

海洋性气候积雪结构演化与力学特征

温梦鸽, 李 化, 赵思远, 崔浩楠, 邓建辉*

(四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室水利水电学院, 四川 成都 610065)

摘要: 为了解海洋性气候积雪的结构演化和物理力学特性, 以西藏嘎隆拉山稳定积雪期-融雪期的积雪为例, 通过现场试验对不同深度物理力学性质进行测试。结果表明, 在稳定积雪期, 积雪物理力学参数随着深度和时间的增加表现出增大的趋势, 同时提出硬度和抗剪强度与深度关系式; 在融雪期, 会出现多层明显的软弱层, 力学性质显著弱于雪板层。自由水通过重力和毛细作用在早期弱层中积聚, 加速弱层演变。含水率是影响积雪稳定的关键因素, 电阻率与含水率为负相关关系, 通过现场试验构建了积雪硬度、锥尖阻力与电阻率的关系式。研究成果揭示了积雪结构演化特征及其力学特征变化规律, 为雪崩区的预警与防治工作提供理论基础。

关键词: 现场试验; 积雪结构; 软弱层; 力学特征; 物理特征

中图分类号: P426.63

收稿日期: 2026-2-10

Structural Evolution and Mechanical Characteristics of Snow under Maritime Climatic Conditions

WEN Mengge, LI Hua, ZHAO Siyuan, CUI Haonan, DENG Jianhui*

(State Key Lab. of Hydraulics and Mountain River Eng., College of Water Resource & Hydropower, Sichuan Univ., Chengdu, Sichuan 610065, China)

Abstract: To investigate the structural evolution and physico-mechanical properties of snow under maritime climatic conditions, seasonal snow from the stable snow period to the melting period on Galongla Mountain in Tibet was selected as the study object, and field tests were conducted to measure the physico-mechanical properties at different depths. The results show that during the stable snow period, the physico-mechanical parameters of snow increase with both depth and time, and empirical relationships between hardness, shear strength, and depth are established. During the melting period, multiple distinct weak layers develop, whose mechanical properties are significantly lower than those of the adjacent slab layers. Free water accumulates in the early-stage weak layer due to gravity and capillary action, accelerating the evolution of the weak layer. Liquid water content is identified as a key factor affecting snow stability, and electrical resistivity is negatively correlated with water content. Based on field measurements, empirical relationships among snow hardness, cone penetration resistance, and electrical resistivity are proposed. These findings elucidate the mechanism linking characteristics of snowpack structure evolution and patterns of mechanical changes and provide a theoretical basis for avalanche forecasting and mitigation in snow-prone regions.

Keywords: in-situ tests; snow structure; weak layer; mechanical characteristics; physical characteristics

引言

雪崩是高山地区的易发灾害之一, 对山区的交通廊道、基础设施及人类生命安全构成严重的威胁, 尤其是雪崩发生时伴随的强风气浪, 造成大面积的森林风倒与基础设施破坏(Zhuang et al., 2023)。雪崩通常是由积雪中的薄弱层引起的(J. B. Jamieson & Johnston, 1992; James Bruce Jamieson, 1995; Fierz et al., 2009), 薄

基金项目: 西藏自治区科技计划项目“藏东南雪崩判识、探测与预警技术研究”(XZ202501ZY0006); 应急管理部重点科技计划“雪崩灾害风险消除关键技术及装备研发与示范应用”(2024EMST030303); 四川省交通运输科技项目“大规模在役隧道长期服役性能及韧性提升技术研究”(2026-C-004)

第一作者: 温梦鸽(2002 -), 女, 硕士, 主要从事地质灾害方面的研究工作。E-mail: 3292154690@qq.com

***通信作者:** 邓建辉(1965 -), 男, 现任教授, 主要从事地质灾害方面的研究工作。E-mail: jhdeng@scu.edu.cn

弱层的形成通常与积雪内部发生的变质作用有关。温度是引起积雪变质的主要原因，积雪在温度影响下的变质作用可分为等温变质作用、温度梯度变质作用和融冻变质作用。水是驱动积雪变质的重要因素，水的温度是 0℃，含水量高的雪层和表层雪之间会形成强烈的温度梯度，水汽向上移动并在雪晶上凝华，雪晶不断增大，最终形成刻面晶体结构，且温度梯度在两层界面处最大，变质作用也最强 (中国科学院兰州冰川冻土研究所, 1979; Colbeck, 1982; Conlan and Jamieson, 2015)。我国藏东南地区，受印度洋暖湿气流驱动，积雪具有显著的海洋性特征，其变质作用主要受液态水及气态水的驱动。

现场原位试验是研究积雪结构演化和强度变化的直接方法，积雪的强度参数直接关系到积雪层的稳定性，Kinar 系统的介绍了积雪的物理和力学特性的测量方法(Kinar and Pomeroy, 2015)。积雪的稳定性试验最常用方法有压缩试验(CT)、扩展柱状试验(ECT)和鲁奇布洛克试验(RB)(Jamieson, 1999; Simenhois and Birkeland, 2006)，压缩试验(CT)可以完美的检测到积雪中的潜在弱层，但由于无法进一步评估裂纹的扩展潜能，将其直接视为整体结构失稳会导致对危险性的高估，具有较高的误报率，而扩展柱状试验(ECT)在小尺度试验中展现出最优的分类性能，能有效区分稳定与不稳定的积雪结构(Winkler and Schweizer, 2009)；同时可以通过多参数地震度量技术识别与分类雪崩 (Wang et al., 2026)。积雪稳定性由雪的基本力学性质决定，力学性质试验用于测量积雪的强度和硬度，常用方法有刀片式硬度计、抗拉试验和贯入试验，Jamieson 和 Johnston 的现场拉伸测试为雪层抗拉强度提供了数据参考(Jamieson and Johnston, 1990)，现有的贯入试验(CPT)设备经过改进，可以在雪地中进行有效测试(Schaap and Föhn, 1987; McCallum, 2013)。密度也可以在一定程度上反映积雪的性质，王楷迪等通过野外试验分析了自然积雪与雪崩堆积体的密度特征，为野外雪崩的识别提供了科学依据(王楷迪等, 2025)，付强等通过持续性观察初步确定了积雪物理参数的变化特点(付强等, 2017)，沈丹祎等系统阐述了雪崩影响因素及其启动-运动-堆积机理(沈丹祎等, 2025)，我国现有研究多是针对积雪范围变化和区域易发性等宏观尺度，且研究多是中国天山地区的大陆性气候，对藏东南这种海洋性气候的积雪结构演化和力学参数变化的研究较为匮乏。

为了更好的了解积雪结构演化和物理力学特性，本文在嘎隆拉山区开展系统的积雪现场测试，通过多参数同步测量分析积雪结构及软弱层的力学特征，探讨液态水对软弱层演变和弱化过程的控制机制，为积雪稳定性评价提供数据支持和理论依据。

1 研究区概况与试验方案

1.1 研究区概况

根据青藏高原危险性研究(李晓东等, 2022) (数据来源于国家冰川冻土沙漠科学数据中心(<http://www.ncdc.ac.cn>))，扎墨公路嘎隆拉段属于中高风险区(图 1)，且是通往墨脱县的重要山口。嘎隆拉山位于西藏自治区墨脱县与波密县的交界地带，是岗日嘎布山脉的西端段，平均海拔 4800m。嘎隆拉山是南面印度洋暖水气和北面青藏高原高寒水气的交锋带，冰川发育，冰川融水最终汇入雅鲁藏布江的支流，且地质构造复杂，雪崩、滑坡和泥石流等灾害频发，嘎隆拉段公路中段和隧道南侧出口坡度陡峻、物源丰富、积雪稳定性差，是雪崩高风险区，隧道出口北侧局部区域遭受雪崩冲击(田旭文等, 2025)。

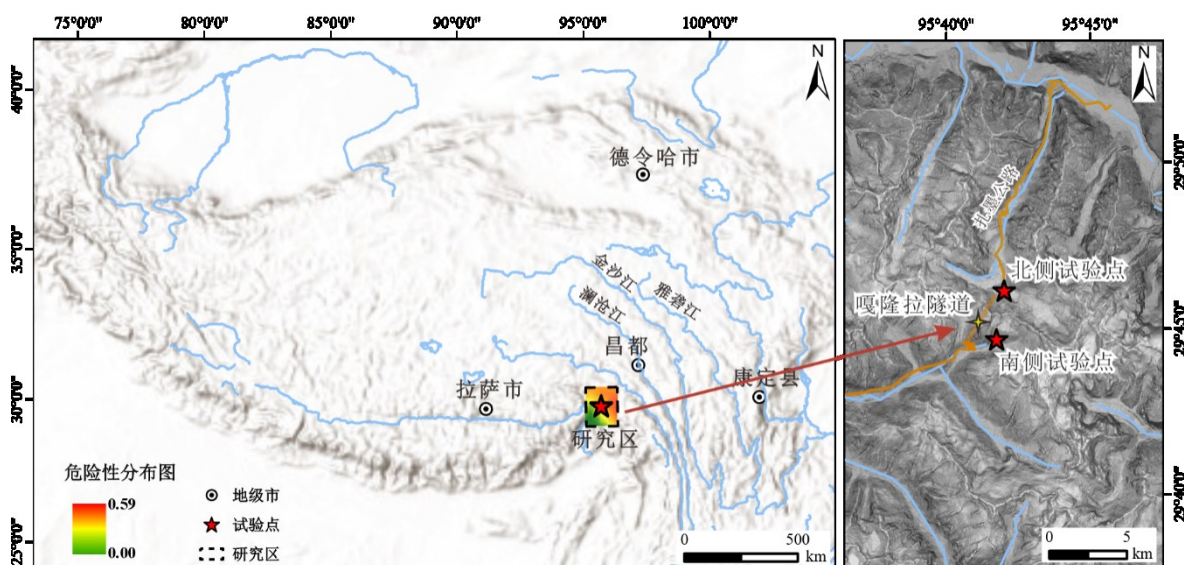
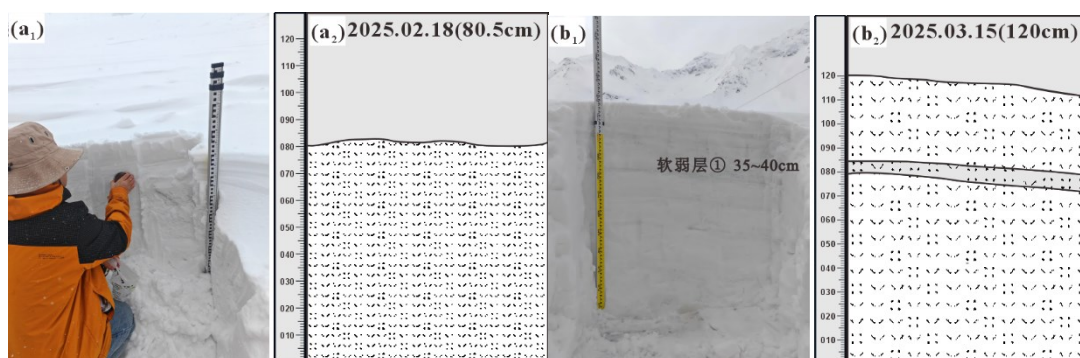


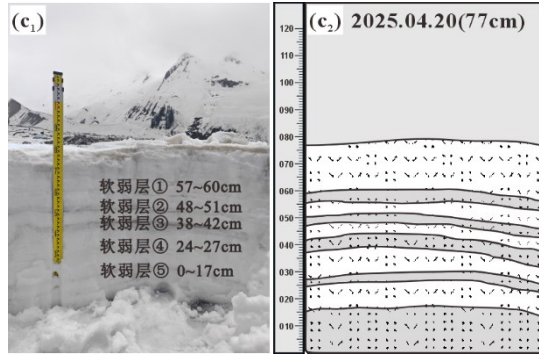
图1 现场试验地点
Fig.1 Field Test Site

海洋性气候是指受海洋影响显著的气候类型，主要分布在沿海地区，通常降水量较多，且全年分配均匀。海洋性气候积雪是在相对潮湿和温暖气候的产物，融化和雨雪事件常见，雪层中常见潮湿雪或高比例的冰，积雪密度和含水量较高，而大陆性气候温度相对较低，积雪较薄，雪层中容易形成持续数月的弱层。嘎隆拉山是印度洋暖气和青藏高原高寒水汽的交锋带，具有明显的季节性特征。研究区年降雨量 697.8mm，受印度洋暖湿气流影响，降水集中，多在夏季 6-8 月份，温度较高，积雪消融显著。年平均气温为 -0.21°C ，年平均降雪量为 0.84m(田旭文等, 2026)，主要集中在冬季 12 月至次年 3 月，积雪厚度大且持续时间长。

1.2 试验方案

为了解积雪变质作用和演化过程，评估积雪物理力学特征的变化，本文采用原位试验法进行系统地研究，通过现场积雪剖面观察和试验，从时间尺度上对积雪进行分析。现场使用雪铲挖出积雪剖面进行参数观测，包括雪深、雪温、雪密度、湿度的基础物理参数以及硬度、抗剪强度和基于 CPT 测量的锥尖阻力、侧壁摩阻力、电阻率的力学参数。在嘎隆拉隧道南北两侧进行积雪原位试验(图 1)，试验分为两组，分别分析嘎隆拉隧道 2-4 月份同一点位的稳定积雪期至消融期以及消融期的不同暴露时间下的力学参数，雪层剖面及剖面示意图如图 2 和图 3 所示。

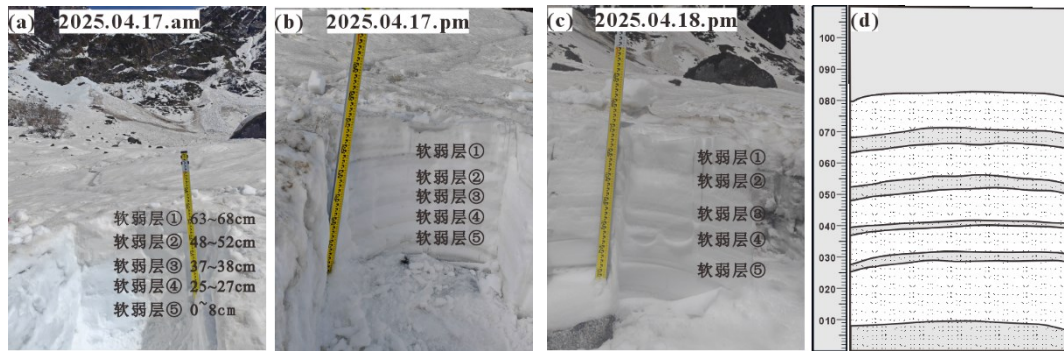




图(a)、(b₁)、(c₁)分别为2、3、4月份的雪层剖面图，图(a₂)、(b₂)、(c₂)为3、4月份的雪层剖面示意图，其中白色区域为雪板层，灰色区域为肉眼观测的软弱层

图2 北侧试验点2、3、4月份雪层剖面图及示意图

Fig.2 Snow stratigraphic profiles and schematic diagrams of the north-side test site in February, March, and April



图(a)、(b)、(c)为雪层剖面图，图(d)为雪层剖面示意图

图3 南侧试验点三面光雪层剖面

Fig.3 Three-sided snow layer profile at the southern test site

2 实验设备及测量方法

2.1 试验设备

用于积雪测量的仪器有“便携式”和“固定式”，便携式设备可用于取积雪空间上的特征，而固定式设备用于监测固定位置的积雪特征的时间变化。本文测量采用的设备均为便携式。

(1) 雪深：积雪深度是指积雪的总高度，简称雪深，传统的测量方法可分为雪尺和雪深探测杆两类，本次研究采用雪尺对积雪深度进行测量，雪尺量程为 300cm，精度 0.1cm，测量时将雪尺贴于剖面并与地面垂直，以地面为基准面读取积雪深度，如图 2(b₁)所示。

(2) 雪温：对雪温的测量的方法较多，有红外温度计、电阻温度计以及一般的针式温度计或玻璃管温度计。本文采用的是电阻测温计，测温范围为-50~100℃，精度为±0.05℃。挖出剖面、放置好雪尺后应立即对雪温进行测量，测量时将温度传感器水平插入雪层中(图 4(a))，避免手接触到温度传感器，待读数稳定后记录其读数。

(3) 雪密度：现有对积雪密度测量的方法有微波辐射测量法和雪层剖面法。本研究中对密度的测量是用容积为 550ml 的取样器来完成，重量由电子秤测量，电子秤的量程为 5kg，精度为 0.01g。测量从雪面开始，按层取雪样，为确保称重的准确性，应将电子秤水平放置并归零，同时尽量避免风的影响(图 4(b))。取样时尽量避免阳光直射，以减轻太阳暴晒对积雪特性变化造成的影响，每层的密度通过质量除以体积求得。

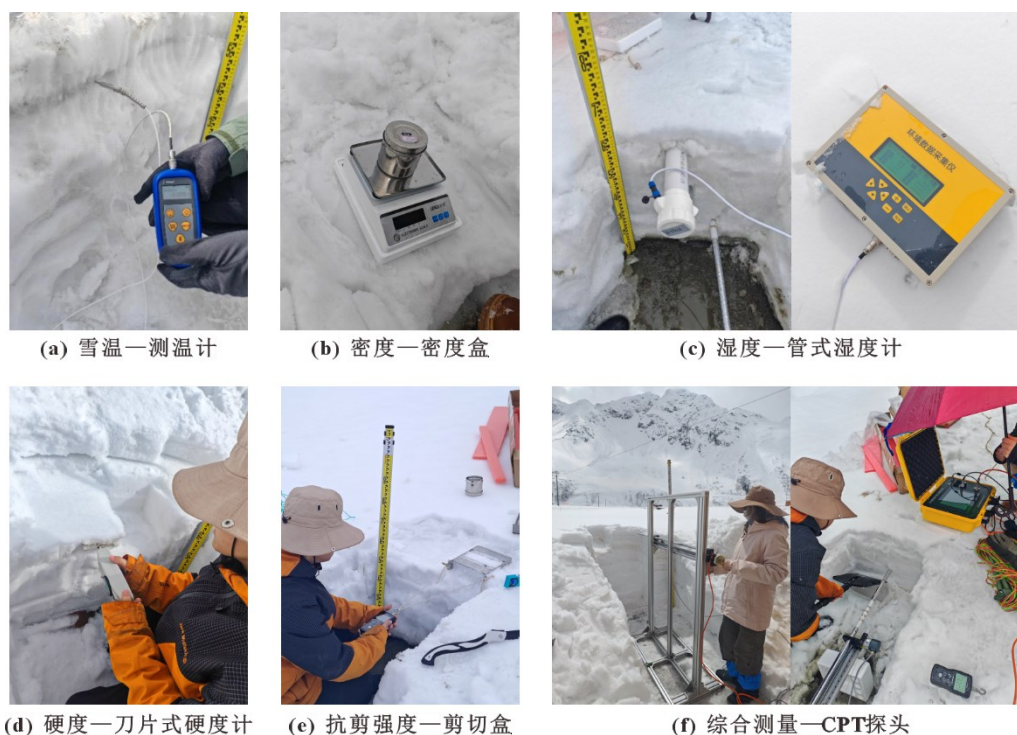


图4 实验设备

Fig.4 Experimental Equipment

(4) 湿度：含水率的测量有定量估计法、热融法和介电常数反演法三类(车涛等著, 2020)，定量估计法是指用手挤压积雪观察是否黏附和有无液态水来判断，是野外最直观的一种观测方法，根据积雪体积含水量定量估计表(表 1)中的具体描述判断。本研究中使用的是雪湿度含水率多层管式传感器，其原理是利用介电常数和液态水含量的关系，通过向雪中发射高频电磁波，利用电磁波传播速度随介电常数升高而降低的关系，同时结合反射信号的时间差计算介电常数，也称时域反射技术，然后通过混合模型将介电常数差异转换为雪中液态水体积含量。其测量的湿度值范围为 0 ~ 100%，精度为 0.5%。本研究中设备每隔 10cm 布设一个传感器，共布设 3 个，测量方法与温度类似，按层插入雪层中，测量后取最大值(图 4 (c))。

表 1 积雪体积含水量定量估计表(Fierz et al., 2009)

Table 1 Quantitative Estimation Table for Snowpack Volume Water Content (Fierz et al., 2009)

类型	湿度指数	代码	含水量/%	具体描述
干燥	1	D	0	雪层温度都在 0℃以下，分散的雪花颗粒在挤压时几乎没有相互黏附的倾向
潮湿	2	M	<3	雪层温度为 0℃，液态水在 10×放大倍数下不可见。分散的雪晶体有明显粘在一起的倾向
润湿	3	W	3~8	雪层温度为 0℃，液态水在 10×放大倍数下可见。对积雪压缩，水不能渗出
湿润	4	V	8~15	雪层温度为 0℃，对积雪适度挤压后水可以被压出（雪晶体呈现连锁状态）
浸湿	5	S	>15	雪晶体被水浸湿。此时空气占整个空间的 20%~40%

(5) 硬度：积雪硬度是指单位面积积雪承受抵抗力的大小，反映积雪的塑性压缩破坏能力。本研究中对硬度的测量使用刀片式硬度计 (Blade Hardness Gauge, BHG)，用于评估雪层结构差异和硬度，挖出雪坑剖面后每 10cm 测量一次硬度值，并结合肉眼观察对雪层进行分层。其中刀片尺寸：宽 10cm、厚 0.6mm，

测量刀片垂直插入雪层时受到的阻力,通常以力值表示(图 4 (d))。以 10cm/s 的速度贯入,贯入深度 4cm,记录测力计读数,每层雪测量多次取平均值。

(6) 抗剪强度:积雪抗剪强度是指积雪承受剪切应力的能力,由于雪极易受扰动,现场剪切盒试验是目前测量雪层抗剪强度的实用方法,剪切盒尺寸选择 200mm×200mm×50mm,竖板宽度 2mm,测量时需将雪面铲平,剪切盒竖直压入雪层中,快速施力拉动剪切盒至拉切雪层与原始雪层完全错位,用电子测力计记录其峰值(图 4 (e)),电子测力量程为 0~1000N,精度为±2N,剪切强度为测力计的数值除以有效剪切面积。

(7) 锥尖贯入试验(Cone Penetration Testing,CPT):积雪是由雪晶、空气和液态水组成的多孔介质,由于雪晶呈现高阻抗的介电特性,而含有离子的液态水是良好的导体,已有研究表明电导率与积雪含水率表现出极好的线性关系(Granlund et al, 2009),而电导率与电阻率互为倒数,因此电阻率与含水率之间存在显著的负相关关系,含水率越高,电阻率越低,同时锥尖贯入时会破坏雪颗粒间的连接,因此可以用 CPT 设备测量积雪层的强度和电阻率。本研究中 CPT 设备用于测量雪的锥尖阻力、侧壁摩擦力和电阻率,贯入时保持探头的贯入速率为 2cm/s(图 4(f)),其中锥尖阻力的标定量程为 0~200KPa,侧壁摩擦力为 0~100KPa,电阻率为 0~20MΩ·m。由于干雪的电阻率极低,在现场实测时会显示超出标定刻度的数值,该数值作为定性评估积雪干燥状态的依据。

2.2 数据整理与分析

本研究采用目视观测与刀片式硬度计(BHG)结合的方法对积雪剖面进行划分。挖出雪坑后,通过对现场的剖面观测,首先基于积雪层中比较明显的物理特征对其进行分层,例如积雪颗粒形态变化和层间界面清晰度等,将积雪结构初步划分为雪板层和软弱层;在此基础上,对初步划分的雪层开展相应的刀片式硬度计(BHG)试验进行验证,明确雪板层(Snow Slab, SS)和软弱层(Weak Layer, WL)的划分。通过对积雪参数的分层测量,构建基于雪板层和软弱层的多参数数据集,为后续积雪特征的分析提供数据基础。

在积雪物理力学特性的评估中,密度、硬度、锥尖阻力和电阻率等指标在物理变化上存在一定的关联,但在表征积雪演化时具有明显的互补性。密度和硬度作为传统的分层测试手段,反映了积雪层的压实状态与骨架强度;锥尖阻力的连续贯入,可以弥补人工分层测试分辨率的不足。此外,电阻率作为液态水的指标,可以指示诱发积雪力学强度弱化的水热驱动机制。本文的统计分析以分组对比分析为主。通过分析不同雪层参数的分布范围和变化趋势,分析积雪软弱层与雪板层在力学响应上的整体差异;对不同测试时期的试验结果进行分析对比,探讨积雪物理和力学特性的时间演化和空间差异。同时针对电阻率与力学参数之间的潜在关系,开展探索性的相关性分析,识别不同参数变化趋势之间的关系。

3 结果

3.1 研究区雪剖面结构及时间演化特征

根据气象数据,将嘎隆拉隧道 12 月至次年 3 月份积雪厚度稳定增长日期划分为稳定积雪期,4 月至积雪完全融化划分为融雪期。嘎隆拉隧道北侧不同试验时期的积雪剖面观测结果表明:积雪随着向消融期的转变,会逐渐表现出分层的特征,在 2 月稳定积雪期,虽然积雪中存在深霜、冰层等存在厚度极薄的弱层,但肉眼难以观察到,积雪结构表现出较高的均质性,未出现明显分层结构;而在 3 月份,随着气温逐渐升高,积雪开始出现分层结构,但整体呈现出均质性;当气温持续升高并进入消融期后,积雪则表现出显著的层理结构,呈软硬相间状,其中软弱层较薄,与相邻较硬雪层的物理力学特性截然不同。

3.2 雪层物理参数沿剖面的分布特征

(1) 雪温随深度变化特征

已有研究表明,积雪具有良好的隔热性,大气温度的波动主要作用于表层 0.05~0.20 m 厚的雪,而底部雪温较为稳定(Birkeland et al., 1998)。结合图 5 看,大气温度和相变过程影响着积雪层的温度,当大气温度较高时,积雪层温度随雪深的增加而降低,表现为负相关,而当大气温度较低时则呈现相反的规律,特

别是与下垫面接触的雪层温度在 0℃ 附近波动, 软弱层的温度普遍略高于雪板层, 顶层的软弱层雪温最高, 进一步表明积雪表层温度受大气影响。

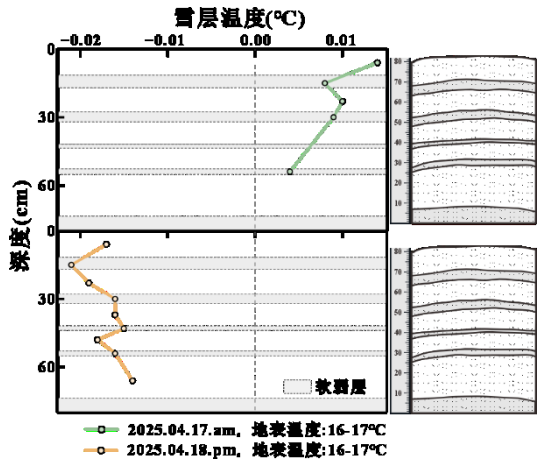


图 5 三面光雪层剖面温度随深度变化及示意图
Fig.5 Temperature Profile of Snow Layer with Three-Sided Exposure at Different Depths and Schematic Diagram

(2)电阻率随深度变化特征

当积雪进入消融期并开始呈现出明显的分层结构后, 通过 CPT 分别对不同雪深的软弱层和雪板层的电阻率进行测试, 试验结果表明(图 6): 软弱层的总体电阻率明显低于积雪板层, 说明软弱层中的含水率整体要高于雪板层, 其中雪板层的电阻率会随着深度的增加而有所增加, 说明雪板层随着积雪厚度的增加, 含水率会有所下降; 而软弱层的电阻率随着深度的变化先增加后减少, 在浅表层部位和底部地表接触部位的电阻率最低, 说明软弱层的含水率受大气温度及地表温度的影响较大, 而在雪板层之间的软弱层由于有较厚雪板层的保护, 未发生明显的相态转变, 含水率较低(图 6 上); 当经过一昼夜的阳光照射与夜间冻结作用后, 积雪层整体的电阻率呈现明显衰减趋势, 雪板层表面受大气温度影响含水率出现明显增大, 影响深度约为 30cm, 同时软弱层的存在阻碍了地表温度向上覆雪板层的温度传递, 在 30cm 范围内, 雪板层的电阻率值由整体增大向相近值趋近, 而 30cm 以下的雪板层电阻率值虽整体下降, 但整体仍呈现随深度逐渐增加的趋势(图 6 下)。

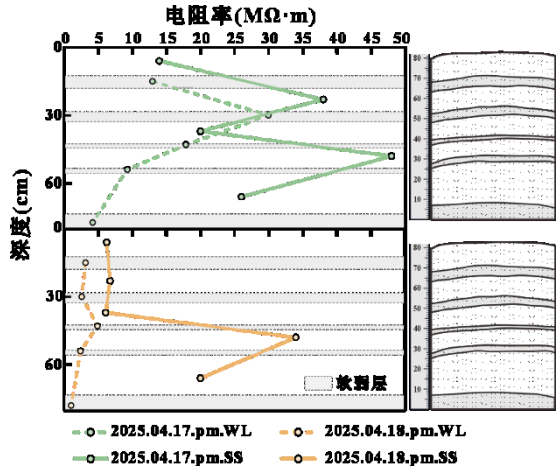


图 6 雪层电阻率随深度变化
Fig.6 Snow Layer Resistivity Variation with Depth

(3)密度随深度变化特征

嘎隆拉地区的积雪密度存在明显的垂向剖面变化, 表现出明显的季节性演化特征。在稳定积雪期, 积雪密度的测量范围在 0.2~0.45g/cm³ 之间, 在垂直剖面上虽有一定的波动, 但整体随积雪深度和时间的增加而逐渐增大, 表明此时积雪密度在一定程度上受自然沉积效应的控制, 最小值为表层积雪, 在 30cm 雪深

处往往会出现密度相对较大值(图 7(a)), 说明雪层结构具有不均匀性, 积雪并非单次降雪的结果, 该层可能是一次降雪事件后形成的具有特殊层位的雪层; 而进入融雪期后, 随着温度的升高积雪开始融化, 与稳定积雪期相比, 积雪层的含水率有所提升, 雪层密度整体高于积雪期, 密度范围在 $0.39\sim 0.48\text{g/cm}^3$ 之间, 但沿深度的变化特征发生变化, 呈现“先减后增”的特征(图 7(b)), 密度最大值出现在表层或底层, 和电阻率变化趋势相反, 说明在融雪期积雪密度主要受含水率的控制。

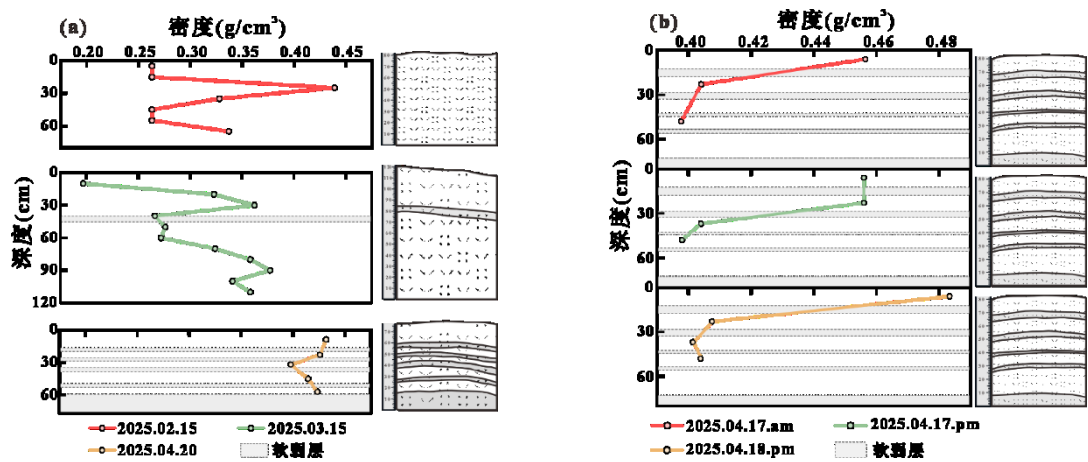


图 7 2-4 月(a)和三面光(b)雪层密度随深度变化
Fig.7 Snow layer density variation with depth for February–April (a) and three-sided illumination (b)

Michał Laska 等人对北极冰川积雪做了长达 30 多年的详细研究, 并构建了名为 Hansbreen 的雪坑数据集(Laska et al., 2022), 该数据集包含了晶粒形状、硬度和密度等多个参数, 可利用 niviz 进行可视化, 本文选取 2019.04.03 和 2019.06.19 的数据作为参考, 结果如图 8 所示, 图中不同的颜色表示不同晶粒形状, 其中上 x 轴表示手测硬度, 条块越长代表雪层越硬, 下 x 轴表示积雪密度, 用紫色曲线表示, 右下角为积雪剖面的测量时间。从密度曲线上看, 处于融化状态的积雪与冰层的密度显著高于其他颗粒形态的雪层, 本文的试验结果与其表现出相同的规律, 表明积雪的密度受含水率的影响, 含水率越高, 密度越大。

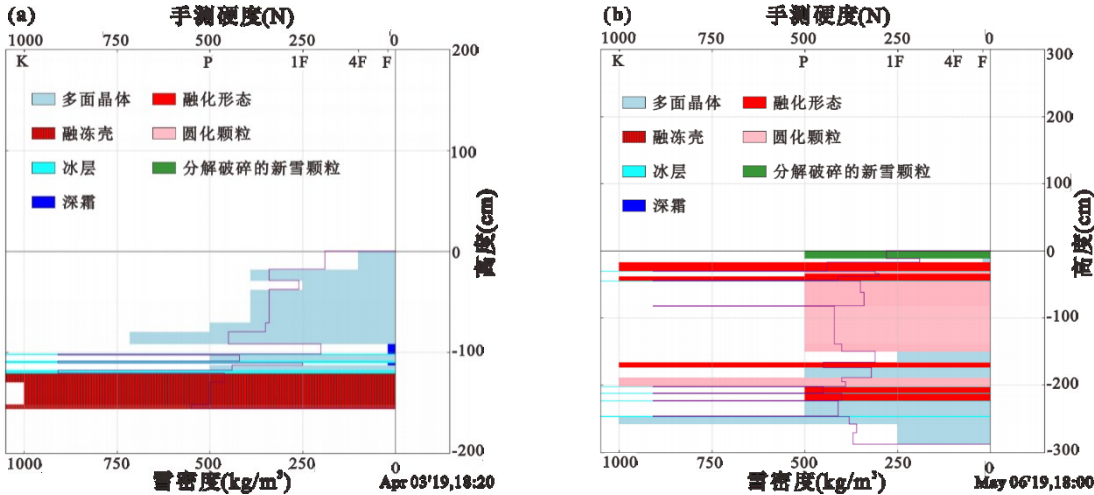


图 8 Hansbreen 雪坑现场实测数据
Fig.8 Field Measurement Data from Hansbreen Snow Pit

3.3 力学参数沿剖面分布特征

(1) 抗剪强度随深度变化特征

在稳定积雪期, 抗剪强度沿深度虽略有波动, 但整体表现为随深度的增加而增大, 测量范围在 $0\sim 13\text{kPa}$ 之间, 最小值普遍出现在浅表层积雪中 (图 9(a)); 而在融雪期, 由于软弱层的存在, 积雪沿深度的抗剪强

度波动较大(图 9(b)), 说明软弱层的性质与雪板层不同, 软弱层的抗剪强度明显低于积雪板层的抗剪强度; 对比融雪期三面光积雪剖面的数据可知, 随着光照时间的增加, 积雪层的整体抗剪强度呈现衰减的趋势。

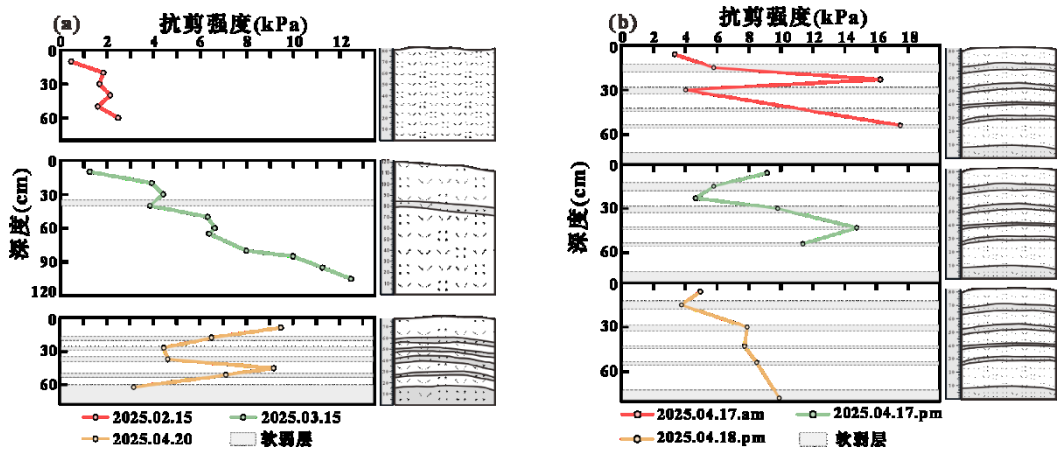


图 9 2-4 月(a)和三面光(b)雪层抗剪强度随深度变化
Fig.9 Shear strength of snow layers with depth from February to April (a) and three-sided illumination (b)

(2)硬度随深度变化特征

积雪层的硬度变化特征与抗剪强度呈现出相似的规律, 具有显著的季节性力学演化规律。现场试验结果显示, 在 2 - 3 月份的稳定积雪期, 积雪硬度在 0~35N 区间, 雪层硬度呈现出随深度和时间的增加逐渐增大的规律(图 10(a)), 而在 4 月份的融雪期, 由于软弱层的存在, 积雪硬度沿深度不再呈现规律性变化, 单独分析对比软弱层和雪板层的硬度(图 10(b))可知, 雪板层的硬度随深度的增加而增加, 软弱层无明显变化规律, 其硬度最低值出现在软弱层中的某一层或最底层, 同时软弱层的硬度明显低于雪板层。

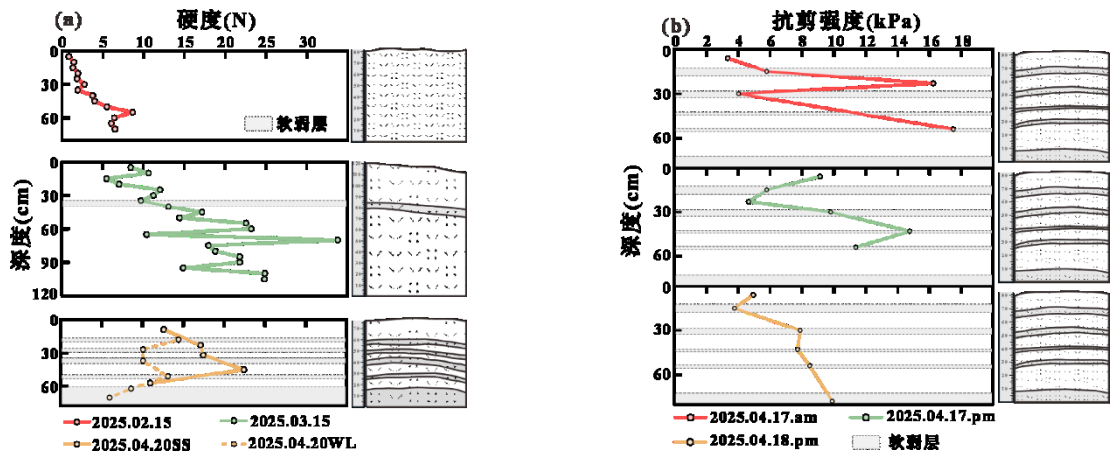


图 10 2-4 月(a)和三面光(b)雪层硬度随深度变化
Fig.10 Hardness of snowpack with depth from February to April (a) and three-sided illumination (b)

计算雪板层沿雪深的硬度增长率, 计算结果见表 2, 随着时间的增加, 硬度增长率在减小, 说明积雪前期, 雪层相对松软, 硬度增加较快, 而随着时间的增加, 雪层有了一定硬度后, 硬度增长速率有所降低。

表 2 硬度增长率
Table 2 Hardness Growth Rate

测试地点	北侧			南侧		
测试时间	2025.02.15	2025.03.15	2025.04.20	2025.04.17.am	2025.04.17.pm	2025.04.18.pm
增长率/%	22.48	17.22	16.12	38.62	35.40	32.07

从数值范围看, 本研究测得的刀片式硬度值主要分布在 0~35 N 之间, 与 Barsevskis 的测试结果处于相近区间, 同时 Barsevskis 建立了刀片硬度计测量值与手测硬度等级之间的对应关系(图 11(a)), 其中手测

硬度是依据插入阻力大小，以拳头（fist, F）、四指（4fingers, 4F）、一指（1finger, 1F）、铅笔（pencil, P）及刀片（knife blade, K）划分的基础经验等级(Fierz et al., 2009)，并辅以“+”“-”进行次级细分，该关系为不同测试方法的硬度指标对照提供了依据(Barsevskis and Paetkau, 2022)。依据该对应关系，对 Hansbreen 雪坑的现场观测数据(图 8)进行对比分析发现，软弱层的硬度多分布于 F ~ 4F 等低硬度等级范围内，与本文中软弱层对应的硬度区间具有良好一致性。

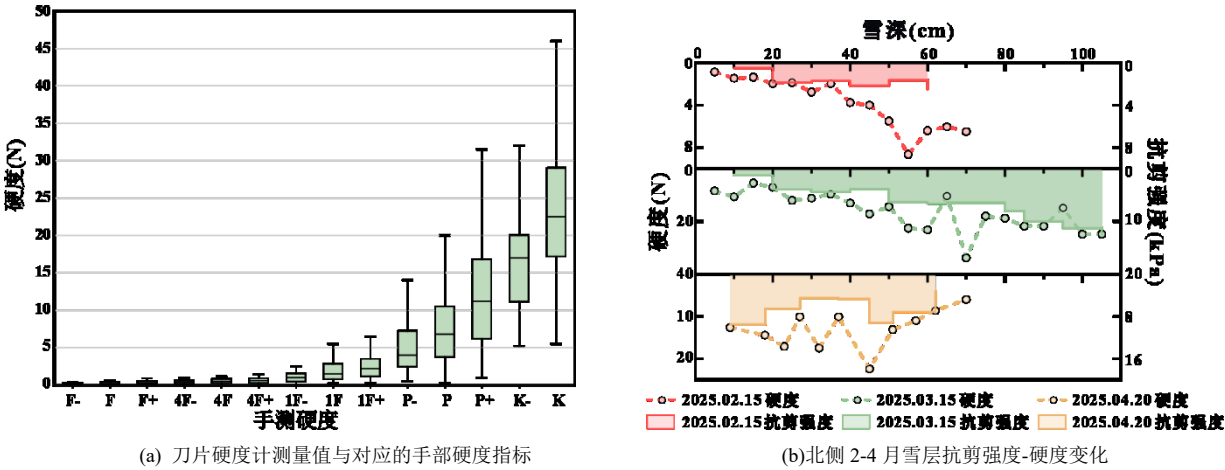


图 11 硬度相关指标
Fig.11 Hardness-Related Indicators

综合分析积雪硬度与抗剪强度(图 11(b))，结果显示，积雪的硬度与抗剪强度在垂向分布上具有高度的一致性，硬度大的层位其抗剪强度通常也较高。

(3) 锥尖阻力随深度变化特征

用 CPT 设备对雪层从表层至底层依次测量记录其锥尖阻力，结果见图 12，结果显示，软弱层的锥尖阻力明显低于邻近的积雪板层。对于积雪板层，积雪的锥尖阻力从表层到底层呈现逐渐增大的规律。

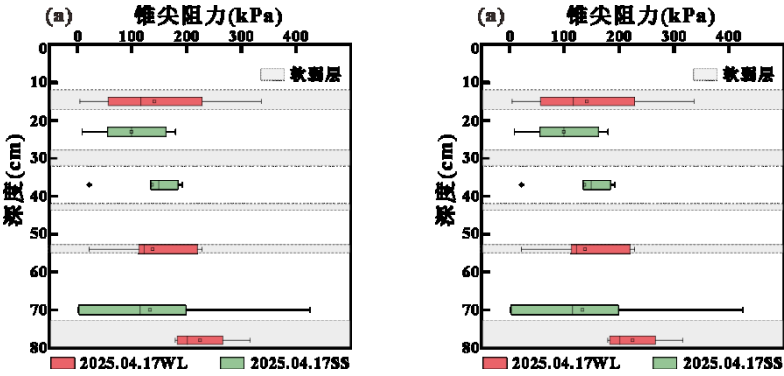


图 12 2025.04.17(a)和 2025.04.18(b)锥尖阻力随深度变化
Fig.12 2025.04.17(a) and 2025.04.18(b)Tip resistance varies with depth

Schneebeli (图 13 (a)) 测试的穿透阻力范围在 0-500kPa(Schneebeli and Johnson, 1998)，庄峰对硬度与密度的研究表明 (图 13 (b))，当积雪密度为 0.45 g/cm^3 时，其锥尖阻力在 0 – 1000 kPa 内(庄峰, 2020)，对比已有研究，本试验测得的锥尖阻力值整体落在上述文献的范围内，且测量结果中存在阻力值骤降的层位，表明本研究获得的锥尖阻力数据及规律具有良好的合理性。

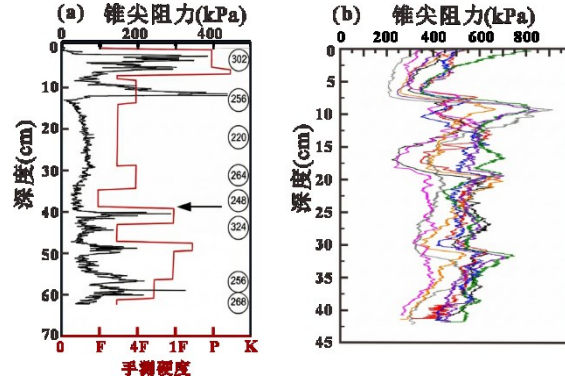


图 13 Schneebeli 试验数据(a)和庄峰试验数据(b)
Fig.13 Schneebeli test data (a) and Zhuangfeng test data (b)

本研究基于嘎隆拉隧道北侧积雪，通过对实测数据进行线性拟合，提出在稳定积雪期抗剪强度、硬度与深度的关系。

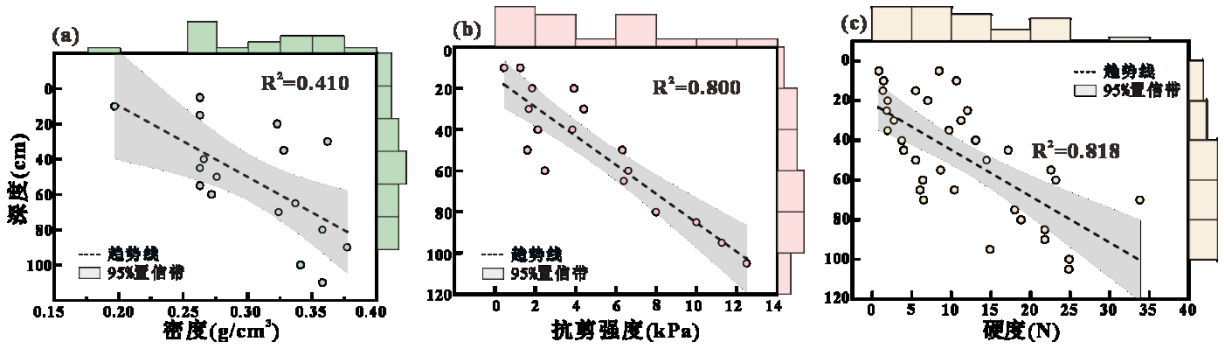


图 14 积雪密度(a)、抗剪强度(b)和硬度(c)与深度拟合曲线
Fig.14 Fitting curves for snow density (a), shear strength (b), and hardness (c) versus depth

抗剪强度和硬度随深度变化的拟合关系式如下：

$$\tau = 0.1136z - 0.7003 \quad (1)$$

τ 为抗剪强度，kPa； z 为雪深，cm， $R^2 = 0.800$ ；

$$\kappa = 0.1056z - 0.1736 \quad (2)$$

κ 为积雪硬度，N； z 为雪深，cm， $R^2 = 0.818$ 。

拟合结果显示，积雪的物理参数和力学参数在积雪剖面上表现出显著的差异性。积雪密度与深度的线性拟合结果较差， R^2 仅为 0.410，积雪密度整体表现为随深度的增加而波动增加的趋势，说明积雪密度在一定程度上受自然沉积过程中的重力压实，波动特征表明积雪在演化过程中，受到复杂的气象过程的强烈干扰，积雪内部形成了性质不同的特定层位；与密度不同，积雪的力学参数则随深度表现出较好的线性增长趋势， $R^2 \geq 0.8$ ，且随雪深的增加趋势相近，每增加 1m 雪深，分别增大 0.1136kPa 和 0.1056N，表明在稳定积雪期，积雪的抗剪强度和硬度变化的影响因素一致，主要受重力压实作用的影响。

3.4 软弱层与雪板层对比

(1)软弱层出现特征

根据稳定积雪期至消融期的积雪剖面观测可知，随着积雪从稳定期向消融期的转变，积雪层的分层界面逐渐清晰，3 月份首次出现界面清晰的软弱层，但仅有一层，且厚度较小，随着温度的升高，积雪进入消融期，雪层中界面清晰的软弱层数增多，层厚增加，且软弱层在雪剖面中与雪板层交替出现。现场剖面记录和测量结果显示，相比于雪板层，软弱层的厚度较小，但在积雪剖面中界限清晰，多数情况下厚度小于 5 cm，个别位置软弱层略厚，尤其是雪层底部与下垫面接触部分，一方面，是由于地面温度相较于积雪较高，较大的温度梯度使积雪融化；同时水力梯度使土壤中的自由水渗入雪层底层；另一方面融水和降雨

也会在重力作用下渗透到雪层底部，多重因素促进底层积雪的融化。

(2)软弱层与雪板层的力学参数对比

定义硬度综合衰减率 $\eta = \frac{H_{ref}-H_{weak}}{H_{ref}} \times 100\%$ ， $H_{ref} = \frac{H_{above}+H_{below}}{2}$ ，硬度比 $R = \frac{H_{weak}}{H_{ref}}$ ，式中， H_{above} 为上覆雪板层的硬度， H_{below} 为下伏雪板层的硬度， H_{weak} 为软弱层的硬度。其中 η 越大，R 越小，说明软弱层硬度衰减越快，雪层越不稳定，计算三面光雪层的硬度衰减率，结果见表 3。综合衰减率 η 的结果表明，软弱层的硬度衰减率随着光照时间的增加明显增大，说明软弱层的硬度随着光照时间的增加，硬度衰减越快，衰减最快的为第一层软弱层，综合衰减率数值最大。

表 3 软弱层与雪板层综合衰减率与硬度比
Table 3 Comprehensive Decay Rate and Hardness Ratio of Weak Layers and Snowboard Layers

实验时间	上层雪板硬度 H_{above} (N)	软弱层硬度 H_{weak} (N)	下层雪板硬度 H_{below} (N)	综合衰减率 η (%)	硬度比 $R = H_{weak}/H_{ref}$
2025.04.17am	6.74	7.18	11.04	19.20	0.81
	11.04	11.31	12.53	4.02	0.96
2025.04.17pm	5.30	7.96	8.95	37.95	1.12
	8.95	5.90	10.07	32.19	0.62
	10.07	7.68	12.57	-7.11	0.68
2025.04.18pm	3.68	2.08	5.05	52.44	0.48
	5.05	4.10	3.71	6.42	0.94
	3.71	2.60	6.09	46.94	0.53
	6.09	3.80	9.34	50.73	0.49

根据上表的实测数据可知，多数积雪层的硬度比 $R < 1$ ，表明软弱层的力学性质普遍弱于周围雪层，在消融期初期，软弱层硬度比 R 处于 0.81~0.96 的相对高位，随着光照时间和气温的增长，硬度比 R 逐渐减小，至 4 月 18 日下午，该值迅速衰减至 0.49~0.53，且下午的硬度比明显小于上午，表明积雪软弱层的硬度下降速率明显高于雪板层。

由上述 CPT 测量的锥尖阻力图可以看出，锥尖阻力中值足以表达雪层的锥尖阻力变化规律，因此取其中值进行软弱层与雪板层的分析。综合分析软弱层与雪板层的硬度、锥尖阻力以及电阻率，从箱型图的结果(图 15)来看，软弱层的力学参数明显低于软弱层。

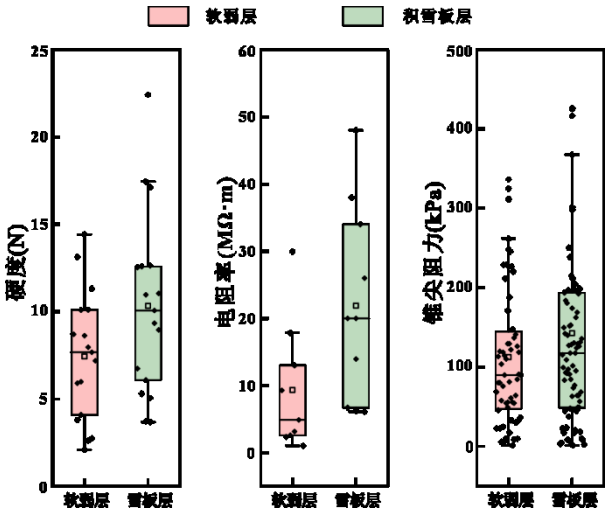


图 15 软弱层与雪板层物理力学参数对比
Fig.15 Comparison of Physical and Mechanical Parameters Between Weak Layers and Snowboard Layers

4 讨论

4.1 雪层结构的时间演化机制

本研究中,嘎隆拉隧道北侧积雪在稳定积雪期未见明显分层结构,受重力沉降和烧结作用(Krol, 2017),积雪微观结构发生变化。在 4 月中旬积雪剖面出现结构清晰、力学性质明显弱化的软弱层。这一特征表明,软弱层的形成并非源于单次降雪事件,而是与春季阶段积雪内部的逐步演化过程有关。一次降雪事件停止后,积雪表层经历多种气象和物理过程,会显著改变表层结构,而这些表层特征在后续降雪被掩埋后,会形成特定物理属性的层位,比如表面霜、融冻壳、风板等,同时不同的气象条件差异也会使积雪形成分层结构(Colbeck, 1991)。

这些具有特殊物理性质的层随着春季气温升高,日内冻融过程增强,积雪内部的温度梯度和水分条件发生明显变化,雪的融化变质作用增强,值得注意的是,对于分解破碎的雪,在短期内积雪强度会随着含水量的增加而增加,随着含水率的进一步增加,液态水开始溶解冰骨架,导致积雪粘聚力下降(Schlumpf et al., 2024),为软弱层的演变提供条件。由于这些层具有较高的孔隙度和渗透率,成为了融水运移的优势流通过路径,液态水在此处聚集(Marsh and Woo, 1984; Kinar and Pomeroy, 2015) (图 16(a)),从而表现出低阻抗特征。随着温度的升高,融雪进程加剧,同时地表出现径流,自由水在重力作用与毛细作用下不断在积雪层中聚集,积雪层中的含水量持续增加,软弱层厚度逐渐变厚,由于受重力作用控制的融水最先到达顶层软弱层,而受毛细作用控制的地表流水在底层聚集,表层和接触地表的软弱层厚度最大。

本文的咖啡示踪试验发现,咖啡液在毛细作用下向上部运移,液态水在积雪颗粒接触处,即曲率半径最小处聚集,局部富集的水分快速破坏颗粒间的冰桥连接,显著降低雪颗粒间的作用力(Colbeck, 1982),底部颜色最深,说明此处聚集的自由水含量最高(图 16(b)),与此同时,底层积雪还受地热通量的驱动产生融化,融冻变质作用最强烈,水分富集,积雪强度下降速度较快,容易成为积雪层的薄弱层;现场将两块新挖的雪块堆叠来模拟两次降雪事件,图 16(c)和(d)是 2025.04.17 下午 16:12 和 18:10 的结构剖面,结果进一步证实,表层积雪直接暴露于大气环境,受强烈的太阳辐射影响,率先发生剧烈的相变融化,表层冰晶骨架消融收缩,产生的大量液态水,在重力作用下沿雪层孔隙向下快速渗透与运移,迅速充填孔隙,导致表层积雪含水率急剧升高;同时随着消融时间的增加,融水沿两层雪交界处持续汇聚,软弱层厚度明显增加,结构弱化效应随时间显著增强。

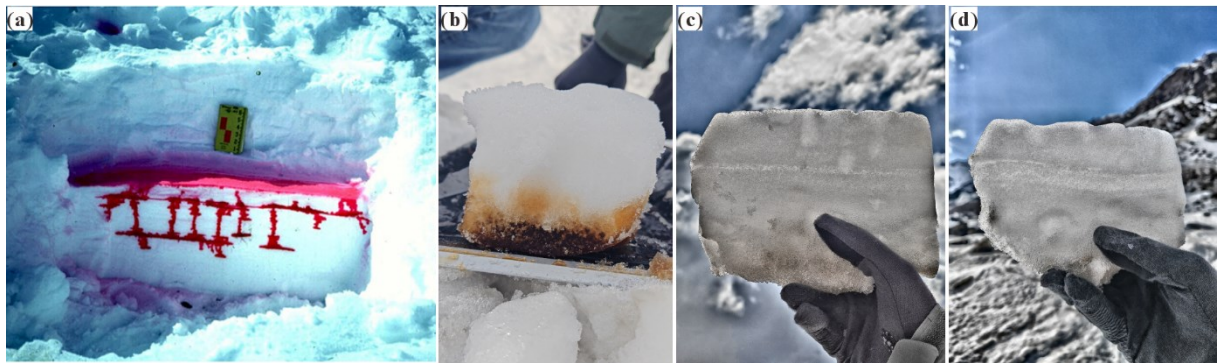


图 16 水流动路径及软弱层变化(图(a)来源于文献(Kinar & Pomeroy, 2015; Marsh & Woo, 1984))
Fig.16 Water Flow Path and Variations in Weak Layers(Picture from reference(Kinar & Pomeroy, 2015; Marsh & Woo, 1984))

4.2 液态水对软弱层力学性质的控制作用

在 2-3 月份的积雪期未识别出明显软弱层结构,本节重点讨论 4 月中旬出现的软弱层与相邻雪板层。液态水在软弱层大量聚集并破坏了积雪骨架,积雪颗粒之间通过冰桥连接,由于积雪颗粒接触处的曲率半径最小,液态水倾向于在此处聚集,会快速破坏连接键,导致颗粒间的连接断裂(图 17 错误!未找到引用源。),从而显著降低了雪颗粒间的作用力。

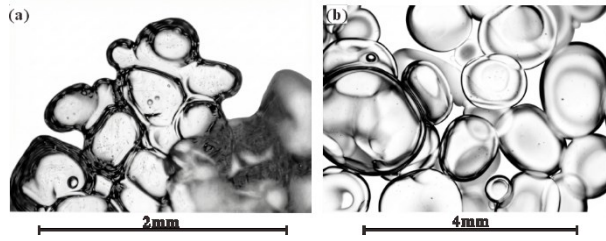


图 17 融水对积雪破坏积雪骨架(图片参考文献(ColbeckS C, 1982))
Fig.17 Destruction of the snow skeleton by meltwater (Image reference: Colbeck, S. C., 1982)

现场测试结果显示，软弱层在硬度、抗剪强度及锥尖阻力等力学参数上整体低于相邻雪板层，表现出明显的力学弱化特征，当受到外界扰动时，变形无法在雪层间协调传递，当上覆雪板层施加荷载时，软弱层容易发生破坏，破坏一般发生在某一层含水率较高（一般是顶层）的软弱层（图 18a）以及与下垫面接触的软弱层（图 18b）。这种硬-软-硬的三明治结构，使雪层极易失稳。

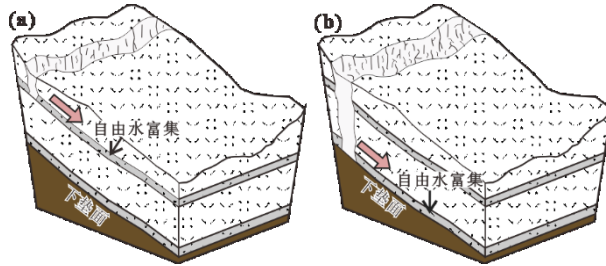


图 18 雪斜坡失稳示意图
Fig.18 Schematic Diagram of Snow Slope Instability

图 19 为 2025.04.18.pm 的物理力学参数，结果说明电阻率、硬度和锥尖阻力表现出相似的变化趋势，抗剪强度呈现出一定的离散性，根据现场实测数据构建积雪的硬度和锥尖阻力与电阻率关系，拟合关系式如下：

$$\kappa = 0.1763\xi + 3.5781 \quad (3)$$

其中， κ 为积雪层硬度，N； ξ 为电阻率， $M\Omega \cdot m$ ，决定系数 $R^2 = 0.594$ ；

$$\varpi = 5.1683\xi + 66.404 \quad (4)$$

其中， ϖ 为积雪层的锥尖阻力，kPa； ξ 为电阻率， $M\Omega \cdot m$ ， $R^2 = 0.626$ 。

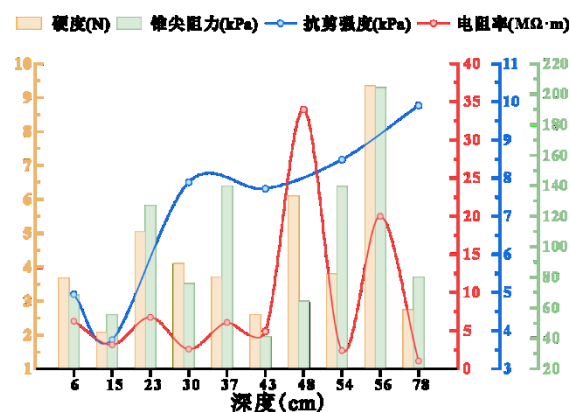


图 19 2025.04.18 雪层物理力学参数
Fig.19 Physical and Mechanical Parameters of Snow Layer on 2025.04.18

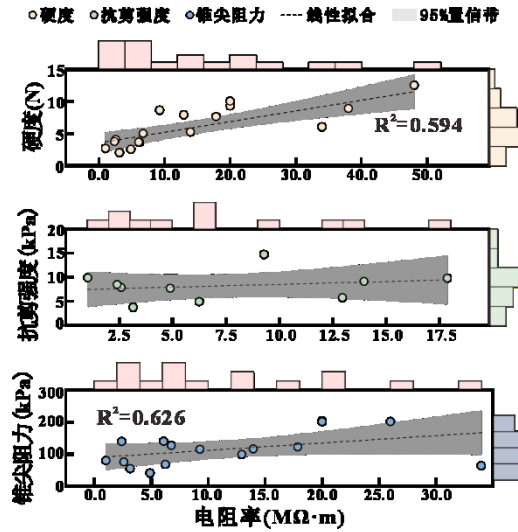


图 20 力学参数与电阻率关系
Fig.20 Relationship Between Mechanical Parameters and Resistivity

拟合曲线见图 20，说明硬度和锥尖阻力等力学参数与电阻率呈现正相关的变化规律，即与含水率表现出负相关的规律。这一拟合结果印证了液态水对积雪力学强度的弱化作用，具有一定的工程意义，传统的积雪力学测试多为破坏性操作，且受人为操作影响误差较大，而积雪的电学性质具有高度敏感且易于连续测量，基于本研究的电-力学耦合关系，实时反演融雪期雪层力学强度，追踪潜在软弱层的时空演化，可以为雪崩预警模型提供关键的理论算法支撑。

4.3 海洋性气候积雪力学参数的时空演化特征

本研究表明稳定积雪期与融雪期的力学性质表现出明显差异，积雪结构的演化反映了重力和液态水对力学性质的驱动作用。在稳定积雪期，积雪的密度可以反映其内部的压实固结状态。实测数据显示，研究区的积雪密度在 $0.20 \sim 0.45 \text{ g/cm}^3$ 之间，整体表现为随深度的增加而增大，其主要受重力作用影响。而大陆性气候相对干燥，积雪密度相对较小，多在 $0.15 \sim 0.35 \text{ g/cm}^3$ ，积雪密度随雪深的变化增加较小，受重力作用影响较弱；同时由于积雪层内部强大的温度梯度，其底部长期发育粒径粗大、孔隙率较高的深霜，无法在上覆荷载作用下被有效压实，导致积雪底部相较于中层的密度稍低(Lackner et al., 2022)。

同样，研究区的积雪硬度和抗剪强度与雪深表现出强相关性，积雪初期雪晶形态不规则，颗粒间接触点少，在自身重力驱动下优先发生几何重排；随着压实程度加深，颗粒间接触面积扩大，冰晶的烧结作用持续加强，骨架逐渐致密，压实速率相应降低，积雪层的硬度与抗剪强度随深度显著增加；与此不同的是，大陆性气候积雪在风力和重力作用下，中上部的变化特征与研究区一致，而底部由于深霜层的存在，硬度相较于中层积雪有所降低(Pielmeier and Schneebeli, 2003)。

进入融雪期后，液态水成为主导积雪物理力学性质演化的核心驱动力。研究区的积雪剖面密度增大至 $0.39 \sim 0.48 \text{ g/cm}^3$ ，沿深度呈现先减后增的趋势，这一现象反映了融水在复杂雪层中的分布不均匀特征；同时力学参数迅速衰弱，南侧积雪的硬度深度增长率由 38.62% 快速降至 32.07% ，表明液态水大量消融了颗粒间的冰键，迅速软化冰晶骨架；实测数据显示，富水层位的综合衰减率在极短时间内飙升至 52.44% ，同时硬度比 R 也由初期的 $0.81 \sim 0.96$ 衰减至 $0.48 \sim 0.53$ ， R 值的急速降低表明在自由水浸润下，软弱层的硬度衰减速度远高于相邻的致密雪板层。这种层间力学性质的急剧分化，使得富水层位演化为强度极低的软弱层，为融雪期雪崩的孕育和释放提供了极为有利的力学条件。

5 结论

本研究基于嘎隆拉隧道 2 - 4 月的开展较为系统的现场测试，结合雪层结构的观测和物理力学参数分析，对融雪期的积雪结构演化和软弱层的特征进行了分析。主要结论如下：

(1)在稳定积雪期, 积雪层的力学结构整体处于稳定状态, 期间的积雪力学性质主要由重力压实作用和烧结作用主导, 表现出随深度和时间的增加而增大的变化特征, 抗剪强度测量范围在 0~13kPa 之间, 硬度在 0~35N 之间, 同时提出了该地区抗剪强度、硬度与积雪深度的关系; 进入融雪期后, 积雪层分层结构逐渐显现, 雪板层的力学变化趋势与稳定积雪期相同, 软弱层则无明显规律。

(2)积雪软弱层的形成并非源于单次降雪事件, 而是在后期经历多种物理过程后的结果。软弱层与雪板层间隔分布在积雪层中, 初始厚度较小, 随着消融进程的加剧, 最终贯通全层, 与相邻雪板层相比, 软弱层的力学性质明显弱于雪板层, 为潜在不稳定层。

(3)水是加速软弱层演化以及弱化积雪力学性质的关键因素, 电阻率在一定程度上反映了积雪层的含水量, 本研究提出了硬度、锥尖阻力与电阻率的对应关系, 电阻率与积雪的力学参数呈现正相关的关系, 即与含水量呈现负相关的对应关系。

作者贡献度说明:

作者 1: 负责实验计划与实施; 数据收集与分析; 撰写初稿及修改论文。作者 2: 提供指导与研究建议; 审阅论文并提出修改意见。作者 3: 协助实验设计及技术支持; 审阅论文并提出修改意见。作者 4: 参与实验方法的优化及结果的讨论。作者 5(通讯作者): 设计研究整体框架; 提供资源支持。

References

- Birkeland, K. W., Johnson, R. F., & Schmidt, D. S. (1998). Near-surface faceted crystals formed by diurnal recrystallization: A case study of weak layer formation in the mountain snowpack and its contribution to snow avalanches. *Arctic and Alpine Research*, 30(2), 200-204. DOI: <https://doi.org/10.2307/1552135>
- Barsevskis, P., & Paetkau, M. (2022). Snow characteristics with the blade hardness gauge (Doctoral dissertation, Thompson Rivers University).
- Colbeck, S. C. (1982). An overview of seasonal snow metamorphism. *Reviews of Geophysics*, 20(1), 45-61. DOI: <https://doi.org/10.1029/RG020i001p00045>
- Colbeck, S. C. (1991). The layered character of snow covers. *Reviews of Geophysics*, 29(1), 81-96. DOI: <https://doi.org/10.1029/90RG02351>
- Conlan, M., & Jamieson, B. (2015). Formation and strengthening of layers of dry faceted crystals above artificial melt-freeze crusts from overburden stress in a controlled environment. *Canadian Geotechnical Journal*, 53(2), 187-195. DOI: <https://doi.org/10.1139/cgj-2015-0045>
- Fierz C, Armstrong R L, Durand Y, et al. (2009). The international classification for seasonal snow on the ground.
- Granlund, N., Lundberg, A., Feiccabrino, J., et al. D. (2009). Laboratory test of snow wetness influence on electrical conductivity measured with ground penetrating radar. *Hydrology Research*, 40(1), 33-44. DOI: <https://doi.org/10.2166/nh.2009.040>
- Jamieson, J. B., & Johnston, C. D. (1990). In-situ tensile tests of snow-pack layers. *Journal of Glaciology*, 36(122), 102-106. DOI: <https://doi.org/10.3189/S002214300000561X>
- Jamieson, J. B., & Johnston, C. D. (1992). Snowpack characteristics associated with avalanche accidents. *Canadian Geotechnical Journal*, 29(5), 862-866. DOI: <https://doi.org/10.1139/t92-093>
- Jamieson, J. B. (1995). Avalanche prediction for persistent snow slabs.
- Jamieson, J. B. (1999). The compression test-after 25 years. *The Avalanche Review*, 18(1), 10-12.
- Kinar, N. J., & Pomeroy, J. W. (2015). Measurement of the physical properties of the snowpack. *Reviews of Geophysics*, 53(2), 481-544. DOI: <https://doi.org/10.1002/2015RG000481>
- Krol, Q. E. (2017). Upscaling the evolution of snow microstructure: From 4D image analysis to rigorous models (Doctoral dissertation, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne).
- Laska M, Luks B, Kępski D, et al. (2022). Hansbreen Snowpit Dataset—over 30-year of detailed snow research on an Arctic glacier. *Scientific Data*, 9(1), 656. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01767-8>
- Lackner, G., Domine, F., Nadeau, D. F., et al. M. (2022). Snow properties at the forest-tundra ecotone: predominance of water vapor fluxes even in deep, moderately cold snowpacks. *The Cryosphere*, 16(8), 3357-3373. DOI: <https://doi.org/10.5194/tc-16-3357-2022>
- Marsh, P., & Woo, M. K. (1984). Wetting front advance and freezing of meltwater within a snow cover: 1. Observations in the Canadian Arctic. *Water Resources Research*, 20(12), 1853-1864. DOI: <https://doi.org/10.1029/WR020i012p01853>
- McCallum, A. (2013). Cone Penetration Testing (CPT): a valuable tool for investigating polar snow. *Journal of Hydrology (New Zealand)*, 97-113. <https://www.jstor.org/stable/43945048>
- Pielmeier, C., & Schneebeli, M. (2003). Stratigraphy and changes in hardness of snow measured by hand, ramsonde and snow micro penetrometer: a comparison with planar sections. *Cold Regions Science and Technology*, 37(3), 393-405. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0165-232X\(03\)00079-X](https://doi.org/10.1016/S0165-232X(03)00079-X)
- Schaap, L. H., & Föhn, P. M. (1987). Cone penetration testing in snow. *Canadian Geotechnical Journal*, 24(3), 335-341. DOI: <https://doi.org/10.1139/t87-044>

- Schneebeil, M., & Johnson, J. B. (1998). A constant-speed penetrometer for high-resolution snow stratigraphy. *Annals of Glaciology*, 26, 107-111. DOI: <https://doi.org/10.3189/1998AoG26-1-107-111>
- Simenhois, R., & Birkeland, K. (2006, October). The extended column test: a field test for fracture initiation and propagation. In *Proceedings ISSW* (Vol. 10, pp. 79-85).
- Schlumpf, M., Hendrikx, J., Stormont, J. et al. R. (2024). Quantifying short-term changes in snow strength due to increasing liquid water content above hydraulic barriers. *Cold Regions Science and Technology*, 218, 104056. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2023.104056>
- Winkler, K., & Schweizer, J. (2009). Comparison of snow stability tests: Extended column test, rutschblock test and compression test. *Cold Regions Science and Technology*, 59(2-3), 217-226. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2009.05.003>
- Wang, Q., Xing, A., Wang, W., et al. (2026). Multi-parameter seismic metrics for detection and classification of rock and ice-rock avalanches. *Cold Regions Science and Technology*, 104881. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2026.104881>

附中文参考文献

- 车涛等 著. (2020) 中国积雪地面观测规范. 北京: 科学出版社.(Che, T., et al. (2020) The Chinese Guidelines for Snowpack Observation in the Field. *Beijing: Science Press*. (in Chinese))
- 付强, 彭莉, 汪恩良, 等. (2017) 积雪特性参数分析及雪深模型建立. 东北农业大学学报, 2017, 48(12): 36-45. (Fu, Q., Peng, L., Wang, E L., et al, (2017) Analysis on snow characteristic parameters and construction of snow depth modeling. *Northeast Agri Univ*, 48(12): 36-45. (in Chinese with English abstract))
- 李林, 李晓东, 李红梅等. (2021) 青海省气象科学研究所.青藏高原牧区雪灾专题图. (Li, L., Li, X D., Li, H M., et al. (2021) Thematic Map of Snow Disasters in Pastoral Areas of the Qinghai-Tibet Plateau. Xining: Qinghai Institute of Meteorological Sciences. (in Chinese))
- 沈丹祎, 杨剑, 朱永生, 等. (2025). 雪崩形成机制及危险性评价方法综述. *地球科学*, 1-23. (Shen, D Y., Yang, J., Zhu, Y S., et al. (2025). Research progress on formation mechanisms and rapid hazard assessment of snow avalanche. *Earth Science*, 1-23. (in Chinese with English abstract))
- 田旭文, 姚鑫, 周振凯, 等. (2026) 基于 GIS 与 RAMMS 模拟的雪崩释放区识别及危险性评估: 以西藏扎墨公路嘎隆拉段为例. *地球科学*, 1-17. (Tian, X W., Yao, X., Zhou, Z K., et al. (2026) Snow Avalanche Release Area Identification and Hazard Assessment Based on GIS and RAMMS Modeling: A Case Study of the Galongla Section of the Zhamo Highway, Xizang. *Earth Science*, 1-17. (in Chinese with English abstract))
- 王楷迪, 李星月, 黄雨, 等. (2025). 自然积雪与雪崩堆积体的剖面密度特征分析. *地球科学*, 50(10), 3955-3966. (Wang, K D., Li, X Y., Huang, Y., et al. (2025). Analysis on Density Profile Characteristics of Naturally Deposited Snow and Avalanche Deposition. *Earth Science*, 50(10): 3955-3966. (in Chinese with English abstract))
- 中国科学院兰州冰川冻土研究所. (1979) 雪崩及其防治. 北京: 科学出版社. (Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, (1979) Chinese Academy of Sciences. Avalanches and Their Control. *Beijing: Science Press*. (in Chinese))
- 庄峰. (2019) 积雪硬度及其测试技术的实验研究(硕士学位论文). 大连理工大学. DOI:10.26991/d.cnki.gdllu.2019.000727. (Zhuang, F. (2019) Experimental Study on Snow Hardness and Its Testing Technology (Master's Thesis). *Dalian University of Technology*. DOI: 10.26991/d.cnki.gdllu.2019.000727. (in Chinese with English abstract))