

附件 7

《全国生态状况调查评估技术规范—— 冰川规模和冰量变化观测（征求意见稿）》

编制说明

标准编制组

二〇二六年八月

目 录

- 1 项目背景 1
 - 1.1 任务来源 1
 - 1.2 主要工作过程 1
- 2 标准制订的必要性分析 1
 - 2.1 制订标准的法律法规依据 1
 - 2.2 项目相关行业概况 2
 - 2.3 相关生态环境标准和环境管理工作的需要 4
- 3 国内外相关标准情况的研究 4
 - 3.1 国外相关标准情况的研究 5
 - 3.2 国内相关标准情况的研究 7
- 4 标准制订的基本原则和技术路线 10
 - 4.1 标准制订的基本原则 10
 - 4.2 标准制订的技术路线 11
- 5 标准主要技术内容 11
 - 5.1 标准适用范围 11
 - 5.2 规范结构框架 12
 - 5.3 规范性引用文件 12
 - 5.4 术语和定义 12
 - 5.5 标准主要技术内容确定的依据 14
- 6 与国内外同类标准的水平对比和分析 20
- 7 标准实施建议 21
 - 7.1 拟定标准实施需配套的管理措施、实施方案建议 21
 - 7.2 与拟定标准实施相关的科研建议 21
- 8 参考文献 21

1 项目背景

1.1 任务来源

根据《关于开展 2023 年度国家生态环境标准项目实施工作的通知》（环办法规函〔2023〕340 号），《全国生态状况调查评估技术规范——冰川面积和冰量变化观测》列入 2023 年标准制订项目，项目统一编号：2023-13。该标准制订项目牵头单位是生态环境部卫星环境应用中心，参加单位有云南大学、湖南科技大学、新疆生产建设兵团环境保护科学研究所和西藏自治区生态环境监测中心。

1.2 主要工作过程

依据《国家生态环境标准制修订工作规则》（国环法规〔2020〕4 号），项目承担单位生态环境部卫星环境应用中心组织专家和相关单位成立了技术规范编制组，组织开展项目研究、文献资料分析和国内外相关研究成果调研，并在此基础上召开研讨会，讨论并确定了开展技术规范编制工作的原则、程序、步骤和方法，形成了技术规范初稿。具体过程如下：

前期研究：2024 年 3 月，开展调研，明确编制目标、涉及的观测指标和获取方法等。根据冰川具有独特的形成过程、规模形态和运动特性，兼顾可操作性和科学性的原则，确定编制内容。

形成开题报告和标准草案：2024 年 4 月，根据调研情况，形成初步的标准编写思路；2024 年 6 月，讨论并初步形成《全国生态状况调查评估技术规范——冰川面积和冰量变化观测》标准草案和项目开题论证报告，提交至标准所，并根据意见和要求进行修改。

标准开题：2025 年 9 月，自然生态保护司在卫星中心组织召开标准开题论证会，标准所技术负责同志参会，专家组对标准草案存在问题提出意见，并对下一步改进给予专题指导。

形成标准征求意见稿：2025 年 11 月，编制组根据开题论证会的专家意见，对规范体系 and 内容进一步修改完善，形成目前的标准征求意见稿和编制说明。

2 标准制订的必要性分析

2.1 制订标准的法律法规依据

《中华人民共和国生态环境法典》第六百八十八条：国家加强土地、矿产、森林、草原、湿地、海洋、海岛、江河湖泊、雪山冰川、荒漠、野生动植物、水土保持等自然资源状况和生态状况的调查评价，为保障生态安全、合理开发和高效利用国土空间及各类自然资源提供依据。

《中共中央 国务院关于深入打好污染防治攻坚战的意见》中明确要求“建立全国生态状况评估报告制度”，《中共中央 国务院关于全面推进美丽中国建设的意见》中也要求“加强生态状况监测评估”。

习近平总书记在 2023 年全国生态环境保护大会上作出“加强生态状况监测评估”的重

要指示。

《生态环境部职能配置、内设机构和人员编制规定》第四条第七款规定，生态环境部有“开展全国生态状况评估”的职责，且已经连续开展五次国家生态状况评估，形成了成熟制度。

《中华人民共和国黄河保护法》第十一条：国务院生态环境主管部门应当定期组织开展黄河流域生态状况评估，并向社会公布黄河流域生态状况。将“生态状况评估”进一步拓展并固化到全国生态保护工作。

为贯彻以上相关法律法规和文件要求，落实生态环境部“三定”职责，支撑全国生态状况调查评估工作，制订本标准。

2.2 项目相关行业概况

2.2.1 冰川调查的重要性与发展历程

我国冰川资源具有极端重要性与高度敏感性，是其系统性、定期调查的根本动因。我国是世界上中低纬度地区山地冰川最发育的国家，根据中国第三次冰川编目，2020年前后中国最新冰川面积约为4.6万 km^2 ，冰川总条数约为6.9万条。这些冰川是长江、黄河、雅鲁藏布江、塔里木河、印度河等亚洲十多条大江大河的发源地，直接或间接影响下游十几个国家逾20亿人口的生计，对当地及区域气候、水文、生态平衡和灾害格局产生广泛而深刻的影响。因此，及时、准确地掌握我国冰川分布与动态变化，是保障我国及周边国家水资源安全、实施脆弱生态系统保护、应对气候变化的关键基础，这构成了制订和实施系统性的冰川观测技术规范的核心意义和迫切需求。

国际国内已建立了系统的冰川编目框架，我国积极响应并完成了三次全国性冰川编目。国际上，编制全球冰川目录的倡议开启了全球范围内对冰川进行系统化和规范化调查的进程。始于20世纪中叶，历经国际地球物理年(International Geophysical Year, 简称IGY, 1957-1959)决议、国际水文十年(IHD, 1965-1974)计划推动，最终由世界冰川监测服务处(World Glacier Monitoring Service, 简称WGMS)主导，形成了以1970年40项参数规范为基础的世界冰川编目体系，并于1999年启动持续更新的全球陆地冰川空间测量(Global Land Ice Measurements from Space Project, 简称GLIMS)计划(如Randolph Glacier Inventory系列数据集, 简称RGI)。经过多年的实践和修订，这套体系成为国际冰川编目的参考和指南。我国冰川学研究始于20世纪50年代末，1978年正式响应国际号召启动系统性冰川编目。2002年，在施雅风院士领导下，遵循国际规范的《中国冰川目录》(第一次编目)正式出版。2006年，科技部专项支持刘时银研究员团队开展“中国西部冰川资源及其变化调查”，并于2014年发布了执行GLIMS编码规则的第二次全国冰川编目(SCGI)，清晰展示了2006年前后我国冰川现状及变化趋势。以2020年为现状年的第三次中国冰川编目，由中国科学院西北生态环境资源研究院完成并于2025年3月21日在首个“世界冰川日”发布。

当前中国冰川观测数据丰富但标准不一，亟须制订统一技术规范以实现系统性、可比性监测。尽管国内外已积累了大量冰川观测数据，但我国现有的冰川观测成果在数据格式、采集精度、质量控制和时效性方面存在显著差异，缺乏统一的技术标准和管理规范。这种状况导致数据整合困难，严重影响大时空尺度下的生态资源调查、气候变化研究及水资源管理

决策的科学性和准确性。同时，冰川学理论的深入发展和模型模拟的精细化，对观测信息的丰富性、精度和一致性提出了更高要求。因此，为支撑国家生态安全战略需求，迫切需要通过制订统一的冰川观测技术规范，建立系统性、定期性的调查评估机制，确保冰川观测数据的兼容性、互操作性和长期可比性。

2.2.2 冰川调查的核心内容及技术手段

冰川观测的核心目标是准确获取反映其状态与变化的关键参数，在众多参数中，**冰川面积和冰川冰量（及变化）是两个最基础、最重要且维度不同的核心指标，也是冰川编目和变化评估的核心内容。**冰川面积表征其空间分布范围，是识别冰川存在、分布格局及退缩/前进动态最直观的基础，冰量变化则直接反映冰川的物质平衡（积累与消融之差），二者是评估其响应气候变化强度的最核心物理量。随着冰川调查技术不断演进，逐步形成了实地观测、遥感监测以及 GIS 分析相融合的发展格局。

冰川面积及其变化的调查主要依赖遥感解译与实地验证相结合的技术体系。实地观测则主要通过全球导航卫星系统（Global Navigation Satellite System, GNSS）在冰川边缘精确采集三维坐标点并连接形成边界，为遥感解译提供高精度验证点且适用于关键区域或小冰川的精细调查。基于光学卫星影像（如 Landsat, ASTER）的专家目视解译或利用波段特征（如比值法、雪指数）的自动/半自动解译是目前应用最广泛、最高效的冰川边界提取方法（Guo et al., 2015）。基于雷达卫星影像采用干涉相关性进行冰川/非冰川区判别（Huang et al., 2013）、以及采用机器学习的冰川识别（Zhang et al., 2023），成为了冰川规模调查的重要补充。GIS 技术用于边界的数字化、面积量算及相关地形参数（坡度、朝向等）的提取。

冰川冰量变化观测的核心方法是 DEM 差分法，辅以测高和重力卫星技术。DEM 差分法是基于多时相数字高程模型（DEMs）的比较获取冰川高程变化（ Δh ），并结合冰密度假设，以获得冰川物质平衡（冰量变化）。其中多源 DEM 的空间配准和冰密度选择是关键环节，目前较为常用的配准方法是 Nuth 和 Kääb（2011）提出的配准方案；广泛采用的冰川冰密度（冰川体积-物质转换因子）是 Huss（2013）基于粒雪压实模型和实测数据提出的平均密度 $850 \pm 60 \text{ kg/m}^3$ 作为折中方案，但体积转质量仍是主要误差源之一（Hugonnet et al., 2021）。激光测高（如 ICESat-1、ICESat-2 等）精度高但数据呈离散轨迹，需外推引入不确定性（Treichler and Kääb, 2017），常用于 DEM 高程精度的验证或结合 DEM 数据采用差分法获得冰量变化结果。雷达测高（如 CryoSat-2、Sentinel-3 等）覆盖范围大，但在小尺度复杂高山地形下估算冰川体积变化的精度受限（Jakob et al., 2021）。卫星重力测量技术（GRACE/GRACE-FO）通过检测冰川物质收支引起的重力场微小时变而反演冰川质量变化（Gardner et al., 2013），但其低空间分辨率和高噪音水平限制了其在单个或小规模冰川上的应用，常用于估测全球冰川冰量变化（Wouters et al., 2019）。

技术融合与规范统一是提升观测精度的关键路径。当前技术手段各有优势与局限，规范制订需明确不同技术（实地、光学遥感、雷达遥感、激光/雷达测高、DEM 差分、重力）在获取面积与冰量指标中的适用场景、精度要求和融合策略。重点解决多源数据（如不同 DEM、不同时期影像）的标准化处理、配准和验证流程，以及冰量估算中冰密度参数选择的指导原则，确保观测成果的准确性、一致性、兼容性和长期可比性，为科学认知冰川变化提供坚实数据支撑。

2.3 相关生态环境标准和环境管理工作的需要

本标准的制订是为满足生态环境管理工作的需要，可以表现在以下几个方面：

2.3.1 定期开展全国生态状况遥感调查评估工作的需要

党的十九届五中全会通过的《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议》提出，开展生态系统保护成效监测评估；《中共中央 国务院关于加快推进生态文明建设的意见》《生态环境监测网络建设方案》（国办发〔2015〕56号）、《中共中央 国务院关于深入打好污染防治攻坚战的意见》《中共中央 国务院关于全面推进美丽中国建设的意见》等文件均对开展和加强生态状况监测评估作出明确要求；2019年生态环境部发布的《全国生态状况定期遥感调查评估方案》（环办生态〔2019〕45号）明确规定要建立技术规范。及时建立行业技术规范，可以指导生态状况调查评估规范化开展，保障调查评估成果质量。

2.3.2 开展冰川生态系统评估缺少相关技术规范支撑

冰川作为我国重要的生态系统类型、冰冻圈的重要组成要素，已经有较长时间的观测研究和较为全面的监测手段应用，但随着技术进步和数据积累，逐渐暴露出冰川变化观测成果兼容性较差的问题，需要通过科学、统一的调查技术方法，规范冰川要素的观测内容、方法、流程。2021年，生态环境部发布了11项全国生态状况调查评估技术规范系列标准，但暂未纳入冰川生态系统的观测内容。当前国内仅有四个与冰川调查相关的地方性标准，仅对冰川范围调查的方法和精度评价提供了一般性规范和建议，对全国生态状况调查评估工作的指导性偏弱。随着我国不断推进山水林田湖草沙冰治理与保护的需求，需要有冰川生态系统调查评估相关技术规范的支撑。

2.3.3 完善生态保护监管和生态环境监测的要求

生态环境部于2022年印发的《“十四五”生态保护监管规划》（环生态〔2022〕15号）提出了要通过健全重点领域政策法规与标准规范，完善生态监测调查与评估等各项标准规范，以支撑全过程生态保护监管，推动生态保护修复监管规范化和制度化；2021年印发的《“十四五”生态环境监测规划》（环监测〔2021〕117号）也提出了要重点补充更新自动、遥感、现场监测标准规范，强化生态监测领域标准研究储备。该技术规范的制订对进一步完善生态监测网络、加快国家生态保护红线监管平台建设、加强重点区域生态状况监测评估具有重要促进意义。

2.3.4 贯彻落实国家加强标准化工作的需要

2021年中共中央 国务院印发的《国家标准化发展纲要》明确要求制定修订应对气候变化减缓、适应、监测评估等标准，以持续优化生态系统建设和保护标准，完善绿色发展标准化保障。冰川作为对气候变化极敏感的要素，制订对其调查和评估的相关技术规范，为生态资源评价与监测、保障生态安全具有重要的支撑作用，是支撑国家基础性制度的重要组成。

3 国内外相关标准情况的研究

3.1 国外相关标准情况的研究

国际上尚未发布和实施具有强制性的、按照标准体例组织的、内容专门涉及冰川面积和冰量变化观测的相关标准。目前可以参考的冰川观测和编目的规则，仅针对资源调查和科学研究的需要，结合遥感成像和冰川识别技术对冰川要素的参数和相关数据提出了推荐。有关组织、机构和学者也曾通过发布文件、出版书籍、发表论文等方式指导和规范冰川观测、数据资料处理和共享，如《冰川学概论》（卡列斯尼克）、《冰川物理学》（Paterson）、《冰川研究基本方法指南》（阿夫修克）。

起源于联合国国际水文十年计划（IHD）的世界冰川监测服务处（WGMS），是当前国际上管理和协调全球冰川资源调查的主导机构，推动并实现了“世界冰川编目（WGI）”数据集并确保其持续更新。WGI 首次系统性地描述了全球冰川现状，对数据组织、处理与展示方法给出了指导性意见。WGMS 为了保证不同国家和地区提交数据的规范性，提出了标准化的冰川编目参数体系（表 3-1），并对每个参数给出了详细定义、缺省值和示例。该参数框架后续也成为了其他全球性冰川观测计划的规范性文件。例如，全球陆地冰川网络（GTN-G）遵循该规范收集和整理全球冰川观测数据，并持续基于最新数据成果更新《冰川物质平衡通报》和《全球冰川变化通报》。

表 3-1 世界冰川监测服务处的冰川编目参数体系

指标类型	参数
冰川位置	冰川编号、国家缩写、大陆代码、流域代码、自定义位置代码、当地冰川代码、冰川名称
数据时间	地形图年份、地形图比例尺、影像年份
冰川类型	冰川类型、冰川形态、冰川前缘、纵剖面、补给来源、冰舌状态、冰碛物
冰川属性	雪线高程、雪线精度、雪线日期、平均冰厚、冰厚精度、总面积、面积精度、当地投影面积、历史最大面积、平均宽度、平均长度、最大长度、历史最大长度、消融区长度、积累区朝向、消融区朝向
坐标系统	纬度、经度、坐标东向值、坐标北向值、坐标系统
地形因子	最大高程、平均高程、最小高程、历史最小高程、积累区平均高程、消融区平均高程
冰川状态	冰舌活动开始期、冰舌活动结束期
其他要素	数据贡献者、备注

由 NASA/USGS 等发起的全球陆地冰川空间观测计划（GLIMS）是一个国际性科研联盟，旨在通过卫星影像获取建立全球冰川遥感数据库，分析冰川范围及其变化特征，并评估这些变化数据的外在驱动因素。GLIMS 针对广泛使用的遥感冰川调查和编目手段，从冰川定义、冰雪分类识别、数据组织管理等方面编写了许多的规则，制订了《数字冰川目录编制指南》，包含标准化的分类体系（冰川类型、形态、物源、末端特征等）以及数字化数据处理流程（表 3-2）。在这套体系支撑和指导下，伦道夫冰川目录（RGI）持续发布并连续更

新，已成为全球和区域冰川遥感信息提取的重要参考。

表 3-2 全球陆地冰川空间观测计划的冰川范围调查推荐方法

推荐方法	参考内容
冰川区	认定冰川组成，并结合地形、纹理及其他地貌参数等识别冰川区。冰川区可包含多种形态冰体、积雪、表碛、甚至植被。
人工解译	对当地深入了解是人工解译高质量和精度的前提；可结合 DEM 数据分离单条冰川。
多波段分类方法	基于冰川和积雪短波红外波段极低反射和可见光波段较高反射特性，采用波段比值法进行冰川区识别；影像信噪比和阴影会影响波段比值阈值；可采用归一化植被指数（NDVI）提高准确度。
地貌学方法	结合地形、面向对象分析和神经网络的冰川识别方法：采用光谱数据和地形对地表覆盖进行分类；采用影像空间分析提取地貌、形态、和地形信息；采用地貌分析和 DEM 空间分析提取典型地形信息；数据融合进行面向对象参数化方案；通过神经网络对冰面特征和冰川进行识别。
辅助手段	结合 DEM 数据和热成像数据辅助冰川识别。
质量控制	初查：拓扑结构和数据完整性自动检查；可视化目视检查。 精度描述：选取遥感影像，高精度提取冰川与冰川识别结果进行对比，详细描述地理位置误差、解译误差、解译偏差以及算法缺陷等。

国际雪冰委员会（ICSI）于 2002 年发布山地冰川物质平衡监测手册，旨在为兴都库什-喜马拉雅地区国际实验与网络（HKH-FRIEND）雪冰工作组提供技术支持，后续也成为了区域和全球冰川物质平衡监测工作的指导性文件。该手册对冰川物质平衡观测参数进行了具体定义，并提出冰川物质平衡监测所使用方法必须满足标准化、可常规测量、成本低廉、可由当地（国家）独立执行等原则，且对常用的冰川物质平衡监测和估算方法的流程和规范进行了阐述（表 3-3）。

表 3-3 国际雪冰委员会的物质平衡监测推荐方法

观测方法	方法概述	适用条件	局限性
大地测量法	采用地形图、航空航天提取 DEM 以及机载激光扫描作为数据源	作为冰川学法的补充，且在于长时间尺度（10 年）上作为实地测量方法的验证	人工高程点采集无法覆盖全部冰川；基于遥感影像提取的积累区误差较大；体积-物质转换参数不确定；无法给出单点物质变化
冰川学法	采用花杆和雪坑实地测量冰川表面点物质积累和消融	精度最高，且能给出物质平衡空间分布信息	数据采集率低且后勤和人力成本较高
冰川学间接法	通过获取物质平衡线高度或消融面积比来计算	需要长时间序列的数据支撑	物质平衡线高度准确性对估算结果影响较大
冰通量法	通过提取物质平衡线处的冰体平均流速，结合雷达获取的冰川厚度计算	仅适用于稳定冰川	仅适用于稳定冰川

观测方法	方法概述	适用条件	局限性
水文学法	通过物质守恒原理计算	常与其他方法结合使用	降水、蒸发、径流等成分获取困难;冰体内部物质传输过程会降低结果可信度
冰通量散度法	基于机载雷达获取的冰川表面高程及空间流速场,结合大地测量法和冰流模型计算	充足的冰川动力过程观测数据支撑	应用成功率不高;较依赖昂贵的机载设备和极易受恶劣天气影响
模型评估法	基于气候要素采用简单的度日模型或精密的能量平衡模型计算	适用于无跃动、冰崩等非气象机械过程的冰川	降水参数检校是难点

2011年,第16届世界气象大会批准了全球冰冻圈观测计划(GCW)实施战略,并于2015年将其纳入世界气象组织(WMO)各计划的核心工作。全球冰冻圈观测计划(GCW)于2023年更新了《仪器和观测方法指南》,在其第二卷《冰冻圈变化的测量》中,重点介绍冰川质量平衡、冰川前缘变化和冰川厚度等参数的经典测量方法,并对冰川观测参数进行具体描述和推荐(表3-4),也对冰川作业所需的个人安全装备及用法进行了推荐。

表 3-4 全球冰冻圈观测计划的冰川调查参数与推荐方法

参数	内容和方法
冰川属性	国家或地区、冰川编号、冰川名称、地理实体/山脉或群落、平衡线附近中心点、日期、表面积、长度、海拔、地形测绘、方位、平均坡度
冰川轮廓和面积	冰川定义、冰川标志号、工具和图像、冰川轮廓标准、最小尺寸、不确定性、图像选择
冰川厚度和体积	探地雷达测量实地作业和数据处理、测量误差和不确定性
冰川前缘变化与长度	实地数据:推荐沿主流线方向并垂直于冰川外缘测量;航空航天数据:人工数字化或自动生成;不确定性
物质平衡报告系统	地层系统、固定日期系统、浮动日期系统、组合系统
表面积累测量	人工测量:雪坑测量、雪芯钻探、冰裂缝地层测量、误差来源;探地雷达测量:作业方法及参数
表面消融测量	消融桩:桩分布及类型、钻孔设备、标桩放置和读数、自主消融测量、误差和不确定性来源
物质平衡计算	剖面法、等高线法、统计方法、基于模型的外推法、大地测量方法、历史记录偏差检测与订正、不确定性

3.2 国内相关标准情况的研究

中国冰川调查研究在不断发展和总结过程中,已经逐步建立了较为完善的冰川观测体系,发展了先进的观测技术,通过出版书籍以及大量地区性、专题性考察报告或文集等方式指导和规范冰川观测工作,如《西藏冰川》(李吉均等,1986)、《中国冰川概论》(施雅风等,1988)、《中国冰川水资源》(杨针娘,1991)、《中国天山冰川站手册》(刘潮海,1991)、

《天山冰川作用》（刘潮海等, 1998）、《中国冰川与环境-现在、过去与未来》（施雅风等, 2000）、《冰冻圈遥感》（曹梅盛 等, 2006）、《冰川动力学模式基本原理和参数观测指南》（李慧林等, 2009）、《冰川观测与研究方法》（刘时银等, 2012），形成了诸多主要以科学研究为目的的观测手册。

中国是世界冰川编目数据的主要主持、维护和更新国家之一，我国全国性的冰川编目工作是世界冰川编目的延续和发展。其中，科技部科技基础性工作专项支撑下的中国第二次冰川编目，是我国最重要、最全面和最权威的冰川编目工作，通过参考世界冰川编目指南，结合我国冰川调查工作的实际需求，建立了完善的冰川编目体系（表 3-5），包括编目对象定义、数据源选择与预处理、冰川专家/自动解译、单条冰川划分、冰川面积/长度/朝向/坡度/储量估算、精度评价与分类、数据成果核实与检校等。项目实施过程中通过大量实践和凝练，形成了专著《冰川观测与研究方法》（刘时银等, 2012）以及项目执行技术指南，从仪器设备选择与操作、数据采用与处理、结果检校与精度评价、成果格式与报告形式等方面，对冰川资源实地和遥感检测的技术手段进行了规定。从专业与科学的角度，成体系提出了大时空尺度冰川资源调查技术规范，成为了国内冰川资源调查与科学研究的重要依据和参考。

表 3-5 中国第二次冰川编目参数与推荐方法

参数	内容与方法
冰川属性	冰川名称、流域代码、中国第一次冰川编目代码、GLIMS 代码、山脉名称、行政区、坐标经度、坐标纬度、冰川面积、冰川面积误差、冰川面积相对误差、表碛面积、表碛面积误差、表碛面积相对误差、冰川体积、最大高程、最小高程、平均高程、中值高程、平均坡度、平均坡向、数据源、辅助数据源、数据日期、高程参考数据、高程参考数据日期、完成人、核查人
冰川物质平衡	（1）直接观测：测点分布，花杆消融观测，雪坑积累观测，物质平衡计算 （2）间接观测：水文学法、重复测量法、踏勘方法
冰川厚度	冰雷达测厚：基本原理、现场作业、内业整理、测厚成图
冰川变化	（1）测绘方法：标志点测量法、摄影测量法、平板仪测量法、地面立体摄影法、重复航空摄影测量法、数字摄影测量法、卫星遥感技术、 （2）冰川面积变化：地形图比较法、网格法、纵横断面法、坐标比较法、冰量计算

目前，国内仅有 4 项于近期刚发布的冰川调查相关的地方标准。尚未发布和实施按照标准体例组织的、内容专门涉及冰川面积和冰量变化观测的相关国家标准或行业标准。

新疆维吾尔自治区为满足自然资源管理需求，以规范化冰川遥感监测为目标，于 2024 年发布了《冰川资源遥感调查技术规范》（DB65/T 4783）、《冰川范围调查技术规范》（DB65/T 4784）、《地面三维激光扫描冰川观测技术规范》（DB65/T 4802）、《冰川厚度测量技术规范》（DB65/T 4803），率先形成冰川资源调查三级标准体系。具体内容如下：

《冰川资源遥感调查技术规范》从冰川资源遥感调查工作整体层面出发，对工作流程、实施方案编制、前期准备、信息提取、质量控制、调查结果综合分析、成果编制与提交等总体内容进行了阐述，并具体定义了冰川储量估算的经验公式法和厚度积分法，最后对调查检查、调查成果及命名规则进行了规范。

《冰川范围调查技术规范》重点关注冰川调查要素，指出冰川范围调查需要包含冰川边界采集、单条冰川提取、表碛区分离及属性填写等部分，并对冰川范围调查要素的具体内容进行规范（表 3-6）。该地方标准也对成果归档及命名规则及冰川范围遥感数据属性项进行了规范。

表 3-6 《冰川范围调查技术规范》中冰川范围调查参考方法

方法或步骤	内容及要求
地面观测	(1) 设备装备：GNSS 接收设备、地面三维激光扫描仪、RTK 接收设备、测绳等 (2) 边界观测：获取单条冰川边界位置、点位测量个数不做限制，以安全为上、人力可达为原则开展
遥感调查	(1) 影像筛选：时相、云量、积雪、山体阴影 (2) 目视判读法：色调特征、形态特征、纹理特征、运动特征、水文特征、裸岩地剔除等 (3) 非监督分类：光谱信息统计特征 (4) 监督分类：依据判别规则识别 (5) 基于对象方法分类：多尺度分割并建立冰川提取规则
单条冰川提取	依据冰川内部山体的最高棱线分割连片的冰川复合体
表碛区分离	裸冰区与表碛区分类
精度验证	采用实地观测数据对遥感调查结果进行精度验证 采用更高分辨率 DOM 进行精度验证
质量检查	DOM 数据、矢量数据、成果文档

《地面三维激光扫描冰川观测技术规范》聚焦冰川要素调查的具体技术，对冰川表面形态的地面三维激光扫描重建方法进行了规范，具体对冰川资源调查中所用设备、具体参数、操作流程、质量控制的内容和步骤给出了指导性参考（表 3-7）。

表 3-7 《地面三维激光扫描冰川观测技术规范》中观测内容及要求

内容	要求
基本要求	人员、观测条件、工作流程、资料收集、仪器及相关材料
数据采集与处理	扫描站布设、点云数据采集、点云数据配准、降噪与抽稀、DEM 制作
数据应用	(1) 根据生成的山体阴影图，人工目视解译勾绘冰川边界，获取冰川面积和长度变化信息； (2) 根据大地测量法计算冰川物质平衡原理，将冰量-物质转换密度和冰川厚度变化相乘即可获得大地测量法冰川物质平衡

《冰川厚度测量技术规范》也是针对冰川要素调查的具体技术，对采用探地雷达测深冰川厚度进行了规范，对技术应用过程中的具体步骤、参数设置、采样形式与结果、成果整理等给出了参考性推荐（表 3-8）。

表 3-8 《冰川厚度测量技术规范》中冰川厚度测量内容及要求

内容	要求
精度	探地雷达测深最大深度大于 200 m 测点定位平面误差不超过 10 m
测量作业	测线布设、测点密度、采样时间间隔、测点间距、测点定位与拍照
数据整编	测点位置图、测量记录表、剖面图
数据应用	冰川储量估算：结合冰川范围利用厚度积分法估算冰储量

青海省 2024 年发布了《冰川监测技术规范》（DB63/T 2295-2024），重点对冰川物质平衡、运动速率、冰川厚度、末端位置等要素的监测方法、监测频率和精度要求进行了阐述（表 3-9），并给出了积雪分类及密度范围，以及冰川消融花杆测量记录样表、冰川冰密度测量方法及相关记录样表、冰川末端标志物距离测量记录样表等表格参考格式。

表 3-9 《冰川监测技术规范》中冰川监测内容及要求

内容	监测方法	监测频率	精度要求
冰川累积	具体阐述了采样点选择、雪坑挖掘或机械钻取样以及测量内容等内容	至少 1 次/年	厚度测量误差不大于 0.5 cm；雪层密度误差不大于 0.01g/cm ³
冰川消融	具体阐述了消融花杆布设、花杆消融量测量和花杆位置测量等内容	至少 2 次/年，分别于消融季开始前和结束后	花杆出露长度误差不大于 0.5 cm；雪层密度误差不大于 0.01g/cm ³
冰川厚度	推荐采用地质雷达测量厚度，并辅以 RTK 测量设备采集测量点位及轨迹坐标	重复测量时间应不小于 3 年	测量中误差不大于 3.0 m
末端位置	分别阐述了 RTK 碎步测量和末端标志物距离测量等监测方法	与消融花杆同期	RTK 位置整体误差不大于 7.0 cm；末端标志物距离中误差不大于 5.0 cm

4 标准制订的基本原则和技术路线

4.1 标准制订的基本原则

（1）适用性、科学性原则

本标准的内容应满足全国生态状况变化调查评估的要求，能为冰川面积和冰量变化观测提供技术依据。标准需明确定义观测的核心物理量及其测量原理和计算方法，经过充分验证，并有明确的精度和不确定性评估，能够作为定量评价冰川变化的科学手段。

（2）可操作性原则

本标准中采用的技术方法应现实易行，制订的操作流程步骤清晰，方法涵盖了基于实地观测和遥感观测的手段，兼顾传统冰川学方法和新观测技术的应用，在数据和方法的选择上具备一定的灵活性。

(3) 技术实现的经济可行性原则

本标准中采用的技术方法应经济可行，确保按照该标准开展观测时，涉及的参数容易获取、方法容易实现，成本较低，经济可行。本标准选取的冰川边界、末端位置、冰川面积、冰川物质平衡、冰面高程等关键观测要素，都是冰川变化监测中常用且指示性强的指标，方法较为成熟，流程也受到行业广泛认可，具有经济可行性。

4.2 标准制订的技术路线

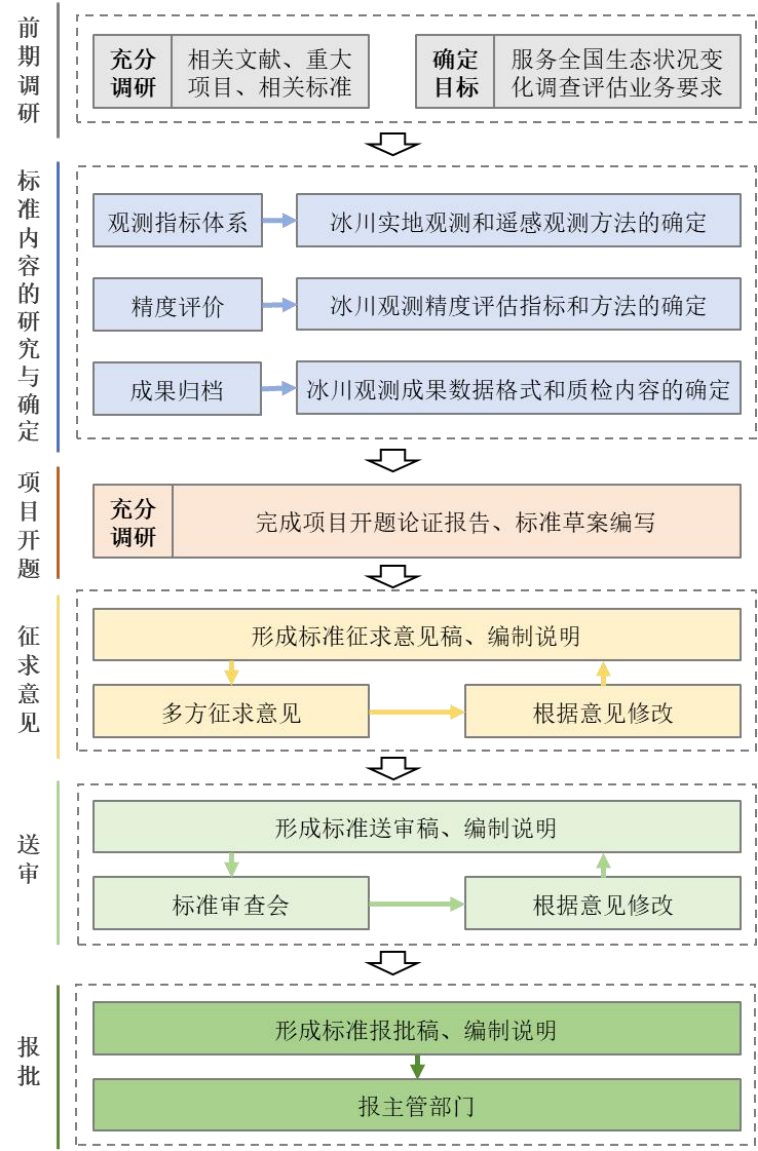


图 1 标准制订技术路线图

5 标准主要技术内容

5.1 标准适用范围

本标准规定了利用天基和空基遥感数据，辅以地面观测，进行冰川规模和冰量变化观测

的技术流程、总体要求、观测技术、精度评价、质量检查和成果归档等要求。

本标准适用于全国冰川分布区域山地冰川的调查和评估，其他地理区域可参照执行。

冰川冰量变化精度受高程精度、不同数字高程模型匹配精度及密度不确定性等的影响，因此，在数据精度较差，影像易出现过曝的区域，本标准适用性有待商榷。

5.2 规范结构框架

标准文本共有十个章节和三个附录，前四章为标准规范规定内容，分别为“1 适用范围”“2 规范性引用文件”“3 术语和定义”“4 总则”。后六章是本标准的主要内容，分别为“5 技术流程”，给出了本标准针对主要观测内容的技术流程；“6 总体要求”，从观测指标、数学基础和属性要求三个方面给出了本标准的内容基础；“7 冰川规模变化观测”和“8 冰川冰量变化观测”，分别从观测内容、观测方法和变化计算三个方面进行规定；“9 精度评价”，分别对观测和结果计算的精度评价方法进行规定；“10 数据检查和成果归档”，是对最终提交成果的内容、格式等进行规定，并在附录中给出了具体指标和内容。

5.3 规范性引用文件

此部分列出了本标准文本中正式引用的标准和文件，均未注日期，其最新版本（包括所有的修改单）均适用于本标准。包括：

2 项与生态状况评估技术相关的国家生态环境标准：《全国生态状况调查评估技术规范——生态系统遥感解译与野外核查》（HJ 1166）、《全国生态状况调查评估技术规范——数据质量控制与集成》（HJ 1176）；

6 项与测绘数据和技术相关的国家标准：《近景摄影测量规范》（GB/T 12979）、《遥感影像平面图制作规范》（GB/T 15968）、《数字航空摄影测量 空中三角测量规范》（GB/T 23236）、《光学遥感测绘卫星影像产品元数据》（GB/T 35643）、《数字航天摄影测量 空中三角测量规范》（GB/T 43995）、《地理信息 成像传感器的地理定位模型 第2部分：SAR，InSAR，lidar 和 sonar》（GB/T 44490.2）；

2 项与无人机遥感测量相关的行业标准：《机载激光雷达数据获取技术规范》（CH/T 8024）、《无人机航摄系统技术要求》（CH/Z 3002）。

5.4 术语和定义

（1）冰川 glacier

地球上由降雪和其他固态降水积累、演化形成的在自身重力作用下处于流动状态的冰体，包括冰帽和冰盖。本标准中冰川特指山地冰川，也被称为山岳冰川、山麓冰川。

该术语定义参考《冰冻圈科学辞典》，结合本标准内容，限定了冰川类型。

（2）冰川规模变化 glacier extent change

冰川在一定时期内，因冰川物质平衡变化和冰川动力过程造成的边界范围、冰川长度（冰川末端位置）、表碛覆盖范围等的变化。其中，冰川几何形态的变化特征可通过重复制图的方式来获取，冰面湖塘、基岩露头等特征需在制图时独立反映。

该术语定义由编制组给出，结合全国生态状况调查评估工作和本标准的适用范围，内容包括反映冰川规模变化的指标及其获取方式。

（3）冰量变化 ice mass change

观测周期内，由冰川不同位置的厚度减薄或增加以及崩解脱离引起冰川体积发生变化，并根据冰川密度计算的冰川质量变化，数值用水当量表示。按此方法获得的整条冰川的冰量变化，对应冰川表面的当量水层厚度，与冰川物质平衡相当。

该术语定义由编制组给出，结合全国生态状况调查评估工作和本标准的适用范围，遵循冰川学界对冰量变化的观测方法和世界冰川监测服务处（World Glacier Monitoring Service, 简称 WGMS）要求的标准化单位。

（4）分冰岭 ice divide

与分水岭相当的冰川分割线，是冰川上具有相反冰流向的分界线。分冰岭把复杂的冰川多边形斑块划分为不同的单条冰川。

该术语定义参考《冰冻圈科学辞典》。

（5）冰川表碛 supraglacial debris

覆盖冰川消融区表面的岩屑、沙砾、粉尘等碎屑物质，其厚度在几厘米到几米之间。表碛厚度分布不均，表面破碎，且越靠近冰川末端，表碛覆盖越厚。表碛分布影响冰川的融化速率，薄层表碛加速冰川融化，厚层表碛则减缓冰川融化。表碛覆盖区往往发育有冰面湖塘和冰崖。

该术语定义由编制组给出，参考《冰冻圈科学辞典》中冰碛的定义和现实的分布状况，结合本标准的适用范围，便于遥感解译实际操作。

（6）冰川中流线 glacier centerlines

一条接近冰川主流线的虚拟参考线，是冰川表面各高程带中心点的连线。主流线指冰川表面各高程横断面上最大冰流速点的连线，对于地貌形态无异常变化的冰川，二者位置相近。因此，冰川长度测量及几何形态特征描述通常以中流线作为基准参考线。

该术语定义参考关于冰川中流线自动提取的科技文献和《冰冻圈科学辞典》中冰川流线的定义。

（7）冰川表面高程 glacier surface elevation

按照一定基准测量的冰川表面某点距离海平面的高程。可根据地面或遥感测量获取，可用等高线、规则格网或点云的高程值表达。

该术语定义由编制组给出，参考冰川地貌学中对冰川表面形态的描述和《测绘基本术语》（GB/T 14911-2008）。

（8）冰川密度 glacier density

冰川体积变化与质量水当量的转换参数，为冰川表面新雪、粒雪、冰川冰密度（范围 $350\sim 917\text{ kg m}^{-3}$ ）空间分布的综合体现。基于大地测量法计算多年间隔的冰川冰量变化时，推荐取值 $850 \pm 60\text{ kg m}^{-3}$ 。

该术语定义由编制组给出，参考《冰冻圈科学辞典》（秦大河等，2014）以及《冰川观测与研究方法》（刘时银等，2012），采用冰川变化研究领域主流学术期刊发表的冰川学研究普遍采用的数值。

（9）激光雷达 light detection and ranging; LiDAR

发射激光束并接收回波获取冰川表面高程信息的星载或机载系统。

该术语定义参考《光电测量 智能操控类激光雷达主要参数测试方法》（GB/T 45307-2025）。

（10）合成孔径雷达干涉测量（interferometric synthetic aperture radar; InSAR）

利用两幅或多幅经配准的 SAR 复图像共轭相乘得到的干涉相位，以直接获取图像覆盖区域冰川表面高程及其变化信息的一种空间对地观测技术。

该术语定义参考《基于 InSAR 技术的地壳形变监测规范》（GB/T 44146-2024）。

5.5 标准主要技术内容确定的依据

5.5.1 冰川规模变化观测

（1）观测指标的确定

由于冰川具有独特的形成过程、规模形态和运动特性，为准确描述冰川的几何形态变化特征，本标准以通过卫星或航空平台获取的多期遥感影像数据进行制图的手段来获取冰川规模变化指标，包括冰川边界变化观测、冰川末端位置变化、冰川表碛覆盖范围变化等方面，并关注了能够反映冰川规模变化的其他属性，如冰面湖塘面积、基岩露头图斑等的变化。观测各要素的具体定义主要参考《冰冻圈科学辞典》（秦大河等，2014）以及《冰川观测与研究方法》（刘时银等，2012）。通过综合参考《冰川观测与研究方法》《冰川范围调查技术规范》（DB65/T 4784）以及世界冰川监测服务处（WGMS）和全球陆地冰川空间观测计划（GLIMS）指导性文件等对冰川面积（范围）及其变化的描述，阐述了冰川规模变化涉及指标的具体工作内容及其过程。

冰川边界范围变化指冰川边界在时间上的位置移动，表现为冰川的扩张或缩小，以面积或平均长度与平均宽度表示。具体分析时还可区分裸冰川区边界、表碛覆盖区边界等。一般推荐以固定分冰岭（如山脊线）对冰川进行切分，因采用不同分冰岭数据带来的冰川范围差异不计入冰川面积变化。通过多期遥感影像数据制图来获取冰川边界变化信息。

冰川末端位置变化是指沿冰川中流线一定范围测量的冰川末端位置的平均高程和平均长度变化量，反映冰川末端前进、后退或稳定状态，其数值即对应长度或高程变化量。由于中流线提取与冰川边界和数字高程模型有关，建议以最早制图数据提取中流线为基准确定冰川末端位置，这样计算的长度（末端位置）变化具有可比性。

冰川表碛覆盖范围变化指冰川表碛覆盖区域在时间上的变化，用于评估冰川消融、表面反照率及冰川动力学等特征及其变化。表碛覆盖范围的变化通常由冰川消融、冰流变形、物源补给及坡面堆积等过程共同驱动，其变化可通过不同时期的遥感影像判读或分类结果确定，计算各时期表碛覆盖区的面积差值或比例变化率来表征。

（2）观测方法的确定

本标准为了保证数据的兼容性、互操作性和长期可比性，选择了方法较为成熟、流程受行业广泛认可的观测方法。主要参考世界冰川监测服务处（WGMS）在开展“世界冰川编目（WGI）”数据集工作时对数据组织、处理与展示方法给出的指导性意见，中国第二次冰川编目工作建立的完善冰川编目体系对编目参数和观测的推荐方法，以及《冰川观测与研究方法》（刘时银等，2012）中执行技术指南，对采用的遥感数据进行要求，并分别给出了冰川边界、表碛覆盖范围、长度等指标的提取方法和注意事项。

在遥感数据选取时,要优先选取冰川区消融季末期、无(或少)云和积雪覆盖的光学遥感影像。若单景影像难以满足无云/雪要求,可选用多景互补影像或长波段 SAR 影像进行边界提取。数据预处理和解译流程参考 HJ 1166-2021,质量控制参考 HJ 1176-2021。并对影像的质量、空间分辨率、最长时间间隔和可比性进行了规定。

在对冰川边界的提取时,基于地形校正与正射校正后的光学遥感影像,通过波段比值阈值分割或智能解译(如深度学习算法)自动识别积雪、裸冰和表碛分布范围,经形态学开闭运算滤除小斑块及裂隙后,转化为矢量边界。在数据质量差、识别误差大或表碛覆盖的区域,参考 SAR 和热红外影像开展目视解译,进行精细修订以提高精度。为保证数据质量和变化分析的可比性,还需满足 a) 不同时期的边界提取应采用一致的解译规则与方法,尽量由同一(或少数)解译人员完成; b) 最小编录冰川面积应根据采用的影像分辨率确定,最小制图图斑不应小于 3×3 个像元,同时,应核查连续存在 2 年以上的此类小图斑,并将其纳入最小编录范围。

在对冰川表碛范围提取时,除利用多模态数据和深度学习方法提取表碛边界外,还应结合多源影像特征(SAR 相干特征、地表温度特征、光谱色彩和纹理特征)、地形辅助要素(冰面湖塘、冰崖分布)、地貌约束条件(冰川末端水文特征以及冰川两侧的地形与水系分布)加以判读修正,提高表碛覆盖范围的识别精度后,从冰川边界中分离出表碛覆盖范围边界。

在对冰川长度提取时,通过提取冰川中流线长度间接地获取冰川长度信息。冰川中流线可基于欧氏分配原理,结合冰川表面地形特征,利用冰川边界和数字高程模型数据从形态学角度提取,进而获取冰川长度及其变化信息。

针对冰川内部或周缘的基岩裸露区的情况,其识别应基于多时相遥感影像,按年际暴露稳定性分类处理: a) 连续不低于 5 年暴露的长期稳定基岩露头,不计入有效冰川覆盖面积; b) 暴露范围呈年际波动或出现/消失交替的基岩露头,应纳入冰川编录范围,计入有效冰川覆盖面积或基岩露头面积,并作为独立图层记录。

(3) 变化计算方法的确定

主要有两方面内容,面积变化和长度变化。对投影、数据精度、注意事项等做了要求。

对面积变化进行计算时,借助理信息系统或其他相应的软件,将不同时期获取的冰川边界数据转换成面状矢量图层,并采用研究区所在分带的 UTM 投影坐标系以保证面积计算精度。分别计算不同时期的冰川面积和表碛覆盖面积,并求得冰川面积变化量。面积单位以 km^2 或 m^2 表示,保留两位小数。还需评估时段内基岩露头出现时间和频次,扣除多年出现的露头面积。

对长度变化进行计算时,在同一中流线方向上计算不同时期冰川末端位置之间的距离差,即为冰川长度变化量。长度单位以 km 或 m 表示,保留两位小数。

5.5.2 冰川冰量变化观测

(1) 观测内容的确定

本标准以通过卫星或航空平台获取的多期遥感影像数据获取冰川表面高程差,结合冰川面积和统一的冰川密度值,计算用水当量表示的冰川物质量变化。通过综合参考《冰川观测与研究方法》(刘时银等, 2012)、国际雪冰委员会(ICSIG)指导性文件、《冰川厚度测量

技术规范》（DB65/T 4803）以及当前冰川学研究技术发展与应用现状，本标准从间接观测和直接观测冰川表面高程差的角度，对各工作内容及过程进行了阐述，观测各要素的具体定义主要参考《冰冻圈科学辞典》（秦大河等，2014）以及《冰川观测与研究方法》（刘时银等，2012）。

本标准仅限基于大地测量学的方法，通过重复获取不同时期的数字高程模型（DEM）间接观测冰川表面高程差，或采用 InSAR 技术直接观测冰川表面高程差，结合冰川面积和冰川平均密度，获取用当量水层厚度表示的冰川质量变化。

（2）观测方法的确定

国际雪冰委员会（ICSI）具体阐述了 6 种冰川冰量变化或物质平衡的观测方法，其中冰川学法属于直接观测手段，是冰川学研究中最为传统的方法，其他方法通过其他参数间接估算冰川变量变化或物质平衡。大地测量法是目前运用最多的冰川冰量变化观测方法，数据源易于获取且方法简单；冰川学间接法需要的数据源最少但精度不高；水文学法、冰通量散度法和模型评估法是基于精确气候参数输入下采用物理模型对冰川物质平衡进行模拟，需要极为繁多的数据源支撑且实施难度高。《冰川观测与研究方法》（刘时银等，2012）对冰川学法中的雪坑积累观测和花杆消融观测进行了专业且细致的描述，是行业通行的重要参考。全球冰冻圈观测计划（GCW）也对雪坑积累观测和花杆消融观测进行了类似的阐述。《冰川观测与研究方法》和全球冰冻圈观测计划（GCW）均对探地雷达测量冰川厚度和体积进行了描述，采用多次探地雷达厚度重复测量的成果，也可实现冰川冰量变化观测。中国第二次冰川编目的成果属性中也存在冰量估算量，但该参数是基于面积-体积经验公式计算，精度较低。随着观测技术和手段的发展，目前地面近景摄影测量、无人机倾斜摄影测量、LiDAR 等最新技术在冰川变化观测中得到了广泛应用且技术越来越成熟，而前述标准或指南均未提及，体现了这些标准的时代局限性。

基于冰川表面高程变化间接获取冰川冰量变化的大地测量法是目前大时空尺度冰川监测的主要手段，可通过多种技术或手段获取冰川表面高程，进而采用大地测量法获取冰川冰量变化，也可采用雷达差分干涉方法直接获取冰川冰量变化。本标准重点推荐大地测量法对冰川冰量变化或物质平衡进行监测，通过结合当前冰川学研究中较为成熟且应用广泛的观测技术和手段，并参考国际雪冰委员会（ICSI）和全球冰冻圈观测计划（GCW）的指导文件以及《冰川物质平衡通报》和《全球冰川变化通报》等全球尺度冰川物质平衡监测成果，推荐了 DGNSS 测量、地面近景摄影测量、无人机倾斜摄影测量、LiDAR、航空航天摄影测量等冰川表面高程提取技术或数据成果，并基于当前科研理论认识和研究成果对操作过程及具体要求进行了阐述，同时也参考了冰川学研究的最新理论、处理方法及参数设置。

在对冰川表面高程差的间接观测方面，采用符合国家标准/行业规范的 LiDAR（CH/T 8024-2011）、地面近景摄影测量（GB/T 12979-2008）、无人机倾斜摄影测量（CH/Z 3002-2010）等技术获取的不同时期 DEM，计算冰川表面高程差。在冰川表面高程间接观测过程中，还需满足：a）不同 DEM 数据获取与制图过程，需满足国家标准和行业规范；b）多源 DEM 数据的观测时间优先选择在消融季末进行，且覆盖包括积累区和消融区的整条冰川，生成的 DEM 数据，空间分辨率不低于 30 m；c）计算冰川表面高程差异时，不同时期获取的 DEM 数据，空间坐标系、空间分辨率、数据单位等数学基础应统一；d）可基于冰川及周边地形

的坡度/坡向/高程等地形因子、DEM 分辨率、获取平台轨道等信息对不同 DEM 间的空间匹配误差进行检校。空间匹配校正后的平面误差不高于 1/3 个参考数据像元，高程差误差应不高于观测区域内冰川表面高程差平均值同等数量级。

在对冰川表面高程差的直接观测方面，利用覆盖同一冰川区域的两景或时间序列合成孔径雷达（SAR）影像，可采用多种 InSAR 技术，直接提取观测时期内的冰川表面高程变化点云数据。在冰川表面高程差直接观测过程中，还需要满足：a) 进行差分干涉的 SAR 影像对，空间基线应小于 400 m；图像配准误差不高于 1/8 个像元；冰川覆盖区的干涉相干性数值高于 0.7；b) 采用 InSAR 技术提取的冰川表面高程差点云数据，应同时覆盖冰川的积累区和消融区。

（3）冰川密度值确定

为最终获取冰川冰量变化，应基于冰川表面高程差，结合冰川密度，通过计算冰川质量水当量变化获取。冰川从上游积累区到下游消融区的不同部位，一定厚度表层由不同比例的新雪、粒雪、冰川冰等成分组成，且组分比例受年代、季节、温度、降水等时间和气候因素综合作用并持续变化。但是，新雪、粒雪和冰川冰的密度存在较大差异，从 500 kg m^{-3} 到 917 kg m^{-3} 之间不等，差异化的冰川密度取值，会导致相同的冰川表面高程变化值，计算得到存在偏差的冰川物质变化估算成果。

Huss (2013) 采用改进的 Herron-Langway (HL) 模型，基于新雪密度、冰川年积累率、温度环境、融水再冻结等参数，确定粒雪动态化密度；通过模拟 50 年时间尺度五种冰川物质变化速率和强度下，粒雪密度演化以及冰川物质变化，对冰川体积-物质转换的冰川平均密度取值进行实验，并与瑞士阿尔卑斯山地区的 Griesgletscher 冰川和 Silvrettagletscher 冰川实测数据进行交叉验证。其结果显示，在观测间隔相对较长时，取值为 $850 \text{ kg m}^{-3} \pm 60 \text{ kg m}^{-3}$ 的冰川平均密度，是可靠的冰川体积-物质转换因子，其本质是粒雪-冰川冰过渡带的代表性密度值，可以反映冰川整体的物质状态。这一取值得到了冰冻圈领域学者的广泛认可；利用冰川表面高程变化估算物质平衡时，不再区分成积累区和消融区等冰川部位，以及新雪、粒雪与冰川冰等冰川组分，冰川体积-物质转换因子统一采用取值为 $850 \text{ kg m}^{-3} \pm 60 \text{ kg m}^{-3}$ 的冰川平均密度，成为了目前冰冻圈学术研究和应用中最普遍的做法。

本标准为了不同区域不同时期冰川冰量变化观测的一致性和可比性，也采用这一普遍作法，即获取冰川表面高程差后，结合冰川面积，利用取值为 $850 \text{ kg m}^{-3} \pm 60 \text{ kg m}^{-3}$ 的冰川平均密度，计算冰川物质水当量变化。

（4）变化计算方法的确定

主要给出了计算公式及相关参数。

统计观测周期内冰川表面高程差，依据统计特征对高程异常值进行识别并予以剔除后，采用公式（1）计算冰川冰量变化或物质平衡当量：

$$\Delta M = \bar{\Delta h} \rho_g S_{max} \quad (1)$$

式中： ΔM ——观测冰川冰量变化，单位 kg；

$\bar{\Delta h}$ ——冰川表面高程差平均值，单位 m；

ρ_g ——冰川平均密度，取值 $850 \text{ kg m}^{-3} \pm 60 \text{ kg m}^{-3}$ ；

S_{max} ——冰川最大发育范围的投影面积，单位 m^2 。

公式（1）中， $\bar{\Delta h}$ 对应的冰川表面当量水层厚度 $\bar{\Delta h} \rho_g / \rho_w$ ，与冰川物质平衡相当，其中 ρ_w

为水密度 1000 kg m^{-3} 。

5.5.3 精度评价

精度评价是评估冰川要素观测成果可信度和质量的重要定量参数,也是成果可用性的主要参考。随着观测技术和手段的发展、以及空间分析与统计理论的深入,地学测绘成果的定量精度评价方法也更为准确和可靠。

中国第二次冰川编目基于冰川边界缓冲区评估冰川面积结果精度,基于两次冰川面积结果精度采用误差传递法计算冰川面积变化精度。国际雪冰委员会(ICSIG)和全球冰冻圈观测计划(GCW)仅对冰川冰量变化或物质平衡观测的不确定性进行了讨论,未给出具体的精度定量计算方法。《冰川物质平衡通报》和《全球冰川变化通报》仅进行数据编纂,未对冰川物质平衡精度进行具体阐述。通过参考中国第二次冰川编目、《冰川物质平衡通报》和《全球冰川变化通报》等主要的区域和全球冰川数据集,并结合冰川学研究中被广泛接受和应用的精度评价方法,本标准分别对冰川面积和冰量变化等观测要素的精度定量评价方法、具体计算过程以及通用参数设置进行了详细阐述。其中,冰川边界范围观测精度采用冰川缓冲区法估算,通过计算待评估边界与其相对面积差的平均值及标准差进行不确定性评估;冰川面积变化精度基于误差传递,通过计算不同时期冰川面积误差平方根来表征;冰川冰量变化精度需要使用高精度独立数据作为基准,利用稳定无冰区进行误差标定,由冰川表面高程差误差、冰川面积误差和冰川平均密度误差构成,基于误差传递原理估算。

(1) 冰川边界范围观测精度

综合提出从基于实地观测、基于遥感影像和基于经验三个角度进行评价。

基于实地观测的精度评估,主要针对可抵达冰川,可利用全球卫星导航系统(GNSS)、无人机等手段,采集冰川边缘离散点的平面坐标,数字化形成连续闭合的冰川边界线,通过计算样本冰川待评估边界与实测边界的面积相对偏差平均值及标准差开展不确定性评估。实地观测时还需注意:a) 优先在消融季开展观测,以避免或减少季节性积雪对冰川边界识别的干扰;b) 根据冰川规模动态调整采样点间距,确保能有效捕捉冰川边界的形态特征点;c) 采用GNSS观测时,需专项评估冰川边缘定位点通行安全性与测量可行性。

基于遥感影像的精度评估,主要针对冰川可达性较差无法现场核实的情况,可基于与边界提取同期或时间邻近的遥感影像,通过目视解译获取新的冰川边界,计算待评估边界与其相对面积差的平均值及标准差开展不确定性评估。具体操作分为两种情况:a) 有更高分辨率影像时,由经验丰富的专家重新解译多条冰川边界;b) 仅有原分辨率影像时,由多名专家多次(3~5次)解译多条冰川边界,基于新解译边界的面积均值开展评估。

基于经验的精度评估作为上述两种方法的补充,可进一步采用两种辅助方法:a) 依据影像分辨率设定冰川边界位置不确定范围(通常为0.5像元,表碛覆盖部分可放宽至1像元),计算冰川范围面积差评估不确定性;b) 当数据源和处理方法与引文一致时,直接采用文献中冰川边界不确定性的范围值(通常为2%~5%)作为估算依据。

(2) 冰川面积变化精度

在参考冰川边界精度评价的内容获取不同时期冰川边界不确定性后,可根据误差传递原理,结合两个时期冰川边界的不确定性开展面积变化的不确定性评估,通过计算不同时期冰川面积误差平方根来表征,按照下式计算:

$$\sigma_{\Delta S} = \sqrt{(\Delta S_1 \cdot e_1)^2 + (\Delta S_2 \cdot e_2)^2} \quad (2)$$

式中： ΔS_1 ——时间点 t_1 时存在而在 t_2 时消失的冰川面积，单位 m^2 ；

ΔS_2 ——时间点 t_2 时出现而在 t_1 时缺失的冰川面积，单位 m^2 。

(3) 冰川冰量变化精度

为排除冰川自身变化对观测成果精度评估的影响，在观测冰川发育范围周边临近平坦区域，利用更高精度或可信度的测绘成果作为参考数据，对地表高程差值的精度进行评价。对非冰川区域同一采样空间，基于直接或间接观测提取的高程差异值，作为样本观测值；可利用观测时期内采集的 GNSS 地面验证点、激光测高地面光斑，或基于更高分辨率 DEM 测绘成果等提取高程差值，作为真实差异值。获取的高程差异值精度，结合冰川平均密度误差和面积变化误差，通过误差传递原理，对冰川冰量变化观测结果精度予以评价。并分别给出了重复观测的高程差误差计算方法和冰川冰量变化精度计算方法。

5.5.4 成果归档

(1) 属性要素的确定

世界冰川编目（WGI）是以实地观测并辅以遥感数据获取的冰川观测成果，因此按照 8 个指数类别推荐了共计 48 个冰川属性参数，其中包括冰川类型中的冰川前缘、纵剖面、补给来源、冰舌状态、冰碛物等参数，冰川属性中的雪线高程及精度、历史最大面积、历史最大长度、消融区长度等参数，地形因子中的历史最小高程、积累区平均高程、消融区平均高程等参数，以及冰川状态中的冰舌活动开始期、冰舌活动结束期等参数需要大量且长时间积累的地面观测获取。伦道夫冰川目录（RGI）适应当前冰川编目技术和手段发展，以遥感数据源为主整编冰川观测成果，其最新的版本 RGI v7.0 包括冰川代码、位置、跃动类型、末端属性、地形因子等共计 28 个冰川属性，其中跃动类型和末端属性需要一定的专业知识予以定义，且部分定义存在争议。中国第二次冰川编目在继承世界冰川编目（WGI）和伦道夫冰川目录（RGI）属性的基础上进行了适应性发展，从水资源角度出发增加了冰川体积估算量等参数、从物质平衡模拟角度出发增加了表碛面积及占比等参数以及从数据质量控制角度出发增加了核查人。本标准最后参考中国第二次冰川编目、世界冰川编目（WGI）、伦道夫冰川目录（RGI）等区域或全球重要冰川编目成果，取消存在争议或专业性较强的参数，遵循可精确提取和普适性强的原则，对冰川面积变化成果属性要素进行了规范，增强与全球冰川编目数据集以及其他国家或区域冰川观测成果的兼容性和互操作性。

(2) 数据格式的确定

中国第二次冰川编目仅提供了成果矢量数据集。世界冰川编目（WGI）和伦道夫冰川目录（RGI）等数据集在提供成果矢量数据集的同时，也将冰川属性 CSV 文件和属性字段 JSON 格式文件作为附件，增强了多种软件平台的可读性。《冰川物质平衡通报》和《全球冰川变化通报》为专业性较强的数据集，主要为科研工作者服务，在提供成果数据集的基础上，还增加了数据分析及可视化内容。为了增强与其他国家或区域冰川观测成果的兼容性和互操作性，通过参考中国第二次冰川编目、世界冰川编目（WGI）、伦道夫冰川目录（RGI）、《冰川物质平衡通报》和《全球冰川变化通报》等主要的区域和全球冰川数据集，本标准对冰川面积和冰量变化等观测成果的数据格式和质量检查进行了详细定义和描述，推荐提交 Excel 格式的地面观测数据、TIFF 格式（或 GeoTIFF 格式）的遥感数据源及冰川冰量变化成果、

Shapefile 格式（或.shp 格式）的冰川边界矢量数据。

5.5.5 质量控制

本标准的质量控制贯穿观测、计算和成果归档的全过程。质量检查的依据包括测绘和地理信息数据质量相关标准，如 GB/T 18316-2008《数字测绘成果质量检查与验收》、GB/T 24356-2023《测绘成果质量检查与验收》、CH/T 1026-2012《数字高程模型质量检验技术规程》及冰川遥感国际通用方法（如 GLIMS 指南等）。

在观测阶段，对影像源、影像质量和 DEM 质量提出要求，预处理和解译流程参考已有技术规范，并通过提示形式提出关键注意事项，确保用于冰川制图的数据满足质量标准。

在计算阶段，本标准设置了专门的精度评价内容，分别对冰川边界、面积变化和冰量变化的估算方法及注意事项进行说明，并依据通用误差传播和 DEM 差分评价方法开展精度控制，确保计算结果可靠。

在成果归档阶段，通过检查冰川边界矢量数据的拓扑一致性，以及面积变化、高程变化和冰量变化数据的异常值，结合元数据完整性审核，确保最终归档成果满足质量要求、可检验、可追溯。

6 与国内外同类标准的水平对比和分析

中国冰川广泛分布于四川、云南、青海、甘肃、西藏和新疆等中国西部 6 省/自治区，发育海拔（2360~8848 m）、地形、气候区以及交通条件迥异，导致冰川观测后勤支撑的经济和人力成本差异巨大，成果更新周期也存在较大不同。且针对不同目的所需要的冰川资源观测方法和技术也存在较大不同，要建立统一且可操作性强的标准是本标准制订过程中的技术难点之一。

受经济发展和技术支持的区域差异限制，不同地区、机构和组织在冰川面积和体积变化观测的要素和方法上存在区别。世界冰川编目和中国冰川编目对冰川规模观测提出了规范性建议，且按照不同冰川变化研究成果出版了书籍和文献，但这些资料学术性强，规范不统一，指导一线工作人员的可操作性不强。其中，中国第二次冰川编目所执行和推荐的规范和方法，不属于标准体例发布和实施的标准，规范性和强制性不足；且其推荐的规范和方法，偏重于基于中等分辨率的卫星遥感影像开展的冰川编目方法，对地面考察以及 LiDAR 等高分辨率点云数据并未涉及。新疆维吾尔自治区和青海省发布的地方性标准，仅对冰川范围调查的方法和精度评价提供了一般性规范和建议，对具体调查和操作的指导性偏弱，且也没有对冰川冰量变化这一冰川资源重要参数的观测方法进行规范。本标准执行过程中的另一重要技术难点，就是完善和优化这些学术性较高的规范，建立可操作性强的普适性标准。

随着航空（北斗卫星导航系统/高时空分辨率可见光和雷达卫星）、航天（LiDAR）、近景（无人机平台搭载的多传感器）及实地（延时相机/GNSS）观测技术和数据源多样且发展迅速，众多高分辨率影像和点云数据被广泛应用于冰川学研究。而这些日新月异迭代的技术与参数多样的数据采集器，导致观测所涉及的数据源分辨率、观测点分布、成果精度等参数无法定量规范。针对以上技术难点，为了增强与全球冰川编目数据集以及其他国家或区域冰川观测成果的兼容性和互操作性，并且适应当前遥感技术的发展，本标准通过对比和总结

国际上通用或广泛参考的冰川调查方法和手段,推荐适应性广和应用性强的冰川面积和体积变化调查方法,并在继承 WGMS 和 GLIMS 推荐观测参数的基础上,从高质量和强实用性的冰川资源成果出发,构建成本可控和可广泛推广的冰川调查标准。

7 标准实施建议

7.1 拟定标准实施需配套的管理措施、实施方案建议

本标准首次建立了面向全国生态状况调查评估的冰川观测技术规范,与其他生态系统野外观测和调查评估等技术规范,共同构建生态系统综合调查评估体系。本标准可 effectively 提高全国和区域生态系统研究相关基础能力和生态系统调查评估综合能力,便于生态环境保护等相关单位使用。

本标准由生态环境部自然生态保护司、法规与标准司组织制订,由生态环境部卫星环境应用中心、云南大学、湖南科技大学、新疆生产建设兵团环境保护科学研究所和西藏自治区生态环境监测中心共同起草,由生态环境部解释,建议尽快采用本标准。

7.2 与拟定标准实施相关的科研建议

当前无人机技术和应用快速发展,人工智能也逐渐渗透到科学研究的方方面面,为确保本标准的技术先进性与适用性,建议结合前沿技术开展多传感器集成与协同、冰川智能解译、不确定性量化研究等适应当前数据和技术特点的科研工作,推动冰川观测向智能化、高精度化发展。

8 参考文献

- [1] Berthier E, et al. Remote sensing estimates of glacier mass balances in the Himachal Pradesh (Western Himalaya, India). *Remote Sensing of Environment*, 2007, 108(3): 327-338. DOI: 10.1016/j.rse.2006.11.017
- [2] Berthier E, et al. Measuring glacier mass changes from space-a review. *Reports on Progress in Physics*, 2023, 86(3). DOI: 10.1088/1361-6633/acaf8e
- [3] Gardner A S, et al. A reconciled estimate of glacier contributions to sea level rise: 2003 to 2009. *Science*, 2013, 340(6134): 852-857. DOI: 10.1126/science.1234532
- [4] Guo W, Liu S, et al. The second Chinese glacier inventory: data, methods, and results. *Journal of Glaciology*, 2015, 61(226): 1-16.
- [5] Huang L, Li Z, Tian B S, et al. Monitoring glacier zones and snow/firn line changes in the Qinghai-Tibetan Plateau using C-band SAR imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 137: 17-30.
- [6] Hugonnet R, et al. Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century. *Nature*, 2021, 592(7856): 726-731. DOI: 10.1038/s41586-021-03436-z
- [7] Huss M. Density assumptions for converting geodetic glacier volume change to mass change. *Cryosphere*, 2013, 7(3): 877-887. DOI: 10.5194/tc-7-877-2013

- [8] Jakob L, Gourmelen N, Ewart M, et al. Spatially and temporally resolved ice loss in High Mountain Asia and the Gulf of Alaska observed by CryoSat-2 swath altimetry between 2010 and 2019. *Cryosphere*, 2021, 15(4): 1845-1862. DOI: 10.5194/tc-15-1845-2021
- [9] Kääb A. Glacier Volume Changes Using ASTER Satellite Stereo and ICESat GLAS Laser Altimetry. A Test Study on EdgeØya, Eastern Svalbard. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(10): 2823-2830. DOI: 10.1109/TGRS.2008.2000627
- [10] Li J, et al. Investigating the bias of TanDEM-X digital elevation models of glaciers on the Tibetan Plateau: impacting factors and potential effects on geodetic mass-balance measurements. *Journal of Glaciology*, 2021, 67(264): 613-626. DOI: 10.1017/jog.2021.15
- [11] Nuth C, Kääb A. Co-registration and bias corrections of satellite elevation data sets for quantifying glacier thickness change. *Cryosphere*, 2011, 5(1): 271-290. DOI: 10.5194/tc-5-271-2011
- [12] Raup B, Kääb A, Kargel J S, et al. Remote sensing and GIS technology in the Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS) Project. *Computers & Geosciences*, 2007, 33: 104-125.
- [13] Treichler D, Kääb A. Snow depth from ICESat laser altimetry-A test study in southern Norway. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 191: 389-401. DOI: 10.1016/j.rse.2017.01.022
- [14] Wouters B, Gardner A, Moholdt G. Global Glacier Mass Loss During the GRACE Satellite Mission (2002-2016). *Frontiers in Earth Science*, 2019, 7. DOI: 10.3389/feart.2019.00096
- [15] Zemp M, et al. Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016. *Nature*, 2019, 568(7752): 382-386. DOI: 10.1038/s41586-019-1071-0
- [16] Zhang E, Catania G, Trugman D T. AutoTerm: an automated pipeline for glacier terminus extraction using machine learning and a "big data" repository of Greenland glacier termini. *The Cryosphere*, 2023, 17(8): 3485-3503.
- [17] 施雅风, 等. 中国冰川概论[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [18] 杨针娘, 等. 中国冰川水资源[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1991.
- [19] 刘潮海, 等. 中国天山冰川站手册[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1991.
- [20] 刘潮海, 等. 天山冰川作用[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [21] 施雅风, 等. 中国冰川与环境——现在、过去和未来[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [22] 刘时银, 等. 冰川观测与研究方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012.