

季节性冻融对SAR提取冰川湖精度的影响——以贡措与郎措为例

吴仁哲^{1,3}, 刘国祥^{2,4}, 蔡佳欣²

1. 河南省科学院 空天信息研究所, 郑州 450046;

2. 西南交通大学 地球科学与工程学院, 成都 611756;

3. 河南省空天信息智能处理与集成应用工程研究中心, 郑州 450046;

4. 西南交通大学 高速铁路安全运营空间信息技术国家地方联合工程实验室, 成都 611756

摘要: 在全球变暖背景下, 冰川湖扩张所诱发的溃决风险日益加剧, 持续、精准的冰川湖监测已成为灾害防控的关键。现如今, 合成孔径雷达 (SAR) 凭借全天时、全天候及对云雾穿透的独特优势, 已在复杂山区冰川湖研究中广泛应用; 其高时间分辨率更使捕捉冰川湖季节动态变化成为可能。然而, SAR后向散射特征受冰川湖季节性冻融导致的识别误差尚未有效探讨, 限制了SAR提取冰川湖的准确性。本文以贡措、郎措为试验区, 联合Sentinel-1 SAR与多源光学影像, 分析了2020年两湖面积变化, 并探讨SAR特征对冻融过程的响应机制。结果显示: 郎措较少出现季节性结冰, 光学与SAR影像提取的湖泊面积基本一致; 贡措则存在明显的季节性冻融差异, SAR影像提取的面积在1.85—2.65 km²波动, 而光学影像则稳定在2.6—2.8 km²。进一步结合SAR强度与干涉相干性分析发现, 贡措在每年11月至次年3月期间存在相对稳定的湖冰, 是导致SAR与光学影像提取冰川湖提取差异的主要原因。基于这一发现, 本研究通过分析不同状态下的SAR强度与相干性特征, 采用经验性阈值有效划分了冰川湖水体与湖冰。综合贡措与郎措的监测结果可初步得知: SAR影像更适用于暖季无冰期冰川湖的监测, 或适用于不发生显著季节性冻融的冰川湖研究; 同时, SAR强度与干涉相干性结合能够为识别冰川湖是否存在稳定湖冰提供有效依据。

关键词: 冰川湖, 面积演化, 合成孔径雷达, 后向散射强度, 极化特征, 干涉相干性, 稳定冰检测

中图分类号: P237/P2

引用格式: 吴仁哲, 刘国祥, 蔡佳欣. 2026. 季节性冻融对SAR提取冰川湖精度的影响——以贡措与郎措为例. 遥感学报, 30(4): 1117-1129

Wu R Z, Liu G X and Cai J X. 2026. Freeze-thaw effects on SAR-based glacial lake mapping: Gongcuo and Langcuo case study. National Remote Sensing Bulletin, 30(4): 1117-1129 [DOI: 10.11834/jrs.20265336]

1 引言

高山冰川湖 (亦称冰川湖) 是高山环境中由冰川侵蚀、冰碛物阻塞及冰川融水汇聚形成的天然水体, 常见于冰斗、冰川前缘与冰碛洼地, 是冰冻圈水文系统的重要组成部分 (施雅风, 2011; 姚晓军等, 2017; Yao等, 2018)。在全球变暖背景下, 冰川快速退缩与融水供给共同驱动冰川湖的数量增长与面积扩张 (邬光剑等, 2019; 张国庆等, 2022)。以高亚洲为例, 2018年的编目显示该地区冰川湖数量已达30121个, 总面积超过

2080 km², 1990年—2018年间年均面积增长率约15.2% (Wang等, 2020)。这些湖泊在枯水期承担关键的调蓄功能, 是“亚洲水塔”等高山流域下游供水与用水安全的重要保障 (朱立平等, 2019; Nüsser和Schmidt, 2017); 但随着冰川物质持续亏损, 冰川湖储水量不断上升, 导致冰川湖溃决洪水的风险显著增加, 进而对下游基础设施与居民区构成日益突出的威胁, 区域水安全面临的不确定性也随之上升 (周玉杉等, 2024; 姚檀栋和姚治君, 2010; Ahmed, 2025)。因此, 对冰川湖进行系统监测具有迫切的现实需求。

收稿日期: 2025-09-11; 预印本: 2025-12-11

基金项目: 国家自然科学基金(编号:U22A20565, 42371460, 42171355, 4250060469, 42501437); 国家重点研发计划(编号:2023YFB2604001)

第一作者简介: 吴仁哲, 研究方向为多源遥感冰川湖动态演化。E-mail: rswrz@hnas.ac.cn

通信作者简介: 刘国祥, 研究方向为合成孔径雷达综合应用与机理分析。E-mail: rsgxliu@swjtu.edu.cn

冰川湖对气温和降水变化极其敏感,其大小、水位高低和结冰时间的变化能直接反映冰川退缩和区域能量—水分条件的改变,为捕捉气候变化信号提供关键证据(Nie等,2021;Zhang等,2024)。更为重要的是,冰川湖物候直接表征季节尺度能量收支与水循环过程,是评估水资源可得性、枯水期补给能力以及灾害孕育条件的重要指标(C和Priyadharsini,2025;Kaushik等,2022)。已有研究表明,高山湖泊的融冰期呈系统性提前,主要与冬季降雪减少和春季升温有关(Preston等,2016);且融冰异常往往与冰川湖突然扩张同时发生,可在溃决洪水发生前几周至几个月提供早期预警信号(Baig等,2020)。此外,冰川湖扩张与连通性变化还会影响径流过程与侵蚀格局,进一步影响下游安全(Tian等,2015)。这些科学价值进一步凸显了连续、系统监测冰川湖的必要性。

冰川湖通常分布于难以到达的高山区域,此类地区通常云雾频繁,使得遥感监测成为必要手段(李均力等,2011;闫斌等,2022)。在众多遥感数据源中,SAR因其不受云雾干扰,具有更好的持续监测效用(卢文路等,2020)。平静水面在雷达影像中表现为低后向散射,利于精确识别与描绘湖岸线;不同的散射差异可用于刻画湖冰冻融过程(Jawak等,2015)。目前,基于Sentinel-1的时序散射特征已成功用于冰川湖冻结/消融的定量反演与长期物候序列构建(Murfitt和Duguay,2021)。然而,相对于光学遥感观测到的冰川湖特征,雷达后向散射特征更加复杂且模糊。尽管交叉极化扩充了SAR影像特征的丰富度,但对于冻结湖面与湿雪等反射信号近似的物,传统SAR手段仍然难以有效区分(Jawak等,2015)。

面向SAR区分冰川湖特定状态的局限性,本文引入合成孔径雷达干涉测量数据(InSAR)提供的相干性信息作为补充。InSAR相干性对冰川湖表面介电特性变化敏感,可以进一步扩充冰川湖状态信息维度。目前,已有研究将InSAR相干性用于南北极冰川湖的融水与再冻结过程研究,但将其应用于高山冰川湖的探索仍然较少(Li等,2021)。为此,本研究选取相邻但冻融特征存在显著差异的高山冰川湖——贡措与郎措作为研究对象,综合利用Sentinel-1卫星的后向散射强度与干涉相干性信息进行持续监测,并结合ERA5-Land再分析气候数据进行综合分析,旨在更深入地探

究高山冰川湖融水—结冰的周期性变化过程。

2 研究区与数据

2.1 贡措、郎措冰川湖研究区

研究区选取位于西藏自治区东部昌都市八宿县来古村附近的两处冰川湖——贡措与郎措(图1)。两湖地处帕隆藏布上游雅隆冰川、来古冰川群前缘区域,属于青藏高原东缘受季风显著影响的高山冰川—冰川湖复合地貌带。基于高分辨率气候资料的多年平均气候特征显示,该地区全年温度偏低:气温最低达 -26°C ,最高仅 8°C ;地表温度波动更为剧烈,最低达 -30°C ,最高 13°C 。年降水量约200—300 mm,集中于暖季,呈现显著的与热同期现象(Dai等,2022;Fick和Hijmans,2017)。

两湖在空间位置与水文连通性上存在显著差异:贡措位于郎措以西,紧邻雅隆冰川的现代冰川舌部,属于与冰川末端直接接触的冰接触湖(谢自楚和刘潮海,2010)。郎措位于东嘎冰川西侧,是相对独立的封闭型冰川湖,与活动冰舌之间缺乏稳定的表层水力连通。因此,两湖在消融季与非消融季的水量输入、冰水混合物覆盖以及湖面状态可能表现出不同的SAR回波强度与干涉相干性响应(Dai等,2022)。

2.2 研究采用数据

本研究采用的核心数据源为欧洲空间局Sentinel-1卫星的干涉宽幅模式(IW)双极化SAR数据,波段为C波段,幅宽约250 km,地距像元尺度约10 m。其优势在于具备全天时、全天候的观测能力,能够有效克服云雾与光照差异的影响;VV与VH双极化通道可显著提升水体、冰雪与粗糙地表间的可分离度,因此尤其适用于高海拔地区冰川湖长期监测。从发射至今Sentinel-1实现了自2015年起不间断的高频次重访,为时间序列面积变化研究提供了可靠的数据集。

为保证面积变化判读精度并开展不确定性分析,本研究引入以下辅助数据:

(1) 多源光学遥感影像: Sentinel-2的空间分辨率为10 m、重访周期为5 d; Landsat 8的空间分辨率为30 m、重访周期为16 d; 此外引入PlanetScope数据,其空间分辨率达到3—5 m、可实现逐日观测。三者空间分辨率与重访能力上互补,用于光学途径的冰川湖边界提取与变化复核。

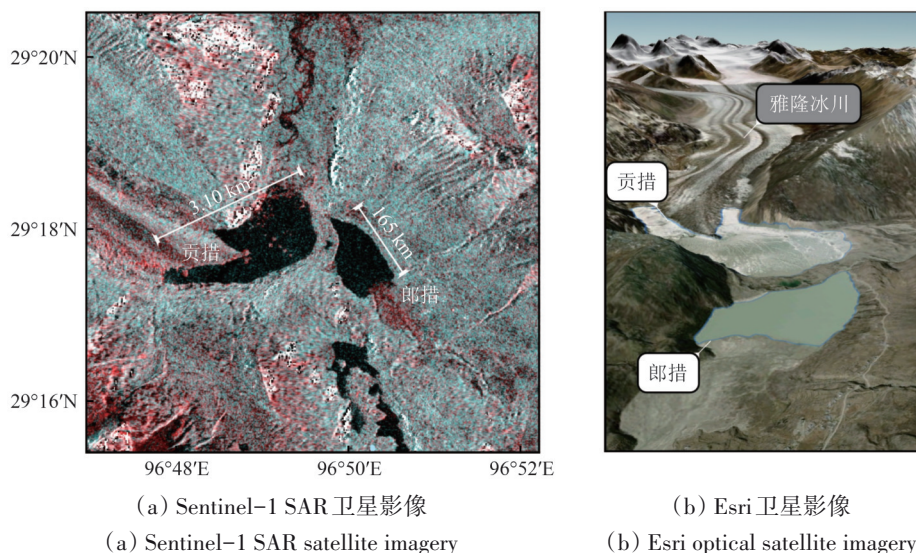


图1 贡措和郎措研究区示意图

Fig. 1 The study area of Gongcuo and Langcuo

(2) ERA5-Land 再分析资料：采用 GEE (Google Earth Engine) 获取逐日数据，由欧洲中期天气预报中心公开发布，水平分辨率为 0.25° 。与 Sentinel-1 过境时刻精确匹配，用以建立后向散射与其后因子之间的关联性，辨识信号异常，服务于冰川湖面积变化相关性分析。

通过阿拉斯加卫星设施 (ASF; <https://search.asf.alaska.edu/> [2025-09-11]) 共收集升轨 SAR 影像 30 景、降轨 SAR 影像 31 景。利用 GEE (Google Earth Engine) 平台获取 Sentinel-2 影像 72 景、Landsat 8 影像 12 景及 PlanetScope 影像 84 景。经暗通道云掩膜处理 (3.2 节) 后，剔除了受云雾遮挡的冰川湖光学影像，最终筛选出 64 景有效影像。

3 研究方法

3.1 SAR 数据预处理

SAR 数据处理采用商业雷达软件 GAMMA 完成 (Werner 等, 2000)。首先获取 Sentinel-1 A/B 单视复数 (SLC) 数据；随后对同轨影像进行亚像元配准 (精度优于 0.2 像元)。为降低斑点并获得近似正方形地面像元，对配准后的单视复数影像在距向与方位向分别以 5 比 1 缩放进行多视。多视强度影像经辐射定标为后向散射系数，并根据式 (1) 转换为分贝 (dB) 值：

$$\sigma_{\text{dB}}^0 = 10 \times \log(k_s \times |\text{DN}|^2 \times \sin\theta) \quad (1)$$

式中， k_s 为定标常数，DN 为多视影像的像元强度值， θ 是局部入射角。干涉相干系数是覆盖同一区

域的两幅单视复数影像的复互相关系数的幅值，其估计式为

$$\rho(x, y) = \frac{s_1(x, y)s_2^*(x, y)}{\sqrt{\langle |s_1|^2 \rangle \langle |s_2|^2 \rangle}} \quad (2)$$

式中， $\rho(x, y)$ 为像元 (x, y) 处的相干值， s_1 和 s_2 分别为两期单视复数影像的复数值，* 表示复共轭。 $\langle \cdot \rangle$ 表示在 3×3 像元窗口内的空间平均。基于单视复数影像干涉对共获得了 59 幅相干图像 (基于时间相邻 SAR 影像，时间间隔为 12 d)，包含升轨 29 景，降轨 30 景。后向散射强度与相干图像均在 WGS84 基准下采用 UTM 投影，以 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 像元进行地理编码。对于获取的同一轨道 SAR 数据，按照时间顺序将相邻两景影像配对形成干涉对，以进行相干性计算。时间基线最大为 12 d，垂直基线最大为 300 m。相干性计算采用 5×5 像素的估计窗口，在兼顾空间分辨率的同时确保估计精度。为抑制干涉相位噪声，在处理过程中应用 Goldstein 滤波进行相位去噪。

3.2 暗通道云掩膜

受云雾干扰，研究区在光学影像中可见度较差。针对该问题，本文采用多源光学影像，通过提升时间分辨率实现更多有效冰川湖信息获取。然而这就造就了影像信息驳杂，不同的影像在处理时候调用不同的云检测算法，且 PlanetScope 缺乏专业的云雾检测算法。为了普适且有效获取云雾掩膜，本文基于 RGB 暗通道先验构建了一种云

雾检测方法。暗通道先验是一种经验性假设，假定自然界中无云雾污染的影像RGB波段必定存在一个较小的值，该值接近或等于零（He等，2011）。具体而言，暗通道先验算法可以表示如下：

$$J_{\text{dark}}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_{c \in \{r, g, b\}} J^c(y) \right) \quad (3)$$

式中， $J^c(y)$ 代表的是位置 y 处颜色通道 c 的像素值， $\Omega(x)$ 则表示以 x 为中心的局部邻域。进一步可以通过下述公式获得地表透射率：

$$I(x) = J(x)t(x) + A(1 - t(x)) \quad (4)$$

式中， $I(x)$ 是位置在 x 处的有云图像的像素值， $J(x)$ 是位置在 x 处的无云图像像素值， $t(x)$ 代表透射率其范围是 $[0, 1]$ ， A 则是全局大气光，通常选择图像中亮度最高且颜色接近白色的区域作为大气光估计值。透射率的详细计算方式与导向滤波优化请参考何凯明等的研究（He等，2011），本文不再进行赘述。根据多次测试对比，通过将 $I(x) < 0.3$ 的像元标记为云雾像元，即可简单高效获取Planet云掩膜。

3.3 时序冰川湖提取

冰川湖在SAR影像中的表现具有显著的季节性差异，这一差异主要取决于表层湖冰的形成与消融过程。为定量剖析湖冰对雷达后向散射特征

及面积信号的影响，本文基于Sentinel-1 VV/VH双极化时间序列，开展冰川湖面积的时序提取与验证。

在技术路径上，沿用本团队既有的研究框架（Wu等，2024，2025），以简单线性迭代聚类算法SNIC为核心：首先将具备不同极化信息的VV与VH波段联合输入，形成双通道特征空间；随后以影像局部同质性为准则执行空间—光谱聚类，最终将像元划分为水体与非水体两类，实现冰川湖边界的自动提取。SNIC同时具备边界约束机制与自适应种子密度调整能力，可根据纹理差异自动分割异质区域，因而非常适合高山冰川湖在冻结/消融阶段呈现的边缘模糊或弱信号情形。

具体流程如图2所示。首先，将连体分布的冰川湖实体分割为独立的分析单元，确保每个湖体在局部统计域内呈现可辨识的双峰分布；其次，注意到雷达后向散射直方图两端极端值对团簇误差具有放大效应，保留中间98%像元并剔除百分比最高与最低的各1%离群值，以此抑制边缘杂波，提高聚类的离散度；最后，对每个湖体的裁剪影像分块运算，逐期输出连续时间序列的水体掩膜并计算面积变化，完成湖冰出现与消失全过程的量化监测。

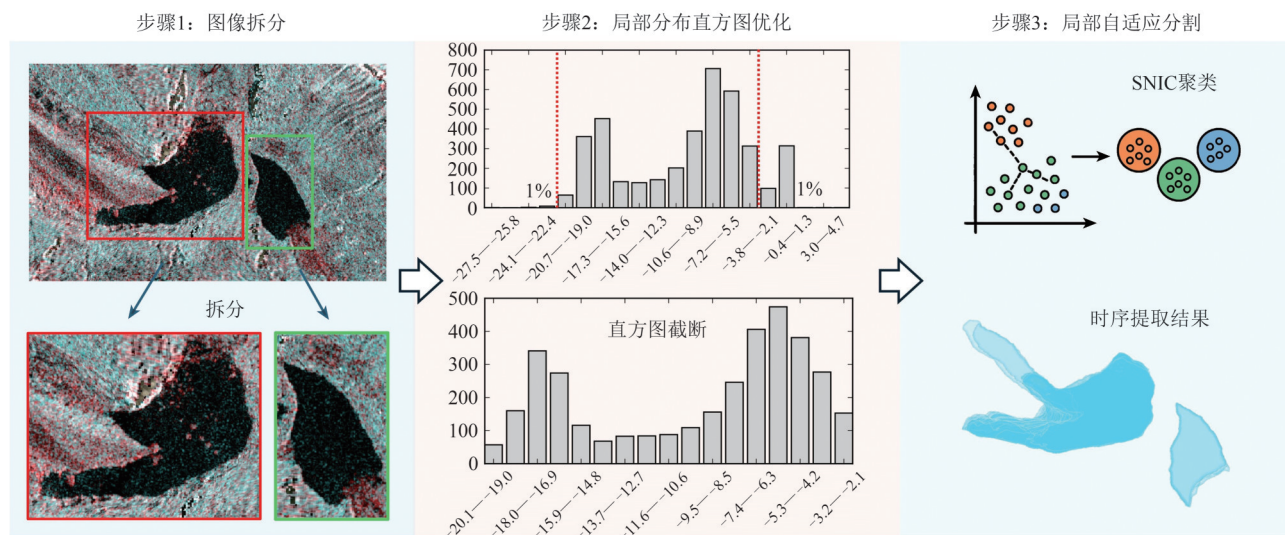


图2 时序冰川湖提取流程

Fig. 2 Workflow for temporal glacial lake extraction

4 结果

4.1 SAR影像冰川湖面积变化

基于本文提出的时序冰川湖提取算法，获取

了2020年1月1日—2021年1月1日期间冰川湖的动态变化信息。为确保矢量化结果的准确性，对提取结果进行了人工检核与校正。校正原则为：补充图像中具有冰川湖特征但未被自动识别的区域；删除不具备冰川湖特征的误识区域。当湖面

结冰时，SAR影像因冰层覆盖导致冰川湖与非冰川湖区域难以区分，故不将其识别为冰川湖；而光学影像因保留明显的边界特征，仍可识别为冰川湖。校正工作采用单人矢量修正、多人复核的方式，以确保校正结果符合真实边界要求。

冰川湖面积变化统计结果如图3所示。根据西藏地区气候季节特征（史继清等，2018），四季平均起始日期分别划分为2月25日（春）、5月31日（夏）、9月15日（秋）和11月28日（冬）。图3显

示，基于SAR影像的贡措面积呈现显著季节性波动：春季扩张，夏秋季达到峰值，冬季萎缩。郎措面积则相对稳定，无明显季节性变化。值得注意的是，2020年5月1日的降轨SAR影像显示贡措面积骤降至0.14 km²。遗憾的是，2020年5月1日前后缺乏可靠的光学影像数据。仅获取4月21日与5月10日两景少云PlanetScope影像，其均未显示贡措形态发生明显改变。

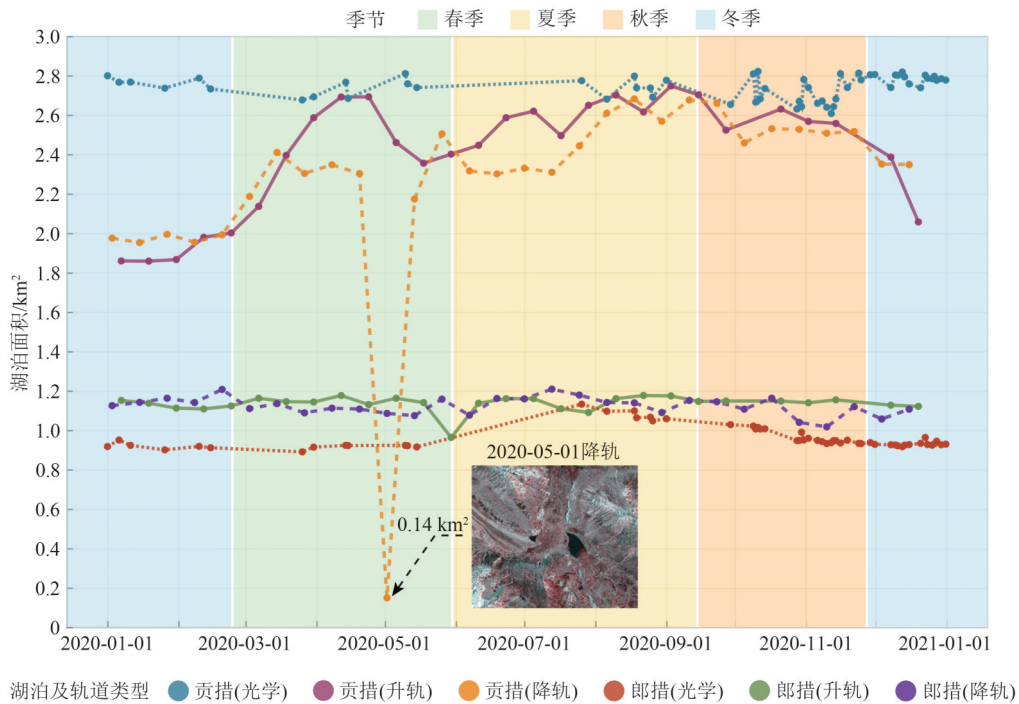


图3 贡措与郎措面积变化

Fig. 3 Areal changes of Gongcuo and Langcuo

为了探究冰川湖在SAR影像中为何面积存在显著季节性变化，本文将光学影像与SAR影像在相邻的时间进行详细对比。如图4所示，SAR影像在水体会发生镜面反射，导致回波信号强度较弱表征为影像中像元亮度降低，而浮冰、冰碛物等较为粗糙，回波信号较强表征为影像中像元亮度增加。春季贡措和郎措均存在有浮冰，SAR影像中冰川湖特征相较于光学影像显著减小。随着进入夏季，冰川湖特征更加明显，此时SAR影像中的冰川湖面积与光学影像最为接近，然而仍然存在部分浮冰或者冰碛物。随着进入秋季，气温逐渐降低，湖面结冰的情况再次出现。而进入冬季，贡措已彻底结冰，但湖冰部分仍然存在有部分类似湖水特征，经过观察湖面中心区域，湖冰平整

且没有冰碛物等杂质，过于光滑的表面产生类似水体的镜面反射，导致SAR影像中冰川湖信号强度较低。

4.2 SAR影像中雷达特征变化

结果表明，在观测时段内贡措、郎措的实际面积变化较小，SAR影像呈现的面积波动主要源于湖面结冰产生的电磁散射特性变化，进而导致面积解译的系统性偏差。为定量分析结冰过程对SAR影像特征的影响机制，本研究基于2020年8月26日贡措与郎措完全解冻期的Planet影像提取冰川湖矢量边界（下文统称“基准矢量”），并在此基准矢量范围内利用SAR时间序列数据，系统分析了两湖在VV与VH极化方式及升轨、降轨观测模式下的后向散射响应规律。

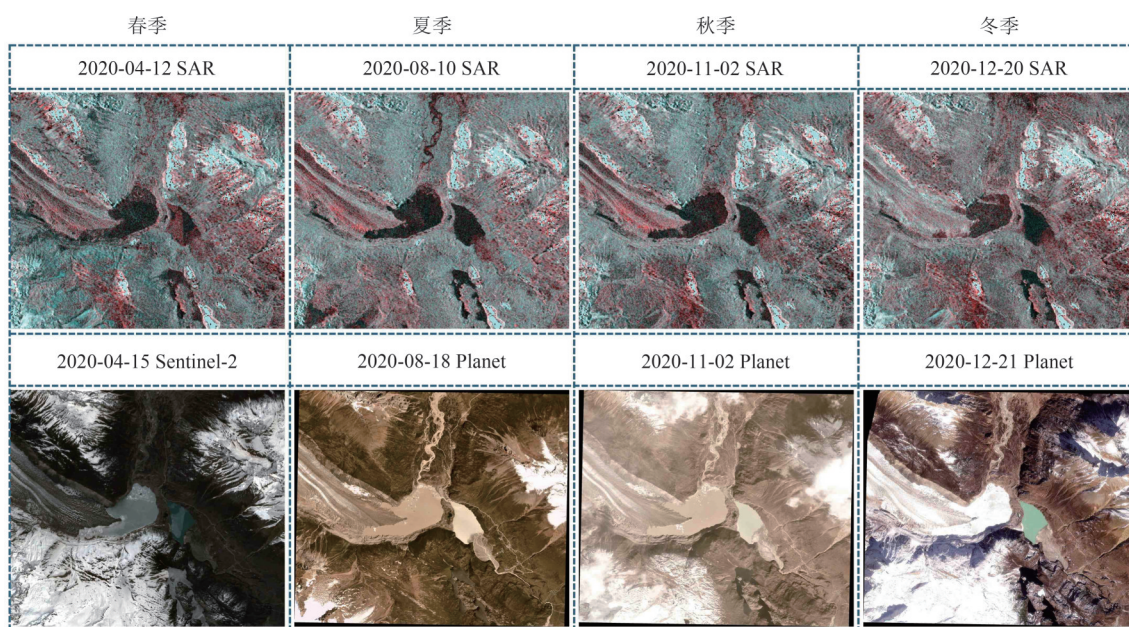
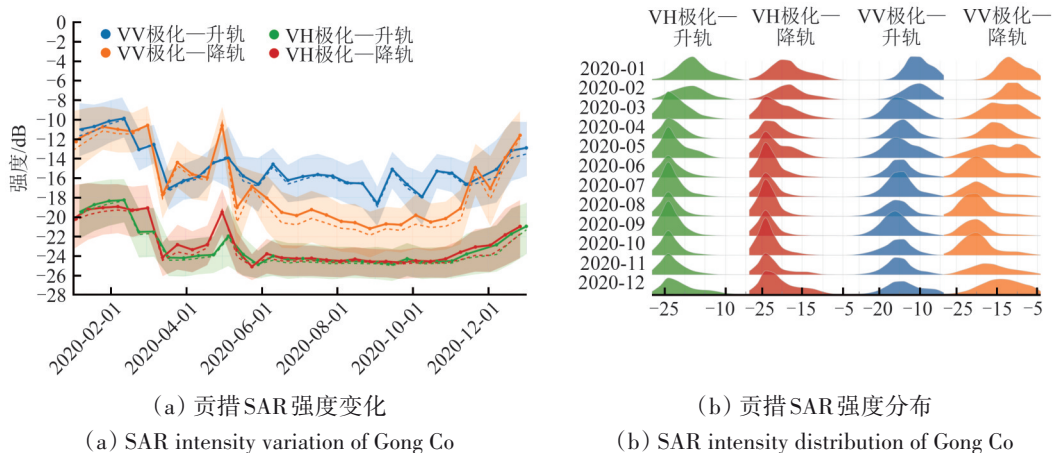


图4 SAR影像与光学影像冰川湖特征对比

Fig. 4 Comparison of SAR and optical imagery for glacial lake characteristics

图5和图6分别展示两湖区域后向散射强度的时序演变特征：图5(a)和图6(a)呈现冰川湖区域后向散射系数的时间序列均值，阴影区域代表了数据波动范围；图5(b)和图6(b)表征不同月份平均强度的统计分布。结果表明，两湖在不同极化模式下存在显著差异，VV极化普遍高于VH极化约6—10 dB。该现象符合水体表面散射理论：在光滑水面条件下，雷达信号以镜面反射为主导，极化方向转换比例较低，导致交叉极化VH

通道的回波能量显著弱于水平极化VV通道(Kirby等, 2024)。升降轨观测结果显示，在VV极化模式下，两湖升降轨平均强度时间序列整体趋势一致，差异幅度约为2—4 dB，但在特定时段存在系统性偏移，可能与入射角差异、观测几何构型以及地形坡度引起的投影畸变有关。在VH极化模式下，升降轨平均强度差异更为显著，时间序列波动加剧，尤其在4—9月差异进一步扩大，从而表明交叉极化对冰—水相变过程具有更高敏感性。



(a) 贡措SAR强度变化

(a) SAR intensity variation of Gong Co

(b) 贡措SAR强度分布

(b) SAR intensity distribution of Gong Co

图5 贡措SAR极化特征变化

Fig. 5 SAR polarization variations of Gongcuo

后向散射的季节性演变可较为清晰地映射冰川湖物候：(1) 4—9月是融化期，后向散射强度陡降，其中VH极化的降幅尤为明显，这一阶段对

应冰雪融化、液态水体大面积暴露，镜面反射增强。(2) 11月至次年2月是冻结期，这一阶段冰面粗糙度提升及积雪体散射，后向散射强度回升。

(3) 3月和10月过渡期，这一阶段呈现较大的时序波动，体现出冰—水相变过程中的不稳定性与复杂性。湖区对比显示：贡措后向散射强度标准差4—6 dB，其存在较强的季节性演化；郎措标准

差2—4 dB，序列更为稳定，表明其所处地理环境更为封闭、水文条件相对稳定。为了更好的显示VV、VH极化冰川湖特征变化，图5和图6强度值分布采用了月度平均（图5(b)和图6(b)）。

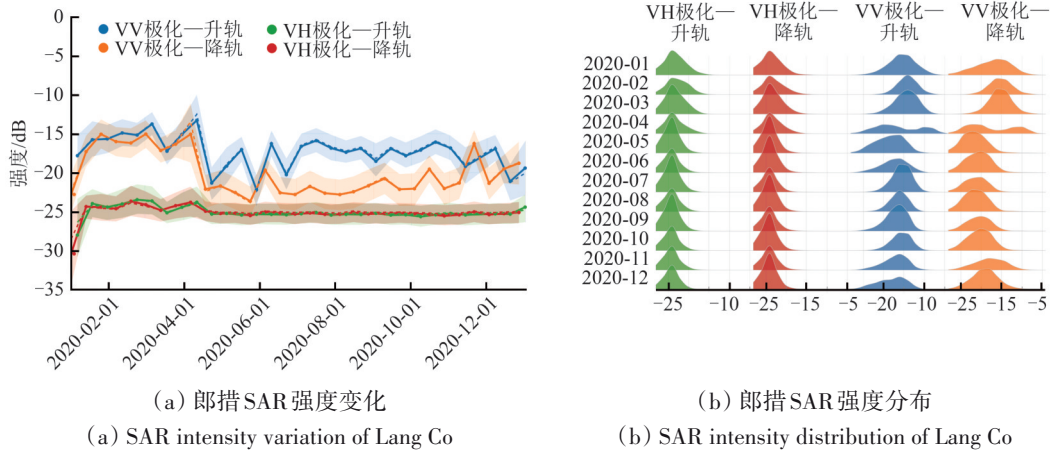


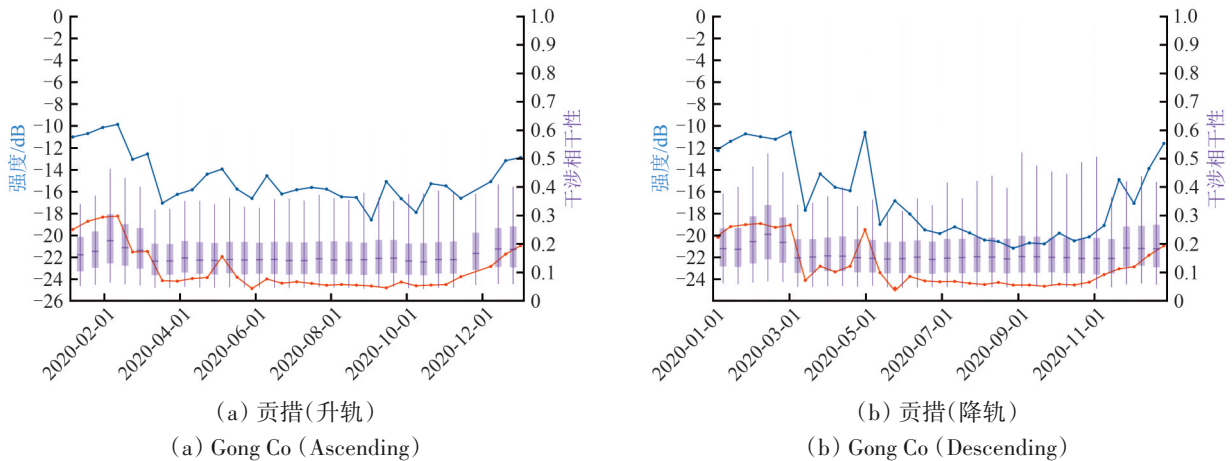
图6 郎措SAR极化特征变化
Fig. 6 SAR polarization variations of Langcuo

4.3 SAR干涉相干性变化

在C波段Sentinel-1的12 d重访条件下，开阔水面因镜面反射与风浪导致的快速形变，强度低且相干性接近零（Antonova等，2016）。新生薄冰或快速生长/消融的冰体虽可能较开阔水面反射信号强度有所增加，但其结构与含水状态变化快，仍表现为低相干。随着气温降低，冰面运动逐渐减缓，其内部结构变化也趋于稳定，如岸连冰、稳定厚冰，此时相干性会显著升高（Tian等，2015）。

图7展示了贡措、郎措的升降轨影像的时序强度值与干涉相干性。干涉相干性采用箱线图绘制以展示基准矢量范围内所有像元的相干性分布，

反射信号仍采用折线图绘制了基准矢量范围内的强度均值，与干涉相干性形成对照。针对贡措（图7(a)、(b)），相干性在1—3月及11—12月分布靠上，显著高于其他月份，均值约为0.2，四分之三分位数介于0.25—0.3之间，表明该时间段贡措形成了较大范围且稳定的岸连冰或厚冰。在4—9月，干涉相干性维持在较低水平，均值约0.15，四分之三分位数位于0.2附近，此时可能仅存在薄冰或开阔水体。针对郎措而言（图7(c)、(d)），郎措全年相干性整体偏低，均值约为0.15，四分之三分位数位于0.2附近，1—3月及11—12月期间仅有小幅抬升，其冰面相较于贡措存在更强的变化，稳定冰覆盖范围有限。



(a) 贡措(升轨)
(a) Gong Co (Ascending)

(b) 贡措(降轨)
(b) Gong Co (Descending)

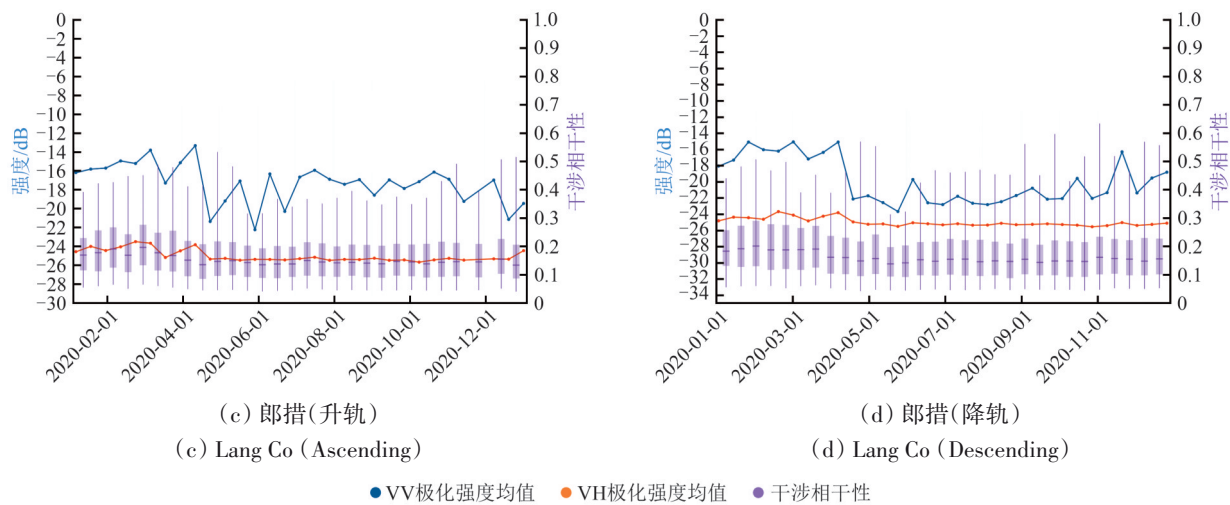


图7 贡措、郎措升降轨强度与干涉相干性对比

Fig. 7 Ascending vs. descending track intensity and interferometric coherence of Gongcuo and Langcuo

5 讨论

5.1 气候对于SAR冰川湖特征的影响

冰川湖结冰导致的SAR后向散射信号变化以及干涉相干性演变与气候因子密切相关，其中温度的影响最为直接且显著。图8基于GEE调用ERA5-Land每日汇总数据，统计了研究区2020年—2021年期间的2 m气温与地表温度。结果表明，该区域全

年温度偏低：气温最低达 -26°C 、最高仅 8°C ；地表温度波动更为频繁，最低达 -30°C 、最高 13°C 。两者季节变化趋势基本一致，3月后逐步升温，于8—9月达到峰值，随后快速回落，至11月降至接近3月的均值。温度序列表明，自5月20日起气温持续高于 0°C 并维持至10月18日。与此相对照，光学影像显示贡措于5月10日已完成解冻，可能更早但缺少有效影像支撑；其冻结发生于11月19日，而11月16日的影像仍显示未冻结状态。

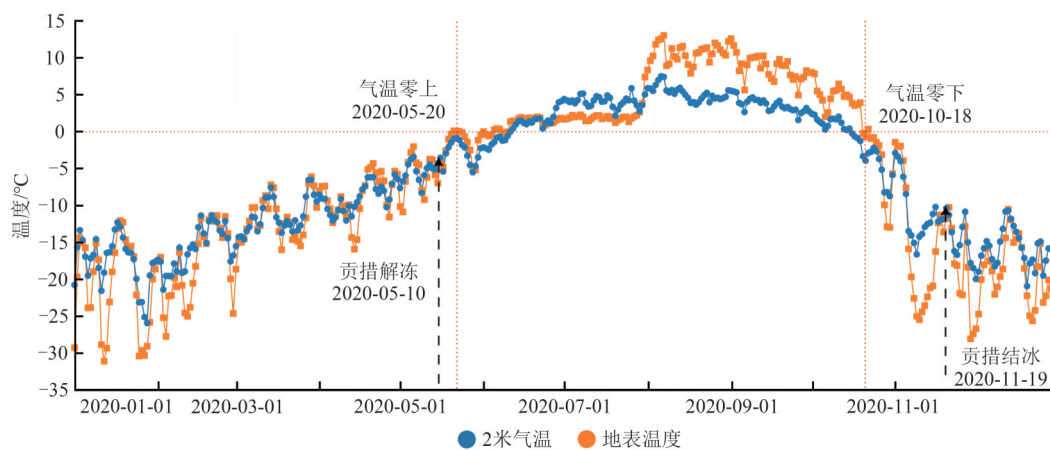


图8 研究区2020年—2021年期间2 m气温与地表温度ERA5-Land每日汇总

Fig. 8 ERA5-Land daily 2-m air temperature and land surface temperature (2020—2021)

贡措的SAR强度在3月中旬出现显著下降，至11月初又逐步上升。该现象与冰体厚度变化密切相关，雷达波可在一定厚度范围内穿透冰层到达水面。理论上，C波段在干冷条件下对干冰的穿透深度可达数米；但在实际应用中，当冰层厚度超过一定阈值时，来自冰—气界面与冰—水界面的

反射回波产生相位差并满足相消条件，导致来自水面的有效回波显著衰减 (Ferro-Famil 和 Gay, 2016)。由此，冰体变厚通常会引起SAR强度上升，反之则表现为强度下降。贡措呈现出典型的静水型特征，此类湖泊近岸浅水区湖冰更厚，湖心深水区湖冰较薄。其物理机制在于浅水区热容

量较低，冬季降温更快，初始结冰时间早于深水区；而湖心水深较大，水体潜热储存更多，冻结进程滞后且形成的冰层相对较薄。

为进一步探究贡措与郎措冰川湖的SAR影像

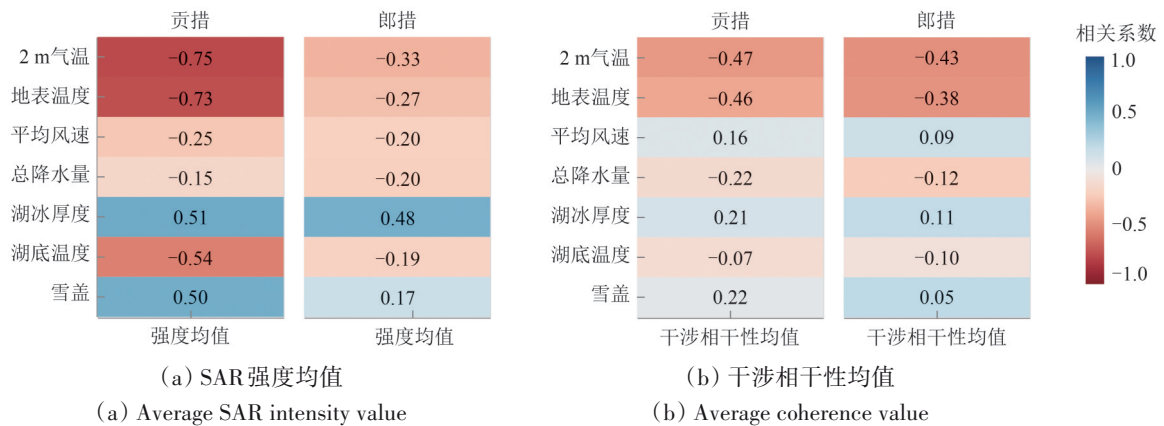


图9 冰川湖SAR影像强度、干涉相干性与ERA5-Land气象数据的线性相关性
Fig. 9 Linear relationship of SAR intensity, coherence, and ERA5-Land meteorology for glacial lakes

在SAR强度均值方面（图9（a）），不同气候因子的相关性存在明显差异。2 m气温与地表温度与郎措的相关性相对较弱，负相关系数分别为-0.33和-0.27。与贡措的相关均呈显著负相关，相关系数分别为-0.75和-0.73。升温导致冰面消融与含水率增加，改变了介电常数与表面粗糙度，并提升开阔水体比例，综合作用下抑制后向散射强度。值得注意的是，湖冰厚度、雪盖也与SAR后向散射强度呈较强正相关，可能源于积雪覆盖的体散射特性与湿雪的电磁吸收共同降低回波能量。相比之下，平均风速、总降水量与强度的线性相关性较弱，显示其对后向散射强度的直接线性影响有限。

与强度特征相比，干涉相干性对多数气候因子的响应较弱，相关系数绝对值普遍低于0.25，表明干涉相干性更多地可能受到两次SAR成像间的基线距以及地表本身的物理特性剧烈变化所主导，而与这些气候因子的平均状态关联性较低。然而，2 m气温与地表温度同干涉相干性呈现出中等强度负相关。其中，郎措湖的相干性与气温和地温的负相关性分别是-0.47和-0.46，甚至略高于贡措湖的相关性。气温的升高会显著降低SAR信号的干涉相干性，温度上升引发的冰面快速融化、雪水状态变化或表层变形，会导致两次SAR成像期间地表散射特性发生剧烈改变，从而造成严重

特征与气候因子之间的关联，本文基于皮尔逊相关系数构建热力图（图9），以揭示气候条件对冰川湖微波散射特性的作用机制。

的时空去相干。

因此，若利用SAR影像提取冰川湖面积，应优先选择温度较高且开阔水体占比显著的时段，以降低湖冰散射对水体判读的干扰。若关注湖冰的生消演变，则宜联合分析后向散射强度与干涉相干性，以判定湖冰空间范围、识别稳定冰体并辅助推断相对冰厚与力学稳定性。

5.2 基于强度—相干性联合阈值的冰川湖状态判断

整体而言，SAR影像可通过回波强度变化有效感知水域结冰状态，而相干性则为冰川湖冻融监测提供了与强度互补的“稳定性”维度，能够进一步判别湖泊中是否存在稳定冰体。由于水体镜面反射特性，交叉极化VH通道对水体变化更为敏感。在水域范围内，SAR回波信号增强可能指示冰川湖存在结冰现象；基于贡措与郎措SAR影像及干涉相干性特征，冰川湖状态可采用表1所示进行判别，其中相干性以12 d为周期的短期干涉相干性表征。该阈值经多次统计测试并与光学遥感影像对照选定，能够较为有效地描述贡措与郎措的湖冰范围。具体分类结果如图10所示，该图展示了升轨影像中冰川湖像元的分类结果。需要注意的是，冰川湖回波增强的成因较为复杂，例如风浪导致的表面粗糙度增大亦会引起散射增强，

因而难以完全避免误差。

该阈值属于经验性设定, 迁移至其他冰川湖区域时仍需开展进一步测试与调整。此外, 本文所用干涉相干性基于相邻SAR影像, 时间间隔为12 d。尽管厚冰可维持较长时间, 冰体在生消过程中的形变仍会显著降低相干性, 因此此类具有时间差的相干性指标仅能用于定性判别是否存在稳定厚冰, 尚不足以支撑定量识别。若能缩短干涉时间基线, 例如采用TanDEM-X等一发多收卫星

以提高相干性, 可以更加有效区开阔水体、薄冰与稳定厚冰。

表1 SAR影像判断冰川湖状态参数设置

Table 1 Parameter settings for determining glacial lake states from SAR imagery

类型	强度范围/dB	相干性范围
开阔水体	$VH \leq -4$	相干性均值 ≤ 0.15
薄冰	$-20 \leq H \leq -24$	相干性均值 ≤ 0.15
稳定冰	$VH \geq -20$	相干性均值 ≥ 0.15

注: 该阈值为基于本研究区的经验值, 应用至其他区域需进行验证和调整。

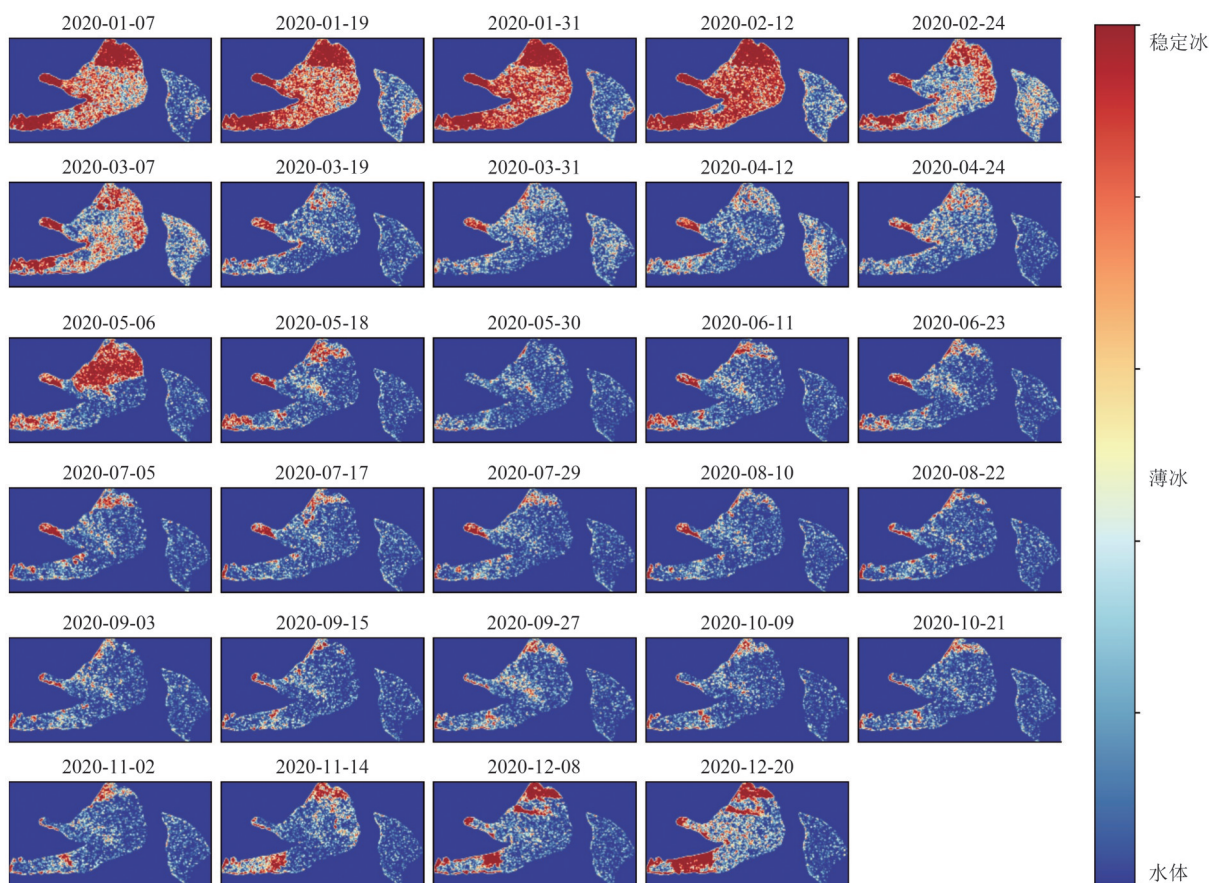


图10 升轨Sentinel-1影像冰川湖像元分类

Fig. 10 Glacial lake pixel classification from ascending Sentinel-1 images

6 结论

本文基于Sentinel-1 SAR数据, 监测了贡措和郎措2020年水体面积的年际变化, 并选取多源无云时序光学影像进行对比验证, 探究了冰川湖冰生消过程对SAR影像后向散射的影响。结果显示, 郎措在全年SAR影像中面积表现稳定, 而贡措则呈现显著季节性波动, 其冰川湖水域面积变化范围为1.85—2.65 km², 相较之下, 光学影像揭

示的贡措面积为2.6—2.8 km²。

进一步分析SAR后向散射特征表明, 11月至次年3月贡措存在湖冰覆盖, 导致冰川湖开阔水面特征消失, 从而造成SAR水体提取的季节性低估。为深入探究SAR信号对湖冰的响应机制, 本研究对相邻时序SAR影像实施两两差分干涉处理, 利用干涉相干性补充SAR强度在时间稳定性维度的不足。统计特性显示, 当满足 $VH \leq -24$ dB、 $VV \leq -16$ dB且相干性 ≤ 0.15 时, 可有效区分贡措与郎措

的湖冰和开阔水面。同时, ERA5-Land再分析数据证实, 区域气温的季节性波动是影响SAR信号特征变化的主导因素: 5月中旬至10月中旬, 气温与地表温度持续高于0℃, 对应于光学影像观测的湖面解冻期; 随着气温降低, 11月后贡措湖面再次封冻。存在季节性冻结的贡措SAR强度值与气温的皮尔逊相关系数达到-0.75, 证实温度升高有助于湖冰消融、冰体变薄, 进而减少雷达有效散射面积, 导致整体回波强度减弱。

整体而言, 本文揭示了SAR影像在冰川湖监测中的误差核心来源, 系统分析了贡措与郎措的微波后向散射响应特征, 并提出了基于强度-相干性联合阈值的冰川湖与湖冰判别方法, 为季节性冻融条件下的冰川湖动态监测提供了可行的技术路径。鉴于青藏高原冰川湖在海拔、气候及冻融特征等方面的多样性, 该方法在更大范围冰川湖的适用性仍需进一步验证与优化。

参考文献(References)

- Ahmed R. 2025. Glacial lake outburst flood (GLOF) hazard and risk management strategies: A global overview. *Water Resources Management*, 39(1): 1-16 [DOI: 10.1007/s11269-024-03958-x]
- Antonova S, Duguay C, Käab A, Heim B, Langer M, Westermann S and Boike J. 2016. Monitoring bedfast ice and ice phenology in lakes of the Lena River delta using TerraSAR-X backscatter and coherence time series. *Remote Sensing*, 8(11): 903 [DOI: 10.3390/rs8110903]
- Baig S U, Khan H, Muneeb F and Dad K. 2020. Formation of a hazardous ice-dammed glacier lake: a case study of anomalous behavior of Hassanabad glacier system in the Karakoram. *SN Applied Sciences*, 2(7): 1285 [DOI: 10.1007/s42452-020-2989-4]
- Dai K R, Wen N L, Fan X M, Deng J, Zhang L L, Liang R B, Liu J and Xu Q. 2022. Seasonal changes of glacier lakes in Tibetan Plateau revealed by multipolarization SAR data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 19: 4502005 [DOI: 10.1109/LGRS.2021.3131717]
- Ferro-Famil L and Gay M. 2016. Penetration depth of synthetic aperture radar signals in ice and snow: an analytical approach//Workshop Remote Sensing and Modeling of Surface Properties. Grenoble: [s.n.]
- Fick S E and Hijmans R J. 2017. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12): 4302-4315 [DOI: 10.1002/joc.5086]
- He K M, Sun J and Tang X O. 2011. Single image haze removal using dark channel prior. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 33(12): 2341-2353 [DOI: 10.1109/TPAMI.2010.168]
- Jawak S D, Bidawe T G and Luis A J. 2015. A review on applications of imaging synthetic aperture radar with a special focus on cryospheric studies. *Advances in Remote Sensing*, 4(2): 163-175 [DOI: 10.4236/ars.2015.42014]
- Kaushik S, Singh T, Joshi P K and Dietz A J. 2022. Automated mapping of glacial lakes using multisource remote sensing data and deep convolutional neural network. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 115: 103085 [DOI: 10.1016/j.jag.2022.103085]
- Kirby K, Rennie C D, Poot R, Ferguson S, Cousineau J and Nistor I. 2024. Accuracy of surface water maps derived from radar satellite imagery compared to multispectral satellite imagery. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 50(1): 2433591 [DOI: 10.1080/07038992.2024.2433591]
- Li J L, Sheng Y W and Luo J C. 2011. Automatic extraction of Himalayan glacial lakes with remote sensing. *National Remote Sensing Bulletin*, 15(1): 29-43 (李均力, 盛永伟, 骆剑承. 2011. 喜马拉雅山地区冰湖信息的遥感自动化提取. *遥感学报*, 15(1): 29-43) [DOI: 10.11834/jrs.20110103]
- Li W R, Lhermitte S and López-Dekker P. 2021. The potential of synthetic aperture radar interferometry for assessing Meltwater Lake dynamics on Antarctic ice shelves. *The Cryosphere*, 15(12): 5309-5322 [DOI: 10.5194/tc-15-5309-2021]
- Lu W L, Liu Z F, He C Y and Xia P. 2020. A new method for detecting urban construction land based on Sentinel-1A synthetic aperture radar data and fully convolutional network. *Arid Land Geography*, 43(3): 750-760 (卢文路, 刘志锋, 何春阳, 夏沛. 2020. 基于Sentinel-1A合成孔径雷达数据和全卷积网络的城市建设用地监测方法研究. *干旱区地理*, 43(3): 750-760) [DOI: 10.12118/j.issn.1000-6060.2020.03.21]
- Murfitt J and Duguay C R. 2021. 50 years of lake ice research from active microwave remote sensing: progress and prospects. *Remote Sensing of Environment*, 264: 112616 [DOI: 10.1016/j.rse.2021.112616]
- Nie Y, Pritchard H D, Liu Q, Hennig T, Wang W L, Wang X M, Liu S Y, Nepal S, Samyn D, Hewitt K and Chen X Q. 2021. Glacial change and hydrological implications in the Himalaya and Karakoram. *Nature Reviews Earth and Environment*, 2(2): 91-106 [DOI: 10.1038/s43017-020-00124-w]
- Nüsser M and Schmidt S. 2017. Nanga Parbat revisited: evolution and dynamics of sociohydrological interactions in the northwestern Himalaya. *Annals of the American Association of Geographers*, 107(2): 403-415 [DOI: 10.1080/24694452.2016.1235495]
- C Abinesh, and Priyadharsini C. 2025. Enhancing glacial lake monitoring through CNN-based UNet models in a streamlit application//2025 Fourth International Conference on Smart Technologies, Communication and Robotics (STCR). Sathyamangalam, India
- Preston D L, Caine N, McKnight D M, Williams M W, Hell K, Miller M P, Hart S J and Johnson P T J. 2016. Climate regulates alpine

- lake ice cover phenology and aquatic ecosystem structure. *Geophysical Research Letters*, 43(10): 5353-5360 [DOI: 10.1002/2016gl069036]
- Shi J Q, Gan C L, Bianduo, Chuduo, Dou Y L, Pubu C R and Guo Y N. 2018. Variation of seasons in Tibet autonomous region from 1981 to 2015. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 40(6): 1110-1119 (史继清, 甘臣龙, 边多, 除多, 豆永丽, 普布次仁, 郭艺楠). 2018. 1981-2015年西藏全区气候季节的变化. *冰川冻土*, 40(6): 1110-1119 [DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2018.0120]
- Shi Y F. 2011. *New Understanding of Quaternary Glaciations in China*. Shanghai: Shanghai Popular Science Press (施雅风). 2011. 中国第四纪冰川新论. 上海: 上海科学普及出版社)
- Tian B S, Li Z, Engram M J, Niu F J, Tang P P, Zou P F and Xu J. 2015. Characterizing C-band backscattering from Thermokarst Lake ice on the Qinghai-Tibet Plateau. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 104: 63-76 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2015.02.014]
- Wang X, Guo X Y, Yang C D, Liu Q H, Wei J F, Zhang Y, Liu S Y, Zhang Y L, Jiang Z L and Tang Z G. 2020. Glacial lake inventory of high-mountain Asia in 1990 and 2018 derived from Landsat images. *Earth System Science Data*, 12(3): 2169-2182 [DOI: 10.5194/essd-12-2169-2020]
- Werner C, Wegmüller U, Strozzi T and Wiesmann A. 2000. Gamma SAR and interferometric processing software//Proceedings of the Ers-Envisat Symposium. Gothenburg: [s.n.]: 1620-1629
- Wu G J, Yao T D, Wang W C, Zhao H B, Yang W, Zhang G Q, Li S H, Yu W S, Lei Y B and Hu W T. 2019. Glacial hazards on Tibetan Plateau and surrounding alpine. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 34(11): 1285-1292 (邬光剑, 姚檀栋, 王伟财, 赵华标, 杨威, 张国庆, 李生海, 余武生, 类延斌, 胡文涛). 2019. 青藏高原及周边地区的冰川灾害. *中国科学院院刊*, 34(11): 1285-1292 [DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.2019.11.011]
- Wu R Z, Liu G X, Bao X, Lv J C, Shama A, Zhang B, Mao W F, Chen J, Yang Z H and Zhang R. 2025. Eliminating geometric distortion with dual-orbit Sentinel-1 SAR fusion for accurate glacial lake extraction in southeast Tibet Plateau. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 136: 104329 [DOI: 10.1016/j.jag.2024.104329]
- Wu R Z, Zhang R, Cai J X, Cai K, Wu T T, Lv J C, Shi Y L and Liu G X. 2024. Glacial lake extraction framework based on coupling of GEE and historical glacial lake position. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 21: 2001005 [DOI: 10.1109/LGRS.2024.3370229]
- Xie Z C and Liu C H. 2010. *Introduction to Glaciology*. Shanghai: Shanghai Popular Science Press (谢自楚, 刘潮海). 2010. 冰川学导论. 上海: 上海科学普及出版社)
- Yan B, Jia H G, Ren W J, Wu R Z and Huang X R. 2022. Glacier lake extraction and variation analysis of the Bujiangangri glacier based on the NDWI-NDSI combination threshold method. *National Remote Sensing Bulletin*, 26(11): 2344-2353 (闫斌, 贾洪果, 任文静, 吴仁哲, 黄心茹). 2022. 基于NDWI-NDSI组合阈值法的布加岗日冰湖提取及其变化分析. *遥感学报*, 26(11): 2344-2353 [DOI: 10.11834/jrs.20210205]
- Yao T D and Yao Z J. 2010. Impacts of glacial retreat on runoff on Tibetan Plateau. *Chinese Journal of Nature*, 32(1): 4-8 (姚檀栋, 姚治君). 2010. 青藏高原冰川退缩对河水径流的影响. *自然杂志*, 32(1): 4-8 [DOI: 10.3969/j.issn.0253-9608.2010.01.002]
- Yao X J, Liu S Y, Han L and Sun M P. 2017. Definition and classification systems of glacial lake for inventory and hazards study. *Acta Geographica Sinica*, 72(7): 1173-1183 (姚晓军, 刘时银, 韩磊, 孙美平). 2017. 冰湖的界定与分类体系——面向冰湖编目和冰湖灾害研究. *地理学报*, 72(7): 1173-1183 [DOI: 10.11821/dlxb201707004]
- Yao X J, Liu S Y, Han L, Sun M P and Zhao L L. 2018. Definition and classification system of glacial lake for inventory and hazards study. *Journal of Geographical Sciences*, 28(2): 193-205 [DOI: 10.1007/s11442-018-1467-z]
- Zhang G Q, Wang M M, Zhou T and Chen W F. 2022. Progress in remote sensing monitoring of lake area, water level, and volume changes on the Tibetan Plateau. *National Remote Sensing Bulletin*, 26(1): 115-125 (张国庆, 王蒙蒙, 周陶, 陈文锋). 2022. 青藏高原湖泊面积、水位与水量变化遥感监测研究进展. *遥感学报*, 26(1): 115-125 [DOI: 10.11834/jrs.20221171]
- Zhang T G, Wang W C and An B S. 2024. Heterogeneous changes in global glacial lakes under coupled climate warming and glacier thinning. *Communications Earth and Environment*, 5(1): 374 [DOI: 10.1038/s43247-024-01544-y]
- Zhou Y S, Li X, Zheng D H, Ren S S, Wang Y Z and Li Z W. 2024. Data, methods and perspectives of optical stereo and bistatic SAR satellites for monitoring glacier thickness change in high-mountain Asia. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 53(5): 779-800 (周玉杉, 李新, 郑东海, 任姗姗, 汪赢政, 李志伟). 2024. 亚洲高山区冰川厚度变化光学立体和双基 SAR 卫星监测数据、方法与展望. *测绘学报*, 53(5): 779-800 [DOI: 10.11947/j.AGCS.2024.20230260]
- Zhu L P, Zhang G Q, Yang R M, Liu C, Yang K, Qiao B J and Han B P. 2019. Lake variations on Tibetan Plateau of recent 40 years and future changing tendency. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 34(11): 1254-1263 (朱立平, 张国庆, 杨瑞敏, 刘翀, 阳坤, 乔宝晋, 韩博平). 2019. 青藏高原最近40年湖泊变化的主要表现与发展趋势. *中国科学院院刊*, 34(11): 1254-1263 [DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.2019.11.008]

Freeze–thaw effects on SAR–based glacial lake mapping : Gongcuo and Langcuo case study

WU Renzhe^{1,3}, LIU Guoxiang^{2,4}, CAI Jiaxin²

1. Aerospace Information Research Institute, Henan Academy of Science, Zhengzhou 450046, China;

2. Faculty of Geosciences and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;

3. Henan Province Engineering Research Center for Intelligent Processing and Integrated Application of Aerospace Information, Zhengzhou 450046, China;

4. State-Province Joint Engineering Laboratory of Spatial Information Technology for HSR Operation Safety, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China

Abstract: Under global warming, glacier retreat and meltwater accumulation drive the expansion of glacial lakes. As a result, the risk of glacial lake outburst floods that threaten downstream infrastructure and communities increases significantly. Continuous and accurate monitoring of glacial lakes is essential for disaster prevention. Synthetic aperture radar (SAR) has become widely applied in complex mountainous glacial lake studies because of its all-weather, continuous capability and cloud-penetrating advantage, with high temporal resolution enabling capture of seasonal dynamics. However, identification errors caused by seasonal freeze-thaw processes affecting SAR backscatter characteristics remain inadequately explored, thereby limiting extraction accuracy. This study aims to investigate the response mechanisms of SAR features to glacial lake freeze-thaw cycles systematically and develop methods to improve monitoring reliability under seasonal ice conditions.

This study selected two adjacent glacial lakes with distinct freeze-thaw characteristics—Gongcuo and Langcuo in Basu County, Tibet—as test sites. We analyzed lake area changes throughout 2020 by combining Sentinel-1 SAR imagery with multisource optical data (Sentinel-2, Landsat-8, and PlanetScope). SAR preprocessing included radiometric calibration, multilooking, and geocoding using GAMMA software. Lake boundaries were extracted using a simple noniterative clustering algorithm applied to dual-polarization Vertical-Vertical (VV) and Vertical-Horizontal (VH) intensity data. Interferometric coherence was computed from temporally adjacent SAR image pairs with 12-day intervals to assess surface stability. The dark channel prior algorithm was employed for cloud masking of optical imagery. ERA5-Land reanalysis climate data were integrated to correlate SAR feature variations with temperature, precipitation, and wind conditions through Pearson correlation analysis.

Analysis revealed that Langcuo rarely experiences seasonal freezing, with lake areas extracted from optical and SAR imagery showing good agreement. By contrast, Gongcuo exhibited pronounced seasonal freeze-thaw differences; in particular, SAR-derived areas fluctuated between 1.85 and 2.65 km², whereas optical imagery showed stable areas from 2.6 km² to 2.8 km². Combined analysis of SAR intensity and interferometric coherence revealed that Gongcuo develops relatively stable lake ice from November through March annually. This stable ice is the primary cause of discrepancies between SAR and optical lake extraction. Backscatter intensity exhibited a strong negative correlation with temperature ($r=-0.75$), thereby confirming that warming promotes ice thinning and reduces effective scattering surfaces. Coherence analysis demonstrated that stable thick ice maintains high coherence values (mean ~ 0.2 ; upper quartile 0.25–0.3), whereas open water and thin ice show low coherence (mean ~ 0.15). An empirical threshold classification was established: open water (VH ≤ -24 dB; coherence ≤ 0.15), thin ice (-20 dB \leq VH ≤ -24 dB; coherence ≤ 0.15), and stable ice (VH ≥ -20 dB; coherence ≥ 0.15).

This study demonstrates that SAR imagery is highly suitable for monitoring glacial lakes during warm ice-free seasons or for lakes without significant seasonal freeze-thaw cycles. Moreover, combining SAR intensity with interferometric coherence provides effective evidence for identifying the presence of stable lake ice. The findings reveal that seasonal ice cover is the core source of SAR extraction errors in glacial lake monitoring. The proposed intensity-coherence joint threshold method offers a feasible technical approach for dynamic monitoring under seasonal freeze-thaw conditions; however, further validation across the diverse glacial lakes of the Tibetan Plateau is needed to optimize broad applicability.

Key words: glacial lake, area evolution, Synthetic Aperture Radar, backscatter intensity, polarization characteristics, interferometric coherence, stable ice detection

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. U22A20565, 42371460, 42171355, 4250060469, 42501437); National Key Research and Development Program of China (No. 2023YFB2604001)