

doi:10.3799/dqkx.2025.102

自然积雪与雪崩堆积体的剖面密度特征分析

王楷迪¹, 李星月^{1,2*}, 黄雨^{1,2}, 刘杰^{3,4}

1. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092

2. 同济大学土木工程防灾减灾国家重点实验室, 上海 200092

3. 新疆交通规划勘察设计研究院有限公司, 新疆乌鲁木齐 830006

4. 新疆高寒高海拔山区交通基础设施安全与健康重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830006

摘要: 为明确区域积雪雪崩情况, 对 2024 年 1 月喀纳斯雪崩区两条典型公路沿线积雪密度进行原位测量分析。基于中国西北大陆性气候条件下干冷积雪特征, 对比自然降雪和雪崩堆积情况下的积雪密度特征, 揭示积雪密度在垂直剖面上的变化规律。结果显示, 不同情况下积雪密度的变化趋势具有相似性, 但自然积雪的密度梯度和最大值与雪崩堆积体存在显著差异。因此, 可结合积雪垂直剖面密度分布特征与最大值, 提出判别雪体为自然积雪或雪崩堆积体的方法。研究成果为野外自然积雪及雪崩堆积体的分析和识别提供了科学依据。

关键词: 喀纳斯雪崩; 积雪密度; 自然积雪; 雪崩堆积体

中图分类号: P426.63+5; P426.63+6 **收稿日期:** 2025-04-30

Analysis on density profile characteristics of naturally deposited snow and avalanche deposition

WANG Kaidi¹, LI Xingyue^{1,2*}, HUANG Yu^{1,2}, LIU Jie^{3,4}

1. Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China

2. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China

3. Xinjiang Transportation Planning, Survey and Design Institute Co., Ltd., Urumqi Xinjiang 830006, China

4. Xinjiang Key Laboratory for Safety and Health of Transportation Infrastructure in Alpine and High-altitude Mountainous Areas, Urumqi Xinjiang 830006, China

Abstract: In order to clarify regional snow and avalanche conditions, the snow density along two typical highway lines in the Kanas avalanche area in January 2024 was measured. Based on the characteristics of dry and cold snow under the continental climate conditions of northwest China, the density of naturally deposited snow and avalanche deposition is compared. The different characteristics of the density profiles at different conditions are identified. The results show that the trends of snow density profiles under the different conditions share similarities, but the density gradient and the maximum density change significantly from naturally deposited snow to avalanche deposition. Therefore, based on the characteristics of the vertical density profile and the maximum snow density, it can be identified whether a snow deposition is from natural snowfall or an avalanche. The outcomes provide a scientific basis for the analysis and identification of natural snow and avalanche deposits in the field.

Key words: Kanas avalanche; snow density; naturally deposited snow; avalanche deposition

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (No. 42202312); 交通运输部行业重点科技项目 (2022-ZD6-090)

作者简介: 王楷迪 (1998—), 男, 博士研究生, 主要从事冰冻圈灾害研究. E-mail: 2310506@tongji.edu.cn, ORCID: 0009-0006-5256-2701.

***通讯作者:** 李星月, E-mail: xingyueli@tongji.edu.cn, ORCID: 0000-0002-0805-2185.

引言

雪崩作为破坏性最强的自然灾害之一，严重威胁高山地区道路安全。阿勒泰地区地处中国新疆北部，由于大西洋及北冰洋的气流影响，冬季出现大规模长时降雪（Wang et al., 2017），在风、温度等其他外界因素作用下，极易诱发雪崩，造成基础设施的损坏和山区人畜的伤亡，阻碍地区社会及经济的可持续发展（Hao et al., 2018）。因此，如何防治雪崩灾害是该地区发展的一大挑战，其中关键问题在于野外雪崩情况的识别与分析。

雪密度作为雪的基本物理参数之一，其特征及变化趋势能够反应积雪情况。雪力学参数的确定（Wang and Baker, 2013），渗透性、热导率等性质的变化（Calonne et al., 2012）以及雪动力学模型的构建（Lehning et al., 2002）都与雪密度紧密相关，其在积雪研究中广泛应用。在雪崩过程中，存在雪颗粒的碰撞、剪切、摩擦等动力学行为以及融化等热力学行为（Valero et al., 2015；Sovilla et al., 2001），导致雪体密度增大。这种动态压密和热力学增密效应使雪崩堆积体的密度通常高于自然降雪在自重下沉积形成的雪层密度（Li et al., 2021）。因此，可利用积雪密度特征作为分析或判别积雪为自然积雪或雪崩堆积体的依据。由于雪崩运动过程中的雪密度获取困难（Sovilla et al., 2006），通常基于所形成的雪崩堆积体密度分析雪崩运动行为。例如，Christen et al.（2010）说明了雪崩动力学模型能够通过沉积区相关参数反溯计算特定地点记录的雪崩事件。

积雪密度变化规律研究在国内外已有相关成果，我国西北地区（尤其是阿勒泰地区）积雪密度情况及变化规律研究也取得了较好的进展。例如，在积雪密度随空间分布规律研究中，杨大庆等（1992）提出冬季积雪层的平均密度不随积雪深度而变化；郝晓华等（2009）提出山区积雪存在垂直分布的密度差异，风较大的山顶常形成风成雪壳。此外，积雪密度也可随时间、下垫面等其他因素影响，魏文寿等（2001）提出新降雪密度随沉积时间呈现线性变化；Dai et al.（2022）通过综合微波辐射测量（IMCS）对积雪进行观测后发现雪密度随雪龄的增加而增加，在达到 $\sim 0.2\text{--}0.25\text{ g/cm}^3$ 后保持稳定，在一月份后，由于底

层深霜发育良好，中层的雪密度大于底层和上层；张伟等（2014）分析了不同下垫面对雪密度的影响，说明雪密度受温度场、液态水含量、下垫面属性、融化和再冻结作用的共同影响，其中草地和水泥上积雪底部的密度呈现密实化过程，而河冰上积雪底部的积雪密度逐渐减小。

基于以上研究可知，由于野外情况复杂，积雪密度随深度的变化规律存在差异，目前仍没有定论。此外，现有研究多关注积雪本身特征，缺少针对自然降雪堆积体和雪崩堆积体密度的对比分析，难以根据现有积雪密度特征判别自然积雪和雪崩堆积体。本文在前人研究的基础上，对2024年1月喀纳斯雪崩地区自然降雪及雪崩雪积雪密度进行原位测量，对自然积雪堆积体和雪崩堆积体的垂直剖面密度特征进行对比分析，明确了自然积雪和雪崩堆积体的密度特征差异，提出了基于密度特征判别自然积雪和雪崩堆积体的方法，为该地区积雪雪崩的识别提供科学依据。

1 雪崩背景与调查路线概况

1.1 雪崩背景

我国西北地区位于欧亚大陆腹地的中纬度地带，对全球气候变化较为敏感（Song et al., 2024）。根据野外数据，近50年阿勒泰地区冬季降雪量显著增加，且空间上呈现自山区向河谷降雪量逐渐减少的趋势（白松竹等，2014）。山区充沛的降雪为雪崩灾害提供了丰富的物源，一旦出现极端天气，如异常高温或极端降雪，极易诱发雪崩，对人类社会及经济发展造成严重威胁。以2024年1月发生的喀纳斯雪崩为例，气温异常偏高，新增积雪显著，加上有利于诱发雪崩的地形，导致喀纳斯、禾木、白哈巴等景区的道路多处发生雪崩，造成当地群众、游客等4800多人受困，其中滞留游客1501人。该雪崩灾害由点连线，由线到面，呈现出多发、高发、频发的特点，最长一段雪崩掩埋区长达6公里，本研究重点调查了受严重影响的S232线及X852线两条公路沿线。该地区雪崩诱发因素主要包括降雪、气温、地形，分述如下。

1.1.1 降雪

新疆是我国典型积雪区之一，位于我国西北部。根据气象数据显示，新疆受西风环流和西伯

利亚高压的影响，空气水汽通量显著高于华北、青藏高原等其他内陆地区，导致新疆北部积雪量较大（Peng and Zhou, 2017）。此外，近年来全球气候变化导致极端天气事件增多，特别是冬季的强降雪变得更为频繁，这种趋势在新疆北部尤为显著（Wang et al., 2013）。1960 年以来，新疆北部积雪深度呈较高值，其中阿勒泰地区平均日积雪深度最大，为 10.30 cm/day（Tan et al., 2019）。近 50 年来，北疆地区年平均积雪深度、最大积雪深度和雪水当量均呈现出长期上升趋势（Ma and Qin, 2012）。降雪量每 10 年增量达 5.69 mm（Yang et al., 2020），平均积雪持续时间约为 120 天，平均积雪深度为 60 cm，尤其是在高山地区，积雪持续时间和平均积雪深度分别达到 200 天和 100 cm 以上（Zhang et al., 2017）。新疆年雪水当量呈现年际间大幅波动，雪水当量整体随时间呈上升趋势（胡列群等，2013），为雪崩灾害提供了充足的物源。2024 年 1 月，阿勒泰地区遭遇持续多轮强降雪，其中喀纳斯山区累计降雪量达到 122.7 mm，最大积雪深度达到 80-200 cm。

1.1.2 气温

新疆近 50 年来的气温呈上升趋势，平均增长率为 0.27 °C/10 a，其中北疆地区为 0.36 °C/10 a（苏宏超等，2003）。在空间上，整个地区都出现了温度升高的趋势，其中 93.4% 的地区降水增加。庄晓翠和郭城（2006）指出阿勒泰地区冬季平均气温增暖最为显著，积雪期平均温度有所升高。2023 年 12 月下旬至 24 年 1 月上旬，喀纳斯景区气温异常偏高，平均气温达到 -9.6 °C，突破了有气象记录以来的历史极值。异常高温导致积雪融化明显，破坏了积雪稳定性，进而诱发雪崩。

1.1.3 地形

喀纳斯地区位于中国西北部阿勒泰区域（如图 1 所示），地形复杂，海拔在 317 m 到 4374 m 之间，呈现北部陡峭、南部相对平缓的趋势（Wang et al., 2024）。Jost et al.（2007）基于原位数据研究表明，80%-90%积雪量发生大规模变化的原因在于海拔、坡向和森林覆盖率。由于喀纳斯的陡峭山坡和显著的海拔落差，尤其是在 35°-45° 的坡度区间，使积雪容易堆积并失稳，成为雪崩的潜在诱发区域。典型的雪崩往往发生在这些陡坡上，尤其是在高海拔区域和植被稀疏区，容易在降雪、升温等外界因素影响下引发雪崩。

地形和风的耦合作用使得喀纳斯的积雪分布不均匀，尤其是在山谷和凹陷区域。在极端降雪事件中，降雪优先沉积在山脉的背风坡上，迎风坡积雪较少，而背风坡积雪较厚，积雪层易于滑移，成为雪崩高发区。

喀纳斯地区的地形起伏大，山谷与山脊交错分布，交通网络密集且多沿山而建，一旦发生雪崩，积雪会沿山谷向下运动，产生巨大的破坏力。本次调查区域如图 1 中标注区域，为 2024 年 1 月喀纳斯雪崩区域公路沿线（S232 及 X852），位于海拔较低的山谷一带。结合地形与气象特征，积雪在斜坡上堆积后极易形成不稳定雪层，在外界因素触发下易引发雪崩，威胁该地区人类生命财产安全。

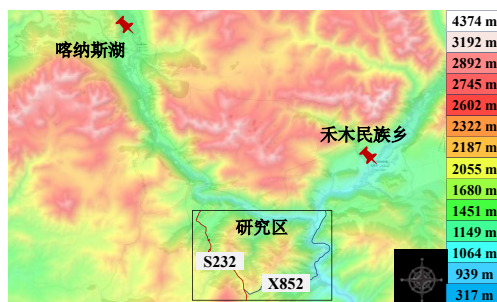


图 1 喀纳斯地区地形图

Fig.1 Kanas area topographic map

1.2 调查路线概况

S232 线起点为喀纳斯湖（K0+000），终点为喀纳斯景区海流滩收费站（K74+000），全长 74.558 公里，于 2004 年建成通车。路线呈西北-东南走向，山势自北向南逐步降低，阶梯层状地貌明显，沿线地形起伏较大。该路线沿线覆盖有植被，但由于气候寒冷，特别是在高海拔地带，植被较为稀疏，积雪层的稳定性差。实地观测表明，S232 公路附近的陡坡区域雪崩发生频繁，积雪厚度在极端天气情况下可显著增加，尤其是迎风坡与背风坡积雪分布差异大，背风坡积雪更厚且不稳定，成为雪崩的主要诱发点。X852 线起点位于禾木哈萨克族乡禾木村，终点位于铁尔沙汗，与 S232 线相连，全长约 48.218 公里，于 2015 年竣工投入使用，X852 沿线地势复杂，山地地貌发育，公路沿线多处坡度在 30° 至 45° 之间，属于雪崩易发区的典型地形。尤其是公路穿过的峡谷区域，积雪往往堆积在山谷和凹陷地带，成为雪崩的高发

区域。两条公路均位于阿尔泰山脉中山带，穿过地形复杂、起伏较大的山岭重丘区，这些地貌特征加剧了雪崩的发生风险。

本次科考路线中共布设 12 个观测点（S232 线 4 处，X852 线 8 处），分析的典型测点数为 5 个，包括 2 个雪崩堆积体测点和 3 个自然积雪对照点（图 2）。根据本次科考研究需要以及“WMO-No. 8”和“NOAA COOP”现场观测指南，按照以下标准进行选点：①雪崩堆积体高度 > 1 m；

②避开风吹积雪堆、动物足迹和人为活动区域，优选平坦、无落物的开阔地带；③自然积雪点位附近 100 m 内无雪崩点位；④试验当日无再降雪、无强风条件。其中，对于雪崩堆积体的选点，雪崩大小可影响积雪的垂直密度分布，由于无法通过一点处雪崩堆积体高度得到雪崩方量，且缺乏雪崩发生前后的三维数字高程信息，难以直接依据雪崩大小进行选点，但堆积体高度从一定程度上反映了雪崩的大小。



图 2 公路沿线测点位置

Fig.2 Location of the measurement points along the investigated highway

2 研究方法

本次野外积雪研究采用原位测量方法，主要对雪深及雪密度进行测量，分析雪密度沿雪深方向上的变化趋势特征与规律。野外测量时间为 2024 年 3 月上旬，在 1 月喀纳斯雪崩发生后，雪崩堆积体上覆有新降雪。

（1）雪深：传统的测量方法是使用雪尺（snow stake）或雪深测量杆（snow probe），测量者将测量杆垂直插入雪层，读取积雪的深度。因其简单易行、成本较低，且本次原位测量点位均为 200 cm 以下小范围区域积雪深度，本研究采用雪尺手动测量雪深，具体工具包括花杆和钢尺（如图 3）。测量时以地面为基准面，记为 0 cm，以地面至雪面的垂直距离为雪深，取观测点周围 3 次测量值的平均值，精度为 0.1 cm。

（2）雪密度：现有积雪密度测量方式较多，包括微波辐射测量法和雪层剖面法等。其中，微波辐射测量法通过测量微波辐射穿过雪层时的衰减来推算雪的密度。雪层剖面法需要人工挖掘雪坑，观察雪层结构，通过目测和手动工具测量每

一层的密度，可以结合雪芯采样或使用手持密度计。本研究采用雪层剖面法结合环刀实验测量积雪密度，如图 4 所示，分别利用自制环刀及电子秤得到雪样体积和重量。其中自制环刀体积为 287.2 cm^3 、质量为 73.8 g，数字电子秤是防水便携式，在 -25°C 至 $+40^\circ\text{C}$ 的工作环境下，分辨率为 0.1 g，精度为 $\pm 0.01 \text{ g}$ ，可测最大质量为 1000 g。具体雪密度测量方法如下：用雪铲从积雪表面至地面挖出一个雪坑剖面，并用雪锯获取观测区域内积雪的垂直柱状剖面；将称重秤放在平坦的表面上并归零；将自制环刀贯入被测目标层以收集样品，并清除自制环刀外的所有积雪（如图 4a 所示）；将雪样放置在称重秤上称重并记录重量数据（如图 4b 所示）；从雪面开始，根据花杆标记，每隔一节花杆（即 20 cm）测量一次雪密度。



图 3 雪深测量

Fig.3 Snow depth measurement

本研究采取积雪剖面观测方法，在选定的积雪处挖掘至底部，从积雪表面到底面的垂直平整



a. 环刀贯入

a. Ring knife penetration



b. 称重记录

b. Weighing records

图 4 自制环刀测雪密度

Fig.4 Self-made ring knife to measure snow density

3 积雪数据分析

本研究积雪数据分析主要包括密度分布和积雪上覆压力，其中，密度数据为野外测量数据，上覆压力基于密度沿垂直方向的积分得到。积雪的压实过程对密度分布具有显著影响，在无其他外力因素影响下，雪层在重力作用下受到上覆雪层的自重压实，导致其内部孔隙率下降、密度增大。对测点积雪数据进行分析，计算其上覆压力。根据连续介质力学基本原理，单位面积上的上覆压力可视为上方积雪重量的累积，计算如下：

壁面作为观测面。为防止人为因素对雪样的污染，预先对观测点位进行现场勘查。若发现人为因素导致的污染，则在采样前对污染区域的积雪进行清理，向积雪内挖掘足够深（至少 1 m），坑壁垂直平整、分层清晰，并在主剖面点周围 5-10 m 内另开两个平行雪坑，重复剖面测量，以判断污染是否为局部偶然现象。若三坑剖面杂质层位置一致，可视为自然因素，无需剔除，以确保采样数据反映真实的雪体性质。若污染源为自然因素，如自然降雪区中有机碎屑（枯叶等）、土壤尘埃或大气微粒随雪落富集所形成的“杂质层”（Dong et al., 2023），或雪崩堆积区雪崩运动过程中侵蚀夹带等效效应所形成的混杂物流，仍按照原位试验要求采集数据。

$$p(z) = g \int_0^h \rho(z) dz \quad (1)$$

其中， $p(z)$ 表示从积雪表面至深度 z 处的累积上覆压力，Pa； h 为积雪深度，cm； $\rho(z)$ 为雪层在深度 z 处的密度， g/cm^3 ； g 为重力加速度， cm/s^2 。

这一积分关系说明，上覆压力的大小取决于垂直方向上各层雪的密度及厚度。随着雪深增大，其下雪层所受到的上覆压力也随之增大，积雪内部逐渐压实，积雪密度也呈现增长趋势。在实际测量中，数据往往为离散形式。常用的数值积分方法包括梯形法和辛普森法。本研究采用梯形积分法计算各测点处的累积上覆压力，即：

$$p_i = \sum_{i=1}^k \rho_i g \Delta h_i \quad (2)$$

其中, ρ_i 和 Δh_i 为第 i 层密度 (kg/m^3) 和厚度 (m), k 为总层数。根据实测数据, 可计算出每层雪的上覆压力。

3.1 自然降雪区积雪密度及上覆压力

喀纳斯地区在自然降雪下的积雪密度存在显著的垂直剖面变化。以图 5a 中的 S232 线 K25+550 测点为例, 雪深达 120 cm, 积雪为自然降雪所形成, 其下植被发育。积雪沿深度方向的密度剖面如图 5b 所示, 呈现雪层顶部及底部密度小, 中部密度较大的特点, 并且底部密度略大于顶部密度。这种密度分布从雪层表面到底面具有“先增后减”的特征, 说明除自然沉积效应, 还有其他效应导致了下层密度变小, 可能与积雪稳定期和非稳定期中不同雪层的变化情况相关。

在稳定积雪期, 地面温度高于雪面上方的空气温度, 积雪剖面下层的温度较高, 热中心较稳定且集中在雪层底部。当平均雪温接近 0°C , 温

度梯度在 100 K/m 以上时 (Bouvet et al., 2023), 雪层底部形成发育良好的松散深霜颗粒层, 而表层新降雪在未受外力作用下密度较小, 中部积雪未形成深霜且含水率较高, 导致密度大于雪层顶部及底部。

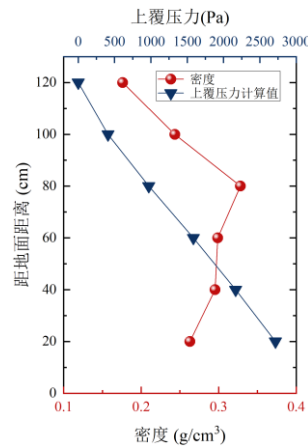
在非稳定积雪期, 由于外界温度升高, 雪层顶部新雪融水下渗, 中部积雪接收上层融水导致密度增大, 底部积雪由于深霜融化形成空洞, 积雪整体仍呈现上下部密度较小, 中部密度较大的趋势 (高培等, 2010)。

除上述“先增后减”分布, 自然降雪的积雪密度也存在从表层到底层逐渐增加的趋势, 如图 6 所示。这种情况下, 积雪密度趋势和上覆压力趋势相近, 表明此时自然沉积对密度特征起主导作用, 表层雪所受压力较小、压实作用较弱, 而底层雪受上覆积雪的压力较大、压实作用明显, 导致积雪密度分布随深度增加呈现“逐渐增大”的特征。此外, 从积雪表层到积雪底层, 雪龄增加, 压实作用的时间也相应增加, 进一步促进了雪层密度随深度增加而增加的趋势。



a. 现场积雪情况

a. Snow conditions on site



b. 测点密度情况

b. Density of measurement points

图 5 S232 线 K25+550 处自然降雪测点及密度分布

Fig.5 Measurement point and data of natural snowfall at K25+550 on line S232

3.2 雪崩堆积区积雪密度及上覆压力

相对于自然降雪区, 雪崩堆积区的积雪可能与雪崩发生前后的自然积雪混合, 导致密度剖面更加复杂。基于 X852 线及 S232 线典型雪崩点位处的积雪堆积体密度分析, 发现积雪密度呈现从表层向底层先增加后减小的分布特征 (图 7), 与

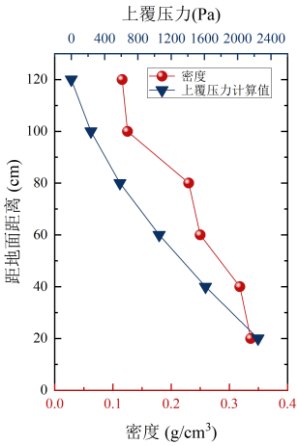
上覆压力趋势存在差异。例如, 在 X852 线 K25+500 处, 雪深达 158 cm, 表层为新降雪, 中层为雪崩堆积体, 底层为雪崩前的自然积雪。如图 7b 所示, 此测点积雪密度分布和图 5b 中的相似, 均为“先增后减”型, 但潜在原因有所不同。在雪崩堆积区, 表层较小的雪密度是由于松散的新降雪; 中

间较大的雪密度来自雪崩堆积体，雪崩运动过程中存在雪颗粒碰撞压实行为，导致较大的雪密度；底层较小密度的雪推测为雪崩前此处的自然积雪。其中，底层自然积雪的密度有自上而下呈减小的趋势，可能是由于自然积雪表层的雪受上部雪崩雪的压实作用更显著。基于对 2024 年 1 月喀纳斯雪崩掩埋的 S232 路段点位（雪深 160 cm）分析，进一步得到了雪崩堆积区“先增后减”型的积雪密度分布（图 7d）。不同的是，该点位底部雪密度较小，从距地面 20 cm 到 40 cm 处密度明显小于中部雪崩雪密度，这和该地区新降雪密度接近，表明了雪崩前自然积雪的影响。

值得注意的是，在现有雪崩堆积体密度分布研究中，由于堆积体底部的上覆压力较大，积雪密度由上而下呈增大的趋势（Li et al., 2021；Keshari et al., 2010），而非“先增后减”型，这和雪崩前当地的积雪情况及雪崩后的降雪情况相关。以 Li et al. (2021)研究的雪崩为例，该雪崩位于野外试验场，雪崩前的雪况清晰，可以剔除雪崩前自然积雪的影响，并在雪崩发生后测得堆积体的密度，不受雪崩发生后自然降雪的影响。而对于本文研究的自然发生的雪崩，其堆积区情况更为复杂，积雪密度特征受雪崩及自然降雪影响明显。



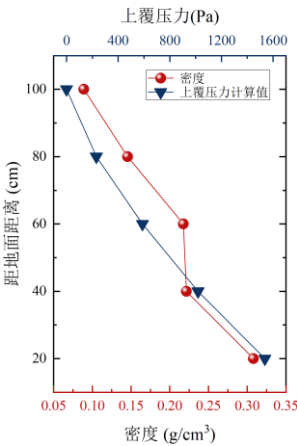
a. 现场积雪情况
a. Snow conditions on site



b. 测点密度情况
b. Density of measurement points



c. 现场积雪情况
c. Snow conditions on site



d. 测点密度情况
d. Density of measurement points

图 6 X852 线自然降雪测点及密度分布（其中 a、b 为 K21+950 处测点及数据情况；c、d 为 K30+650 处测点及数据情况）

Fig.6 Measurement point and data of natural snowfall on line X852 (a and b are the measurement points and data at K21+950; c and d are the measurement points and data at K30+650)

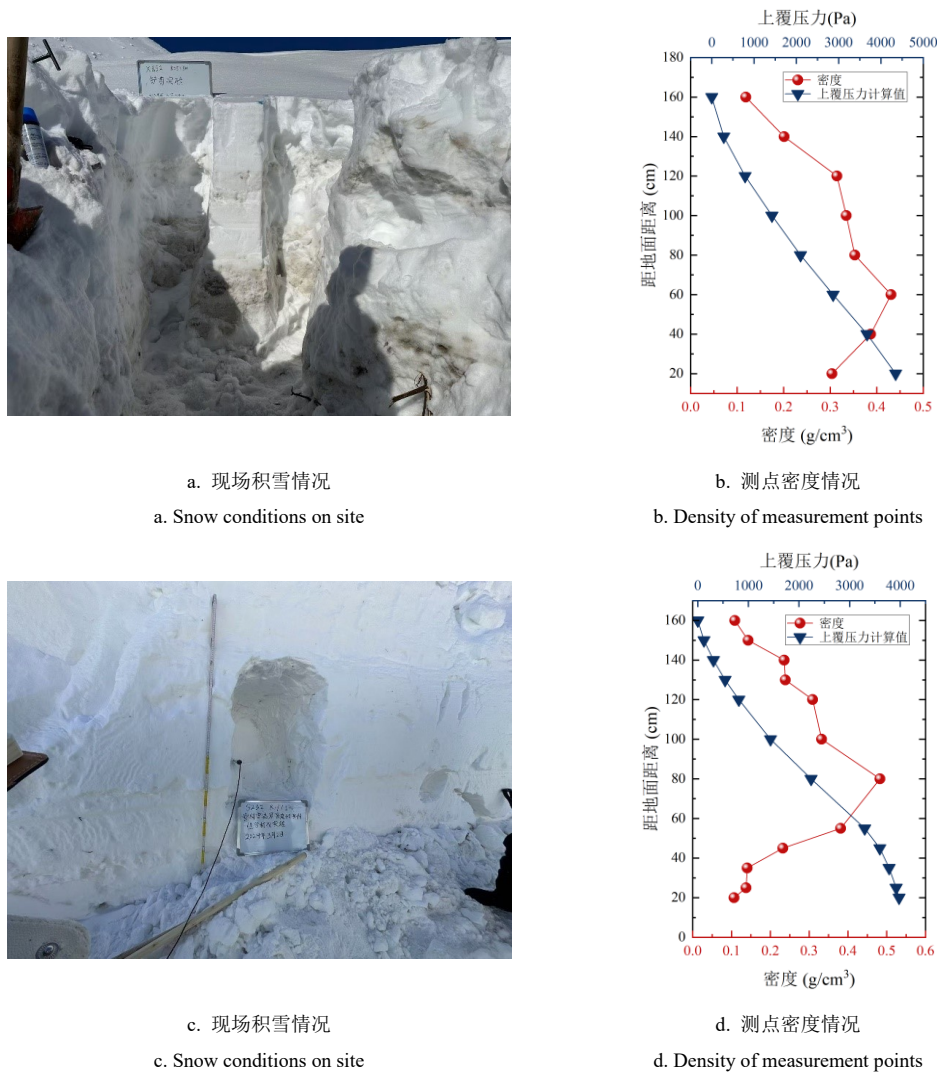


图 7 雪崩测点及密度分布（其中 a、b 为 X852 线 K25+500 处测点及数据情况；c、d 为 S232 线 K17+500 处测点及数据情况）

Fig.7 Measurement point and data of snow avalanche deposit (a and b are the measurement points and data at K25+500 on X852 line; c and d are the measurement points and data at K17+500 on S232 line)

3.3 自然降雪区与雪崩堆积区积雪密度差异

基于积雪密度分布特征分析，虽然自然降雪区和雪崩堆积区具有相似的积雪密度分布趋势，包括“先增后减”及“逐渐增大”，但二者密度梯度存在差异。如图 8 所示，对于 S232 线 K17+500 处、S232 线 K25+550 处以及 X852 线 K25+500 处的三个测点而言，三者垂向密度变化趋势均为“先

增后减”型，但自然降雪区 S232 线 K25+550 测点处积雪密度梯度明显比另外两个雪崩点位处小。基于积雪密度值分析，在本文的研究区，自然降雪区的最大积雪密度 $\rho_{\max}$ 为 0.337 g/cm^3 （表 1），密度范围在 0.10 g/cm^3 - 0.34 g/cm^3 ，和前人研究中阿勒泰地区积雪密度特征相近。例如，高培等（2010）提出，阿勒泰地区积雪均属低密度雪，

批注 [审稿意见1]: 图 8 无分图 a, 需核查

批注 [XL2]: 已将“图 8a”改为“图 8”

密度变化范围大致为 0.15 g/cm³-0.35 g/cm³，属大陆性气候条件下形成的干寒型低密度积雪；魏文寿等（2001）研究表明中国西北地区的积雪平均密度为 0.20 g/cm³-0.23 g/cm³。而雪崩堆积区的最大积雪密度 $\rho_{\max}$ 为 0.483 g/cm³（表 1），雪的密度范围在 0.30 g/cm³-0.48 g/cm³，与前人研究中所给出的雪崩雪密度 0.28 g/cm³-0.50 g/cm³ 范围相符（Dent et al., 1998; Keshari et al., 2010）。自然降雪区和雪崩堆积区积雪密度最大值差异明显，这是由于雪崩运动过程中存在雪颗粒间的碰撞压实及雪颗粒流与边界的相互作用，这些动力过程导致的雪密度增加明显大于自然积雪静力条件下由上覆压力导致的密度增加。以上数据分析表明，需要结合积雪密度梯度与密度最大值判别积雪雪崩情况。

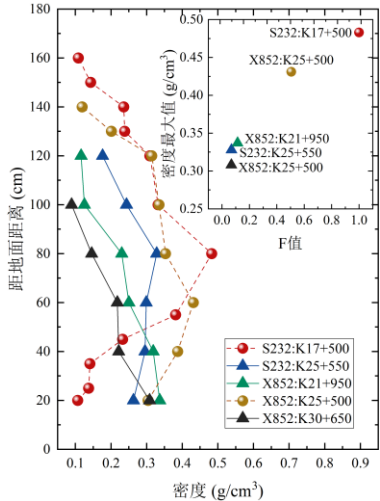


图 8 各测点密度变化对比（其中实线为自然降雪点位，虚线为雪崩点位）

Fig.8 Comparison of snow density change at different measurement points (The solid lines denote natural snowfall,

表 1 测点最大密度值、密度梯度及判别函数计算结果

Table 1 The maximum density value, density gradient and discriminant function calculation results of the measuring point

测点	$\rho_{\max}$ (g/cm ³)	$\int \frac{d\rho}{dz} dz$ (g/cm ⁴)	$\tilde{\rho}_{\max}$	$\tilde{G}_{\text{int}}$	F 值	标签	类别
S232:K17+500	0.483	0.04370	1.000	1.000	1.000	1	雪崩堆积体
S232:K25+550	0.328	0.01585	0.115	0.000	0.069	0	自然积雪
X852:K21+950	0.337	0.01711	0.166	0.045	0.114	0	自然积雪
X852:K25+500	0.431	0.02241	0.703	0.236	0.506	1	雪崩堆积体
X852:K30+650	0.308	0.01901	0.000	0.114	0.068	0	自然积雪

除了本文的研究区，式（3）中提出的判别方

and the dotted lines are from snow avalanches)

4 积雪雪崩识别与密度特征讨论

4.1 自然降雪区与雪崩堆积区积雪识别

为分析积雪为自然降雪或雪崩堆积体，本研究基于密度梯度和密度最大值提出判别函数 F ：

$$F = \alpha \cdot \max(\rho) + \beta \cdot \int_0^h \frac{d\rho}{dz} dz \#(3)$$

其中， ρ 为雪体密度，g/cm³； z 为垂直方向上的坐标； h 为雪深，cm； α 和 β 为权重常数。最大密度（ $\rho_{\max}$ ）反映雪崩动力压实的强度，g/cm³；密度梯度（ $d\rho/dz$ ）积分反映垂直方向上剪切作用的累积效应，g/cm⁴。通过将密度梯度和密度最大值归一化至 [0, 1] 区间，消除量纲差异，并求解权重，可得到适用于本研究区的判别函数。

以 X852 线 K25 +500 点位为例，该处最大密度值为 0.431 g/cm³，密度梯度为 0.02241 g/cm⁴。将参数归一化至 [0, 1] 区间以标准化，标准化后的密度最大值为 $\tilde{\rho}_{\max}$ ，密度梯度为 $\tilde{G}_{\text{int}}$ 。按照上述流程获取其他测点数据，结果如表 1 所示，其中标签为 0 时标记为自然积雪，标签为 1 时标记为雪崩雪。对数据进行拟合，求解权重得 $\alpha = 0.60$ ； $\beta = 0.40$ 。这表明在本研究区内密度最大值在判别中的权重更大，与雪崩动力压实直接相关；密度梯度反映雪层间由于剪切效应导致的密度增加。代入式（3）可得本研究区判别函数为：

$$F = 0.60 \cdot \tilde{\rho}_{\max} + 0.40 \cdot \tilde{G}_{\text{int}} \#(4)$$

对 F 值进行计算，结果如表 1 所示。当 $F > 0.50$ 时，可判别为雪崩堆积体（图 8）。

法也适用于其他有自然积雪和雪崩堆积体密度数

据的地区。如果应用于其他区域,需要基于当地的积雪密度数据,确定密度梯度和密度最大值的权重系数,得到针对该区域的判别函数表达式。本研究中的密度最大值所占权重较大,主要因为研究区内雪崩的动力压实效应相较于雪崩的剪切效应更加显著。如果雪崩剪切行为或其他因素导致的密度梯度变化显著,而动力压实效应不明显,则可能出现密度梯度占权重较大的情况。

4.2 积雪密度特征讨论

根据本文对研究区自然降雪区和雪崩堆积区积雪密度的对比分析,积雪垂直剖面密度分布存在“逐渐增大”和“先增后减”两种趋势。

为进一步说明积雪密度变化特征,本次科考除对研究区点位进行原位测量外,对北疆那巴高速、G219 线路以及研究区外 S232 线路也选取了部分典型点位进行原位测量,密度数据如图 9 所示。图示五个测点均为公路沿线自然降雪点位,根据密度数据变化趋势,积雪密度由表层到底层大体上也呈现出“先增后减”(如 S232 线 K44+475 点位)和“逐渐增大”(如 G219 线 K125+900 点位)两种变化趋势。值得注意的是,那巴高速点位虽然整体上也呈现近似“逐渐增大”的变化趋势,但出现多次突然的波动变化,这是因为该点位处于风吹雪影响严重的区域,风的作用使新沉积的雪在落地后受到压实,同时在烧结作用下形成一个密度较高的“风成雪壳”或压实层。此外,由于新雪不断覆盖以及雪粒输送过程中可能产生局部再分散现象,所以风吹雪堆积体的垂直密度剖面往往呈现非单调特征。

对于自然降雪区积雪密度,郑照军等(2021)记录了 2015-2016 年中 113 天新疆阿勒泰国家基准气候站逐日积雪密度数据,整理发现积雪密度垂直分布规律与本文基本相符,其中“逐渐增大”型主要集中于 2015 年底,属于新降雪形成的积雪,而“先增后减”型主要集中于 2016 年初,由于外界温度变化导致积雪先后出现深霜发育和积雪融化现象,均表现为积雪中层密度大于表层和底层;Hao et al. (2021) 利用重力测量和介电常数测量(GMS 和 DMS)两种方法得到了干、湿两种积雪的剖面密度,结果显示两种积雪密度垂直分布规律整体上呈现“先增后减”的趋势。

对于雪崩堆积区积雪密度,在无自然降雪影响的情况下,Hopfinger et al. (1977) 提出更高密

度的雪粒存在于雪崩堆积体的底部,即密度垂直分布呈现“逐渐增大”的趋势。在有自然降雪影响的情况下,雪崩堆积区积雪的高密度主要由于中层雪崩雪密度高于表层和底层的自然降雪积雪密度。Sovilla et al. (2001) 对 1997/98 年短期内发生的四次雪崩进行分析,发现雪密度从初始 135 kg/cm^3 逐渐增加至所形成的雪崩堆积体的 $500\text{--}560 \text{ kg/cm}^3$; Sovilla et al. (2006) 汇总了 1998 年至 2000 年在瑞士发生的 18 次灾难性雪崩数据,雪崩最后的沉积密度均远大于其释放密度,这也说明了雪崩雪密度大于自然降雪的积雪密度。

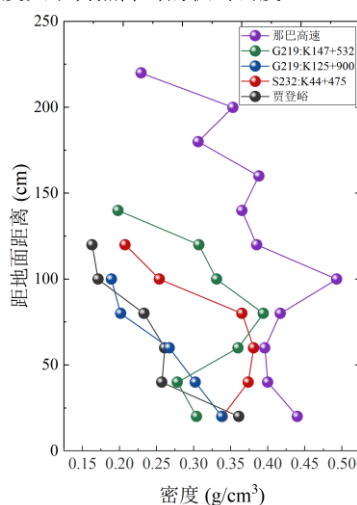


图 9 自然降雪区测点垂直剖面密度分布

Fig.9 Vertical density profile of measurement points in natural snowfall areas

5 结论

本研究基于环刀实验,对喀纳斯地区 X852 线和 S232 线公路沿线典型点位开展了原位测量,分析了自然降雪区和雪崩堆积区的积雪垂直剖面密度分布特征及规律。主要结论如下:

(1) 自然降雪区积雪密度变化受温度梯度和上覆压力的影响,可由表层到底层呈现密度“先增后减”或“逐渐增大”两种趋势。雪崩堆积区积雪密度趋势与自然降雪区相似,但其潜在原因不同,“先增后减”型由底部密度较小的自然积雪导致,“逐渐增大”型由雪崩动力作用下的压力所主导。

(2) 自然降雪区积雪和雪崩堆积区积雪在密

度梯度和密度最大值两方面存在明显差异。相较于雪崩堆积体，由于自然积雪主要受静力条件影响，其垂直剖面上密度梯度和密度最大值较小。

（3）基于积雪密度最大值与积雪垂向密度梯度，提出了积雪雪崩情况的判别函数。其中，密度最大值与雪崩动力压实作用直接相关，在判别函数中的权重更大；密度梯度反映雪层间剪切效应导致的密度增加，所占权重较小。

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（通讯作者）：设计研究整体框架；指导数据处理与分析；修改论文；提供资源支持。作者 3：提供指导与研究建议；参与实验方法的优化及结果的讨论；审阅论文并提出修改意见。作者 4：协助实验设计及技术支持；审阅论文并提出修改意见。

References

- Bai, S. Z., Chen, Z., Zhuang, X. C., et al., 2014. Variations of Winter Snow Concentration Degree and Concentration Period in Altay Region. *Journal of Arid Meteorology*, 32(1), 99. (in Chinese with English abstract)
- Bouvet, L., Calonne, N., Flin, F., et al., 2023. Heterogeneous Grain Growth and Vertical Mass Transfer within a Snow Layer under a Temperature Gradient. *The Cryosphere*, 17(8): 3553-3573.
- Calonne, N., Geindreau, C., Flin, F., et al., 2012. 3-D Image-based Numerical Computations of Snow Permeability: Links to Specific Surface Area, Density, and Microstructural Anisotropy. *The Cryosphere*, 6(5), 939-951. DOI: <https://doi.org/10.5194/tc-6-939-2012>
- Christen, M., Kowalski, J., & Bartelt, P. 2010. RAMMS: Numerical Simulation of Dense Snow Avalanches in Three-dimensional Terrain. *Cold Regions Science and Technology*, 63(1-2), 1-14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2010.04.005>
- Dai, L., Che, T., Zhang, Y., et al., 2022. Microwave Radiometry Experiment for Snow in Altay, China: Time Series of in Situ Data for Electromagnetic and Physical Features of Snowpack. *Earth System Science Data*, 14(8), 3509-3530. DOI: <https://doi.org/10.5194/essd-14-3509-2022>
- Dent, J. D., Burrell, K. J., Schmidt, D. S., et al., 1998. Density, Velocity and Friction Measurements in a Dry-snow Avalanche. *Annals of Glaciology*, 26: 247-252.
- Dong, Z., Jiang, H., Baccolo, G., et al., 2023. Biological and Pollution Aerosols on Snow and Ice—interplay between the Atmosphere and the Cryosphere. *Journal of Earth Science*, 34(6): 1951-1956. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12583-023-2004-2>
- Gao, P., Wei, W. S., Liu, M. Z., et al., 2010. Snow Density and Liquid Water Content within the Seasonal Snow Cover in the Western Tianshan Mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology*, (4), 786-793. (in Chinese with English abstract)
- Hao, J. S., Huang, F. R., Liu, et al., 2018. Avalanche Activity and Characteristics of its Triggering Factors in the Western Tianshan Mountains, China. *Journal of Mountain Science*, 15(7), 1397-1411. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11629-018-4941-2>
- Hao, J., Mind'je, R., Feng, T., et al., 2021. Performance of Snow Density Measurement Systems in Snow Stratigraphies. *Hydrology Research*, 52(4): 834-846. DOI: <https://doi.org/10.2166/nh.2021.133>
- Hao, J., Zhang, X., Cui, P., et al., 2023. Impacts of Climate Change on Snow Avalanche Activity along a Transportation Corridor in the Tianshan Mountains. *International Journal of Disaster Risk Science*, 14(4): 510-522.
- Hao, X. H., Wang, J., Che, T., et al., 2009. The Spatial Distribution and Properties of Snow Cover in Binggou Watershed, Qilian Mountains: Measurement and Analysis. *Journal of Glaciology and Geocryology*, (2), 284-292. (in Chinese with English abstract)
- Hopfinger, E. J. and Tochon-Danguy, J. C., 1977. A Model Study of Powder-snow Avalanches. *Journal of Glaciology*, 19(81): 343-356.
- Hu, L. Q., Huang, W. J., Yin, K. Q., et al., 2013. Estimation of Snow Water Resources and its Distribution in Xinjiang. *Advances in Water Science*, 24(3): 326-332. (in Chinese with English abstract)
- Hu, L. Q., Huang, W. J., Yin, K. Q., Xiong, L., et al., 2013. Estimation of Snow Water Resources and its Distribution in Xinjiang. *Advances in Water Science*, 24(3): 326-332.
- Jost, G., Weiler, M., Gluns, D. R., et al., 2007. The Influence

- of Forest and Topography on Snow Accumulation and Melt at the Watershed-scale. *Journal of Hydrology*, 347(1-2), 101-115. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.09.006>
- Keshari, A. K., Satapathy, D. P., & Kumar, A. 2010. The Influence of Vertical Density and Velocity Distributions on Snow Avalanche Runout. *Annals of glaciology*, 51(54), 200-206. DOI : <https://doi.org/10.3189/172756410791386409>
- Lehning, M., Bartelt, P., Brown, B., et al., 2002. A Physical SNOWPACK Model for the Swiss Avalanche Warning: Part II. Snow Microstructure. *Cold regions science and technology*, 35.3: 147-167. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0165-232X\(02\)00073-3](https://doi.org/10.1016/S0165-232X(02)00073-3)
- Li, X., Sovilla, B., Jiang, C., et al., 2021. Three-dimensional and Real-scale Modeling of Flow Regimes in Dense Snow Avalanches. *Landslides*, 18, 3393-3406. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01692-8>
- Ma, L., & Qin, D., 2012. Temporal-spatial Characteristics of Observed Key Parameters of Snow Cover in China during 1957-2009. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 4(5), 384.
- Peng, D., & Zhou, T. 2017. Why was the Arid and Semiarid Northwest China Getting Wetter in the Recent Decades?. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(17), 9060-9075. DOI: <https://doi.org/10.1002/2016JD026424>
- Song, M., Li, Z., Wang, F., et al., 2024. Influence of Sub-Cloud Secondary Evaporation Effects on the Stable Isotopes in Precipitation of Urumqi Glacier No. 1, Eastern Tianshan. *Journal of Earth Science*, 35(1): 177-189. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12583-021-1522-z>
- Sovilla, B., Burlando, P., & Bartelt, P. 2006. Field Experiments and Numerical Modeling of Mass Entrainment in Snow Avalanches. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 111(F3). DOI: <https://doi.org/10.1029/2005JF000391>
- Sovilla, B., Somavilla, F., & Tomaselli, A., 2001. Measurements of Mass Balance in Dense Snow Avalanche Events. *Annals of Glaciology*, 32: 230-236.
- Su, H. C., Wei, W. S., & Han, P., 2003. Changes in Air Temperature and Evaporation in Xinjiang during Recent 50 Years. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 25(2): 174-178. (in Chinese with English abstract)
- Tan, X., Wu, Z., Meng, X., et al., 2019. Spatiotemporal Changes in Snow Cover over China during 1960–2013. *Atmospheric Research*, 218: 183-194. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.11.018>
- Valero, C. V., Jones, K. W., Bühler, Y., et al, 2015. Release Temperature, Snow-cover Entrainment and the Thermal Flow Regime of Snow Avalanches. *Journal of Glaciology*, 61(225): 173-184.
- Wang, B., Cheng, W., Xu, H., et al., 2024. Vegetation Differentiation Characteristics and Control Mechanisms in the Altay Region Based on Topographic Gradients. *Ecological Indicators*, 160, 111838. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111838>
- Wang, S. P., Jiang, F. Q., Hu, R. J., et al., 2013. Temporal and Spatial Variability of Extreme Snowfall Indices over Northern Xinjiang from 1959/1960 to 2008/2009. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 1(6), 7059-7092. DOI: <https://doi.org/10.5194/nhessd-1-7059-2013>
- Wang, S., Ding, Y., Jiang, F., et al., 2017. Defining Indices for the Extreme Snowfall Events and Analyzing Their Trends in Northern Xinjiang, China. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 95(5), 287-299. DOI: <https://doi.org/10.2151/jmsj.2017-016>
- Wang, X., & Baker, I. 2013. Observation of the Microstructural Evolution of Snow under Uniaxial Compression Using X - ray Computed Microtomography. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(22), 12-371. DOI: <https://doi.org/10.1002/2013JD020352>
- Wei, W. S., Qin, D. H., & Liu, M. Z., 2001. Properties and Structure of the Seasonal Snow Cover in the Northwest Regions of China. *Arid Land Geography*, 24(4), 310-313. (in Chinese with English abstract)
- Yang, D. Q., Zhang, Y. S., & Zhang, Z. Z., 1992. A study on the Snow Density in the Head Area of Urumqi River Basin. *Acta Geographica Sinica*, 47(3). (in Chinese with English abstract)
- Yang, T., Li, Q., Liu, W., et al., 2020. Spatiotemporal Variability of Snowfall and its Concentration in Northern Xinjiang, Northwest China. *Theoretical and Applied*

- Climatology*, 139, 1247-1259. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02994-7>
- Zhang, R., Liang, T., Feng, Q., et al., 2017. Evaluation and Adjustment of the AMSR2 Snow Depth Algorithm for the Northern Xinjiang Region, China. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10(9): 3892-3903. DOI: 10.1109/JSTARS.2016.2620521.
- Zhang, W., Shen, Y. P., He, J. Q., et al., 2014. Snow Properties on Different Underlying Surfaces during Snow-melting Period in the Altay Mountains: Observation and Analysis. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 36(3), 491-499. (in Chinese with English abstract)
- Zheng, Z. J., Hao, X. H., Li, X. F., et al., 2021. Historical Data Set of Snow Cover in China (2008-2019). National Cryosphere Desert Data Center (<http://www.ncdc.ac.cn>). (in Chinese)
- Zhuang, X. C., Guo, C., Zhao, Z. B., et al., 2010. Snow Cover Variation Analysis in Altay Area of Xinjiang. *Journal of Arid Meteorology*, 28.2: 190. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 白松竹, 陈真, 庄晓翠, 等, 2014. 阿勒泰地区冬季降雪的集中度和集中期变化特征. *干旱气象*, 32(1), 99.
- 高培, 魏文寿, 刘明哲, 等, 2010. 天山西部季节性积雪密度及含水率的特性分析. *冰川冻土*, (4), 786-793.
- 郝晓华, 王建, 车涛, 等, 2009. 祁连山区冰沟流域积雪分布特征及其属性观测分析. *冰川冻土*, (2), 284-292.
- 胡列群, 黄慰军, 殷克勤, 等, 2013. 新疆冬季雪水资源估算及分布特征. *水科学进展*, 24(3): 326-332.
- 苏宏超, 魏文寿, & 韩萍, 2003. 新疆近 50a 来的气温和蒸发变化. *冰川冻土*, 25(2): 174-178.
- 魏文寿, 秦大河, & 刘明哲, 2001. 中国西北地区季节性积雪的性质与结构. *干旱区地理*, 24(4), 310-313.
- 杨大庆, 张寅生, & 张志忠, 1992. 乌鲁木齐河源雪密度观测研究. *地理学报*, 47(3),.
- 张伟, 沈永平, 贺建桥, 等, 2014. 阿尔泰山融雪期不同下垫面积雪特性观测与分析研究. *冰川冻土*, 36(3), 491-499.
- 郑照军, 郝晓华, 李晓峰, 等, 2021. 中国积雪历史数据集 (2008-2019 年). 国家冰川冻土沙漠科学数据中心 (<http://www.ncdc.ac.cn>).