

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产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