



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2405300

引用格式:黄丽,李宗仁,李得林,等.基于 Sentinel-2 影像的冰川自动化提取方法试验[J].科学技术与工程,2025,25(18):7710-7718.

Huang Li, Li Zongren, Li Delin, et al. Experiment of automatic glacier extraction methods based on Sentinel-2 image[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(18): 7710-7718.

基于 Sentinel-2 影像的冰川自动化提取方法试验

黄丽^{1,2,3}, 李宗仁^{1,2,3*}, 李得林^{1,2,3}, 辛荣芳^{1,2,3}, 李启萍^{1,2,3}, 魏赛拉加⁴

(1. 青海省地质调查院, 西宁 810012; 2. 青海省遥感大数据工程技术研究中心, 西宁 810012;
3. 青藏高原北部地质过程与矿产资源重点实验室, 西宁 810012; 4. 青海省地质环境监测总站, 西宁 810001)

摘要 近半个世纪以来,受全球气候暖湿化影响,中国冰川消融速度逐渐加剧,加强对冰川分布状况的监测日益重要,如何快速且准确地提取冰川信息,对实现冰川常态化监测工作尤为关键。针对目前冰川自动化提取方法存在的不足,采用面向对象自动分类技术,以青海省门源县为试验区,利用 Sentinel-2 影像与 DEM 数据,分析总结了冰川在多维度特征下的表现规律,并针对冰川提取中存在的边界破碎、山体阴影处的漏提、云误提等现象,利用决策树 C5.0 模型构建了多特征组合的冰川提取规则集与邻域特征的提取规则集,解决了单阶段面向对象自动化提取算法存在的主要问题,形成了基于面向对象的两阶段冰川提取方法,实现了冰川信息的高效自动化提取。试验结果表明:区内冰川在光谱均值、光谱标准差、归一化雪盖指数 NDSI、DEM、邻接度、坡向等特征下具有响应规律,构建的两阶段提取方法能够较好地实现冰川的自动化提取,并在云盖区域和山体阴影区域内具有良好的识别效果,识别精度达 98.50%。

关键词 Sentinel-2 影像; 决策树; 多特征组合; 邻域特征; 冰川自动化提取

中图分类号 TP79; **文献标志码** A

Experiment of Automatic Glacier Extraction Methods Based on Sentinel-2 Image

HUANG Li^{1,2,3}, LI Zongren^{1,2,3*}, LI De-lin^{1,2,3}, XIN Rong-fang^{1,2,3}, LI Qi-ping^{1,2,3}, WEI Sai-la-jia⁴

(1. Institute of Geological Survey of Qinghai Province, Xining 810012, China;

2. Qinghai Remote Sensing Big Data Engineering Technology Research Center, Xining 810012, China;

3. Qinghai Geological Survey Institute, The northern Qinghai-Tibet Plateau Geological Processes and Mineral Resources Laboratory, Xining 810012, China; 4. Geological Environment Monitoring Station of Qinghai Provincial, Xining 810001, China)

[Abstract] Over the past half-century, global warming and humidification have led to an accelerated rate of glacier melting in China, highlighting the increasing importance of monitoring glacier distribution. However, current automated glacier extraction methods have significant limitations, such as boundary fragmentation, omission of glaciers in shaded mountain areas, and misclassification in cloud-covered regions. To address these issues, this study selected Menyuan County in Qinghai Province as the experimental area. Sentinel-2 imagery and DEM data were utilized, applying object-oriented automatic classification technology in combination with the C5.0 decision tree model to develop a multi-feature glacier extraction rule set and a neighborhood feature rule set. An improved two-stage object-oriented glacier extraction method was subsequently proposed. The findings revealed that glaciers exhibited distinct response patterns across various features, including spectral mean, spectral standard deviation, NDSI (normalized difference snow index), DEM (digital elevation model), adjacency, and slope orientation. A two-stage glacier extraction method effectively enabled automatic glacier extraction. It also significantly enhanced the recognition accuracy in cloud-covered and shaded mountain regions, achieving an overall glacier recognition accuracy of 98.50%.

[Keywords] Sentinel-2 image; decision tree; multi-feature combination; neighborhood feature; automatic glacier extraction

以气温升高为主要标志的全球气候变化已导致中国绝大多数冰川处于退缩状态,基于中国两次冰川编目资料,20 世纪 70 年代至 21 世纪第一个 10

年时期,中国冰川面积减少了约 18%^[1-2]。冰川消融加剧,雪线上升,对区域水资源和区域经济社会发展,乃至全球气候变化和海平面变化产生直接

收稿日期: 2024-07-15 修订日期: 2025-03-20

基金项目: 青海省自然资源专项(QHZC-2021-050)

第一作者: 黄丽(1986—),女,汉族,青海民和人,硕士,工程师。研究方向:测绘与遥感技术应用。E-mail:289992860@qq.com。

* 通信作者: 李宗仁(1987—),男,汉族,青海民和人,硕士,正高级工程师。研究方向:资源与环境遥感应用。E-mail:303523234@qq.com。

投稿网址:www.stae.com.cn

或间接影响^[3-4]。在宏观和区域尺度上加强对冰川状况的监测显得尤为重要,特别是通过自动化提取方法实现对冰川覆盖的精准识别更为关键。

目前,针对冰川的自动化提取方法主要包括:①波段运算提取,如雪盖指数法,范慧颖等^[5]基于此法在 Landsat 影像上对山地冰川进行了高精度识别提取,但是此类方法存在阈值难确定、冰川与积雪覆盖区难以识别区分的问题,普适性较差,需要结合其他技术或者方法来综合利用;②传统像素级分类算法提取,主要为监督分类法和非监督分类法^[6];韩惠等^[7]利用此法对西昆仑山崇测冰川区的冰川进行提取,非监督分类结果存在错分裸地与细碎化严重现象;监督分类法可有效提取冰川,且较非监督分类法精度更高,但仍存在冰川漏提问题;③深度学习分类算法提取,如深度卷积语义分割网络;王忠武等^[8]利用上下文感知深度学习语义分割网络实现了 Landsat 影像的冰川提取,实验结果完整性好且能减少山体阴影的漏提取;但深度学习方法的精度和泛化性严重依赖于样本量,而像素级分类方法样本人工标注工作量大;④面向对象技术的信息提取,是将研究对象破碎成同质图斑对象,结合纹理、光谱、形状的多特征进行信息识别,该方法不仅能够避免像素的“椒盐”现象,还能有效结合多维度特征展开分析和信息提取。借助此方法的优势,使得面向对象信息提取技术在土地利用^[9]、变化检测^[10-11]和信息提取^[12-13]方面应用很多。雍万铃等^[14]利用面向对象的技术展开积雪信息提取,相比传统的雪盖数法,提取效果更优。杨佳等^[15]构建了面向对象的改进冰雪指数法,有效解决了地物错分问题,且提高了冰川识别精度。但是,面向对象方法的主要挑战在于高质量的特征选择、有效的分类算法和相似特征对象的误分类,且目前单阶段面向对象自动化提取算法存在的主要问题是对象缺乏更大感受野的特征,也因缺少空间邻域信息而产生孤立、离散、不连通的分类结果^[16]。因此,解决单阶段面向对象方法存在的主要问题,对其进行改进与完善,可实现对冰川更加准确、更加高效地自动化提取。

因此,现以青海省门源县为试验区,以冰川自动化提取为主要研究方向,借助面向对象方法的优势,利用试验区 Sentinel-2 影像分析冰川在不同维度特征上的特点,并利用 C5.0 决策树算法,构建两阶段的冰川提取规则集,以实现试验区高准确度的冰川覆盖自动化提取,为后续冰川监测及冰川自动化提取方法的进一步探索提供一定的数据基础。

1 试验区概况

试验区位于青海省东北部,隶属于青海省海北州藏族自治州,地处祁连山系东端。其东北与河西走廊中部的甘肃省天祝、肃南、山丹县接壤,南与大通县、互助县相连,西与祁连县、海晏县毗邻,如图 1 所示。属高原大陆性气候,年平均气温 1.5℃,境内地形复杂、高低悬殊,北部冷龙岭群峰耸立,南部达坂山层峦叠嶂,西部中低山丘陵滩地相间,东部两山合拢峡谷纵横,地形整体上呈现西北高、东南低的趋势。其中,最高的冷龙岭岗什卡峰海拔达 5 254.5 m,山顶呈现积雪终年不化、冰川银光闪烁的美景。

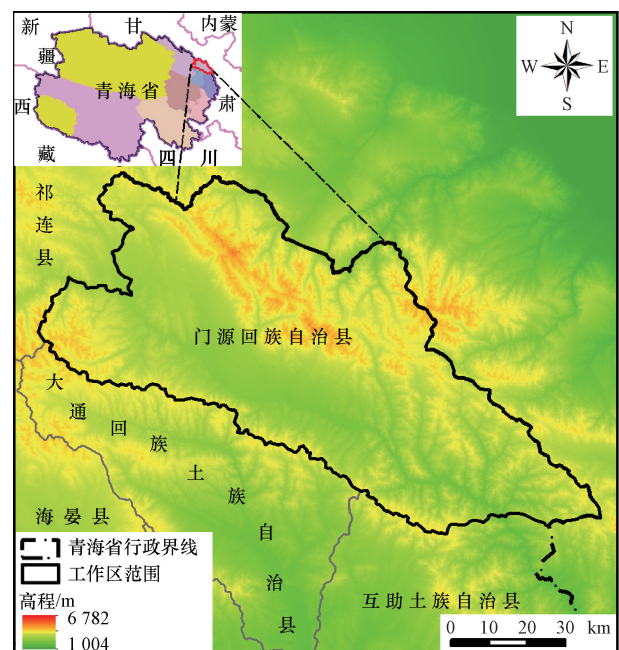


图 1 试验区地理位置及地貌特征图

Fig. 1 Map of geographical location and geomorphic characteristics of the experimental site

2 数据选取与数据预处理

试验区选取青海省门源县 2023 年 Sentinel-2 卫星遥感影像和高程数据 (digital elevation model, DEM) 作为输入数据。Sentinel-2 号卫星搭载一枚高分辨率多光谱成像仪 (multi-spectral imager, MSI), 可覆盖 13 个光谱波段,幅宽可达 290 km,其波段参数如表 1 所示。

首先,利用 SNAP 软件对影像数据进行分辨率重采样,将影像不同波段的分辨率重采样为 10 m;其次,将重采样后数据进行波段融合,并将单景影像进行了镶嵌处理;然后,将镶嵌融合好的遥感影像按照试验区范围进行了裁剪及色彩

增强处理,最终得到了试验区 Sentinel-2 影像,如图 2 所示,分辨率为 10 m。其辅助数据为试验区 DEM 数据分辨率为 30 m,重采样后为 12.5 m,如图 3 所示。

表 1 Sentinel-2 卫星主要波段参数

Table 1 Main band parameters of Sentinel-2 satellite

传感器	波段	波长 / μm	空间分辨率/m
多光谱成像仪	1:海岸/气溶胶波段	0.433	60
	2:蓝波段	0.490	10
	3:绿波段	0.560	10
	4:红波段	0.665	10
	5:植被红边波段	0.705	20
	6:植被红边波段	0.740	20
	7:植被红边波段	0.783	20
	8:近红外波段	0.842	10
	8:A-近红外波段(窄)	0.865	20
	9:水蒸气波段	0.945	60
	10:短波红外波段	1.375	60
	11:短波红外波段	1.610	20
12:短波红外波段	2.190	20	

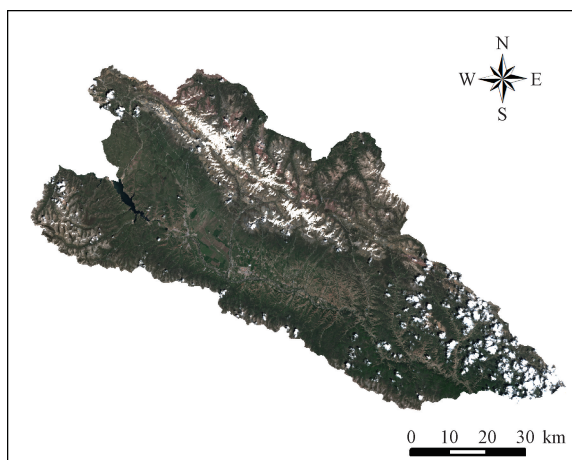


图 2 试验区 Sentinel-2 影像

Fig. 2 Sentinel-2 image of the experimental site

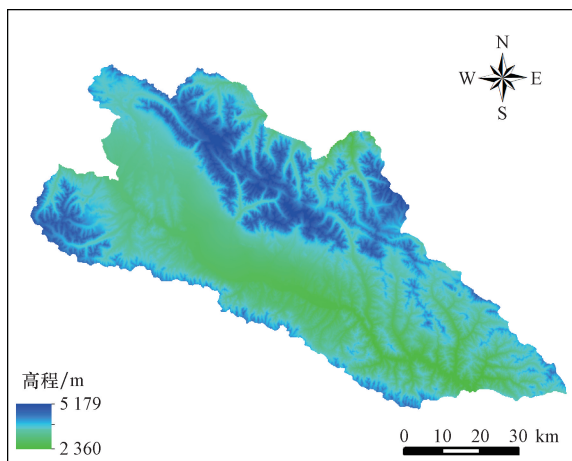


图 3 试验区 DEM 数据

Fig. 3 DEM data of the experimental site

3 试验方法

针对冰川提取中边界破碎、山体阴影漏提取及云误提等问题,设计了两阶段面向对象的提取方法。该方法首先通过多尺度分割获取同质图斑对象,并分析构建冰川提取的多维特征,然后以图斑对象为分析单元,利用 C5.0 决策树模型,对冰川在多维度特征上的规律进行挖掘,构建多特征组合的冰川提取规则集,来进行冰川第一阶段的提取。同时,构建考虑邻域特征及坡度特征的提取规则集,进行冰川第二阶段的提取,最终获取冰川提取结果。总体技术流程如图 4 所示。

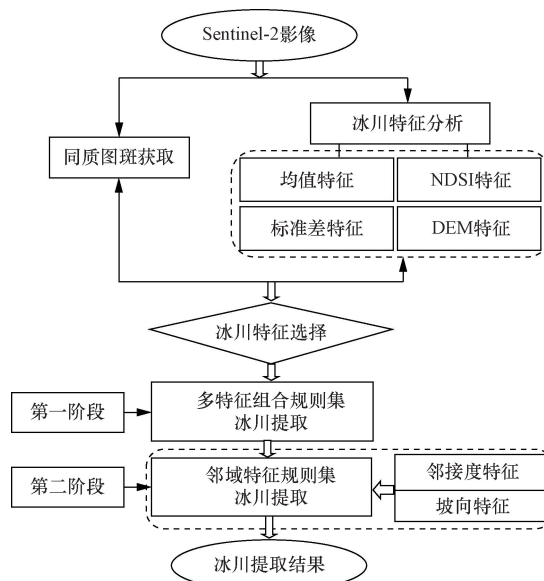


图 4 总体技术流程图

Fig. 4 The overall flow chart

3.1 同质区图斑获取

本文研究采用分形网络演化方法 (fractal net evolution approach, FNEA)^[17] 对遥感影像进行分割。该方法基于影像对象间异质性进行分割合并,异质性由包含对象的光谱和形状差异决定,通过紧致度、形状参数等的设置避免对象边界破碎。FNEA 尺度参数设置为 50,紧致度设置为 0.5,形状参数设置为 0.1。将分割后的同质图斑对象作为信息提取的分析单元,试验区多尺度分割结果如图 5 所示。

3.2 冰川特征分析

代表性全面且精简的特征是高效面向对象分类的基础,本文研究不仅选用面向对象分析中常用的均值特征,同时考虑到冰川的特性而增加了标准差、归一化雪盖指数 (normalized difference snow index, NDSI) 和 DEM 等特征。

3.2.1 均值特征

在均值特征上,冰川在蓝、绿、红、近红波段上,

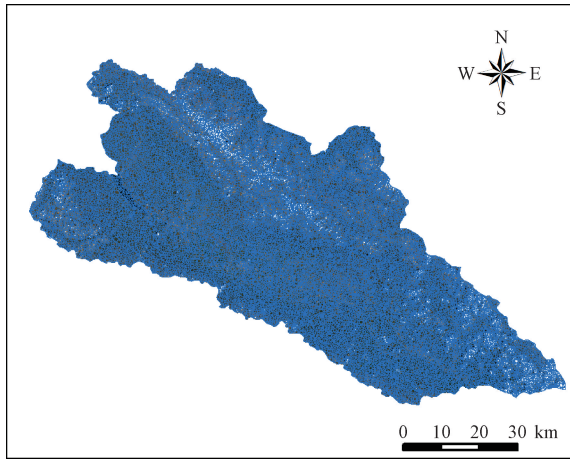


图5 试验区多尺度分割图斑结果

Fig. 5 Multi-scale segmentation results of the experimental site
反射率稍高,均值表现偏高,在短波红外上,吸收率偏高,均值表现偏低。光谱均值是由一个同质图斑对象的所有像素值的平均值,计算公式为

$$\bar{S}_i = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{n} \quad (1)$$

式(1)中: \bar{S}_i 为图斑对象的均值; n 为图斑对象内像素数量; S_i 为图斑对象内单个像素的灰度值。

3.2.2 标准差特征

在标准差特征上,冰川在蓝、绿、红、近红波段上,标准差值表现偏高,在短波红外上,标准差值表现偏低。

标准差能反映一个数据集的离散程度,计算公式为

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S}_i)^2} \quad (2)$$

式(2)中: δ 为图斑对象的标准差。

3.2.3 归一化雪盖指数(NDSI)特征

NDSI是利用绿光波段(G_{REEN})的高反射及短波红外波段1(S_{WIRI})的高吸收特性,组合突显了影像中积雪的覆盖部分,计算公式为

$$\text{NDSI} = \frac{G_{\text{REEN}} - S_{\text{WIRI}}}{G_{\text{REEN}} + S_{\text{WIRI}}} \quad (3)$$

3.2.4 DEM特征

冰川的分布和高程值呈现正相关的关系,DEM特征可以有效地提升冰川的可分辨性。

3.3 多维特征选择与规则集构建

3.3.1 多维特征的选择

为避免分类过程中盲目使用多种特征而导致的计算量急剧增大、分类精度降低、分类特征冗余等问题,需要对分析的特征进行选择。本文研究利用 Pearson 相关系数对所选特征进行相关性分析,

将强相关的特征进行剔除,保留独立性较强的特征,用于后续规则集构建。

Pearson 相关系数计算公式为

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2} \sqrt{n \sum_{i=1}^n y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n y_i\right)^2}} \quad (4)$$

式(4)中: r 为相关系数; n 为特征数组的对象数量; x_i 、 y_i 分别为两个特征数据。

相关系数的绝对值越大,相关性越强;相关系数越接近于1或-1,相关度越强,相关系数越接近于0,相关度越弱。对两个特征之间相关系数 >0.9 的特征,保留其中一个特征即可。筛选后的特征共8个,分别为蓝波段均值(B-Mean)、短波红外1均值(SWIR 1-Mean)、蓝波段标准差(B-Std)、蓝波段标准差(G-Std)、近红外波段标准差(NIR-Std)、短波红外1标准差(SWIR 1-Std)、NDSI特征、DEM特征,特征之间的相关性如表2所示,相关性绝对值均小于0.86,利用双尾检验进行显著性检验,相关性在0.01层面上显著。

3.3.2 多维特征规则集构建

1) C5.0 算法原理

决策树算法是面向对象分类中常用的高效率算法,常见的决策树算法有卡方自动交互检测法分(CHi-squared automatic interaction detector, CHAID)、类与回归树法(classification and regression tree, CART)、QUEST(quick unbiased efficient statistical tree)和C5.0。

本文研究采用适用于大数据分析的C5.0决策树算法,此算法以信息增益率为标准确定最佳分组变量和最佳分割点,其核心概念是信息熵。

假设训练集合 D , $|D|$ 为样本容量,即样本的个数。设有 K 个类 C_k 来表示, $|C_k|$ 之和为 $|D|$, $k=1,2,\dots$,根据特征 A 将 D 划分为个子集 D_1, D_2, \dots, D_n , $|D_i|$ 为 D_i 的样本个数, $|D_i|$ 之和为 $|D|$, $i=1,2,\dots$,记 D_i 属于 C_k 的样本集和为 D_{ik} ,即交集, $|D_{ik}|$ 为 D_{ik} 的样本个数,算法如下。

信息增益的计算公式为

$$H(D) = - \sum_{k=1}^K \frac{|C_k|}{|D|} \log_2 \frac{|C_k|}{|D|} \quad (5)$$

选定 A 的信息熵 $H(D|A)$ 计算公式为

$$\begin{aligned} H(D|A) &= \sum_{i=1}^n \frac{|D_i|}{|D|} H(D_i) \\ &= - \sum_{i=1}^n \frac{|D_i|}{|D|} \sum_{k=1}^K \frac{|D_{ik}|}{|D_i|} \log_2 \frac{|D_{ik}|}{|D_i|} \end{aligned} \quad (6)$$

表2 特征相关性统计表

Table 2 Feature correlation statistics table

特征	B-Mean	SWIR1-Mean	B-Std	G-Std	NIR-Std	SWIR1-Std	NDSI	DEM
B-Mean	1.000							
SWIR1-Mean	-0.349	1.000						
B-Std	0.594	-0.270	1.000					
G-Std	0.541	-0.194	0.894	1.000				
NIR-Std	0.425	-0.073	0.658	0.829	1.000			
SWIR1-Std	-0.150	-0.109	0.179	0.175	0.228	1.000		
NDSI	0.853	-0.738	0.581	0.521	0.383	-0.085	1.000	
DEM	-0.038	0.050	-0.027	-0.021	-0.014	-0.001	-0.051	1.000

信息增益的计算公式为

$$G(D,A) = H(D) - H(D|A) \quad (7)$$

信息增益代表利用特征 A 对数据集 D 分类后混乱程度降低了多少。信息增益越大,分类性越强。

2) 多特征组合规则集构建

输入分隔对象数据和特征,采用 C5.0 决策树模型挖掘冰川提取规则,构建规则集如表 3 所示。

3.4 邻域特征选择与规则集构建

冰川提取中面临山体阴影漏提取的挑战,基于面向对象的单阶段规则集分类分析缺乏对更大感受野邻域特征的考虑,仅从对象自身特征分析很难提取山体阴影处的冰川。本文研究基于多特征组合规则集提取的结果,进一步设置邻接度和坡向特征。

(1) 邻接度特征。针对山体阴影对象漏提取的问题,设计邻接度特征,定义为对象与相邻的冰川对象图斑邻接长度与对象周长的比值。

(2) 坡向特征。对象的坡向定义为对象所有像素坡向的均值。坡向计算方法为八邻域差分法^[18],选择待计算像素周围 3×3 窗口,首先计算南北和东

西方向的高程变化率,然后通过加权差分的方法计算坡向值。为了简化特征,计算的坡向采用相对正北方向的相对坡向,值域为 $[0^\circ, 180^\circ)$ 。

针对邻域特征规则集的构建同样采用 C5.0 算法,进行分类的对象仅为第一阶段判定为非冰川的图斑,构建的规则集如表 4 所示。

4 试验结果与分析

4.1 多特征组合规则集与光谱均值特征规则集对比

为了对比分析多特征组合规则集与常用的光谱均值特征规则集的差异,本文研究同时选取了光谱均值特征,并通过 C5.0 算法挖掘了基于光谱特征的冰川提取规则。利用多特征组合规则集和光谱均值特征规则集分别进行了试验区冰川的提取,同时加入了以中国第二次冰川编目为基础数据并利用高分辨率遥感影像修编的试验区冰川分布真值成果,并将真值成果与两种规则集提取的冰川结果进行了比对,该区域冰川分布真值与基于两种特征规则集冰川的提取结果如图 6 所示。

表3 多特征组合规则集

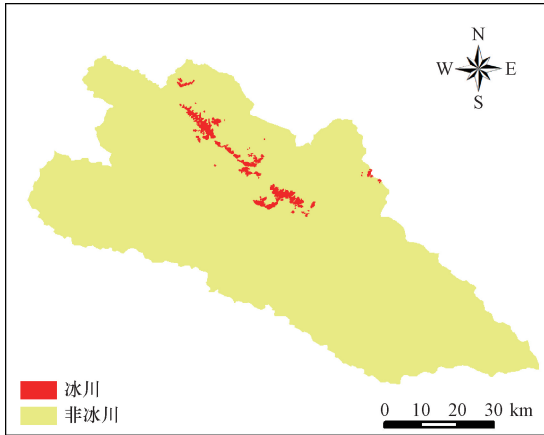
Table 3 Multi-feature combination rule set

类型	提取规则集
冰川	规则 1 IF B-Std $\leq 2\ 012.197$ and NDSI ≤ 0.027 and DEM $> 3\ 862.061$ and SWIR1-Mean $\leq 13\ 325$ and B-Mean $> 18\ 020.387$
	规则 2 IF G-Std $> 4\ 062.874$ and NDSI ≤ 0.113 and DEM $> 4\ 251.944$ and B-Mean $> 18\ 020.387$
	规则 3 IF DEM $> 4\ 269.164$ and B-Mean $> 18\ 020.387$
	规则 4 IF DEM $> 4\ 306.618$ and B-Mean $> 17\ 927.063$
	规则 5 IF NIR-Std $> 1\ 293.764$ and NDSI ≤ 0.027 and DEM $> 3\ 862.061$ and SWIR1-Std $\leq 13\ 325$ and B-Mean $> 18\ 020.387$
	规则 6 IF NDSI ≤ 0.113 and DEM $> 4\ 109.698$ and SWIR1-Mean $\leq 16\ 662.381$ and B-Mean $> 18\ 020.387$
	规则 7 IF SWIR1-Std > 371.375 and G-Std $\leq 4\ 062.874$ and NDSI ≤ 0.113 and DEM $> 4\ 109.698$ and B-Mean $> 18\ 020.387$
	规则 8 IF NIR-Std $> 5\ 799.014$ and NDSI ≤ 0.113 and DEM $> 4\ 109.698$
非冰川	规则 1 IF DEM $> 2\ 360$ and DEM $\leq 4\ 306.618$ and B-Mean $\leq 18\ 020.387$
	规则 2 IF B-Mean $\leq 17\ 927.063$
	规则 3 IF DEM $> 2\ 360$ and DEM $\leq 4\ 109.698$
	规则 4 IF NDSI ≤ 0.113 and DEM $> 2\ 360$ and DEM $\leq 4\ 306.618$ and SWIR1-Mean $> 16\ 662.381$

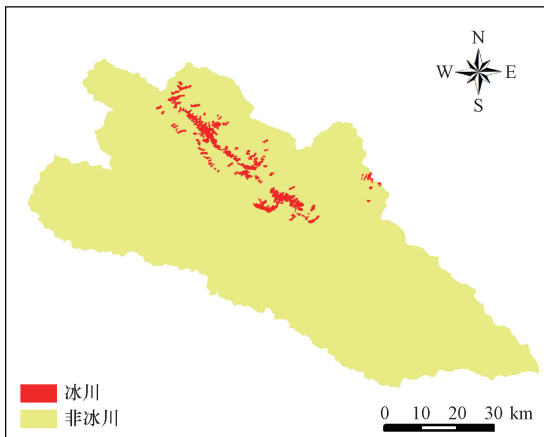
表 4 邻域特征规则集

Table 4 Neighborhood feature rule set

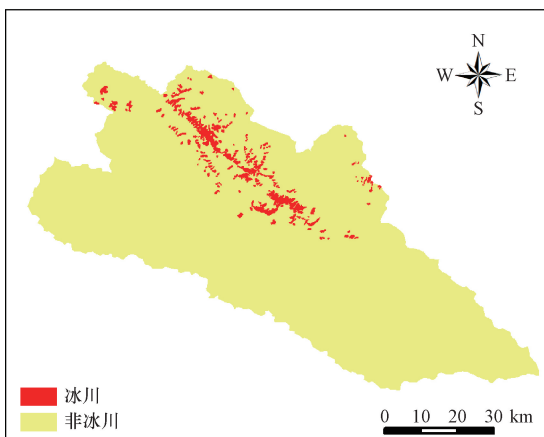
类型	提取规则集	
冰川	规则 1	IF 邻接度 > 0.873
	规则 2	IF 邻接度 ≥ 0.659 and 坡向 ≤ 86.545°
非冰川	规则 1	IF 邻接度 < 0.659 or 坡向 > 86.545°



(a) 试验区冰川分布真值



(b) 试验区冰川多特征组合信息提取结果



(c) 试验区冰川光谱均值特征信息提取结果

图 6 试验区冰川分布真值与提取结果

Fig. 6 Glacier distribution true values and extraction results of the experimental site

从图 6 可以看出试验区内冰川主要分布在北部及东北部方位的山区。对比多特征组合和光谱均值特征两种规则集的提取结果,多特征组合与光谱均值的提取结果可以表现出试验区冰川的整体分布情况,但在光谱均值特征的提取结果中,试验区西北方向有大片明显的对于云的误提取现象。

与此同时,将试验区冰川分布真值、基于多特征组合规则集与光谱均值特征规则集的冰川提取结果进行量化对比,如表 5 所示;该区域冰川分布面积为 69.68 km²,多特征组合特征集与光谱均值特征集提取的冰川面积分别为 99.58 km²和 137.34 km²,分别超出试验区冰川面积真值的 42.91%和 97.10%。

多特征组合与光谱均值特征冰川提取结果的细节如图 7 所示。经对比可知,利用光谱均值特征提取的冰川,存在明显的云误提为冰川的现象,多特征组合冰川提取结果相比光谱均值冰川提取结果效果较优。利用混淆矩阵对多特征组合与光谱均值特征提取的对象结果进行精度评价。利用多特征组合提取结果计算混淆矩阵如表 6 所示,提取的总体精度为 97.87%。利用光谱均值特征提取结果计算混淆矩阵如表 7 所示,提取的总体精度为 92.58%。对比可知,多特征组合的提取精度优势较光谱均值特征组合显著。

表 5 冰川分布真值与提取结果对比量化表

Table 5 Quantitative comparison table of glacier distribution true values and extraction results

量化指标	冰川分布真值	多特征提取结果	均值提取结果
面积/km ²	69.68	99.58	137.34
全区面积占比/%	1.09	1.56	2.15

表 6 试验区多特征组合提取结果混淆矩阵统计表

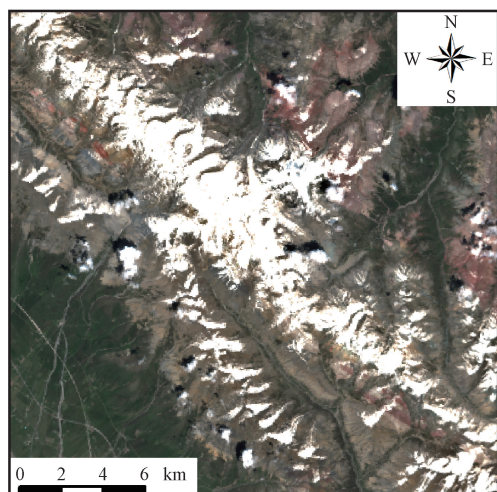
Table 6 Confusion matrix statistical table of multi-feature combination extraction in the experimental site

项目	分类	预测值		
		冰川	非冰川	合计
真值	冰川	5 902	694	6 596
	非冰川	118	31 433	31 551
	合计	6 020	32 127	38 147
总体精度/%		97.87		

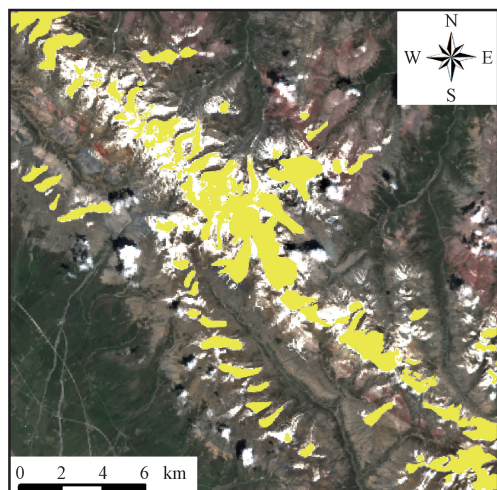
表 7 试验区光谱均值特征提取结果混淆矩阵统计表

Table 7 Confusion matrix statistical table of spectral Mean feature extraction in the experimental site

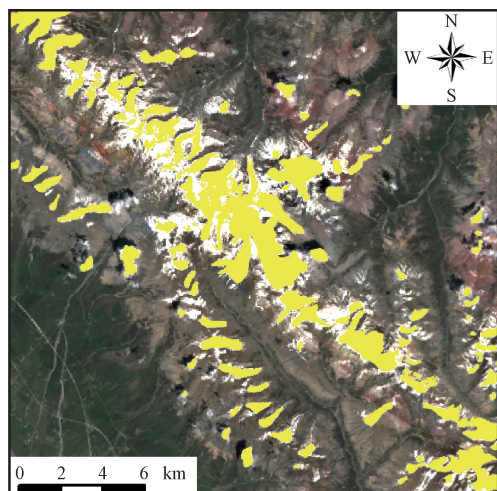
项目	分类	预测值		
		冰川	非冰川	合计
真值	冰川	6 019	0	6 019
	非冰川	2 830	29 298	32 128
	合计	8 849	29 298	38 147
总体精度/%		92.58		



(a) 遥感影像



(b) 多特征组合提取结果

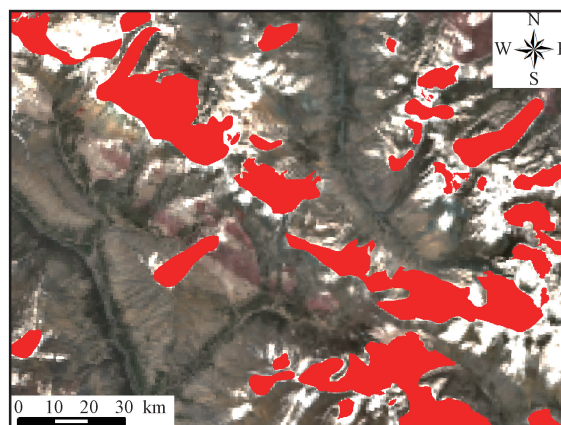


(c) 均值特征提取结果

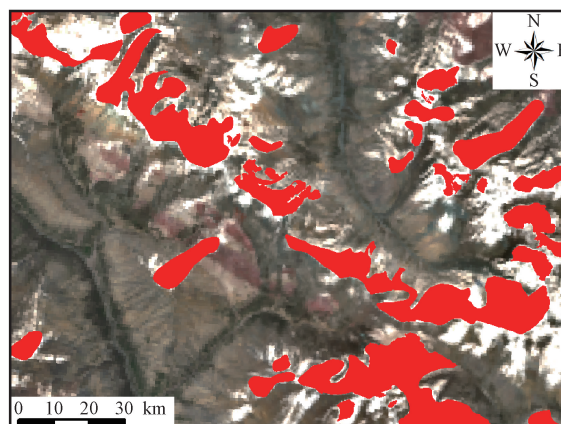
图7 试验区多特征组合与均值特征提取结果细节图
Fig. 7 Detailed graph of the results of multi-feature combination and mean feature extraction in the experimental site

4.2 邻域特征规则集应用效果

对多特征组合规则集提取结果进行第二阶段邻域特征规则集提取后,提取的总体精度 98.50%,较多特征组合提取精度提升了 0.63%。多特征组合与邻域特征提取冰川结果的细节比较如图 8 所示。从图 8 可以看出经过邻域特征规则集提取优化后提取结果空间连续性更好,利用多特征组合在山体阴影处的冰川漏提现象得到明显的改善补充。



(a) 多特征组合提取结果



(b) 邻域特征提取结果

图8 多特征组合与邻域特征提取结果比较

Fig. 8 Comparison between multi-feature combination extraction and neighborhood feature extraction

5 结论

以门源县作为试验区,选取了该区域 Sentinel-2 遥感影像与 DEM 辅助数据,对其进行了冰川自动化提取方法的试验研究,得出如下结论。

(1) 冰川在 DEM、光谱均值、光谱标准差、NDSI、邻接度、坡向等特征上,均具有特定的响应规律;通过面向对象的 C5.0 决策树方法,挖掘出冰川在不同特征上的规则,构建出了多特征组合的冰川提取规则集与邻域特征的提取规则集,实现了高精

度的冰川覆盖自动化提取。

(2)利用多特征组合规则集与光谱均值规则集提取的冰川面积分别 99.58 km² 与 137.34 km²,冰川提取总精度分别为 97.87% 与 92.58%,多特征组合的冰川提取精度显著优于光谱均值特征组合。

(3)利用多特征组合开展的试验区第一阶段的冰川自动化提取,总体精度可达到 97.87%,对比单纯利用光谱均值的冰川提取结果,精度优势更为显著;通过增加邻域特征的第二阶段的提取后,进一步优化了冰川的提取精度,试验区冰川自动化提取的总体精度达到了 98.50%。通过两个阶段的冰川自动化提取方法,有效解决了云覆盖及山体阴影覆盖区域冰川提取中存在的误提、漏提等问题。

参 考 文 献

- [1] 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.
Liu Shiyin, Yao Xiaojun, Guo Wanqin, et al. The contemporary glaciers in China based on the Second Chinese Glacier Inventory [J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(1): 3-16.
- [2] Guo W, Liu S, Xu J, et al. The second Chinese glacier inventory: data, methods and results [J]. Journal of Glaciology, 2015, 61 (226): 357-372.
- [3] 赵聪,梁京涛,王军朝,等. 帕隆藏布流域(波密-然乌段)冰川动态变化遥感分析[J]. 科学技术与工程, 2019, 70(1): 3-16.
Zhao Cong, Liang Jingtao, Wang Junchao, et al. Remote sensing analysis of glacier dynamic changes in Parlung Zangbo River [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 70(1): 3-16.
- [4] 王宁练,姚檀栋,徐柏青,等. 全球变暖背景下青藏高原及周边地区冰川变化的时空格局与趋势及影响[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1220-1232.
Wang Ninglian, Yao Tandong, Xu Baiqing, et al. Spatiotemporal pattern, trend, and influence of glacier change in Tibetan Plateau and surroundings under global warming [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(11): 1220-1232.
- [5] 范慧颖,董武,康宝生,等. 基于遥感图像的山地冰川识别方法对比[J]. 水利水电技术, 2020, 51(5): 47-58.
Fan Huiying, Dong Wu, Kang Baosheng, et al. Remote sensing image-based comparison of methods formountain glacier identification [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51 (5): 47-58.
- [6] 赵春霞,钱乐祥. 遥感影像监督分类与非监督分类的比较[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2004, 34(3): 90-93.
Zhao Chunxia, Qian Lexiang. Comparative study of supervised and unsupervised classification in remote sensing image [J]. Journals of Henan University (Natural Science Edition), 2004, 34 (3): 90-93.
- [7] 韩慧,杨晓辉,赵井东. 西昆仑山崇测冰川区多源遥感影像的冰川信息提取方法研究[J]. 冰川冻土, 2018, 40(5): 951-959.

- Yang Hui, Yang Xiaohui, Zhao Jingdong. A study of glacier information extraction methods based on multisensors remote sensing images in the Chongce Glacier Area, West Kunlun Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(5): 951-959.
- [8] 王忠武,王志盼,尤淑撑,等. Landsat 影像冰川提取的上下文感知语义分割网络法[J]. 测绘学报, 2020, 49(12): 1575-1582.
Wang Zhongwu, Wang Zhipan, You Shucheng, et al. Landsat image glacier extraction based on context semantic segmentation network [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2020, 49 (12): 1575-1582.
- [9] 张静懿,王金亮,胡文英,等. 基于面向对象 CART 决策树的土地利用分类研究 [J]. 地理空间信息, 2023, 21(1): 113-118.
Zhang Jingyi, Wang Jinliang, Hu Wenying, et al. Research on land use classification based on object-oriented CART decision tree [J]. Geospatial Information, 2023, 21(1): 113-118.
- [10] 张沁雨,李哲,彭道黎. 利用面向对象变化向量分析(OCVA)检测土地利用变化[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(6): 166-174.
Zhang Qinyu, Li Zhe, Peng Daoli. Land use change detection based on object-oriented change vector analysis (OCVA) [J]. Journal of China Agricultural University, 2019, 24(6): 166-174.
- [11] 陈磊士,廖玉芳,杜东升. 高分卫星在气候适应型试点城市绿地变化监测中的应用——以常德为例[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(31): 12955-12961.
Chen Leishi, Liao Yufang, Du Dongsheng. Application of GF satellites in monitoring green space change in climate-adapted pilot cities: a case study of Changde [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(31): 12955-12961.
- [12] 牛佳威. 一种面向对象的 CART 决策树火烧迹地提取方法 [J]. 北京测绘, 2023, 37(5): 649-654.
Niu Jiawei. An object-oriented method for extracting burned area using CART decision tree [J]. Beijing Surveying and Mapping, 2023, 37(5): 649-654.
- [13] 刘丽,李士垚,王润,等. 联合深度学习与面向对象分析的卫宁北山露天矿山采场信息提取[J]. 测绘通报, 2024(2): 51-57.
Liu Li, Li Shiyao, Wang Run, et al. Open-pit mining area extraction based on deep learning and object-oriented image analysis in the Weining Beishan Area [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2024(2): 51-57.
- [14] 雍万铃,杨树文,张立峰,等. 面向对象的卫星影像积雪信息提取[J]. 测绘科学, 2016, 41(9): 91-95.
Yong Wanling, Yang Shuwen, Zhang Lifeng, et al. Snow cover extraction from HJ images with object-oriented method [J]. Science of Surveying and Mapping, 2016, 41(9): 91-95.
- [15] 杨佳,薛莎莎,苏永恒,等. 面向对象-改进冰雪指数法消除冰湖干扰提取冰川边界的优越性分析——以各拉丹冬冰川为例[J]. 冰川冻土, 2022, 44(5): 1665-1673.
Yang Jia, Xue Shasha, Su Yongheng, et al. Analysis of superiority of the object-oriented-improved ice and snow index method to eliminate glacial lake interference and extract glacier boundaries:

- taking Geladandong Glacier as an example [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(5): 1665-1673.
- [16] 王永吉, 孟庆岩, 杨健, 等. 一种基于特征选择的面向对象遥感影像分类方法[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(32): 107-113.
Wang Yonghao, Meng Qingyan, Yang Jian, et al. Object based remote sensing image classification based on feature selection method[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(32): 107-113.
- [17] Baatz M. Object-oriented and multi-scale image analysis in semantic networks [C]// Proceedings of the 2nd International Symposium on Operationalization of RemoteSensing. Enschede: ITC, 1999: 16-20.
- [18] 陈艳丽, 李少梅, 刘岱岳. 基于规则格网 DEM 的坡度坡向分析研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2009, 32(5): 36-39.
Chen Yanli, Li Shaomei, Liu Daiyue. Analysis of slope and aspect based on regular grid DEM[J]. Geomatics and Spatial Information Technology, 2009, 32(5): 36-39.