

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2020.0107

YAN Lili, GAO Jianfeng, WANG Jian, et al. Glacier mapping based on GF-1 satellite remote sensing[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(4):1400-1406. [彦立利, 高健峰, 王建, 等. 基于GF-1卫星遥感的冰川边界识别[J]. 冰川冻土, 2020, 42(4):1400-1406.]

基于GF-1卫星遥感的冰川边界识别

彦立利¹, 高健峰², 王建¹, 郝晓华¹

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 甘肃兰州 730000; 2. 中国地质大学(北京)信息工程学院, 北京 100083)

摘要: 高分一号(GF-1)卫星的成功发射开启了国产高分辨率对地观测的新时代, 为探讨国产高分卫星在冰川边界识别中的有效性, 在缺少短波红外和热红外波段的情况下, 将GF-1影像、建立的波段比值Band1/Band4, 数字高程模型和坡度相结合, 采用面向对象的分析方法, 经过反复试验, 确定影像分割和合并尺度, 进而确定冰川边界的知识规则, 最终实现冰川边界的识别。以研究区第二次冰川编目数据集作为参考数据, 采用混淆矩阵的方法对识别结果进行验证, 总体精度和Kappa系数为90.05%和0.79。同时将识别结果与人工修订冰川边界进行对比, 可以发现除少量冰舌末端冰川外, 该方法可以有效地对冰川进行识别。建立的知识规则显示仅仅利用蓝色波段和DEM就可以有效地提取裸冰区, 波段比值、坡度和纹理特征更有助于冰舌的提取。该研究表明GF-1卫星数据可以有效识别冰川范围, 为冰川研究提供可靠的数据和研究基础。

关键词: GF-1; 表碛覆盖冰川; 地形参数; 面向对象

中图分类号: P343.6; P236 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2020)04-1400-07

0 引言

冰川变化不仅是气候变化的敏感指示器, 而且是影响水资源变化、海平面上升、洪水、泥石流等自然灾害发生的重要因素。进入21世纪以来, 气候变暖, 冰川消融加速, 依据近年卫星遥感影像和20世纪60年代航空照片对全国范围内1700多条冰川的分析对比以及对数十条冰川实地考察验证表明, 约82%的冰川处于退缩状态^[1]。作为水资源的冰川、积雪融水是河川径流的重要补给来源, 是我国西部干旱地区绿洲农业赖以生存和发展的生命线^[2-3]。天山是中亚地区冰冻圈对全球变化反应最为敏感的地区, 玛纳斯河发源于天山主峰, 其冰川面积仅次于托木尔峰地区^[4], 在玛纳斯河流域, 冰川融水量约为 $4.422 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占玛纳斯河径流量35.13%, 是玛纳斯河径流的主要补给源之一^[5]。气候变暖导致冰川面积急剧减少, 在其融水补给河川径流的同时, 也常伴有冰川洪水、冰川泥石流、风

吹雪等冰雪灾害发生^[6-7], 势必对流域的社会经济发展、生态平衡和人民生活产生重要的影响。

遥感和GIS技术的发展为冰川变化研究提供了新的手段, 传统的冰川自动提取方法主要包括监督分类和非监督分类、阈值统计法、雪盖指数法和波段比值法, 在各自研究区都取得很好结果^[8-10]。然而受冰川运动和物质平衡变化的影响, 部分山地冰川表面被岩石碎屑(冰碛)物所覆盖^[11-12], 由于表碛覆盖冰川与周围地物极其相似的光谱特性, 甚至实地测量也难以进行区分, 使其成为冰川自动提取中的难点^[11-13]。基于表碛覆盖下冰川的低辐射温度引起的冷却作用, 导致其上的冰碛物具有比周围地物较低的辐射温度, Lougeay^[14]首先提出基于辐射温度来提取表碛覆盖冰川的方法。基于此, Ranzi等^[15]和Taschner等^[16]利用可见光和热红外波段提取表碛覆盖冰川时发现, 当冰碛物厚度超过40~50 cm时, 冰碛物表现出与周围地物相似的温度。考虑到

收稿日期: 2018-06-11; 修订日期: 2019-03-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41801273; 41571371); 中国科技基础资源调查专项(2017FY100503); 资助

作者简介: 彦立利(1983-), 女, 山东聊城人, 助理研究员, 2014年在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所获博士学位, 从事冰雪遥感研究. E-mail: llyan@lzb.ac.cn

通信作者: 王建, 研究员, 从事地图学与地理信息系统研究. E-mail: wjian@lzb.ac.cn.

表碛一般位于冰川消融区, 地形较为平缓, Bishop 等^[17]尝试利用高程、坡度、坡向和曲率等地形参数提取表碛覆盖冰川, 但由于 DEM 数据精度不高, 无法呈现更加详细的地形信息, 使冰川与非冰川过渡区域的表碛物提取仍不准确。Bolch 等^[18-19]分析地形参数和热红外数据的优势与局限性, 将地形参数(坡度、曲率)与 ASTER 影像热红外波段相结合成功地对喜马拉雅山冰川进行了提取, 结果表明综合热红外遥感和地形参数的方法在一定程度上能够提高表碛覆盖冰川识别的精度。同时由于遥感影像具有丰富的光谱信息, 遥感影像也参与到碛覆盖冰川的自动识别中, 并取得较好的结果^[20-22]。总结已有研究成果发现遥感影像分辨率和 DEM 的数据精度都会对表碛覆盖冰川识别的精度产生影响, 高分辨率遥感影像、高精度地形参数以及热红外信息的结合将成为目前表碛覆盖冰川提取的重要方法。综上所述的冰川识别方法大都是基于国外遥感卫星, 基于像元光谱统计的自动分类技术, 而基于国内卫星, 尤其高分辨卫星影像的冰川信息提取相对较少^[23]。我国高分卫星的成功发射, 能够提供高空间分辨率影像, 使得地形效应显著、地物类差异增大, 为冰川监测能力的提高奠定了基础。随着高空间分辨率影像应运而生的面向对象分析(Object-based image analysis, OBIA)方法, 突破了基于像元分类的局限性, 以含有更多

语义信息的多个相邻像元组成的对象为单元^[24], 实现图像的精确分割, 充分发挥高分辨影像在遥感分类中的作用, 为高分辨率遥感影像分类提供了新的途径。

本文以基于 GF-1 WFV(Wide Field of View)宽幅相机多光谱数据自动识别冰川范围, 由于 GF-1 卫星缺少冰川光谱强吸收的短波红外波段, 导致传统的波段比值法不适合高分影像的冰川识别, 需要结合其他数据进行冰川边界的识别。以研究区第二次冰川编目数据集为参考验证该方法的有效性, 为该区域地提供可靠和科学的决策信息, 为国产高分辨率卫星数据的有效性验证和推广应用提供典型示范。

1 研究区概况和数据资料

1.1 研究区概况

玛纳斯河流域地处欧亚大陆腹地, 位于天山北麓, 准噶尔盆地南缘, 地处 $43^{\circ}27' \sim 45^{\circ}21' \text{N}$, $85^{\circ}01' \sim 86^{\circ}32' \text{E}$ (图 1)。玛纳斯河发源于天山北坡依连哈比尔尕山, 属于冰川融水及降雨混合补给型的山溪性河流, 全长 324 km, 水量主要来自高山区的冰雪融水和中高山区降雨。玛纳斯河上游海拔 3 600 m 以上山区大部分面积为冰川及永久性积雪覆盖, 平均雪线为 3 970 m; 海拔 1 500~3 600 m, 降水丰沛, 植被较好, 为径流形成区。由东南流向西

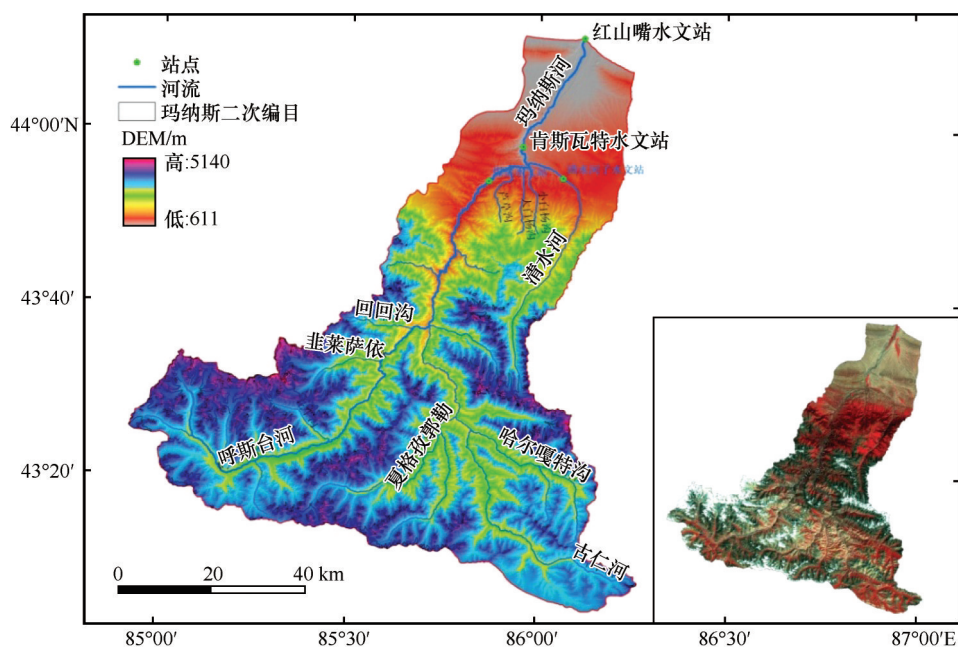


图 1 研究区地理位置图(右下角为研究区对应的高分一号影像)

Fig. 1 Map showing the geographic location of study area (right corner showing the GF-1 image of study area)

北,汇集吉兰德、韭菜萨依、哈熊沟等10条支流,至肯斯瓦特水文站出峡谷,进入前山阶地,出红山嘴水文站,流入冲积扇,被引入各个农牧业灌溉区和石河子市^[25]。

1.2 数据资料

本文所采用的遥感数据为GF-1卫星的多光谱宽幅影像,成像时间为2015年9月1日,GF-1卫星于2013年4月26日成功发射,搭载了两台2 m全色、8 m多光谱相机和四台16 m多光谱相机。同时选用90 m空间分辨率的SRTM数字高程模型作为辅助数据源,SRTM数据由地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>),利用SRTM3 V4.1版本的数据加工而来,可以为冰川识别提供所需的地形参数,如坡度、坡向等。此外,以中国第二次冰川编目数据集为参考数据对自动识别结果进行人工修订,以人工修订边界来验证和评估冰川自动识别结果,其中,第二次冰川编目于2007年启动,玛纳斯河流域第二次冰川编目数据集所用数据源为2007年9月和2009年8月的Landsat ETM+遥感影像^[26]。

2 研究方法

2.1 数据预处理

影像的预处理包括正射校正、辐射定标、大气校正和几何校正,在遥感图像处理平台ENVI5.1支持下,本研究首先直接使用影像原始RPC信息分别对GF-1多光谱影像和全色波段进行正射校正。然后通过辐射定标将影像的数字量化(DN)值转换为地表反射率和辐射度,绝对辐射定标参数(表1)从中国资源卫星应用中心网站获取,对辐射定标后获取的辐亮度影像,采用FLAASH模块进行大气校正。由于GF-1影像与SRTM之间存在明显的几何偏差,还需要进一步进行配准,以带有准确空间位置的SRTM影像为基准影像,确保每个控制点的误差在一个像元内,采用最近邻法进行重采样。

表1 GF-1 WFOV1传感器主要载荷参数及绝对辐射定标系数

Table 1 The main load parameters and absolute radiation calibration coefficient of the GF-1 WFOV1 sensor

载荷	波段	空间分辨率/m	光谱范围/ μm	Gain	Bias
WFOV1	1	16	0.45~0.52	0.1709	-0.0039
	2	16	0.52~0.59	0.1398	-0.0047
	3	16	0.63~0.69	0.1195	-0.0030
	4	16	0.77~0.89	0.1338	0.0274

2.2 冰川识别指标确定

由于GF-1卫星影像缺少冰川光谱强吸收的短波红外波段,导致传统的波段比值法(近红外波段/短波红外波段)和雪盖指数法(NDSI)不适用于GF-1卫星影像的冰川边界识别。通过对比分析,确定蓝色波段是适合高分冰雪识别的最佳波段^[27],因此利用可见光波段和近红外波段建立波段比值(GF1/GF4)。

地形参数和热红外遥感相结合是目前表碛覆盖冰川识别的重要方法,然而GF-1卫星也不具备探测地表温度的热红外波段,基于此,考虑将地形参数作为冰川识别的辅助参数,由SRTM数据生成了DEM相对应的坡度和曲率。将GF-1影像与曲率、坡度进行分析对比,发现曲率与冰川分布没有明显的相关关系。因此,选取DEM和坡度作为冰川的识别指标。同时,选取归一化差值植被指数(NDVI)来区分植被区和非植被区。

2.3 面向对象分析方法

将高分辨的GF-1 WFOV1多光谱影像(B1~B4)和确定的冰川识别指标波段比值(GF1/GF4)、DEM和坡度叠加成一个数据集,采用面向对象的分析方法,对流域内的冰川进行识别。冰舌末端由纯冰川以及冰川和冰碛物的混合物组成,将研究区冰川分为裸冰区和冰舌区两类。面向对象分析方法以一定的灰度、方差等为基础分割原始影像,根据每个分割单元统计的灰度、纹理、形态等特征来进行分类^[28]。图像分割是面向对象分类中的关键技术,分割的好坏直接影响影像的分类精度。面向对象的另一个关键步骤是信息提取,选择合适的特征指数将目标地物和其他地物区分开,是信息提取的关键,需要结合专家知识和经验,对特征指数进行对比分析,确定合适的特征及特征组合实现目标地物的提取。本文的技术路线如图2所示。

根据冰川分布特点,首先将研究区分为两部分,河流左岸为表碛覆盖冰川区,河流右岸和主源为裸冰区。采用软件ENVI 5.1中的Feature Extraction模块,应用边缘检测分割方法对叠加影像进行分割,并对分割对象进行二次合并。经过反复试验,最终确定左边区域影像分割尺度和合并尺度分别为70和70,右边影像分割尺度为80。对分割和合并后的影像,需要选择冰川与其他地物差异明显的特征指数,排除裸岩石、冰湖、河流和滩地等对冰川提取的影响。冰川地处高海拔,通过

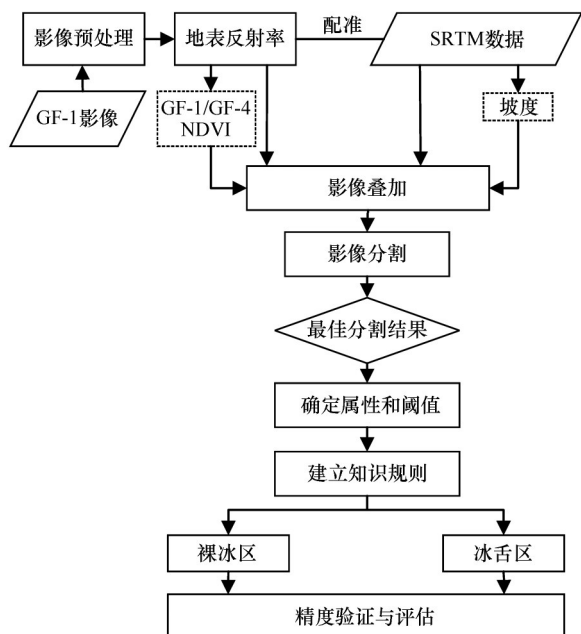


图2 基于 GF-1 影像识别冰川的技术路线图
Fig. 2 The flow chart of glacier mapping based on GF-1 Satellite

DEM 的设定能够避免河流和冰湖等地物的影响，对于难以区分的裸岩石，应用地形因子加以区分，然后结合专家知识经验和目视效果，设置各特征指数的阈值，最终获取的冰川识别知识规则如表 2 所示。

表3 基于 GF-1 卫星的冰川边界提取精度验证
Table 3 Precision verification of the glacier mapping based on GF-1 data

方法	总体精度/%	Kappa 系数	冰川区		非冰川区	
			生产精度/%	用户精度/%	生产精度/%	用户精度/%
GF-1+地形参数	90.05	0.79	89.67	85.95	90.31	92.96

由表 3 可知，本研究提取的冰川边界总体精度和 Kappa 系数分别为 90.05% 和 0.79，其中，与非冰川区识别精度相比，冰川区的生产精度和用户精度都相对较小，分别为 89.67% 和 85.95%。从总体精度来看，利用 GF-1 卫星进行冰川识别是有效的。同时，将基于 GF-1 卫星提取的冰川边界与 2015 年真实冰川边界进行对比(图 3)，可以看出在裸冰区和冰舌上部两者吻合的很好，然而在冰舌末端，尤其被冰碛物覆盖区域，该方法会漏分(如图 3 蓝色)和错分(如图 3 绿色)少量冰川，此外，部分难以区分的积雪也被划分为冰川。统计冰川真实面积和识别面积得出，2015 年玛纳斯河流域冰川面积为 475.03 km²，基于 GF-1 自动识别的冰川面积为

表2 冰川识别的知识规则		
Table 2 The knowledge rule for glacier recognition		
类型	裸冰	冰舌
左岸	band1>0.079, DEM>3 761 m	slope<12.9, 1.32<band1/band4<1.8, tex(band1)>0.004, band2>0.048; slope>12.9, 1.40<band1/band4<1.8, tex(band1)>0.07, band2>0.048
右岸	band1>0.074, DEM>3 302 m	slope<24, 1.28<band1/band4<1.8, tex(band1)>0.006, band2>0.052; 24<Slope<35, 1.35<band1/band4<1.8, tex(band1)>0.006, band2>0.052

注：所有的特征指数都为平均值 (mean)，tex 表示纹理特征。

3 结果与分析

为验证 GF-1 影像识别冰川的有效性，本研究采用混淆矩阵和 Kappa 系数来验证和评估使用方法的有效性。首先将河流左岸和右岸所识别的冰川边界进行合并，并将裸冰区和冰舌区划分为冰川区，将其余地物划分为非冰川区。以玛纳斯河流域第二次冰川编目数据为参考，对冰川识别结果进行人工修正，获取研究区 2015 年的真实冰川边界。通过随机生成点的方法获取地物验证点，将随机产生的点作为地面真实值对冰川提取结果进行验证，总共选取 7 610 个点，其中，非冰川区验证点为 4 449 个，冰川区为 3 161 个，精度评价结果如表 3 所示。

501.09 km²，面积误差为 5.6%，经过以上分析可以发现面积误差集中在部分冰舌末端的漏分、部分裸岩石和积雪的错分，其中，部分积雪被误划分为冰川是导致最终识别的冰川面积偏大的主要原因。

根据建立的冰川识别知识规则和提取结果发现，仅仅利用蓝色波段和 DEM 进行纯冰川识别就能达到很好的效果，所建立的波段比值 (band1/band4) 适于识别冰舌区域，针对冰舌末端的冰碛物，光谱相似的裸岩石可以通过坡度、植被指数等来区分。对于冰舌末端，尤其冰碛物来说，纹理特征和坡度是区分冰川与其他地物的有效因子。

总体来说，GF-1 卫星影像在缺少热红外和短波红外的情况下，在识别冰川方面是有效的，错

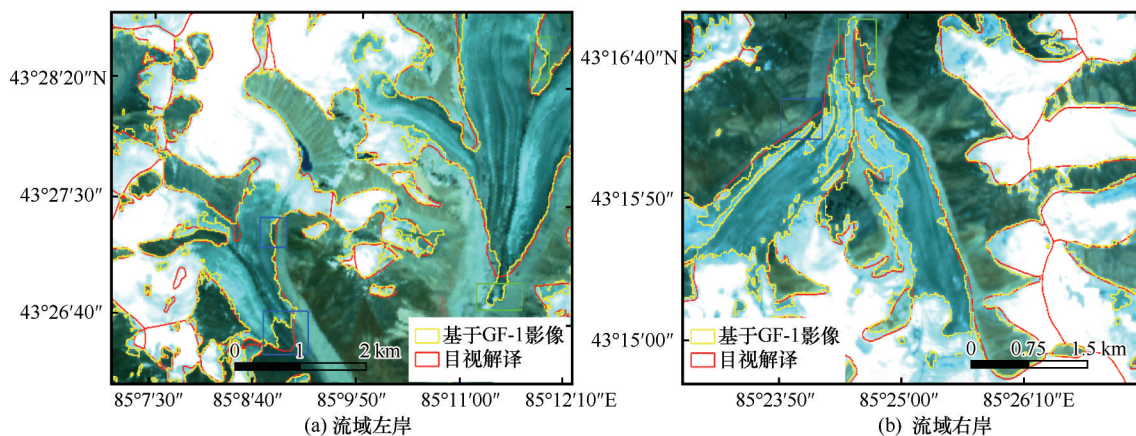


图3 冰川识别结果对比图

Fig. 3 Comparison of the boundaries of the identified glaciers

分和漏分的裸岩石所占面积不多,面积误差主要来自于河流左岸北部的积雪。同时采用面向对象方法将影像划分为图斑,避免了基于像元分类产生的大量“椒盐效应”,大大减少了人工修订的工作量,能够快速获取冰川的真实面积。

4 结论与展望

由于GF-1号卫星影像缺少热红外和短波红外波段,传统的波段比值方法不适用于GF-1卫星影像,本文通过对比分析建立高分波段比值,同时结合DEM、坡度等提取流域内冰川,主要结论与展望如下:

(1) 利用混淆矩阵的方法对冰川识别结果进行精度验证,显示冰川信息提取的总体精度为90.05%, Kappa系数为0.79。通过与目视解译边界进行比较,发现该方法可以很好的识别出冰舌上部的纯冰川区域和部分冰碛物。然而部分裸岩石也被错分为冰川,尤其在坡度、高程和光谱上都和冰舌末端难以区分,此外,还有部分积雪的错分,一定程度上降低了冰川边界自动提取的精度。

(2) 面向对象方法避免了传统分类存在的“椒盐噪声”,即使对冰川存在错分和漏分,仍在一定程度上减少了人工修正的工作量。检验特征指数和阈值的设定是信息提取精度的关键步骤,仍需要结合专家知识经验,才能快速的确定指数和阈值,未来研究中引入新的理论,如粗糙集理论,对波段进行优化和阈值自动确定。如何快速高效的实现面向对象分析方法的步骤,仍需要进一步进行讨论。

(3) 高分辨卫星影像具有的空间分辨率和时间

分辨率在冰川监测中具有独特的优势,本研究仅仅利用蓝色波段就可以很好的提取纯冰川,即使缺少热红外波段和远红外波段也能很好的提取冰舌末端,甚至是冰碛物,证明国产高分辨率卫星在冰川识别中是可行的,但对于特别难以区分的积雪、部分裸岩石和冰舌末端信息,仅利用高分影像难以实现自动提取。在今后的研究中应该将高空间分辨率光学影像与SAR影像联合进行冰川识别,2016年8月发射的GF-3合成孔径雷达卫星为冰川识别提供了数据支持,为联合国产高分卫星在冰川研究中提供了研究基础。

参考文献(References):

- [1] Ren Jiawen, Ye Baisheng, Ding Yongjian, et al. Initial estimate of the contribution of cryospheric change in China to sea level rise[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(14): 1084–1087. [任贾文, 叶柏生, 丁永建, 等. 中国冰冻圈变化对海平面上升潜在贡献的初步估计[J]. 科学通报, 2011, 56(14): 1084–1087.]
- [2] Shen Yongping, Su Hongchao, Wang Guoya, et al. The responses of glaciers and snow cover to climate change in Xinjiang (I): hydrological effects [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(3): 513–527. [沈永平, 苏宏超, 王国亚, 等. 新疆冰川、积雪对气候变化的响应(I): 水文效应[J]. 冰川冻土, 2013, 35(3): 513–527.]
- [3] Yin Zhenliang, Feng Qi, Liu Shiyin, et al. The application progress of hydrological model in quantifying the contribution of glacier runoff to total watershed runoff [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(1): 248–258. [尹振良, 冯起, 刘时银, 等. 水文模型在估算冰川径流研究中的应用现状[J]. 冰川冻土, 2016, 38(1): 248–258.]
- [4] Yuan Guoying. Agricultural ecological environment protection and rational utilization of resources of Manas River basin in Xinjiang, China [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 1993, 7(3): 463–465. [袁国映. 中国新疆玛纳斯河流域农业生态环境资源保护与合理利用[J]. 干旱区资源与环境, 1993, 7(3): 463–465.]
- [5] Xu Suning, Yang Jingchun, Li Youli. Fluctuations of dis-

- charge rate of Manas River and its response to climatic changes during the recently 50 years[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2004, 20(6): 65–68. [徐素宁, 杨景春, 李有利. 近 50 a 来玛纳斯河流量变化及对气候变化的响应[J]. *地理与地理信息科学*, 2004, 20(6): 65–68.]
- [6] Shen Yongping, Su Hongchao, Wang Guoya, et al. The responses of glaciers and snow cover to climate change in Xinjiang(II): hazards effects[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(6): 1355–1370. [沈永平, 苏宏超, 王国亚, 等. 新疆冰川、积雪对气候变化的响应(II): 灾害效应[J]. *冰川冻土*, 2013, 35(6): 1355–1370.]
- [7] Mao Weiyi, Fan Jing, Shen Yongping, et al. Variation of extreme flood of the rivers in Xinjiang region and some typical watersheds from Tianshan Mountains and their response to climate change in recent 50 years[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(5): 1037–1046. [毛伟峰, 樊静, 沈永平, 等. 近 50 a 来新疆区域与天山典型流域极端洪水变化特征及其对气候变化的响应[J]. *冰川冻土*, 2012, 34(5): 1037–1046.]
- [8] Paul F. The New Swiss glacier inventory 2000 application of remote sensing and GIS[D]. Zurich: University of Zurich, 2003.
- [9] Xu Junli, Liu Shiyin, Zhang Shiqiang, et al. Glaciers fluctuations in the Karamilan-Keriya River watershed in the past 30 years[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(3): 312–318. [许君利, 刘时银, 张世强, 等. 塔里木盆地南缘喀拉米兰河克里雅河流域内流区近 30 a 来的冰川变化研究[J]. *冰川冻土*, 2006, 28(3): 312–318.]
- [10] Zhang Shiqiang, Lu Jian, Liu Shiyin. Deriving glacier border information on Qinghai Tibet by TM spectrum image[J]. *Journal of Geomatics and Information of Wuhan University*, 2001, 26(5): 435–440. [张世强, 卢健, 刘时银. 利用 TM 高光谱图像提取青藏高原喀喇昆仑山区现代冰川边界[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2001, 26(5): 435–440.]
- [11] Paul F. Changes in glacier area in Tyrol, Austria, between 1969 and 1992 derived from Landsat 5 thematic mapper and Austrian Glacier Inventory data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(4): 787–799.
- [12] Paul F, Kaab A, Maisch M, et al. Rapid disintegration of Alpine glaciers observed with satellite data[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(21): 163–183.
- [13] Feng Tong, Liu Shiyin, Xu Junli, et al. Glacier change of the Yarkant River basin from 1968 to 2009 derived from the First and Second Glacier Inventories of China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(1): 1–13. [冯童, 刘时银, 许君利, 等. 1968–2009 年叶尔羌河流域冰川变化—基于第一、二次中国冰川编目数据[J]. *冰川冻土*, 2015, 37(1): 1–13.]
- [14] Lougeay R. Detection of buried glacial and ground ice with thermal infrared remote sensing[C]//Advanced Concepts and Techniques in the Study of Snow and Ice Resources, National Academy of Sciences, Washington, DC, 1974.
- [15] Ranzi R, Grossi G, Iacovelli L, et al. Use of multispectral ASTER images for mapping debris-covered glaciers within the GLIMS Project[C]//IGARSS 2004: IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings, Volumes 1–7, 2004: 1144–1147.
- [16] Taschner S, Ranzi R. Comparing the opportunities of LANDSAT-TM and ASTER data for monitoring a debris covered glacier in the Italian Alps within the GLIMS project[C]//IGARSS 2002: IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium and 24th Canadian Symposium on Remote Sensing, Volumes I-Vi, Proceedings, 2002: 1044–1046.
- [17] Bishop M P, Bonk R, Kamp J U, et al. Terrain analysis and data modeling for alpine glacier mapping[J]. *Polar Geography*, 2001, 25(3): 182–201.
- [18] Bolch T, Buchroithner M, Peters J, et al. Identification of glacier motion and potentially dangerous glacial lakes in the Mt. Everest region/Nepal using spaceborne imagery[J]. *Natural Hazards & Earth System Sciences*, 2008, 8(6): 1329–1340.
- [19] Bolch T, Buchroithner M, Pieczonka T, et al. Planimetric and volumetric glacier changes in the Khumbu Himal, Nepal, since 1962 using Corona, Landsat TM and ASTER data[J]. *Journal of Glaciology*, 2008, 54(187): 592–600.
- [20] Paul F, Huggel C, Kaab A. Combining satellite multispectral image data and a digital elevation model for mapping debris-covered glaciers[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89(4): 510–518.
- [21] 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.
- [22] Robson B A, Nuth C, Dahl S O, et al. Automated classification of debris-covered glaciers combining optical, SAR and topographic data in an object-based environment[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 170: 372–387.
- [23] Fan Xiaobing, Yan Lili, Xu Jinghua, et al. Analysis of glacier change in Manas River basin in the last 50 years based on multi-source data[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(5): 1188–1198. [樊晓兵, 彦立利, 徐京华, 等. 基于多源数据的近 50 a 玛纳斯河流域冰川变化分析[J]. *冰川冻土*, 2015, 37(5): 1188–1198.]
- [24] Cao Bao, Qin Qiming, Ma Haijian, et al. Application of object-oriented approach to SPOT5 image classification: a case study in Haidian District, Beijing City[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2006, 22(2): 46–49. [曹宝, 秦其明, 马海建, 等. 面向对象方法在 SPOT5 遥感图像分类中的应用——以北京市海淀区为例[J]. *地理与地理信息科学*, 2006, 22(2): 46–49.]
- [25] Hao Jun. Evolution regularity and characteristics of runoff and flood[J]. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 2010, 16(10): 1170–1172. [郝军. 玛纳斯河径流与洪水特征分析及演变规律研究[J]. *水利科技与经济*, 2010, 16(10): 1170–1172.]
- [26] Guo Wanqin, Liu Shiyin, Yao Xiaojun, et al. The second glacier inventory dataset of China (Version 1.0)[DS]. Lanzhou: Cold and Arid Regions Science Data Center, 2014.
- [27] Xiao Pengfeng, Feng Xuezhi, Xie Shunping, et al. Research progresses of high-resolution remote sensing of snow in Manasi River basin in Tianshan Mountains, Xinjiang Province[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 2015, 51(5): 909–920. [肖鹏峰, 冯学智, 谢顺平, 等. 新疆天山玛纳斯河流域高分辨率积雪遥感研究进展[J]. *南京大学学报(自然科学)*, 2015, 51(5): 909–920.]
- [28] Gong Peng. Some forefront problems of remote sensing science and technology[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2009, 13(1): 13–23. [宫鹏. 遥感科学与技术中的一些前沿问题[J]. *遥感学报*, 2009, 13(1): 13–23.]

Glacier mapping based on GF-1 satellite remote sensing

YAN Lili¹, GAO Jianfeng², WANG Jian¹, HAO Xiaohua¹

(1. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. School of Information Engineering, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: GF-1 satellite's successful launch opens a high resolution satellite earth observation. To discuss the effectiveness based on GF-1 satellite in the absence of short-wave infrared and thermal infrared bands in mapping glacier, in this study, glaciers are mapped based on the object-oriented method using GF-1 images, band ratio of Band 1 and Band 4, digital elevation model and slope information. The segmentation and merge levels and rules of glacier mapping were defined by trial and error, then the boundary of glacier was obtained. Confusion matrix was used to test and verify the results based on the Second Glacier Inventory Dataset of China (Version 1.0), with overall accuracy and Kappa confidence of 90.05% and 0.79. Meanwhile, comparing this result with the result by visual revision showed that this approach could distinguish glacier well, except for the glacier terminal, the rule for glacier indicated blue band and DEM could distinguish ice from its surrounding, and the band ratio, slope and texture characteristic were helpful for extracting glacier terminal. This study showed that GF-1 satellite could map the boundary of glacier effectively, and could provide reliable data and research foundation for glacier research.

Key words: GF-1; debris-covered glaciers; topographic parameters; object-oriented

(责任编辑: 刘时银; 编辑: 周成林)