

分类号：
学号：20222018019

密级：公开
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



基于冰川变化脆弱性与服务价值的冰川生态管理研究——以中国阿尔泰山地区为例

学位申请人	戴玉萍
指导教师	王璞玉 研究员 张正勇 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	冰川变化与可持续发展
所在学院	理学院

中国·新疆·石河子

2025年5月

分类号：
学号：20222018019

密级：公开
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



基于冰川变化脆弱性与服务价值的冰川生态管理研究——以中国阿尔泰山地区为例

学位申请人	戴玉萍
指导教师	王璞玉 研究员 张正勇 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	冰川变化与可持续发展
所在学院	理学院

中国·新疆·石河子

2025年5月

**Research on glacier ecological management based on glacier change
vulnerability and service value: A case study of Chinese Altai
Mountains region**

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Natural Science

By

Dai Yuping

(Geography)

Dissertation Supervisor: Prof. Wang Puyu & Prof. Zhang zhengyong

May, 2025

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

本人所提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：戴玉萍

时间：2025年5月16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：戴玉萍

时间：2025年5月16日

导师签名：王璞玉 张正勇

时间：2025年5月16日

摘要

冰川作为冰冻圈重要的组成要素，是气候变化的指示器和预警器。作为干旱区重要的淡水资源，冰川变化脆弱性和冰川生态服务价值与区域社会经济发展密切相关。本研究以中国阿尔泰山地区为例，基于 Landsat 遥感影像数据、气象数据、地表径流数据、植被覆盖数据和相关社会经济数据等，构建了冰川变化脆弱性和冰川生态服务价值评估体系，定量评估了 2000—2020 年中国阿尔泰山地区的冰川变化脆弱性及服务价值，明确了该地区冰川变化脆弱性与服务价值的时空分异特征，并利用障碍度模型进一步分析了阻碍冰川变化脆弱性降低的影响因素。最后，基于脆弱性与服务价值的评估结果，建立了“高脆弱-高价值的优先保护区”与“高脆弱性-服务价值变化率的敏感响应区”的分区体系，形成了冰川生态保护分区格局，为实现区域冰川生态系统管理提供了重要的科学依据。得出的结论如下：

(1) 1990—2020 年间，中国阿尔泰山地区冰川面积与冰储量以约 0.67%/a 的速率持续减小。但不同县市间冰川面积变化率差异显著，青河县冰川面积缩减速率最大，达 2.43%/a，而布尔津县最小，仅为 0.60%/a。2000—2020 年间，中国阿尔泰山地区冰川变化脆弱性呈持续上升趋势。在空间上呈现出西南部和中部地区脆弱性较低，北部和东部地区脆弱性较高的分布格局。随着社会经济条件与适应能力持续改善，阻碍冰川变化脆弱性降低的主要障碍因子逐步从 2000 年的城镇固定资产投资、粮食总产量等适应能力与敏感性维度，向暴露度维度集中。至 2020 年，阻碍冰川变化脆弱性降低的主要障碍因素都集中于暴露度维度，其中冰川自身变化与发育水平是阻碍脆弱性降低的主要原因。

(2) 2020 年中国阿尔泰山地区的冰川生态服务价值为 36.49 亿元，气候调节是该地区冰川最主要的服务，其次是径流调节和淡水资源供给，三者分别占总价值的 87.88%、8.82%、2.47%。中国阿尔泰山西北部的冰川生态服务价值显著高于东南部，不同县域的冰川生态服务价值存在显著差异，其中布尔津县的冰川生态服务价值最高，为 27.31 亿元，青河县的冰川生态服务价值最低仅为 0.03 亿元。2000—2020 年中国阿尔泰山的冰川生态服务价值呈递减趋势，共减小 41.99 亿元，服务价值变化率为-53.51%，除和布克赛尔县、吉木乃县和青河县在 2000—2010 年间的冰川生态服务价值有所增长外，各县市的冰川生态服务价值在不同的时间段均处于减少状态。

(3) 在核心区域管控层面，基于高脆弱-高价值和高脆弱性-服务价值变化率划定的冰川变化优先保护区和冰川变化敏感区包括：哈巴河、布尔津、和布克赛尔、福海、吉木乃和青河六个县市。其中，哈巴河县和布尔津县仅为优先保护区，应当对其划定冰川保护红线和缓冲区，对红线内的区域实行严格管控，对缓冲区允许低强度的人类活动。和布克赛尔县和福海县仅为冰川变化敏感区，针对这一类县市需要根据每个地区的不同情况采取适应性策略，提高区域应对冰川变化敏感度的能力。吉木乃县和青河县为优先保护-敏感区，在这类县市的冰川保护中既需要划定冰川保护红线和缓冲区，又需要采取适应性策略提高区域应对冰川变化的适应能力。在调控全区脆弱性层面，未来减缓阿尔泰山地区冰川变化脆弱性的路径可从增加城镇固定资产投资、提高水资源利用效率、控制区域人口规模、参与减缓气候变化行动和直接进行冰川保护等方面进行。

关键词：中国阿尔泰山地区；冰川变化；脆弱性；服务价值；冰川生态系统管理

Abstract

Glaciers, as an important component of the cryosphere, are indicators and early warning systems of climate change. As an important freshwater resource in arid areas, the glacier change vulnerability and glacier ecological service value are closely related to regional socio-economic development. Based on Landsat remote sensing image data, meteorological data, surface runoff data, vegetation cover data, and related socio-economic data, this study constructed an evaluation system for glacier change vulnerability and glacier ecological service value in the Chinese Altai Mountains region. It quantitatively evaluated the glacier change vulnerability and glacier ecological service value from 2000 to 2020 and clarified the temporal and spatial differentiation characteristics of vulnerability and service value in this region. The obstacle degree model was used to further analyze the influencing factors that hindered vulnerability reduction. Finally, based on the evaluation results of vulnerability and service value, a zoning system of “high vulnerability-high value priority protected areas” and “high vulnerability-sensitive response areas with change rate of service value” was established. The conclusions reached are as follows:

(1) From 1990 to 2020, the glacier area and volume in the Chinese Altai Mountains region had continued to shrink at a rate of about $0.67\% \text{ a}^{-1}$. However, the change rate of glacier area among different counties and cities was significantly different. Qinghe County had the largest shrinking rate of glacier area, reaching $2.43\% \text{ a}^{-1}$, while Burqin County had the smallest rate, only $0.60\% \text{ a}^{-1}$. From 2000 to 2020, the glacier change vulnerability in the Chinese Altai Mountains showed a continuous upward trend. Spatially, it showed a distribution pattern of low vulnerability in the southwest and central areas and high vulnerability in the north and eastern areas. With the continuous improvement of social and economic conditions and adaptability, the main obstacle factors hindering the reduction of vulnerability to glacier change gradually concentrated from the adaptability and sensitivity dimensions such as urban fixed asset investment and total grain output in 2000 to the exposure dimension. By 2020, the main obstacles to the reduction of vulnerability of glacier change were concentrated in the exposure dimension, among which the changes and development levels of glaciers themselves were the main reasons hindering the reduction of vulnerability.

(2) In 2020, the glacier ecological service value in the Chinese Altai Mountains region was 3.649 billion yuan. Climate regulation was the most important service of glaciers in this region, followed by runoff regulation and freshwater resource supply, which accounted for 87.88%, 8.82%, and 2.47% of the total value respectively. The glacier ecological service value in the northwest of the Chinese Altai Mountains region was significantly higher than that in the southeast, and there were significant differences in different counties. From 2000 to 2020, the glacier ecological service value in the Chinese Altai Mountains region showed a decreasing trend, with a total decrease of 4.199 billion yuan, and the change rate of service value was -53.51% . Except for the increase of glacier ecological service value in Burqin County, Jimnai County, and Qinghe County from 2000 to 2010, the glacier ecological service value in all counties and cities decreased in different time periods.

(3) At the core regional management and control level, glacier change priority protection areas and glacier change sensitive areas delineated based on high vulnerability-high value and high vulnerability-service value change rates include: Habahe, Burqin, Haboksair, Fuhai, Jimnai and Qinghe six

counties and cities. Among them, Habahe County and Burqin County are only priority protected areas, and glacier protection red lines should be designated for them, and the areas within the red lines should be strictly controlled. Haboksair County and Fuhai County are only sensitive areas to glacier change. For this kind of counties and cities, it is necessary to adopt adaptive strategies according to the different conditions of each region to improve the regional ability to cope with the sensitivity of glacier change. Jimnai County and Qinghe County are priority protection-sensitive areas. In the glacier protection of such counties and cities, it is necessary to delineate the red line of glacier protection, and adopt adaptive strategies to improve the regional adaptability to glacier changes. At the level of regulating the vulnerability of the whole region, the ways to mitigate the glacier change vulnerability in the Chinese Altai Mountains region in the future can be from increasing urban fixed asset investment, improving water resources utilization efficiency, controlling regional population size, participating in climate change mitigation actions and directly protecting glaciers.

Key words: Chinese Altai Mountains region; Glacier changes; Vulnerability; Service value; Glacier ecosystem management

目录

摘要.....	I
Abstract.....	II
第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景和研究意义.....	1
1.2 国内外研究进展.....	2
1.2.1 冰川变化脆弱性研究.....	2
1.2.2 冰川生态服务价值研究.....	3
1.2.3 冰川生态系统管理.....	5
1.3 研究目标和内容.....	6
1.3.1 研究目标.....	6
1.3.2 研究内容.....	6
1.3.3 技术路线.....	7
第二章 研究区概况.....	8
2.1 地理概况.....	8
2.2 气候特征.....	8
2.3 冰川分布.....	9
2.4 社会经济情况.....	10
第三章 数据与方法.....	12
3.1 数据获取与处理.....	12
3.1.1 遥感影像数据.....	12
3.1.2 气象数据.....	13
3.1.3 地表径流数据.....	14
3.1.4 植被覆盖数据.....	14
3.1.5 社会经济数据.....	14
3.2 研究方法.....	15
3.2.1 冰川变化.....	15
3.2.2 冰川变化脆弱性评估.....	16
3.2.3 冰川生态服务价值评估.....	20
3.2.4 冰川变化优先保护区与敏感区识别.....	25
第四章 冰川变化脆弱性评估.....	27
4.1 冰川变化.....	27
4.1.1 冰川变化特征.....	27
4.1.2 冰川变化对气候的响应.....	28

4.2 冰川变化脆弱性时空变化	29
4.2.1 各维度时空变化	29
4.2.2 脆弱性综合评估	32
4.3 脆弱性影响因素分析	33
4.3.1 各维度的障碍度分析	34
4.3.2 脆弱性的主要影响因素	36
第五章 冰川生态服务价值核算	38
5.1 冰川生态服务价值现状特征	38
5.2 冰川生态服务价值空间分布差异	39
5.2.1 冰川生态服务价值总体空间分布差异	39
5.2.2 不同类型的单项服务价值空间差异	40
5.3 冰川生态服务价值变化	42
5.3.1 冰川服务功能价值总体变化	42
5.3.2 各县市冰川生态服务价值变化	43
5.3.3 不同类型的单项冰川生态服务价值变化	45
第六章 冰川生态系统优先保护区和敏感区识别及适应性管理策略	47
6.1 冰川生态系统优先保护区与敏感区识别	47
6.2 适应性管理策略	50
6.2.1 核心区域管控：优先保护区与敏感区协同管理	50
6.2.2 全域脆弱性调控：冰川变化脆弱性的减缓路径	52
第七章 结论与展望	54
7.1 主要结论	54
7.2 研究创新点	55
7.3 不足与展望	56
参考文献	57
致谢	64
作者简介及攻读学位期间发表的论文情况	65

第一章 绪论

1.1 研究背景和研究意义

冰冻圈是具有一定厚度且连续分布于地球表层的负温圈层,包括所有种类的冰、雪和冻结土(施雅风等,2000)。该圈层不仅是监测全球气候系统变化的灵敏指示器,更通过能量传输与物质循环的反馈机制,对地球系统起着调节作用(Marshall et al., 2011; Xiao et al., 2015)。研究显示,冰冻圈对邻近的自然和人类系统具有深远影响,其演变直接关系到区域环境的稳定性(秦大河等,2014, 2017)。作为冰冻圈的重要组成部分,冰川会与大气进行复杂的交互作用,并表现出对气候变化高度敏感及双向反馈的特性。这种独特的响应机制使得冰川变化常被作为反映气候变化的核心指标,其不仅能揭示区域环境变化,还能有效指示全球尺度的气候变迁规律(Thomas et al., 2011)。

全球陆地表面约10%的区域被冰川覆盖,这些固态水库储存着地球上近70%的液态淡水。值得注意的是,分布于人类聚居区周边的山地冰川具有特殊的利用价值。尤其是在干旱和半干旱地区,高山的冰川融水维系着绿洲农业的生命线,同时也是许多大江大河源头的重要补给(蓝永超等,2007)。作为高寒地带特有的固态水库,冰川不仅维系着区域水系的年内径流量稳定,对季节性水资源分配进行有效调节,同时孕育出独特的山地生态系统,为绿洲农业灌溉、清洁能源开发及文化遗产传承提供了不可或缺的自然基底(Gagné et al., 2014)。

19世纪后期以来,地球气候系统呈现显著增温趋势。观测数据表明,1880—2012年间全球地表平均温升达 0.85°C (IPCC., 2013; 秦大河等, 2014)。在气候变暖的大环境下,世界范围内的冰川出现明显的萎缩现象(Kraaijenbrink et al., 2017; IPCC., 2018)。1971—2009年,全球山地冰川的储量以年均约226 Gt的速度下降(IPCC., 2013; 秦大河等, 2014)。中国山地冰川与全球冰川变化规律一样,也表现出面积缩减、厚度减薄及物质持续亏损的状态,且2000年后消融速率显著加快(第三次气候变化国家评估报告编写委员会., 2015)。在干旱区绿洲扩张与城镇化进程加速的背景下,冰川持续消融将加剧区域水资源供需矛盾,威胁生态环境稳定与社会经济可持续发展(张凯等, 2011; Pritchard et al., 2019)。

受气候变化和人类活动的双重影响,冰川除气候调节和水文的调节功能外,其生态环境效应亦日益凸显,冰川变化对人类社会带来的风险和服务均在发生深刻的变化(秦大河等, 2014)。一方面,冰川变化首先影响气候、水资源、生态系统、环境等,继而通过上述自然过程影响区域社会经济发展,造成区域应对冰川变化的脆弱性提高。另一方

面,冰川与森林、草地等生态系统类似,具有向人类社会及自然界提供水资源、栖息地等产品或服务的功能(效存德等,2016),在全球变暖的背景下,随着冰川持续融化,再加上缺少科学有效的管理,导致冰川服务呈日益退化趋势(效存德等,2020)。因此,科学评估区域冰川变化脆弱性及冰川生态系统提供的服务价值,是构建冰川资源可持续管理体系的基础。通过区域冰川变化脆弱性与服务价值进行量化评估,能够系统辨识冰川生态系统的功能特征与变化的风险等级。基于两者的评价结果科学地划定和识别冰川优先保护区与冰川变化敏感区,不仅能够为区域经济发展提供稳定的水资源保障,还能有效保护生物多样性、气候调节等生态服务功能,从而实现经济、生态和社会的协调发展。

中国阿尔泰山是我国冰川退缩最强烈的地区之一(Yao et al., 2012; Wang et al., 2020; Su et al., 2022; Wang et al., 2024)。在1960—2009年间,中国阿尔泰山冰川面积和数量分别减少了104.61 km²和116条(Yao et al., 2012)。2000—2021年,该地区冰川融水年均量为3.16×10⁸ m³(Wang et al., 2024),占区域总水资源的3.16%,是2020年该地区总供水量的8.54倍,可满足606万人全年用水需求。尤其是在干旱季节和年份,冰川融水可提供稳定的水源,对维持干旱地区生态系统的稳定性和绿洲的存续发挥着关键作用(Jia et al., 2024)。因此,冰川的显著退缩预计将对区域产生重大影响,导致当地气候、水文过程和区域水资源发生变化,这些变化进一步对区域生态、社会经济和人口的可持续发展产生了深远影响(Chang et al., 2022; Wang et al., 2024)。当前亟需以县域为基本单元,系统评估中国阿尔泰山地区冰川变化脆弱性与冰川生态服务价值,并基于评估结果探索科学化、差异化的冰川生态系统适应性管理策略。

1.2 国内外研究进展

1.2.1 冰川变化脆弱性研究

脆弱性是指人类与环境系统因外部干扰或胁迫而可能遭受损害的程度(Turner et al., 2003),其概念最早源于自然灾害研究领域,随后逐步扩展到气候变化、生态评估及社会经济等多元学科(Birkmann et al., 2007; Birkmann et al., 2013)。随着应用领域的不断扩展,其概念与内涵逐渐丰富:早期研究主要聚焦自然系统的物理暴露度与敏感性,而近年来全球气候持续变化引发的生态系统扰动频率加快、影响范围扩大且强度显著增强(IPCC., 2012; IPCC., 2013),促使学界对气候变化影响机制的认识从单纯关注自然环境效应转向社会经济可持续发展维度(Reid et al., 2013)。在此背景下,脆弱性的定义范式发生重要演变——从单一强调自然要素驱动转向整合社会因素的作用机制,具体表现为将社会系统的敏感性与适应能力纳入评估框架(IPCC., 2012),从而构建起自然-社会耦合的综合性分析视角。

中国科学家在 2007 年提出冰冻圈及其变化的脆弱性概念。具体包含两个层面：一是冰冻圈的脆弱性，即冰冻圈对气候变化的脆弱性，属于自然系统的脆弱性，根据冰冻圈要素组成可以分为冰川的脆弱性、积雪的脆弱性、冻土的脆弱性等；二是冰冻圈变化的脆弱性，即系统对冰冻圈变化影响的脆弱性，系统可以包括干旱区环境—绿洲社会经济系统、寒区生态系统等（杨建平等, 2015）。

冰川系统脆弱性评估的理论基础源于冰冻圈变化的脆弱性研究。目前国内外学术界对于冰川系统脆弱性的评估分析仍处于初步探索阶段（Pan et al., 2011; Immerzeel et al., 2020）。我国科学家早在 2007 年就关注到冰川动态变化与区域发展之间的联系，但如何构建冰川变化自然过程与社会经济系统之间的耦合机制仍是当前研究的重点突破方向。（杨建平等, 2010）。目前冰川脆弱性的研究已经从概念和理论的定性研究转向脆弱性评估指标和模型构建、因子指数的计算等定量研究。其主要的研究内容可以分为以下几个方面：①冰川脆弱性评估指标和模型的构建，不同的研究者依据研究目标的特点和目的，科学合理地选择脆弱性的评估指标对区域的冰川脆弱性指数进行计算。目前，常用的冰川变化脆弱性指数模型计算方法包括主成分分析法、综合指数法、熵值法等（杨建平等, 2013; Mustafa et al., 2020; Cai et al., 2021）。②研究不同系统对冰川变化的脆弱性，包括人类环境系统（Bury et al., 2011）、社会经济系统（王世金等, 2018）、水资源系统（Anderson et al., 2020），以及冰川变化对区域水循环和生态系统的影响（姚檀栋等, 2013）。③基于未来气候情形对冰川脆弱性的评估，部分学者利用 IPCC 发布的未来气候情景模型对未来冰川脆弱性做了预测和评估（He et al., 2012; 杨建平等, 2013）；④开展风险—脆弱性—适应全链式研究。在此类型的研究中，学者们一方面通过影响分析、风险与脆弱性评价，从关键驱动因素中提炼适应措施（王世金等, 2014, 2017）；另一方面，对已实施的适应措施，如种植业结构调整、节水技术、人工草地和暖棚建设等进行模型评估，从而达到量化不同措施的实施效果和优劣的研究目的（李曼等, 2015）。然而，在冰川变化脆弱性的研究中，评估结果的不确定性主要受指标选取标准差异及模型构建方法异质性等因素共同影响。在区域冰川变化脆弱性评价中，指标的选取存在精度与广度的矛盾（Cai et al., 2022），对长时间和小尺度上的研究也较为缺乏，许多数据在县域尺度上获取比较困难。但当前我国可持续发展战略的开展以县域为基本管理单位，因此，从县域视角上进行长时间、小尺度的区域冰川变化脆弱性研究是十分必要和迫切的。

1.2.2 冰川生态服务价值研究

冰川与森林、草地、湿地、海洋等生态系统类似，具有完整的服务功能，它能为人类社会提供淡水资源、水力发电和气候调节等多种服务（效存德等, 2016）。然而，以往研究多关注冰川变化产生的致灾效应，对冰川致利效应的研究相对较少（效存德等, 2019; 林浩曦等, 2020），加之冰川所在地区往往地理位置偏远、自然环境脆弱和社会经济水平

相对较低，公众认知和重视程度也处在较低水平，冰川服务未能引起足够的重视（效存德等, 2020）。随着社会经济的发展，冰冻圈服务的重要性日趋凸显，2016年习近平总书记提出“绿水青山是金山银山，冰天雪地也是金山银山”论述，更加强了各界对冰冻圈服务的重视（林浩曦等, 2020）。

目前冰川服务等冰冻圈致利方面的研究仍处于探索阶段（效存德等, 2019）。已有的冰川服务相关研究主要分为以下几个方面：①服务功能的划分。效存德等参考生态服务价值的划分方法，将冰冻圈服务功能划分为供给服务、调节服务、支持服务和文化服务四个大类以及淡水资源、清洁能源、气候调节等九个子类（效存德等, 2016, 2019, 2020）。②不同区域冰川生态服务价值评估。不同学者依据各地区特点和研究目的，评估了天山、祁连山、三江源等区域的冰川生态服务价值（张正勇等, 2018; 孙美平等, 2021; 马维谦等, 2021; Cai et al., 2023; Sun et al., 2023），发现冰川生态服务价值在不同流域和山系中存在显著的时空差异（孙美平等, 2021; 马维谦等, 2021; Sun et al., 2023）。③不同视角的冰川生态服务价值评估。如：从冰川水资源视角编制冰川水资源资产负债表（孙振元等, 2021），同时基于“资源—资产—资本”视角探讨冰冻圈资源可持续利用路径（李晨毓等, 2020）。④冰川生态服务价值评估方法。冰川生态服务功能具有多样性和复杂性，针对不同的服务功能需要利用不同的评价方法。当前对冰川生态服务价值评估的方法主要有三种：单位服务功能价格法、能量平衡法和价值当量因子法。单位服务功能价格法能够对不同服务功能和不同区域进行多样化评估，是目前最为全面且准确的评估方法之一（张正勇等, 2018; 孙美平等, 2021; 马维谦等, 2021; Cai et al., 2023; Sun et al., 2023）。能量平衡法使用能量平衡模型模拟冰川能量平衡过程，获得冰川融化消耗的能量和消融量，但对一些气象站分布较少的高山地区进行评估时会存在较大误差（马维谦等, 2021）。传统价值当量评估多采用专家经验法作为主要判定依据，这一方法局限于冰川面积，未能充分考虑冰川储量动态变化的时空异质性特征（谢高地等, 2015），在用于冰川生态服务价值计算时会存在一定误差，因此在研究特定区域时，需要对当量因子进行修正（孙美平等, 2021; 马维谦等, 2021）。

国内冰川生态系统服务价值评估领域仍处于探索阶段，现有研究虽构建了基础理论框架（效存德等, 2016, 2019, 2020），但仍面临以下核心问题：①冰川生态服务功能评估标准体系不完善。主要表现为分类标准与评估指标缺乏统一规范，评估结果的准确性难以验证比较。②冰川生态服务功能评价方法仍需完善。目前，冰川生态服务功能的定量评估主要借用生态系统服务的评估方法，而与森林、草原、湖泊等相比，冰川具有自身的特殊性，需要针对冰川的特征特点对评价方法进行改进和更新使其在冰川生态服务价值评估中更加适用。③缺乏对冰川生态服务功能评估的空间分异和动态变化规律的研究。由于冰川资源的空间分布不均，且难以获取长期连续的冰川资料，现有的冰川生态服务功能评估多停留在静态层面，缺乏对其空间分异和动态变化规律的定量研究。④针对大

尺度区域的冰川生态功能开展了大量的研究,但在县域尺度上对其进行精细的研究却很少。随着冰冻圈科学的不断发展,冰川服务功能的研究已从单一功能向更全面的综合评估转变。然而,现有研究主要聚焦在省域、流域、山系等尺度单元,针对县域尺度的系统性分析仍显不足,导致县级尺度的冰川生态服务价值受到忽视而未能深入认识。

1.2.3 冰川生态系统管理

生态系统管理概念于 1992 年正式提出,旨在协调人类需求与生态系统的多样性保护、健康及可持续性 (Kaufmann et al., 1994)。早期管理多依赖资源禀赋与地方经验,以最大化粮食、木材或渔业产量为目标 (Berkes et al., 2000; Sáenz-Arroyo and Roberts, 2008)。随着生态系统多稳态理论 (Robbins, 2013) 与非线性响应特性 (Levin et al., 2013) 的提出,管理目标从单一物质产出转向综合服务价值优化,涵盖生产、调控、支持与文化功能 (Adeel et al., 2005)。人类社会经济活动作为生态系统的有机组分 (Heesterbeek et al., 2015),增加了生态管理的复杂性。传统自上而下实现产量最大化的平衡态管理难以应对多元化服务间的权衡 (DeFries et al., 2004)。为此,相关学者提出采用系统性方法替代单一产出最大化策略 (Grumbine, 1994; Sayer et al., 2013)。当前生态系统管理需整合多部门协作与弹性机制 (Armitage et al., 2009; Nagendra and Ostrom, 2012),突破行政边界 (Blum and Roberts, 2009; Koplitz et al., 2016),并探索市场化服务补偿 (Guerry et al., 2015),以实现生态-社会系统的动态适应与可持续调控。

冰川生态管理是指通过科学规划、系统保护和合理利用等措施,对冰川及其周边生态系统进行保护和管理,以维护冰川生态系统的稳定性和生态服务功能。当前,已有部分学者提出和给予了解决冰川生态管理相关问题的对策。在适应性管理策略方面, Cook et al. (2021) 基于共同生产理论构建冰川生态系统服务模型,揭示人类干预在淡水资源供给、水力发电等冰川服务中的必要性,并提出供需调控、气候适应性水电设计、区域多主体协同治理和全球协作四维适应性管理框架。康世昌等 (2020) 基于对全球山地冰冻圈变化的影响研究,提出了资源优化、多方利益平衡、聚焦灾害风险防控、提升区域适应能力等应对策略。在政策法律方面, Anaconda et al. (2018) 通过分析阿根廷和智利有关冰川保护法律发现,当前制定的冰川保护法律忽视了冰川的动态变化,可能阻碍人工湖排险等灾害防控措施实施以及冰川湖调蓄功能等气候适应策略应用,加剧下游居民安全风险,应当制定更灵活的冰川保护法律来保护下游人口免受冰冻圈变化的影响。在技术管理方面, Niranchana et al. (2023) 在冰川生态系统管理中使用一种智能能源监测系统 (Intelligent Energy Monitoring Systems) 监测冰川环境中的能量动态,为研究者提供温度波动、冰融化速率和冰川能量平衡的实时数据。中国第二次青藏科考团队通过无人机航测、遥感监测及水文气象自动系统构建了“冰川—大气—水—土壤—生态”多圈层监测网络,成功预警雅鲁藏布江冰崩堵江灾害 5 次,推动了冰湖溃决风险的科学评估

(姚檀栋等, 2022)。

随着气候变暖的加剧, 冰川生态系统面对冰川加速退缩与功能退化的双重压力。然而, 传统的冰川管理多集中在冰川变化的物理监测以及灾害预警, 缺少兼顾生态安全与可持续利用的科学管理体系。与此同时, 由于不同冰川分布区的自然、社会经济条件不同, 冰川生态管理也很难具有统一的管理标准和策略。因此, 依据不同地区的特点, 统筹脆弱性调控与服务价值保护和利用, 制定适应于本地的冰川保护分区, 依据不同分区实施不同的适应性策略是实现区域冰川生态系统管理的关键。

1.3 研究目标和内容

1.3.1 研究目标

本研究以中国阿尔泰山地区为研究对象, 旨在分析 1990—2020 年间中国阿尔泰山冰川变化特征, 系统地评估和分析该地区冰川变化脆弱性和服务价值的时空变化特征。在此基础上, 尝试将冰川变化的脆弱性与冰川服务相结合, 建立“高脆弱-高价值的优先保护区”和“高脆弱性-服务价值变化率的敏感响应区”的分区体系。针对这两个区域的划分结果, 并结合冰川变化脆弱性的影响因素分析, 提出相应的冰川生态管理方案。

1.3.2 研究内容

本研究基于冰川学、地理学与生态经济学理论框架, 建立了中国阿尔泰山地区冰川变化脆弱性及服务价值的综合评估体系。旨在系统评估该地区冰川变化的脆弱性及其服务价值的变化特征, 探析影响冰川变化脆弱性的因素, 并建立“高脆弱-高价值的优先保护区”和“高脆弱性-服务价值变化率的敏感响应区”的分区体系, 为阿尔泰山地区制定应对适应冰川变化的相关政策措施提供研究基础。本文的研究内容主要围绕以下几个方面展开:

1、冰川变化脆弱性评估

基于多源遥感影像数据, 划定 1990、2000、2010 和 2020 年中国阿尔泰山地区冰川边界, 分析 1990—2020 年冰川面积和储量的时空变化特征及其对气候变化的响应。在冰川变化研究的基础上, 结合气象、地形、地表径流和相关社会经济等数据, 构建涵盖暴露度、敏感性和适应能力的冰川变化的脆弱性评估指标体系, 评估分析 2000—2020 年间中国阿尔泰山地区脆弱性时空变化并探究脆弱性的影响因素。

2、冰川生态系统服务价值评估

基于冰川和相关社会经济等数据, 构建冰川服务评估指标体系, 评估分析中国阿尔泰山地区冰川生态服务价值现状特征及空间分布, 揭示 2000—2020 年冰川生态服务价

值的动态变化机制。

3、冰川优先保护区识别与适应性管理

基于冰川变化脆弱性评估与服务价值的核算，建立“高脆弱-高价值的优先保护区”与“高脆弱性-服务价值变化率的敏感响应区”的分区体系，形成中国阿尔泰山地区冰川生态系统管理分区图，针对优先保护区和敏感区的分区结果，结合冰川变化脆弱性的影响因素分析，提出针对不同类型地区的冰川生态管理方案，为冰川保护与区域发展矛盾提供决策路径。

1.3.3 技术路线

本文的研究技术路线图，如图 1-1 所示。

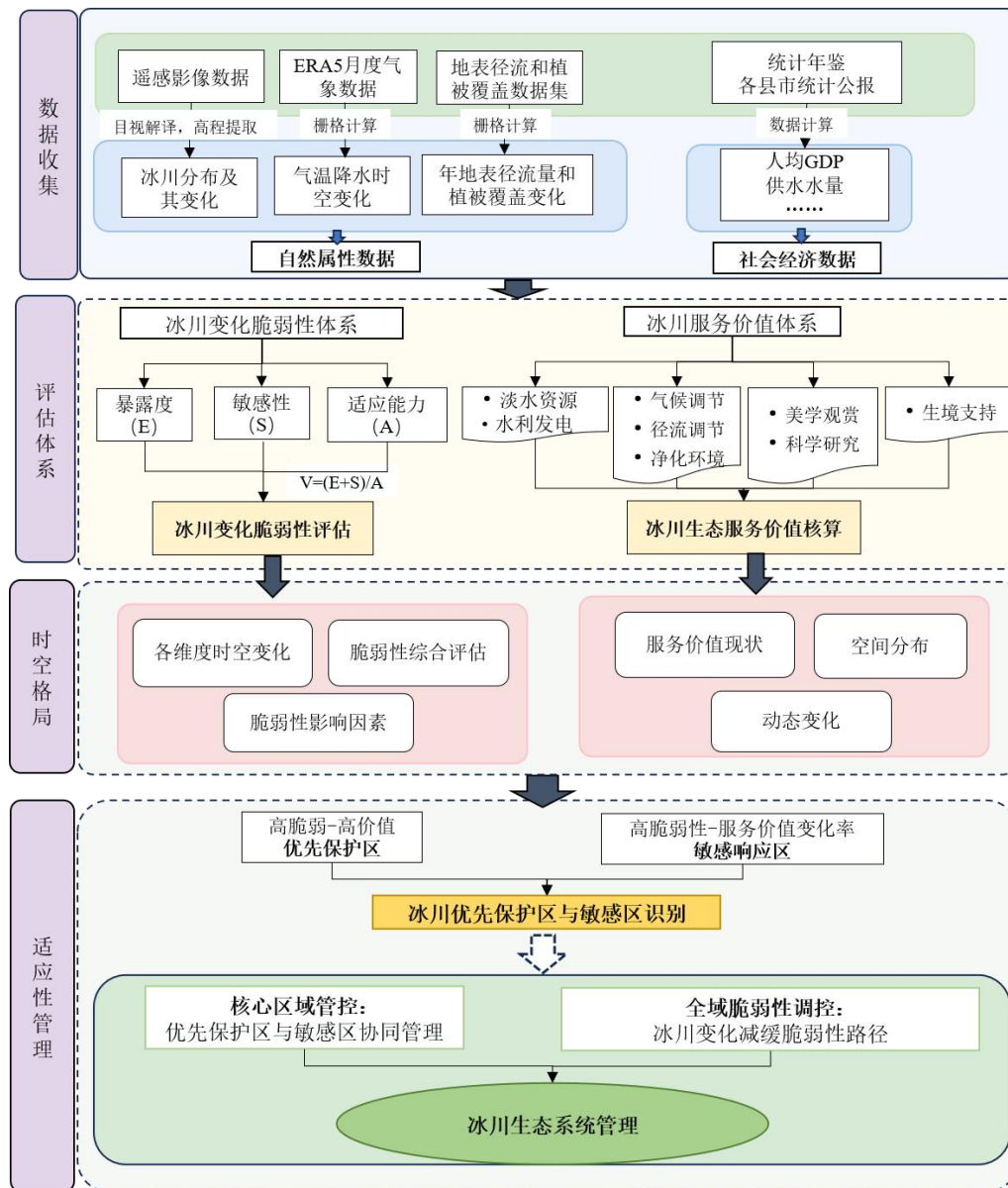


图 1-1 技术路线图

Figure 1-1 Technology roadmap