

引文格式:周卫永,许民,康世昌,等.天山科其喀尔冰川表碛识别及其表面流速特征[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(12):2537-2547.DOI:10.13203/j.whugis20220656



Citation: ZHOU Weiyong, XU Min, KANG Shichang, et al. Identification of Debris-Covered Koxkar Glacier in Mt. Tianshan and Its Velocity Characteristics[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2025, 50(12):2537-2547. DOI:10.13203/j.whugis20220656

天山科其喀尔冰川表碛识别及其表面流速特征

周卫永^{1,2,4,5} 许民^{2,3} 康世昌^{2,3} 韩海东^{2,3} 韩惠^{1,4,5}

1 兰州交通大学测绘与地理信息学院,甘肃 兰州,730070

2 中国科学院西北生态环境资源研究院冰冻圈科学与冻土工程全国重点实验室,甘肃 兰州,730000

3 中国科学院大学,北京,100049

4 地理国情监测技术应用国家地方联合工程研究中心,甘肃 兰州,730070

5 甘肃省地理国情监测工程实验室,甘肃 兰州,730070

摘要:表碛覆盖型冰川有其独特的物质平衡特征,冰川流速是评估物质平衡的重要指标。针对遥感方法难以区分冰川表碛和岩石的问题,利用结合纹理和地形因素的特征优选随机森林算法识别了天山科其喀尔冰川的表碛范围,相较于其他机器学习方法,识别精度有显著提升。基于表碛识别结果和2017—2021年哨兵2号影像数据,采用特征匹配及互相关计算方法对表碛覆盖冰川流速进行了估算。表碛识别结果显示,表碛覆盖面积约24.6 km²,占整个科其喀尔冰川面积的31.7%。流速估算结果表明,科其喀尔冰川年均最大流速位于东支海拔4 380 m左右位置,在2020年达到约145.9 m/a。随海拔降低,冰川末端流速递减至0~10 m/a。对研究区1989—2021年的流速变化进行长时序分析发现,在冰川中上部,冰川表面流速随气候变暖而持续加快;在冰川下部海拔3 090~3 500 m的区间内,由于冰碛积累和冰舌的不断减薄,冰川表面流速持续降低,冰川物质平衡处于亏损状态。

关键词:表碛识别;随机森林;冰川流速;特征匹配及互相关计算;科其喀尔冰川

中图分类号:P237

文献标识码:A

收稿日期:2024-05-28

DOI:10.13203/j.whugis20220656

文章编号:1671-8860(2025)12-2537-11

Identification of Debris-Covered Koxkar Glacier in Mt. Tianshan and Its Velocity Characteristics

ZHOU Weiyong^{1,2,4,5} XU Min^{2,3} KANG Shichang^{2,3} HAN Haidong^{2,3} HAN Hui^{1,4,5}

1 Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China

2 State Key Laboratory of Cryospheric Science and Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

4 Nation-Local Joint Engineering Research Center of Technologies and Applications for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730070, China

5 Gansu Provincial Engineering Laboratory for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730070, China

Abstract: Objectives: The spectral characteristics of supraglacial debris are extremely similar to those of rocks, which is difficult to retrieve by semi-automatic or automatic interpretation of remote sensing. Obtaining the extent of supraglacial debris and glacial surface flow velocity can help to understand the characteristics of glacier mass balance about debris-covered glaciers. **Methods:** Random forest method based on feature optimization is used to identify the supraglacial debris of Koxkar Glacier. To increase the distinguish ability between supraglacial debris and rocks, Sentinel-2 images, remote sensing indexes, terrain features and texture features are also added for image classification. Glacial flow velocity is estimated using coregistration of optical sensed images and correlation (COSI-Corr) method, which is considered to be one

基金项目:国家自然科学基金(41971094,41871055);中国科学院青年创新促进会人才项目(2019414)。

第一作者:周卫永,硕士,主要研究方向为雷达遥感应用和冰冻圈水文。dayzwy@gmail.com

通信作者:许民,博士,副研究员。xumin@lzb.ac.cn

of the most effective methods for small-scale and high-precision estimation of glacial flow velocity. **Results:** Compared with other machine learning classification methods, random forest method based on feature optimization can effectively avoid the misclassification between supraglacial debris and rock. The result of identification shows that the area of debris is about 24.6 km², accounting for 31.7% of the total area of Koxkar Glacier. The results of glacial flow velocity show that the maximum average annual flow velocity occurs at about 4 380 m above sea level in the eastern branch and can reach 145.9 m/a in 2020. The flow velocity reduces to 0—10 m/a with the decreasing elevation. The flow velocity during the ablation period is much higher than the annual mean velocity. The differences of velocity on the glacier tongue are induced by differences of altitude, ice lake outburst, collapse of subglacial meltwater channel and other factors. The changes of flow velocity in the study area from 1989 to 2021 show that the flow velocity in the upper and middle parts of the glacier continues to accelerate with the increase of surface temperature. In the range from 3 090 m to 3 500 m above sea level located in the lower part of the glacier, the flow velocity decreases continuously due to the accumulation of debris and the continuous thinning of glacier tongue. **Conclusions:** Compared with other machine learning classification methods, the accuracy of the random forest method based on feature optimization can be significantly improved in identification of supraglacial debris. In the past 30 years, the overall flow velocity of debris-covered Koxkar Glacier is slowly increasing with obviously spatiotemporal differences, and the glacier mass balance of the glacier below 3 500 m above sea level is in a continuous deficit state.

Key words: supraglacial debris identification; random forest; glacier velocity; coregistration of optical sensed images and correlation (COSI-Corr); Koxkar Glacier

冰川被称为气候变化的指示器,其物质平衡状态能敏感反映气候的变化^[1]。受气候变暖影响,中国天山、祁连山等高山冰川均出现明显的消融加快和边界退缩,对邻近区域的水文和生态环境产生了深远的影响^[2]。区别于表面洁净冰川,表碛覆盖型冰川在消融、径流等物质损失的过程中,表碛会对其产生隔热、阻滞作用^[3]。识别冰川表碛覆盖范围,分析表碛覆盖冰川流速特征,对研究冰川水文和物质平衡具有重要意义。

遥感技术广泛应用于冰川调查和监测^[4-5],但表碛的光谱特性与岩石极为相近,使得表碛覆盖型冰川的遥感半自动或自动解译成为一个难题。目前相关研究均围绕解决表碛与岩石间异物同谱的问题展开,几种具有可行性的方案包括:(1)由于下层冰川的作用,表碛温度低于周边地物,使得利用热红外遥感判别表碛成为可能^[6],但目前的热红外传感器精度普遍较低(Landsat热红外影像的分辨率为100 m)。(2)雷达的干涉相干性对地物形变速度和水分含量十分敏感。冰川存在位移形变,表碛覆盖区又是冰川的主要消融位置,干涉影像在表碛分布区域会出现失相干现象,从而对表碛进行有效的识别^[7]。但冰川边界的低流速和低含水量往往不足以引发合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)的失相干现象,导致表碛边界识别模糊^[8]。(3)表碛是冰

川运动的产物,有其独特的纹理和地形分布特征。将遥感指数与地形、纹理等特征结合进行影像阈值分割,识别表碛的精度能有明显提升^[9-11],但该方法在不同的研究区需凭经验挑选特征组合,通过试错法确定特征的阈值,具有较大主观性,普适程度不高。本文识别表碛的思路是在多特征融合方法的基础上,通过决策树优选特征向量,以机器学习代替繁琐的阈值判定过程。

在冰川流速监测方面,光学遥感主要基于图像特征跟踪原理,通过计算同名点在一定时期内的位移量来估算流速^[12]。图像特征跟踪的实现方法有所不同,特征匹配及互相关计算(coregistration of optical sensed images and correlation, COSI-Corr)被认为是最有效的方法之一,适用于小范围高精度的冰川流速估算^[13]。对于表碛覆盖型冰川而言,表碛随冰川运动的位移速度即是冰川表面运动速度。事实上,表碛的分布增强了冰川的表面特征,在同名点匹配机制上提升了流速估算结果的准确性。文献[14]对天山科其喀尔冰川2001—2007年表面运动速度进行了估算,但由于选用数据的局限性,没能获取与研究时间一致的影像,经改算后的结果精度可能受到一定影响。Landsat、Sentinel-2等卫星重访周期短,提供的影像日期丰富,可对冰川消融期甚至更短期间内的冰川和流速状态进行监测^[15-17]。

针对目前遥感方法识别表碛研究中遇到的问题,本文基于 Sentinel-2 卫星遥感数据,采用结合纹理和地形因素的特征优选随机森林方法对天山科其喀尔冰川进行地物分类,识别表碛范围,验证所提方法在表碛识别过程中的自适应性优势。基于前置工作获取的表碛范围,使用 COSI-Corr 方法估算科其喀尔表碛覆盖冰川 2017—2021 年全年以及每年 5 月—9 月消融期内的表面流速,最后结合美国冰雪中心发布的 1989—2018 年 ITS_LIVE 冰川流速数据,对研究区表碛覆盖冰川的表面流速特征进行长时序的分析。

1 研究区概况

天山西段的托木尔峰地区分布着大规模的树枝状山谷冰川,以多冰舌、表碛密布、热喀斯特地貌发育为特征,称为托木尔型冰川。科其喀尔冰川(80°10.20'E, 41°48.77'N)位于托木尔峰南麓,是典型的托木尔型冰川,其面积 82.89 km²,径流面积 118.12 km²,冰储量 15.79 km³,消融区面积约 30.6 km²[18]。海拔 3 750 m 以下为表碛的主要分布区,占据消融区的 83%^[19]。2003—2014 年期间,研究人员在科其喀尔冰川开展了大规模的气象梯度观测、雷达冰川测厚、冰川运动速度监测、水文断面径流量监测等科考活动。2008—2011 年间的水文实测数据显示,科其喀尔冰川的年平均径流量为 118.2×10⁶ m³,每年 5 月—9 月冰川消融期内的径流量占到全年的 87.0%^[20]。基于中国第一次冰川编目,科其喀尔冰川区地貌如图 1 所示。

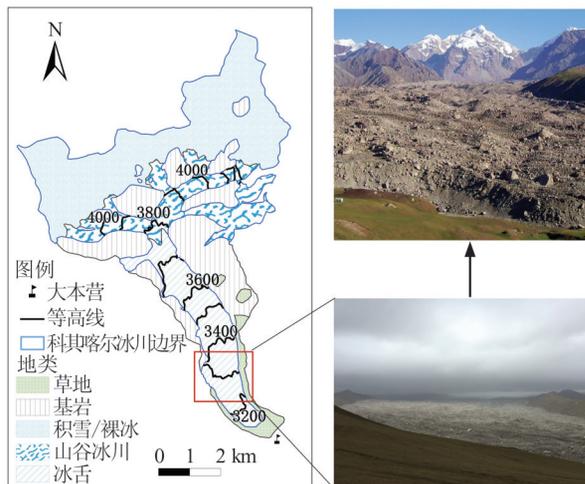


图 1 科其喀尔冰川区地貌

Fig. 1 Landform of Koxkar Glacier Area

2 研究方法和数据处理

2.1 数据集

本文以 2017—2021 年获取的 16 景 Sentinel-2 卫星影像为基础数据,参数见表 1。预处理后影像重采样至 10 m 分辨率;数字高程模型(digital elevation model, DEM)采用先进陆地观测卫星 ALOS 获取的高分辨率地形数据,精度为 12.5 m;基础冰川数据使用中国第一次和第二次冰川编目数据集,下载自国家冰川冻土沙漠科学数据中心(<http://www.ncdc.ac.cn/portal>);1989—2018 年冰川流速数据来自美国冰雪数据中心 ITS_LIVE 数据集;气象数据采用欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasting, ECMWF)第 5 代气候再分析(ECMWF reanalysis v5, ERA5)逐月数据集。基于以上数据进行表碛识别和表面流速估算,具体技术路线如图 2 所示。

表 1 哨兵二号影像参数

Table 1 Parameters of Sentinel-2 Images

影像编号	采集时间	太阳高度角/(°)	太阳方位角/(°)
1	2016-12-21	66.809 3	165.239 5
2	2017-05-23	23.584 9	151.154 5
3	2017-09-20	42.155 0	163.319 8
4	2017-12-29	66.314 9	166.690 1
5	2018-05-08	26.866 2	154.265 9
6	2018-09-30	45.707 3	165.593 1
7	2018-12-21	66.798 8	165.289 2
8	2019-05-30	23.644 4	144.326 0
9	2019-08-31	35.103 2	157.527 4
10	2019-12-26	66.848 8	164.713 1
11	2020-04-29	30.104 1	150.951 7
12	2020-09-21	43.179 5	160.129 6
13	2020-12-15	66.527 2	165.937 9
14	2021-05-04	28.736 7	150.119 5
15	2021-09-06	44.873 2	161.358 6
16	2021-12-23	66.402 8	167.475 3

2.2 特征优选随机森林原理

特征优选随机森林对比原有算法的改进之处在于引入特征向量重要性的概念,找出分类精度最高、成本最低的特征组合方案,在减少信息冗余的同时提升了识别精度^[21-22]。

随机森林模型构建时通过 Bootstrap 方法随机抽取 N 个子样本集,这一过程使用约 63% 的样本,剩余数据称为袋外数据(out-of-bag, OOB),用于模型的性能检验^[23]。由于同类特征向量之

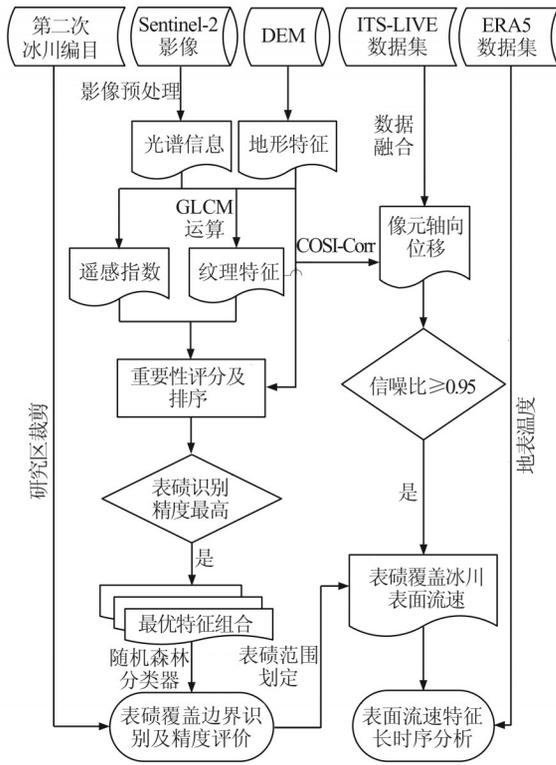


图2 本文方法的技术路线

Fig. 2 Flowchart of the Proposed Method

间具有较高相关性,在训练模型时会产生信息冗余,导致训练成本增加的同时还会对分类精度产生影响。通过计算 OOB 预测错误率可以对每一种特征向量的重要性进行评分。第 m 个特征向量 X_m 的重要性 V_m^{OOB} 的计算式为:

$$V_m^{OOB} = \frac{\sum_{q=1}^{n_i} I(Y_q = Y_q^i)}{n_i} - \frac{\sum_{q=1}^{n_i} I(Y_q = Y_{q,\pi_m}^i)}{n_i} \quad (1)$$

式中, n_i 为第 i 棵树中每种变量的 OOB 数据数量; $I()$ 为指示函数, 值相等时取 1, 不等时取 0; $Y_q \in \{0, 1\}$ 为第 i 棵树第 q 个节点的真实值; $Y_q^i \in \{0, 1\}$ 为 X_m 中一个随机值在第 i 棵树第 q 个节点的预测结果; $Y_{q,\pi_m}^i \in \{0, 1\}$ 为另一个随机值的预测结果, 计算两次 OOB 预测错误率的差值, 标准化处理后即为 X_m 在第 i 棵树的重要性, 结果的平均值即该特征向量的重要性^[24]。

2.3 样本选择和特征优选

以研究区消融时段后期 2021-09-06 的 Sentinel-2 影像为底图, 综合实地调查、冰川编目以及 Google Earth 提供的亚米级影像进行样本点选择。为增加样本量提高分类精度, 将选样区域扩大至研究区周边, 选取表碛、裸冰/积雪、岩石/裸地、草地 4 类训练样本点共 2 249 个, 并以 750 m × 750 m 网格等间距选取 1 326 个验证样本点。

对 4 类训练样本共 28 个特征变量进行构建和优选, 获得最优特征组合用于地物分类。待选择的特征变量详情见表 2, 其中纹理特征由灰度共生矩阵 (gray-level co-occurrence matrix, GLCM) 运算得出。计算 28 个特征变量的重要性并进行排序, 结果如图 3 所示。光谱信息对分类的贡献度最大, 而纹理特征贡献度较小, 仅有 Mean 特征的重要性得分超过 2。表碛通常分布于平缓的冰舌或冰川末端, 与 Elevation 和 Slope 两个特征具有较高的关联度。

表 2 未经优选的特征变量描述

Table 2 Feature Variable Description Before Optimization

特征类型	特征向量
光谱信息	B1: 海岸/气溶胶波段
	B2~B4: 可见光波段
	B5~B7: 可见光-近红外波段
	B8~B8A: 近红外波段
	B9~B12: 短波红外波段
	亮度(Luminance): $0.11R_{B2} + 0.59R_{B3} + 0.3R_{B4}$
	归一化雪盖指数(normalized difference snow index, NDSI): $(R_{B3} - R_{B11}) / (R_{B3} + R_{B11})$
	归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI): $(R_{B8} - R_{B4}) / (R_{B8} + R_{B4})$
	近红外短波红外波段比(near infrared/short waveinfrared 1, NIR/SWIR1): R_{B8} / R_{B11}
	陆地水分指数(land surface water index, LSWI): $(R_{B8} - R_{B11}) / (R_{B8} + R_{B11})$
	均值(Mean): 平均灰度值
	方差(Variance): 灰度值离散程度
遥感指数	协同性(Homogeneity): 像素分布紧密度
	反差性(Contrast): 邻域内灰度差异
	非相似性(Dissimilarity): 距离加权灰度反差
	熵(Entropy): 影像无序程度
	角二阶矩(Second Moment): 均匀和粗细程度
	相关性(Correlation): 行列相似性
地形特征	高程(Elevation): 描述地面高程信息
	坡向(Aспект): 坡面水平投影方向
	坡度(Slope): 地表单元陡缓程度

按重要性排序结果依次叠加特征向量来训练随机森林模型, 基于混淆矩阵原理对分类精度进行评价。使用的分类精度指标为 F1 分数, 是兼顾精确率和查全率的加权平均值^[25]。分类精度和 Kappa 系数随特征个数的增加而变化, 如图 4 所示。由图 4 可以看出, 单独波段 B2 的分类精度较低, 增加特征向量后分类精度快速提升, 在特征个数到达 5 之后增速放缓; 表碛分类精度和 Kappa 系数在特征个数为 22 时达到最大, 分别为

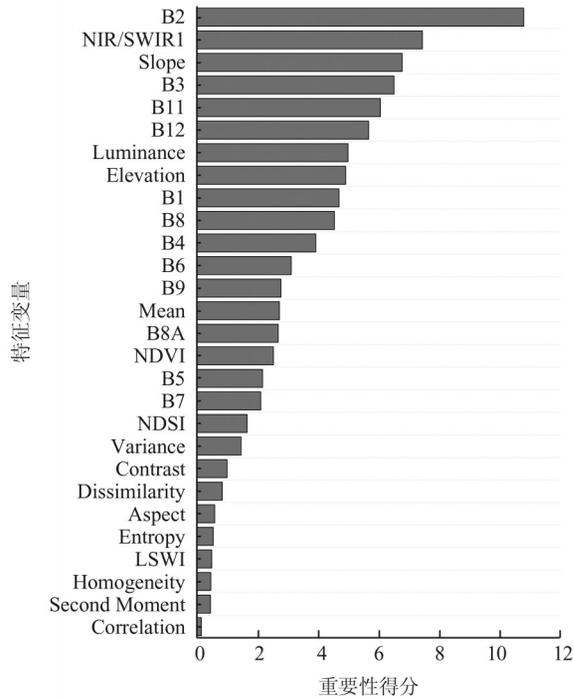


图 3 特征变量重要性得分

Fig. 3 Importance Scores of Feaure Variations

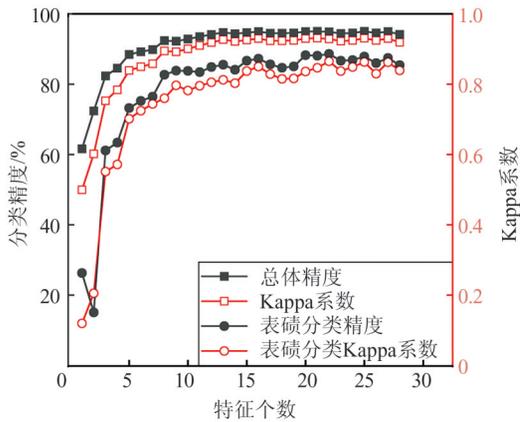


图 4 分类精度与特征个数的关系

Fig. 4 Relationship Between Classification Accuracy and Feature Number

88.6% 和 0.86, 此后呈现缓慢波动下降趋势。本文以获得最高的表碛识别精度为准则, 优选前 22 个特征向量构成最优特征组合。

2.4 表碛覆盖冰川流速估算

裸冰和积雪表面光滑, 流速估算结果可信用度不高。科其喀尔冰川表碛的广泛分布增强了其表面特征, 为遥感技术对其表面流速进行监测提供了有利条件^[14]。同时, 对比多期遥感影像发现, 在地形阻隔下, 研究区表碛覆盖范围无较大变化。考虑到以上因素, 流速估算范围以上文识别的表碛边界为基准。对研究区 2017—2021 年 16 个日期的影像进行两两匹配, 获得 10 组影像对, 如图 5 所示。

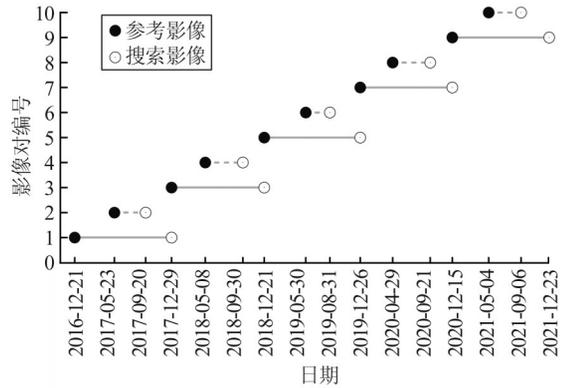


图 5 影像匹配示意图

Fig. 5 Diagram of Image Matching

影像配对完成后, 使用 COSI-Corr 方法进行流速估算, 信噪比 (signal noise ratio, SNR) 小于等于 0.95 的估算结果可能存在较大偏差, 以克里金插值替换。奇数组影像对的日期跨度近似为全年, 偶数组影像对的日期跨度在消融期 5 月—9 月以内, 无需对最后结果进行夏日改算。需说明的是, 流速估算结果实质上是表碛随下层冰川运动的速度, 该速度等同于冰川表面流速。

3 结果与分析

3.1 表碛识别结果分析

以最优特征组合训练随机森林模型并进行影像分类, 经 3×3 中值滤波去除椒盐噪声后, 结果如图 6 所示, 表碛识别精度和 Kappa 系数分别为 88.6% 和 0.86。

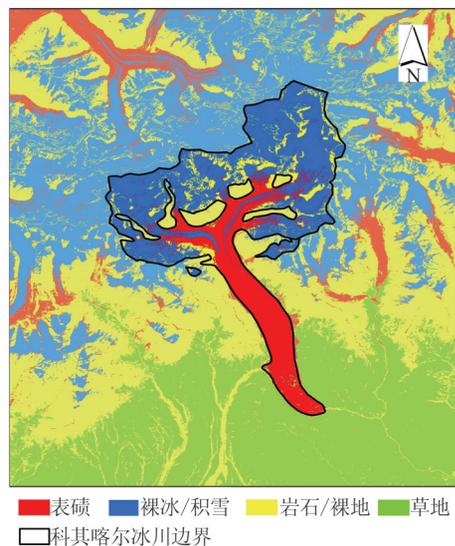


图 6 地物分类结果

Fig. 6 Land Feature Classification Result

基于第二次冰川编目的科其喀尔冰川面积统计结果如图 7 所示。统计前剔除了识别出的岩

石区域,冰川总面积约 77.4 km^2 ,表碛覆盖面积约 24.6 km^2 ,占冰川总面积的 31.7% 。表碛的主要分布范围在 $3\ 100 \sim 4\ 100 \text{ m}$ 之间,在其他高程范围内也有少量分布。

在表碛覆盖范围内均匀随机产生样点,对表碛分布的地形特征进行统计分析,如图8所示。由图8可以看出,表碛覆盖区域的坡向趋向于南偏东方向。表碛高程上下四分位区间为 $3\ 399 \sim 3\ 869 \text{ m}$,坡度分布上下四分位区间为 $11.7^\circ \sim 25.4^\circ$,与一般认知相符,表碛分布在平缓的冰舌或冰川末端,解释了 Elevation 和 Slope 两个地形特征在分类过程中为何具有高贡献度。

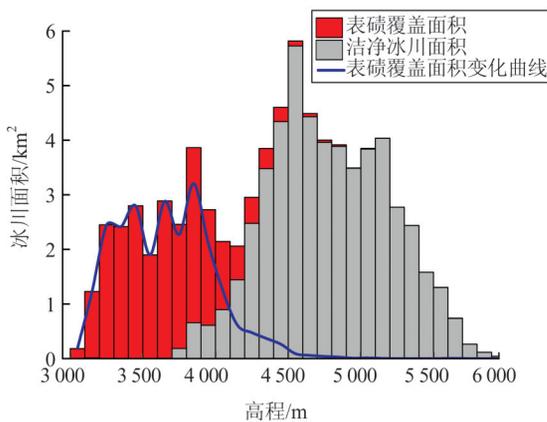


图7 科其喀尔冰川表碛覆盖面积统计

Fig. 7 Statistics of Supraglacial Debris Coverage in Koxkar Glacier

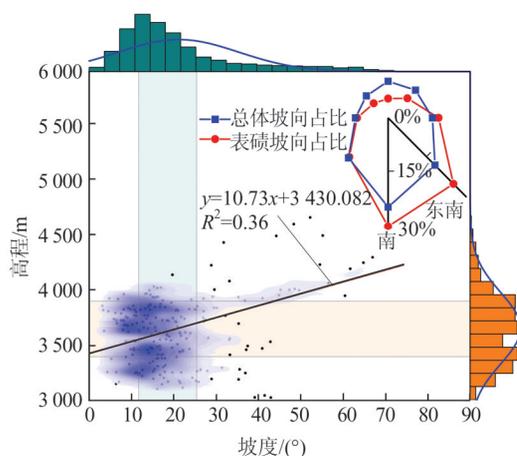


图8 科其喀尔冰川表碛的地形分布特征

Fig. 8 Topographic Distribution Characteristics of Supraglacial Debris in Koxkar Glacier

3.2 流速估算精度验证

非冰川点位的理论流速为0,在缺乏实测数据的情况下可用于验证流速估算结果的精度^[26]。本文选择已有的全部岩石样点作为控制点,出于严谨,不再特意从估算结果接近于0的稳定区域

中筛选样本。计算得出2017—2021年年均表面流速估算值的均方根误差(root mean square error, RMSE)以及未经插值和数值换算的原始偏移量RMSE,结果见表3。COSI-Corr作为被多次应用验证的位移估算方法,其可靠性较高,影响其估算精度的主要因素是影像分辨率。本文用于互相关匹配的影像分辨率为 10 m ,理论误差上限为 14.14 m ,估算结果的原始偏移量RMSE均小于该值,说明流速估算结果误差在接受范围内,可用于后续的趋势性变化分析。

表3 流速估算结果均方根误差

Table 3 RMSE of Velocity Estimation Results

年份	表面流速RMSE/($\text{m} \cdot \text{a}^{-1}$)	原始偏移量RMSE/m
2017	7.45	7.96
2018	7.68	7.38
2019	8.75	9.00
2020	4.94	4.87
2021	8.26	8.56

3.3 流速估算结果分析

2017—2021年科其喀尔表碛覆盖冰川表面流速估算结果如图9所示。由于冰川东支流速明显大于西支,年平均表面流速大致沿中线偏东位置对称分布。最大流速出现在东支海拔 $4\ 380 \text{ m}$ 左右的位置,该区域坡度大,物质补给丰富,在2020年的年均流速能达到约 145.9 m/a ;从最大流速出现位置沿海拔向下,流速出现骤降,上方冰瀑布汇入后,流速又快速拉升,在海拔 $3\ 880 \text{ m}$ 左右位置有一个峰值;在海拔 $3\ 450 \sim 3\ 650 \text{ m}$ 区间内,冰川流线有两次弯折,受山脊阻挡,流向出现明显的向内挤压;到了冰舌中下部,物质补给减少、坡度减缓、内碛含量也相对较高^[27],多种抑制作用下,表面流速降低至 $0 \sim 10 \text{ m/a}$ 。

消融期的冰川表面流速远高于年平均值,峰值呈面状分散在冰川边缘,与年平均流速特征有较大区别。形成这种分布特征的原因可能有:(1)冰川物质堆积在冰舌两侧和中线处,冰川流线位置又因冰床刨蚀作用形成槽谷,局部高度差加上夏季消融加剧会导致流速增大和流向偏转。(2)表碛覆盖区域广泛发育冰面湖^[28],发生溃决将导致周边冰流状态剧烈变化,如2021-05-04—2021-09-06消融期内,海拔 $3\ 300 \text{ m}$ 处冰面湖的溃决导致周边冰流速激增,如图10所示。(3)消融区下分布着较多融水通道,出现塌陷会对冰川表面流速状态产生一定影响。

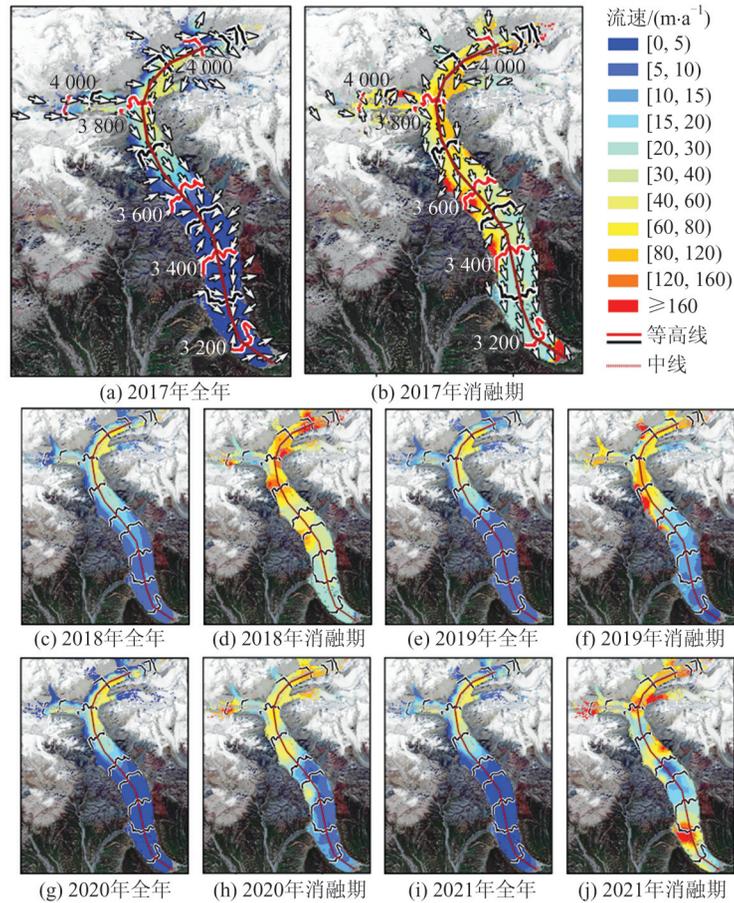


图 9 科其喀尔表碛覆盖冰川 2017—2021 年表面流速估算结果

Fig. 9 Estimation of Surface Flow Velocity of Supraglacial Debris Covered Koxkar Glacier from 2017 to 2021

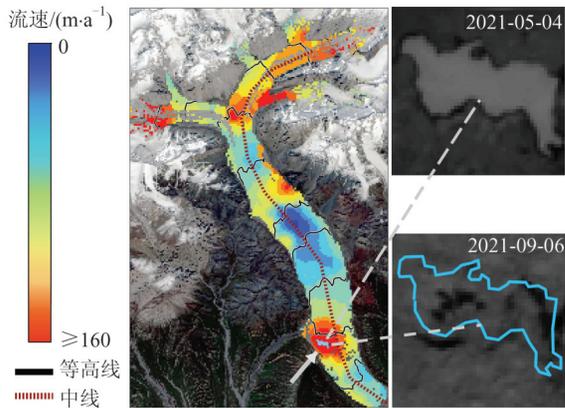


图 10 2021 年消融期内由冰湖溃决引起的流速变化
Fig. 10 Variation of Flow Velocity due to Ice Lake Outburst During Ablation Period in 2021

4 讨论

4.1 表碛识别精度评价

本文中表碛识别的主要不确定因素来自影像的分辨率以及样本点的选择。当一个像元内包含多种地物时,分类结果具有一定随机性,地物交界处问题尤为突出,提升所用影像的分辨率是最有效的改善方法。由于表碛和岩石的高度

相似,尽管挑选样本时融合了多方数据,部分点位依旧由于缺乏实地调查而导致定性模糊,这种不确定性有待后续进一步排除。

精度评价的数值结果会受样本质量影响而产生波动,但在使用样本一致时,能直观反映分类器的优劣程度。本文使用相同的训练样本和验证样本,多种机器学习方法识别表碛的精度见表 4,其中分类精度指标使用 $F1$ 分数,一致性检验指标使用 Kappa 系数。异物同谱导致表碛与岩石区分困难,4 种分类目标的光谱曲线和不同方法的分类结果如图 11 所示。由图 11(a)可以看出,表碛和岩石的光谱曲线几乎重合,仅利用光谱信息进行表碛识别的情况下,所有方法精度都很低。考虑光谱信息的神经网络分类方法存在将表碛错分为岩石的情况,如图 11(b)所示;考虑全部特征向量的支持向量机方法时间成本高,且出现过拟合现象,将特征相似的河道两侧岩石错分为表碛,如图 11(c)所示。随机森林方法在训练过程中优先给定采样空间,通过构建多颗决策树收敛预测结果,一定程度上减少了过拟合。考虑全部特征向量的随机森林方法已经具有较高

的表碛识别精度,但经特征优选后精度还能提升近3%。总的来说,特征优选随机森林方法应用于表碛识别有很大优势。

表4 不同方法表碛识别精度对比

Table 4 Comparison of Recognition Accuracy of Debris by Different Methods

特征组合	分类方法	F1分数/%	Kappa系数
光谱信息	随机森林	67.8	0.65
	最大似然法	45.8	0.35
	支持向量机	29.5	0.25
	神经网络分类	61.4	0.48
光谱+指数+	随机森林	85.4	0.84
地形+纹理	支持向量机	76.0	0.69
优选特征	随机森林	88.6	0.86

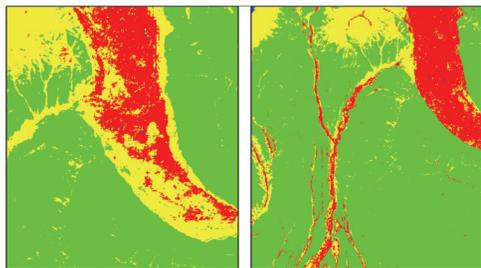
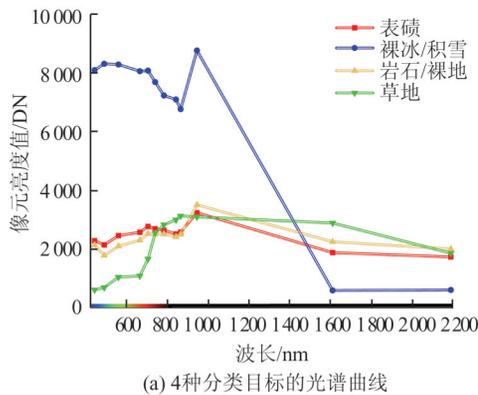


图11 4种分类目标的光谱曲线和不同方法的分类结果

Fig. 11 Spectral Curves of Four Classification Targets and Classification Results of Different Methods

4.2 表碛覆盖冰川流速时空变化特征

冰川中线处流速能大致反映冰川整体运动情况^[29],沿中线提取表碛覆盖冰川的表面流速用于长时序变化分析,不同海拔区间内流速变化趋势有很大的差异。1989—2021年科其喀尔冰川表面流速时空变化见图12。如图12(a)所示,依据1989—2021年33年间流速均值随高程降低而产生的变化速率 K 的不同,将研究区划分为3个区间:Ⅰ(海拔3880~4000 m, $K=0.344$)、Ⅱ(海

拔3500~3880 m, $K=-0.133$)、Ⅲ(海拔3090~3500 m, $K=-0.013$)。各段区间表面流速均值在1989—2021年间的变化趋势如图12(b)所示,其中冰川流速数据来自ITS_LIVE数据集,2019—2021年的数据空缺由本文流速估算结果填补。ITS_LIVE数据集的制作使用了以Landsat为主的光学遥感影像,光学遥感估算位移的基本原理一致,即计算同名点位移,各方法之间性能差距不大,融合不同流速估算结果用于趋势性分析较为合理。Ⅰ区表面流速均值33年间的变化明显,数值波动大,整体呈现上升趋势,流速增量约为31.7 m/a,在1999年前有一个超越Ⅱ区流速均值的过程;Ⅱ区表面流速均值呈缓慢上升趋势,33年间增量仅在7.3 m/a左右;Ⅲ区变化趋势与Ⅰ区、Ⅱ区相反,呈缓慢下降趋势。整体上,流速呈缓慢上升趋势,增量约5.9 m/a。

4.3 流速变化与地表温度的关系

基于ERA5逐月数据集对科其喀尔冰川1989—2021年地表温度进行Mann-Kendall(M-K)趋势检验,如图13所示,其中 F_i 是按时间序列顺序计算的地表温度正态分布统计量,再按时间序列逆序构建另一正态统计量 B_i ,且 $B_1=0$ 。 F_i 和 B_i 曲线的交界点为数值突变点。当 F_i, B_i 均大于0时,表明地温呈上升趋势;当 F_i 大于显著性水平临界值 $U_{0.05}=1.95$ 时,表明地温上升显著。由图13可以看出,科其喀尔冰川地区的地温在1989—2021年呈现持续增长趋势。

一般来说,影响冰川表面运动速度的因素有冰厚、地形、冰面温度、降水、底部滑动等^[30]。在长时序分析中,引起流速改变的主要原因之一是冰面温度的变化,这一点在对比年均和消融期流速差异时也有所体现。由于实测数据获取难度高,目前关于冰川流速对气候变暖响应的研究中,常见使用遥感反演地温或再分析地表温度数据近似代替冰面温度。

考虑到冰川运动集中在消融期,基于ERA5逐月气象数据集计算1989—2021年每年5月—9月的月平均地表温度,与科其喀尔表碛覆盖冰川的表面流速年均值进行相关性检验,结果如图14所示。结合地表温度持续上升的实际情况来看,图12(b)所展示的表面流速变化趋势与图14的相关性检验结果相吻合,很大程度上说明了地表温度是影响研究区冰川流速的重要因素。地表温度的持续上升会使得冰川积累区消融加快,物质输送量增多,冰川中上部的流速变化因此呈持续

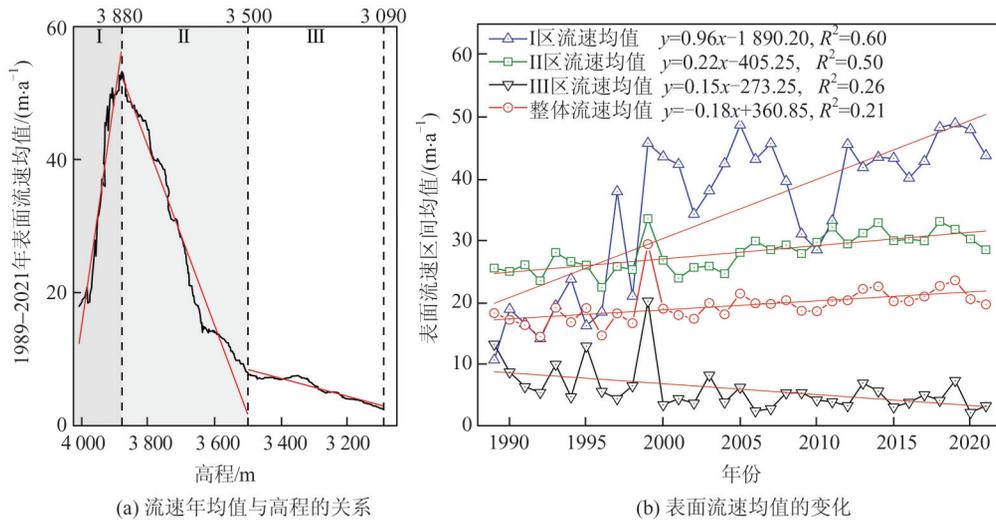


图 12 1989—2021 年科其喀尔冰川表面流速时空变化

Fig. 12 Temporal and Spatial Variation of Surface Velocity of Koxkar Glacier from 1989 to 2021

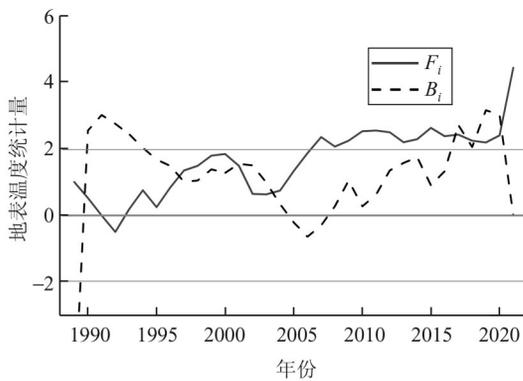


图 13 1989—2021 年科其喀尔地表温度 M-K 趋势检验
Fig. 13 Mann-Kendall Trend Test of Surface Temperature of Koxkar Glacier from 1989 to 2021

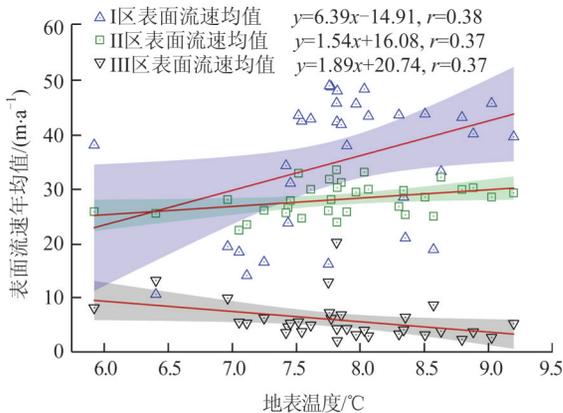


图 14 科其喀尔冰川表面流速与地表温度的相关性检验
Fig. 14 Correlation Test Between Surface Velocity and Surface Temperature of Koxkar Glacier

增长趋势,表现为 I、II 两区间内表面流速与地温的正相关。东西两条主冰川表碛较薄,随着海拔下降,表碛厚度逐渐递增,较厚的表碛阻隔了热量的传递,抑制了冰川的流动和消融。在气候变暖背景下,冰碛在冰舌中下部累积的同时,冰

舌厚度在不断减薄,抑制了物质输送,而冰川消融速率却在显著增加^[33]。两种因素的叠加影响下,冰舌下部物质持续损失,流速不断降低,表现为 III 区表面流速与地温的负相关。综上所述,海拔 3 500 m 以下区间负向的流速变化趋势实际上表明该区域与冰川上部物质变化的关联持续减弱,物质平衡处在亏损状态。

5 结 语

本文验证了结合地形和纹理因素的特征优选随机森林方法应用于表碛识别时的优势,精度相较于其他机器学习方法有显著提升。表碛识别结果显示,研究区内表碛覆盖面积约 24.6 km²,占科其喀尔冰川总面积的 31.7%。

对研究区表碛覆盖冰川 2017—2021 年的流速估算结果进行分析,发现海拔 3 800 m 以上年均流速较高,3 800 m 以下由于物质补给减少、冰碛堆积、坡度变化缓等原因,年均流速递减至 0~10 m/a 之间。消融期内的冰川表面流速远高于年平均,流速峰值呈面状分散在冰川边缘。夏季消融加剧会导致冰川流速增大和流向偏转,冰面湖溃决和冰下融水通道的塌陷也会导致冰流状态发生较大变化。

对研究区表碛覆盖冰川 1989—2021 年的流速变化进行长时序分析,可以得出结论:(1)随着气候变暖,地表温度的上升对研究区冰川表面流速有正向驱动作用,海拔 3 800~4 000 m 区间内流速均值在 33 年间增加约 31.7 m/a,海拔 3 500~3 800 m 区间内流速均值增加约 7.3 m/a;(2)在冰碛累积和冰舌减薄的影响下,物质补给向冰川下

部运输受阻,导致海拔3 090~3 500 m区间的冰川表面流速持续降低,物质平衡处于损失状态。

参 考 文 献

- [1] 秦大河,丁一汇,苏纪兰,等. 中国气候与环境演变评估(I): 中国气候与环境变化及未来趋势[J]. 气候变化研究进展, 2005, 1(1): 4-9.
QIN Dahe, DING Yihui, SU Jilan, et al. Assessment of Climate and Environment Changes in China (I): Climate and Environment Changes in China and Their Projection [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2005, 1(1): 4-9.
- [2] SORG A, BOLCH T, STOFFEL M, et al. Climate Change Impacts on Glaciers and Runoff in Tien Shan (Central Asia) [J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(10): 725-731.
- [3] 张勇,刘时银. 中国冰川区表碛厚度估算及其影响研究进展[J]. 地理学报, 2017, 72(9): 1606-1620.
ZHANG Yong, LIU Shiyin. Research Progress on Debris Thickness Estimation and Its Effect on Debris-Covered Glaciers in Western China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(9): 1606-1620.
- [4] 王晓文,刘巧,张波,等. 近40 a昆仑山口37号冰川冰舌滑塌多源遥感监测与分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(11): 1687-1696.
WANG Xiaowen, LIU Qiao, ZHANG Bo, et al. Monitoring and Analyzing Collapse of KLSK-37 Glacier Tongue in Recent 40 Years with Multi-source Remote Sensing [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(11): 1687-1696.
- [5] 李建江,龙之冠,刘立越,等. 基于遥感影像反演的普若岗日冰原反照率比较[J]. 北京测绘, 2025, 39(10): 1496-1502.
LI Jianjiang, LONG Zhiguan, LIU Liyue, et al. Comparison Analysis of Albedo of Puruogangri Ice Field Based on Remote Sensing Image Inversion [J]. *Beijing Surveying and Mapping*, 2025, 39(10): 1496-1502.
- [6] SHUKLA A, ARORA M K, GUPTA R P. Synergistic Approach for Mapping Debris-Covered Glaciers Using Optical - Thermal Remote Sensing Data with Inputs from Geomorphometric Parameters [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(7): 1378-1387.
- [7] LIPPL S, VIJAY S, BRAUN M. Automatic Delineation of Debris-Covered Glaciers Using InSAR Coherence Derived from X-, C- and L-Band Radar Data: A Case Study of Yazgyl Glacier [J]. *Journal of Glaciology*, 2018, 64(247): 811-821.
- [8] 蒋宗立,丁永建,刘时银,等. 基于SAR的表碛覆盖型冰川边界定位研究[J]. 地球科学进展, 2012, 27(11): 1245-1251.
JIANG Zongli, DING Yongjian, LIU Shiyin, et al. A Study of the Debris-Covered Glacier Limit Based on SAR [J]. *Advances in Earth Science*, 2012, 27(11): 1245-1251.
- [9] BHAMBRI R, BOLCH T, CHAUJAR R K. Mapping of Debris-Covered Glaciers in the Garhwal Himalayas Using ASTER DEMs and Thermal Data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, 32(23): 8095-8119.
- [10] SCHERLER D, WULF H, GORELICK N. Global Assessment of Supraglacial Debris-Cover Extents [J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(21): 11.
- [11] 吴淼,韩用顺,张东水,等. 表碛覆盖冰川信息提取方法: 以波密县为例[J]. 山地学报, 2017, 35(2): 238-245.
WU Miao, HAN Yongshun, ZHANG Dongshui, et al. Information Extraction Method of Debris-Covered Glaciers in Bomi County [J]. *Mountain Research*, 2017, 35(2): 238-245.
- [12] 李荣兴,何美茜,葛绍仓,等. 东南极历史冰流速过估改正[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(10): 1661-1669.
LI Rongxing, HE Meixi, GE Shaocang, et al. Overestimation Correction in Historical Ice Flow Velocity Mapping in East Antarctica [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(10): 1661-1669.
- [13] 尹谢兵,李梦华,俸彬,等. NCC堆叠的SAR POT方法参数优化及雅弄冰川流速提取[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2025, 50(8): 1705-1718.
YIN Xiebing, LI Menghua, FENG Bin, et al. Parameter Optimization of the SAR POT Method for NCC Stacking and the Yanong Glacier Velocity Extraction [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, 50(8): 1705-1718.
- [14] 许君利,张世强,韩海东,等. 天山托木尔峰科其喀尔巴西冰川表面运动速度特征分析[J]. 冰川冻土, 2011, 33(2): 268-275.
XU Junli, ZHANG Shiqiang, HAN Haidong, et al. Change of the Surface Velocity of Koxkar Baxi Glacier Interpreted from Remote Sensing Data, Tianshan Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(2): 268-275.
- [15] ALTENA B, SCAMBOS T, FAHNESTOCK M, et al. Extracting Recent Short-Term Glacier Velocity Evolution over Southern Alaska and the Yukon from a Large Collection of Landsat Data [J]. *The*

- Cryosphere*, 2019, 13(3): 795-814.
- [16] 熊俊麟, 范宣梅, 窦向阳, 等. 藏东南然乌湖流域雅弄冰川流速季节性变化[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(10): 1579-1588.
XIONG Junlin, FAN Xuanmei, DOU Xiangyang, et al. Seasonal Variation of Yalong Glacier's Velocity in Ranwu Lake Basin, Southeast Tibetan Plateau [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(10): 1579-1588.
- [17] 廖虹怡, 柳林. 利用 Landsat8 分析冬克玛底冰川表面反照率时空变化[J]. 测绘地理信息, 2024, 49(3): 19-24.
LIAO Hongyi, LIU Lin. Temporal and Spatial Variation of Surface Albedo of Dongkemadi Glacier Based on Landsat8 [J]. *Journal of Geomatics*, 2024, 49(3): 19-24.
- [18] 韩海东, 刘时银, 丁永建, 等. 科其喀尔巴西冰川的近地层基本气象特征[J]. 冰川冻土, 2008, 30(6): 967-975.
HAN Haidong, LIU Shiyin, DING Yongjian, et al. Near-Surface Meteorological Characteristics on the Koxkar Baxi Glacier, Tianshan [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(6): 967-975.
- [19] HAN H D, WANG J, WEI J F, et al. Backwasting Rate on Debris-Covered Koxkar Glacier, Tuomuer Mountain, China [J]. *Journal of Glaciology*, 2010, 56(196): 287-296.
- [20] XU M, HAN H D, KANG S C, et al. Characteristics of Climate and Melt Runoff in the Koxkar Glacier River Basin, South Slope of the Tianshan Mountains, Northwest China [J]. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2019, 11(6): 435-447.
- [21] 张博, 江航, 江耀, 等. 基于随机森林的汶川县土地覆盖遥感监测与生态系统功能变化分析[J]. 北京测绘, 2025, 39(6): 867-872.
ZHANG Bo, JIANG Hang, JIANG Yao, et al. Remote Sensing Monitoring of Land Cover and Ecosystem Function Change Analysis in Wenchuan County Based on Random Forest [J]. *Beijing Surveying and Mapping*, 2025, 39(6): 867-872.
- [22] 刘逸娴, 刘庆生, 张新, 等. 融合颜色特征的随机森林特征优选的黄河三角洲植被信息分类[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2025, 50(9): 1802-1811.
LIU Yixian, LIU Qingsheng, ZHANG Xin, et al. Classification of Vegetation Information by Integrating Color Features with Multi-feature Optimization of Random Forest in the Yellow River Delta [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, 50(9): 1802-1811.
- [23] BELGIU M, DRĂGUȚ L. Random Forest in Remote Sensing: A Review of Applications and Future Directions [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, 114: 24-31.
- [24] GENUER R, POGGI J M, TULEAU-MALOT C. Variable Selection Using Random Forests [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2010, 31(14): 2225-2236.
- [25] ZHENG X X, HE G J, WANG S S, et al. Comparison of Machine Learning Methods for Potential Active Landslide Hazards Identification with Multi-source Data [J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2021, 10(4): 253.
- [26] 彭博洋, 周春霞, 朱冬雨, 等. 利用 U-Net 的格陵兰冰盖冰面湖提取和面积变化分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(9): 1621-1629.
PENG Boyang, ZHOU Chunxia, ZHU Dongyu, et al. Extraction and Area Change Analysis of Supraglacial Lakes in Greenland Ice Sheet Using U-Net Model [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(9): 1621-1629.
- [27] 鲁红莉, 韩海东, 许君利, 等. 天山南坡科其喀尔冰川消融区运动特征分析[J]. 冰川冻土, 2014, 36(2): 248-258.
LU Hongli, HAN Haidong, XU Junli, et al. Analysis of the Flow Features in the Ablation Zone of the Koxkar Glacier on South Slopes of the Tianshan Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(2): 248-258.
- [28] WU Z, ZHANG H W, LIU S Y, et al. Influence of Debris Cover on Glacier Response to Climate Change: Insights from Koxkar Glacier Using Dynamic Simulation [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2019, 12(16): 506.
- [29] 周中正, 许才军, 刘洋, 等. 岗纳楼冰川表面流速时空变化特征提取及分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(2): 226-233.
ZHOU Zhongzheng, XU Caijun, LIU Yang, et al. Extraction and Analysis of Temporal-Spatial Variation Characteristics of Surface Velocity of the Gangnalou Glacier [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(2): 226-233.
- [30] 管伟瑾, 曹泊, 潘保田. 冰川运动速度研究: 方法、变化、问题与展望 [J]. 冰川冻土, 2020, 42(4): 1101-1114.
GUAN Weijin, CAO Bo, PAN Baotian. Research of Glacier Flow Velocity: Current Situation and Prospects [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2020, 42(4): 1101-1114.