基于GF-1的青藏高原东南部积雪分布 及MODIS积雪产品适用性研究

蒲旭凡¹, 丁永建², 侯丽陶¹, 张小文¹, 张世强^{1*}

(1. 西北大学城市与环境学院, 西安 710127; 2. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 兰州 730000)

摘要: 青藏高原东南部海拔高, 地形复杂, 云量大, 准确掌握该地区的积雪分布特征对于积雪灾害防治非常重要。论文以2013—2019年冬季积雪累积期云量符合要求的35景高分一号(GF-1)影像为基础, 将全色影像和多光谱影像融合为2 m分辨率影像, 通过目视解译获取了研究区积雪的空间分布特征, 结合改进后的30 m分辨率SRTM DEM, 探讨了地形对积雪分布的影响。结果表明: 积雪像元在研究区范围内占比为33.1%。积雪的垂直分布特征明显: 积雪在高程带4000~5000 m(高海拔)处分布较集中, 积雪面积占比为18.1%; 在0~2000 m、2000~3000 m和6000~7000 m处积雪面积占比均不到0.1%。积雪在北坡、东北坡的分布比例较高, 均为15%以上; 在南坡、西坡、西南坡、东南坡分布比例较低, 均为10%左右。将基于GF-1影像获取的积雪分布分别与同日获取的根据MODIS V6积雪产品计算的积雪比例(MODIS FSC)和积雪分布的对比表明, 64.4%的MODIS FSC像元绝对误差不超过10%, MODIS积雪分布产品对含雪像元的漏分率和误分率平均为33.8%和32.7%, 说明MODIS积雪产品在研究区的精度还具有较高的不确定性, 其对低覆盖积雪反演的精度较差。这表明利用MODIS积雪产品研究青藏高原东南部积雪的时空变化特征时还需要对其积雪反演算法进行改进, 同时亟需加强地面观测和基于多源遥感数据的积雪研究。研究结果可为青藏高原东南部雪冰灾害防治提供支撑。

关键词: 积雪; 高分辨率; MODIS积雪产品; 青藏高原东南部

积雪对于全球水循环、能量收支平衡以及表征气候变化具有重要的意义^[1]。在冰雪融水补给河川径流的同时, 冰崩、雪崩、风吹雪、沟道冰、雨蚀雪、冰雪洪水等灾害也会随之发生, 对道路等工程建设和运营维护带来重大影响。在全球变暖的影响下, 冰雪洪水频率和强度增加及其间接引起的水土流失等多种生态问题使经济损失加大^[2-4]。

青藏高原东南部积雪时间长, 分布范围广, 多分布于高山区, 地形复杂, 雪冰灾害及其影响对当地居民生命安全和经济发展产生较大威胁^[5]。20世纪90年代以来藏东南地区积雪灾害总频次呈增长

趋势^[6], 特别是2018年发生的冰崩并阻塞雅鲁藏布江灾害, 故必须对藏东南地区的冰雪灾害高度关注。其中, 青藏高原东南部, 海拔高, 地形复杂, 人烟稀少, 气象站站点稀疏, 云量丰富, 已有的基于地面的积雪观测资料非常匮乏, 满足云覆盖率要求的可见光卫星遥感影像非常有限, 这些导致对青藏高原东南部冰雪的时空变化特征了解不多, 如何利用现有资源在短期内对研究区潜在的冰雪灾害进行有效识别和应对, 对相关遥感产品的精度进行评估, 亟待开展相关研究。

目前, 基于多光谱影像提取积雪分布的理论和

收稿日期: 2020-02-24; 修订日期: 2020-08-31。

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0201); 国家自然科学基金重点项目(41730751)。[Foundation: Funding for the Second Comprehensive Research Expedition on the Qinghai-Tibet Plateau, No. 2019QZKK0201; Key Program of the National Natural Science Foundation of China, No. 41730751.]

第一作者简介: 蒲旭凡(1998—), 女, 硕士生, 研究方向为冰冻圈积雪遥感。E-mail: 201920834@stumail.nwu.edu.cn

*通信作者简介: 张世强(1973—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事流域系统中各要素水循环的观测、遥感反演与模拟等研究。

E-mail: zhangsq@lzb.ac.cn

引用格式: 蒲旭凡, 丁永建, 侯丽陶, 等. 基于GF-1的青藏高原东南部积雪分布及MODIS积雪产品适用性研究[J]. 地理科学进展, 2021, 40(3): 477-486. [Pu Xufan, Ding Yongjian, Hou Litao, et al. Characteristics of snow cover in the southeastern Tibetan Plateau based on GF-1 and applicability of MODIS snow cover products. Progress in Geography, 2021, 40(3): 477-486.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2021.03.011

应用体系日渐成熟。国内外学者发展了多种积雪信息提取算法^[7-8],发布了MODIS逐日积雪产品和积雪面积比例产品,并利用Landsat TM/ETM+等数据进行了部分区域的积雪产品精度评估^[9-11],各种积雪产品被广泛应用于特定区域积雪信息长时间序列观测^[12-15]、融雪径流模拟^[16-18]等研究。这些积雪研究中采用的多光谱遥感数据空间分辨率较低,其中MODIS积雪产品应用最为广泛,其对于分析宏观尺度的积雪分布特征和长期变化具有重要意义。然而,对于冰雪灾害防治来说,直接利用这些数据来分析研究区的积雪分布特征难以满足需要,对相关积雪产品的精度检验也是确定其能否开展长期变化研究的基础。因此,本文基于高分一号影像(GF-1)对研究区的冬季积雪积累期的分布开展了研究,试图确定研究区积雪冬季最大分布范围,并在此基础上评估了同期的MODIS积雪产品的精度,以期为青藏高原东南部雪冰灾害防治提供支撑。

1 研究区域及数据

1.1 研究区概况

研究区(图1)位于29°N~31°N、94°E~97°E,平均海拔4000 m以上,最低海拔不足1000 m,地形高差大,自然环境复杂,灾害频发。研究区年温差最高可达60℃,降雨量最大达1200 mm,降水丰富且降水集中于每年的5—9月^[19]。积雪主要发育于每年10月至次年4月,最大积雪量一般出现在1、2月,尽管其比例不高,但积雪量仍较为可观。因此,尽量

图1 研究区示意图

Fig.1 Location of the study area

选取12月至次年2月积雪积累期的卫星影像,试图获取积雪最大分布范围。

根据第1次冰川编目获得的研究区的冰川分布,仅仅在波密和多吉地段有少量冰川分布。由于云的影响,第2次冰川编目中该地区的冰川数据并没有更新。考虑到冬季冰川上也有积雪,本文中未单独区分冰川对积雪的影响。

1.2 数据来源及数据处理

本文研究中的DEM数据主要来源于SRTM GL1(SRTM Global 1- arc, <http://earthexplorer.usgs.gov/>),分辨率为30 m,共计8景。SRTM DEM的水平绝对精度±20 m,高程绝对精度±16 m,空间参考坐标系统为WGS84/EGM96^[20]。

本文研究提取的积雪信息主要采用GF-1卫星影像。GF-1全色波段空间分辨率为2 m,多光谱段空间分辨率为8 m。单景影像成像宽幅为32 km左右。根据云覆盖率最小和时间上处于相近年份的冬季的要求,在中国资源卫星中心(<http://www.cresda.com/CN/>)获取了35景多光谱相机(PMS)影像。最终获取的影像成像时间最早为冬季的10月30日,最迟为1月28日,获取年份为2013—2019年(表1),其中2018年冬季的影像最多。

本文对MODIS积雪产品进行了验证。MODIS是搭载在Terra和Aqua卫星上的传感器,其单景影像测绘宽幅为2330 km×10 km,目前MODIS的积雪数据产品已更新至版本6。与版本5相比,其改善了晴空条件下的云监测,应用了定量图像恢复(QIR)算法恢复了丢失的MODIS Aqua波段6积雪检测数据,使MODIS Terra和MODIS Aqua积雪产品具有同样的精度;积雪产品主要包括归一化差分积雪指数(NDSI)数据集和积雪分布比例数据集,后者的编码为:0~100(积雪)、200(缺失数据)、201(不确定像元)、211(暗像元)、237(内陆水体)、239(海洋)、250(云)、254(探测饱和像元)。本文依据高分一号影像的空间范围和获取日期分别下载了同一获取日期的MOD10A1数据(<https://ladsweb.modaps.eos-dis.nasa.gov/>)。

对数据的处理分别包括对SRTM数据、GF-1影像和MODIS数据的预处理。由于研究区地形复杂,SRTM DEM数据中存在大量空洞,故须对其进行填补。目前DEM数据空洞填补主要分为2种:一种是用同一区域其他DEM产品填补,并平滑其相接区域^[21],这种方法因辅助填充DEM与原始DEM

的生成算法及分辨率不同会产生一定的误差;另外一种方法是利用邻域计算待插值区域的近似值进行填补^[22],但该方法对于山峰顶部和谷底等特征地形难以表达,主要适用于空值区域较小的数据空洞填补^[23]。由于研究区内 SRTM DEM 空洞较大,本文填补空值的方式是以 30 m 分辨率的 ASTER GDEM V2(<http://www.gscloud.cn/>)作为辅助数据进行填充。因 ASTER GDEM 数据是相对高程,本文

以 ASTER GDEM 为辅助 DEM 数据,基于空间误差分析方法^[24]对空洞进行插值。经目视检验填补后 SRTM DEM 效果较好,且 DEM 空值边界高程过渡自然(图 2)。

基于填充后的 SRTM DEM,根据文献[25]将高程划分为 6 个高程带,即划分为 0~2000、2000~3000、3000~4000、4000~5000、5000~6000、6000~7000 m,分别对应于地貌划分指标的低中海拔、亚

表1 研究区积雪研究选取的高分1号影像信息

Tab.1 Information of GF-1 images in the study on snow cover on the study area

景号	中心经度/(°E)	中心纬度/(°N)	条带号	获取日期
1801000	94°57'46.08"	30°14'27.60"	51492	2013-11-10
180751	96°36'30.42"	30°14'29.04"	7097	2013-11-30
214079	94°51'20.52"	29°57'44.64"	8509	2013-12-04
214080	94°47'06.36"	29°41'02.22"	8509	2013-12-04
176383	96°11'43.08"	29°57'46.62"	6901	2013-12-08
3046953	95°15'37.44"	29°57'51.48"	93827	2014-01-22
3235449	96°43'59.52"	30°14'27.60"	105367	2014-01-22
4411140	95°59'04.92"	29°41'02.04"	167811	2014-01-30
4559807	96°05'55.32"	30°14'28.50"	173227	2014-12-28
5696469	97°26'15.72"	30°48'08.10"	222916	2015-01-01
5696470	97°21'44.46"	30°31'26.22"	222916	2015-01-01
773059	95°27'14.40"	29°57'45.72"	25995	2015-01-09
773060	95°22'59.34"	29°41'02.76"	25995	2015-01-13
806915	97°22'31.26"	30°14'29.94"	26874	2015-11-21
157415	94°33'47.16"	29°37'00.48"	6032	2015-11-25
171389	96°20'58.92"	30°27'10.80"	6634	2015-11-25
175604	96°41'02.40"	30°27'11.52"	6861	2015-12-28
219191	96°03'25.20"	29°53'47.58"	8707	2016-01-05
4559961	96°26'17.16"	30°10'34.32"	173231	2016-01-05
760909	95°11'17.16"	29°53'48.12"	25658	2016-11-16
4573640	96°37'16.14"	29°57'45.90"	173961	2016-11-24
5855503	96°09'49.86"	30°31'10.74"	227538	2017-1-16
5869030	97°10'51.78"	30°47'57.12"	227896	2017-12-06
5869033	96°58'00.48"	29°57'47.88"	227896	2018-01-16
5869031	97°06'33.30"	30°31'14.52"	227896	2018-01-16
5869032	97°02'16.62"	30°14'31.38"	227896	2018-01-20
5869029	97°15'11.16"	31°04'39.36"	227896	2018-10-30
6029821	97°11'34.80"	29°57'47.16"	232922	2018-10-30
797011	96°49'22.08"	30°31'12.72"	26607	2018-12-10
1814838	95°59'25.62"	30°27'15.48"	51824	2018-12-14
1814839	95°55'07.14"	30°10'32.52"	51824	2018-12-14
1933195	94°33'26.82"	29°53'44.70"	54912	2018-12-14
1963210	95°45'08.46"	29°53'44.34"	55654	2018-12-14
1963211	95°40'51.78"	29°37'00.30"	55654	2018-12-14
3021376	96°29'16.08"	29°53'22.02"	92348	2019-01-28

图2 SRTM DEM 部分区域去除空值前(a)后(b)对比图

Fig.2 A comparison of before (a) and after (b) voids removal in SRTM DEM

高海拔、亚高海拔、高海拔、高海拔和极高海拔区,根据SRTM DEM数据分别获取了6个高程带的分布。根据SRTM DEM将坡向划分为北坡、西北坡、西坡、西南坡、南坡、东南坡、东坡、东北坡。

高分一号影像的预处理包括:①根据中国资源卫星应用中心提供的辐射定标系数和偏移量对高分影像进行辐射定标,获得地表反射率;②用FLAASH模型^[26]对高分影像进行大气校正,以有效去除水蒸气、气溶胶散射和邻近效应,从而计算出校正后的反射率;③将填补空值后的30 m分辨率SRTM DEM分别重采样至8 m和2 m,基于重采样后的SRTM DEM对高分一号多光谱影像和全色影像分别进行正射校正,对校正后典型山区的目视检验表明,山区的山谷和山脊线能很好地叠加在一起,有效消除了地形产生的几何畸变;④考虑到Pansharp融合方法在以高分一号影像为数据源的融合中综合表现良好^[27],用该方法对高分一号影像进行图像融合,融合后的影像空间分辨率为2 m;⑤以最大似然法^[28]自动解译识别积雪,将地物分为2大类,一类是积雪,一类是非积雪,并用混淆矩阵对积雪分类结果进行精度评价,总体分类精度达到96.1%;⑥利用目视解译对分类结果进行进一步修正,镶嵌时在影像叠压处选取云覆盖率较低影像的积雪分类结果,降低云对分类结果的影响,进而获取研究区的积雪分布图。

对MODIS数据的预处理包括:①用MRT(MODIS Reprojection Tool)批量提取MODIS归一化差分积雪指数(NDSI)和MODIS积雪分布数据集,经重采样,投影,拼接,输出为GeoTIFF格式。②对MODIS积雪产品的精度评估以积雪面积比例数据集(FSC)和积雪分布数据集为基础数据,由于MODIS版本6的积雪产品不再生产MODIS FSC,这里

以Salomonson^[29]等提出的基于MODIS NDSI观测值和Landsat TM积雪量之间的回归关系计算积雪面积比例(FSC),该方法与版本5的积雪面积比例(FSC)产品相关性达98%,平均绝对误差小于0.1^[30];积雪分布产品通过MODIS积雪分布数据集获得,将像元值0~100(积雪像元)赋值为1,否则赋值为0。

对MODIS积雪产品的精度评估规则如下:以高分一号影像反演的积雪分布为基础,将积雪分布按照MODIS积雪产品格网计算了各格网内积雪分布的比例,作为MODIS FSC的“真值”图像,记为“真值”FSC,其与MODIS FSC空间分辨率一致,为500 m;由于MODIS积雪产品的影像覆盖范围较大,根据文献[31-32]中的雪盖数据制图规则,将“真值”FSC $\geq 15\%$ 的像元定义为含雪像元,否则定义为不含雪像元,作为检验MODIS积雪分布产品的“真值图像”,用以计算MODIS积雪分布产品对积雪的误判像元、漏判像元、误分率和漏分率,其中:误判像元是指在MODIS积雪分布产品中将不含雪像元误分为含雪像元的部分;漏判像元是指将含雪像元漏分为不含雪像元的部分;误分率表示误判像元占MODIS积雪分布产品含雪像元的百分比;漏分率表示漏判像元占“真值”积雪分布产品含雪像元的百分比。

本文研究利用青藏高原东南部积雪分布图、分高程带积雪分布图和分坡向积雪分布图,获取研究区积雪分布特征。最后将每景高分影像的积雪分布逐一与同日的MODIS影像获得的积雪产品进行对比,对MODIS FSC与“真值”FSC进行比较分析,计算MODIS FSC绝对误差频率分布及MODIS积雪分布产品对积雪的误分率和漏分率。

2 结果与分析

2.1 青藏高原东南部积雪空间分布特征

青藏高原东南部积雪空间分布特征如图3所示,其积雪分布占比约为33.1%。积雪较密集处主要分布于波密与多吉之间、普宗与尼余之间靠近普宗、多吉与康玉之间靠近多吉、康玉与夏里之间、八宿与夏里之间以及夏里至邦达机场之间的地区;邦达机场与昌都之间、尼余至久荣之间的区域积雪间断分布。条带状积雪^[31]往往易发生雪崩,主要分布于波密至普宗之间,靠近亚龙藏布流域,多吉、康玉、普宗以东,康玉以西之间的地区,以及怒江以

图3 青藏高原东南部积雪分布

Fig.3 Distribution of snow cover in the southeastern part of the Tibetan Plateau

东,邦达机场以西之间的地区。

2.2 青藏高原东南部积雪在不同高程带分布特征

青藏高原东南部不同高程带及积雪占比如图4及表2所示。研究区的平均海拔均在4000 m以上;4000~5000 m高程带在研究区范围内占比最高,为52.71%,其中4000~5000 m高程带(高海拔)积雪面积占研究区面积比例在所有高程带中最高,达到18.11%;0~2000、2000~3000 m和6000~7000 m高程带处的比例极低,积雪面积占比均不到0.1%;6000~7000 m高程带处积雪覆盖率(研究区范围内该高程带积雪面积占高程带面积的比例)较高,达到88.1%,其次是在5000~6000 m高程带处,为65.7%,在其他高程带均不到40%。不同高程带积雪占研究区面积比例由高到低依次均为4000~5000、5000~6000、3000~4000、2000~3000、6000~7000、0~2000 m高程带。

2.3 青藏高原东南部积雪在不同坡向分布特征

研究区范围内积雪不同坡向的分布特征明显(图5、表3),其中:在北坡、东北坡的分布比例较高,均为15%以上;其次在西北坡、东坡,分布比例均在12.5%以上;在南坡、西坡、西南坡和东南坡分布比例较低,均为10%左右。

2.4 MODIS 积雪产品在研究区的精度评价

研究区范围内MODIS FSC与“真值”FSC的对比的结果(图6)表明,MODIS FSC高于“真值”FSC的像元值,其占有像元比例达57.6%,表明MODIS FSC高估的部分(57.6%)略高于低估部分(42.4%)。MODIS FSC的绝对误差分布直方图(图7)表明,MODIS FSC绝对误差小于±10%的部分占比最高,为64.4%;84.9%的像元绝对误差不超过30%,说明研究区内MODIS FSC的精度较高。

从逐图像的对比如,含雪像元的漏分率与误分率(图8)表明,MODIS积雪分布产品对含雪像元的平均漏分率和误分率分别为33.8%和32.7%,漏分率总体上明显大于误分率,个别影像的漏分率最高达91.3%。当“真值”积雪覆盖率小于20%时,MODIS积雪分布产品对含雪像元漏分率和误分率平均分别为46.3%和54.4%;当积雪覆盖率大于20%时,MODIS积雪分布产品对含雪像元漏分率和误分率平均分别为32.2%和29.9%。这说明研究区内地表积雪覆盖率较低时,MODIS积雪分布产品对积雪像元的识别误差较大;随着积雪覆盖率的增加,MODIS积雪分布产品对含雪像元的误分率逐渐降低。可见,MODIS积雪分布产品的NDSI-FSC经验

图4 青藏高原东南部不同高程带处积雪及高程带占比

Fig.4 Ratio of snow cover at different elevation zones and elevation zones to the southeastern part of the Tibetan Plateau

算法^[32]对低积雪覆盖的误差很大,需要进一步改进。

3 讨论

综合来看,与同期由高分一号影像反演的“真值”FSC比较,MODIS FSC的精度较高,MODIS积雪分布产品的精度较低,说明MODIS积雪产品对研究区积雪信息的刻画具有较大的不确定性。本文使用的MODIS影像在研究区范围内云的占比在30%以上,使MODIS积雪产品精度受到影响。另外,坡度、坡向等地形因子、积雪覆盖范围、地物类型分布等对造成MODIS积雪产品的不确定性产生不同程度影响^[34],这说明直接利用MODIS产品来分析研究区积雪的长期变化可能存在较大的不确定性。在利用MODIS积雪产品进行时空动态分析时应改进其反演算法和考虑云的影响。

本文对积雪分布的结果仍存在一定的不确定性,一方面,研究区气象观测站点数量较少,缺乏对积雪的专门观测,因而缺乏长时间序列积雪观测数据,导致本文结果无法直接与地面观测成果进行对比。同时,尽管本文在选择高分影像时尽量都在冬季,但由于研究区云覆盖率高,对云所在像元被归为无雪一定程度上低估了积雪分布范围。此外,高分遥感影像的获取时间长达6 a,不同年份、不同日期获取的积雪分布结果不一定是最大积雪覆盖。另外,风吹雪、雨蚀雪、雪崩等积雪物理过程会导致

表2 青藏高原东南部不同高程带处积雪及高程带占比

Tab.2 Ratio of snow cover at different elevation zones and elevation zones to the southeastern part of the Tibetan plateau

高程/m	积雪占比/%	高程占比/%
0~2000	<0.01	0.01
2000~3000	0.04	4.91
3000~4000	1.26	21.58
4000~5000	18.11	52.71
5000~6000	13.62	20.75
6000~7000	0.03	0.03

图5 青藏高原东南部积雪面积随坡向分布比例

Fig.5 Distribution ratio of snow cover area by slope direction for the southeastern part of the Tibetan Plateau

积雪再分布,使得即使同日不同时间获取的积雪分布可能也有差异,从而对GF-1与MODIS积雪产品的对比产生一定影响。

从空间分辨率看,目前中国的高分2号卫星的多光谱影像空间分辨率为3.24 m,Quickbird多光谱影像的分辨率为2.44~2.88 m,利用这些影像可以获得更高分辨率的积雪分布。然而,由于云的影响,很难获取同一冬季时段符合云量要求的影像。随着存量数据的不断增加,未来采用这些更高分辨率的影像可能获得更准确的积雪分布。

总的来看,青藏高原东南部的高云覆盖、复杂地形、气候条件、较大的地形起伏形成的山区阴影等都可能对光学遥感影像对本区的积雪分布遥感监测存在较大的困难和较高的不确定性,而目前

表3 青藏高原东南部积雪面积随坡向分布比例
Tab.3 Distribution ratio of snow cover area by slope direction for the southeastern part of the Tibetan plateau

坡向	积雪分布比例/%
北	17.38
东北	16.69
东	12.59
东南	10.68
南	9.30
西南	9.20
西	10.25
西北	13.91

图6 研究区MODIS FSC与高分影像FSC
Fig.6 Comparison between MODIS fractional snow cover (FSC) and FSC obtained from GF-1 on the study area

的微波遥感积雪产品分辨率较低,且由于复杂地形导致微波反演积雪的不确定性也较高。因此,研究区亟需加强地面观测,特别是需增加对积雪的专项监测,也需要利用无人机、飞艇等工具,开展卫星—无人机—地面的联合观测,加强多源卫星遥感积雪反演算法和融合算法的研究。

4 结论

本文以从高分一号PMS传感器获得的35景8 m分辨率多光谱影像、2 m分辨率全色影像以及30 m分辨率SRTM数字高程模型为数据基础,利用目视解译获取了研究区的积雪空间分布,分析了青藏高原东南部的积雪空间分布特征,并对同期的MODIS积雪产品进行了评估。主要结论如下:

(1) 在研究区,积雪像元占比约为33.1%,条带

图7 研究区MODIS FSC相对“真值”FSC误差频率分布直方图

Fig.7 Frequency distribution of error between MODIS FSC and FSC obtained from GF-1 on the study area

图8 研究区MODIS 积雪分布产品精度评价
Fig.8 Accuracy evaluation of MODIS snow distribution products on the study area

状积雪主要分布于波密至普宗之间,靠近亚龙藏布流域,多吉、康玉、普宗以东,康玉以西之间,以及怒江以东,邦达机场以西之间的地区。

(2) 研究区积雪覆盖在垂直分布和不同坡向分布特征明显。在研究区范围内,积雪在高程带4000~5000 m(高海拔)处分布较集中,积雪面积占比为18.11%;在0~2000、2000~3000和6000~7000 m高程带处积雪面积占比均不到0.1%。在北坡、东北坡的分布比例较高,均在15%以上;在南坡、西坡、西南坡、东南坡分布比例较低,均为10%左右。

(3) 与同期由高分影像获取的积雪分布对比发现,MODIS FSC产品高估的比例略高于低估的比例。MODIS积雪分布产品对含雪像元的漏分率总体上略大于误分率;当像元内积雪比例小于20%时,MODIS积雪分布产品的识别精度较低,表明MODIS积雪产品在积雪覆盖率较低时精度较差。

目前对于研究区的冰雪灾害监测非常有限,尽管MODIS积雪产品空间分辨率偏低和低覆盖积雪的精度较低,但因其具有较高的时间分辨率,利用MODIS积雪产品进行研究区的长期积雪时空分析仍对青藏高原东南部的雪冰灾害防治意义重大;雪深和雪水当量是重要的积雪参数,更能体现积雪量,从应用广泛的AVHRR、AMSR-E、AMSR2传感器数据反演雪深和雪水当量以及目前已有的降尺度雪深^[35]和雪水当量产品^[36],对研究区进行长期积雪参数时空分析对冰雪灾害防治有重要的参考价值;此外,开展不同来源遥感积雪产品研究,以及加强积雪地面观测网络的建设也是积雪时空动态研究的重要方向。

参考文献(References)

- [1] 徐兴奎. 1970—2000年中国降雪量变化和区域性分布特征[J]. 冰川冻土, 2011, 33(3): 497-503. [Xu Xingkui. Spatiotemporal variation and regional distribution characteristics of snowfall in China from 1970 to 2000. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(3): 497-503.]
- [2] Shao Q Q, Liu G B, Li X D, et al. Assessing the snow disaster and disaster resistance capability for spring 2019 in China's Three-River Headwaters Region [J]. Sustainability, 2019, 11(22): 6423. doi: 10.3390/su11226423.
- [3] 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. [Shen Yongping, Su Hongchao, Wang Guoya, et al. The responses of glaciers and snow cover to climate change in Xinjiang (II): Hazards effects. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(6): 1355-1370.]
- [4] 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. [Shen Yongping, Su Hongchao, Wang Guoya, et al. The responses of glaciers and snow cover to climate change in Xinjiang (I): Hydrological effects. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(3): 513-527.]
- [5] 宋章, 张广泽, 蒋良文, 等. 川藏铁路主要地质灾害特征及地质选线探析[J]. 铁道标准设计, 2016, 60(1): 14-19. [Song Zhang, Zhang Guangze, Jiang Liangwen, et al. Analysis of the characteristics of major geological disasters and geological alignment of Sichuan-Tibet railway. Railway Standard Design, 2016, 60(1): 14-19.]
- [6] 张涛涛, 延军平, 廖光明, 等. 近51a青藏高原雪灾时空分布特征[J]. 水土保持通报, 2014, 34(1): 242-245, 251. [Zhang Taotao, Yan Junping, Liao Guangming, et al. Spatiotemporal distribution of snow disaster on Tibetan Plateau in recent 51 years. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(1): 242-245, 251.]
- [7] Huang X D, Hao X H, Feng Q S, et al. A new MODIS daily cloud free snow cover mapping algorithm on the Tibetan Plateau [J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2014, 6(2): 116-123.
- [8] Painter T H, Rittger K, McKenzie C, et al. Retrieval of subpixel snow covered area, grain size, and albedo from MODIS [J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(4): 868-879.
- [9] Hall D K, Riggs G A. Accuracy assessment of the MODIS snow products [J]. Hydrological Processes, 2007, 21(12): 1534-1547.
- [10] Hao X H, Luo S Q, Che T, et al. Accuracy assessment of four cloud-free snow cover products over the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. International Journal of Digital Earth, 2019, 12(4): 375-393.
- [11] 唐志光, 王建, 李弘毅, 等. 青藏高原MODIS积雪面积比例产品的精度验证与去云研究[J]. 遥感技术与应用, 2013, 28(3): 423-430. [Tang Zhiguang, Wang Jian, Li Hongyi, et al. Accuracy validation and cloud obscuration removal of MODIS fractional snow cover products over Tibetan Plateau. Remote Sensing Technology and Application, 2013, 28(3): 423-430.]
- [12] Basang D, Barthel K, Olseth J A. Satellite and ground observations of snow cover in Tibet during 2001-2015 [J]. Remote Sensing, 2017, 9(11): 1201. doi: 10.3390/rs9111201.
- [13] Dietz A J, Wohner C, Kuenzer C. European snow cover characteristics between 2000 and 2011 derived from improved MODIS daily snow cover products [J]. Remote Sensing, 2012, 4(8): 2432-2454.
- [14] 林金堂, 冯学智, 肖鹏峰, 等. 基于MODIS数据的玛纳斯河山区雪盖时空分布分析[J]. 遥感技术与应用, 2011, 26(4): 469-475. [Lin Jintang, Feng Xuezh, Xiao Pengfeng, et al. Spatial and temporal distribution of snow cover in mountainous area of Manasi River Basin based on MODIS. Remote Sensing Technology and Application, 2011, 26(4): 469-475.]
- [15] 张杰, 韩涛, 王建. 祁连山区1997—2004年积雪面积和雪线高度变化分析[J]. 冰川冻土, 2005, 27(5): 649-654. [Zhang Jie, Han Tao, Wang Jian. Changes of snow cover area and snowline altitude in the Qilian Mountains, 1997-2004. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(5): 649-654.]
- [16] Qiu L H, You J J, Qiao F, et al. Simulation of snowmelt runoff in ungauged basins based on MODIS: A case study in the Lhasa River basin [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2014, 28(6): 1577-1585.

- [17] Tekeli A E, Akyürek Z, Arda Şorman A, et al. Using MODIS snow cover maps in modeling snowmelt runoff process in the eastern part of Turkey [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 97(2): 216-230.
- [18] Zhang F, Zhang H B, Hagen S C, et al. Snow cover and runoff modelling in a high mountain catchment with scarce data: Effects of temperature and precipitation parameters [J]. *Hydrological Processes*, 2015, 29(1): 52-65.
- [19] 杨德宏. 川藏铁路昌都至林芝段主要工程地质问题分析 [J]. *铁道标准设计*, 2019, 63(9): 16-22, 27. [Yang Dehong. Analysis of main engineering geological problems in Changdu to Linzhi section of Sichuan-Tibet railway. *Railway Standard Design*, 2019, 63(9): 16-22, 27.]
- [20] Hayakawa Y S, Oguchi T, Lin Z. Comparison of new and existing global digital elevation models: ASTER G-DEM and SRTM-3 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35 (17): L17404. doi: 10.1029/2008gl035036.
- [21] Crippen R E, Hook S J, Fielding E J. Nighttime ASTER thermal imagery as an elevation surrogate for filling SRTM DEM voids [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(1): L01302. doi: 10.1029/2006gl028496.
- [22] Reuter H I, Nelson A, Jarvis A. An evaluation of void-filling interpolation methods for SRTM data [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2007, 21 (9): 983-1008.
- [23] 宋海航. 中国地区 SRTM DEM 数据的空洞填补及精度评价 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018. [Song Haihang. Research on SRTM void-filling and precision detection of SRTM data in China. Beijing, China: China University of Geosciences, Beijing, 2008.]
- [24] 凌峰, 王乘, 张秋文. 基于 ASTER 数据和空间误差分析的 SRTM 无效区域填充 [J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2006, 34(12): 108-110. [Ling Feng, Wang Cheng, Zhang Qiuwen. Filling voids in SRTM data by using the data from ASTER and spatial elevation difference interpolation. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2006, 34(12): 108-110.]
- [25] 李炳元, 潘保田, 韩嘉福. 中国陆地基本地貌类型及其划分指标探讨 [J]. *第四纪研究*, 2008, 28(4): 535-543. [Li Bingyuan, Pan Baotian, Han Jiafu. Basic terrestrial geomorphological types in China and their circumscriptions. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(4): 535-543.]
- [26] 李述, 刘琪璟. 高程和大气模式对 FLAASH 模型校正结果的影响 [J]. *遥感技术与应用*, 2015, 30(5): 939-945. [Li Shu, Liu Qijing. Effect on atmospheric correction by ground elevation and atmospheric model parameters of FLAASH model. *Remote Sensing Technology and Application*, 2015, 30(5): 939-945.]
- [27] 刘锟, 付晶莹, 李飞. 高分一号卫星 4 种融合方法评价 [J]. *遥感技术与应用*, 2015, 30(5): 980-986. [Liu Kun, Fu Jingying, Li Fei. Evaluation study of four fusion methods of GF-1 PAN and multi-spectral images. *Remote Sensing Technology and Application*, 2015, 30(5): 980-986.]
- [28] 闫琰, 董秀兰, 李燕. 基于 ENVI 的遥感图像监督分类方法比较研究 [J]. *北京测绘*, 2011(3): 14-16. [Yan Yan, Dong Xiulan, Li Yan. The comparative study of remote sensing image supervised classification methods based on ENVI. *Beijing Surveying and Mapping*, 2011(3): 14-16.]
- [29] Salomonson V V, Appel I. Estimating fractional snow cover from MODIS using the normalized difference snow index [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89(3): 351-360.
- [30] 邱玉宝, 王星星, 韩璐璐, 等. 2002—2016 年高亚洲逐日积雪覆盖率数据集 [J]. *中国科学数据(中英文网络版)*, 2017, 2(2): 59-69. [Qiu Yubao, Wang Xingxing, Han Lulu, et al. Daily fractional snow cover dataset over High Asia (2002–2016). *China Scientific Data*, 2017, 2(2): 59-69.]
- [31] Metsämäki S, Mattila O P, Pulliainen J, et al. An optical reflectance model-based method for fractional snow cover mapping applicable to continental scale [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 123: 508-521.
- [32] Rittger K, Painter T H, Dozier J. Assessment of methods for mapping snow cover from MODIS [J]. *Advances in Water Resources*, 2013, 51: 367-380.
- [33] 蔡强. 川藏铁路、公路帕隆藏布流域雪崩危害评估 [D]. 西南交通大学, 2017. [Cai Qiang. Evaluation of avalanche hazards in Parlung Zangbu Basin, Sichuan-Tibet Railway and Highway. Chengdu, China: Southwest Jiaotong University, 2016.]
- [34] 樊晓兵. 复杂山区 MOD10A1 积雪面积数据精度变化研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2016. [Fan Xiaobing. The study of accuracy variation of MOD10A1 snow cover datas in rugged terrain. Chengdu, China: Southwest Jiaotong University, 2016.]
- [35] Wang Y L, Huang X D, Wang J S, et al. AMSR2 snow depth downscaling algorithm based on a multifactor approach over the Tibetan Plateau, China [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 231: 111268. doi: 10.1016/j.rse.2019.111268.
- [36] 赵文宇. 基于被动微波遥感和 MODIS 产品的天山雪水当量降尺度研究 [D]. 石河子: 石河子大学, 2016. [Zhao Wenyu. A downscaling method for snow water equivalent using passive microwave remote data and MODIS products in the Tianshan Mountains. Shihezi, China: Shihezi University, 2016.]

Characteristics of snow cover in the southeastern Tibetan Plateau based on GF-1 and applicability of MODIS snow cover products

PU Xufan¹, DING Yongjian², HOU Litao¹, ZHANG Xiaowen¹, ZHANG Shiqiang^{1*}

(1. College of Urban and Environmental Science, Northwest University, Xi'an 710127, China;

2. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, CAS, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The southeastern Tibetan Plateau is high in elevation, with complex terrain and high cloud cover. It is very important to understand the characteristics of the snow cover distribution in this area for railway snow disaster prevention. Based on 35 GF-1 images during the snow accumulation period from 2013 to 2019, 2 m-resolution images were obtained by fusing panchromatic band and multispectral bands. Characteristics of the spatial distribution of snow cover within study area were obtained by visual interpretation. Combined with the modified 30 m-resolution SRTM DEM, the influence of topography on the distribution of snow cover was analyzed. The proportion of snow pixel in the study area is 33.1%. The vertical characteristics of snow cover are obvious. Snow cover is concentrated in the elevation zone of 4000–5000 m (high altitude), accounting for 18.1% of the total snow cover area. The distribution ratio of snow cover on the north slope and northeast slope is higher, which is more than 15%, and the distribution ratio of snow cover on the south slope, west slope, southwest slope and southeast slope is lower, which is all about 10%. The comparison between the snow cover distribution obtained based on GF-1 images and the snow distribution proportion (MODIS fractional snow cover, FSC), and the snow cover distribution calculated based on the MODISV6 snow cover product (MODIS snow cover) obtained on the same day suggests that for the absolute error, 64.4% of MODIS FSC snow pixels are less than 10%, the producer accuracy and user accuracy of MODIS snow distribution products snow pixels are 33.8% and 32.7%, respectively, which indicates that the accuracy of MODIS snow products is relative low in the areas on the study area, and it is more pronounced with low snow coverage. The results indicate that when using MODIS snow cover products to study the temporal and spatial variation characteristics of snow cover in the study area, it is necessary to improve the retrieval algorithm of snow cover and to strengthen ground observations and snow cover research based on multi-source remote sensing data. This study provides support for snow and ice disaster prevention in the southeast Tibetan Plateau.

Keywords: snow cover; high resolution; MODIS snow cover products; the southeast Tibetan Plateau