质亏损不断加剧（Gardelle et al., 2012; Maurer et al., 2019）。IPCC《海洋与冰冻圈特别报告》指出，1971–2019 年全球山地冰川（不含大陆冰盖）整体长期处于质量负平衡状态，且 2006–2019 年亏损速率进一步加快，已成为全球海平面上升的重要贡献来源之一（Intergovernmental Panel on Climate Change, 2019）。由冰川消融引起的海平面上升，还可能进一步导致海岸侵蚀、海水入侵以及淡水资源污染等问题，并持续影响沿海生态环境与社会经济系统（Van Der Geest and Van Den Berg, 2021）。因此，冰川变化不仅具有突出的生态环境意义，也与人类社会面临的风险密切相连。

相较于海平面上升所带来的全球性影响，在中国西北干旱区，冰川变化更直接地体现在区域水资源格局的调整上。作为高山地区重要的固体水资源储库，冰川能够对河川径流起到季节调节和枯水补给的作用，是维系干旱区绿洲生态安全和生活用水的重要基础（刘时银等，2006; Unger-Shayesteh et al., 2013; Duethmann et al., 2016; Kraaijenbrink et al., 2017）。在气候变暖条件下，冰川加速消融可能会在一定时期内增加河流径流，但从更长时间尺度来看，随着冰储量持续减少，流域可能面临径流拐点提前出现以及供水能力下降的风险，从而提高区域水资源系统的不稳定性（李忠勤等，2010; 徐丽萍等，2020）。此外，冰川消融加剧还可能诱发冰湖溃决洪水、冰川泥石流等山地灾害，对山前居民点、交通设施及基础工程安全造成不利影响。因此，准确识别冰川分布现状并把握其变化规律，是开展区域水资源评价、山地灾害预警和适应性管理的重要前提。

中国是世界中低纬度山地冰川分布最为显著的国家之一（李忠勤，2019）。地处中亚干旱区核心地带的天山，是中国西北冰川资源最为集中的山系之一，其冰雪融水对包括准噶尔盆地在内的内陆河流域水资源安全具有关键意义（邢武成等，2017）。

已有研究表明,近50年来天山地区气温持续升高,尽管部分区域降水有所增加,但总体上区域冰川仍呈现明显退缩趋势(李佳秀等,2018)。准噶尔盆地内流区位于天山北坡,是该地区重要的冰川发育和融水补给区域,冰川变化会直接影响玛纳斯河、奎屯河、金沟河等内陆河流域的径流过程,并进一步作用于盆地绿洲农业灌溉、城市供水保障(胡汝骥,2004)。该区以面积较小的冰川为主,且末端海拔相对较低,因此对气候升温表现出更高敏感性,其面积收缩与储量损失更容易传导为径流变化响应(Sorg et al., 2012; Farinotti et al., 2015)。因此,选择准噶尔盆地内流区开展冰川现状与变化研究,不仅具有鲜明的区域针对性,也有助于认识干旱区山地冰川变化的一般规律。

冰川编目是认识冰川资源本底、开展变化监测与预测研究的基础性工作。冰川编目不仅能够系统记录冰川的数量、面积、空间分布及其格局特征,为冰川资源调查提供标准化数据基础,也是冰川动力过程模拟、质量平衡估算和未来径流预测研究的重要输入数据(Jacob et al., 2012; Huss and Hock, 2015; Zekollari et al., 2022)。在准噶尔盆地内流区,我国自20世纪60年代以来已积累了较为丰富的冰川调查与编目资料,代表性成果包括中国第一次和第二次冰川编目(CGI-1和CGI-2),为区域冰川长期变化研究奠定了重要基础。尽管如此,现有资料仍存在一些不足。已有编目成果的时间更新相对滞后,多数基于2010年前后遥感影像,难以反映近十余年来冰川快速变化的新特征。不同时期编目成果在一致性和可比性方面仍存在一定局限,早期受遥感影像分辨率、几何校正水平及人工判读条件等影响,部分区域存在边界误差和空间位置偏移,进而影响多期变化量的精确计算。已有研究多集中于典型冰川或单一流域尺度,从整个准噶尔盆地内流区出发开展系统统计与综合分析的成果仍相对不足。随着国产高分辨率遥感影像和DEM数据的不断丰富,在统一几何基准和解译标准基础上更新区域冰川编目,并据此开展全区尺度的变化评估,已经具备较好的数据基础和技术条件,也具有较强的现实意义。

基于此,本文以新疆准噶尔盆地内流区为研究对象,围绕冰川现状识别、长期变化分析和区域响应特征展开研究。在此基础上,从面积等级、海拔分布、坡向特征、山系、流域和行政区等方面差异,对研究区冰川的空间分布特征及其变化规律进行分析。研究结果可为区域水资源保障、山地灾害防控和气候变化适应提供基础数据和科学依据。

1.2 国内外研究进展

围绕冰川变化研究,国内外已在观测手段、编目对比方法和区域案例分析等方面

积累了较为丰富的成果。总体来看, 相关研究主要可从三个方面进行梳理: 一是遥感 (RS) 和地理信息系统 (GIS) 在冰川识别与变化监测中的应用进展; 二是多期冰川编目对比分析的方法发展; 三是准噶尔盆地内流区及邻近区域冰川变化研究的积累与不足。对这些研究进行系统梳理, 有助于明确该领域的主要技术路线、已有认识和当前仍存在的问题, 也可为本文研究内容和技术方案的确定提供依据。

1.2.1 RS 和 GIS 在冰川变化研究中的应用

RS 与 GIS 已成为当前冰川变化研究中应用最广泛的技术手段。冰川多分布于高海拔山区, 自然条件复杂、交通不便, 传统野外考察和实地测量虽然能够获取较高精度的冰川形态参数及周边环境信息, 但难以满足长期连续观测和大范围调查的需求 (Raup et al., 2015)。在这一背景下, 冰川变化研究逐步由以野外调查为主转向以遥感监测为主 (Racoviteanu et al., 2008)。

在冰川变化研究中, RS 主要用于获取冰川空间分布信息、识别冰川边界, 并为不同时期冰川面积变化分析提供基础数据。GIS 则主要承担数据管理、空间分析、变化统计和结果表达等任务 (Raup et al., 2007)。自 1972 年 Landsat MSS 发射以来, Landsat 系列影像凭借时间序列长、获取较稳定等优势, 成为冰川边界识别和面积变化分析的重要数据来源 (Wulder et al., 2019)。此后, ASTER、ALOS、SPOT、QuickBird、IKONOS、CBERS、IRS 和 Sentinel 等多源光学及微波遥感数据相继应用于冰川研究, 不仅提高了冰川变化监测在时间上的连续性和空间上的覆盖能力, 也推动相关研究由局部样区逐步扩展至流域、山系乃至更大区域尺度 (Racoviteanu et al., 2009; Paul et al., 2015)。

RS 和 GIS 在冰川变化研究中的核心应用, 首先体现在冰川边界提取、面积计算和多期变化监测方面。研究通常以遥感影像为主要数据源, 以数字高程模型 (DEM) 为重要辅助数据, 在统一预处理和精确配准的基础上, 在 GIS 环境下完成冰川边界提取、面积统计和多期边界叠置分析 (Paul et al., 2009)。为降低季节性积雪对冰川边界判读的干扰, 已有研究通常优先选取消融末期影像, 并结合辐射校正、几何校正、云与阴影掩膜以及多期影像交叉核对等方法, 尽可能削弱非冰川地物的影响 (Andreassen et al., 2008; Racoviteanu et al., 2009)。与此同时, DEM 不仅能够提供高程、坡度和坡向等地形信息, 还可辅助识别阴影区和复杂地形背景下的冰川边界, 从而提高判读结果的稳定性 (Paul et al., 2009)。在获得多期冰川边界之后, GIS 中的叠置、差分和分组统计功能还可进一步用于计算冰川面积变化量、变化速率, 并结合高程带、坡向、流域和山系等开展空间分异分析, 从而揭示冰川变化的区域差异特征。

RS 和 GIS 支持下的冰川边界识别主要包括人工目视解译、自动提取以及二者结合

的半自动流程 (Racoviteanu et al., 2009)。人工目视解译能够综合利用影像色调、纹理、形态和地形背景等信息,对云层、季节性积雪、湖泊水体和山体阴影等干扰因素具有较强辨识能力,在表碛覆盖区也具有一定优势,但工作量较大,且较依赖解译经验 (Paul et al., 2013)。自动提取方法主要包括监督分类、非监督分类、波段比值法和积雪指数阈值法等,适合区域尺度的冰川识别和多期对比分析,但容易受到云、阴影、季节性积雪和高反射裸岩等背景因素影响,常出现局部误分割和边界偏差问题 (Paul et al., 2002; Bolch et al., 2010)。因此,在实际研究中,更常见的做法是先利用自动方法进行初步识别,再结合 GIS 平台开展规则化处理和人工修正,以兼顾工作效率和边界精度 (Bolch et al., 2010; Paul et al., 2015)。总体来看,RS 和 GIS 并不只是简单用于边界提取,而是贯穿于冰川识别、变化检测、空间分析和结果表达的整个研究过程。

近年来,随着中国高分辨率对地观测系统的建设与完善,国产高分辨率卫星影像在冰川研究中的应用价值不断提升。高分和资源等系列卫星数据具有较高空间分辨率、获取能力较强和数据来源相对稳定等特点,为复杂山地环境下冰川边界精细识别提供了新的数据支撑 (刘锟等, 2015)。相较于中等分辨率影像,国产高分影像在识别小冰川、冰川末端、冰缘过渡带以及表碛覆盖区边界方面更具优势,也更有利于在山体阴影、裸岩背景和季节性积雪干扰较强的区域开展人工判读与边界修订。特别是在研究区这类中小冰川数量较多、冰川边界较破碎、局部地形复杂的区域,高分辨率影像能够更清晰地表达冰川形态细节,从而提高冰川编目的精细程度和结果可靠性。对于高分辨率国产影像而言,其空间细节优势能够更好地服务于冰川边界精细修订、小冰川识别以及表碛覆盖冰川的人工核查,从而在一定程度上弥补中低分辨率影像在复杂山区应用中的不足。

总体来看,RS 和 GIS 的结合已成为冰川变化研究中较为成熟的技术路径,为区域尺度冰川边界提取、面积统计、多期变化监测和空间差异分析提供了重要支撑。随着遥感数据源不断丰富,特别是高分辨率影像在复杂山地环境中的应用增强,冰川现状编目的精细化水平得到明显提升。不过,在复杂地形区和多时期研究中,影像分辨率差异、季节性积雪干扰、阴影影响以及表碛覆盖冰川边界判定不确定性等问题仍然存在,这些问题也为后续多期编目对比和长期变化分析提出了更高要求。

1.2.2 多期冰川编目对比方法研究进展

在遥感和 GIS 技术支持下,多期冰川边界数据为区域冰川变化研究提供了较稳定的观测基础。不过,和单期冰川边界提取相比,多期冰川编目对比更复杂。问题不只是把不同年份的冰川边界叠加起来,还要判断哪些变化是真实的冰川变化,哪些只是数据差异带来的表面变化。同时,还要保证不同年份比较的是同一冰川对象。已有研

究表明 (Nagai et al., 2016; Sakai, 2019; Zhan et al., 2025), 多期冰川编目结果通常不能直接比较。原因主要有几方面。一个是数据源不同, 如传感器类型、空间分辨率和影像获取时间不同。一个是空间基准不完全一致, 如配准误差、投影差异、DEM 基准差异和系统偏移。还有一个是边界判读规则不统一, 如分冰岭划分方式和最小冰川面积设定不同。再加上阴影、季节性积雪、亮色裸岩和表碛覆盖等复杂地表条件, 也会增加边界判定的不确定性。因此, 多期冰川编目对比不能简单看作边界叠置后的直接求差。在对比前, 还要进行一致性处理和质量控制, 尽量避免把边界提取误差或判读标准差异当成真实的冰川面积变化 (Paul et al., 2009; Racoviteanu et al., 2009)。

为了提高多期冰川编目结果的一致性和可比性, 国际上已经建立了较成熟的数据体系和处理流程。以 Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS) 为代表的国际计划, 在统一数据格式和元数据规范的基础上整合冰川边界及其属性信息, 并提供更新工具, 以适应不同传感器和多源影像条件。这种做法有助于提高成果的可追溯性, 也便于后续核查和共享 (Raup et al., 2007)。Randolph Glacier Inventory (RGI) 更强调全球范围内的完整覆盖。在统一属性体系下, RGI 汇集了不同来源的冰川边界数据, 为全球变化评估和冰川质量变化研究提供了基础资料。这也说明, 在开展区域对比和变化归因分析时, 不能忽略原始数据之间的差异 (Randolph Consortium, 2014)。在高山亚洲地区, Glacier Area Mapping for Discharge from the Asian Mountains (GAMDAM) 编目更重视人工精细解译, 并结合 DEM 和高分辨率影像进行检查。通过重复解译和一致性检查, 可以在一定程度上减少解译差异, 提高结果的稳定性和可复核性 (Nuimura et al., 2015)。由上述数据体系建设与编目实践可以看出, 当前研究已形成较为一致的认识, 多期冰川编目对比的关键不在于边界的直接叠置, 而在于首先处理好多源数据在空间基准、数据来源与判读标准等方面的不一致性, 以保证比较结果的可靠性与可比性。

从方法上看, 多期冰川编目对比主要集中在三个关键问题上, 即空间基准统一、判读标准统一和跨期对象对应。空间基准统一的重点, 是确保不同时期的冰川边界处在同一空间参考框架下, 包括投影一致、基准一致、影像严格配准, 并尽量识别和减小系统偏移。Nuth and Kääb (2011) 在多源高程数据比较中提出了同配准和偏差订正方法, 其核心思路是先去除整体平移等系统误差, 再检查并修正与地形有关的误差。这种先处理系统误差、再开展差异分析的思路, 对多期冰川边界比较也有重要参考意义 (Nuth and Kääb, 2011)。判读标准统一更强调规则和流程一致。国际上通常会对影像选择、边界判读标准和编辑规则进行统一控制, 如碎斑处理、拓扑一致性检查和边界规则化等, 以减少不同解译流程带来的面积系统差异。同时, 还要通过多源影像相互验证, 尽量减弱季节性积雪、阴影等非冰川要素对边界判读的影响 (Paul et al., 2009)。跨期对象对应所要解决的, 是同一冰川在不同年代之间的连续追踪问题。由

于分冰岭划分差异、冰川分裂或合并，以及小冰川时有时无等情况的存在，简单的边界比较往往难以保证统计对象一致。为此，很多研究在 GIS 环境下建立跨期对应关系，根据边界叠置关系制定合并和拆分规则，并结合唯一标识或编码实现跨期追踪，从而使变化统计尽量反映同一冰川的实际变化（Raup et al., 2007；Randolph Consortium, 2014）。可以看出，现有研究虽然方法路径不完全一样，但关注点基本一致，都是围绕怎样让不同年份的数据真正可比这个问题展开。

此外，表碛覆盖冰川是多期对比中最容易引入系统偏差的一类冰川，在多期编目对比时易出错。因为它表面的碎屑和周边裸岩在光谱特征上比较接近，单纯依赖光学阈值方法往往难以稳定识别边界，不同编目在识别时容易划定出不同的表碛范围。为了提高识别精度，相关研究通常会结合热红外信息、DEM 提供的地形因子以及 SAR 数据，并进一步采用纹理分析、面向对象方法、机器学习或深度学习方法，再辅以人工检查，以提高表碛覆盖冰川边界识别的准确性和跨期解译结果的一致性（Racoviteanu and Williams, 2012；Bhardwaj et al., 2014；Robson et al., 2015；Alifu et al., 2020；Thomas et al., 2023；Yang et al., 2024）。除了表碛覆盖带来的识别困难，多期冰川编目对比还需要建立清楚的误差评估体系。误差主要来自两个方面。一类是影像分辨率差异和几何配准偏差带来的空间位置误差。另一类是解译过程中的主观性，以及阴影、积雪、碎屑覆盖和裸岩干扰等复杂背景条件下边界判定的不确定性。在跨期对比中，即使配准偏差较小，或边界判读只存在轻微差异，也可能在边界叠置比较中表现为连续的变化带。如果不对这部分由错位和判读差异引起的假变化进行量化和剔除，面积变化和末端长度变化结果就可能被系统性高估或低估。

总的来看，多期冰川编目对比的关键不在于边界的简单叠加，而在于统一空间基准、判读标准和跨期对应关系，并对误差来源进行识别。围绕 GLIMS、RGI 和 GAMDAM 等数据体系，相关研究已形成了较成熟的技术框架，也表明只有在一致性处理基础上，多期冰川变化结果才具有较好的可靠性和可比性。对于数据来源复杂、早期编目与近年遥感数据差异较大的区域而言，这一点尤为重要，也为区域尺度长期冰川变化研究提供了明确的方法参考。

1.2.3 准噶尔盆地内流区冰川研究进展

准噶尔盆地内流区冰川研究开展较早，是我国冰川学研究较为重要的区域之一。该区较系统的调查工作始于 20 世纪 50 年代末至 60 年代初，并与中国第一次冰川编目工作同步推进（施雅风，2005）。早期研究主要依托地形图、航空相片及实地考察，对全国范围冰川开展了基础调查，并据此建立了中国第一次冰川编目（CGI-1），为准噶尔盆地内流区冰川资源研究提供了最早的基础资料。根据 CGI-1，以 1960 年左右为

基准年, 该内流区共分布冰川 3406 条, 总面积为 2251.41 km² (施雅风, 2005)。

20 世纪 70–80 年代, 随着天山冰川观测试验站的建立和完善, 准噶尔盆地内流区冰川研究逐步从基础调查转向长期连续观测。其中, 乌鲁木齐河源 1 号冰川自 1959 年起持续开展观测, 已形成我国时间序列较长、资料积累较为系统的冰川观测记录之一。相关研究表明, 该冰川长期处于物质亏损状态 (李忠勤, 2019)。在这一基础上, 观测范围又逐步扩展到博格达峰地区、奎屯河流域等地, 积累了大量关于物质平衡、冰面消融和冰川运动的观测资料 (Wang et al., 2014; Li et al., 2016)。

进入 20 世纪末和 21 世纪初后, 卫星遥感推动了冰川编目更新和区域研究的快速发展。中国第二次冰川编目 (CGI-2) 基于 2004–2009 年间 Landsat TM/ETM+ 等影像, 实现了全国冰川信息的数字化更新。根据 CGI-2, 截至 2007 年左右, 准噶尔盆地内流区冰川数量减少到 3096 条, 总面积退缩到 1737.35 km² (刘时银等, 2015)。CGI-1 与 CGI-2 的对比表明, 该区域冰川总体处于明显退缩状态。基于这两期编目成果, 国内外学者又在流域和局部区域开展了大量研究。比如, Fan et al. (2015) 指出, 1964–2013 年玛纳斯河流域冰川面积缩减 161.54 km², 年均退缩率为 0.48%/a; Wang et al. (2021) 对艾比湖流域的研究表明, 1964–2019 年间冰川面积退缩 263 km², 占原始总面积的 32%。在天山北坡中段 (王圣杰等, 2011; 邢武成等, 2017) 和博格达地区 (牛生明等, 2014; 何毅和杨太保, 2014) 等区域, 相关研究也普遍指出过去半个多世纪冰川退缩明显。由此可以看出, 区域研究虽然对象和范围不同, 但结论较为一致, 即准噶尔盆地内流区冰川整体上处于持续退缩过程。

在典型冰川研究方面, 乌鲁木齐河源 1 号冰川一直是最重要的监测对象之一 (李忠勤, 2011; 王璞玉等, 2011b)。此外, 奎屯河哈希勒根 51 号冰川 (张慧等, 2015) 和四工河 4 号冰川 (王璞玉等, 2011a; 王璞玉等, 2012) 等代表性冰川的研究, 也揭示了加速消融的阶段特征。相关研究不只关注面积和末端位置变化, 也开始讨论表碛覆盖对消融的影响、冰川动力学响应以及对河川径流的作用等问题。国际上, Bolch (2007) 等对天山及周边地区的综合研究, 以及 Farinotti et al. (2015) 对高山亚洲冰川特征与过程量的评估, 也将本区作为重要案例。同时, GAMDAM 等国际区域编目计划也覆盖了本区 (Nuimura et al., 2015; Sakai, 2019)。不过, 由于边界划分标准、数据来源和解译方法存在差异, 不同研究之间的统计结果仍有一定出入。这也说明, 在该区域开展多期编目对比时, 一致性处理和对象匹配仍然很重要。

总体来看, 准噶尔盆地内流区冰川研究已经形成了较好的基础。早期调查和两次冰川编目为区域研究提供了基本数据, 长期定位观测为认识典型冰川变化过程提供了连续记录, 流域和局部区域研究则进一步揭示了该区冰川持续退缩的总体趋势。关于研究区冰川退缩这一基本事实, 已有研究已经形成了较为一致的认识。

不过, 现有研究在数据时效性、区域整合和多期编目可比性方面仍存在一定不足。

首先, 现有区域研究的重要基础数据仍主要依赖 CGI-2, 其基准年约为 2009 年, 距今已有十多年, 而近十多年正是全球变暖持续加剧、冰川消融不断加强的时期 (Hugonnet et al., 2021), 已有编目难以准确反映当前冰川资源分布状况。其次, 已有研究多集中于单一流域或少数典型冰川, 缺少从准噶尔盆地内流区这一完整水文单元出发的系统分析, 这在一定程度上限制了对区域共性和空间差异的整体认识, 也不利于综合评估冰川变化对内流区水资源系统的影响。并且, 早期数据精度和判读标准差异仍可能影响长期序列结果的准确性。CGI-1 主要依赖地形图和早期航片, 受分辨率和复杂地形条件影响, 在陡峭地形和阴影区的边界判读仍存在不确定性; 同时, 季节性积雪与冰川冰之间的混淆, 也一直是影响遥感编目精度的重要因素 (Paul et al., 2009)。

准噶尔盆地内流区冰川研究已形成较好基础, 已有成果对区域冰川分布格局、典型冰川变化过程及总体退缩趋势已有较清楚认识。不过, 现有研究仍存在数据更新不足、区域整合不够以及多期编目可比性有限等问题。特别是近年来冰川持续退缩背景下, 基准年较早的编目成果已难以准确反映当前冰川资源状况, 而单一流域或典型冰川研究也不足以支撑从完整内流区尺度认识区域共性与空间差异。因此, 有必要在更新研究区冰川数据的基础上, 对历史编目进行一致性处理, 并从完整区域范围出发开展长期变化分析。基于此, 本文以准噶尔盆地内流区为对象, 建立 2020 年冰川数据集, 并结合历史编目开展一致性处理和长期变化研究, 以提高区域冰川变化分析的时效性、可靠性和可比性。

1.3 研究内容

基于以上背景, 本文以新疆准噶尔盆地内流区为研究对象, 围绕冰川现状编目更新、多期编目一致性处理、区域长期变化分析和典型冰川过程补充四个方面开展研究。基于国产高分系列和资源系列卫星影像、COP-DEM 以及历史冰川编目资料, 构建研究区 2020 年冰川编目数据集 (GI-JIB2020), 并在统一几何基准和判读规则的基础上, 对 1960–2020 年冰川变化进行系统分析。同时, 结合长期监测冰川资料, 对区域尺度冰川变化结果进行过程层面的补充和对照。本文主要研究内容如下:

(1) 构建准噶尔盆地内流区 2020 年冰川编目数据集, 并分析冰川分布现状。

以国产高分系列和资源系列卫星影像为主要数据源, 结合 COP-DEM 和 GIS 空间分析方法, 提取研究区冰川边界, 建立 GI-JIB2020 数据集。在此基础上, 统计 2020 年冰川数量、面积、储量等总体特征, 并从面积等级、山脉、子流域、行政区、高程带和朝向等方面分析研究区冰川分布格局。

(2) 围绕多期冰川编目的可比性问题,开展历史编目修订、一致性校正和跨期对象匹配。

针对 CGI-1、CGI-2 与 GI-JIB2020 在数据源、分辨率、边界表达和分冰岭划分等方面的差异,建立历史编目修订、跨期匹配与融合处理流程,比较原始编目对比法、修订编目对比法和编码匹配法的结果差异,明确适用于研究区长期冰川变化分析的主要方法,为后续变化统计提供一致的数据基础。

(3) 分析准噶尔盆地内流区 1960–2020 年冰川变化特征及其空间差异。

基于多期冰川编目成果,在统一处理基础上系统分析研究区冰川在 1960–2020 年间的面积变化和退缩速率,重点从不同面积等级、不同山脉、不同子流域以及不同海拔和朝向等方面揭示冰川变化的空间分异特征,并结合区域气候背景讨论冰川变化的主要影响因素。

(4) 结合典型监测冰川资料,分析冰川变化过程及其与区域结果的关系。

选取乌鲁木齐河源 1 号冰川、哈希勒根 51 号冰川、四工河 4 号冰川和扇形分流冰川 4 条典型监测冰川,结合长期观测资料、遥感影像和既有研究成果,分析其阶段性退缩过程和边界演变特征,并与区域编目得到的平均变化结果进行对照,以补充区域统计结果在阶段过程 and 变化细节方面的不足。

1.4 技术路线

本文以准噶尔盆地内流区为研究对象,综合利用高分系列和资源系列卫星影像、COP-DEM、Google Earth、野外验证资料、历史冰川编目资料以及天山冰川站监测资料,构建研究区冰川现状识别与长期变化分析的数据基础。在国产高分辨率遥感影像支持下,开展冰川边界提取,并结合 DEM 辅助划定分冰岭、计算冰川属性和进行精度检查,建立 GI-JIB2020 编目数据集,据此分析研究区 2020 年冰川分布特征。在此基础上,对 CGI-1、CGI-2 与 GI-JIB2020 进行统一整理和一致性处理,建立编码匹配关系,并开展 1960–2020 年冰川变化分析,识别冰川面积、数量及其空间分异特征。同时,结合典型监测冰川资料,对区域尺度冰川变化结果进行对照和补充,以增强对冰川阶段变化过程的认识。本文技术路线如图 1-1 所示:

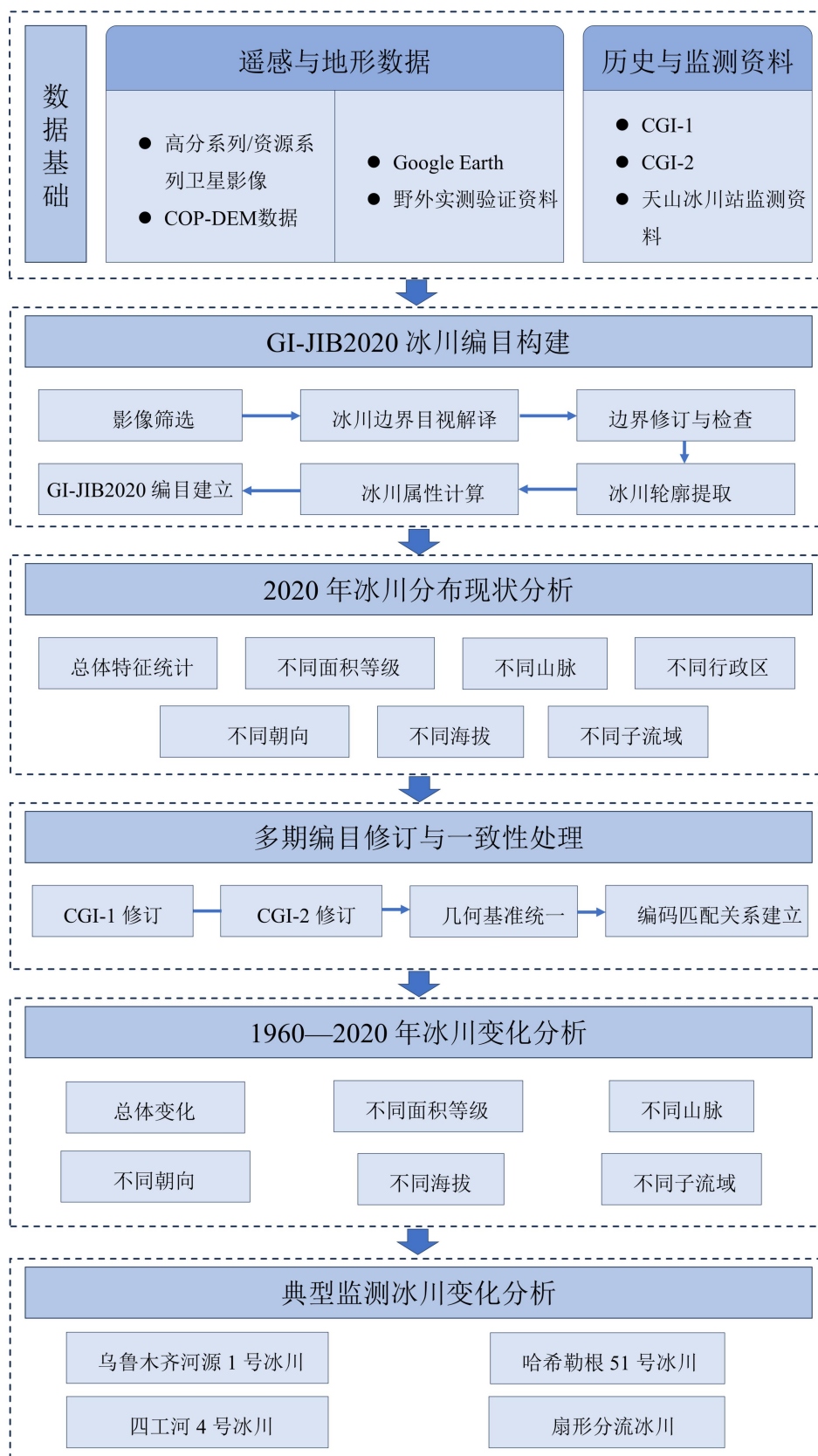


图 1-1 技术路线图

Figure 1-1 Technical Roadmap

第2章 研究区概况

2.1 地理位置

准噶尔盆地内流区位于中国新疆维吾尔自治区北部，地理范围约在东经 $79^{\circ}48'-96^{\circ}24'$ 、北纬 $42^{\circ}48'-47^{\circ}36'$ 之间（图 2-1）。从地貌格局看，准噶尔盆地呈不规则三角形，南缘为天山山脉，北与阿尔泰山相接，西以准噶尔界山为界，东北延伸至卡拉麦里山一带，整体地势向西倾斜且北部略高于南部。由于盆地边界划定方法不同，相关研究给出的盆地面积存在差异，约为 $1.3-3.8 \times 10^5 \text{ km}^2$ （Yu and Wang, 2020; Li et al., 2023）。

本文所称准噶尔盆地内流区，采用《中国第一次冰川编目》对内流区水文单元的界定（施雅风，2005），是指汇入准噶尔盆地内部、最终不通向海洋的河流所经过的区域，构成一个相对完整的内陆水文单元。区内地表径流和地下水总体汇入盆地内部的终端洼地和湖泊，如艾比湖、乌伦古湖和玛纳斯湖，或消散于荒漠地区，不与外流河系相连。研究区水系主要包括流向艾比湖、乌伦古湖和玛纳斯湖的河流，以及天山东段若干散流短河，如伊吾河、木垒河等。北部额尔齐斯河不属于研究区，因为该河为外流河，最终汇入北冰洋水系。在行政区划上，研究区主要涉及乌鲁木齐市、克拉玛依市、昌吉回族自治州、博尔塔拉蒙古自治州、阿勒泰地区、塔城地区、石河子市，以及哈密市的巴里坤哈萨克自治县和伊吾县（施雅风，2005）。同时，依据内流区水文边界划分，研究区内还有部分冰川与巴音郭楞蒙古自治州、伊犁哈萨克自治州和吐鲁番市相关县市重叠，本文在行政区统计中一并纳入。准噶尔盆地周缘高山与盆地相间分布，区内水资源对周边高山降水、季节性积雪融水和冰川融水补给依赖明显。因此，准确评估该内流区冰川资源现状及其变化，对区域水资源安全和生态稳定具有重要意义。

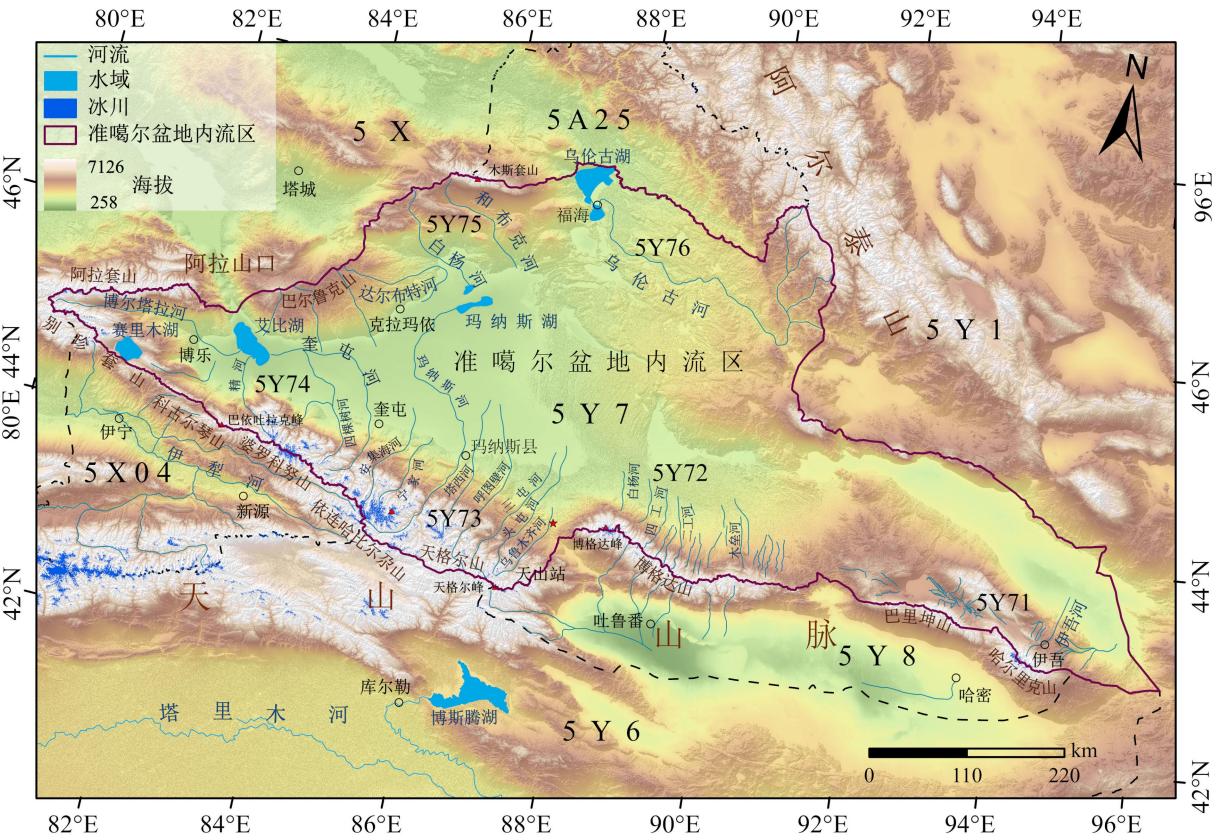


图 2-1 研究区概况图
Figure 2-1 Overview of the Study Area

2.2 地质地貌

准噶尔盆地内流区是典型的封闭型内陆盆地，地势总体表现为四周高、中部低。地形条件影响冰川的发育范围和分布，也影响冰川融水由山地向盆地内部的输送过程（胡汝骥，2004；施雅风，2005）。研究区冰川主要分布在盆地周缘山地，包括南缘天山、北缘阿尔泰山和西缘山地。这些地区海拔较高，地形起伏较大，有利于固态降水积累和冰体保存（邢武成等，2017；李忠勤，2019）。

高山带冰川地貌较发育，常见类型有角峰、刃脊、冰斗、冰蚀槽谷和 U 型谷等（施雅风，2005）。现代冰川多分布在冰斗、槽谷上段、阴坡和局部低凹地形。冰川边界形态受坡向、坡度和谷地形态影响。在陡峻岩壁、崩塌堆积体和阴影过渡带附近，冰体、积雪和碎屑覆盖之间的界线较复杂，容易增加冰川边界判定的不确定性。这也是遥感解译和多时期边界对比中需要注意的误差来源（刘时银等，2015）。从高山带向盆地内部，地形逐渐过渡为中低山、丘陵和山前平原。河流出山后常形成冲积扇和洪积扇，是山地来水向平原输送和转化的重要地带（胡汝骥，2004）。进入盆地腹地

后,地势变缓,风成地貌分布较广,古尔班通古特沙漠占据较大面积。终端湖泊和低洼区是地表水与地下水的主要汇集区。整个区域形成了山地补给、山前转化、盆地汇集的地貌格局。上游冰川变化能够通过融水过程影响下游水资源供给,这也是本文开展冰川现状编目和变化分析的重要地貌背景(李忠勤,2019)。

2.3 气候水文

准噶尔盆地内流区位于亚欧大陆腹地,属温带大陆性干旱气候。区域气温和降水的空间差异较明显,形成了水分主要在周缘山地形成、在盆地平原区消耗的基本格局。盆地平原区年均气温约为6–7℃,年较差和日较差均较大,降水总体较少,年均降水量多在100–200 mm,盆地腹地部分地区不足50 mm。随海拔升高,周缘山地降水明显增加,中山带以上可达400–600 mm。高海拔地区气温较低,降水更易以固态形式积累,为积雪和冰川发育提供了水分条件(Zhu et al., 2014)。

研究区水汽输送以西风环流影响为主,水汽主要来自地中海、里海、黑海、大西洋和北冰洋等中高纬地区,并随季节和年份变化而有所差异(Hu et al., 2021; Jin et al., 2024)。盆地西部和西北部部分地形缺口有利于西风气流进入,并在周缘山地形成地形性降水。其中,阿拉山口是研究区重要的风道和水汽通道,进入盆地的水汽在山地迎风坡抬升凝结,对周边山区降水补给具有重要作用(Wang et al., 2020)。

在上述气候条件下,准噶尔盆地内流区形成了典型的封闭型内陆水文系统。区内地表径流和地下水主要汇入盆地内部低地、终端湖泊,或在荒漠区逐渐消耗。主要水系包括流向艾比湖、乌伦古湖、玛纳斯湖等终端湖泊的河流,以及天山东段若干散流短河。额尔齐斯河为外流河,不属于本研究内流区水系。区内河流多发源于周缘山地,径流补给主要来自山地降水、季节性积雪融水和冰川融水,其中冰雪融水在夏季高温少雨时期对径流维持作用较为明显。冰川和积雪作为高山固体水储库,其变化会通过河流径流过程进一步影响山前平原的用水条件和生态需水格局。

此外,阿尔泰山北坡的科布多河流入蒙古国,属东亚水系。1960年该流域在我国境内分布有少量冰川。《简明中国冰川目录》将其与准噶尔内流区冰川一并统计(施雅风,2005)。为与早期冰川目录保持一致,本文同样将其纳入研究范围。

2.4 植被土壤

准噶尔盆地内流区植被和土壤分布受山地—山前一盆地腹地水热条件差异影响,分异较为明显(胡汝骥,2004; Yao et al., 2022)。周缘山地气温较低、降水较多,植

被覆盖和成土条件相对较好；盆地腹地降水少、蒸发强，植被稀疏，土壤风沙化和盐渍化现象较为突出（Yao et al., 2022）。山地冰雪融水是维持内流区绿洲—荒漠格局的重要水源之一（邓海军和陈亚宁，2018；Yao et al., 2022）。

山地带植被和土壤分带较明显。高海拔地区多分布高山草甸和寒漠植被，土壤以高山草甸土和高山寒漠土为主；中山带常见山地森林和山地草原，土壤以灰褐色森林土和钙积性土类为主（胡汝骥，2004）。积雪消融和冰川融水变化会影响山地土壤含水量和植被生长（邓海军和陈亚宁，2018；Yao et al., 2022）。

山前地带以冲洪积物为主，土壤多为荒漠灰钙土，在灌溉条件下可形成绿洲灌溉土（胡汝骥，2004）。该区是山地来水进入平原的重要地带，生态环境和农业生产对冰雪融水补给依赖较强。盆地腹地土壤以风沙土和盐渍土为主，古尔班通古特沙漠广泛分布固定和半固定沙丘，植被以白梭梭、沙拐枣等耐旱灌木为主（钱亦兵等，2003；钱亦兵等，2007）。终端湖泊及其周边低地盐渍土分布较广，植被多为盐生草甸和耐盐灌草（胡汝骥，2004）。总体上，上游冰川和积雪变化会通过影响山前径流和绿洲供水，进一步作用于区域植被和土壤环境。

2.5 冰川分布概况

2.5.1 准噶尔盆地内流区冰川分布概况

根据第二次冰川编目数据，准噶尔盆地内流区共有冰川 3097 条，冰川面积约为 1744.60 km²，平均冰川面积为 0.56 km²。区内冰川分布具有明显的周缘高山集聚特征。冰川几乎全部分布在盆地边缘的高海拔山地，盆地内部平原和低山丘陵区基本没有冰川发育（图 2-2）。区内冰川主要沿盆地周缘山系成带分布。南缘冰川集中在天山北坡，受地形高度和迎风降水条件影响，在多条山前河流源区形成较连续的冰川分布带。北缘和西北缘冰川主要分布在阿尔泰山及邻近山地的高海拔地区，多位于山脊和谷源地带，并与上游支流汇水区相对应。总体来看，准噶尔盆地内流区冰川分布与高程条件和山地地形关系密切。冰川主要集中在周缘山系的高海拔地带，向盆地内部迅速减少。

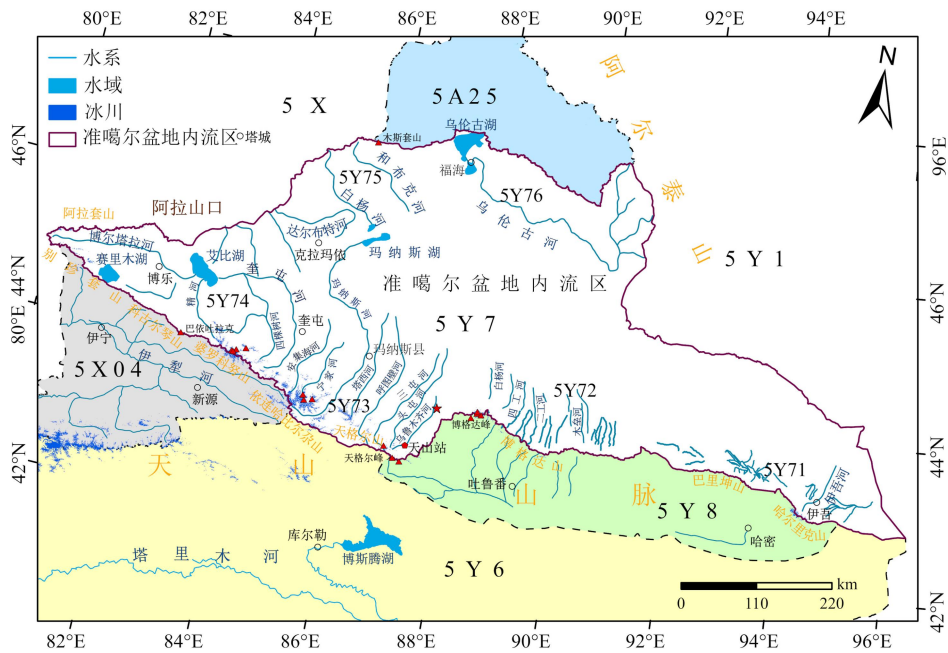


图 2-2 准噶尔盆地内流区冰川分布图

Figure 2-2 Glacier Distribution in the Junggar Inland Basin

2.5.2 监测冰川概况

为进一步分析准噶尔盆地内流区冰川变化的具体过程，本研究选取了 4 条具有较好观测基础和代表性的冰川开展个案研究（图 2-3）。这些冰川在地理位置、规模、形态和监测条件等方面存在差异，可较好反映研究区不同类型冰川的变化特征。

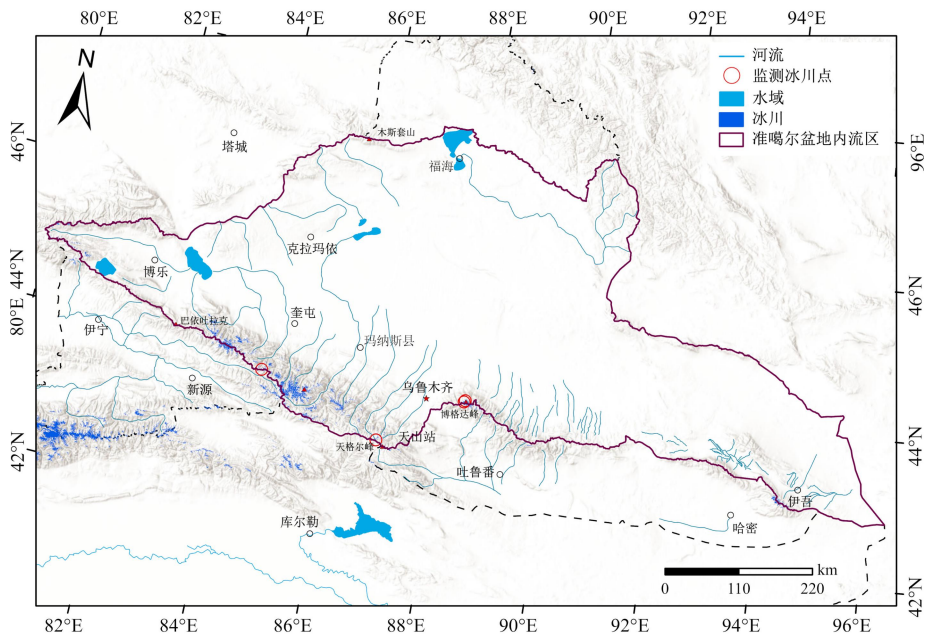


图 2-3 监测冰川分布图

Figure 2-3 Distribution of the Monitored Glaciers

乌鲁木齐河源 1 号冰川位于天山乌鲁木齐河上游，是我国连续监测时间最长的冰川之一，属于典型的冰斗—山谷冰川。自 1959 年以来，依托天山冰川观测试验站，已建立较完整的长期观测体系，观测内容包括物质平衡、冰川运动、冰面气象和冰川末端变化等，积累了连续时间较长的监测资料。哈希勒根 51 号冰川位于天山北坡奎屯河流域，是一条典型冰斗冰川，面积较大，冰舌区存在较连续的表碛覆盖（图 2-4）。该冰川在形态和表面特征上具有一定代表性，可用于分析表碛覆盖条件下的冰川变化特征。四工河 4 号冰川位于天山北坡四工河上游，是一条典型的中小型山谷冰川。该冰川对气候变化响应较快，其变化过程能够较直接反映区域气候波动对中小冰川的影响。扇形分流冰川位于研究区西部，冰舌末端呈扇状展开，属于形态较特殊的溢出山谷冰川（图 2-5）。其形态特征与冰流运动及下伏地形关系密切，对该冰川开展研究有助于认识不同形态冰川的变化差异。



图 2-4 奎屯河哈希勒根 51 号冰川照片

Figure 2-4 Photograph of Glacier No. 51 in the Haxilegen Region of the Kuytun River



图 2-5 扇形分流冰川照片

Figure 2-5 Photograph of the Fan-Shaped Glacier

第 3 章 数据与方法

3.1 数据

本文所采用的数据源主要包括高分卫星影像、冰川编目数据和数字高程模型等，其具体来源和用途详见表 3-1。

表 3-1 研究数据清单

Table 3-1 List of Research Data

数据	分辨率	时间	用途	数量	数据来源
GF-1	2 m	2020–2021	冰川边界提取	19	中国资源卫星应用中心网站
GF-6	2 m	2019–2020	冰川边界提取	4	
ZY-3	6 m	2019–2021	冰川边界提取	6	
Landsat MSS	60 m (重采样)	1972–1977	CGI-1 辅助修订	10	美国地质调查局 (USGS)
COP- DEM	30 m	2010–2015	山脊线提取、属性计算		https://dataspace.copernicus.eu
冰川编 目数据		1959–1970 2007–2009	冰川变化研究分 析		图书资料 (刘潮海等, 1982; 中国科学院兰州冰川冻土研究所, 1986a; 中国科学院兰州冰川冻土研究所, 1986b); 国家冰川冻土沙漠科学数据中心
气象站 数据		1959–2018 1959–2016	冰川变化归因		中国科学院天山冰川观测试验站

3.1.1 遥感影像数据

本研究用于冰川边界解译的主要遥感数据为中国高分辨率对地观测系统系列卫星

影像。高分专项是《中国国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006–2020 年）》部署的 16 个重大科技专项之一，其主要任务是构建由卫星、平流层飞艇和飞机共同组成的高分辨率对地观测系统，并与其他观测方式相结合，最终形成具备全天候、全天时和全球覆盖能力的对地观测体系（刘锬等，2015）。

高分一号（GF-1）作为该系列的首颗卫星，于 2013 年 4 月 26 日在酒泉卫星发射中心成功发射。该卫星搭载了两台 2 m 全色/8 m 多光谱相机以及四台 16 m 分辨率多光谱宽幅相机。其中，PMS 相机具有较高的空间分辨率，能够较为清晰地识别冰川边界、冰面裂隙及表碛覆盖范围等信息，从而为冰川边界的精细解译提供了可靠的数据支撑。

为保证冰川边界解译的准确性和时效性，遥感影像的选取需要满足统一要求。本研究参考国际冰川遥感监测的通用标准（Paul et al., 2009），确定了 3 条影像选取原则。其一，优先选取冰川消融末期影像。北半球一般为 7–9 月。此时季节性积雪大多已经消融，冰川实际范围暴露较为完整，可减少面积误判。其二，优先选取云量较少的影像，通常要求低于 5%，并尽量保证冰川区内部无明显云、阴影和季节性积雪干扰。这样可以保证边界信息较完整，减少解译误差。其三，为了建立能够代表特定年份的冰川编目，所选影像的时间应尽量集中。本研究以 2020 年为现状基准年。对 2020 年因云雾遮挡或数据缺失而不能满足要求的区域，选用 2019 年或 2021 年同季节、质量合格的影像补充，以保证编目结果在时间上尽量一致，并较好反映 2020 年冰川空间分布状况。

本研究以高分一号（GF-1）影像为主要数据源，同时加入同样具有较高空间分辨率的高分六号（GF-6）和资源三号（ZY-3）影像，用于补充单一卫星在覆盖范围和获取时相上的不足。最后共筛选出合格影像 29 景，其中 2020 年影像 19 景，2019 年和 2021 年影像分别为 4 景和 6 景。

3.1.2 冰川编目数据

本研究通过中国第一次冰川编目（CGI-1）、中国第二次冰川编目（CGI-2）和准噶尔盆地内流区 2020 年冰川编目（GI-JIB2020）来研究准噶尔盆地内流区的冰川变化。

20 世纪 70 年代，中国科学院兰州冰川冻土研究所按照国际冰川编目规范开展了 CGI-1 编制工作，并形成了《中国冰川目录》新疆地区 5 卷 9 册资料。准噶尔盆地内流区的冰川资料主要来自《中国冰川目录 II 阿尔泰山区》、《中国冰川目录 III 天山山区（西北部准噶尔内流区）》和《中国冰川目录 III 天山山区（东部散流内流区）》。CGI-1 以 1:5 万和 1:10 万航测地形图及同期航空像片为基础数据，资料年代主要为 1956–1973 年，少数区域延续到 20 世纪 80 年代。准噶尔盆地内流区采用的图幅时间为 1959–1971 年，其中 1959 年 9 幅，1960–1964 年 9 幅，1971 年 1 幅。由于所用图

幅大多集中在 20 世纪 60 年代初, 且 20 世纪 60–70 年代区域冰川变化总体较小, 因此本文将 CGI-1 统一归为 1960 年。在此基础上, 本文对 CGI-1 进行了屏幕数字化处理, 共识别出冰川 3413 条, 总面积为 2584.42 km²。该结果与原始目录统计值存在一定差异。这种差异主要与图件数字化处理、冰川边界重新判定、分冰岭划分调整以及 GIS 条件下面积重新计算有关(刘时银, 2015; 孙美平, 2015)。因此, 需要对其进行一定的修正。

CGI-2 由国家青藏高原科学数据中心提供(<https://data.tpdc.ac.cn/en>), 主要基于 2004–2011 年的 Landsat TM/ETM+ 遥感影像(30 m)。在准噶尔盆地内流区, 共采用 2006–2010 年的 17 景影像, 其中 2006 年 2 景、2007 年 8 景、2009 年 5 景、2010 年 2 景。据此识别出本区发育冰川 3097 条, 总面积为 1744.60 km²。鉴于影像时间主要集中在 2007 年, 本研究将 CGI-2 的现状年统一设定为 2007 年。

GI-JIB2020 是在新疆冰川编目 2020 (CGI-XJ2020) 数据集(Li et al., 2025) 基础上, 面向准噶尔盆地内流区研究需求构建的区域冰川数据集。其对应区域的冰川边界解译、属性提取与质量控制由作者在参与 CGI-XJ2020 编制期间具体承担完成。本文进一步对该区域成果进行提取、整理与区域化处理, 统一数据结构和字段体系, 并结合研究区分析需求补充开展校核与误差评估, 最终形成准噶尔盆地内流区 2020 年冰川数据集(GI-JIB2020) (详见第 3.3 章)。

3.1.3 数字高程模型

本文采用的数字高程模型为哥白尼数字高程模型(Copernicus Global DSM), 简称 COP-DEM。该模型由欧洲空间局(ESA)在哥白尼计划(Copernicus)框架下开发, 属于全球覆盖的数字高程模型产品。COP-DEM 结合雷达高度计、光学卫星和激光雷达等多种技术获取地表高程信息, 空间分辨率达到 30 m。与其他开源 DEM 数据相比, COP-DEM 在精度和分辨率方面优势较为明显, 能够更有效地表征地形细节(Li et al., 2025)。

3.1.4 野外验证资料

为检验准噶尔盆地内流区 2020 年冰川数据集的边界精度和空间一致性, 研究团队于 2021–2023 年在天山典型冰川区开展了冰川边界定位点外业观测。外业 GPS 定位点可为冰川末端和冰缘过渡带等边界不确定性较大的部位提供直接的边界验证, 尤其适用于薄表碛覆盖区的边界判定和校核。在此基础上, 结合中国科学院天山冰川观测试验站的长期监测资料, 本文汇集了 9 条监测冰川的末端 GPS 定位数据, 包括乌鲁木齐

河源 1 号、2 号、6 号、7 号冰川，玛纳斯河流域鹿角湾冰川和扇形分流冰川，四工河 4 号冰川，以及哈希勒根 51 号和 48 号冰川，共获得 154 个高精度定位点（表 3-2）。将这些定位点与 2020 年编目边界进行空间叠置对比，可定量识别边界位置偏差，并为冰川数据集边界的修订提供依据。

表 3-2 准噶尔盆地内流区 9 条野外实测冰川信息

Table 3-2 Information on 9 Glaciers Measured in the Field in the Junggar Inland Basin

冰川名称		所属流域	面积(km ²)	GPS 点数量
乌鲁木齐河源 1 号冰川	东支	乌鲁木齐河	0.96	18
	西支	乌鲁木齐河	0.55	16
乌鲁木齐河源 2 号冰川		乌鲁木齐河	0.69	22
乌鲁木齐河源 6 号冰川		乌鲁木齐河	0.28	11
乌鲁木齐河源 7 号冰川		乌鲁木齐河	0.37	14
鹿角湾冰川		金沟河	1.16	16
扇形分流冰川		四工河、庙尔沟	9.24	12
四工河 4 号冰川		四工河	2.31	16
奎屯河哈希勒根 51 号冰川		奎屯河	1.14	18
奎屯河哈希勒根 48 冰川		奎屯河	5.34	11

3.1.5 气象数据

为分析准噶尔盆地内流区冰川变化的气候背景，本文收集并整理了乌鲁木齐河源 1 号冰川附近大西沟气象站和玛纳斯河流域肯斯瓦特水文站的日尺度气温和降水资料。上述站点分别代表研究区中东部典型冰川区和天山北坡重要内陆河流域，能够为区域冰川变化解释提供气象依据。

在数据预处理过程中，本文对原始日值资料进行了质量控制，主要包括剔除缺测值代码、删除记录不完整年份，并在此基础上分别计算年平均气温和年降水量。大西沟站用于年平均气温分析的时间序列为 1959–2018 年，用于年降水量分析的时间序列为 1959–2016 年。肯斯瓦特水文站的年平均气温和年降水量时间序列均为 1980–2023 年。基于上述处理结果，本文进一步分析了代表性站点气温和降水的长期变化趋势，并将其作为第 5 章冰川变化影响因素分析的重要气候背景资料。

3.1.6 其他数据

为提高冰川边界解译的可靠性，本文采用 Google Earth 高分辨率影像作为辅助判读数据。其多时相真彩色影像可用于对冰川末端、阴影区及薄表碛覆盖区等关键部位进行对照核查，识别局部错判与边界偏移，并据此修订矢量边界，提升编目成果的几何精度与一致性。

3.2 CGI-1 修正与 CGI-2 交叉验证

基于三期编目冰川边界的 GIS 空间叠加分析，本文识别出 CGI-1 与 CGI-2 相对于 GI-JIB2020 的系统性差异，主要表现为五类：（1）部分冰川在不同时期编目中的矢量边界重合度偏低；（2）表碛覆盖信息记录不完整或识别不足，局部存在边界缺失与错判；（3）季节性雪斑与裸岩易被误判为冰川单元；（4）分冰岭划分在个别区域存在异常，进而影响冰川数量及属性统计的一致性；（5）不同时期编目所用遥感数据分辨率存在差异，高分辨率影像（如 GF/ZY）相较中低分辨率地形图与 Landsat 影像更利于精细刻画冰缘、表碛覆盖区及小型冰体，从而导致 GI-JIB2020 中部分单条冰川面积大于 CGI-1 与 CGI-2 的情况（Zhan et al., 2025）。

为降低多期编目冰川面积变化估算的不确定性，本文对 CGI-1 冰川边界开展系统修正。首先收集 Landsat 系列影像（表 3-1）及 GI-JIB2020 编制所用的高分、资源系列影像，将 CGI-1 边界与相应时期影像叠加，并与 GI-JIB2020 边界进行对照。其中，Landsat 数据采用 USGS 发布的二级产品，已完成辐射校正、几何校正与地形校正等预处理。以 GI-JIB2020 为几何基准，对 CGI-1 中与其重合度较低且形态差异明显的冰川边界重新定位或重描，对重合度较高且空间位置基本一致的冰川保持不变。鉴于 CGI-1 主要依据地形图判读，大型冰川积累区轮廓相对清晰，而消融区及小冰川边界不确定性较大，本文进一步利用 Landsat MSS 真彩色合成影像，对冰舌、小冰体及冰缘过渡带进行补充判读与局部细化（Hall et al., 2003; Racoviteanu et al., 2009）。针对 CGI-1 中将裸岩或季节性积雪误判为冰川的情况，结合多期遥感影像光谱特征进行互证，剔除不具多年性冰川特征的单元（Racoviteanu et al., 2009; Paul et al., 2013）。经修正与互证，非冰川单元被剔除，部分冰川边界得到收缩与细化。修订后，研究区 CGI-1 冰川总面积由 2584.42 km² 调整为 2343.03 km²，冰川条数由 3413 条减少至 3412 条。

CGI-2 在影像时间、数据源（Landsat TM/ETM+）及提取方法上与 GI-JIB2020 更为接近，整体边界与 GI-JIB2020 保持较高一致性，因此未开展大范围调整。修订工作主要针对 CGI-2 在部分冰川末端表碛覆盖区的漏采问题，并限定于表碛覆盖冰川。具

体而言, 以 GI-JIB2020 中表碛覆盖冰川为参照, 将 CGI-2 边界与高分、资源卫星影像及 Google Earth 高分辨率影像叠加开展交叉验证。当纹理、色调及地形指示共同表明 CGI-2 边界明显低估表碛覆盖范围或偏离冰体实际分布时, 对相应边界进行针对性修订 (Paul et al., 2004; Frey et al., 2012)。最终在研究区范围内共修订 19 条表碛覆盖冰川边界, 其中新增识别 9 条表碛覆盖冰川, 并对 10 条既有表碛覆盖冰川范围进行调整。修订后, 研究区 CGI-2 冰川数量总体保持不变, 总面积由 1744.60 km² 更新为 1760.01 km², 从而提高了 CGI-2 与其他时期编目成果之间的空间可比性。

另外, 受限于现有辅助影像对早期小冰川及表碛边界的判读能力, CGI-2 与 GI-JIB2020 中新增的小冰川未予补充, CGI-1 的表碛覆盖冰川边界亦未开展进一步调整。

3.3 GI-JIB2020 编制

3.3.1 冰川边界提取

3.3.1.1 裸冰区冰川边界提取

本研究所采用的高分卫星影像和资源卫星影像, 难以直接应用传统的波段比值阈值法和雪盖指数法进行冰川自动提取。已有研究表明, 蓝光波段在高分辨率影像冰雪识别中具有较好的判别效果 (肖鹏峰等, 2015), 可见光与近红外波段组合也有助于增强冰雪与周边地物之间的光谱差异 (彦立利等, 2020)。因此, 相关波段组合可作为冰川识别与边界判读的重要辅助依据。基于此, GI-JIB2020 以高分辨率遥感正射影像为基础, 采用人工目视判别方法提取冰川边界。结合 ZY-1、ZY-3、GF-1 和 GF-6 等影像的光谱特征, 影像波段组合设置为标准假彩色 (4、3、2) 或真彩色 (3、2、1), 其中 1 为蓝光波段, 2 为绿光波段, 3 为红光波段, 4 为近红外波段。上述波段组合有利于增强冰川与周围地物的差异, 提高冰川识别效果。对于裸冰区, 冰川边界判读相对较为直接。裸冰表面反射率较高、亮度较大, 与周边地物之间存在较明显差异, 同时, 冰川边缘通常较清晰, 颜色变化也较明显, 因此在遥感影像中较易识别 (图 3-1)。

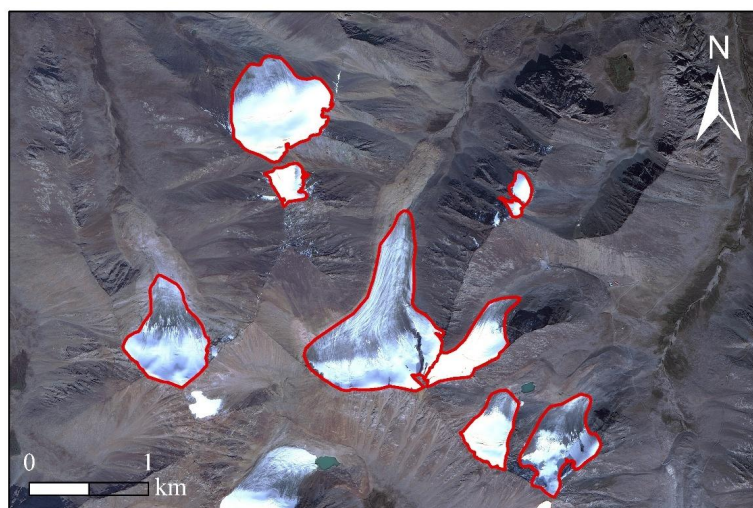


图 3-1 裸冰判读实例

Figure 3-1 Example of Clean-Ice Delineation

3.3.1.2 表碛型冰川边界提取

已有研究尝试利用表碛覆盖冰川的表面曲率、温度等特征进行识别。Bolch et al. (2010) 结合 ASTER 影像立体像对生成的 DEM 和热红外波段信息, 对表碛覆盖冰川识别方法进行了研究。Shukla and Ali (2016) 利用短波红外与热红外波段的差异, 提出了归一化差异表碛指数 (NDDI), 用于提取表碛覆盖冰川边界。该指数在 ASTER 影像中的应用效果较好, 但由于对阈值设置较为敏感, 在大范围冰川提取中的稳定性仍然不足。与自动分类方法相比, 手工数字化在表碛覆盖冰川边界提取中通常具有更高精度。现有自动分类结果虽然能够提高一定的工作效率, 但多数情况下仍主要作为手工数字化判读的辅助参考 (Paul et al., 2015)。

基于上述认识, 本文采用人工目视解译方法提取表碛覆盖冰川边界。该方法的优势在于, 解译者能够综合遥感影像特征与地形地貌信息, 对自动提取方法难以稳定识别的表碛覆盖冰川进行更为准确的判断。对于表碛覆盖冰川区的人工判读, 主要可依据以下三个方面的特征。

首先, 表碛覆盖区通常表现出地表温度较低、植被覆盖较少的特点。由于表碛厚度存在空间差异, 不同部位的冰川消融程度并不一致, 进而导致地表起伏变化较大, 并与周边地形形成较明显的差异。因此, 在自然真彩色合成影像中, 表碛覆盖冰川区在颜色和纹理上通常与周围地物有所区别, 这可作为区分冰川表碛覆盖区与邻近裸露基岩的重要依据 (图 3-2)。



图 3-2 表碛型冰川判读实例 1

Figure 3-2 Example 1 of Delineation for a Debris-Covered Glacier

其次，表碛覆盖冰川的表层之下通常为渗透性较差的冰川冰体。在持续消融作用下，冰川表面容易形成大小不一的洼地，并进一步汇集融水，发育成不同规模的冰川表面湖。与冰川侧缘碛湖和末端湖相比，这类冰川表面湖在形态特征上具有较明显的差异。尤其是规模较大的冰川表面湖，往往能够在遥感影像中较清晰地识别，因此可作为判识冰川表碛覆盖区的另一类典型标志（图 3-3）。

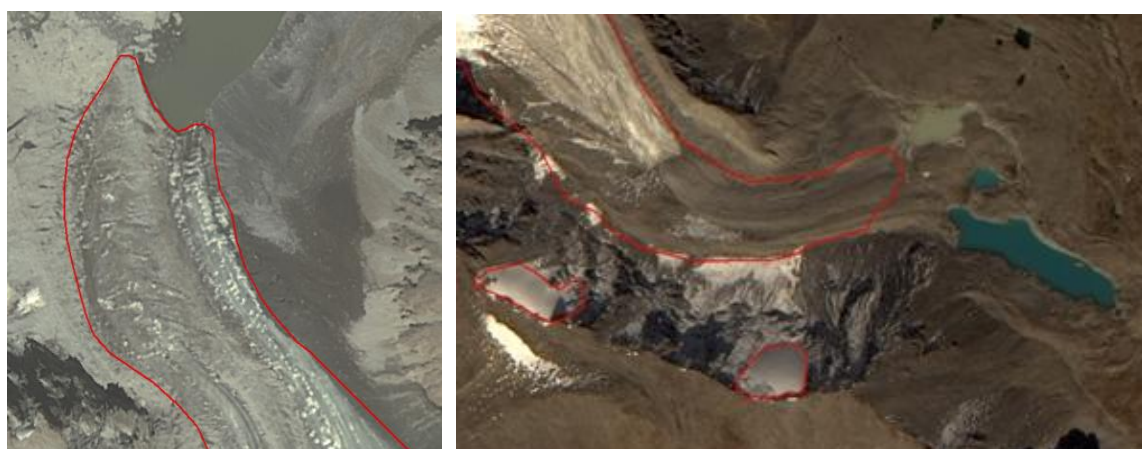


图 3-3 表碛型冰川判读实例 2

Figure 3-3 Example 2 of Delineation for a Debris-Covered Glacier

此外，表碛覆盖冰川末端在冰川融水长期冲刷作用下，通常会形成较为明显的水系出露特征（图 3-4）。相较于冰川内部复杂的地表形态，末端区域的影像表现通常更为清晰，水流汇集与出露现象也较易辨认。因此，末端水系特征可作为识别表碛覆盖冰川末端位置的重要依据。



图 3-4 表碛型冰川判读实例 3

Figure 3-4 Example 3 of Delineation for a Debris-Covered Glacier

3.3.2 冰川分冰岭划定

冰川分冰岭划定是冰川编目中的重要环节，其目的在于依据地形分界，将连续冰体划分为相互独立的冰川单元（Paul et al., 2009; Bolch et al., 2010）。本研究以 COP-DEM 高程数据为基础，在 ArcGIS 平台中利用水文分析工具自动提取分冰岭，并结合人机交互判读对提取结果进行检查与优化，获得研究区分冰岭的空间分布。在此基础上，将分冰岭结果应用于 3.3.1 章节提取的冰川边界分割，形成单冰川矢量单元（Bolch et al., 2010; Guo et al., 2015）。需要说明的是，基于 DEM 的自动提取方法在地形复杂区域容易产生偏差，可能出现分界线位置不稳定或局部错判等问题。为减少此类误差，本文进一步结合卫星影像判读与原始 DEM 信息，对自动提取结果进行了人工校正，重点修正了不合理的分冰岭位置，从而提高了单冰川划分结果的准确性和一致性。

3.3.3 冰川属性计算

GI-JIB2020 为 CGI-XJ2020 数据集中准噶尔盆地内流区范围的子集，沿用了 CGI-XJ2020 的属性字段设置和编码体系（Li et al., 2025）。根据国际冰川编目推荐的属性内容（Müller et al., 1977; Paul et al., 2009; Randolph Consortium, 2014），GI-JIB2020 的属性信息主要包括冰川编码、冰川名称、冰川面积、位置属性、冰川储量、地形参数、冰川类型，以及影像和编制检查信息等。在冰川编码方面，包括了 3 套编码字段，即 FCGI_ID、SIGLIMS_ID 和 XJGLIMS_ID（Li et al., 2025）。FCGI_ID 采用世界冰川

编目 (WGI) 的流域冰川编码方法, 由大洲代码、五级流域代码和冰川编号组成 (Müller et al., 1977)。SIGLIMS_ID 采用 GLIMS 编码方式, 由冰川中心坐标生成 (Raup et al., 2007; Racoviteanu et al., 2009)。XJGLIMS_ID 为 CGI-XJ2020 基于冰川边界中心 $x-y$ 坐标生成的区域编码 (Li et al., 2025)。

冰川面积在 Albers 等积投影下由 GIS 软件计算得到。位置信息包括冰川中心坐标、所属山系、流域和行政区划等内容。地形参数以 COP-DEM 为基础, 在冰川范围内利用 ArcGIS 分区统计等工具提取最高、最低、平均和中值海拔。平均坡度由坡度栅格在冰川掩膜范围内统计得到, 坡向由坡向栅格计算获得 (Paul et al., 2009; Yao et al., 2012)。冰川类型主要分为表碛型和非表碛型, 并在 “Type” 字段中赋值, 1 表示表碛型冰川, 2 表示非表碛型冰川。跨国界冰川通过 “tag” 字段标识, 0 表示境内冰川, 1 表示跨国界冰川 (Li et al., 2025)。影像来源、影像时间、DEM 来源以及编制与检查人员等信息也在数据整理过程中同步记录, 用于数据溯源和质量追踪。

单条冰川储量的计算通常以探地雷达 (GPR) 或钻孔观测获取的冰厚数据为基础。但冰川区自然条件较差, GPR 和钻孔观测开展困难, 能够直接获取的厚度资料较少。因此, 基于单条冰川的储量一面积经验公式 (3-1), 已成为区域和全球冰川储量及其变化评估中常用的方法。本文也采用储量一面积经验公式对准噶尔盆地内流区冰川储量进行计算:

$$V = aA^\gamma \quad (3-1)$$

式中 V 为冰川体积; A 为冰川面积; a 和 γ 分别代表体积转换系数和面积指数。中国第一、二次冰川编目中的储量计算中均使用了上述公式 (施雅风, 2005; 刘时银等, 2015)。GI-JIB2020 同样也继承了这一方法。由于该统计模型未考虑局部地形 (如坡度、表碛覆盖厚度) 对冰厚分布的影响, 另外不同冰川区域冰川的物理特性也有所不同, 因而使用该公式时, 应根据研究区的实测数据对 a 和 γ 两个系数进行推算或对其理论数值进行修正。

中国第一次冰川编目公式使用的系数 (表 3-3) 基于中国境内 27 条冰川的 GPR 测厚数据推算得到, 其中祁连山冰川由于多为悬冰川和坡面冰川, 平均厚度小于同等规模其它类型冰川因而选用了不同的公式系数 (施雅风, 2005)。CGI-2 使用的公式系数 (表 3-3) 由两套数值组成, 分别由 Radić and Hock (2010) 和 Grinsted (2013) 提出, 计算出的结果分别以属性条目 “Glc_Vol_A” 和 “Glc_Vol_B” 标识于编目中。其中 Radić and Hock (2010) 的公式系数源于 Chen and Ohmura (1990) 和 Bahr et al. (1997) 研究结果的组合。Grinsted (2013) 的公式系数基于 Cogley (2012) 汇编的全球冰川面积体积观测数据集的计算, 该数据库共收集了全球范围 264 条冰川的 GPR 厚度测量数据。

表 3-3 冰川编目中使用的面积—体积经验公式系数
Table 3-3 Coefficients of the Area–Volume Scaling Equation Used in the Glacier Inventory

编目名称	a	γ	适用范围	数据来源
CGI-1	0.0436	1.3	中国西部冰川	施雅风 2005
	0.0344	1.45	祁连山冰川	施雅风 2005
CGI-2	0.0365	1.375	全球冰川	Radić and Hock 2010
	0.0433	1.29	全球冰川	Grinsted 2013
GI-JIB2020	0.0341	1.2683	中国新疆冰川	Li et al (2025)

GI-JIB2020 储量计算公式的构建参考 Li et al. (2025) 的研究 a 和 γ 分别为 0.0341 和 1.2683（表 3-3），由此计算出的 2020 年准噶尔盆地内流区冰川储量为 73.77 km³。

3.4 冰川面积变化及误差评估

3.4.1 冰川面积变化

为系统评估 1960–2020 年准噶尔盆地内流区冰川面积变化，本文在三期冰川编目数据统一修订的基础上，设置原始编目对比、修订编目对比、冰川融合与编码匹配三类方案，用于计算冰川面积变化并比较不同处理策略下结果差异及其不确定性来源。

（1）原始编目数据对比法

直接采用未修订的 CGI-1、CGI-2 与 GI-JIB2020 提供的冰川边界面积，分别计算 1960–2007 年、2007–2020 年及 1960–2020 年的面积变化量与年均相对退缩率。该方法将三期编目视为离散时点，通过总面积差分获取区域尺度变化，流程简洁、结果直观，便于与既有基于原始编目的研究结论进行横向对照。其局限在于，三期原始编目在数据源、分辨率、判读规则与分冰岭划分等方面存在差异，差分结果难以避免叠加真实冰川变化与编目差异带来的系统偏差，从而影响变化幅度的可比性与归因解释。

（2）修订编目对比法

基于 3.2 章节对 CGI-1 与 CGI-2 的系统修订成果，使三期编目在几何基准、边界识别与分冰岭划定方面尽量保持一致。在此基础上统计 1960、2007 与 2020 年研究区冰川总面积，并计算各时段面积变化量与年均相对退缩率。相较于原始编目对比法，该方案能够削弱由数据源差异与编目规则不一致引入的系统误差，使区域尺度退缩率更接近冰川实际演变。其不足主要在于，该方法侧重区域总量变化，难以追踪单条冰川的分裂、合并与消亡等个体过程。同时，三期编目在最小面积阈值与小冰体识别能力方面仍存在差别，修订过程亦难以完全补齐遗漏的小冰川，从而限制了对微小冰体

及其对区域冰储量变化贡献的刻画。对于表碛覆盖冰川，CGI-2 修订后其表碛区边界与 GI-JIB2020 的整体退缩指向一致。尽管 CGI-1 的表碛区边界未进行专门修订，经核查其数字化边界在退缩方向与幅度上与后两期总体一致，因此本文将表碛覆盖冰川与裸冰冰川统一纳入面积变化统计与分析。

(3) 基于融合处理的冰川编码匹配法

在修订编目对比的基础上，进一步开展编码匹配以实现单条冰川尺度的变化追踪。考虑到影像分辨率提高及冰川消融分裂等因素，CGI-2 与 GI-JIB2020 相较 CGI-1 可能将同一冰川拆分为多个冰体单元。为保证跨期对象一致性，本文以 CGI-1 的 FCGI_ID 作为统一标识，对 CGI-2 与 GI-JIB2020 中对应冰体进行编号匹配与校正，确保三期数据中同一 FCGI_ID 始终对应同一冰川对象。编号统一后，在 ArcGIS 中以 FCGI_ID 为基准使用 Dissolve（融合）工具，将后两期中同一编码下的多个冰体合并为单条冰川边界，以减少单冰川多单元带来的统计偏差。随后以 CGI-1 为基准，对融合后的 CGI-2 与 GI-JIB2020 进行匹配筛选，提取三期均存在的冰川集合，计算其在 1960、2007 与 2020 年的总面积及各时段面积变化量与年均退缩率。该方法能够实现单条冰川在三期编目中的连续对应与变化追踪，并避免因分辨率提高导致新增识别小冰川而引起的跨期样本不一致，但其结果仅代表三期均被识别的冰川集合，难以覆盖研究区全部冰川。

在充分考虑三期编目之间的分辨率差异、分冰岭划分调整以及冰川分裂或合并导致的对象不一致等因素后，本文将基于融合处理的冰川编码匹配法作为研究区冰川变化的主要统计方法，用于后续冰川面积变化量与退缩率的计算与分析。方法选择依据及其结果分析见第 5.1 章。

3.4.2 误差评估

3.4.2.1 冰川编目精度评估

在 GI-JIB2020 中，冰川边界绘制误差主要来源于方法误差（Raup et al., 2007），而由边界误判造成的系统性误差不再另行估算（Randolph Consortium, 2014）。方法误差主要通过野外 GPS 实测数据，并结合高分辨率 Google Earth 影像（空间分辨率优于 1 m）对冰川末端定位点进行校正和核验来获取（Paul et al., 2013; Guo et al., 2015）。2019–2021 年，利用无人机影像与 RTK-GPS 获取了 9 条典型冰川（表 3-2）末端的 154 个高精度定位点及配套野外照片。上述冰川多为中国科学院天山冰川观测试验站长期监测对象，末端识别与多期变化记录较为可靠，可作为编目边界精度检验的控制点（Racoviteanu et al., 2009; Li et al., 2025）。通过将定位点与人工绘制的冰川边界进行对照，并结合高分辨率影像对冰川边界进行复核，得到冰川边界位置精度：裸冰区边界误差约为 ± 4 m，表碛覆盖区边界误差约为 ± 12 m。

3.4.2.2 冰川面积误差评估

GI-JIB2020 冰川面积误差评估是基于上述冰川编目方法的精度来进行，并采用冰川缓冲区评估的面积（Granshaw and Fountain, 2006；Bolch et al., 2010；Chand and Sharma, 2015）。评估的过程采用公式（3-2）：

$$E_A = L_i E_{p_i} + L_d E_{p_d} + L_r E_{p_r} \quad (3-2)$$

其中， E_A 表示冰川面积误差， E_{p_i} 和 E_{p_d} 分别表示裸冰区和表碛区的冰川边界误差， L_i 和 L_d 分别为裸冰区和表碛区的冰川边界长度， L_r 为分布岭长度。由于分冰岭误差对所采用 DEM 的依赖性较强，且难以进行准确评估，因此在误差评估过程中，以一个 DEM 像元的大小，即 30 m，代替分冰岭误差。根据上述精度评估结果，准噶尔盆地内流区冰川面积误差为 $\pm 45.09 \text{ km}^2$ ，占总面积的 2.74%。

3.4.2.3 冰川变化误差评估

研究区 CGI-1 的冰川边界来自地形图数字化成果，其精度评估参考 Xu et al. (2015)。其中，1:50,000 和 1:100,000 地形图数字化结果的平面位置误差分别为 6.5 m 和 14.2 m。根据误差传递公式（Racoviteanu et al., 2009），估算得到 CGI-1 冰川边界误差为 $\pm 16 \text{ m}$ 。进一步计算表明，CGI-1 的冰川面积误差为 182.90 km^2 ，占冰川总面积的 7.80%。CGI-2 的不确定性则主要来源于编目制作过程。参照 Guo et al. (2015)，裸冰与表碛覆盖型冰川的边界位置误差分别为 $\pm 10 \text{ m}$ 与 $\pm 30 \text{ m}$ 。CGI-2 的冰川面积不确定性为 87.4 km^2 ，占总面积的 5.0%。

不同冰川编目之间的差异主要来自获取时相、制图方法与数据源等方面的不同。为定量评估多期编目对比下冰川面积变化估计的不确定性，本文采用误差传播公式（3-3）：

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

式中， E_{AC} 为冰川面积变化的不确定性； E_{A1} 与 E_{A2} 分别表示前一期与后一期冰川编目的面积不确定性。基于该传播方法，计算得到 1960–2007 年、2007–2020 年与 1960–2020 年冰川面积变化的不确定性分别为 $\pm 202.71 \text{ km}^2$ 、 $\pm 98.35 \text{ km}^2$ 和 $\pm 188.38 \text{ km}^2$ 。

第4章 基于 GI-JIB2020 的 2020 年冰川分布特征

4.1 GI-JIB2020 数据集总体特征

GI-JIB2020 以 GF 与 ZY 系列高分辨率影像为主要解译数据源，并结合 COP-DEM 提取地形参数与分冰岭信息编制而成，为准噶尔盆地内流区冰川边界与属性描述提供数据支撑。相较于以地形图或中等分辨率影像建立的历史编目，GI-JIB2020 的边界定位精度与属性表征精度有所提高。本章后续分析以数据集中全部单条冰川边界为基础，对冰川面积等级、山系、子流域、行政区划以及海拔与朝向等分布特征开展统计分析。

根据 GI-JIB2020 统计，2020 年准噶尔盆地内流区共发育冰川 3174 条，总面积 1645.69 km²，冰川储量 73.77 km³，其中表碛型冰川 74 条，总面积 319.45 km²，占冰川总面积的 19.41%。

4.2 不同面积等级冰川分布特征

准噶尔盆地内流区单条冰川面积介于 0.01–35.19 km²，平均面积为 0.52 km²（图 4-1）。从数量上看，面积 < 0.1 km² 的冰川最多，共 1311 条，占冰川总数的 41.34%。其次为 0.1–0.5 km² 冰川，共 1191 条。上述两类面积等级冰川合计占冰川数量的 78.90%，总面积为 348.72 km²，占总面积的 21.20%。20.0–50.0 km² 等级冰川数量最少，仅 4 条，总面积 115.88 km²，占总面积的 7.04%，均分布于依连哈比尔尕山主峰区。就面积分布而言，0.1–0.5 km² 冰川总面积最大，为 286.31 km²，占冰川总面积的 17.40%。其次为 2.0–5.0 km² 冰川，总面积 276.03 km²（16.78%）。面积 < 0.1 km² 冰川总面积最小，为 63.57 km²，占冰川总面积的 3.97%。整体上，面积等级越大，冰川数量越少，但占总面积比例越大。面积 > 30 km² 的大型冰川仅 1 条（FCGI_ID: 5Y738C0052），位于依连哈比尔尕山主峰区，其冰川储量为 3.12 km³。总体上，研究区以小冰川（面积 < 0.5 km²）居多，小冰川数量占比较高，且主要集中在较小面积等级范围内。

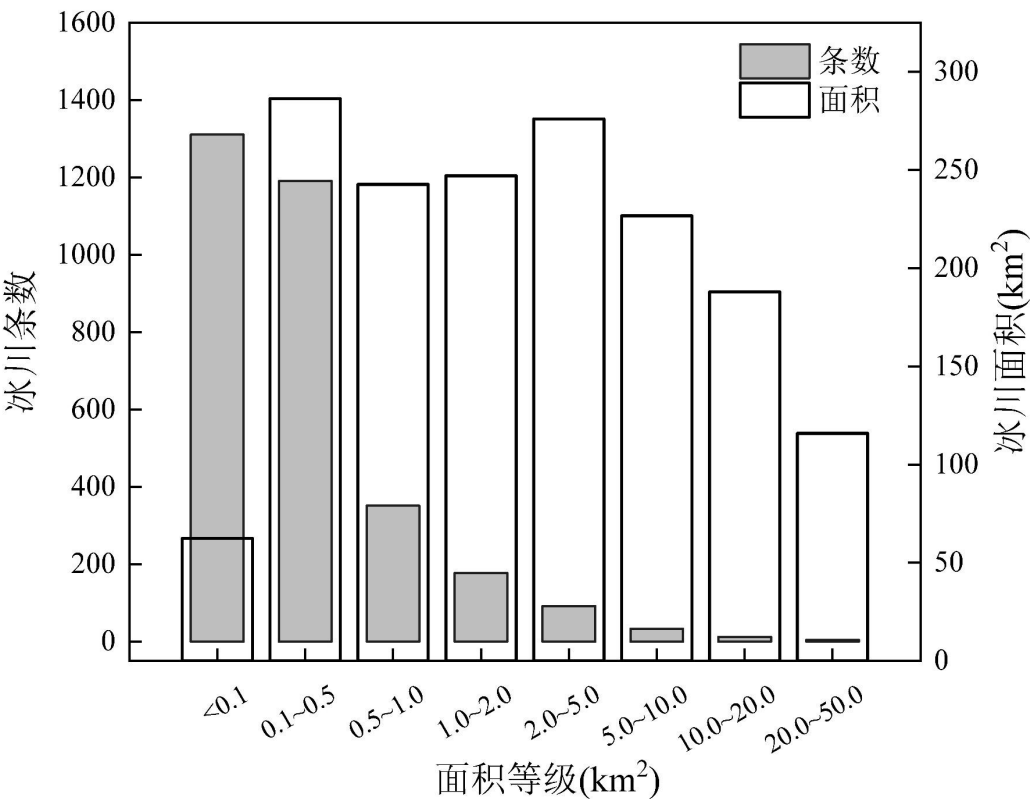


图 4-1 准噶尔盆地内流区不同面积等级下的冰川数量和面积

Figure 4-1 Glacier Number and Area in Different Area Classes in the Junggar Inland Basin

4.3 不同山脉冰川分布特征

基于 ArcGIS 平台对准噶尔盆地内流区内不同山脉的冰川分布进行统计，得到准噶尔盆地内流区内依连哈比尔尕山、婆罗科努山、科古琴山、别珍套山、阿拉套山、穆斯套岭、阿尔泰山、哈尔里克山、巴里坤山、博格达山和天格尔山的 2020 年冰川面积等相关信息，结果见表 4-1。

2020 年，准噶尔盆地内流区冰川主要分布于北天山和东天山地区。其中，依连哈比尔尕山是研究区冰川最为密集、总面积最大的山系（图 4-2）。该山系共发育冰川 1715 条，占冰川总数的 54.03%，总面积 1009.75 km²，占总面积的 61.36%，冰川储量 48.71 km³，为各山系中最高，占总储量的 66.03%。冰川主要集中于主峰及邻近高海拔地带，并沿主要山脊和上游源区向两侧山谷延展，类型以山谷冰川为主。

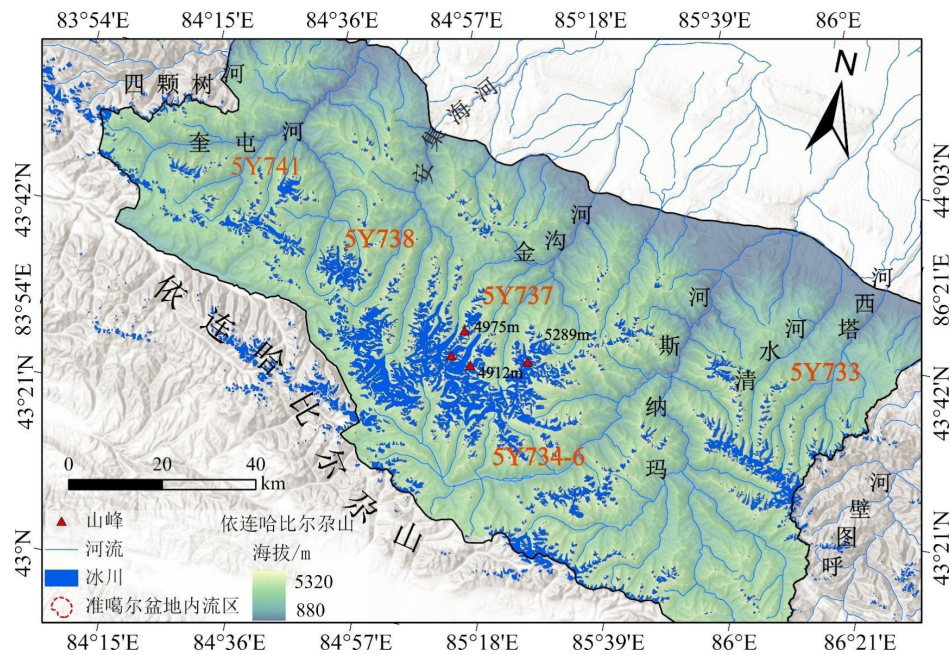


图 4-2 准噶尔盆地内流区依连哈比尔尕山 2020 年冰川分布特征

Figure 4-2 Glacier Distribution Characteristics of Eren Habirga Mountain in 2020 in the Junggar Inland Basin

表 4-1 准噶尔盆地内流区冰川不同山系分布情况

Table 4-1 Distribution of Glaciers in Different Mountain Ranges of the Junggar Inland Basin

山脉	主峰海拔 (m)	冰川条 数	冰川面积	冰川储量	冰川平均 面积	最大冰川面积
			km ²	km ³	km ²	km ²
依连哈比尔尕山	5289	1715	1009.75	48.71	0.59	35.19
婆罗科努山	4715	468	317.47	14.00	0.68	19.31
科古琴山	3616	13	2.39	0.06	0.18	0.68
别珍套山	4234	174	66.92	2.27	0.40	4.42
阿拉套山	4228	76	41.33	1.67	0.54	7.68
穆斯套岭	3825	2	0.57	0.02	0.29	0.52
阿尔泰山	4374	4	0.80	0.02	0.14	0.14
哈尔里克山	4888	48	43.98	1.79	0.92	4.63
巴里坤山	4338	33	7.98	0.24	0.24	2.08
博格达山	5445	148	57.30	2.39	0.39	8.63
天格尔山	4562	493	97.20	2.60	0.19	2.33
总计		3174	1645.69	73.77	-	-

除依连哈比尔尕山外，婆罗科努山和天格尔山也是研究区冰川较为集中的山系。婆罗科努山共发育冰川 468 条，总面积 317.47 km²，冰川储量 14.00 km³（图 4-3）。

冰川总体沿高海拔山脊带及其两侧源区呈带状分布，并在主要峰区附近形成局部集聚。天格尔山共发育冰川 493 条，总面积 97.20 km²，冰川储量 2.60 km³。该山系以小冰川为主，冰川分布相对分散，整体规模明显小于依连哈比尔尕山和婆罗科努山（图 4-4）。相比之下，阿尔泰山和穆斯套岭在研究区范围内的冰川数量较少，且均以小冰川为主。阿尔泰山共有冰川 4 条，总面积 0.80 km²。其中，仅有 1 条冰川汇入乌伦古河，面积为 0.14 km²。穆斯套岭在研究区内有 2 条冰川，总面积 0.57 km²，分别发育于主峰西侧并流向查干郭勒河，面积约为 0.05 km² 和 0.52 km²。

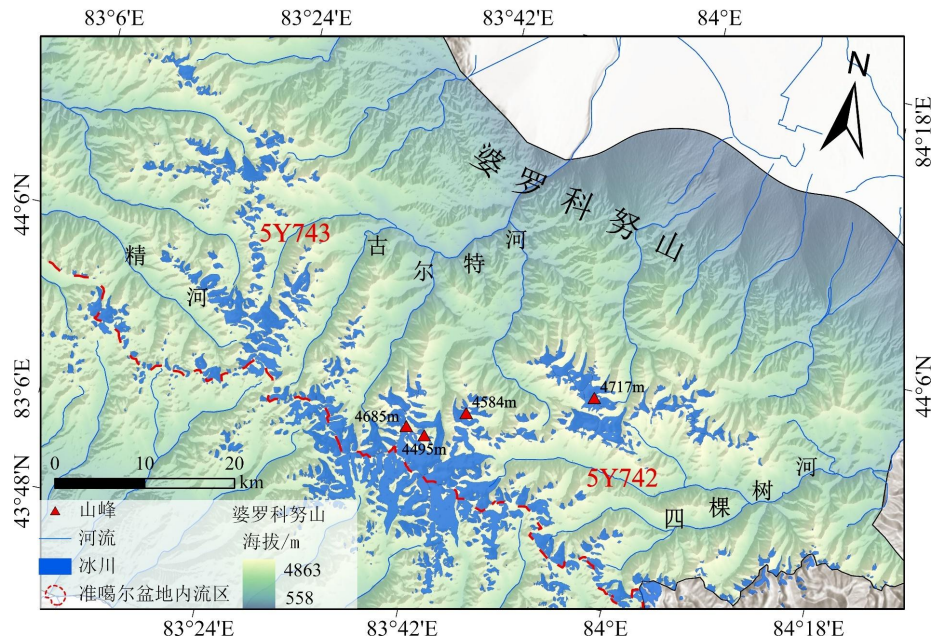


图 4-3 准噶尔盆地内流区婆罗科努山 2020 年冰川分布特征

Figure 4-3 Glacier Distribution Characteristics of Borohoro Mountain in 2020 in the Junggar Inland Basin

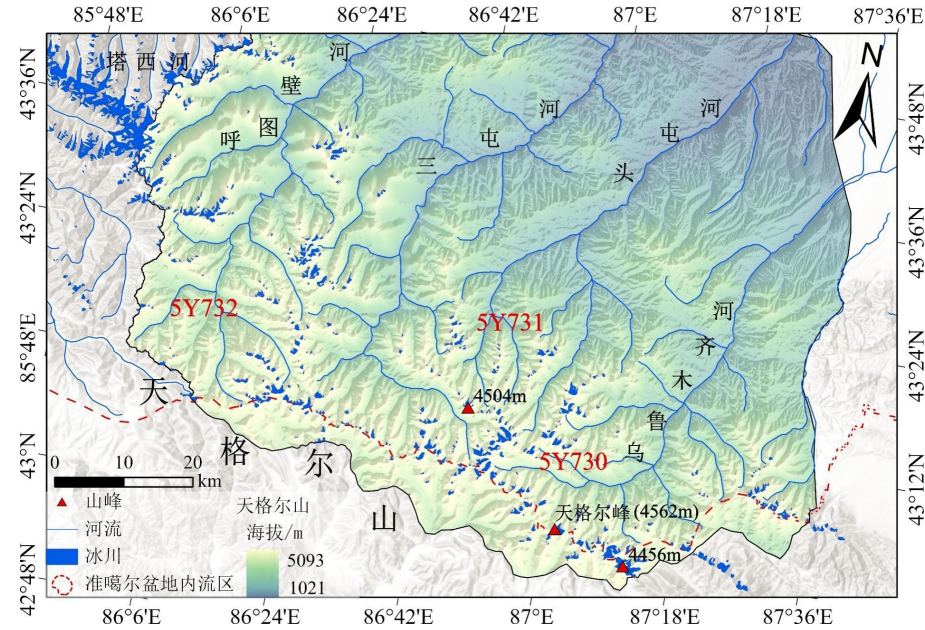


图 4-4 准噶尔盆地内流区天格尔山 2020 年冰川分布特征

Figure 4-4 Glacier Distribution Characteristics of Tengg'er Mountain in 2020 in the Junggar Inland Basin

博格达峰位于中国天山东段博格达山西端，海拔 5445 m，是准噶尔盆地内流区典型的山地冰川集中分布区之一（图 4-5）。由图 4-5 可知，峰区周边冰川分布较为集中，主要位于高海拔山脊及其两侧源区，且南北坡之间的分布差异较为明显。该区域集中了博格达山约 75% 的冰川面积，其中南坡冰川面积占峰区冰川总面积的 60%，冰川数量和面积均多于北坡。博格达峰地区现代冰川在北坡主要分布于三工河、四工河、甘河子沟和白杨河等河流源头，而南坡则主要分布在古班博格达河、黑沟和阿克苏河等河流上游源区（施雅风，2005）。其中，天山天池湖直接接受三工河冰川补给。到 2020 年，峰区共发育冰川 126 条，总面积为 81.58 km²，平均单条冰川面积为 0.65 km²。其中，分布于准噶尔盆地内流区的冰川有 54 条，面积 39.22 km²。分布于吐鲁番—哈密盆地的冰川有 72 条，面积 42.36 km²。

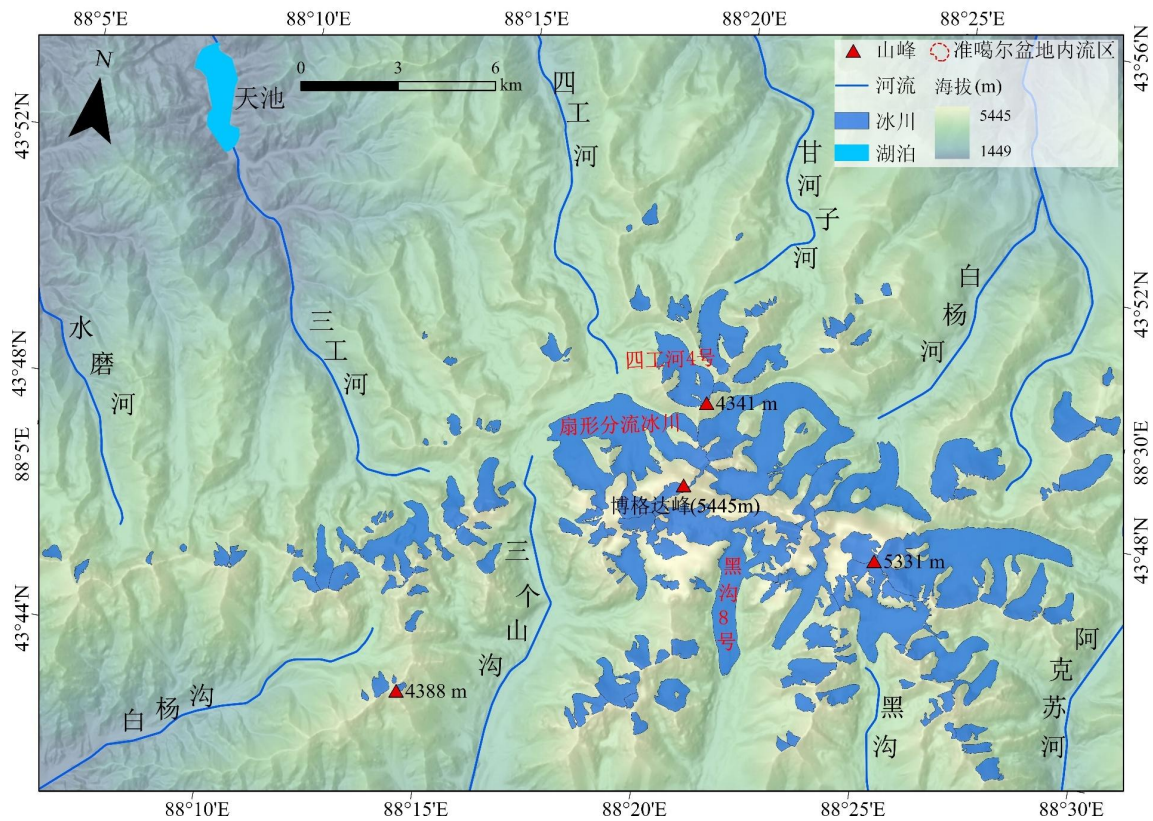


图 4-5 博格达峰地区 2020 年冰川分布情况

Figure 4-5 Glacier Distribution in the Bogda Peak Region in 2020

4.4 不同子流域冰川分布特征

依据中国第一次冰川编目，准噶尔盆地内流区划分为 6 个三级流域，即伊吾河（5Y71）、白杨河（5Y72）、玛纳斯河（5Y73）、艾比湖（5Y74）、和布克河（5Y75）和乌伦古河（5Y76）。同时，考虑到早期冰川目录已将科布多河（5Y12）相

关冰川一并纳入统计，本文亦将其纳入本研究的流域叙述范围。在三级流域划分基础上，研究区进一步细分为 23 个四级流域。GI-JIB2020 继承了上述流域分区体系，研究区冰川在各流域的分布统计结果见表 4-2。

表 4-2 准噶尔盆地内流区不同流域冰川分布

Table 4-2 Glacier Distribution in Different River Basins of the Junggar Inland Basin							
三级流域	四级流域	冰川数量		冰川面积		冰储量	
		条数	%	km ²	%	km ³	%
伊吾河(5Y71)	伊吾河 (5Y711)	48	1.51	43.98	2.67	1.79	2.42
	巴里坤湖 (5Y712)	33	1.04	7.98	0.48	0.24	0.33
	总计	81	2.55	51.96	3.16	2.03	2.75
白杨河(5Y72)	中葛根河(5Y723)	34	1.07	9.35	0.57	0.28	0.38
	白杨河等(5Y724)	56	1.77	8.33	0.51	0.22	0.30
	三工河等(5Y725)	58	1.83	39.62	2.41	1.89	2.56
	总计	148	4.67	57.30	3.48	2.39	3.24
	乌鲁木齐河(5Y730)	112	3.53	23.18	1.41	0.63	0.86
玛纳斯河等 (5Y73)	头屯河等(5Y731)	178	5.61	32.28	1.96	0.86	1.16
	呼图壁河(5Y732)	202	6.37	41.71	2.53	1.11	1.51
	塔西河(5Y733)	92	2.9	38.12	2.32	1.54	2.09
	玛纳斯河右岸(5Y734)	100	3.15	53.66	3.26	2.18	2.96
	玛纳斯河主源(5Y735)	338	10.66	144.88	8.80	5.89	7.98
	玛纳斯河左岸(5Y736)	402	12.68	270.15	16.42	13.36	18.12
	霍尔果斯河(5Y737)	260	8.2	190.57	11.58	10.29	13.95
	安集海河(5Y738)	243	7.66	171.29	10.41	9.81	13.30
	总计	1927	60.77	965.84	58.69	45.68	61.93
	奎屯河(5Y741)	281	8.86	141.11	8.57	5.63	7.64
艾比湖 (5Y74)	四棵树河(5Y742)	350	11.04	250.22	15.20	11.38	15.42
	精河(5Y743)	116	3.66	67.15	4.08	2.62	3.55
	大河沿子河(5Y744)	5	0.16	0.24	0.01	0.004	0.005
	赛里木湖(5Y745)	10	0.32	2.26	0.14	0.06	0.08
	博尔塔拉河(5Y746)	250	7.88	108.25	6.58	3.94	5.34
和布克河 (5Y75)	总计	1012	31.91	569.22	34.59	23.63	32.03
	和布克郭勒 (5Y754)	2	0.06	0.57	0.03	0.02	0.02
	乌伦古河 (5Y761)	1	0.03	0.14	0.01	0.003	0.004
科布多河 (5Y12)	科布多河 (5Y124)	3	0.09	0.66	0.04	0.02	0.02
总计		3174	100	1645.69	100	73.77	100

由表 4-2 可见，在三级流域尺度上，玛纳斯河流域（5Y73）冰川最为集中。该流域共有冰川 1927 条，占全区的 60.77%，冰川总面积为 965.84 km²，占 58.69%。冰储量为 45.68 km³，占 61.93%。从空间分布看（图 4-6），该流域冰川主要集中在南缘和西南部高海拔山区，并在部分上游源区呈连续分布。

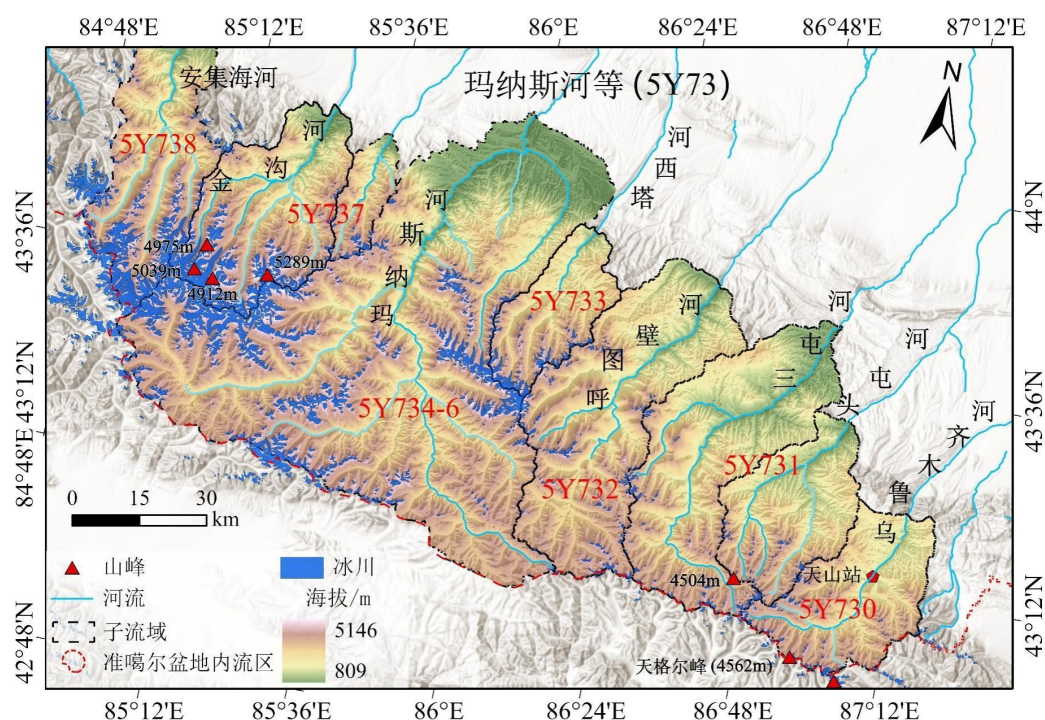


图 4-6 准噶尔盆地内流区玛纳斯河等（5Y73）流域 2020 年冰川分布特征

Figure 4-6 Glacier Distribution Characteristics of the Manas River Basin (5Y73) in 2020 in the Junggar Inland Basin

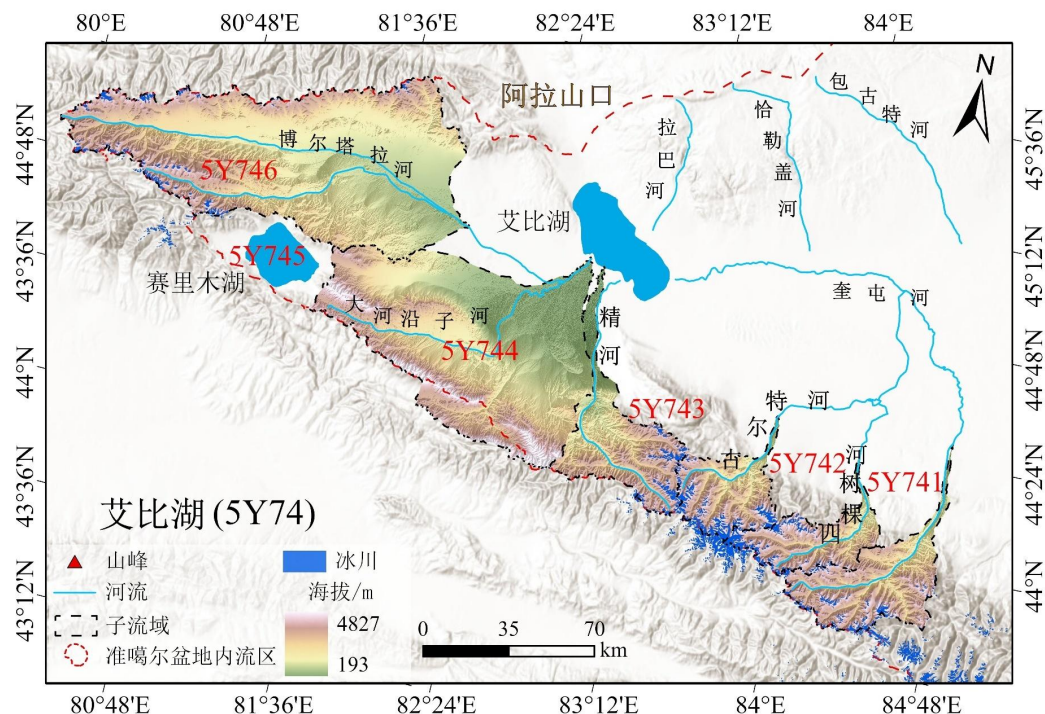


图 4-7 准噶尔盆地内流区艾比湖（5Y74）流域 2020 年冰川分布特征

Figure 4-7 Glacier Distribution Characteristics of the Ebinur Lake Basin (5Y74) in 2020 in the Junggar Inland Basin

艾比湖流域（5Y74）是研究区冰川分布最集中的流域之一，仅次于玛纳斯河流域。由表 4-2 可见，该流域共有冰川 1012 条，占全区 31.91%，冰川面积为 569.22 km²，占 34.59%，冰储量为 23.63 km³，占 32.03%。从空间分布看（图 4-7），冰川主要分布于流域南缘、东南部和西北部山地，平原区、艾比湖周边及北部低地基本不发育冰川。四级流域内部差异也较明显，其中四棵树河（5Y742）规模最大，共有冰川 350 条，冰川面积 250.22 km²，冰储量 11.38 km³，奎屯河（5Y741）次之，共有冰川 281 条，冰川面积 141.11 km²，冰储量 5.63 km³，博尔塔拉河（5Y746）和精河（5Y743）也分布有较多冰川，而大河沿子河（5Y744）和赛里木湖（5Y745）冰川发育较弱，数量和面积均较小。

除玛纳斯河流域（5Y73）和艾比湖流域（5Y74）外，其余三级流域冰川规模明显偏小。伊吾河流域（5Y71）共有冰川 81 条，冰川面积 51.96 km²，冰储量 2.03 km³，白杨河流域（5Y72）共有冰川 148 条，冰川面积 57.30 km²，冰储量 2.39 km³。和布克河流域（5Y75）、乌伦古河流域（5Y76）和科布多河流域（5Y12）冰川发育最弱，冰川数量分别仅有 2 条、1 条和 3 条，冰川面积分别为 0.57 km²、0.14 km² 和 0.66 km²，冰储量分别为 0.02 km³、0.003 km³ 和 0.02 km³。结合表 4-2 可以看出，这些流域冰川分布范围较小，且空间上较为分散。

在四级流域尺度上，冰川数量、面积和冰储量主要集中在少数子流域。由表 4-2 可见，玛纳斯河左岸（5Y736）规模最大，共有冰川 402 条，占全区 12.68%，冰川面积为 270.15 km²，占全区 16.42%，冰储量为 13.36 km³，占全区 18.12%。四棵树河（5Y742）次之，共有冰川 350 条，冰川面积 250.22 km²，冰储量 11.38 km³。霍尔果斯河（5Y737）和安集海河（5Y738）的冰川面积分别为 190.57 km² 和 171.29 km²，冰储量分别为 10.29 km³ 和 9.81 km³，在各子流域中也占较大比重。玛纳斯河主源（5Y735）共有冰川 338 条，冰川面积 144.88 km²，冰储量 5.89 km³，也较为突出。相比之下，乌鲁木齐河（5Y730）、头屯河等（5Y731）和呼图壁河（5Y732）虽然冰川数量较多，但冰川面积分别仅为 23.18 km²、32.28 km² 和 41.71 km²，说明这些子流域以小规模冰川为主。乌伦古河（5Y761）和和布克郭勒（5Y754）冰川规模最小，数量和面积均处于较低水平。

总体上，研究区冰川主要集中在玛纳斯河流域和艾比湖流域的上游子流域，尤其集中于南部和西南部高山源区，北部、西北部流域以及湖盆、平原和低海拔地区冰川发育较弱。

4.5 不同行政区冰川分布特征

为从资源管理和区域水安全的角度分析准噶尔盆地内流区冰川资源在行政区尺度上的分布差异，并为分区评估、重点区域识别和管理单元衔接提供基础资料，有必要在地级和县级行政区尺度上，对冰川数量、面积和冰储量进行统计和归纳。表 4-3 列出了研究区冰川在不同层级行政单元中的分布情况。由于部分冰川跨越行政边界，这类冰川在相关行政单元中分别统计，因此地级和县级行政区汇总结果可能存在重复计入。

表 4-3 准噶尔盆地内流区冰川不同行政区分布表

地级行政区	县级行政区	冰川数量	冰川面积	冰川储量
		条数	km ²	km ³
乌鲁木齐市	乌鲁木齐县	146	33.33	0.94
	达坂城区	37	36.57	1.78
	米东区	1	0.05	0.001
	总计	184	69.95	2.72
昌吉回族自治州	昌吉市	178	33.41	0.88
	呼图壁县	198	68.55	2.70
	玛纳斯县	293	140.69	5.89
	阜康市	56	39.45	1.89
	吉木萨尔县	45	7.40	0.21
	奇台县	45	10.25	0.30
	总计	815	299.75	11.85
巴音郭楞蒙古自治州	和静县	668	521.91	28.82
	尼勒克县	79	191.66	11.79
伊犁哈萨克自治州	霍尔果斯市	34	21.54	0.75
	伊宁县	3	0.14	0.002
	总计	116	213.34	12.55
博尔塔拉蒙古自治州	温泉县	246	105.27	3.83
	博乐市	26	14.12	0.52
	精河县	111	71.23	2.91
	总计	383	190.62	7.25
哈密市	伊州区	41	44.19	1.82
	伊吾县	48	43.98	1.79
	巴里坤哈萨克自治县	33	7.98	0.24
	总计	122	96.14	3.85
吐鲁番市	托克逊县	7	1.78	0.05
	高昌区	23	7.26	0.23
	总计	30	9.04	0.28

续表 4-4 准噶尔盆地内流区冰川不同行政区分布表

地级行政区	县级行政区	冰川数量	冰川面积	冰川储量
		条数	km ²	km ³
塔城地区	沙湾县	577	493.36	28.20
	乌苏市	672	436.91	19.34
	和布克赛尔蒙古自治县	2	0.57	0.02
	总计	1251	930.84	47.55
阿勒泰地区	青河县	1	0.14	0.003
	阿勒泰市	3	0.66	0.015
	总计	4	0.80	0.018

在地级行政区尺度上,冰川分布差异较为显著。塔城地区冰川数量最多,共有 1251 条,冰川面积为 930.84 km²,冰储量达 47.55 km³,各项指标均位居各地级行政区首位。巴音郭楞蒙古自治州居于第二,共分布冰川 668 条,冰川面积 521.91 km²,冰储量 28.82 km³。伊犁哈萨克自治州共有冰川 116 条,冰川面积 213.34 km²,冰储量 12.55 km³。博尔塔拉蒙古自治州分布冰川 383 条,冰川面积 190.62 km²,冰储量 7.25 km³。哈密市和吐鲁番市的冰川面积分别为 96.14 km²和 9.04 km²。相比之下,阿勒泰地区在研究区内仅分布 4 条冰川,冰川面积 0.80 km²,冰储量仅为 0.018 km³。

在县级行政区尺度上,各行政单元之间的冰川分布差异更为突出。乌苏市冰川数量最多,共有 672 条。和静县冰川面积最大,达 521.91 km²,冰储量为 28.82 km³。沙湾县冰川面积为 493.36 km²,冰储量 28.20 km³。温泉县共有冰川 246 条,冰川面积 105.27 km²,冰储量 3.83 km³。玛纳斯县分布冰川 293 条,冰川面积 140.69 km²,冰储量 5.89 km³。尼勒克县共有冰川 79 条,冰川面积 191.66 km²,冰储量 11.79 km³。青河县仅有 1 条冰川,冰川面积 0.14 km²,冰储量 0.003 km³。伊宁县和米东区的冰川数量也相对较少,分布范围较为有限。

在“乌昌石”天山北坡经济带相关城市中,乌鲁木齐市共有冰川 184 条,冰川面积为 69.95 km²,冰储量为 2.72 km³,主要分布在乌鲁木齐县和达坂城区。昌吉回族自治州共有冰川 815 条,冰川面积为 299.75 km²,冰储量为 11.85 km³,冰川主要分布在呼图壁县、玛纳斯县和阜康市。

4.6 不同地形因素冰川分布特征

为揭示准噶尔盆地内流区冰川的垂直分布特征,本文按 100 m 高程带对研究区冰川面积进行了分带统计(图 4-8)。结果显示,研究区冰川分布海拔为 2997~5321 m。从具体高程带看,研究区冰川面积主要集中在 3500~4500 m 之间,总面积为 1481.31 km²,占冰川总面积的 90%。其中,3900~4000 m 为冰川面积最高的高程带,面积为

197.18 km²，占总面积的 12%，是冰川分布最集中的海拔带。其邻近高程带冰川面积也相对较大，说明研究区冰川主体主要分布在这一高度范围附近。进一步统计表明，3800~4200 m 范围内冰川面积为 766.70 km²，占总面积的 46.59%，接近全区冰川总面积的一半。相比之下，高、低海拔两端冰川面积明显较小：低于 3400 m 的冰川面积仅为 14.71 km²，占总面积不足 1%，高于 4800 m 的冰川面积为 17.25 km²，约占总面积的 1%。总体上，研究区冰川面积在中高海拔带最为集中，而低海拔和高海拔区域冰川分布均较少。

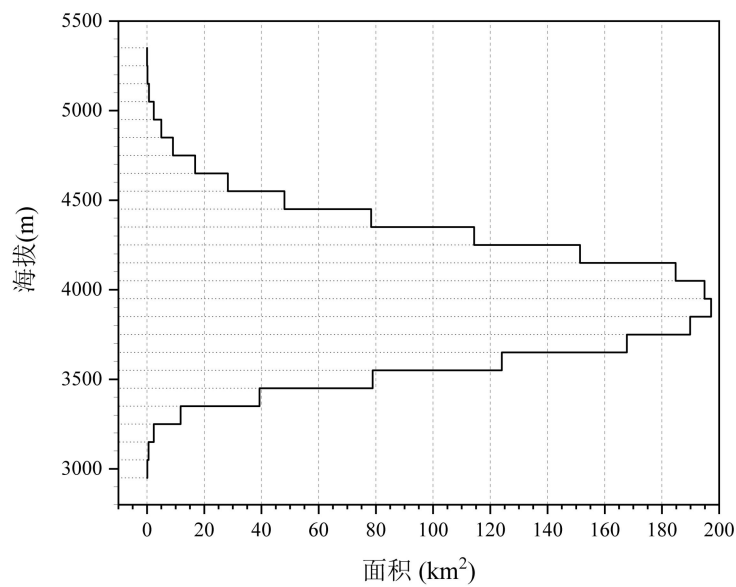


图 4-8 准噶尔盆地内流区不同海拔带冰川分布情况

Figure 4-8 Glacier Distribution in Different Elevation Bands of the Junggar Inland Basin

本研究将冰川朝向划分为北（N）、东北（NE）、东（E）、东南（SE）、南（S）、西南（SW）、西（W）和西北（NW）8 个方向，并分别统计各方向冰川的数量和面积。如图 4-9 所示，准噶尔盆地内流区冰川朝向分布差异明显，整体上以北（N）向、东北（NE）向和西北（NW）向冰川为主。其中，北（N）向冰川数量和面积最多，共有 1541 条，面积 812.56 km²，分别占全区冰川总数的 48.55%和总面积的 49.38%，其次是东北（NE）向冰川，共有 518 条，面积 351.88 km²，分别占 16.32%和 21.38%。西北（NW）向冰川数量较多，共有 571 条，面积 168.65 km²，分别占 17.99%和 10.25%。三者合计共有冰川 2630 条，面积 1333.09 km²，分别占全区冰川总数的 82.86%和总面积的 81.01%，表明研究区冰川主要集中分布于北向及其相邻方向。相比之下，东（E）向、西（W）向和南（S）向冰川分布较少。东（E）向冰川共有 129 条，面积 79.43 km²，分别占 4.06%和 4.83%。西（W）向冰川共有 142 条，面积 60.04 km²，分别占 4.47%和 3.65%。南（S）向冰川共有 108 条，面积 100.93 km²，分别占 3.40%和 6.13%。西南（SW）向冰川最少，仅有 86 条，面积 33.37 km²。

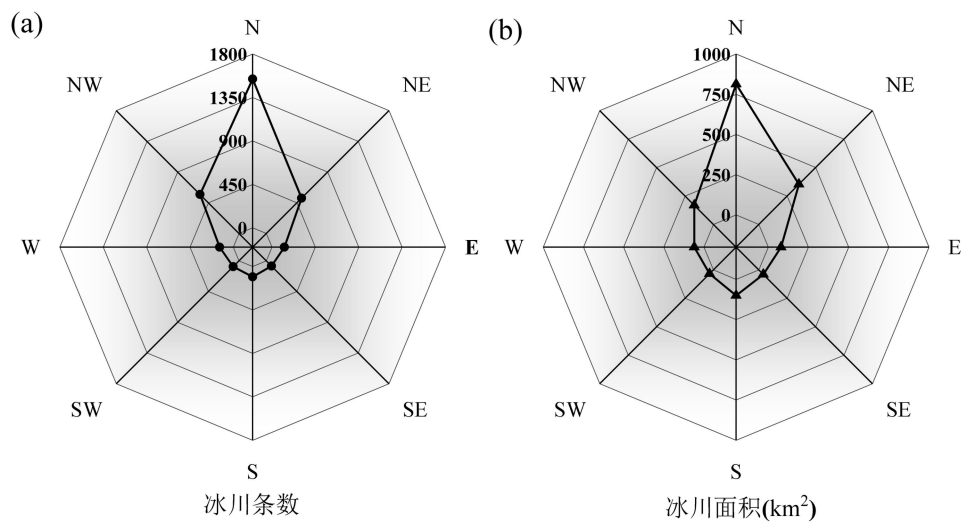


图 4-9 准噶尔盆地内流区不同朝向冰川数量 (a) 和面积 (b) 分布情况

Figure 4-9 Glacier Number and Area in Different Orientations in the Junggar Inland Basin

4.7 冰川分布特征分析

准噶尔盆地内流区冰川分布并不均匀，而是明显集中在北天山中部。这一空间格局首先与山系高度及地形条件密切相关。冰川发育需要足够的高程条件，以维持低温环境和固态降水积累，因此高大山系通常更有利于冰川形成和保存（Bolch, 2007；Su et al., 2022）。研究区内，依连哈比尔尕山的冰川数量和面积均居首位，表明高海拔主峰区及其邻近较宽阔的山脊地带更适宜冰川发育。相比之下，阿尔泰山、穆斯套岭等区域冰川数量较少、面积较小，说明当山系海拔、峰区范围或适宜冰川发育的地形条件不足时，冰川分布会明显减弱。总体来看，山系高度和地形条件在很大程度上限定了研究区冰川发育的空间范围。

除地形条件外，区域水汽补给也是影响冰川分布格局的重要因素。研究区冰川主要集中在玛纳斯河流域、艾比湖流域等周缘山地源区，这与西风水汽输入及迎风坡降水补给密切相关（Sorg et al., 2012；Unger-Shayesteh et al., 2013）。西风气流进入盆地西部和西北部后，在高山迎风坡抬升冷却，更易形成降雪和积雪积累，从而为冰川维持提供必要的水分来源。依连哈比尔尕山、婆罗科努山等山系冰川分布较为集中，不仅与峰区高程条件较好有关，也与这些区域更容易获得西风水汽补给有关。相较之下，一些边缘山地和小流域冰川数量较少、规模较小，说明在地形高度不足或水汽补给较弱的条件下，冰川难以形成大范围集中分布。因此，研究区冰川分布格局并非单纯由高程决定，而是山系高度与区域水汽条件共同作用的结果。

从冰川面积组成来看，研究区以中小冰川为主。面积小于 0.5 km^2 的冰川数量占总数的 78.90%，说明小面积冰川在研究区占比较高。已有研究指出，中小冰川通常数

量较多,对气候变化响应更为迅速,也更容易发生破碎化和面积缩减(Radić and Hock, 2010; 刘时银等, 2015; Su et al., 2022)。研究区内,大量小冰川主要分布在峰脊两侧、支谷源头和局部高海拔低凹地带,这些部位虽然有利于冰川形成,但单体规模通常较小,因此整体上表现为冰川数量较多、单条面积较小、分布相对分散。与此同时,依连哈比尔尕山主峰区仍发育有少量面积较大的山谷冰川,说明在高程更高、地形条件更完整、水分补给更有利的区域,冰川仍可发育为规模较大的连续冰体。

坡向条件同样会对冰川分布产生明显影响。研究区冰川主要分布在北向、东北向和西北向坡面,说明偏北坡面更有利于冰川发育和保存。偏北坡面多为阴坡,接受太阳直接辐射较少,地表受热较弱,消融期能量条件相对不足。同时,这类坡面上的积雪保存时间通常更长,更有利于冰川长期维持(DeBeer and Sharp, 2009; Olson and Rupper, 2019)。相比之下,南向、东南向和西南向坡面接受辐射更多,消融作用更强,因此冰川数量和面积均相对较少。此外,研究区东西向冰川分布较少,还与山谷走向有关。天山北坡和东天山地区的山谷多呈南北走向,而东西朝向的冰川与山谷走向大致垂直。在这种地形条件下,冰川发育空间受到一定限制,不利于其大规模扩展和积累,因此东西向冰川在数量和面积上都相对较小。

4.8 本章小结

本章基于 GI-JIB2020 数据集,从面积等级、山系一流域一行政区及海拔、坡向等多个层面,系统分析了准噶尔盆地内流区冰川的空间分布特征。结果表明,2020 年研究区共有冰川 3174 条,总面积 1645.69 km²,总储量 73.77 km³,整体呈现出数量多而单体规模小的特征,小冰川占明显优势。冰川空间分布极不均匀,主要集中于北天山和东天山高山地区,以依连哈比尔尕山最为集中。在流域尺度上,玛纳斯河流域和艾比湖流域集中了研究区大部分冰川,而北部、西北部边缘流域以及湖盆和平原区冰川发育较弱。不同层级行政单元之间的冰川资源分布也存在明显差异,反映出冰川资源在区域空间上的高度集聚性。

从地形分布看,研究区冰川主要集中在 3500~4500 m 中高海拔带,3900~4000 m 为分布最集中的高程带,坡向上以北向、东北向和西北向冰川为主,东西向和南向冰川相对较少。总体来看,准噶尔盆地内流区冰川分布格局并非由单一因素决定,而是山系高度、地形条件、区域水汽补给以及坡向辐射差异共同作用的结果。高大山系及其高海拔源区为冰川发育提供了基本地形基础,西风水汽输入增强了周缘山地的积雪补给,而偏北坡面较弱的受热条件和较长的积雪保存时间,则进一步促进了冰川的形成与保存。

第 5 章 1960—2020 年准噶尔盆地内流区冰川变化

5.1 准噶尔盆地内流区冰川总体变化

根据原始编目对比、修订编目对比和编码匹配三种方法，可得到三期冰川总面积及年均退缩率（表 5-1）。原始编目中 1960 年总面积为 2584.42 km²，显著高于修订结果，1960—2020 年均退缩率为 0.61%/a，其中 1960—2007 年和 2007—2020 年的年均退缩率分别为 0.69%/a 和 0.44%/a，退缩率较高的原因在于 CGI-1 采用的影像分辨率较低，季节性积雪与裸岩难以有效区分，冰川边界被高估。同时，数字化过程中存在坐标系偏移等系统误差，部分区域的冰川边界被拉伸，进一步放大了面积（姚晓军等，2012；Sun et al., 2018）。

表 5-1 三种冰川变化计算方法结果展示表
Table 5-1 Results of the Three Glacier Change Calculation Methods

时间	原始编目	修订编目	编码匹	时段	原始编目	修订编目	编码匹
	对比法	对比法	配法		对比法	对比法	配法
	面积(km ²)				年均退缩率(%/a)		
1960	2584.42	2343.03	2343.03	1960—2007	0.69	0.53	0.54
2007	1744.60	1760.01	1747.01	2007—2020	0.44	0.50	0.49
2020	1645.69	1645.69	1635.39	1960—2020	0.61	0.50	0.50

基于修订后的编目数据对比结果，1960—2020 年研究区冰川面积年均退缩率为 0.50%/a。其中，1960—2007 年年均退缩率为 0.53%/a，2007—2020 年为 0.50%/a。

编码匹配法研究显示，在 CGI-1 的 3412 条（总面积 2343.03 km²，占原始总面积的 91%）冰川中，有 2606 条冰川（融合处理后条数）在 CGI-2 中匹配成功，此时冰川总面积减少为 1747.01 km²，未匹配的 804 条冰川中，有 654 条（面积 83.94 km²）已完全消融。而这 2606 条冰川从 CGI-2 到 GI-JIB2020 匹配成功的冰川共有 2349 条（融合处理后条数），此时冰川总面积减少为 1635.39 km²，有 262 条冰川未能匹配，研究发现，这其中有 224 条冰川已消融殆尽（面积 12.01 km²）。需要说明的是，2020 年研究区冰川现状总面积为 1645.69 km²，对应 GI-JIB2020 全区编目结果。用于 1960—2020 年跨期比较的编码匹配结果，其统计对象为三期均建立对应关系的冰川集合，2020 年总面积为 1635.39 km²。前者用于表征研究区冰川现状，后者用于保证长期变化分析的跨期可比性。最终，利用冰川编码匹配法得到的 1960—2020 年均退缩率为 0.50%/a，其中

1960–2007年和2007–2020年的年均退缩率分别为0.54%/a和0.49%/a，这一结果与修订编目数据对比法得到的结果相比，退缩率略有增加，这是因为排除了CGI-2和GI-JIB2020中在CGI-1中未被识别的新增小冰川的影响，使其结果更为可靠。因此本研究以编码匹配法得到的数据来分析准噶尔盆地内流区冰川变化。

从阶段变化看，1960–2007年的年均退缩率略高于2007–2020年（表5-1）。这与两个方面有关。一个是小冰川在前一阶段消失得更多。1960–2007年消融消失的小冰川有654条，2007–2020年为224条。在用相对退缩率表示时，小冰川消失会使阶段退缩率表现得更高。另一个是冰川退缩多从末端开始。随着冰川末端不断上移，退缩过程会逐步发生变化，退缩速率也可能在不同时段有所下降（Furbish and Andrews, 1984; Huss et al., 2012; De Angelis, 2014）。

5.2 不同面积等级冰川变化特征

为分析准噶尔盆地内流区不同面积等级冰川的变化特征，本文统计了1960年、2007年和2020年各面积等级冰川数量与面积的变化（图5-1），并结合单条冰川初始面积与面积变化之间的关系（图5-2），讨论不同规模冰川的退缩差异。

研究区冰川数量总体以小冰川为主，其中0.1–0.5 km²等级始终占据优势。该等级冰川由1960年的1687条减少至2007年的1082条，并在2020年进一步减至972条，始终是各面积等级中数量最多的一类。与此同时，0.5–1.0 km²、1.0–2.0 km²和2.0–5.0 km²等级冰川数量也持续减少，说明中小型冰川是研究区数量变化最明显的部分。相比之下，面积大于5 km²的冰川数量较少，变化相对有限。值得注意的是，面积小于0.1 km²的冰川变化趋势有所不同，其数量在1960–2007年间由725条增加至829条，至2020年又回落至729条，这一情况与较大冰川在退缩过程中发生分裂，以及部分较高面积等级冰川缩减后转入该等级有关。

冰川面积退缩也主要集中在中小冰川范围内。1960–2020年间，0.1–0.5 km²等级冰川面积减少159.00 km²，为各面积等级中最多。0.5–1.0 km²和2.0–5.0 km²等级分别减少151.42 km²和151.23 km²，1.0–2.0 km²等级减少116.09 km²，说明研究区冰川总面积的缩减主要发生在0.1–5.0 km²范围内。相比之下，面积小于0.1 km²的冰川虽然数量较多，但由于面积基数较小，60年间仅减少7.80 km²。面积大于10 km²的冰川较为稳定，变化较小。

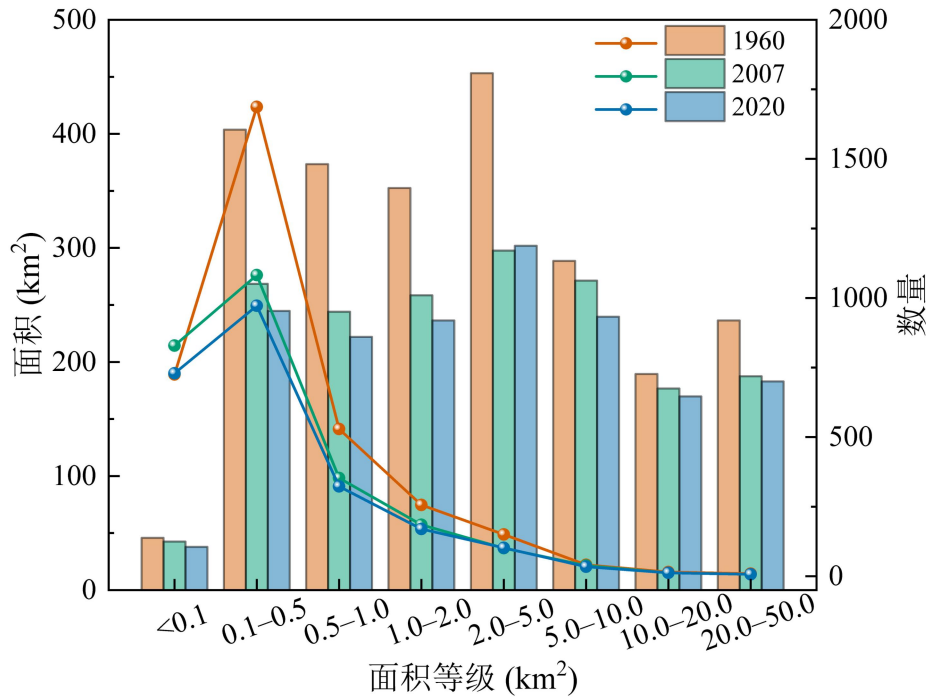


图 5-1 准噶尔盆地内流区不同面积等级冰川变化图

Figure 5-1 Glacier Changes in Different Area Classes in the Junggar Inland Basin

图 5-2 展示了单条冰川面积的绝对变化和相对变化特征。面积小于 1 km^2 的冰川共有 2941 条，平均绝对减少 0.13 km^2 ，平均相对缩减 56.38% ，其中 878 条已完全消失。面积为 $1\text{--}5\text{ km}^2$ 的冰川共有 406 条，平均减少 0.48 km^2 ，平均相对缩减 25.54% 。面积大于 5 km^2 的冰川共有 61 条，平均减少 0.95 km^2 ，平均相对缩减 9.73% 。从散点分布看，初始面积较小的冰川，相对退缩幅度更大，接近完全消失的样本也更多。初始面积较大的冰川，绝对面积减少量更大，而相对变化幅度较小。总体上，冰川面积越小，相对退缩越明显，冰川面积越大，绝对面积损失越大。

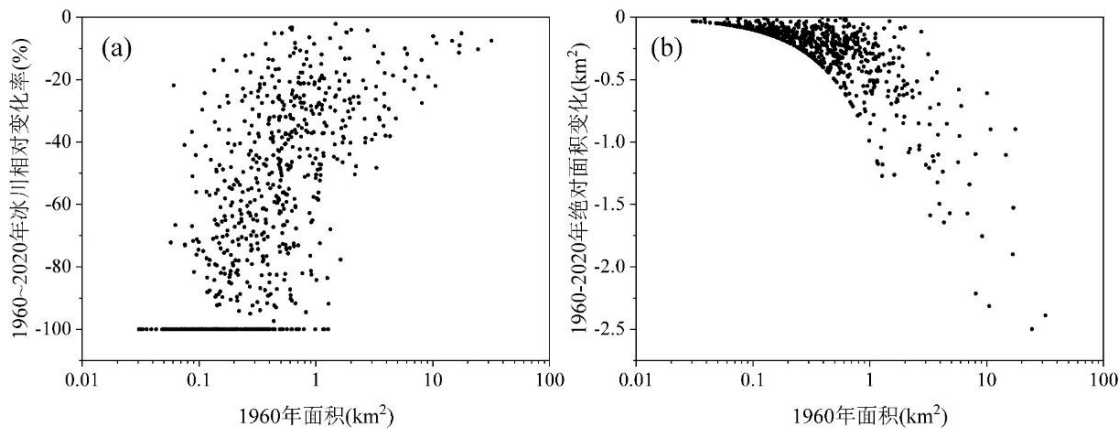


图 5-2 准噶尔盆地内流区单条冰川面积变化与初始面积的关系散点图：（a）相对面积变化率（%）与 1960 年面积（ km^2 ）；（b）绝对面积变化量（ km^2 ）与 1960 年面积（ km^2 ）

Figure 5-2 Scatterplots of the Relationship Between Glacier Area Change and Initial Area for Individual Glaciers in the Junggar Inland Basin: (a) Relative Area Change Rate (%) versus Area in 1960 (km^2); (b) Absolute Area Change (km^2) versus Area in 1960 (km^2)

5.3 不同山脉冰川变化特征

表 5-2 显示，1960—2020 年准噶尔盆地内流区各山脉冰川面积均持续减少，不同山脉之间的面积减少量和退缩幅度存在明显差异。

依连哈比尔尕山的冰川面积减少最多，1960—2020 年累计减少 360.56 km²，相对退缩 26.44%，年均退缩率为 0.44%/a。该山脉冰川分布较多，是研究区冰川面积减少最集中的山脉。婆罗科努山和天格尔山的面积减少量也较大，分别减少 120.81 km² 和 96.62 km²，相对退缩分别为 27.67%和 50.10%，年均退缩率分别为 0.46%/a 和 0.84%/a。博格达山面积减少 48.57 km²，相对退缩 45.93%，年均退缩率为 0.77%/a。别珍套山、阿拉套山、哈尔里克山和巴里坤山的面积减少量相对较小，1960—2020 年分别减少 29.80 km²、21.49 km²、12.85 km² 和 8.69 km²，但这些山脉的相对退缩幅度并不低。巴里坤山相对退缩 52.14%，年均退缩率为 0.87%/a，高于依连哈比尔尕山等冰川面积较大的山脉。表明一些冰川较少的山脉，虽然总面积减少量不大，但退缩幅度反而更高。在冰川分布较少的山脉中，科古琴山、穆斯套岭和阿尔泰山 1960 年的冰川面积都较小，三者合计仅 11.99 km²。1960—2020 年间，这 3 个山脉的冰川面积分别减少 4.62 km²、1.18 km² 和 2.45 km²，相对退缩分别为 65.84%、67.44%和 75.42%，年均退缩率分别为 1.10%/a、1.12%/a 和 1.26%/a。

表 5-2 准噶尔盆地内流区各山脉冰川变化

Table 5-2 Glacier Changes in Different Mountain Ranges of the Junggar Inland Basin

山脉	冰川退缩面积 (km ²)			冰川面积退缩率 (%)			年均退缩率 (%/a)		
	1960— 2007	2007— 2020	1960— 2020	1960— 2007	2007— 2020	1960— 2020	1960— 2007	2007— 2020	1960— 2020
依连哈比尔尕山	308.77	51.79	360.56	22.65	4.91	26.44	0.48	0.38	0.44
婆罗科努山	100.31	20.50	120.81	22.97	6.09	27.67	0.49	0.47	0.46
科古琴山	4.56	0.05	4.62	65.08	2.17	65.84	1.38	0.17	1.10
别珍套山	27.46	2.34	29.80	28.57	3.41	31.00	0.61	0.26	0.52
阿拉套山	18.35	3.14	21.49	29.28	7.09	34.29	0.62	0.55	0.57
穆斯套岭	1.09	0.09	1.18	62.56	13.02	67.44	1.33	1.00	1.12
阿尔泰山	2.21	0.24	2.45	68.01	23.18	75.42	1.45	1.78	1.26
哈尔里克山	10.96	1.90	12.85	19.30	4.14	22.63	0.41	0.32	0.38
巴里坤山	6.75	1.94	8.69	40.49	19.59	52.14	0.86	1.51	0.87
博格达山	37.93	10.64	48.57	35.87	15.69	45.93	0.76	1.21	0.77
天格尔山	77.64	18.98	96.62	0.26	16.48	50.10	0.86	1.27	0.84

5.4 不同子流域冰川变化特征

为揭示准噶尔盆地内流区冰川退缩在流域尺度上的差异，本研究在三级流域尺度上统计了 1960—2007 年、2007—2020 年和 1960—2020 年 3 个时段的冰川面积变化（表 5-3）。

表 5-3 准噶尔盆地内流区各三级流域冰川变化

Table 5-3 Glacier Changes in the Third-Level River Basins of the Junggar Inland Basin

三级流域	冰川退缩面积（km ² ）			冰川面积退缩率（%）			年均退缩率（%/a）		
	1960— 2007	2007— 2020	1960— 2020	1960— 2007	2007— 2020	1960— 2020	1960— 2007	2007— 2020	1960— 2020
伊吾河（5Y71）	17.71	3.84	21.54	24.11	6.89	29.33	0.51	0.53	0.49
白杨河（5Y72）	33.66	10.64	44.30	33.17	15.69	43.65	0.71	1.21	0.73
玛纳斯河等 （5Y73）	314.78	61.94	376.72	23.53	6.06	28.17	0.50	0.47	0.47
艾比湖（5Y74）	222.31	34.87	257.18	27.07	5.82	31.31	0.58	0.45	0.52
和布克河 （5Y75）	1.09	0.09	1.18	62.56	13.02	67.44	1.33	1.00	1.12
乌伦古河 （5Y76）	0.34	0.07	0.41	61.38	34.72	74.79	1.31	2.67	1.25
科布多河 （5Y12）	1.87	0.17	2.03	69.37	20.19	75.55	1.48	1.55	1.26

从面积变化看，玛纳斯河等流域（5Y73）和艾比湖流域（5Y74）是研究区冰川面积减少最集中的两个流域。1960—2020 年，玛纳斯河等流域（5Y73）冰川面积减少 376.72 km²，相对退缩 28.17%，年均退缩率为 0.47%/a，艾比湖流域（5Y74）冰川面积减少 257.18 km²，相对退缩 31.31%，年均退缩率为 0.52%/a。这两个流域冰川分布集中、面积基数较大，因此面积减少量也最为显著。分阶段看，玛纳斯河等流域（5Y73）在 1960—2007 年和 2007—2020 年的年均退缩率分别为 0.50%/a 和 0.47%/a，艾比湖流域（5Y74）分别为 0.58%/a 和 0.45%/a，说明两个流域在前后两个阶段均表现为持续退缩，且 2007 年以后退缩速率略有减缓。

伊吾河流域（5Y71）和白杨河流域（5Y72）的冰川面积相对较小，但退缩幅度并不低。1960—2020 年，伊吾河流域（5Y71）冰川面积减少 21.54 km²，相对退缩 29.33%，年均退缩率为 0.49%/a，白杨河流域（5Y72）冰川面积减少 44.30 km²，相对退缩 43.65%，年均退缩率为 0.73%/a。两者的阶段变化存在一定差异，伊吾河流域（5Y71）

在1960–2007年和2007–2020年的年均退缩率分别为0.51%/a和0.53%/a。而白杨河流域（5Y72）在2007–2020年的年均退缩率达到1.21%/a，明显高于1960–2007年的0.71%/a，表明该流域近一阶段退缩有所加快。

研究区北部和边缘地区的和布克河流域（5Y75）、乌伦古河流域（5Y76）和科布多河流域（5Y12）冰川数量较少、面积较小，绝对面积减少量并不大，但相对退缩最为强烈。1960–2020年，和布克河流域（5Y75）、乌伦古河流域（5Y76）和科布多河流域（5Y12）冰川面积分别减少1.18 km²、0.41 km²和2.03 km²，对应的相对退缩幅度分别达到67.44%、74.79%和75.55%，年均退缩率分别为1.12%/a、1.25%/a和1.26%/a，均明显高于研究区主要冰川集中流域。其中，乌伦古河流域（5Y76）在2007–2020年的年均退缩率达到2.67%/a，为各流域中最高，显示出近年快速萎缩的特征。上述结果说明，边缘小流域虽然冰川面积有限，但由于冰川规模普遍较小、系统稳定性较弱，对气候变化的响应更为敏感，因此相对退缩更加明显。

5.5 不同地形因素冰川变化特征

图5-3展示了1960年、2007年和2020年3个时期准噶尔盆地内流区不同海拔带冰川面积的分布与变化。

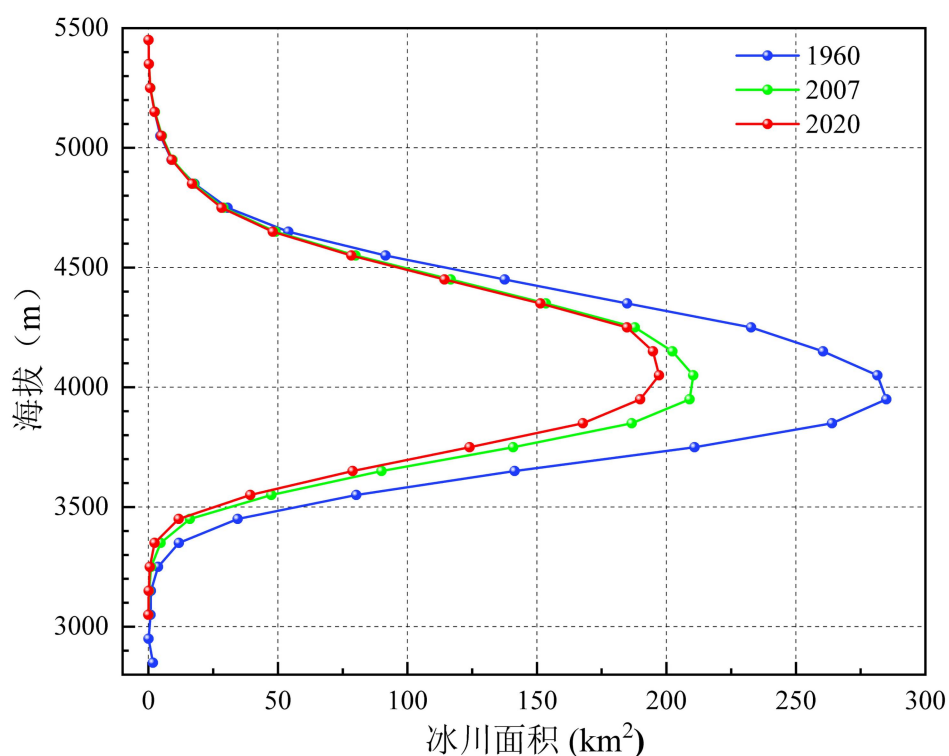


图5-3 准噶尔盆地内流区不同海拔冰川变化图

Figure 5-3 Glacier Changes in Different Elevation Bands in the Junggar Inland Basin

在低海拔区域,冰川面积缩减最为明显。到2020年,3000 m以下冰川已基本消失,3100 m以下冰川面积也由3.57 km²减至0.12 km²,说明低海拔边缘带冰川已接近消失。3400~3900 m是冰川面积减少最明显的海拔带,冰川面积由981.39 km²减至599.82 km²,累计减少381.57 km²。该海拔带对应多数冰川末端及主要消融区的分布范围,因此面积缩减最为显著。相比之下,4500 m以上冰川面积变化幅度明显减小,1960–2020年仅减少8.99 km²。5000 m以上高海拔区域冰川面积总体保持稳定,未发生显著变化。

图5-4展示了准噶尔盆地内流区不同朝向冰川的变化情况。总体上,1960–2020年各朝向冰川的数量和面积均呈减少趋势,但不同朝向之间的变化幅度存在明显差异。北向(N)冰川数量始终最多,且减幅相对最小,由1960年的1396条减少至2020年的1224条,东南向(SE)、西南向(SW)、东向(E)和南向(S)冰川数量下降则更为明显。冰川面积变化也表现出相似特征,北向(N)和东北向(NE)冰川面积减少最为显著,1960–2020年分别减少206.37 km²和204.57 km²,而西南向(SW)冰川面积减少最少,仅减少39.63 km²。不同朝向冰川的退缩强度也不相同,西南向(SW)冰川年均退缩率最高,为0.96%/a,东南向(SE)和西向(W)次之,分别为0.79%/a和0.72%/a,北向(N)最低,仅为0.34%/a。综合来看,偏北朝向冰川面积减少量较大,但退缩速率相对较低,偏南和偏西朝向冰川相对退缩更为明显。

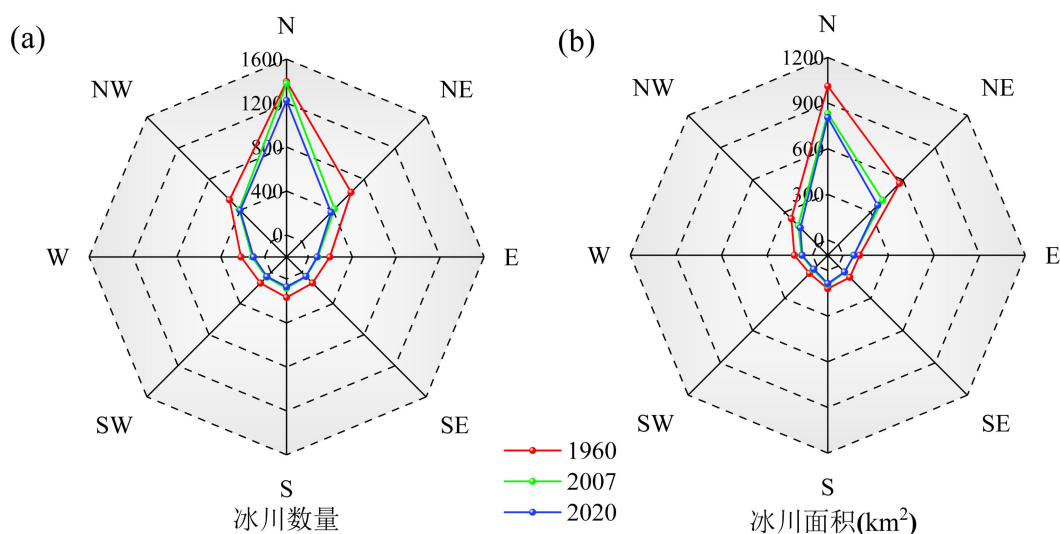


图 5-4 准噶尔盆地内流区不同朝向冰川数量 (a) 和面积变化 (b)

Figure 5-4 Changes in Glacier Number and Area in Different Orientations in the Junggar Inland Basin

5.6 冰川变化空间特征分析

准噶尔盆地内流区冰川在1960–2020年持续退缩,但不同冰川的退缩强度并不一致。这种差异不是由单一因素决定的,而是冰川规模、空间位置和地形条件共同作用的结果(刘时银等,2015; Su et al., 2022)。

从整体上看,研究区冰川退缩具有明显的空间差异。冰川集中分布的山脉和流域,面积减少通常更大,而中小冰川较多、位置偏边缘的区域,退缩往往更明显。这种差异首先与冰川规模有关。研究区内 $0.1\text{--}0.5\text{ km}^2$ 等级冰川长期占数量优势,同时又是面积减少最明显的部分,说明中小冰川是研究区冰川变化最活跃的部分。小冰川原始面积和冰储量较小,一旦面积缩减,更容易表现出较大的相对变化,甚至完全消失(孙美平等, 2015; Chand and Sharma, 2015)。相比之下,大冰川虽然相对退缩率较低,但由于冰体较厚、冰舌较长,末端往往延伸至更低海拔地带,在持续增温背景下更易受到强消融影响,因此绝对面积损失通常更大(DeBeer and Sharp, 2009; 邢武成等, 2017)。

这种差异在山脉和流域尺度上表现得更为明显。依连哈比尔尕山、婆罗科努山、天格尔山和博格达山,以及玛纳斯河流域、艾比湖流域等地区,冰川数量多、总面积大,因此累计减少面积也更为突出,是研究区冰川退缩的主要贡献区域。相比之下,科古琴山、穆斯套岭、阿尔泰山、巴里坤山,以及和布克河、乌伦古河、科布多河等边缘山地和小流域,虽然累计减少面积不大,但退缩比例更高。这说明,冰川集中区更容易表现为面积损失大,而边缘地区由于中小冰川占比较高,冰川系统更为脆弱,更容易发生快速萎缩。

海拔条件进一步限定了冰川退缩的主要发生范围。研究区冰川面积减少主要集中在 4500 m 以下,尤其是 $3400\text{--}3900\text{ m}$ 高度带。这一带正是大量冰川末端和主要消融区所在位置,因此面积缩减最为明显。 3000 m 以下冰川已基本消失,说明低海拔边缘冰川最先退出, 4500 m 以上变化明显减弱, 5000 m 以上基本无显著变化,说明高海拔地区仍是研究区冰川相对稳定的部分。结合不同面积等级冰川变化可以看出,大冰川虽然减少面积更大,但这种减少往往先出现在其低海拔末端。许多小冰川分布海拔不一定很低,但因面积本身较小,在退缩过程中更容易表现出较高的相对变化。因此,海拔条件不仅影响冰川退缩优先发生的位置,也影响不同类型冰川的退缩方式(Furbish and Andrews, 1984; DeBeer and Sharp, 2009)。

不同朝向冰川的变化也有明显差别。这种差别与不同坡面的辐射条件、热量状况、水分条件和局地地形环境密切相关。北向(N)、东北向(NE)和西北向(NW)冰川数量较多,面积较大,数量减幅也相对较小,说明偏北坡面更有利于冰川保存。其原因在于偏北坡面多为阴坡,接受太阳直接辐射较少,地表受热较弱,消融期的能量条件相对不足。同时,在区域气候背景下,偏北坡面通常具有更好的冷储条件,积雪保存时间较长,有利于冰川维持相对稳定状态(DeBeer and Sharp, 2009; Olson and Rupper, 2019)。相比之下,南向(S)、东南向(SE)和西向(W)坡面上的冰川,数量和面积减少更明显,表明偏南和偏西坡面冰川退缩更强。这类坡面接受太阳辐射更多,消融季受热更强,冰川表面融化加快。在持续增温背景下,其对气温变化的响

应也更直接,因此更容易出现面积缩减(孙美平等, 2015; Olson and Rupper, 2019)。部分西南向(SW)冰川变化也较明显,但这一方向上的退缩并不完全由坡向决定,还与冰川规模、发育海拔和局地地形条件有关(DeBeer and Sharp, 2009)。若冰川分布在较高海拔,或受到山体遮蔽,退缩幅度可能较小。若分布在开阔坡面,并直接暴露在较强辐射条件下,退缩通常更明显。

5.7 气候变化驱动及区域对比分析

冰川自身属性和地形条件能够解释研究区冰川退缩的空间差异,但对其长期持续退缩的认识,还需要结合区域气候变化背景加以分析。本文依据三期冰川编目得到的0.50%/a年均退缩率,反映的是1960–2020年准噶尔盆地内流区冰川退缩的长期平均水平。该结果能够揭示区域冰川变化的总体趋势,但难以反映单条冰川在不同阶段的具体响应过程。因此,在解释研究区冰川长期退缩时,还需要结合区域气候背景和代表性站点观测资料进行分析。

近60年来,新疆总体呈现明显的暖湿化趋势。已有研究表明,1960–2019年新疆年平均气温和年降水量分别以0.32 °C/10a和9.24 mm/10a的速率增加(Zhou et al., 2023)。天山北坡同期也表现出相近的增温增湿特征。位于准噶尔盆地内流区西部的艾比湖流域,1964–2019年年平均气温和年降水量分别以0.37 °C/10a和13.61 mm/10a的速率增加(Wang et al., 2021)。这表明,研究区总体处于持续增温、降水有所增加的气候背景之下。代表性站点观测结果也支持这一判断。乌鲁木齐河源1号冰川附近的大西沟气象站在1959–2018年间年平均气温明显升高,变化速率为0.254 °C/10a;1959–2016年间年降水量也呈增加趋势,变化速率为19.78 mm/10a。玛纳斯河流域肯斯瓦特水文站在1980–2023年间年平均气温上升速率为0.381 °C/10a,而年降水量变化较小,仅为1.57 mm/10a。无论是区域文献还是站点观测资料,都表明近几十年来研究区增温信号更明显,也更稳定。

从冰川演变过程看,气候因素的影响最终主要通过物质平衡变化表现出来。冰川物质平衡反映冰川物质积累与消融亏损的总体状况,其变化主要受气温和降水条件控制。通常而言,气温升高会加速冰川消融,而降水增加,特别是固态降水增加,则有利于冰川物质积累(李忠勤, 2011; 李忠勤, 2019)。因此,研究区冰川长期退缩并不只是面积变化的直接结果,更是持续增温背景下物质亏损不断累积的表现。结合前述区域气候背景和代表性站点资料可以看出,近几十年来研究区气温升高更明显,持续性也更强,降水虽然有所增加,但变化幅度和稳定性相对有限。这说明,研究区冰川物质平衡总体仍以消融增强为主要特征。乌鲁木齐河源1号冰川的长期观测也表明,

在气候持续变暖背景下,冰川物质亏损不断累积,冰川退缩与气温升高之间密切相关,而降水变化更多表现为阶段性的调节作用(李忠勤等, 2003; 王国亚和沈永平, 2011; Wang et al., 2016; Yuan et al., 2016)。

同时,气候变化对冰川的影响并不一定会立即、同步地反映到不同阶段的退缩过程中。研究区部分冰川发育在较高海拔地区,冰温较低,具有一定的大陆性冰川特征,其动力过程相对缓慢,对气候变化的响应可能存在一定滞后(Li et al., 2011; 李忠勤, 2019; Li et al., 2021; Zekollari et al., 2022)。这说明,区域冰川虽然总体持续退缩,但不同阶段退缩强弱不一定与气候要素变化完全同步。本文基于三期冰川编目揭示的是长时间尺度上的总体变化特征,对阶段性波动和短期响应过程的识别能力仍然有限。因此,现阶段关于气候变化与冰川阶段性退缩差异之间关系的判断,仍主要建立在区域气候背景、站点资料和冰川分布特征的综合分析之上。由于研究区高海拔气象资料和长期实测物质平衡资料仍较有限,这一认识还有待今后结合更系统的观测和模拟研究进一步检验。

为进一步理解研究区冰川退缩特征的区域意义,还可将其与邻近塔里木盆地进行比较。本文基于冰川编码匹配结果表明,1960–2020年准噶尔盆地内流区冰川面积减少707.64 km²,累计退缩30.2%,年均退缩率为0.50%/a。相比之下,已有研究指出,塔里木河流域冰川在20世纪60年代初至2000年间面积减少1307.2 km²,仅占初始面积的6.6%。相关综合研究还表明,塔里木盆地冰川自20世纪60年代至21世纪初总体面积减少约20%(Liu et al., 2006; Wang et al., 2020)。这说明,从相对退缩幅度看,准噶尔盆地内流区冰川退缩强于塔里木盆地平均水平。不过,塔里木盆地内部冰川退缩存在明显区域差异。Liang et al. (2025)指出,阿克苏河流域冰川面积在1963–2007年减少361.22 km²,在2007–2020年进一步减少118.88 km²,年均退缩率由0.38%/a提高至0.51%/a,说明该流域近几十年来冰川退缩有所加快。然而,就整体平均水平而言,准噶尔盆地内流区冰川退缩仍强于塔里木盆地。这种差异可能与两区冰川的高程分布、面积组成、表碛覆盖条件以及地形—气候背景差异有关。准噶尔盆地内流区冰川主要集中分布于3500~4500 m,且以中小冰川为主,这类冰川通常对气候变暖更敏感。相比之下,塔里木盆地分布有大面积高海拔冰川系统,尤其在帕米尔和昆仑山地区,许多冰川发育于更高海拔带,部分区域冰川退缩相对较弱。此外,两区在大气水汽输送条件和地形抬升作用上的差异,也可能进一步加剧冰川变化响应的区域分异。因此,准噶尔盆地内流区冰川较强的退缩特征,不仅反映了区域气候持续变暖的影响,也体现出该区以中低海拔、中小规模冰川为主的冰川系统对气候变化具有更高敏感性。

5.8 本章小结

本章基于编码匹配结果，系统分析了1960—2020年准噶尔盆地内流区冰川的总体变化、不同面积等级差异、山脉与子流域空间分异、地形控制特征及气候驱动。结果表明，研究区冰川整体处于持续退缩状态，60年间冰川面积减少707.64 km²，累计退缩30.2%，年均退缩率为0.50%/a，且1960—2007年退缩略快于2007—2020年。不同类型冰川中，中小冰川始终占主体，也是变化最活跃的部分，其中0.1—0.5 km²等级冰川数量最多、面积减少最明显，小冰川相对退缩更强，更易消失，而大冰川绝对面积损失更大，表明冰川规模是影响退缩方式的重要因素。

从空间格局看，研究区冰川变化具有显著分异特征。依连哈比尔尕山、婆罗科努山以及玛纳斯河、艾比湖等冰川集中分布区，面积减少量最大，是区域冰川退缩的主要贡献区。而科古琴山、穆斯套岭、阿尔泰山及和布克河、乌伦古河、科布多河等边缘山地和小流域，虽绝对减少量较小，但相对退缩更强，表现出更高的脆弱性。地形条件对冰川变化具有明显约束作用，冰川退缩主要集中在4500 m以下，尤以3400~3900 m高度带最为显著，3000 m以下冰川已基本消失。不同坡向冰川变化存在明显差异，偏北坡面冰川累计减少面积较大，但相对退缩强度较弱。偏南和偏西坡面冰川则表现出更明显的相对退缩。总体来看，研究区冰川退缩是冰川规模、空间位置和地形条件共同作用的结果，并在持续增温背景下表现出以消融增强为主的综合响应。

第6章 监测冰川变化特征

基于三期冰川编目, 本文揭示了准噶尔盆地内流区在 1960–2007 年和 2007–2020 年两个阶段的总体退缩特征, 并计算了 1960–2020 年的平均退缩率。然而, 基于冰川编目的冰川变化反映的主要是不同时期冰川面积的变化, 难以刻画冰川退缩在年代际尺度上的阶段差异、突变特征及持续演化过程。对于天山北坡这类中小冰川数量较多、冰川分裂与消亡较为频繁, 且明显受地形遮蔽及局地积累、消融条件影响的区域而言, 仅以区域平均年退缩率表征冰川变化, 既难以反映不同类型冰川在变化过程中的差异, 也不利于揭示冰川退缩在何时加快及其具体演变过程。

为进一步认识准噶尔盆地内流区冰川变化的阶段特征, 并与前文基于多期编目得到的区域变化结果进行对照, 本章选取中国科学院天山冰川站长期监测的 4 条典型冰川作为研究对象, 分别为乌鲁木齐河源 1 号冰川、哈希勒根 51 号冰川、四工河 4 号冰川和扇形分流冰川。4 条冰川在面积规模、表面特征和形态类型等方面存在明显差异。乌鲁木齐河源 1 号冰川和哈希勒根 51 号冰川面积较小, 可作为研究区数量占比较高的小冰川代表。其中, 乌鲁木齐河源 1 号冰川属于非表碛覆盖山谷冰川, 哈希勒根 51 号冰川则可作为表碛覆盖冰川的代表。四工河 4 号冰川为典型山谷冰川, 可代表研究区分布较广的中小型山谷冰川。扇形分流冰川面积较大、形态较为复杂, 可作为较大冰川样本的代表。此外, 这 4 条冰川还对应了不同海拔带和不同地形条件下的典型情形, 能够较好反映小冰川与较大冰川、表碛覆盖与非表碛覆盖冰川, 以及山谷型冰川与大型冰川在变化过程中的差异。

基于长期连续观测资料, 本文进一步分析这 4 条冰川的面积变化过程、阶段差异及其与区域平均退缩率之间的关系, 以更加准确地认识准噶尔盆地内流区冰川退缩的实际演化过程。

6.1 乌鲁木齐河源 1 号冰川变化特征

乌鲁木齐河源 1 号冰川是中国科学院天山冰川站长期定位观测的参照冰川之一。其面积变化能够较好反映天山北坡典型大陆性冰川对气候波动的阶段性响应(李忠勤等, 2003; 李忠勤, 2011; Li et al., 2021)。根据历年实测和解译面积数据, 以及相邻观测期计算得到的年均退缩率(图 6-1), 1 号冰川在 1961–2020 年持续退缩。冰川面积由 1961 年的 1.95 km^2 减至 2020 年的 1.51 km^2 , 累计减少 0.44 km^2 , 缩减 22.56%。

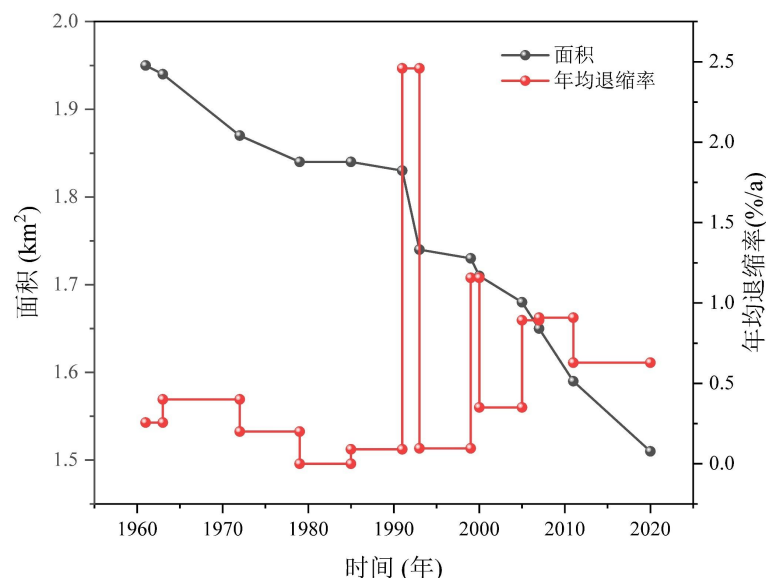


图 6-1 乌鲁木齐河源 1 号冰川面积变化图

Figure 6-1 Area Change of Urumqi Glacier No. 1

从变化过程看，1 号冰川面积退缩并不是均匀进行的，而是有明显阶段差异。1961–1991 年，冰川面积由 1.95 km² 缓慢减至 1.83 km²，30 年累计减少 0.12 km²，缩减 6.15%。这一时期年均退缩率整体较低，多数时段在 0.00~0.40%/a 之间，说明冰川面积变化相对平缓。

进入 20 世纪 90 年代初，冰川面积出现明显减小。1991–1993 年，1 号冰川面积由 1.83 km² 减至 1.74 km²，短期减少 0.09 km²，缩减 4.92%，年均退缩率升至 2.46%/a。这个异常高值与冰川形态变化密切相关。该时期冰川东西两支冰舌完全分离，原来相连的冰体变为两个独立单元，因此面积序列中出现了明显的阶段性下降（Li et al., 2011）。这一分离过程也与前期持续的末端后退一致。已有研究表明，自 20 世纪 60 年代以来，1 号冰川末端总体持续退缩，局部阶段的快速后退与冰体分离共同形成了其面积变化中的跳跃特征（施雅风，2005）。

1993 年以后，1 号冰川进入持续收缩阶段，且 2000 年后退缩明显加快。1993–2020 年，冰川面积由 1.74 km² 进一步减至 1.51 km²，累计减少 0.23 km²，缩减 13.22%，对应年均退缩率约为 0.49%/a。2000–2020 年间，冰川面积由 1.71 km² 减至 1.51 km²，累计减少 0.20 km²，缩减 11.70%，平均约为 0.59%/a。分阶段看，2005–2007 年和 2007–2011 年的年均退缩率分别达到 0.89%/a 和 0.91%/a，2011–2020 年仍保持在 0.63%/a。说明近 20 年来，1 号冰川一直处于较高强度的持续退缩状态。相关研究也指出，近十余年基于无人机测量和多源数据的监测结果显示，1 号冰川的退缩与变薄过程都有加快趋势，其长期物质平衡序列能够较好反映区域气候变化背景下的冰川响应，并具有一定代表性（王国亚和沈永平，2011；Wang et al., 2016；李忠勤，2019；李宏亮等，2021）。

图 6-2 从形态上直观记录了这种阶段变化。早期照片显示，1962 年和 1988 年冰舌连续，冰体规模较大。到 1993 年前后，冰体已出现明显分离和收缩，冰舌变窄，裸露地表和侧碛范围扩大。2001–2020 年间，冰川末端后退和冰体萎缩进一步加剧，冰舌长度和宽度持续减小，表明冰川消融增强，而上游冰体补给减弱。

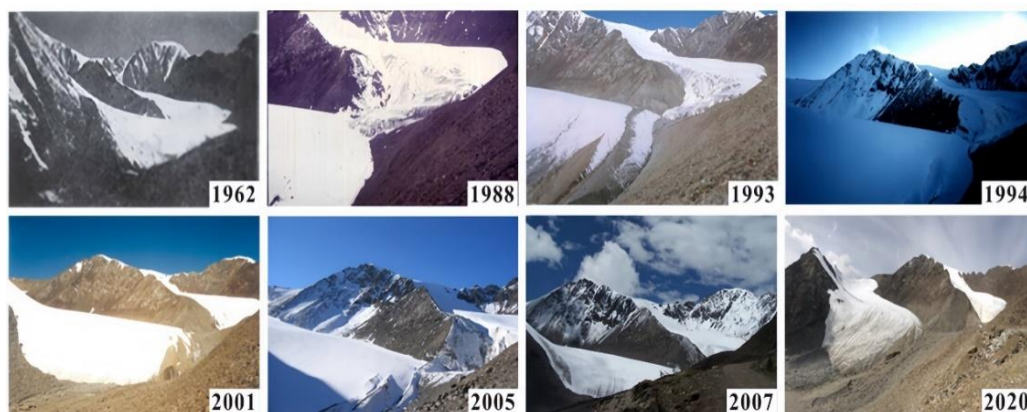


图 6-2 乌鲁木齐河源 1 号冰川实拍照片

Figure 6-2 Photograph of Urumqi Glacier No. 1

图 6-3 中的三期冰川边界也反映出相同过程。由 1962 年到 2020 年边界，冰川边界整体向上游退缩。面积缩减主要发生在冰舌末端和侧缘部位。两支分离后的冰体边界也都持续收缩。这进一步说明，20 世纪 90 年代初的冰体分离事件对面积序列中的突变有直接影响，而 2000 年后的持续退缩则控制了冰川边界的整体内缩。

1 号冰川的长期面积变化表明，其退缩过程具有明显的阶段性，可概括为前期缓慢退缩、90 年代初突变减小、近年持续增强。这也说明，仅用三期编目数据得到的长期平均退缩率，难以完整反映冰川真实的演化过程。要识别关键转折及其变化过程，仍需要依靠长期连续观测和多源监测资料（Li et al., 2011；王璞玉等，2012；Zhang et al., 2018）。

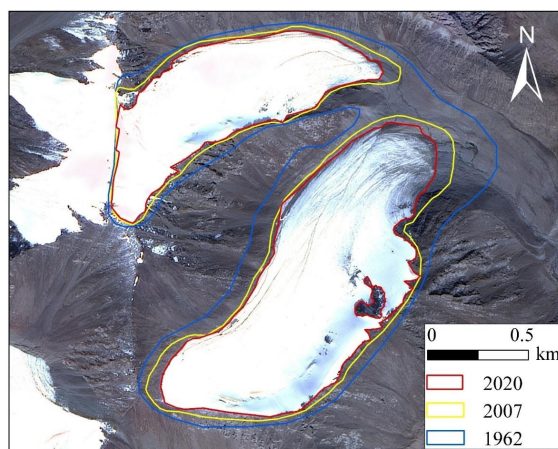


图 6-3 乌鲁木齐河源 1 号冰川三期编目边界变化图

Figure 6-3 Changes in the Inventory Boundaries of Urumqi Glacier No. 1 in the Three Periods

6.2 哈希勒根 51 号冰川变化特征

哈希勒根 51 号冰川位于天山依连哈比尔尕山东北坡奎屯河上游哈希勒根河源区，是该区少数具有长期监测资料的典型冰斗冰川。其面积变化能够较好反映奎屯河源区冰川退缩的阶段过程，也可为流域冰雪融水贡献研究提供依据（张慧，2015）。根据历次监测和解译结果（图 6-4），1964–2020 年该冰川持续退缩，面积由 1964 年的 1.48 km² 减至 2020 年的 1.14 km²，累计减少 0.34 km²，缩减 22.97%。

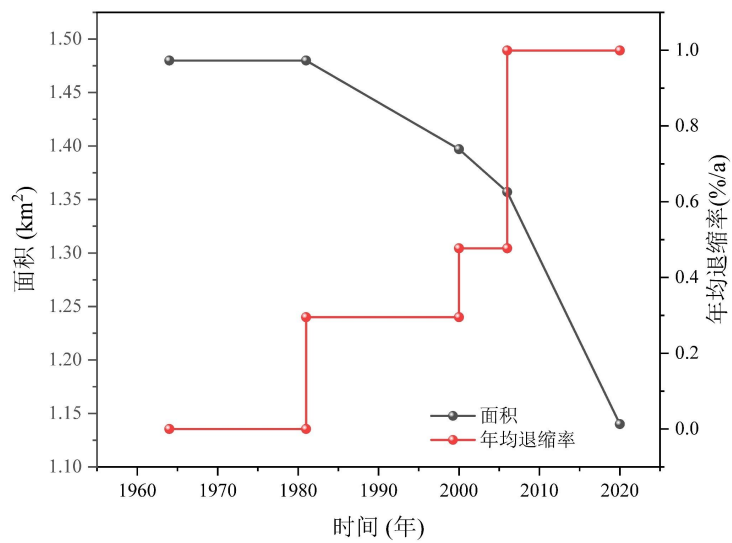


图 6-4 哈希勒根 51 号冰川面积变化图
Figure 6-4 Area Change of Haxilegen Glacier No. 51

从变化过程看，哈希勒根 51 号冰川的面积退缩有明显阶段差异。1964–1981 年，冰川面积基本保持不变，均为 1.48 km²，这一时期面积变化不明显。1981–2000 年，冰川面积减至 1.40 km²，减少 0.08 km²，缩减 5.61%，年均退缩率为 0.30%/a，表明冰川已开始持续退缩。2000–2006 年，冰川面积进一步减至 1.36 km²，减少 0.04 km²，缩减 2.86%，年均退缩率升至 0.48%/a，退缩有所加快。2006 年以后，冰川退缩明显增强。2006–2020 年，冰川面积由 1.36 km² 减至 1.14 km²，减少 0.22 km²，缩减 15.99%，年均退缩率达到 0.99%/a，为整个时段内最高，说明近十余年该冰川已进入快速收缩阶段。

多期边界叠加结果显示了面积损失的具体部位（图 6-5）。从 1964 年到 2006 年边界，冰川边界整体内收幅度较小，变化主要出现在冰体外缘和末端局部。到 2020 年时，冰川回撤明显增强，末端后退和侧缘收缩都更加清楚，冰体平面范围明显缩小。边界变化反映出的 2006 年后明显加快与面积序列中年均退缩率由 0.48%/a 增至 0.99%/a 的结果是一致的。这说明，哈希勒根 51 号冰川近年的面积缩减主要发生在末端和边缘部位，冰体整体处于持续退缩状态。

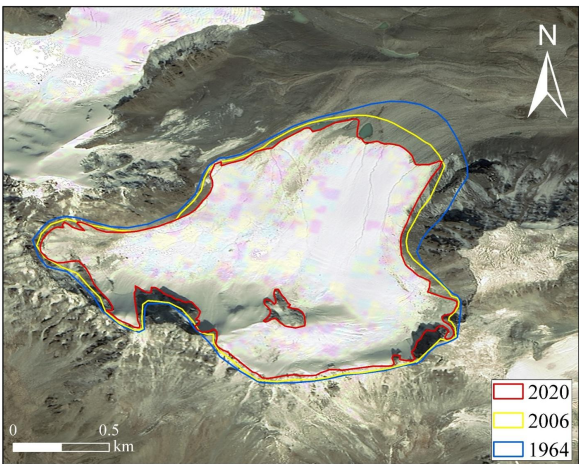


图 6-5 哈希勒根 51 号冰川三期编目边界变化图

Figure 6-5 Changes in the Inventory Boundaries of Haxilegen Glacier No. 51 in the Three Periods

6.3 四工河 4 号冰川变化特征

四工河 4 号冰川位于博格达峰北坡，是一条典型的山谷冰川。该冰川的系统调查始于 1981 年中日联合考察，2009 年天山冰川站又开展了补充观测。本文在此基础上，结合 GI-JIB2020 冰川边界成果，对其 1962–2020 年的面积变化过程进行了分析（伍光和等，1983；牛生明等，2014）。

由面积变化图和年均退缩率可以看出（图 6-6），1962–2020 年四工河 4 号冰川持续退缩。冰川面积由 1962 年的 3.33 km² 减至 2020 年的 2.31 km²，累计减少 1.02 km²，缩减 30.63%

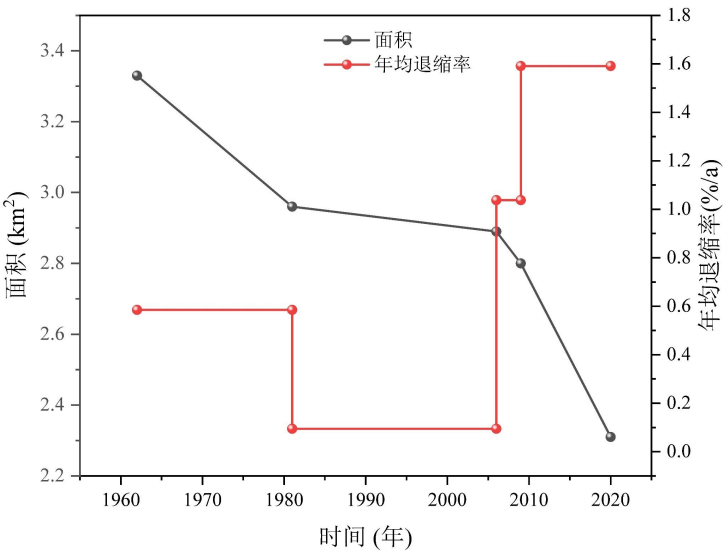


图 6-6 四工河 4 号冰川面积变化图

Figure 6-6 Area Change of Sigong River Glacier No. 4

从变化过程看,四工河4号冰川退缩并不均匀,而是有明显的阶段差异。1962–1981年是相对较快的退缩阶段,冰川面积由 3.33 km^2 减至 2.96 km^2 ,减少 0.37 km^2 ,缩减11.11%,年均退缩率为 $0.58\%/a$ 。1981–2006年退缩明显减缓,冰川面积仅由 2.96 km^2 减至 2.89 km^2 ,减少 0.07 km^2 ,缩减2.36%,年均退缩率降至 $0.09\%/a$,说明这一时期冰川变化较为平缓。2006年以后,退缩再次加快。2006–2009年,冰川面积由 2.89 km^2 减至 2.80 km^2 ,减少 0.09 km^2 ,缩减3.11%,年均退缩率升至 $1.04\%/a$ 。2009–2020年,冰川面积进一步由 2.80 km^2 减至 2.31 km^2 ,减少 0.49 km^2 ,缩减17.50%,年均退缩率升至 $1.59\%/a$,为整个时期最高,说明近十余年该冰川退缩明显加快。

多期边界对比结果(图6-7)也反映出相同的变化特征。1962年到2009年边界之间,冰川边界整体后退幅度相对较小,变化主要出现在冰舌末端和两侧局部。到2020年边界时,冰川回撤明显增强,末端后退和侧缘收缩都更加清楚,冰川平面范围明显缩小。边界变化说明,2009年以后是四工河4号冰川退缩最明显的阶段。

四工河4号冰川在持续退缩背景下,经历了前期较快—中期减缓—近年加快的变化过程。这表明,博格达峰北坡山谷冰川对近几十年气候变化的响应具有明显阶段差异,近年的退缩增强特征尤为突出(牛生明等,2014)。

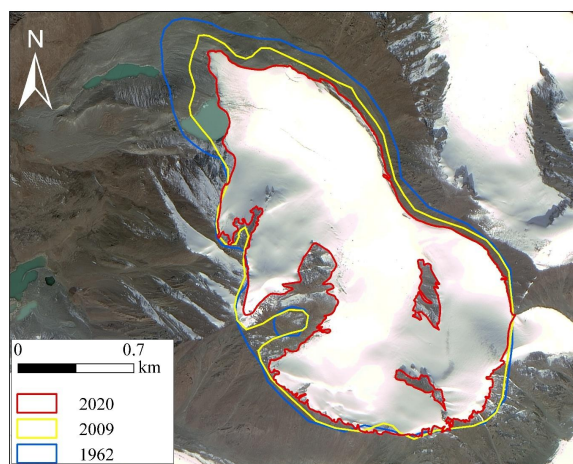


图 6-7 四工河 4 号冰川三期编目边界变化图

Figure 6-7 Changes in the Inventory Boundaries of Sigong River Glacier No. 4 in the Three Periods

6.4 扇形分流冰川变化特征

扇形分流冰川位于博格达峰北坡,是该区典型的复合型分流冰川。根据历次监测和解译面积结果,以及相邻时段计算得到的年均退缩率(图6-8),1962–2020年该冰川持续退缩。冰川面积由1962年的 11.24 km^2 减至2020年的 9.24 km^2 ,累计减少 2.00 km^2 ,缩减17.79%。这表明,该冰川在研究时段内一直处于明显的面积收缩状态。

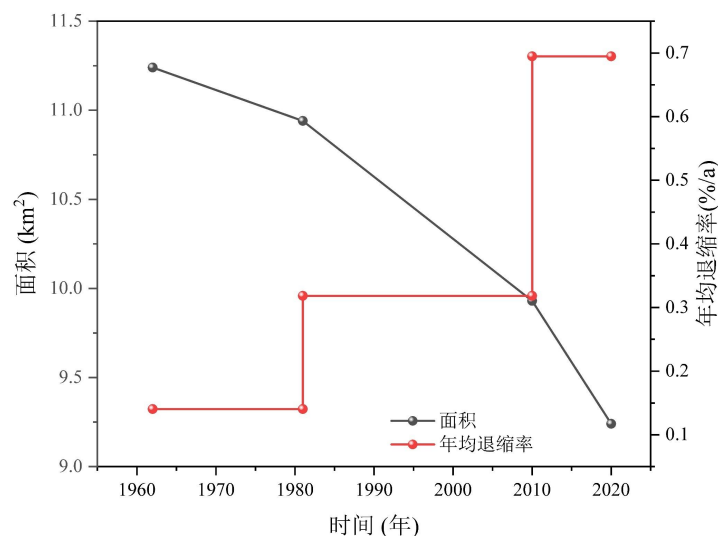


图 6-8 扇形分流冰川面积变化图

Figure 6-8 Area Change of the Fan-Shaped Glacier

从变化过程看，扇形分流冰川退缩具有明显的阶段差异。1962–1981 年，冰川面积由 11.24 km^2 减至 10.94 km^2 ，减少 0.30 km^2 ，缩减 2.67%，年均退缩率为 $0.14\%/a$ ，退缩较为缓慢。1981–2010 年，冰川面积进一步减至 9.93 km^2 ，减少 1.01 km^2 ，缩减 9.23%，年均退缩率升至 $0.32\%/a$ ，说明退缩有所增强。2010–2020 年，冰川面积由 9.93 km^2 减至 9.24 km^2 ，减少 0.69 km^2 ，缩减 6.95%，年均退缩率增至 $0.69\%/a$ ，表明近十余年退缩进一步加快。整体来看，年均退缩率随时间持续升高，说明该冰川退缩强度呈逐步增强趋势。

多期边界对比结果（图 6-9）清楚地反映了面积损失的空间位置。1962 年边界到 2009 年边界之间，冰川边界整体向上游回撤，但后退幅度相对有限，面积减少主要发生在冰舌末端和两侧边缘。到 2020 年边界时，冰川内收更加明显。除了末端继续后退外，两侧边缘收缩范围也进一步扩大。与此同时，冰面内部多处裸岩出露区明显增大，使冰体平面形态更加破碎，也更加不连续。这说明，近年扇形分流冰川的退缩不只表现为冰川末端后退，也表现为冰面变薄和内部消融增强所引起的面积缩减。

扇形分流冰川在持续退缩背景下，整体表现为前期变化较缓、中期退缩增强、近年进一步加快的过程。其近年的快速退缩表明，博格达峰北坡大型分流冰川对近几十年来气候变化的响应正在增强。这种响应已不再仅表现为冰舌末端后退，还体现在冰体边缘收缩和内部裸岩出露增多等方面。

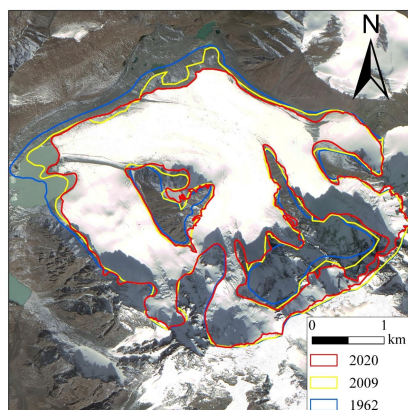


图 6-9 扇形分流冰川三期编目边界变化图

Figure 6-9 Changes in the Inventory Boundaries of the Fan-Shaped Glacier in the Three Periods

6.5 监测冰川与区域编目冰川变化对比分析

乌鲁木齐河源 1 号冰川、四工河 4 号冰川、扇形分流冰川和哈希勒根 51 号冰川的长期观测结果表明，准噶尔盆地内流区典型冰川在近 60 年中均处于退缩状态，但不同冰川的变化过程并不相同。有的冰川早期退缩较缓，近年明显加快，有的冰川在特定时期出现突变式缩减，也有的冰川表现为持续退缩，但阶段差异相对较弱。与此相对应，基于多期冰川编目和编码匹配法得到的区域年均退缩率为 $0.50\%/a$ ，反映的是 1960–2020 年准噶尔盆地内流区冰川整体的平均退缩水平。两类结果在总体趋势上是一致的，均表明研究区冰川在近 60 年中持续退缩，且近几十年退缩有所增强。它们之间的差异并不意味着结论相互矛盾，而主要源于资料来源、统计方式和表达内容的不同。

监测冰川年均退缩率通常由相邻观测期计算得到，更接近冰川在某一阶段的实际变化强度，因此能够较好反映退缩过程中的起伏变化和短时突变（Li et al., 2022）。乌鲁木齐河源 1 号冰川在 1991–1993 年间出现显著高值，就是一个典型例子。这一阶段面积突降主要与冰川东西两支冰舌完全分离有关，而不只是一般意义上的持续退缩（Li et al., 2011）。相比之下，区域编目退缩率是根据若干关键时点之间的面积相减推算得到的，反映的是较长时期内的净变化和平均变化水平（Paul et al., 2009; Paul et al., 2013）。这种方法更适合表征长期背景下的总体退缩强度，但对年际波动和短期突变不够敏感（Paul et al., 2013）。也就是说，区域平均退缩率能够说明研究区冰川整体退缩了多少，却难以展示单条冰川在何时退缩加快、何时发生突变，以及这些变化是如何逐步形成的。

两类结果之间的差异，还与研究对象本身有关。准噶尔盆地内流区冰川以中小冰川为主，这类冰川对外界变化更为敏感，也更容易发生分裂、破碎和消亡，因此通常表现出较高的相对退缩率和更快的数量减少（邢武成等，2017; Wang et al., 2020）。

区域编目统计将这些冰川全部纳入, 因此更能反映整个区域冰川总体的变化特征 (Wang et al., 2020)。相比之下, 监测冰川数量较少, 虽然涵盖了不同类型, 但仍难以完全代表全区冰川的组成特征。以本研究选取的 4 条监测冰川为例, 其中既有面积较大的扇形分流冰川, 也有面积较小的冰川。大型冰川相对退缩率通常较低, 而小型冰川近年的相对退缩强度则更容易升高 (Wang et al., 2012; Wang et al., 2020)。因此, 4 条监测冰川得到的平均年均退缩率约为 $0.59\%/a$, 略高于区域平均值 $0.50\%/a$ 。这一差异更多反映的是样本组成和统计权重的不同, 而不是区域结果与监测结果之间存在实质性冲突。

区域编目和监测资料在内容上也各有侧重。区域编目能够在整个准噶尔盆地内流区范围内同时揭示冰川面积变化及其空间差异, 便于识别不同山脉、不同流域以及不同类型冰川的总体变化格局 (邢武成等, 2017; Wang et al., 2020)。它更适合回答区域上冰川减少了多少、哪些地区减少更明显、不同区域之间差异有多大等问题。监测资料则更强调变化过程本身, 能够识别冰川退缩的阶段特征和关键转折, 也能揭示分裂、裸岩出露扩大等形态变化对面积变化的影响 (Li et al., 2011; Li et al., 2022)。已有研究表明, 天山地区几条典型监测冰川总体经历了由早期变化相对缓慢向后期持续增强消融的转变, 其中 20 世纪 90 年代以后冰川负平衡明显增强, 1990 年代末至 2000 年后多数典型监测冰川进入加速消融阶段 (Wang et al., 2012; Yuan et al., 2016; Zhang et al., 2018)。这类过程信息较难通过三期编目的长期平均结果直接表现出来。

两类结果还受到不同误差来源的影响。监测冰川通常依赖较稳定的观测体系, 边界判读精度较高, 时间连续性也较好, 因此更有利于识别冰川变化过程中的细节 (Li et al., 2022)。区域编目则会受到影像分辨率、季节性积雪、表碛覆盖、几何配准以及人工解译一致性等因素的影响, 不同时期数据误差并不完全一致 (Paul et al., 2009; Paul et al., 2013)。尽管本研究已通过编目修订和编码匹配尽量降低跨期资料之间的偏差, 但区域统计结果仍更偏向反映长期平均状态, 对过程细节的表达相对有限。

研究区监测冰川与区域编目冰川变化在总体趋势上是一致的, 都表明准噶尔盆地内流区冰川在近 60 年中持续退缩, 并且近年退缩有所增强。它们的不同, 主要体现在退缩率的统计含义、样本组成以及过程信息的表达能力上。区域编目更适合提供整体量化结果和空间差异, 监测资料更适合揭示阶段过程和突变信号。对每一条冰川来说, 由于其面积、形态和所处环境不同, 具体变化过程也会不同。因此, 要更深入认识冰川退缩过程, 还需要更多长期观测资料。区域平均年均退缩率可以看作内流区冰川长期变化的背景值, 而典型监测冰川所揭示的阶段增强和突变过程, 则为解释区域差异和识别关键转折提供了更直接的依据。二者结合, 有助于建立区域统计与典型过程相互印证的分析框架, 也能为后续水资源影响评估和敏感区识别提供更可靠的支撑。

第7章 结论与展望

7.1 主要结论

本研究以国产高分辨率卫星影像和 COP-DEM 高程数据为基础,结合 GIS 空间分析方法,建立了准噶尔盆地内流区 2020 年冰川编目数据集 (GI-JIB2020),并从面积等级、山脉、流域、行政区、高程和朝向等方面分析了研究区冰川分布特征。在此基础上,结合修订后的中国第一次冰川编目 (CGI-1)、中国第二次冰川编目 (CGI-2) 和 GI-JIB2020 数据,采用编码匹配法对 1960–2020 年准噶尔盆地内流区冰川变化进行了系统分析。同时,结合中国科学院天山冰川站长期定位观测资料和代表性气象站资料,对典型监测冰川变化过程及其气候背景进行了讨论。主要结论如下:

(1) 基于国产高分辨率遥感影像和 COP-DEM 数据,建立了准噶尔盆地内流区 2020 年冰川编目数据集 (GI-JIB2020)。结果表明,2020 年研究区共发育冰川 3174 条,总面积 1645.69 km^2 ,冰储量 73.77 km^3 ,其中表碛型冰川 74 条,面积 319.45 km^2 。研究区冰川总体以中小冰川为主,面积小于 0.5 km^2 的冰川有 2502 条,占冰川总数的 78.90%,但其面积仅占总面积的 21.20%。空间上,冰川主要集中于依连哈比尔尕山、玛纳斯河流域和艾比湖流域;地形上,冰川主要分布于 3800~4200 m 高程带,并以北 (N) 向冰川最为发育。总体来看,准噶尔盆地内流区冰川分布具有明显的高山源区集聚特征,其空间格局主要受山系海拔、地形条件、坡向差异和区域水汽输送共同影响。

(2) 通过对 CGI-1、CGI-2 和 GI-JIB2020 进行统一修订、融合处理和编码匹配,降低了不同时期编目在数据源、空间分辨率、边界判读和分冰岭划分等方面差异对变化分析的影响。在此基础上,采用编码匹配法对 1960–2020 年冰川变化进行统计。结果表明,研究区冰川面积由 1960 年的 2343.03 km^2 减少至 2020 年的 1635.39 km^2 ,累计减少 707.64 km^2 ,退缩幅度为 30.2%,年均退缩率为 0.50%/a;其中 1960–2007 年冰川面积减少 596.02 km^2 ,年均退缩率为 0.54%/a,2007–2020 年进一步减少 111.62 km^2 ,年均退缩率为 0.49%/a。60 年间共有 878 条冰川消失,消失冰川面积为 95.95 km^2 ,表明准噶尔盆地内流区冰川自 1960 年以来总体处于持续退缩状态。

(3) 研究区冰川变化具有明显的规模差异、空间差异和地形差异。小冰川相对退缩更强,更易发生消失;大冰川相对退缩幅度较低,但绝对面积损失更大。山脉尺度上,依连哈比尔尕山、婆罗科努山和天格尔山冰川面积减少最为显著,1960–2020 年分别减少 360.56 km^2 、 120.81 km^2 和 96.62 km^2 ;流域尺度上,玛纳斯河流域 (5Y73) 和

艾比湖流域(5Y74)冰川面积减少最为明显,分别减少 376.72 km² 和 257.18 km²。相比之下,边缘山脉和小流域冰川面积减少量较小,但相对退缩比例更高。地形上,冰川退缩主要集中在 3400~3900 m 高程带,偏北朝向冰川绝对减少量较大,而偏南和偏西朝向冰川相对退缩更强。这表明,研究区冰川退缩不仅受区域气候变暖影响,也与冰川规模组成、末端海拔和局地地形条件密切相关。

(4) 结合代表性气象站资料和典型监测冰川变化过程分析可知,研究区冰川持续退缩与近几十年来明显的气候变暖密切相关。大西沟气象站 1959–2018 年年平均气温上升速率为 0.254 °C/10a,肯斯瓦特水文站 1980–2023 年年平均气温上升速率为 0.381 °C/10a,增温信号较降水变化更为突出,说明气候变暖是推动研究区冰川持续退缩的主要气候因素,降水变化主要起调节作用。4 条典型监测冰川均表现为持续退缩,但阶段过程存在差异:乌鲁木齐河源 1 号冰川表现为前期缓慢退缩、20 世纪 90 年代初明显减小、近年持续增强;哈希勒根 51 号冰川和扇形分流冰川近年退缩有所加快;四工河 4 号冰川则经历了前期较快、中期减缓、近年再度加快的过程。区域编目结果能够揭示研究区冰川长期总体变化及空间差异,典型监测冰川资料则有助于补充单条冰川的阶段变化过程,二者结合可更全面地认识准噶尔盆地内流区冰川退缩特征。

7.2 主要贡献

在已有研究基础上,本文的主要贡献体现在以下 3 个方面:

(1) 在已有冰川编目成果基础上,结合更高分辨率的国产高分系列、资源系列卫星影像和 COP-DEM 数据,本文完成了准噶尔盆地内流区 2020 年冰川边界提取、属性计算、一致性检查与误差评估,构建了研究区 2020 年冰川数据集(GI-JIB2020)。与早期编目资料相比,该数据集在时间更新性、空间精细度和区域适用性方面均有所提升,较为系统地反映了研究区冰川现状,为后续冰川变化分析提供了统一的数据基础。

(2) 在多期冰川编目一致性处理方面,本文针对 CGI-1、CGI-2 和 GI-JIB2020 在数据源、空间分辨率、边界表达和分冰岭划分等方面存在的 inconsistency 问题,建立了历史编目修订、融合处理和跨期冰川编码匹配相结合的分析流程。该流程并非简单进行多期边界叠加,而是在统一空间基准和对象对应关系的基础上,对同一冰川在不同时期的面积变化进行追踪,从而减少了冰川分裂、合并、新增小冰川识别差异等因素对长期变化统计结果的影响。该方法提高了准噶尔盆地内流区 1960–2020 年冰川变化结果的可比性和可靠性,也为数据来源复杂区域的长期冰川变化研究提供了可参考的区域实践。

(3) 将区域冰川编目结果和典型监测冰川的长期观测资料结合起来,加深了对冰

川退缩过程差异的认识。本文在区域统计分析的基础上,选取4条典型监测冰川,对其面积变化过程进行了对比,并分析了区域平均变化与单条冰川阶段变化之间的联系和差别。这样既保留了区域编目在反映长期总体变化方面的优点,也补充了仅靠编目结果难以看出的阶段变化信息,为认识准噶尔盆地内流区冰川退缩过程提供了新的依据。

7.3 不足及展望

尽管本文在多期冰川编目统一、冰川变化量化和空间差异分析方面取得了一定进展,但仍有一些问题需要在后续研究中继续完善。

(1) 本文基于三期冰川编目和典型监测冰川资料,对准噶尔盆地内流区冰川分布现状及1960–2020年变化特征进行了分析,但现有资料在时间分辨率方面仍存在不足。1960年、2007年和2020年三期编目能够较好反映长时段的总体变化趋势,但对年代际波动、短期突变以及阶段性变化过程的刻画仍不够充分。后续研究可在现有编目基础上补充更多中间年份数据,并结合Landsat、Sentinel、高分卫星和历史航空影像等多源遥感资料,构建时间间隔更密集的冰川变化序列,以提高对关键转折时期和阶段变化过程的识别能力。

(2) 本文选取的4条监测冰川较好补充了区域平均结果难以反映的过程信息,但监测冰川数量仍然有限,其面积等级、地形条件和空间分布尚不能完全代表整个内流区冰川的总体情况。后续研究可进一步增加不同面积等级、不同海拔带和不同坡向冰川的长期观测,并加强遥感解译、无人机测量、GNSS定位和实地调查之间的结合,以提高典型冰川样本的区域代表性和变化过程识别能力。与此同时,本文对冰川变化原因的分析主要建立在空间差异、冰川规模和地形条件的基础上,对气候因素及其水文影响的讨论仍可进一步深化。后续可结合气温、降水、物质平衡、冰厚变化和径流资料,进一步分析不同山脉和子流域冰川变化与气候因子之间的关系。

(3) 准噶尔盆地内流区冰川变化不仅反映冰川本身的演变过程,也与区域水资源变化密切相关。后续研究可在现有冰川现状识别和变化分析基础上,进一步评估不同山脉和子流域冰川退缩对融水补给、径流过程和水资源安全的影响,并加强对快速退缩区和敏感区的识别。通过持续结合区域编目、长期监测和多源观测资料,可逐步建立冰川现状更新、长期变化识别、驱动因素分析和水资源影响评估相衔接的研究框架,为准噶尔盆地内流区冰川变化研究和区域水资源管理提供更可靠的科学依据。

参考文献

- Alifu H, Vuillaume J F, Johnson B A, et al. Machine-learning classification of debris-covered glaciers using a combination of Sentinel-1/-2 (SAR/optical), Landsat 8 (thermal) and digital elevation data[J]. *Geomorphology*, 2020, 369: 107365.
- Andreassen L M, Paul F, Kääb A, et al. Landsat-derived glacier inventory for Jotunheimen, Norway, and deduced glacier changes since the 1930s[J]. *The Cryosphere*, 2008, 2(2): 131-145.
- Bahr D B, Meier M F, Peckham S D. The physical basis of glacier volume-area scaling[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, 102(B9): 20355-20362.
- Bhardwaj A, Joshi P K, Snehamani, et al. Mapping debris-covered glaciers and identifying factors affecting the accuracy[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2014, 106-107: 161-174.
- Bojinski S, Verstraete M, Peterson T C, et al. The concept of essential climate variables in support of climate research, applications, and policy[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2014, 95(9): 1431-1443.
- Bolch T, Menounos B, Wheate R. Landsat-based inventory of glaciers in western Canada, 1985-2005[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(1): 127-137.
- Bolch T. Climate change and glacier retreat in northern Tien Shan (Kazakhstan/Kyrgyzstan) using remote sensing data[J]. *Global and Planetary Change*, 2007, 56(1-2): 1-12.
- Chand P, Sharma M C. Glacier changes in the Ravi basin, North-Western Himalaya (India) during the last four decades (1971-2010/13)[J]. *Global and Planetary Change*, 2015, 135: 133-147.
- Chen J, Ohmura A. Estimation of Alpine glacier water resources and their change since the 1870s[C]. In: Lang H, Musy A, eds. *Hydrology in Mountainous Regions I—Hydrological Measurements; the Water Cycle*. IAHS Publication No. 193, 1990: 127-135.
- Cogley J G. The future of the world's glaciers[C]. In: Henderson-Sellers A, McGuffie K, eds. *The Future of the World's Climate*. 2nd ed. Elsevier, 2012: 197-222.
- De Angelis H. Hypsometry and sensitivity of the mass balance to changes in equilibrium-line altitude: the case of the Southern Patagonia Icefield[J]. *Journal of Glaciology*, 2014, 60(219): 14-28.
- DeBeer C M, Sharp M J. Topographic influences on recent changes of very small glaciers in the Monashee Mountains, British Columbia, Canada[J]. *Journal of Glaciology*, 2009, 55(192): 691-700.

- Duethmann D, Menz C, Jiang T, et al. Projections for headwater catchments of the Tarim River reveal glacier retreat and decreasing surface water availability but uncertainties are large[J]. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(5): 054024.
- Fan X, Yan L, Xu J, et al. Analysis of glacier change in Manas River basin in the last 50 years based on multi-source data[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(5): 1188-1198.
- 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): 716-722.
- Frey H, Paul F, Strozzi T. Compilation of a glacier inventory for the western Himalayas from satellite data: Methods, challenges, and results[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 124: 832-843.
- Furbish D J, Andrews J T. The use of hypsometry to indicate long-term stability and response of valley glaciers to changes in mass transfer[J]. *Journal of Glaciology*, 1984, 30(105): 199-211.
- Gardelle J, Berthier E, Arnaud Y. Slight mass gain of Karakoram glaciers in the early twenty-first century[J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5(5): 322-325.
- Granshaw F D, Fountain A G. Glacier change (1958-1998) in the North Cascades National Park Complex, Washington, USA[J]. *Journal of Glaciology*, 2006, 52(177): 251-256.
- Grinsted A. An estimate of global glacier volume[J]. *The Cryosphere*, 2013, 7(1): 141-151.
- 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.
- Hall D K, Bayr K J, Schöner W, et al. 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.
- Hu Q, Zhao Y, Huang A, et al. Moisture transport and sources of the extreme precipitation over northern and southern Xinjiang in the summer half-year during 1979-2018[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2021, 9: 770877.
- Hugonnet R, McNabb R, Berthier E, et al. Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century[J]. *Nature*, 2021, 592(7856): 726-731.
- Huss M, Hock R, Bauder A, et al. Conventional versus reference-surface mass balance[J]. *Journal of Glaciology*, 2012, 58(208): 278-286.
- Huss M, Hock R. A new model for global glacier change and sea-level rise[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2015, 3: 54.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC special report on the ocean and cryosphere in a changing climate[R]. 2019.
- 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.

- Jin C, Wang B, Cheng T F, et al. How much we know about precipitation climatology over Tianshan Mountains—the Central Asian water tower[J]. *npj Climate and Atmospheric Science*, 2024, 7: 21.
- Kraaijenbrink P D, Bierkens M F, Lutz A F, et al. Impact of a global temperature rise of 1.5 degrees Celsius on Asia's glaciers[J]. *Nature*, 2017, 549(7671): 257-260.
- Li H, Wang P, Li Z, et al. An application of three different field methods to monitor changes in Urumqi Glacier No. 1, Chinese Tien Shan, during 2012-18[J]. *Journal of Glaciology*, 2022, 68(267): 41-53.
- Li K, Li Z, Wang C, et al. Shrinkage of Mt. Bogda glaciers of eastern Tian Shan in Central Asia during 1962-2006[J]. *Journal of Earth Science*, 2016, 27: 139-150.
- Li X, Chen G, Wu C, et al. Tectono-stratigraphic framework and evolution of East Junggar Basin, Central Asia[J]. *Tectonophysics*, 2023, 851: 229758.
- Li Z, Li H, Chen Y. Mechanisms and simulation of accelerated shrinkage of continental glaciers: A case study of Urumqi Glacier No. 1 in eastern Tianshan, Central Asia[J]. *Journal of Earth Science*, 2011, 22(4): 423-430.
- Li Z, Li H, Xu C, et al. 60-year changes and mechanisms of Urumqi Glacier No. 1 in the eastern Tianshan of China, Central Asia[J]. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2021, 12(6): 380-388.
- Li Z, Zhan Z, Yang Y, et al. The Chinese Glacier Inventory of Xinjiang in 2020 (CGI-XJ2020): Compilation, features and primary results[J]. *Research in Cold and Arid Regions*, 2025, 17(5): 269-280.
- Maurer J M, Schaefer J M, Rupper S, et al. Acceleration of ice loss across the Himalayas over the past 40 years[J]. *Science Advances*, 2019, 5(6): eaav7266.
- Müller F, Caflisch T, Müller G. Instructions for compilation and assemblage of data for a World Glacier Inventory[M]. Zurich: Department of Geography, Swiss Federal Institute of Technology, 1977.
- Nagai H, Fujita K, Sakai A, et al. Comparison of multiple glacier inventories with a new inventory derived from high-resolution ALOS imagery in the Bhutan Himalaya[J]. *The Cryosphere*, 2016, 10: 65-85.
- Nummura T, Sakai A, Taniguchi K, et al. The GAMDAM glacier inventory: a quality-controlled inventory of Asian glaciers[J]. *The Cryosphere*, 2015, 9(3): 849-864.
- Nuth C, Kääb A. Co-registration and bias corrections of satellite elevation data sets for quantifying glacier thickness change[J]. *The Cryosphere*, 2011, 5(1): 271-290.
- Oerlemans J. Extracting a climate signal from 169 glacier records[J]. *Science*, 2005, 308(5722): 675-677.
- Olson M, Rupper S. Impacts of topographic shading on direct solar radiation for valley glaciers in complex topography[J]. *The Cryosphere*, 2019, 13: 29-40.

- Paul F, Barrand N E, Baumann S, et al. On the accuracy of glacier outlines derived from remote-sensing data[J]. *Annals of Glaciology*, 2013, 54(63): 171-182.
- Paul F, Barry R G, Cogley J G, et al. Recommendations for the compilation of glacier inventory data from digital sources[J]. *Annals of Glaciology*, 2009, 50(53): 119-126.
- Paul F, Bolch T, Briggs K, et al. Error sources and guidelines for quality assessment of glacier area, elevation change, and velocity products derived from satellite data in the Glaciers_cci project[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 203: 256-275.
- Paul F, Bolch T, Kääb A, et al. The glaciers climate change initiative: Methods for creating glacier area, elevation change and velocity products[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 162: 408-426.
- Paul F, Huggel C, Kääb A. Combining satellite multispectral image data and a digital elevation model for mapping debris-covered glaciers[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89(4): 510-518.
- Paul F, Kääb A, Maisch M, et al. The new remote-sensing-derived Swiss glacier inventory: I. Methods[J]. *Annals of Glaciology*, 2002, 34: 355-361.
- Racoviteanu A E, Paul F, Raup B, et al. Challenges and recommendations in mapping of glacier parameters from space: results of the 2008 Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS) workshop, Boulder, Colorado, USA[J]. *Annals of Glaciology*, 2009, 50(53): 53-69.
- Racoviteanu A E, Williams M W, Barry R G. Optical remote sensing of glacier characteristics: a review with focus on the Himalaya[J]. *Sensors*, 2008, 8(5): 3355-3383.
- Racoviteanu A, Williams M W. Decision tree and texture analysis for mapping debris-covered glaciers in the Kangchenjunga area, eastern Himalaya[J]. *Remote Sensing*, 2012, 4(10): 3078-3109.
- Radić V, Hock R. Regional and global volumes of glaciers derived from statistical upscaling of glacier inventory data[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2010, 115(F1): F01010.
- Randolph Consortium. The Randolph Glacier Inventory: a globally complete inventory of glaciers[J]. *Journal of Glaciology*, 2014, 60(221): 537-552.
- Raup B H, Andreassen L M, Bolch T, et al. Remote sensing of glaciers[C]. In: Tedesco M, ed. *Remote Sensing of the Cryosphere*. John Wiley & Sons, 2015: 123-148.
- Raup B, 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(1-2): 101-110.
- Robson B A, Nuth C, Dahl S O, et al. Automated classification of debris-covered glaciers combining optical, SAR and topographic data in an object-based environment[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 170: 372-387.

- Sakai A. Brief communication: Updated GAMDAM glacier inventory over high-mountain Asia[J]. *The Cryosphere*, 2019, 13(7): 2043-2049.
- Shukla A, Ali I. A hierarchical knowledge-based classification for glacier terrain mapping: a case study from Kolahoi Glacier, Kashmir Himalaya[J]. *Annals of Glaciology*, 2016, 57(71): 1-10.
- Sorg A, Bolch T, Stoffel M, et al. Climate change impacts on glaciers and runoff in Tien Shan (Central Asia)[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(10): 725-731.
- Su B, Xiao C, Chen D, et al. Glacier change in China over past decades: Spatiotemporal patterns and influencing factors[J]. *Earth-Science Reviews*, 2022, 226: 103926.
- Sun M, Liu S, Yao X, et al. Glacier changes in the Qilian Mountains in the past half-century: based on the revised First and Second Chinese Glacier Inventory[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, 28: 206-220.
- Thomas D J, Robson B A, Racoviteanu A. An integrated deep learning and object-based image analysis approach for mapping debris-covered glaciers[J]. *Frontiers in Remote Sensing*, 2023, 4: 1161530.
- Unger-Shayesteh K, Vorogushyn S, Farinotti D, et al. What do we know about past changes in the water cycle of Central Asian headwaters? A review[J]. *Global and Planetary Change*, 2013, 110: 4-25.
- Van Der Geest K, Van Den Berg R. Slow-onset events: a review of the evidence from the IPCC Special Reports on Land, Oceans and Cryosphere[J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2021, 50: 109-120.
- Wang L, Bai C, Ming J. Current status and variation since 1964 of the glaciers around the Ebi Lake Basin in the warming climate[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(3): 497.
- Wang P, Li Z, Li H, et al. Analyses of recent observations of Urumqi Glacier No. 1, Chinese Tianshan Mountains[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(8): 720.
- Wang P, Li Z, Li H, et al. Glacier No. 4 of Sigong River over Mt. Bogda of eastern Tianshan, Central Asia: thinning and retreat during the period 1962-2009[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 66(1): 265-273.
- Wang P, Li Z, Wang W, et al. Glacier volume calculation from ice-thickness data for mountain glaciers—A case study of Glacier No. 4 of Sigong River over Mt. Bogda, eastern Tianshan, Central Asia[J]. *Journal of Earth Science*, 2014, 25: 371-378.
- Wang W, Li H, Wang J, et al. Water vapor from Western Eurasia promotes precipitation during the snow season in northern Xinjiang, a typical arid region in Central Asia[J]. *Water*, 2020, 12(1): 141.
- Wulder M A, Loveland T R, Roy D P, et al. Current status of Landsat program, science, and applications[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 225: 127-147.
- Xu J, Liu S, Guo W, et al. Glacial area changes in the Ili River Catchment (Northeastern Tian

- Shan) in Xinjiang, China, from the 1960s to 2009[J]. *Advances in Meteorology*, 2015, 2015: 1-12.
- Yang X, Xie F, Liu S, et al. Mapping debris-covered glaciers using high-resolution imagery (GF-2) and deep learning algorithms[J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(12): 2062.
- Yang Y, Li Z, Wang F, et al. Ice thickness measurement and volume modeling of Muztagh Ata Glacier No. 16, Eastern Pamir[J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(11): 2009.
- Yao T, Bolch T, Chen D, et al. The imbalance of the Asian water tower[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, 3(10): 618-632.
- Yao T, Thompson L, Yang W, et al. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2: 663-667.
- Yu Y, Wang Y. Characteristics of low-rank coal reservoir and exploration potential in Junggar Basin: New frontier of low-rank CBM exploration in China[J]. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2020, 10: 2207-2223.
- Yuan F, Hao Z, Berndtsson R, et al. The mass balance of Glacier No. 1 at the headwaters of the Urumqi River in relation to Northern Hemisphere teleconnection patterns[J]. *Water*, 2016, 8(3): 100.
- Zekollari H, Huss M, Farinotti D, et al. Ice-dynamical glacier evolution modeling—a review[J]. *Reviews of Geophysics*, 2022, 60(2): e2021RG000754.
- Zhan Z, Li Z, Mu J, et al. Glaciers and their changes based on Chinese glacier inventories in Ili River Basin, Xinjiang, northwestern China[J]. *Research in Cold and Arid Regions*, 2025, 17(5): 281-293.
- Zhang H, Li Z, Zhou P, et al. Mass-balance observations and reconstruction for Haxilegen Glacier No. 51, eastern Tien Shan, from 1999 to 2015[J]. *Journal of Glaciology*, 2018, 64(247): 689-699.
- Zhou G, Chen Y, Yao J. Variations in precipitation and temperature in Xinjiang (Northwest China) and their connection to atmospheric circulation[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2023, 10: 1082713.
- Zhu G, Gao H, Zeng G. Changes in wetland landscape pattern in the arid inland area of Northwest China: a case study of the inland drainage area of the Junggar Basin, Xinjiang[J]. *Arid Land Resources and Environment*, 2014, 28(8): 77-82.
- 邓海军, 陈亚宁. 中亚天山山区冰雪变化及其对区域水资源的影响[J]. *地理学报*, 2018, 73(7): 1309-1323.
- 何毅, 杨太保. 博格达峰地区气候变化特征及其对冰川变化的影响[J]. *地理科学进展*, 2014, 33(10): 1387-1396.
- 胡汝骥. 中国新疆自然地理[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004.
- 李宏亮, 王璞玉, 李忠勤, 等. 基于多源数据的天山乌鲁木齐河源 1 号冰川变化研究[J]. *冰川冻土*, 2021, 43(4): 1018-1026.

- 李佳秀, 陈亚宁, 刘志辉. 新疆不同气候区的气温和降水变化及其对地表水资源的影响[J]. 中国科学院大学学报, 2018, 35(3): 370-381.
- 李忠勤, 韩添丁, 井哲帆, 等. 乌鲁木齐河源区气候变化和 1 号冰川 40a 观测事实[J]. 冰川冻土, 2003, 25(2): 117-123.
- 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.
- 李忠勤. 山地冰川物质平衡和动力过程模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- 李忠勤. 天山乌鲁木齐河 1 号冰川近期研究与应用[M]. 北京: 气象出版社, 2011.
- 刘潮海, 尤根祥, 蒲健辰. 中国冰川目录 II 阿尔泰山区[M]. 兰州: 中国科学院兰州冰川冻土研究所, 1982.
- 刘锟, 付晶莹, 李飞. 高分一号卫星 4 种融合方法评价[J]. 遥感技术与应用, 2015, 30(5): 980-986.
- 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.
- 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.
- 牛生明, 李忠勤, 怀保娟. 近 50 年来天山博格达峰地区冰川变化分析[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(9): 134-138.
- 钱亦兵, 吴兆宁, 张立运, 等. 古尔班通古特沙漠植被与环境的关系[J]. 生态学报, 2007, 27(7): 2802-2811.
- 钱亦兵, 张立运, 吴兆宁, 等. 新疆准噶尔盆地边缘部分地段生态环境特征[J]. 干旱区地理, 2003, 26(1): 30-36.
- 秦大河, 丁永建. 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.
- 施雅风. 简明中国冰川目录[M]. 上海: 上海科学普及出版社, 2005.
- 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.
- 王国亚, 沈永平. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川面积变化对物质平衡计算的影响[J]. 冰川冻土, 2011, 33(1): 1-7.
- 王璞玉, 李忠勤, 曹敏, 等. 近 50a 来天山博格达峰地区四工河 4 号冰川表面高程变化特征[J]. 干旱区地理, 2011a, 34(3): 464-470.
- 王璞玉, 李忠勤, 李慧林. 气候变暖背景下典型冰川储量变化及其特征——以天山乌鲁木齐河源 1 号冰川为例[J]. 自然资源学报, 2011b, 26(7): 1189-1198.
- 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.
- 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.
- 伍光和, 张顺英, 王仲祥. 天山博格达峰现代冰川的进退变化[J]. 冰川冻土, 1983, 5(3): 143-152.
- 肖鹏峰, 冯学智, 谢顺平, 等. 新疆天山玛纳斯河流域高分辨率积雪遥感研究进展[J]. 南京大学学报(自然科学), 2015, 51(5): 909-920.
- 邢武成, 李忠勤, 张慧, 等. 1959 年来中国天山冰川资源时空变化[J]. 地理学报, 2017, 72(9): 1594-1605.
- 徐丽萍, 李鹏辉, 李忠勤, 等. 新疆山地冰川变化及影响研究进展[J]. 水科学进展, 2020, 31(6): 946-959.
- 彦立利, 高健峰, 王建, 等. 基于 GF-1 卫星遥感的冰川边界识别[J]. 冰川冻土, 2020, 42(4): 1400-1406.
- 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.
- 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.
- 中国科学院兰州冰川冻土研究所. 中国冰川目录Ⅲ天山山区(东部散流内流区) [M]. 北京: 科学出版社, 1986a.
- 中国科学院兰州冰川冻土研究所. 中国冰川目录Ⅲ天山山区(西北部准噶尔内流区) [M]. 北京: 科学出版社, 1986b.

致谢

时光荏苒，三年的硕士研究生学习生活即将结束。回望这段求学历程，从课程学习、野外观测到论文选题、资料整理与反复修改，一路走来，有艰辛，也有收获；有迷茫，也有成长。论文能够顺利完成，离不开许多师长、同学、亲友的关心、帮助与支持。在此，我谨向所有给予我指导、鼓励和帮助的人致以最诚挚的谢意。

首先，我要衷心感谢我的导师李忠勤老师。感谢李老师在论文选题、研究思路、框架搭建、研究方法和论文修改等各个环节给予我的悉心指导。李老师严谨求实的治学态度、深厚扎实的学术功底以及对科研工作的高度投入，使我深受启发、受益匪浅。无论是在研究方向的把握上，还是在论文细节的推敲上，李老师都给予了我极大的帮助和耐心指导，让我逐步学会以更加规范、严谨的态度开展学术研究。与此同时，我也特别感谢李老师为我提供了宝贵的科研实践平台，使我有机会依托中国科学院新疆天山冰川国家野外科学观测站参与相关科研工作。几次野外观测与项目经历，不仅拓宽了我的学术视野，也让我对冰川研究有了更加直观而深刻的认识。同时，我要感谢徐丽萍老师。感谢徐老师在研究生学习期间给予我的关心、帮助与支持。徐老师在学业和科研过程中给予了我许多鼓励，也让我在研究生阶段感受到师长的关怀与温暖。在此，谨向徐老师致以诚挚的谢意。

其次，我要感谢石河子大学理学院的各位老师。感谢各位老师研究生阶段给予我的专业培养和学术熏陶，使我在理论知识、科研思维和学术素养等方面都得到了系统提升。特别感谢在论文开题、中期检查、预答辩及修改过程中给予我宝贵意见和建议的各位老师。正是由于你们严谨负责的指导，我才能不断发现问题、修正不足，并逐步完善论文内容。

感谢中国科学院新疆天山冰川国家野外科学观测站的各位老师、师兄师姐和同门在学习与科研中的帮助与支持。感谢陈智、詹泽鑫、马昊、牟建新、赵卫博、杨业菲、王芳龙、张昕、贾玉峰等师兄师姐在科研交流、野外工作和日常学习中给予我的帮助。感谢天山站职工林茂伟、马应辉、陈建安、李清等在野外工作期间的关心与照顾。正因为有你们的支持与帮助，我才能更加顺利地野外观测、数据整理和相关研究工作，也让我在艰苦的野外环境中感受到集体的温暖。感谢我的同门王茜、梁奇斌、席娟伟、刘博文、李一帆等同学在学习和科研中的鼓励与帮助。与你们一起度过的时光，是我研究生阶段珍贵而难忘记忆。

最后，我要深深感谢我的家人。感谢你们一直以来对我的理解、包容与支持。无论是在生活上还是精神上，你们始终是最坚实的后盾。正因为有了家人的信任与鼓励，我才能够心无旁骛地完成学业、坚定地走到今天。你们的付出与关爱，我将永远铭记于心。

论文的完成，不仅意味着一段学习历程的结束，也意味着新的起点即将开始。未来无论走向何方，我都会铭记这段宝贵的求学经历，铭记所有帮助过我的老师、同学、朋友和家人，并怀着感恩之心继续前行。

作者简介

学习经历

陈炜，男性。2023年毕业于江西理工大学建筑与测绘工程学院地理信息科学专业，获理学学士学位。2023年9月起在石河子大学理学院地理学专业学习，攻读理学硕士学位。

在学期间主要参与的研究项目

- 1.参加了第三次新疆综合科学考察项目《塔里木河流域产/需水要素变化与水资源格局调查》（2022xjkk0101）的部分研究工作。
- 2.参与了第二次青藏高原综合科学考察研究（2019QZKK0201）“冰川、冻土、积雪、地下水”和“亚洲水塔变化与南北极变化联动影响”的相关研究工作。
- 3.参与了新疆昌吉州主要河流冰川资源现状、变化及其对水资源的影响研究项目（CJZ-HLBC-ZYXZ-BHJYX-2024）的相关研究工作。
- 4.参加了天山北坡主要河流冰川分布、变化及其水文影响项目（2025.A-002）的相关研究工作。

攻读硕士学位期间的主要野外考察与科研学习活动

- 1.2023年7月，参加新疆三次科考慕士塔格峰16号冰川考察任务；
- 2.2024年5月，参加天山站组织的乌鲁木齐河源1号冰川春季观测任务；
- 3.2024年8月，参加天山站组织的2024年天山站高山冰雪变化及其影响学术年会暨“天山冰川站科研启航计划”；
- 4.2024年9月，参加天山站组织的玛纳斯河流域鹿角湾冰川考察；
- 5.2025年4月，参加天山站组织的乌鲁木齐河源1号冰川春季观测任务。

在学期间发表的文章

Chen, W., Li, Z., Xu, L., Zhan, Z., Liang, Q., Wang, Q., Xi, J., Liu, B., Zhao, W., & Yang, Y. (2026). Glacier distribution and changes in the Junggar Inland Basin, Xinjiang, northwestern China. *Research in Cold and Arid Regions*. <https://doi.org/10.1016/j.rcar.2026.03.005>.

石河子大学硕士研究生学位论文导师评阅表

研究生姓名	陈炜	学制	全日制
专业	地理学	研究方向	冰川遥感

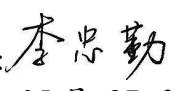
学术评语:

该生硕士学位论文《基于冰川编目的准噶尔盆地内流区冰川现状及变化研究》选题具有较强的区域特色和现实意义。论文以准噶尔盆地内流区冰川为研究对象,围绕冰川编目更新、冰川分布现状及1960—2020年冰川变化特征开展研究,研究内容符合地理学及冰川遥感研究方向要求,对认识新疆北部干旱区山地冰川资源现状、冰川退缩过程及其区域差异具有一定参考价值。

论文基于国产高分辨率遥感影像、历史冰川编目资料、DEM数据和典型监测冰川资料,采用遥感解译、GIS空间分析、冰川编码匹配和统计分析等方法,建立了准噶尔盆地内流区2020年冰川编目数据集,并对研究区冰川分布格局、长期面积变化、不同山脉与流域尺度差异以及典型监测冰川变化过程进行了较为系统的分析。论文数据资料较为翔实,技术路线清晰,研究方法基本合理,结果分析较为充分,所得结论能够较好支撑论文研究目标。

论文结构完整,层次较清楚,文字表达较规范,图表资料较丰富,能够体现作者较好的专业基础、遥感与GIS数据处理能力以及独立开展科研工作的能力。论文在更新区域冰川编目、开展多期编目一致性处理和揭示准噶尔盆地内流区冰川长期变化特征等方面具有一定工作量和应用价值。

总体来看,该论文达到了硕士学位论文的要求,同意提交答辩,并建议授予硕士学位。

指导教师签字:  

2026年05月27日