引文格式：张荞,王金媛,汪宙峰,等. 基于国产遥感云平台的川西高原冰川时空分析[J]. 地理空间信息, 2026, 24(4):56-60. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2026.04.012

基于国产遥感云平台的川西高原冰川时空分析

张　荞，王金媛，汪宙峰，王成武，谢　亮
（西南石油大学 地球科学与技术学院，四川 成都 610500）

摘　要：气候持续升温的趋势导致冰川不断后退，进而影响冰川消融速度和规模，对自然和人类造成广泛不利影响。选取川西高原冰川为研究对象，基于国产的PIE-Engine遥感与地理信息云服务平台，采用Landsat系列遥感影像，对比分析波段比值法、雪盖指数法、深度学习方法3种冰川覆盖范围提取方法，并最终选取雪盖指数法对2000—2021年间每隔3 a的研究区内的冰川面积进行计算提取，分析冰川面积变化总特征，并结合地形因子和气象因子，探讨了冰川变化与地形、气候变化的关系。结果表明，2000—2021年冰川面积变化呈现出退缩的趋势，总计减少307.11 km²，并分析得出地形对冰川发育具有限制性，气候是川西高原冰川变化的主导因素。

关键词：PIE-Engine；川西高原；冰川；时序监测
中图分类号：P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2026）04-0056-05

Spatio-temporal Analysis of Glaciers in the Western Sichuan Plateau Based on the Domestic Cloud Platform

ZHANG Qiao, WANG Jinyuan, WANG Zhoufeng, WANG Chengwu, XIE Liang
(School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: The trend of climate warming leads to the continuous retreat of glaciers, which in turn affects the rate and scale of glacier melt, causing widespread adverse effects on nature and humanity. Taking the glaciers in the Western Sichuan Plateau as the research subjects, based on the PIE-Engine remote sensing and geographical information cloud service platform, utilizing Landsat series remote sensing images, we compared the band ratio method, the normalized difference snow index (NDSI) method, and deep learning method three glacier extraction methods. Finally, we chosen the NDSI method to calculate and extract the glaciers from 2000 to 2021 with 3 years interval, and analyzed the overall characteristics of glacier area changes and the relationship between glacier changes and topography, climate change. The result shows that from 2000 to 2021, there is an obvious retreat trend of glaciers, with a total reduction of 307.11 km². The analysis indicates that topography has a restrictive effect on glacier change, and climate is the dominant influence factor of glacier change in the Western Sichuan Plateau.

Key words: PIE-Engine, Western Sichuan Plateau, glacier, temporal sequence monitoring

政府气候变化专门委员会（IPCC）在2019年批准并接受关于气候变化中的海洋和冰冻圈特别报告指出，近年来在全球气候变暖的背景下全球冰冻圈正在迅速萎缩[1]。中科院西北生态环境资源研究院采用给冰川“盖被子”的创新方法以减缓消融速度[2]。冰冻圈快速变化及其影响日益显著引起学者广泛关注，成为地球科学研究中的热点问题之一[3]。

冰川作为冰冻圈的重要组成部分，受区域气候变化的影响，其面积变化可作为监测气候变化的敏感指示器[4]。中国冰川面积分别占世界和亚洲山地冰川总面积的14.5 %和47.6 %，是中低纬度山地冰川分布面积最大的国家[5]，根据第二次冰川编目数据，四川地区的冰川面积占全国1.06 %，拥有冰川600余条，面积约549.12 km²。冰川分布总体上自西向东随地形从青藏高原到四川盆地逐渐减少，甘孜藏族自治州和阿坝藏族羌族自治州是四川地区冰川的主要分布地，其中甘孜藏族自治州冰川面积最大（515.49 km²），占全省的93.88%[6]。

随着遥感技术的发展和云平台的广泛应用，使得冰川长时间序列变化快速监测成为可能[7-11]。相较于Google Earth Engine（GEE）受限于境外服务器导致的跨境数据延迟问题，国产遥感云服务平台PIE-Engine（pixel information expert engine）展现出高效能、低门槛、易获取优势[12]，其基于国产分布式计算框架构建的双语言接口生态（JavaScript/Python），可适配国内科研生态，在保障数据安全的前提下，为科研用户提供低门槛、高性能的遥感数据处理能力。

冰川编目数据仅提供冰川的静态信息，故基于遥

第一作者简介：张荞（1985—），博士，副教授，研究方向为遥感影像解译与地理空间数据分析，E-mail：scrs_qiaozh@163.com。

感云平台长时序监测是理解冰川动态变化的理想手段。本文旨在研究川西区域冰川面积在时间和空间尺度的变化趋势，分析冰川变化规律，研究结果有助于相关部门深入了解冰川变化趋势及其影响，为冰川保护提供技术支持。因此，实现川西地区冰川变化遥感监测对于指导旅游可持续发展政策、防范冰川融水造成的地质灾害有重要现实意义。

1　研究区与数据

1.1　研究区概况

川西高原地处中国西南部，位于中国四川省西部，川西高原冰川主要集中在甘孜藏族自治州和阿坝藏族羌族自治州（27~34°N，97~104°E），此处的高山高原地形和气候为冰川的形成和发育提供了理想的条件[13]，如图1所示。

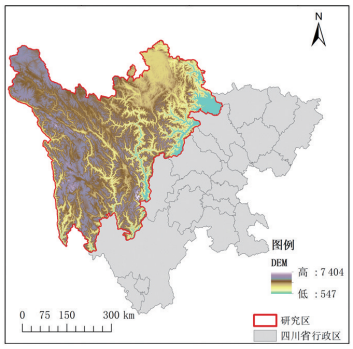


图1　研究区地形及地理位置示意图

审图号：GS京(2022)1061

1.2　数据源

本文主要使用的数据类型及来源如表1所示。

表1　数据类型和来源

类型	年份	分辨率	来源
Landsat遥感影像	2000—2021	30 m	PIE-Engine云平台
ASTER DEM	2000	30 m	https://engine.piesat.cn/
逐月气温、降水数据	1987—2021	1 000 m	国家青藏高原科学数据中心
中国第二次冰川编目数据（CGI v2.0）	2006—2011		https://data.tpdc.ac.cn/
全球冰川数据集7.0	1950—2021		http://www.glims.org/RGI/

2　研究方法

由于CGI v2.0、RGI v7.0是基于30 m空间分辨率的遥感影像进行冰川提取，故本文基于PIE-Engine云平台，依据冰川编目缓冲区对Landsat数据集进行空间筛选，对时间和含云量初步筛选，筛选出2000—2021年6—10月冰雪消融时期且含云量小于30%的Landsat影像，然后进行云掩膜处理排除云对冰川提取的影响。利用PIE-Engine平台提供的在线计算功能和AI平台，进行冰川覆盖范围提取，获取准确的冰川覆盖范围。并结合地形和气候数据，采用GIS空间分析方法，对冰川的时空演变及其影响因素进行分析。

2.1　冰川覆盖范围提取方法

川西高原冰川监测传统研究多采用单一方法（如波段比值法）进行静态分析，本文在川西高原冰川覆盖范围提取时，首次对比采用了波段比值法、雪盖指数法、深度学习方法3种常用方法。

1）波段比值法。基于冰川与其他地表覆盖类型的反射特性差异，通过计算特定波段反射率比值并设适当阈值，可相对便捷地实现对冰川边界的提取。其中TM3/TM5或TM4/TM5比值法在实际应用中效果佳，但该方法在山区阴影下易误判。实际操作中，阈值常选1.5~3.0[14-15]（OLI数据集Band4、Band5、Band6）。

2）雪盖指数法。即归一化积雪指数法（NDSI），是基于植被指数法发展而来的。该方法通过归一化遥感影像中的绿光和短红外波段反射率，有效地从其他地物中区分积雪和冰川。这种方法的精确度相对较高，广泛应用于冰川边界提取研究[16]。根据相关研究，区分冰川与其他地物的一般阈值在0.3~0.6之间[17]，雪盖指数计算公式如式（1）：

$$NDSI=\frac{(Green-SWIR)}{(Green+SWIR)} \tag{1}$$

计算波段比值与雪盖指数时，通过PIE-Engine交互界面反馈与计算结果反复调整阈值，采用等间距阈值法，最终确定波段比值阈值为1.8、雪盖指数阈值为0.366时提取面积与该区域内冰川编目面积较为接近。

3）深度学习方法。基于PIE-Engine AI平台，无代码构建神经网络模型，利用11个波段（包括光谱特征、地形特征、光谱指数）的Landsat TM数据集，共计187张256×256样本，选用DeepLabV3网络，该网络以Xception为骨干网络[18]，引入扩张卷积和ASPP优化结构，提高语义分割性能和运行速率。使用官方提供的NVIDIA T4 Tensor Core进行训练，训练时间约50 min，参数设置如表2所示。

表2　DeeplabV3模型配置参数

参数	值	描述
Batch_size	4	批次大小
Epochs	70	迭代次数
Learning_rate	0.000 3	学习率
Loss	hybrid_loss	损失函数方法
optimizer	Adam	梯度下降法
scheduler	MultiStepLR	学习率衰减策略

2.2　冰川边界提取评价方法

以冰川编目数据为真值进行精度评价，评价方法

采用总体分类精度和kappa系数。总体分类精度（overall accuracy，OA），是指正确分类的像元数在所有像元集合中所占的比重。这一指标可通过混淆矩阵的对角线元素来获取正确分类的像元数量，而总像元数则是所有实际参考类别像元之和，总体分类精度计算公式如式（2）所示：

$$OA = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{N} a_{kk} \tag{2}$$

式中，n为参考像素的总数；a_{kk}为沿混淆矩阵的对角线排列的正确分类的像元数。

Kappa系数是衡量分类一致性的统计指标，综合考虑总体精度和预测与实际的一致性。其值域为-1到1，1表示完全一致，-1表示完全不一致，0为偶然一致。Kappa系数大于0.75表示分类一致性良好。计算公式如式（3）、（4）所示：

$$\text{Kappa} = \frac{p_o - p_c}{1 - p_c} \tag{3}$$

$$p_c = \frac{1}{n^2}\sum_{k=1}^{N}\left(\sum_{i=1}^{N} a_{ki} \times \sum_{i=1}^{N} a_{ik}\right) \tag{4}$$

式中，p_o为总体分类精度；a_{ki}为某一类的真实像元总数；a_{ik}为某一类中被分类的像元总数。

2.3 空间分析方法

在研究冰川变化过程中，地形因子对于理解冰川动态变化至关重要，影响冰川的积累和消融过程，进而改变冰川的覆盖范围。常用的地形特征参数主要涵盖海拔、坡向、坡度、坡长、坡度变率、坡向变率等，这些因素决定气温、降水、太阳辐射和冰雪稳定性等。本文主要通过DEM数据提取了海拔、坡度及坡向3个主要的地形因子来探讨对冰川面积变化的影响。

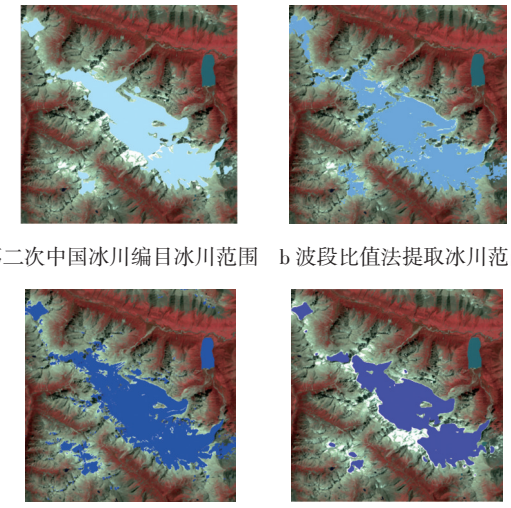
降水和气温是驱动冰川变化的主要气候因素[19]，本研究重点探讨气温与降水对川西高原冰川的影响。针对研究区气象观测数据存在的空间覆盖不足问题，本研究采用经过验证的1 km分辨率栅格数据集，该数据集通过空间插值与多源数据融合技术有效弥补了地面观测的不足[20-21]。由于冰川的特征和区域气候条件等因素，冰川对气温变化的响应具有滞后性。本研究通过交叉相关分析确定9 a作为滞后期分析冰川面积变化，以精确模拟和预测冰川对气温变化的响应。

3 结果与分析

3.1 冰川边界提取及精度验证

为了对比波段比值法、雪盖指数法、深度学习方法3种方法在冰川边界提取中的精度和适用性，选取了德格县新路海现代冰川进行小范围的精度对比分析，并与2004年9月14日现代冰川目录数据进行精度对比。

由图2可知，波段比值法难以区分水体与冰川，雪盖指数法和深度学习方法能较好的提取冰川覆盖范围。定量精度评价如表3所示，深度学习方法的精度最高，其次是雪盖指数法，但是在PIE-Engine云平台使用深度学习方法进行冰川提取的耗时长、效率慢。综合考虑各种方法的优缺点及研究区实际情况，深度学习方法虽然具有较高的精度，但是计算过程耗时较长，且川西范围大，研究时间范围长，需要下载较多的遥感影像，使用遥感云平台进行处理的计算成本较高。波段比值法虽计算简单，但对山区阴影及水体容易误判。而雪盖指数法的精度虽然低于深度学习方法，但是计算效率更好，适合于在遥感云计算平台上快速提取冰川范围。因此本研究基于PIE-Engine Studio利用雪盖指数法在遥感云计算平台自动化提取冰川，降低人工工作量，提升效率。



a 第二次中国冰川编目冰川范围　b 波段比值法提取冰川范围

c 雪盖指数法提取冰川范围　d 深度学习方法提取冰川范围

图2 冰川编目与面积提取局部对比图（德格县新路海现代冰川）

3.2 冰川面积变化总体特征

使用雪盖指数法提取的2000—2021年冰川边界冰川主要随地形分布在川西高原的东西两侧，特别是在东南侧的分布面积最大，范围也最为广泛。随着时间推移，至2021年冰川面积的明显缩减清晰可见。

基于研究区川西高原区域的冰川边界信息，统计分析各时期的冰川变化情况。由表4可知，研究区内冰川面积变化是一个有增有减的过程，但总体呈现出缩减趋势。从2000—2021年，冰川总面积总计减少了307.11 km^2，年均冰川减少量为14.62 km^2，减少量占2000年冰川面积的42.54%，年均退缩比例为2.03%，表明冰川在这一时期内经历了显著的退缩。

表3　冰川边界提取方法评价指标/%

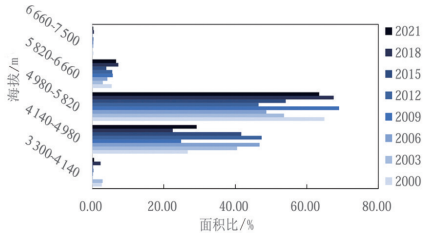
方法	总体分类精度	Kappa系数
波段比值法	98.24	75.68
雪盖指数法	98.40	76.04
深度学习方法	98.75	81.15

表4　2000—2021年川西高原冰川面积变化情况

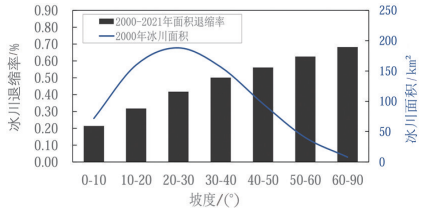
年份	面积/km²	冰川变化量/km²	平均每年变化量/km²·a⁻¹	变化比例/%
2000	721.96			
2003	625.68	−96.28	−32.09	−13.34
2006	697.18	68.50	22.83	10.95
2009	546.25	−150.92	−50.31	−21.65
2012	645.78	99.53	33.18	18.22
2015	597.13	−48.65	−16.22	−7.53
2018	502.60	−94.53	−31.51	−15.83
2021	414.85	−87.75	−29.25	−17.46
总计		−307.11	−14.62	−42.54

3.3　地形因子对冰川面积变化的影响

海拔是直接影响冰川分布的关键性因子。图3a可看出，研究区冰川面积随海拔呈正偏态分布，主要分布在4 140~5 820 m。不同海拔高度冰川面积变化呈现动态的过程，但冰川面积变化总体趋势缩减。冰川面积在4 980~7 500 m海拔范围内变化小，3 300~4 980 m变化大，这一现象表明低海拔冰川对气候因素更为敏感，其面积波动显著；高海拔地区温度低，冰川消融速率相对较慢。在5 820~7 500 m海拔区间，冰川面积占比随时间呈轻微上升趋势，或因低海拔冰川退缩快，使高海拔冰川占比相对提高。



a 2000—2021年川西高原不同海拔冰川面积占比示意图

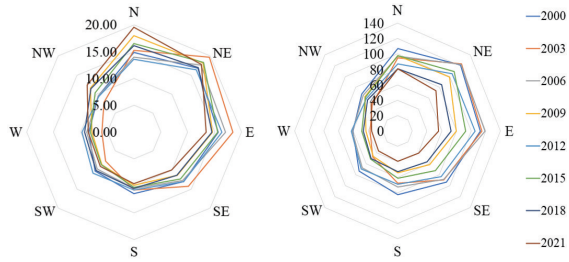


b 不同坡度2000—2021年冰川退缩与冰川分布情况

图3　冰川面积变化与分布情况

坡度影响地表物质流动与能量转换，对冰川形成和发育有一定影响。本文用ASTER DEM数据提取坡度，分为7个等级，分析对冰川分布的影响。结果如图3b所示，川西高原冰川主要分布在10~40°坡度，占比约70 %，坡度大于50°的冰川分布少。冰川面积随坡度增加呈正偏态分布，最佳发育坡度为0~40°。2000—2021年期间各坡度冰川退缩率均呈现减少趋势，坡度大冰川不易发育，表明坡度对冰川发育有一定约束作用。

坡向是影响地表接收阳光的重要地形因子，对冰川变化起关键作用。本研究利用ASTER DEM数据提取坡向信息，将其分为8个方向，分析2000—2021年冰川面积变化。结果如图4所示，川西高原冰川在东北向面积最大，正西向最小，因此适合川西高原冰川发育的方向为东北。2000—2021年间，各个方向冰川均有退缩，其中东北向、东南向、南向冰川面积退缩幅度较大，其他方向面积退缩幅度相对较小。在2000年，东北向冰川面积最多，正西向最少；到2021年，正北向冰川面积成为最大，其退缩比例为2000年的冰川面积的24.72%，而正西向最小，退缩比例为41.67%。



a 不同坡向冰川面积占比/%　　b 不同坡向冰川面积/km²

图4　川西冰川朝向雷达图

3.4　气候因子对冰川面积变化的影响

本研究基于长时间序列的气温、降水及冰川覆盖范围数据进行空间统计分析。图5表明，气温可能是冰川面积变化的关键因素。相关系数在9 a滞后期达到0.552（p <0.05），超出95%置信区间，表明当前气温升高对9 a后的冰川消融有显著促进作用。气温升高时，积雪更易转变为径流，导致冰川覆盖面积缩减；而气温下降时，冰川覆盖面积会增大。研究区内20余年内，平均气温大约每年增长0.019 7℃，而年降水大约每年平均增加0.375 mm，年均冰川面积减少14.62 km²。在2000—2021年期间，研究区内降水量变化较为平稳，呈现略微增加的趋势，但冰川面积呈现出退缩的趋势，未发现年降水量对冰川年际变化的显著影响（p =0.875）。结合2009年年降水量数据、2000年气温数据和2009年冰川面积变化数据推测，降水对冰川面积缩减具有一定的缓解作用，但降水量的缓解能力有限，无法缓解气温迅速且大幅度升高导致的冰川面积缩减的趋势。

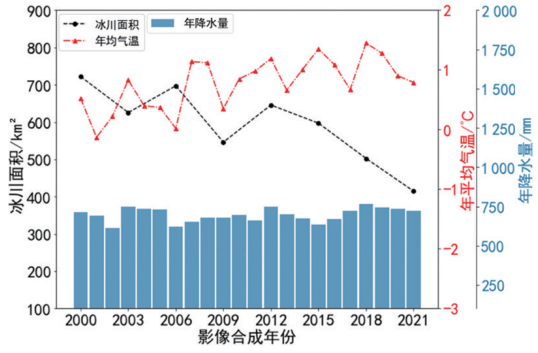


图5 降水、气温和冰川面积变化关系

4 结 语

基于PIE-Engine遥感云平台，对比波段比值法、雪盖指数法、深度学习方法的冰川提取效果，得到如下结论：冰川面积整体呈缩减趋势，2000—2021年，冰川总面积从721.96 km²减少到414.85 km²，减少量占2000年冰川面积的42.54 %；地形对冰川发育具有一定限制作用，川西高原冰川于4 140~5 820 m海拔带、0~40°坡度带和东北向最适合发育；气温升高可能是冰川退缩的主要驱动因素，降水量的缓解能力有限，无法缓解气温迅速升高导致的冰川面积缩减的趋势。

尽管PIE-Engine遥感云平台相较于本地下载再处理效率高，但是仍然存在积雪等因素对冰川边界提取造成影响。本文冰川提取主要依赖于扩大冰川编目缓冲区来确定研究范围，这种方法可能会忽略那些未被编目记录的冰川。未来研究拟从以下三方面进行改进：①结合更多数据源和更先进的算法，提高冰川提取的精准度；②增加气候耦合模型预测冰川变化的动态变化，为冰川保护提供更加精确的科学依据；③深化冰川地形及气候响应机制研究，未来将增加对冰川物质平衡等关键指标的探讨，深入研究冰川对气候的响应。

参考文献

[1] Meredith M, Sommerkorn M, Cassotta S, et al. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate[M]. New York:Cambridge University Press,2019

[2] 谢宜达,孙平安然,王飞腾,等. 地球工程国际研究发展态势及现状:以冰川保护为例[J]. 冰川冻土,2024,46(1):52-64

[3] 钟歆玥,康世昌,郭万钦,等. 最近十多年来冰冻圈加速萎缩:IPCC第六次评估报告之冰冻圈变化解读[J]. 冰川冻土,2022,44(3):946-953

[4] Man X Q, Guo D H, Liu G, et al. Comparison of Different Methods for Monitoring Glacier Changes Observed by Landsat Images[C]//IOP Conference Series:Earth and Environ-mental Science,2014,17(1):12127

[5] 刘潮海,施雅风,王宗太,等. 中国冰川资源及其分布特征:中国冰川目录编制完成[J]. 冰川冻土,2000,22(2):106-112

[6] 施雅风(主编). 中国冰川与环境:现代、过去与将来[M]. 北京:科学出版社,2000

[7] 刘时银,姚晓军,郭万钦,等. 基于第二次冰川编目的中国冰川现状[J]. 地理学报,2015,70(1):3-16

[8] 鄢雪英,张琴琴,张思聪,等. 2005—2015年新疆冰川与常年积雪变化监测研究[J]. 地理空间信息,2019,17(8):36-39

[9] 李晓阳,尹永会. 基于GEE云平台的舟山海域船只多源遥感监测[J]. 地理空间信息,2023,21(1):143-147

[10] Jia l L, Jun Z , Zhong Q L, et al. Elevation Change of the Urumqi Glacier No. 1 Derived from Sentinel-1A Data[J]. Journal of Mountain Science,2021,18(10):2656-2671

[11] Buchelt S, Blöthe H J , Kuenzer C, et al. Deciphering Small-scale Seasonal Surface Dynamics of Rock Glaciers in the Central European Alps Using DInSAR Time Se-ries[J]. Remote Sensing,2023,15 (12):2982

[12] 朱琳,王宇翔. PIE遥感云服务与实践[M]. 北京:科学出版社,2023

[13] 李晓铃,冯建东,王鑫. 川西高原植被状况及其与气候变化关系的遥感研究[J]. 绿色科技,2016,54(14):31-33

[14] 冯雪梅,武红旗,胡贵锋,等. 1987—2021年天山博格达峰地区冰川面积变化特征[J]. 科技资讯,2022,20(20):127-131

[15] 屈冉,申文明,王昌佐,等. 基于波段运算最优方法的冰川遥感信息提取及其变化监测[J]. 地域研究与开发,2013,32(6):154-158

[16] 刘宇硕,秦翔,高思如,等. Landsat5 TM影像在冰川面积信息提取中的精度评价[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2013,41(12):209-219

[17] Onur S. Comparing the Satellite Image Transformation Techniques for Detecting and Monitoring the Continuous Snow Cover and Glacier in Cilo Mountain Chain Turkey[J]. Ecological Indicators,2016,69:261-268

[18] Chen L C, Zhu Y, Papandreou G, et al. Encoder-decoder with Atrous Separable Convolution for Semantic Image Segmentation[C]//Proceedings of the European Conference on Computer Vision(ECCV),2018:801-818

[19] Bao L L , Yi C Z , Cheng H Z. Remote Sensing Detection of Glacier Changes in Tianshan Mountains for the Past 40 Years[J]. Journal of Geographical Sciences, 2004, 14(3):296-302

[20] 段建平,王丽丽,任贾文,等. 近百年来中国冰川变化及其对气候变化的敏感性研究进展[J]. 地理科学进展,2009,28(2):231-237

[21] 汪赢政,李佳,吴立新,等. 1987—2018年祁连山冰川变化遥感监测及影响因子分析[J]. 冰川冻土,2020,42(2):344-356