

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2026.164>



基于风云卫星等多源数据融合的金沙江上游雪盖重建

张俊¹, 曾小玥^{2*}, 万君², 柳晶辉²

1. 中国长江电力股份有限公司, 湖北宜昌 443000

2. 湖北省气候中心, 湖北武汉 430074

摘要: 为了解决云层覆盖导致的积雪覆盖遥感监测产品数据缺失的问题, 提出了一种基于风云卫星等多源数据融合的雪盖重建方法, 通过 7 个去云步骤实现了金沙江上游高精度逐日无云雪盖监测。结果显示, 融合后的雪盖产品总体精度能达到 0.94, Kappa 系数为 0.80, 比广泛使用的美国 IMS 雪冰产品的积雪监测效果更好。然而, 融合雪盖产品的总体精度在海拔 4.3 km 和 5.6 km 左右有轻微下降, 且产品精度随坡向的变化而出现差异。此外, 融合雪盖产品在森林地区的精确率(0.18)远小于其他地区。未来在改进雪盖重建方法时, 应考虑不同坡向的积雪分布以及森林地区的积雪特征, 以提升多源融合无云雪盖产品的精度。

关键词: 风云卫星; 雪盖重建; 多源融合; 间隙填充; 金沙江上游; 遥感。

中图分类号: P237

文章编号: 1000-2383(2026)06-2418-15

收稿日期: 2025-11-10

Snow Cover Reconstruction via Multisource Data Fusion Using Fengyun Satellites in Upper Jinsha River Basin

Zhang Jun¹, Zeng Xiaoyue^{2*}, Wan Jun², Liu Jinghui²

1. China Yangtze Power Co., Ltd., Yichang, 443000, China

2. Hubei Climate Center, Wuhan 430074, China

Abstract: To address the issue of missing data in snow cover products caused by cloud contamination in remote sensing imagery, this study proposes a snow cover reconstruction method based on the fusion of multisource data, including Fengyun satellite observations. A seven-step cloud removal process was employed to achieve daily, accurate, cloud-free snow cover monitoring in the upper Jinsha River basin. The results indicate that the reconstructed snow cover product attains an overall accuracy of 0.94 and a Kappa coefficient of 0.80, outperforming the widely used IMS product from the United States. However, the overall accuracy slightly declines within snow transition zones at altitudes of approximately 4.3 km and 5.6 km, and it varies according to slope aspect. Moreover, the precision of the reconstructed product in forested areas is considerably lower (0.18) than in other land cover types. Future enhancements to the reconstruction method should incorporate slope aspect and forest-specific characteristics to improve the accuracy of multisource fused, cloud-free snow cover products.

Key words: Fengyun satellite; snow cover reconstruction; multisource fusion; gap filling; upper Jinsha River basin; remote sensing.

基金项目: 中国长江电力股份有限公司项目(No.Z242302024)。

作者简介: 张俊(1986—), 男, 高级工程师, 长期从事长江流域气象预报业务工作。ORCID: 0000-0003-3460-3208。E-mail: zhang_jun8@ctg.com.cn

*** 通讯作者:** 曾小玥, E-mail: xyzeng@whu.edu.cn

引用格式: 张俊, 曾小玥, 万君, 柳晶辉, 2026. 基于风云卫星等多源数据融合的金沙江上游雪盖重建. 地球科学, 51(6): 2418–2432.

Citation: Zhang Jun, Zeng Xiaoyue, Wan Jun, Liu Jinghui, 2026. Snow Cover Reconstruction via Multisource Data Fusion Using Fengyun Satellites in Upper Jinsha River Basin. *Earth Science*, 51(6): 2418–2432.

0 引言

积雪是冰冻圈的主要组成部分,具有高反射率和低导热率的特点,能够影响地表能量平衡、改变大气环流运动,进而调节区域气候(Warren, 2019; You *et al.*, 2020; Dong *et al.*, 2023).同时积雪消融能向全球超过1/6的人口供水,是河川径流的重要补给来源,在水资源循环中也扮演着重要角色(Musselman *et al.*, 2021; Yang *et al.*, 2022).青藏高原是中国3大主要积雪区之一,其积雪时间长、分布广、变化快,既是气候变化的敏感区,也是亚洲几大主要河流的发源地(You *et al.*, 2020; 黄晓东等, 2023).金沙江上游地处青藏高原东部,上连长江源区,下接长江干流,其河流径流易受积雪和冰川融化的影响(黄晓东等, 2023; Yi *et al.*, 2023).Han *et al.* (2019)的研究表明2003—2014年长江源区融雪对总径流量的贡献接近7%.5月金沙江上游积雪对总径流量的贡献率甚至可达65%以上(Wang *et al.*, 2022a).根据Yi *et al.* (2023)的研究,较大的雪水当量是金沙江上游春季极端洪水的前提条件,冬季积雪会随着来年春季气温升高而快速融化,进而主导或参与极端洪水的形成.在气候变暖导致积雪和冰川加速融化的背景下(Wei *et al.*, 2025),金沙江上游的融雪径流进一步增加,深刻影响着整个长江流域的水库调度、防汛减灾和生活生产供水等过程(Yao *et al.*, 2022).因此金沙江上游的积雪覆盖及其时空分布特征受到越来越广泛的关注.

可用于监测金沙江上游积雪覆盖的主要方法有地面气象站观测、被动微波遥感和光学遥感监测.其中,地面气象站分布稀疏不均、区域代表性差,被动微波遥感的空间分辨率很粗、观测不确定性较强(Che *et al.*, 2008; Liu *et al.*, 2024; Yun *et al.*, 2024).相较而言,光学遥感影像以易于获取、连续观测时间长、监测区域大、时空分辨率高等优点,成为全球积雪覆盖监测最主要和最成熟的数据源之一(Dixit *et al.*, 2019; Muhuri *et al.*, 2021).来自Terra/Aqua MODIS的光学遥感雪盖产品在监测斯洛伐克北部积雪时,总体精度能达到91.5%(Parajka *et al.*, 2012).MODIS雪盖产品和IMS雪冰产品共同开展新疆积雪覆盖监测,总体精度可达90.61%(侯小刚等, 2018).NOAA AVHRR和MODIS光学影像构建的积雪覆盖范围产品JASMES,精度在

82%以上(Hori *et al.*, 2017).来自VIIRS、Sentinel-2和Landsat-8的积雪产品也显现出良好的积雪监测效果(Liu *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2022b).

随着我国卫星遥感技术的发展,国产风云卫星在积雪覆盖监测领域取得了显著进展.研究表明, FY-3D MERSI-II传感器在冰雪参数反演方面表现优异,其冰雪表面温度的反演精度与Terra/Aqua MODIS产品相当(Zheng *et al.*, 2022).在青藏高原和北疆等中国典型积雪区域,基于FY-3D MERSI-II反演的积雪覆盖率也有较高的精度,其积雪监测效果略优于MODIS传感器(Huang *et al.*, 2025),这为国产卫星在积雪覆盖监测中的广泛应用提供了有力支持.然而,风云卫星在雪盖监测中仍存在明显不足.一方面,风云卫星雪盖产品广泛受到云层遮挡的影响,不可避免地出现大量数据缺失,特别是在高山地区的融雪季,云覆盖率常超过70%(Mao *et al.*, 2019);另一方面,不利的卫星观测几何条件、复杂地形引起的山体阴影以及探测器饱和等问题也会造成观测盲区(Zhang *et al.*, 2020, 2023),严重影响雪盖产品的准确性和时空连续性.目前,国内外关于雪盖产品去云算法的研究主要集中在Terra/Aqua MODIS数据上(Hall *et al.*, 2019),而对国产风云卫星雪盖产品的去云方法研究相对不足,这严重制约了风云卫星雪盖产品在金沙江上游等复杂地形区域的业务化应用,给高精度逐日积雪覆盖遥感监测带来挑战.

因此,为实现金沙江上游流域高精度、逐日无云的动态积雪覆盖监测,本研究采用风云卫星雪盖产品作为主要数据源,根据积雪的时空特征构建了一种风云卫星为主的多源数据融合积雪覆盖获取方法,引入了MODIS光学遥感雪盖产品、地面积雪观测、DEM高程、IMS雪冰产品等多源辅助数据来有效填补风云卫星产品中云覆盖区域,降低雪盖重建过程中的不确定性,提高风云产品雪盖重建和积雪监测的精度,最终完全去除了风云卫星雪盖产品中的云污染.以FY-3D雪盖产品为主,开展多源数据融合的无云积雪覆盖监测方法研究,将有助于建立国产积雪遥感监测体系,提升积雪遥感监测领域的自主创新能力,为金沙江乃至整个长江流域的积雪监测、径流模拟、水资源调度利用等提供科学数据参考.

1 研究区域与数据

1.1 研究区域概况

金沙江上游地处青藏高原东南部、横断山脉北部,发源于青海省唐古拉山脉,自西北向东南流经四川、西藏,最终到达云南.研究区域内地貌复杂,高山峡谷众多,整体地势表现为北高南低,海拔在 6 221~1 850 m,平均海拔 4 530 m,流域总面积约为 216 427 km²,约占长江流域面积的 12%(如图 1).由于研究区域海拔和气候条件复杂多样,流域内积雪的时空异质性较强,同时存在永久积雪和季节性积雪(Yi *et al.*, 2023).

1.2 主要数据来源

1.2.1 FY-3D 卫星雪盖产品 FY-3D 是我国于 2017 年发射的第二代中分辨率极轨气象卫星,搭载有中分辨率光谱成像仪-II 型(MERSI-II)、微波成像仪-I 型(MWRI-I)、红外高光谱大气探测器-I 型(HIRAS-I)、微波温度计-II 型(MWTS-II)等,在气象、海洋和陆表监测中发挥着重要作用(Yang *et al.*, 2024; Huang *et al.*, 2025).其中,MERSI-II 传感器提供空间分辨率 250~1 000 m 的可见光和红外影像,光谱覆盖范围为 0.412~12.000 μm ,可以用于计算归一化差分积雪指数 NDSI(normalized difference snow index),是监测积雪覆盖的主要仪器.

本研究使用的 FY-3D 积雪覆盖产品(FY3D_SNC)来自中国气象局国家卫星气象中心,其空间分辨率为 1 km,时间分辨率为 1 d,时间范围从 2019 年 5 月 1 日到 2023 年 12 月 31 日.FY3D_SNC 产品共有 11 种原始地物类别,为了便于后续处理对产品像元进行重分类.其中无雪地表(25)、湖泊(37)、海

洋(39)、云(50)、海/湖冰(100)、积雪(200)保持不变;缺失数据(0)、不确定值(1)、夜间(11)、探测器饱和(254)和填充值(255)缺少监测信息,因此将这 5 种类别均重分类为云(50).本研究以 FY3D_SNC 产品作为主要数据源开展金沙江上游的积雪覆盖重建,在无云观测区域优先保留风云卫星产品的原始观测值;当风云数据存在云层遮挡时,则利用 MODIS 产品等其他多源数据或时空滤波等方法进行填补.

1.2.2 Terra/Aqua MODIS 雪盖产品 Terra/Aqua MODIS 传感器的雪盖产品 MOD10A1、MYD10A1 用于去除 FY3D_SNC 产品中部分云污染.MOD10A1/MYD10A1 的空间分辨率为 500 m,时间分辨率为 1 d,时间范围从 2019 年 1 月 1 日到 2023 年 12 月 31 日.以 FY3D_SNC 产品为参考影像,将 MOD10A1/MYD10A1 产品重采样到空间分辨率 1 km,使之与 FY3D_SNC 保持一致(表 1).MOD10A1/MYD10A1 产品的像元类别包括归一化积雪指数 NDSI(范围为 0~100)、缺失数据(200)、未决定(201)、夜间(211)、内陆水(237)、海洋(239)、云(250)、探测器饱和(254)等.为和 FY3D_SNC 产品保持一致,将 MODIS NDSI 值小于 10 的像元判识为无雪地表(25),大于等于 10 的像元判识为积雪(50)(Zhang *et al.*, 2019),内陆水和海洋分别重分类到湖泊(37)、海洋(39),其余类别重分类为云(50).

1.2.3 IMS 雪冰数据 IMS 雪冰数据(interactive multisensor snow and ice mapping system)是美国 NOAA 通过 NSIDC 网站提供的多源数据雪冰产品,其空间分辨率有 24 km、4 km 和 1 km,时间分辨率为 1 d.作为当前广泛使用的雪冰数据集之一,IMS 雪冰数据范围广、时间长、产品无云,但其积雪判识的精度较低(Sönmez *et al.*, 2014; 除多等, 2021).本研究将 IMS 雪冰数据作为风云卫星雪盖产品的补充数据,用以完全去除云污染.

1.2.4 站点观测与地理数据 气象站观测数据来自气象大数据云平台“天擎”,共筛选了 2019 年 1 月 1 日到 2023 年 12 月 31 日金沙江上游流域内 11 个站点的逐日积雪观测(图 1).剔除了站点缺测数据(999999)的干扰,重分类为无雪(25)和有积雪(200).此外,航天飞机雷达地形测绘任务(SRTM)获得了全球高程数据(DEM),将其重采样到 1 km 空间分辨率,使之与 FY3D_SNC 产品保持一致

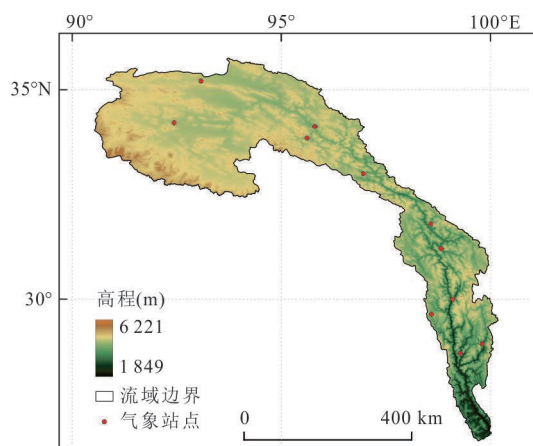


图 1 研究区高程

Fig.1 Elevation of the study area

表 1 主要数据源特性					
Table 1 Characteristics of the main data sources					
数据源	时间 分辨率	空间 分辨率	重采样方法	重采样后的分辨率	重分类后的像元
FY-3D	1 d	1 km	—		
Terra/Aqua MODIS	1 d	500 m	众数重采样		无雪地表(25)、湖泊(37)、海洋(39)、云(50)、 海/湖冰(100)、积雪(200)
IMS	1 d	1 km	最邻近重采样	除站点观测外,其他数据的空间分辨 率均与 FY-3D 保持一致,为 1 km	
站点观测	1 d	—	—		无雪地表(25)、积雪(200)
Landsat-8	16 d	30 m	双三次插值		
DEM	—	30 m	双线性插值		—

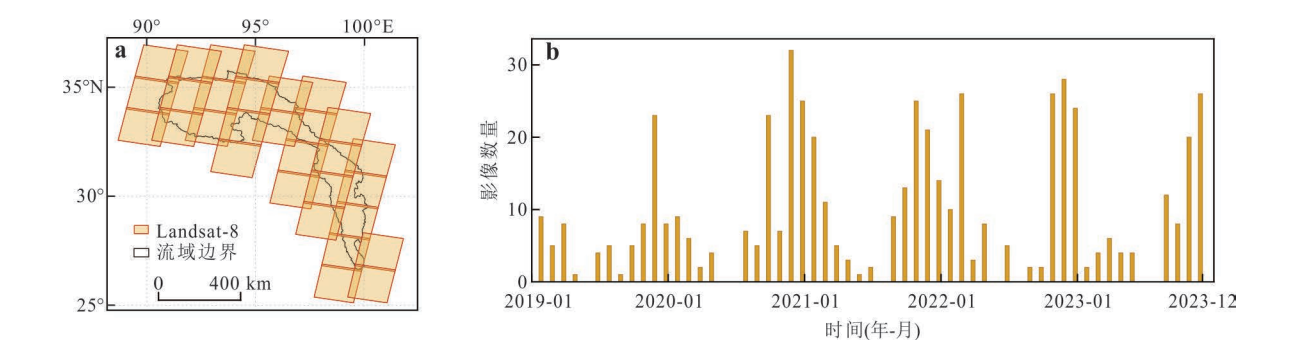


图 2 用于精度检验的 Landsat-8 影像的时空分布

Fig.2 Spatiotemporal distribution of Landsat-8 images used for accuracy assessment

a. Landsat-8 WRS-2 分幅条带矢量图;b. 所使用的 Landsat-8 影像逐月数量分布

(表 1),并计算坡度和坡向等地理辅助信息.

1.2.5 Landsat-8 OLI精度检验数据 Landsat-8 是 2013 年美国发射的陆地资源卫星系列第 8 颗卫星. 利用 Google Earth Engine(GEE)遥感大数据云平台选取 2019—2023 年云量小于 5% 的 Landsat-8 影像, 计算 NDSI 归一化积雪指数并下载. 共获取 563 景和研究区域有重叠的 Landsat-8 NDSI 产品,空间分辨率为 30 m,用于多源融合产品的精度评价与检验. 所选取的 Landsat-8 影像产品的时空分布如图 2 所示. 将 Landsat-8 产品重采样到空间分辨率 1 km, 使之与 FY3D_SNC 保持一致(表 1),并且提取所有落在研究区域内的有效像元作为检验样本.

2 研究方法

2.1 基于风云卫星等多源数据融合的积雪覆盖重建方法

以风云卫星积雪覆盖产品为参考数据,结合 Terra/Aqua MODIS、气象站观测、IMS 雪冰数据集开展多源数据融合的积雪覆盖重建,生成 2019—2023 年金沙江上游流域逐日无云的积雪覆盖数据

集,具体技术路线如图 3 所示.

为了实现积雪覆盖重建,首先考虑积雪的时间连续性,假设在短时间内地表积雪相对稳定,而云层发生快速移动,则可以利用风云卫星与 Terra、Aqua 卫星的过境时间差,去除风云产品中的部分云污染. 基于这一原理,首先采用上下午星合成法(Step 1)对 MODIS 积雪覆盖产品 MYD10A1 和 MOD10A1 进行处理(Gafurov and Bárdossy, 2009; Gao *et al.*, 2010). 上下午星合成规则为:若 MYD10A1 和 MOD10A1 中任一影像的某一像元存在积雪,则将该像元判识为积雪;若某一像元在一幅影像中为云,在另一影像中非雪像元,则将该像元判识为非雪像元. 最终生成 S_{MODIS} 产品. 然后以风云卫星数据积雪覆盖判识产品 S_{FY} 为参考数据,分析区域积雪环境特征,按照多源卫星合成规则(Step 2)融合 S_{MODIS} 产品,去除 S_{FY} 中的云像元,生成初步融合产品 S_i . 在多源数据融合过程中遵循两个优先原则:风云产品优先和积雪像元优先. 优先保留风云卫星产品的像元,当风云数据存在云层遮挡时才利用 MODIS 数据进行去云填补(式 1);其次为降低积雪漏判率,提高山区积雪监测的完整性,当

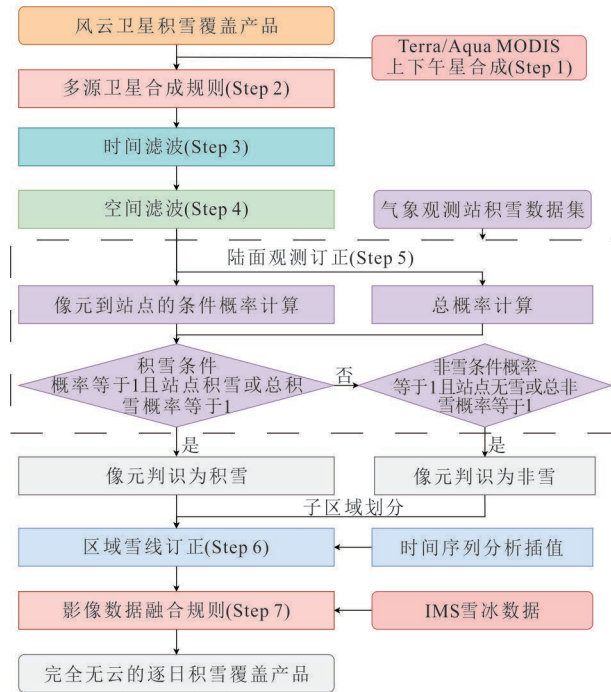


图 3 技术路线

Fig.3 The technical workflow

任一数据源存在积雪时,将像元判识为积雪(式 2)。

多源卫星合成规则如下:

$$S_{(x,y,t)} = i, \text{ if } S_{FY} = i \text{ or } (S_{MODIS} = i \text{ and } S_{FY} = \text{cloud}), \quad (1)$$

$S_{(x,y,t)} = \text{snow}, \text{ if } S_{FY} = \text{snow} \text{ or } S_{MODIS} = \text{snow},$ (2)
式(1~2)中, $S_{(x,y,t)}$ 是时间 t 日、位置 (x, y) 处的像元; snow 是积雪像元; i 是非雪像元值(包括无雪地表、湖泊、海洋、海/湖冰)或积雪像元值; cloud 是云像元。由于 2019 年 1~5 月缺少风云卫星产品,为保证数据集的连续性,因此该时段内直接使用 $S_{MODIS} = S_1$ 开展后续算法步骤。

基于积雪的时间连续性,进一步采用时间滤波法(Step 3)去除云层,根据雪盖产品前后几天的影像来判识当天的地表积雪情况。通常时间越长云污染越少、总体精度越低(Gafurov and Bárdossy, 2009; Gao *et al.*, 2010)。因此选取合适的时间窗口 $\Delta t = 3 \text{ d}$, 对初步融合产品 S_1 进行时间滤波生成 S_2 (式 3)。

$$S_{(x,y,t)} = i \text{ if } S_{(x,y,t)} = \text{cloud} \text{ and } S_{t-\Delta t_1} = S_{t+\Delta t_2} = i, \Delta t_1 + \Delta t_2 \leq \Delta t, \quad (3)$$

式(3)中, $S_{(x,y,t-\Delta t_1)}$ 、 $S_{(x,y,t+\Delta t_2)}$ 分别是位置 (x, y) 处, 时间 $t-\Delta t_1$ 日、 $t+\Delta t_2$ 日的像元。

考虑积雪的空间连续性以及积雪、温度与海拔的关系,海拔越高则温度越低,积雪越容易累积

(Grünwald *et al.*, 2014; Li *et al.*, 2019)。因此可以比较云像元与其周围像元的像元类别和海拔高度(式 4~5),通过空间滤波(Step 4)判识 S_2 产品中云像元是否被积雪覆盖,生成 S_3 。

$$S_{(x,y,t)} = i, \text{ if } \sum (S_{(x',y',t)} = i) > \Delta s_{1/2}, (x',y') \in \Delta s_1, \quad (4)$$

$$S_{(x,y,t)} = \text{snow}, \text{ if } \exists (x',y') \in \Delta s_2, S_{(x',y',t)} = \text{snow} \text{ and } \text{DEM}_{(x',y')} < \text{DEM}_{(x,y)}, \quad (5)$$

式(4~5)中, $\text{DEM}_{(x,y)}$ 、 $\text{DEM}_{(x',y')}$ 为位置 (x, y) 、 (x', y') 处的海拔高程, Δs_1 是以云像元为中心的四邻域, Δs_2 是以云像元为中心八邻域。

地面气象站能为雪盖重建提供连续可靠的实测数据,但是其空间分布有限,难以全面反映大范围的积雪分布特征,在雪盖重建过程中必须充分考虑气象站观测结果和积雪空间分布模式的相关性(Dong and Menzel, 2016; Gafurov *et al.*, 2016)。为此,首先考虑地形地貌和流域水文等因素对积雪分布的影响,根据金沙江上游的小流域提取结果,将研究区域进一步分为上段、中上段、中下段、下段这 4 个子区域(如图 4)。

然后利用 S_3 雪盖产品和气象站积雪观测分别在研究区域的每个子区域(图 4)内估算了像元有无积雪的条件概率,通过陆面观测订正(Step 5)实现积雪重建,获得 S_4 雪盖产品。每个月计算像元的条件概率和总概率如下:

$$P^i(S_{x,y}|S_n) = \frac{\sum (S_{(x,y,t \in \Delta tm)} = S_{(n,t \in \Delta tm)})}{N_{(x,y,\Delta tm)}} \forall S_{(n,t \in \Delta tm)} = i, \quad (6)$$

$$MP^i_{(x,y,\Delta tm)} = \frac{\sum (S_{(x,y,t \in \Delta tm)} = i)}{N_{(x,y,\Delta tm)}}, \quad (7)$$

式(6~7)中, $S_{(x,y,t \in \Delta tm)}$ 是时间 t 、位置 (x, y) 处的像元; Δtm 是时间范围; $S_{(n,t \in \Delta tm)}$ 是第 n 个气象站在时间 t 处的观测值; $N_{(x,y,\Delta tm)}$ 是指在 Δtm 的时间范围内、位置 (x, y) 处有效的像元总数; $P^i(S_{x,y}|S_n)$ 是像元和站点间的条件概率; $MP^i_{(x,y,\Delta tm)}$ 是像元的总概率。根据云像元处的条件概率和总概率判识像元为积雪或非雪,其规则如下:

$$S_{(x,y,t)} = i \text{ if } (P^i(S_{x,y}|S_n) = 1 \text{ and } S_{(n,t)} = i) \text{ or } MP^i_{(x,y,\Delta tm)} = 1. \quad (8)$$

根据积雪在海拔上的分布特征,可以采用区域雪线法(Step 6)估算雪线和陆线,对 S_4 雪盖产品中的云像元进行分类。将所有积雪像元的平均高程

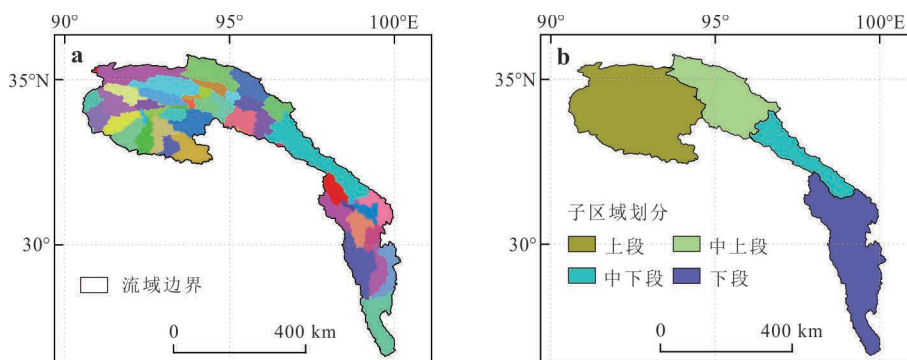


图 4 金沙江上游子区域

Fig.4 Subregions in the upper Jinsha River basin

a. 小流域划分结果; b. 4 个子区域范围

DEMS作为雪线、所有陆地像元的平均高程DEML作为陆线,则海拔大于雪线且坡度小于 60° 的地区积雪容易累积,可以将云像元重分类为有积雪;海拔小于陆线的地区不易有积雪,可以将云像元重分类为无雪地表。逐日计算研究区每个子区域内的雪线和陆线,若子区域内云量大于70%或积雪小于5%,则不保留DEMS和DEML;否则,保留DEMS和DEML。假设短时间内雪线和陆线不会发生剧烈变化,分别统计每年内各子区域保留的DEMS和DEML,对其进行时间序列插值,获取逐日DEMS和DEML。按照区域雪线合成规则生成积雪覆盖区域雪线订正产品 S_5 ,其公式如下,其中 $slope$ 代表云像元处的坡度, $land$ 代表无雪地表。

$$S_{(x,y,t)} = snow \text{ if } DEM_{(x,y)} > DEMS \text{ and } slope < 60^\circ, \quad (9)$$

$$S_{(x,y,t)} = land \text{ if } DEM_{(x,y)} < DEML. \quad (10)$$

最后,利用IMS数据去除 S_5 产品中剩余的所有云像元(Step 7)。对IMS产品(S_{IMS})进行重采样,使之与 S_5 产品的分辨率保持一致,若在 S_5 的云像元处,IMS影像存在积雪,则将该云像元判识为积雪,否则判识为非雪像元,最终生成无云产品 S_6 。

$$S_{(x,y,t)} = i \text{ if } S_5 = cloud \text{ and } S_{IMS} = i. \quad (11)$$

2.2 精度检验与评价

利用重采样后的Landsat-8 NDSI产品对多源融合雪盖产品开展检验与评价。在全球尺度上通常假设Landsat-8 NDSI的阈值为0.4,即NDSI大于0.4时地面有积雪(Dietz *et al.*, 2012)。但由于海拔、季节、土地覆盖和积雪深度等条件的差异,0.4的阈值会低估局地的积雪范围,有研究表明青藏高原地区的NDSI阈值在0.2~0.4更为合理(Zhang *et al.*, 2019; Bousbaa *et al.*, 2024)。

表 2 误差矩阵

Table 2 The error matrix

		Landsat-8	
		有积雪	无积雪
多源融合雪盖	有积雪	TP	FP
	无积雪	FN	TN

因此,本研究结合目视判识和经验结论选择NDSI阈值为0.3,以将Landsat-8 NDSI转换为二值化雪盖产品用于精度检验,构建误差矩阵如表2。精度评价指标包括:精确率(式12),表示多源融合雪盖产品中正确识别的积雪像元占所有积雪像元的比例,即产品的积雪分类精度;召回率(式13),在实际上被积雪覆盖的像元中有多少被多源融合雪盖产品正确识别出来;总体精度(式14),产品正确识别的所有像元占总像元数量的比例;Kappa系数(式15),用于一致性检验的综合指标,一般在0~1之间,Kappa系数越大则一致性越强,大于0.8时可认为融合产品与Landsat-8的结果几乎完全一致(Motiee *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2024);F1分数(公式16),同时兼顾精确率和召回率的综合指标,越大代表融合产品的精确度越好(Hand *et al.*, 2021)。

$$\text{精确率: Precision} = \frac{TP}{TP + FP}, \quad (12)$$

$$\text{召回率: Recall} = \frac{TP}{TP + FN}, \quad (13)$$

$$\text{总体精度: Accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}, \quad (14)$$

$$\text{Kappa系数: Kappa} = \frac{p_0 - p_e}{1 - p_e}, p_0 =$$

Accuracy and $p_e =$

$$\frac{(TP + FN)(TP + FP) + (FP + TN)(FN + TN)}{(TP + FP + TN + FN)^2}, \tag{15}$$

F1 分数: $F1 - Score = 2 \times \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall}.$

$$\tag{16}$$

3 结果与分析

3.1 多源融合方法的去云效率及其重建结果

基于风云卫星等多源数据融合的积雪覆盖重建方法通过 7 个去云步骤(Step 1~7)获取最终的雪盖重建结果,每个步骤的去云效率如表 3 所示.风云卫星积雪覆盖产品(FY3D_SNC)在金沙江上游的年平均云覆盖率在 50%~60%,相比于 Terra/Aqua MODIS 合成产品高出 10%~20% (Step 1).FY3D_SNC 和 MODIS 的融合(Step 2)能去除 FY3D_SNC 雪盖产品中 15%~25% 的云覆盖,体现出多源遥感数据的协同融合是改善数据缺失问题最有效的手段.在 Step 3~7 中,去云率最多的是 Step 3,平均去云量在 15%,表明金沙江上游流域云层的快速移动有利于雪盖产品的重建.针对金沙江上游改进的区域雪线法(Step 6)也去除了约 9% 的云,显示出强大的去云能力.基于气象站积雪监测数据对雪盖产品进行订正(Step 5)仅能去除产品中约 2% 的云量,因为满足订正条件的有效像元很少.利用 IMS 雪冰产品(Step 7)去除 3%~5% 的云层,对融合雪盖产品的总体影响并不明显.通常,ERA5、Merra-2 等再分析产品或者 SSM/I 等被动微波雪深产品也可以代替 IMS 雪冰产品,用于填补融合雪盖产品中残留的云层覆盖.

图 5 展示了基于融合雪盖重建结果(Step 7)计算的积雪覆盖频率(SCF)(秦艳等, 2018).融合雪盖产品在冬季(SCF=0.28)和春季(SCF=0.26)的积雪持续时间最长,秋季次之(SCF=0.21),夏季最

短(SCF=0.12).和广泛使用的 IMS 雪冰产品相比,融合雪盖产品的积雪持续时间在冬季明显偏低,春季、秋季接近,夏季偏高.从空间上看,平均积雪持续时间最长的区域一般出现在金沙江上游流域的中上段和中下段.图 6 展现了像元 SCF 出现频率的分布情况,可以看到融合雪盖产品的 SCF 最常出现在 0.02~0.14 之间;而 IMS 雪冰产品中通常 SCF 为 0~0.02 的像元最多.在冬季,融合雪盖产品 SCF 在 0.02~0.20 之间的像元远多于 IMS 产品,其他情况下的像元则少于 IMS 产品.这些结果表明两种产品的积雪持续情况及其空间分布存在差异,尤其是在冬季积雪较多的时期.

3.2 融合雪盖产品精度总体评价

利用 Landsat-8 雪盖产品对融合雪盖产品开展系统性的精度验证与评价,并与 IMS 雪冰数据进行对比分析.结果表明,相比于 IMS 产品,2019—2023 年融合雪盖产品在多个指标上均有提升.其中融合产品五年内的平均精确率显著提升了 0.18,总体精度提高了约 0.06, F1 分数提高了 0.12,而 Kappa 系数则提高了 0.16(表 4).逐年对比分析显示,融合雪盖产品每年的精确率(0.73~0.84)、总体精度(0.91~0.97)、Kappa 系数(0.75~0.85)和 F1 分数(0.78~0.88)都比 IMS 雪盖产品更高(图 7).这说明融合雪盖产品的总体性能普遍比 IMS 雪冰产品更加优异,和高分辨率的 Landsat-8 雪盖产品具有更好的一致性.

值得一提的是,2019—2023 年融合雪盖产品和 IMS 产品的总体召回率差异并不明显(图 7),但 IMS 雪冰产品可能会存在大量误判(图 8).2019 年 1 月 11 日金沙江上游流域的局部积雪分布图显示(图 8),IMS 雪冰产品的积雪范围相比于 Landsat-8 产品严重偏大(除多等, 2021).而融合雪盖产品和 Landsat-8 雪盖产品的积雪分布区域基本一致,只是融合产品的空间分辨率比 Landsat-8 产品略低,在积雪监测的精细程度上不如 Landsat-8 雪盖产品.这表

表 3 多源融合雪盖重建算法每一步骤的云覆盖百分比

Table 3 Cloud coverage percentages at each step of the snow cover reconstruction algorithm

	FY3D_SNC	Step 1	Step 2	Step 3	Step 4	Step 5	Step 6	Step 7
2019 年	53.02%	43.23%	38.25%	21.66%	18.55%	16.12%	5.07%	0
2020 年	52.87%	39.65%	32.35%	16.65%	13.96%	12.23%	4.25%	0
2021 年	52.72%	36.52%	30.34%	15.75%	13.64%	11.77%	3.37%	0
2022 年	55.07%	39.20%	31.77%	16.91%	14.20%	12.41%	3.79%	0
2023 年	58.24%	38.92%	32.82%	18.39%	15.95%	13.78%	4.69%	0

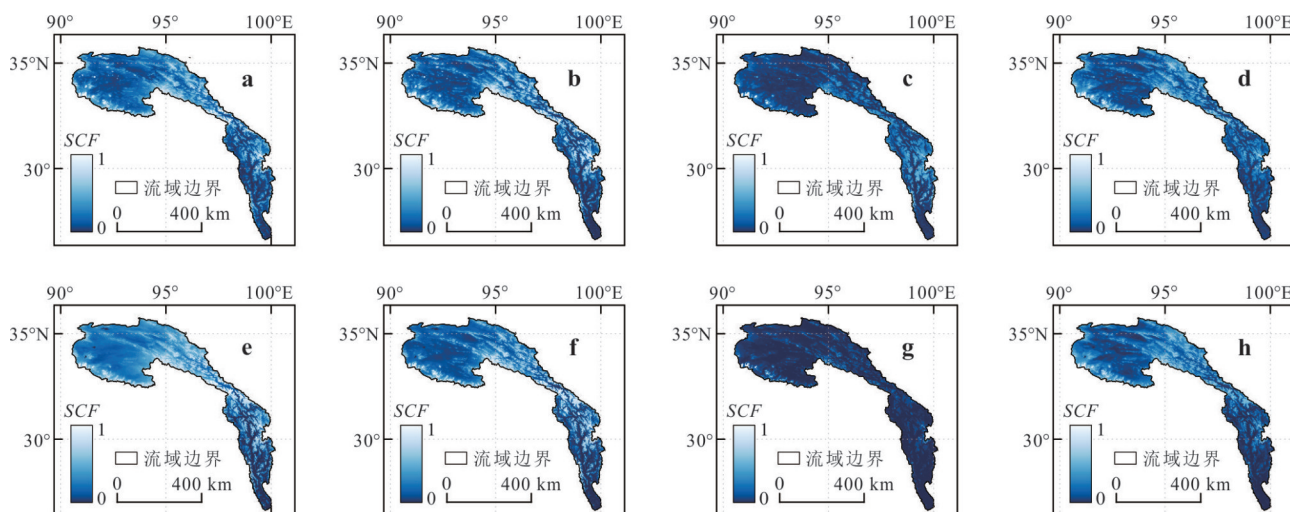


图 5 融合雪盖产品分别在(a)冬季、(b)春季、(c)夏季和(d)秋季的 SCF,以及 IMS 雪冰产品分别在(e)冬季、(f)春季、(g)夏季和(h)秋季的 SCF

Fig.5 Snow cover frequency (SCF) of the reconstructed snow cover products in winter (a), spring (b), summer (c), and autumn (d), and SCF of the IMS products in winter (e), spring (f), summer (g), and autumn (h)

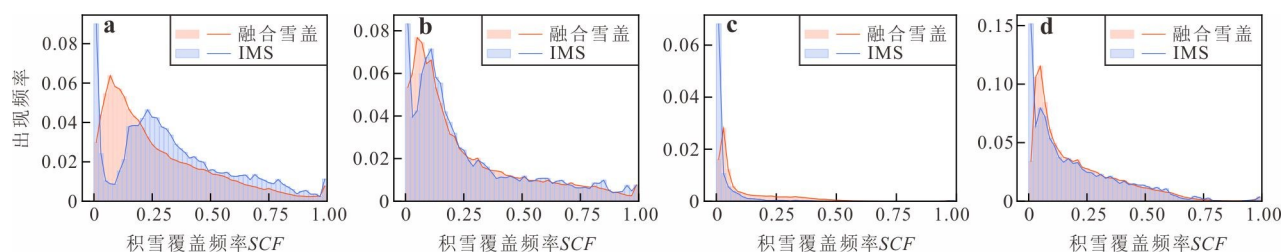


图 6 融合雪盖产品和 IMS 产品分别在冬季(a)、春季(b)、夏季(c)和秋季(d)的像元 SCF 出现频率分布

Fig.6 Frequency distribution of SCF for the reconstructed snow cover products and IMS products in winter (a), spring (b), summer (c), and autumn (d)

表 4 融合雪盖产品和 IMS 总体精度表

Table 4 The accuracy of the reconstructed snow cover products and IMS products

	Precision	Recall	Accuracy	Kappa	F1-score
融合雪盖产品	0.78	0.89	0.94	0.80	0.83
IMS	0.60	0.87	0.88	0.64	0.71

明 IMS 雪冰产品会倾向于采取宽松的积雪判识策略,尽可能多地提取积雪像元,使得产品的召回率能够保持稳定.但 IMS 产品因此将许多非雪像元误判为了积雪像元,降低了积雪判识的准确率.相比之下,融合雪盖产品具有更好的积雪监测效果,能保持召回率大于 0.8 的同时提高精确率,在积雪识别及积雪面积估算上更有优势.

3.3 海拔和坡向对融合精度的影响

进一步分析融合雪盖产品和 IMS 雪冰产品的

精度随海拔变化的分布情况(图 9).融合雪盖产品和 IMS 产品在 4.5~5.0 km 正确判识的积雪像元 (TP) 最多,但是融合雪盖错判的像元 (FP) 远少于 IMS 产品.在 5.5 km 以下,融合产品的精确率普遍较 IMS 产品更高.其中,在海拔 3.8~5.3 km 的地区,融合产品的精确率普遍提高了 0.13~0.25,这一区域约占流域总面积的 88.6%,表明在金沙江上游的主要范围内融合产品的精确率更好.而在 5.8 km 以上的山区,融合产品和 IMS 产品的精确率基本一致且都接近于 1,因为这一范围的积雪更加稳定,易于提取.从召回率来看,3.0~4.5 km 以内 IMS 产品的召回率很低,主要在 0.5~0.8 之间,中位数为 0.63,而融合产品基本稳定在 0.7~0.9,中位数为 0.82.在海拔 4.5~5.3 km 的地区,融合产品与 IMS 产品的召回率非常接近,并且随海拔增加而稳定上升;海拔 6.0 km 以上,两产品的召回率都接近于 1.而在 5.3~6.0 km 之间,融合雪盖产品和 IMS 产品的召回率都

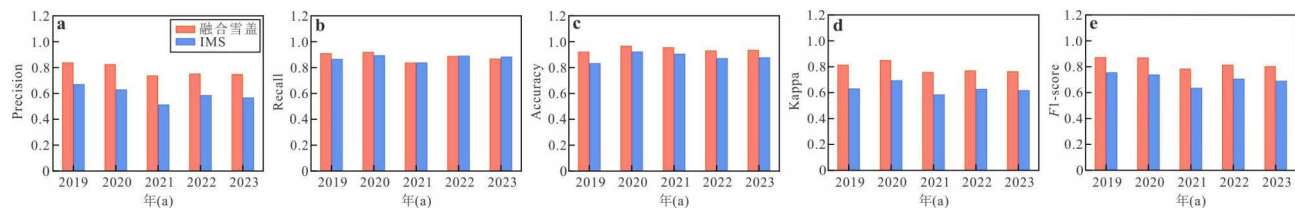


图 7 2019—2023 年融合雪盖产品和 IMS 的精确率(a)、召回率(b)、总体精度(c)、Kappa 系数(d)和 F1 分数(e)

Fig.7 Precision (a), recall (b), overall accuracy (c), Kappa coefficient (d), and F1-score (e) of the reconstructed snow cover products and IMS products from 2019 to 2023

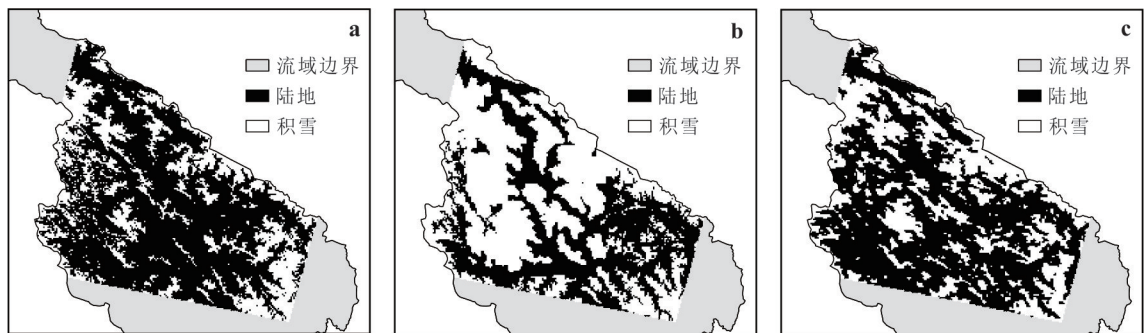


图 8 2019 年 1 月 11 日金沙江上游局部积雪分布

Fig.8 Local snow distribution in the upper Jinsha River on January 11, 2019

a. Landsat-8 影像; b. IMS 产品; c. 融合产品

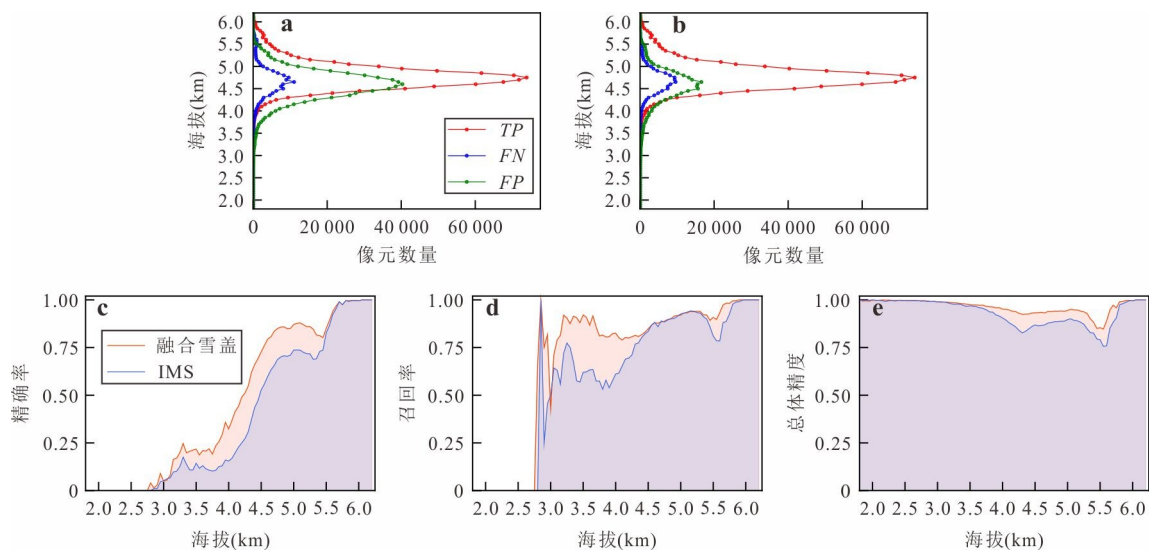


图 9 2019—2023 年融合雪盖和 IMS 产品精度随海拔高程的变化

Fig.9 Variation in the accuracy of reconstructed snow cover and IMS products with altitude from 2019 to 2023

a. IMS 产品的像元数量随高程的变化; b. 融合雪盖产品的像元数量随高程的变化; c. 产品精确率随高程的变化; d. 召回率随高程的变化; e. 总体精度随高程的变化

出现了明显的下降,这一部分主要集中在研究区域上段的高山区.

从总体精度来看,金沙江上游出现了两个谷值.其中一个在海拔 4.3 km 左右,主要集中在沿河两岸的河谷山区边缘,处于不稳定的积雪覆盖区,积雪变化快.这一区域内 IMS 产品的总体精度仅有

0.83,而融合产品的总体精度提高至 0.92,表明融合雪盖产品在流域中上部、中下部和下部的不稳定积雪区具有良好的表现,能更好地提取积雪覆盖.第二个谷值出现在海拔 5.6 km 左右,此时 IMS 产品总体精度为 0.76,融合雪盖产品总体精度大于 0.85.海拔 5.3~5.6 km 之间的积雪主要集中在流域上段高

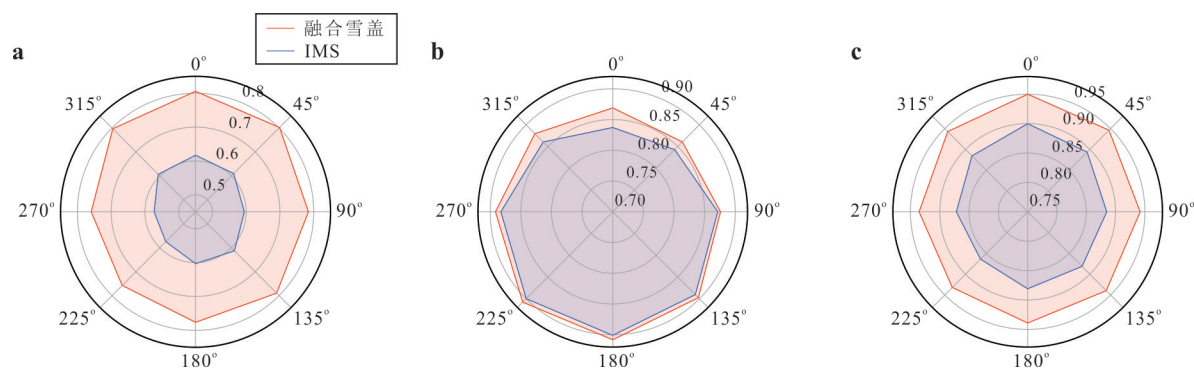


图 10 2019—2023年融合雪盖和IMS产品精度随坡向的变化

Fig.10 Variation in the accuracy of reconstructed snow cover and IMS products with slope aspect from 2019 to 2023

a. 精确率; b. 召回率; c. 总体精度

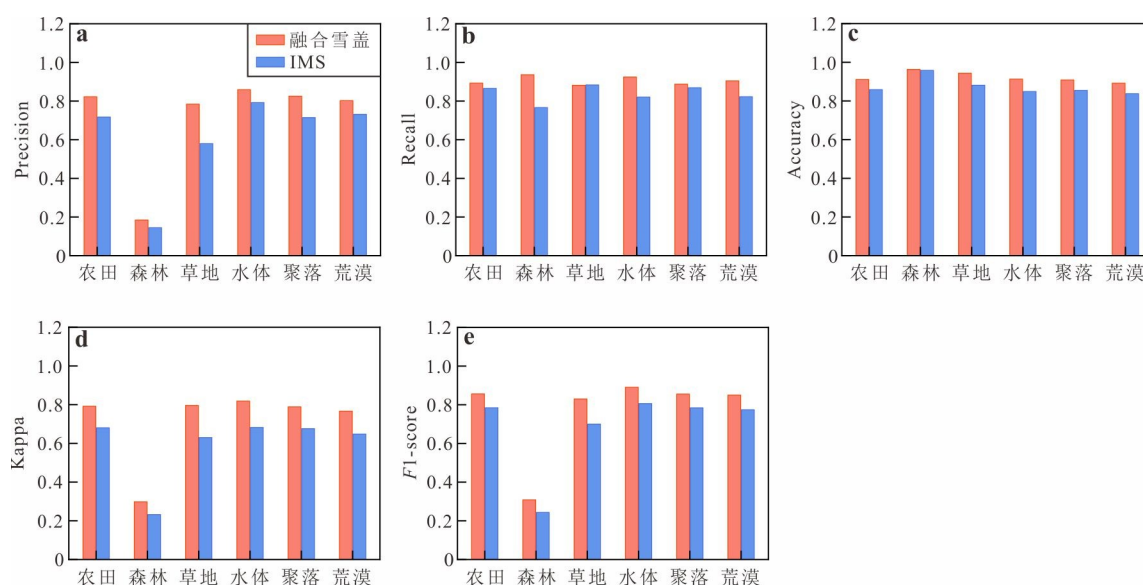


图 11 2019—2023年融合雪盖和IMS产品精度随土地覆盖类型的变化

Fig.11 Variation in the accuracy of reconstructed snow cover and IMS products with land cover types from 2019 to 2023

a. 精确率; b. 召回率; c. 总体精度; d. Kappa系数; e. F1分数

山区的边缘,此时融合雪盖产品的总体精度随海拔的升高而下降.这些结果表明,尽管理论上高海拔地区积雪应更稳定,但实际监测中受复杂地形影响,各子区域的不稳定积雪区会导致融合雪盖产品和IMS产品的监测精度下降.基于风云卫星的多源融合雪盖重建方法在流域内划分了不同子区域,可以一定程度上改善雪盖产品的精度.

此外,坡向也是影响融合雪盖产品精度的因素之一(图 10).在研究区域的南坡($180^{\circ} \pm 22.5^{\circ}$)、西南坡(阳坡, $225^{\circ} \pm 22.5^{\circ}$)和西坡($270^{\circ} \pm 22.5^{\circ}$),融合雪盖产品具有最低的精确率和最高的召回率,分别在0.75~0.78和0.89~0.91.与之相反的是北坡(阴坡, $0^{\circ} \pm 22.5^{\circ}$)和东北坡(半阴坡, $45^{\circ} \pm 22.5^{\circ}$),融合雪盖产品的精确度最高而召回率最低,分别在

0.80~0.81和0.86~0.87,且总体精度最高,为0.95左右.尽管IMS雪冰产品的精度比融合雪盖产品明显偏低,但也呈现出类似的变化情况.这可能有多方面的影响.一方面,阳坡和阴坡接收的太阳辐射不同,存在温度差异,由此改变了积雪的形成和累积过程;另一方面,迎风坡和背风坡的降水和云量不同,通常导致各个坡向上的雪线分布存在差异.这些都会影响融合雪盖产品的精度,使得召回率和精确率难以两全.未来在雪盖重建方法中考虑不同坡向上的积雪分布特征,或许能更进一步提高积雪覆盖重建的准确性.

3.4 土地覆盖类型对融合精度的影响

利用2019—2023年逐年MODIS土地覆盖类型数据(MCD12Q1),参考基于知识规则的土地覆盖

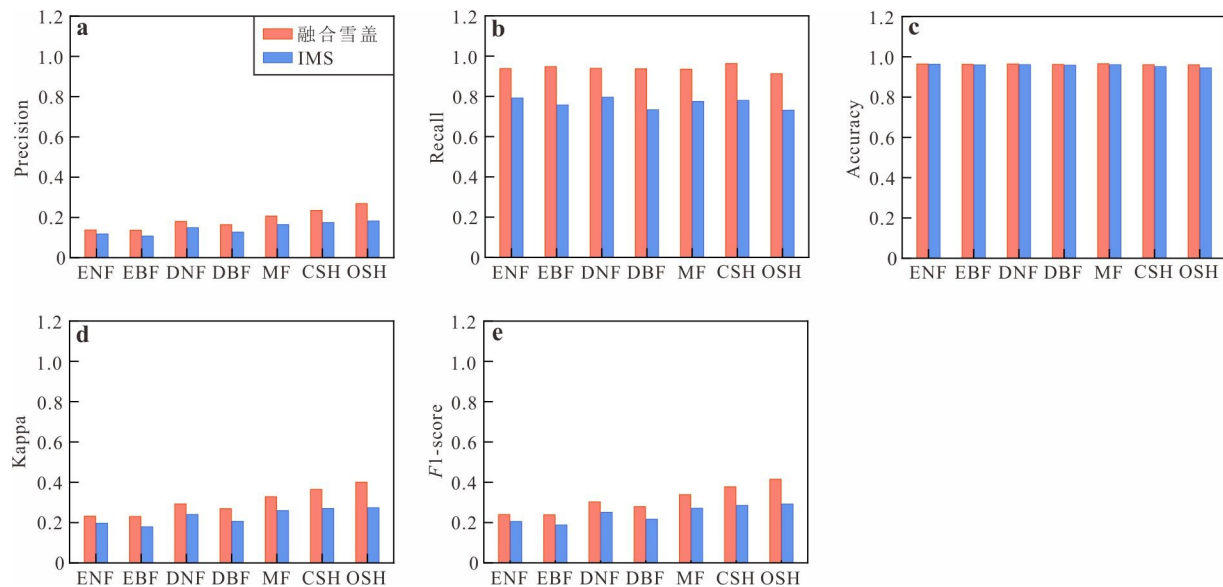


图 12 2019—2023 年融合雪盖和 IMS 产品在不同森林类型下的精度变化

Fig.12 Variation in the accuracy of reconstructed snow cover and IMS products across different forest types from 2019 to 2023
常绿针叶林:ENF,常绿阔叶林:EBF,落叶针叶林:DNF,落叶阔叶林:DBF,混生林MF,郁闭灌丛CSH,稀疏灌丛OSH;a. 精确率; b. 召回率; c. 总体精度; d. Kappa 系数; e. F1 分数图

分类体系将其重分类到 6 类土地覆盖类型(任正超等, 2012),分析融合雪盖产品精度随土地覆盖类型的变化情况(图 11).在农田、草地、水体、聚落和荒漠地区,融合雪盖产品的各个精度指标相对较好,精确率为 0.78~0.86,召回率为 0.88~0.94,总体精度基本保持在 0.89~0.94,Kappa 系数在 0.76 以上,F1 分数在 0.82 以上.这表明融合雪盖产品在这些地区漏判、误判积雪的情况较少,具有良好的精度判识结果.然而在森林地区,融合雪盖产品具有最高的召回率(0.94)和总体精度(0.96),以及最低的精确率(0.18)、Kappa 系数(0.30)和 F1 分数(0.31).进一步分析发现,森林地区实际上的积雪像元很少,仅为样本总像元的 0.9%,但融合产品判识为积雪的像元占样本总像元的 4.5%,积雪漏判很少但误判很多,远远高估了积雪覆盖.对森林区域积雪范围的高估同样也出现在 IMS 产品当中.进一步分析不同森林类型下融合雪盖的判识情况(图 12),稀疏灌丛区域的精确率最高,约为 0.27;其次是郁闭灌丛与混生林,精确率在 0.20~0.23.常绿针叶林和常绿阔叶林的精确率仅有 0.14.尽管融合雪盖产品和 IMS 雪冰数据在各个森林类型下的总体精度相差无几,但融合雪盖产品的召回率、Kappa 系数和 F1 分数均有明显提高.

由于金沙江上游流域的森林积雪很少,当前的雪盖重建方法在整个流域的总体精度仍然较好,但

是该方法明显不适用于森林覆盖率更高的积雪区,需要针对森林积雪特征继续改进.

4 总结与讨论

本文提出了一种以风云卫星为主的多源数据融合雪盖重建方法,通过 7 个步骤完全去除了风云卫星积雪产品中云覆盖等因素导致的数据缺失问题,生成融合雪盖产品并在金沙江上游流域开展了精度检验与评价.检验结果表明,融合雪盖产品在金沙江上游流域表现出良好的监测效果,总体精度达到 0.94,精确率为 0.78,较广泛使用的美国 IMS 雪冰产品有明显提升.

融合雪盖重建方法的主要优势体现在两个方面.首先,该方法通过结合 MODIS 雪盖产品、地面气象站积雪观测等多源数据,有效弥补了单一风云卫星雪盖产品的数据缺失.这种多源数据融合策略有利于降低时间滤波、空间滤波和区域雪线法等处理步骤的误差(Li *et al.*, 2019),从而实现更好的去云效果和更高精度的雪盖重建.验证结果表明,该方法生成的融合雪盖产品在精确率上较 IMS 雪冰产品提升了 0.18,在降低积雪误判方面展现出显著优势.其次,融合雪盖产品在各个土地覆盖类型中均保持了较高的总体精度(0.89~0.96),特别是在农田、草地等非森林区域的积雪监测效果普遍较

好,精确率达到了0.78~0.86,能够准确地反映金沙江上游的积雪时空变化特征。

然而本研究方法仍存在一些局限性。首先,受限于对积雪时空连续性做出的假设,融合雪盖重建方法对快速变化的积雪和短时降雪过程的监测能力较弱(Gafurov and Bárdossy, 2009; Paudel and Andersen, 2011; 侯小刚等, 2018),并且在积雪破碎区域的监测精度有所降低(López-Burgos *et al.*, 2013)。具体而言,融合雪盖产品的总体精度在金沙江上游海拔4.3 km(精度为0.92)和5.6 km(精度为0.85)左右出现了两个谷值,主要分布在河谷和高山边缘的不稳定积雪区,且不同坡向上的监测精度存在一定差异。其次,融合雪盖产品在森林地区的精确率仅有0.18,存在严重的积雪误判现象。这和以往的研究结论一致。森林通常是光学遥感监测积雪覆盖最困难的地区之一(Hall and Riggs, 2007; Luo *et al.*, 2022),森林冠层对降雪的截留过程会影响森林内的积雪分布,林下及冠层边缘的积雪也呈现出更强的空间异质性(Sun *et al.*, 2018)。此外,原始雪盖产品的精度也会影响最终的重建结果。未来的研究可以结合不同坡向以及森林地区的积雪分布特征,优化积雪判识和雪盖重建算法(Gao *et al.*, 2022; Bousbaa *et al.*, 2024),引入随机森林等机器学习方法(John *et al.*, 2022; Yang *et al.*, 2023),以提升风云卫星在积雪监测中的应用效果。

总体而言,本研究采用基于风云卫星的多源融合雪盖重建方法生成了完全无云的逐日雪盖产品,实现了对金沙江上游的高精度积雪覆盖监测,展现了风云卫星在积雪监测中的有效应用。研究方法还具有应用在其他积雪地区的潜力,能为全球变化研究提供新的积雪监测解决方案,为水资源优化管理和生态系统保护提供可靠的数据支撑。

致谢:感谢国家卫星气象中心郑照军在风云卫星数据及其处理中提供的帮助和指导。

References

Bousbaa, M., Boudhar, A., Kinnard, C., et al., 2024. An Accurate Snow Cover Product for the Moroccan Atlas Mountains: Optimization of the MODIS NDSI Index Threshold and Development of Snow Fraction Estimation Models. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 129: 103851. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.103851>

Che, T., Li, X., Jin, R., et al., 2008. Snow Depth Derived

from Passive Microwave Remote-Sensing Data in China. *Annals of Glaciology*, 49: 145—154. <https://doi.org/10.3189/172756408787814690>

Chu, D., Zheng, Z. J., Laba, Z. M., et al., 2021. Accuracy Assessment of IMS 4 km Snow and Ice Products on the Tibetan Plateau Based on Landsat-8 OLI Images. *Remote Sensing Technology and Application*, 36(6): 1223—1235 (in Chinese with English abstract).

Dietz, A. J., Kuenzer, C., Gessner, U., et al., 2012. Remote Sensing of Snow: A Review of Available Methods. *International Journal of Remote Sensing*, 33(13): 4094—4134. <https://doi.org/10.1080/01431161.2011.640964>

Dixit, A., Goswami, A., Jain, S., 2019. Development and Evaluation of a New “Snow Water Index (SWI)” for Accurate Snow Cover Delineation. *Remote Sensing*, 11(23): 2774. <https://doi.org/10.3390/rs11232774>

Dong, C. Y., Menzel, L., 2016. Producing Cloud-Free MODIS Snow Cover Products with Conditional Probability Interpolation and Meteorological Data. *Remote Sensing of Environment*, 186: 439—451. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.09.019>

Dong, Z. W., Jiang, H. C., 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. <https://doi.org/10.1007/s12583-023-2004-2>

Gafurov, A., Bárdossy, A., 2009. Cloud Removal Methodology from MODIS Snow Cover Product. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(7): 1361—1373. <https://doi.org/10.5194/hess-13-1361-2009>

Gafurov, A., Lüdtke, S., Unger-Shayesteh, K., et al., 2016. MODSNOW-Tool: An Operational Tool for Daily Snow Cover Monitoring Using MODIS Data. *Environmental Earth Sciences*, 75(14): 1078. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5869-x>

Gao, M., Gu, X. F., Liu, Y., et al., 2022. An Improved Spatiotemporal Data Fusion Method for Snow-Covered Mountain Areas Using Snow Index and Elevation Information. *Sensors*, 22(21): 8524. <https://doi.org/10.3390/s22218524>

Gao, Y., Xie, H. J., Yao, T. D., et al., 2010. Integrated Assessment on Multi-Temporal and Multi-Sensor Combinations for Reducing Cloud Obscuration of MODIS Snow Cover Products of the Pacific Northwest USA. *Remote Sensing of Environment*, 114(8): 1662—1675. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.02.017>

Grünwald, T., Bühler, Y., Lehning, M., 2014. Elevation

- Dependency of Mountain Snow Depth. *The Cryosphere*, 8(6): 2381–2394. <https://doi.org/10.5194/tc-8-2381-2014>
- Hall, D. K., Riggs, G. A., 2007. Accuracy Assessment of the MODIS Snow Products. *Hydrological Processes*, 21(12): 1534–1547. <https://doi.org/10.1002/hyp.6715>
- Hall, D. K., Riggs, G. A., DiGirolamo, N. E., et al., 2019. Evaluation of MODIS and VIIRS Cloud-Gap-Filled Snow-Cover Products for Production of an Earth Science Data Record. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(12): 5227–5241. <https://doi.org/10.5194/hess-23-5227-2019>
- Han, P. F., Long, D., Han, Z. Y., et al., 2019. Improved Understanding of Snowmelt Runoff from the Headwaters of China's Yangtze River Using Remotely Sensed Snow Products and Hydrological Modeling. *Remote Sensing of Environment*, 224: 44–59. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.01.041>
- Hand, D. J., Christen, P., Kirielle, N., 2021. F*: An Interpretable Transformation of the F-Measure. *Machine Learning*, 110(3): 451–456. <https://doi.org/10.1007/s10994-021-05964-1>
- Hori, M., Sugiura, K., Kobayashi, K., et al., 2017. A 38-Year (1978–2015) Northern Hemisphere Daily Snow Cover Extent Product Derived Using Consistent Objective Criteria from Satellite-Borne Optical Sensors. *Remote Sensing of Environment*, 191: 402–418. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.01.023>
- Hou, X. G., Zheng, Z. J., Li, S., et al., 2018. Generation of Daily Cloudless Snow Cover Product in the Past 15 Years in Xinjiang and Accuracy Validation. *Remote Sensing for Land & Resources*, 30(2): 214–222 (in Chinese with English abstract).
- Huang, J. Y., Jiang, L. M., Pan, F. B., et al., 2025. Estimation and Evaluation of the FY-3D/MERSI-II Fractional Snow Cover in China. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 18: 2497–2511. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2024.3517845>
- Huang, X. D., Ma, Y., Li, Y. X., et al., 2023. Spatiotemporal Variation Characteristics of Snow Cover over the Tibetan Plateau from 1980 to 2020. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 45(2): 423–434 (in Chinese with English abstract).
- John, A., Cannistra, A. F., Yang, K. H., et al., 2022. High-Resolution Snow-Covered Area Mapping in Forested Mountain Ecosystems Using Planet Scope Imagery. *Remote Sensing*, 14(14): 3409. <https://doi.org/10.3390/rs14143409>
- Li, X. H., Jing, Y. H., Shen, H. F., et al., 2019. The Recent Developments in Cloud Removal Approaches of MODIS Snow Cover Product. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(5): 2401–2416. <https://doi.org/10.5194/hess-23-2401-2019>
- Liu, A. W., Che, T., Huang, X. D., et al., 2022. Effect of Cloud Mask on the Consistency of Snow Cover Products from MODIS and VIIRS. *Remote Sensing*, 14(23): 6134. <https://doi.org/10.3390/rs14236134>
- Liu, Y., Yang, J. M., Chen, X., et al., 2024. Moderate-Resolution Snow Depth Product Retrieval from Passive Microwave Brightness Data over Xinjiang Using Machine Learning Approach. *International Journal of Digital Earth*, 17(1): 2299208. <https://doi.org/10.1080/17538947.2023.2299208>
- Luo, J. F., Dong, C. Y., Lin, K. R., et al., 2022. Mapping Snow Cover in Forests Using Optical Remote Sensing, Machine Learning and Time-Lapse Photography. *Remote Sensing of Environment*, 275: 113017. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113017>
- López-Burgos, V., Gupta, H. V., Clark, M., 2013. Reducing Cloud Obscuration of MODIS Snow Cover Area Products by Combining Spatio-Temporal Techniques with a Probability of Snow Approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(5): 1809–1823. <https://doi.org/10.5194/hess-17-1809-2013>
- Mao, K. B., Yuan, Z. J., Zuo, Z. Y., et al., 2019. Changes in Global Cloud Cover Based on Remote Sensing Data from 2003 to 2012. *Chinese Geographical Science*, 29(2): 306–315. <https://doi.org/10.1007/s11769-019-1030-6>
- Motiee, S., Motiee, H., Ahmadi, A., 2024. Analysis of Rapid Snow and Ice Cover Loss in Mountain Glaciers of Arid and Semi-Arid Regions Using Remote Sensing Data. *Journal of Arid Environments*, 222: 105153. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2024.105153>
- Muhuri, A., Gascoin, S., Menzel, L., et al., 2021. Performance Assessment of Optical Satellite-Based Operational Snow Cover Monitoring Algorithms in Forested Landscapes. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14: 7159–7178. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2021.3089655>
- Musselman, K. N., Addor, N., Vano, J. A., et al., 2021. Winter Melt Trends Portend Widespread Declines in Snow Water Resources. *Nature Climate Change*, 11(5):

- 418—424. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01014-9>
- Parajka, J., Holko, L., Kostka, Z., et al., 2012. MODIS Snow Cover Mapping Accuracy in a Small Mountain Catchment—Comparison between Open and Forest Sites. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(7): 2365—2377. <https://doi.org/10.5194/hess-16-2365-2012>
- Paudel, K. P., Andersen, P., 2011. Monitoring Snow Cover Variability in an Agropastoral Area in the Trans Himalayan Region of Nepal Using MODIS Data with Improved Cloud Removal Methodology. *Remote Sensing of Environment*, 115(5): 1234—1246. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.01.006>
- Qin, Y., Ding J. L., Zhao, Q. D., et al., 2018. Spatial-Temporal Variation of Snow Cover in the Tianshan Mountains from 2001 To 2015, and Its Relation to Temperature and Precipitation. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 40(2): 249—260 (in Chinese with English abstract).
- Ren, Z. C., Zhu, H. Z., Liu, X. N., 2012. Spatio-Temporal Differentiation of Land Covers on Annual Scale and Its Response to Climate and Topography in Arid and Semi-Arid Region. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 28(15): 205—214 (in Chinese with English abstract).
- Sönmez, I., Tekeli, A. E., Erdi, E., 2014. Snow Cover Trend Analysis Using Interactive Multisensor Snow and Ice Mapping System Data over Turkey. *International Journal of Climatology*, 34(7): 2349—2361. <https://doi.org/10.1002/joc.3843>
- Sun, N., Wigmosta, M., Zhou, T., et al., 2018. Evaluating the Functionality and Streamflow Impacts of Explicitly Modelling Forest-Snow Interactions and Canopy Gaps in a Distributed Hydrologic Model. *Hydrological Processes*, 32(13): 2128—2140. <https://doi.org/10.1002/hyp.13150>
- Wang, L., Cao, H., Li, Y. R., et al., 2022a. Attribution Analysis of Runoff in the Upper Reaches of Jinsha River, China. *Water*, 14(17): 2768. <https://doi.org/10.3390/w14172768>
- Wang, Y. C., Su, J. Y., Zhai, X. J., et al., 2022b. Snow Coverage Mapping by Learning from Sentinel-2 Satellite Multispectral Images via Machine Learning Algorithms. *Remote Sensing*, 14(3): 782. <https://doi.org/10.3390/rs14030782>
- Warren, S. G., 2019. Optical Properties of Ice and Snow. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 377(2146): 20180161. <https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0161>
- Wei, X., Shen, Y., Wang, Y., et al., 2025. Textural and Mineralogical Characterization of Moraine from the Galongla Glacier: Insights into Climate-Driven Glacial Degradation in Southeast Xizang. *Journal of Earth Science*. <https://doi.org/10.1007/s12583-025-0236-z>
- Yang, K., John, A., Shean, D., et al., 2023. High-Resolution Mapping of Snow Cover in Montane Meadows and Forests Using Planet Imagery and Machine Learning. *Frontiers in Water*, 5. <https://doi.org/10.3389/frwa.2023.1128758>
- Yang, K., Yan, K., Zhang, X. J., et al., 2024. Assessing FY-3D MERSI-II Observations for Vegetation Dynamics Monitoring: A Performance Test of Land Surface Reflectance. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 62: 4401920. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2023.3348997>
- Yang, Y., Chen, R. S., Liu, G. H., et al., 2022. Trends and Variability in Snowmelt in China under Climate Change. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26(2): 305—329. <https://doi.org/10.5194/hess-26-305-2022>
- Yao, T. D., Bolch, T., Chen, D. L., et al., 2022. The Imbalance of the Asian Water Tower. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3(10): 618—632. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00299-4>
- Yi, Y., Liu, S. Y., Zhang, X. H., et al., 2023. Spring Floods and Their Major Influential Factors in the Upper Reaches of Jinsha River Basin during 2001—2020. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 45: 101318. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101318>
- You, Q. L., Wu, T., Shen, L. C., et al., 2020. Review of Snow Cover Variation over the Tibetan Plateau and Its Influence on the Broad Climate System. *Earth-Science Reviews*, 201: 103043. <https://doi.org/10.1016/j.earsci-rev.2019.103043>
- Yun, B. X., Lei, B. Y., Chen, J. N., et al., 2024. SpecTr: Spectral Transformer for Microscopic Hyperspectral Pathology Image Segmentation. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 34(6): 4610—4624. <https://doi.org/10.1109/TCSVT.2023.3326196>
- Zhang, H. B., Zhang, F., Zhang, G. Q., et al., 2019. Ground-Based Evaluation of MODIS Snow Cover Product V6 across China: Implications for the Selection of NDSI Threshold. *Science of the Total Environment*,

- 651: 2712–2726. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.128>
- Zhang, Y. L., Qin, X., Li, X., et al., 2020. Estimation of Shortwave Solar Radiation on Clear-Sky Days for a Valley Glacier with Sentinel-2 Time Series. *Remote Sensing*, 12(6): 927. <https://doi.org/10.3390/rs12060927>
- Zhang, Y. L., Song, Y. Y., Ye, C. Q., et al., 2023. An Integrated Approach to Reconstructing Snow Cover under Clouds and Cloud Shadows on Sentinel-2 Time-Series Images in a Mountainous Area. *Journal of Hydrology*, 619: 129264. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129264>
- Zhang, L. H., Zhang, H. B., Sun, X. Y., et al., 2024. Combined Use of Multiple Cloud-Free Snow Cover Products in China and Its High-Mountain Region: Implications from Snow Cover Identification to Snow Phenology Detection. *Water Resources Research*, 60(6): e2023WR036274. <https://doi.org/10.1029/2023WR036274>
- Zheng, X. P., Hui, F. M., Huang, Z. H., et al., 2022. Ice/Snow Surface Temperature Retrieval from Chinese FY-3D MERSI-II Data: Algorithm and Preliminary Validation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60: 4512715. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2022.3212095>

中文参考文献

- 除多, 郑照军, 拉巴卓玛, 等, 2021. 基于 Landsat-8 OLI 的青藏高原 IMS 4 km 雪冰产品精度评价. 遥感技术与应用, 36(6): 1223–1235.
- 侯小刚, 郑照军, 李帅, 等, 2018. 近 15 年新疆逐日无云积雪覆盖产品生成及精度验证. 国土资源遥感, 30(2): 214–222.
- 黄晓东, 马英, 李雨馨, 等, 2023. 1980—2020 年青藏高原积雪时空变化特征. 冰川冻土, 45(2): 423–434.
- 秦艳, 丁建丽, 赵求东, 等, 2018. 2001—2015 年天山山区积雪时空变化及其与温度和降水的关系. 冰川冻土, 40(2): 249–260.
- 任正超, 朱华忠, 柳小妮, 2012. 年际尺度上土地覆盖类型时空分异及其对气候和地形的响应. 农业工程学报, 28(15): 205–214.