

文章编号: 1008-2786-(2017)3-412-08

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000237

基于 MODIS 数据的青藏高原积雪日数提取 与时空变化分析

唐志光¹ 王 建² 王 欣¹ 李朝奎¹ 梁 继¹ 彭焕华¹

(1. 湖南科技大学 地理空间信息技术国家地方联合工程实验室 湖南 湘潭 411201;

2. 中国科学院西北生态环境资源研究院 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 以青藏高原为研究对象,首先采用基于三次样条函数的去云算法对 2001—2011 年逐日 MODIS 积雪面积比例产品进行了去云处理,并对去云结果进行了精度验证。然后根据去云后的逐日无云 MODIS 积雪面积比例产品,提取了研究区近 11 年的积雪日数,并对积雪日数的时空分布特征进行了分析。结果表明:1. 本文的去云算法能有效的获取云覆盖像元的积雪面积信息,总体平均绝对误差值为 0.092。去云后 MODIS 积雪产品提取的积雪日数与地面观测值具有较高的一致性(87.03%),平均绝对误差 3.8 d;2. 青藏高原积雪日数的分布极不均匀,四周山区(特别是西部和南部山区)积雪分布广泛且积雪日数高,而高原腹地积雪日数低,年均稳定性积雪面积占 27.24%;3. 青藏高原积雪日数的年际波动较大,积雪日数在 34.14% 的地区呈减少的趋势,在 24.75% 的地区呈增加的趋势,其中显著减少和增加的地区分别为 5.59% 和 3.9%。

关键词: MODIS; 青藏高原; 积雪日数; 时空变化

中图分类号: TP 79

文献标志码: A

积雪作为地球表面最为活跃的自然要素之一,因其特有的高反照率、低导热率以及融雪水文效应,在全球能量交换、辐射平衡和水循环中扮演着重要的角色^[1-3]。青藏高原是北半球中纬度海拔最高、积雪覆盖最大的地区,其分布的积雪是我国西北干旱地区重要的水资源,也是我国主要河流的水源源头,同时也影响着该地区的水文和生态过程^[4-7]。因此,准确地监测青藏高原的积雪分布及其变化特征显得尤为重要。

由于青藏高原地形复杂,常规气象站点稀少。因此,以往那些仅仅利用常规气象站的积雪观测信息来监测青藏高原积雪的空间分布和年际变化的研究^[8-10]都存在一定不确定性。通过遥感技术获取大范围积雪信息是积雪监测研究的主要技术手

段。自从 Terra 和 Aqua 卫星发射以来,因其携带的 MODIS 传感器具有较高的光谱及时空分辨率,决定了在地球资源观测中的绝对优势。目前,基于 MODIS 的一系列积雪产品,包括二值雪盖产品和积雪面积比例产品,已经广泛的应用于积雪动态监测、气候研究、融雪径流模拟等研究中^[3,4,11-14]。

然而,大量云遮蔽像元的存在,极大的限制了 MODIS 积雪产品的积雪监测效果。有云的积雪产品难以获得准确的积雪日数。因此,很多学者在二值雪盖产品的基础上,进行了去云研究,例如:1. MODIS 每日产品的融合,即 Terra(上午星)和 Aqua(下午星)产品融合,可以降低 10%~20% 的云^[15,16];2. 固定日数的多日产品的合成,但这类方法降低了积雪探测的时效性,也无法消除云覆盖持

收稿日期(Received date): 2016-06-15; 改回日期(Accepted date): 2016-11-30。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目(41501070; 31400409; 41271091)资助。[National Nature Science Foundation of China (No. 41501070; 31400409 and 41271091) .]

作者简介(Biography): 唐志光(1985-),男,湖南邵阳人,博士,讲师,主要从事冰冻圈遥感方面的研究。[Tang Zhiguang, male, lecturer, mainly engaged in the research in cryosphere remote sensing.]E-mail: tangzhg11@lzb.ac.cn

续时间超过合成日数的云像元^[17,18];3. MODIS 积雪面积产品与被动微波雪深产品的结合^[19-21],因被动微波空间分辨率低,会降低融合后产品的空间分辨率。与二值雪盖产品相比,积雪面积比例产品能反映像元内积雪覆盖面积在时间上逐渐消退/累积的过程。因此,在积雪面积比例产品中云覆盖像元的积雪信息可以用该像元晴空日数下积雪信息的变化曲线进行拟合。

由于雪深受局地影响因素很大,在反映积雪类型分区和分布特征上,积雪日数比积雪深度更具有代表性^[22]。本文以青藏高原为研究对象,旨在利用MODIS 积雪产品实现该地区积雪日数的遥感提取以及分析其近11年的时空变化特征。首先,针对MODIS 积雪面积比例产品的云覆盖问题,采用基于三次样条函数插值的去云方法得到了近11年的无云MODIS 积雪面积比例产品,并对该去云方法进行了精度评价。然后,根据去云后生成的2001—2011年逐日无云的MODIS 积雪面积比例产品,提取了青藏高原逐年积雪日数,并对这11年积雪日数的时空分布特征进行了分析。

1 研究区及数据介绍

1.1 研究区范围

研究区范围为海拔2 500 m以上的青藏高原地区(图1)。位于 $73^{\circ} \sim 105^{\circ} \text{E}$, $25^{\circ} \sim 40^{\circ} \text{N}$,总面积约为2 968 000 km^2 。研究区平均海拔高度为4 367 m。

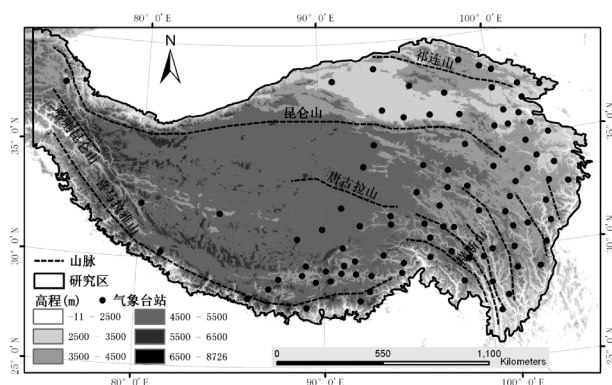


图1 研究区域示意图

Fig.1 Sketch map of the study region

1.2 MODIS 积雪产品与预处理

采用的MODIS 积雪产品为2001—2011年由

Terra 卫星获得的逐日MOD10A1产品,该产品来源于美国国家雪冰数据中心(<http://nsidc.org/NASA/MODIS>)。空间分辨率为500 m,投影方式为正弦地图投影,数据原始格式为hdf。MOD10A1产品包含4个数据影像:二值积雪影像,积雪面积比例影像,雪反照率以及质量评估影像^[23]。本研究中利用的是MOD10A1中的积雪面积比例产品。MODIS 积雪面积比例产品的制图算法是2004年由Salomonson^[24]所发展,并且相关研究^[4,24,25]已证明了该数据质量可靠,平均绝对误差 <0.1 。MOD10A1 积雪面积比例影像的数据编码值包括:0—100(100x 积雪面积比例)、225(陆地)、237(内陆水体)、250(云),以及其它无意义或数据缺失的编码值(200、201、254、255)。

2001—2011年逐日MOD10A1 积雪面积比例影像的预处理主要有基于MODIS Reprojection Tool (MRT, 2008)^[26]的影像批量拼接和重投影处理,重投影为UTM投影。预处理后的输出格式为tif。

1.3 气温数据和DEM数据

收集研究区内93个气象台站(2001—2008年)的逐日积雪深度数据作为验证数据,以检验MODIS提取积雪日数的精度;气象站的分布如图1所示。DEM数据为SRTM数据,空间分辨率为90 m,数据来源于中国西部环境与生态科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn>)。为了便于和空间分辨率为500 m的MODIS 积雪数据进行分析,将DEM数据重采样成500 m分辨率。

2 研究方法

2.1 去云算法与精度评价方案

2.1.1 研究区云覆盖特征

云覆盖像元的存在严重的影响了MODIS 积雪产品的应用。研究过程中统计了2008年青藏高原逐日MOD10A1 积雪产品的云覆盖面积(图2)。从图2可见,在青藏高原地区,云覆盖大量存在,在云覆盖最高期,其面积占到80%以上,日平均云覆盖面积占比为47.3%。

2.1.2 去云算法

由于云覆盖具有快速(逐日)移动的特点,而积雪面积的变化是一个随时间逐渐消融或者积累的过程。本文中采用基于三次样条函数插值的方法进行去云插值。该去云算法包含以下3方面的内容:

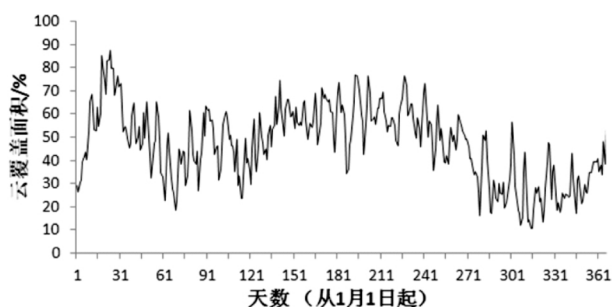


图2 研究区 2008 年逐日云覆盖面积百分比

Fig. 2 Daily cloud covered area (%) over the study area in 2008

① MOD10A1 积雪面积比例产品的重分类。为了方便进行三次样条函数插值,将逐日 MOD10A1 积雪面积比例影像重编码为两类:云(250)和 $100 \times$ 积雪面积比例值(0-100)。其中,对原始编码为 250(云)或者 0-100($100 \times$ 积雪面积比例值)的像元,像元值保持不变;将 225(陆地)以及 237(内陆水体)重编码为 0,即为无雪覆盖(积雪面积比例值为 0);其它代表无意义或数据缺失的编码值(200, 201, 254, 255)均重编码为 250,即视为云覆盖像元。

② 三次样条函数插值处理。逐像元利用时间序列上晴空天数的积雪面积比例信息对云覆盖日数进行插值(插值算法为三次样条函数),获得云覆盖日数的积雪面积比例值。在该插值过程中,如插值得到的 $100 \times$ 积雪面积比例值 < 0 ,重新赋值为 0;如插值得到的 $100 \times$ 积雪面积比例值 > 100 ,则重新赋值为 100(因为 $0 \leq \text{积雪面积比例} \leq 1$)。

③ 计算云持续日数。为了评估去云算法在不同云持续日数条件下的精度,本算法还计算了云覆盖像元的云持续日数,即为该像元从最后一次出现无云覆盖起,到下一次出现无云覆盖为止,中间所连续持续的天数。

该去云算法利用 ENVI + IDL 4.7 编程实现,输出影像包括插值后的无云积雪面积比例影像以及云持续时间影像。

2.1.3 去云算法精度评价方法

去云算法的精度评价过程主要包括:参考影像的选取“云假设”与去云处理;去云结果与参考影像的对比分析。

首先随机选取了青藏高原 2008 年中云覆盖比较少的 4 d(第 37 d、99 d、286 d、328 d)的 MOD10A1 积雪面积比例影像作为“真值”影像,这些影像中晴空下的所有像元的积雪面积比例值即为“真实值”;然后,对这 4 幅“真值”影像进行云掩膜处理,即假

设其完全被云覆盖,所有像元值云掩膜为 250;并对这 4 幅“云假设”后的影像利用以上的去云算法(步骤②、③)进行去云插值计算,获得其积雪面积比例影像(即“计算值”)和云持续日数影像;最后将“真实值”与“计算值”进行比较,统计不同云持续时间条件下的平均绝对误差,对本去云算法的精度进行评价。

2.2 积雪日数提取与分析方法

2.2.1 MODIS 积雪日数提取与精度分析

从无云 MOD10A1 积雪面积比例影像提取积雪日数的过程中,将积雪面积比例大于 50% 的像元(即:像元值 > 50) 定义为积雪像元。计算逐年每个像元满足条件的次数,即得到逐年积雪日数,计算公式如下

$$SCD = \sum_{i=1}^N Ceil(D_i \geq 50) \quad (1)$$

其中 SCD 为某像元的年积雪日数; N 为某年中的总天数(影像个数); D_i 是像元的积雪面积比例值($0 \leq D_i \leq 100$); $Ceil(D_i \geq 50)$ 即为计算 $D_i \geq 50$ 的个数。例如,某天影像中的某像元值为 55(≥ 50),那么该像元 SCD 就加上 1;如果像元值为 20(< 50),那么 SCD 就保持不变。

采用研究区 93 个气象站点的逐日(2001—2008 年)积雪深度观测值来检验 MODIS 提取的积雪日数。其中,地面观测积雪日数是将地面观测积雪深度大于等于 1 cm 计为积雪覆盖日。采用公式(2)计算观测积雪日数与其相对应的 MODIS 积雪日数之间的平均一致性

$$C = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(1 - \frac{|SCD_{mod} - SCD_{ground}|}{SCD_{ground}} \right) \times 100 \quad (2)$$

式中 C 为平均一致性,单位为%, SCD_{mod} 与 SCD_{ground} 分别为一年中 MODIS 提取与地面站观测的积雪日数。 N 为从 2001—2008 年的所有观测样本数。

2.2.2 趋势分析

一元线性回归模型可以模拟每个像元的变化趋势,Stow^[27]以及宋怡^[28]就用该方法来模拟植被的变化。本文同样用该方法来模拟 2001—2011 年积雪日数的变化趋势。利用最小二乘估计一元线性回归模型的趋势线斜率^[29],并对模型进行显著性检验(F 检验)。其中趋势线斜率可以表达为:

$$Slope = \frac{n \times \sum_{i=1}^N i \times SCD_i - \sum_{i=1}^N i \sum_{i=1}^N SCD_i}{n \times \sum_{i=1}^N i^2 - \left(\sum_{i=1}^N i \right)^2} \quad (3)$$

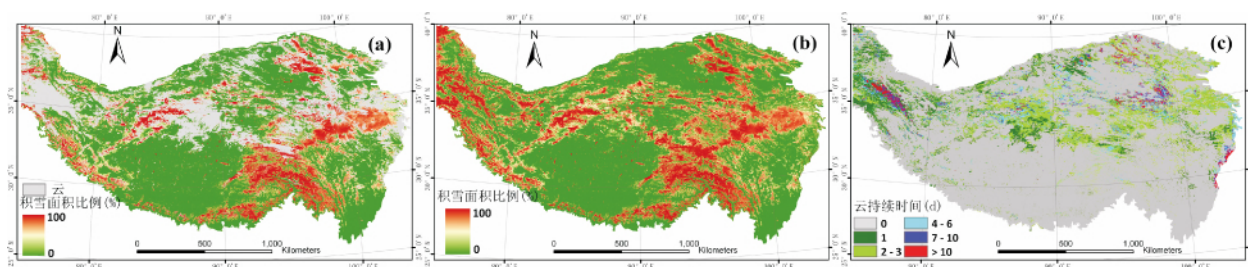


图3 研究区2008年第328 d的原始MODIS积雪面积比例(a)、去云后积雪面积比例(b)以及云持续时间分布图

Fig.3 Original MODIS fractional snow cover (FSC) map (a), cloud removed FSC map (b) and cloud durations (c) on the 328th day of 2008

式中 $Slope$ 为某像元的积雪日数所拟合的回归直线的趋势线斜率; n 为累积的年数; SCD_i 为第 i 年的积雪日数; 在本研究中, n 为 11, 从 2001 年、2002 年...到 2011 年, 其对应的 i 分别为 1、2、...、11。趋势线斜率 $Slope$ 代表了这 11 年的年平均积雪日数增长量, $Slope > 0$ 则说明积雪日数在 11 年间的变化趋势是增加的。反之则是减少。

3 结果及讨论

3.1 去云算法精度分析

以 2008 年第 328 d 为例, 图 3 显示为该日的 MODIS 原始积雪面积比例影像(a)、去云算法处理后的无云影像(b)以及相应的云持续日数(c)。可以看出, 本文的去云算法可以有效的清除云覆盖像元, 获取云覆盖下的积雪信息。

对 2008 年逐日影像中的所有云像元的云持续时间进行统计, 得到研究区云覆盖像元按照云持续时间的频率分布图(图 4a); 可以看出, 随着云持续时间的增大, 研究区云覆盖像元出现的频率逐渐降低; 云持续时间超出 15 d 的云覆盖像元不到 7%, 超过 5 天而 <10 d 的占 20.2%, 在 5 d 之内的云像元占到 62.5%。图 4b 为去云算法在不同云持续时间条件下的平均绝对误差分布(由 2.1.3 中选择的 4 幅参考影像进行精度评价所得)。可见, 去云算法的平均绝对误差随着云持续时间的增长而增大; 当云持续时间不超过 5 d 时, 去云算法的平均绝对误差均 <0.1; 特别是当云持续时间仅为 1 d 的情况下, 平均绝对误差均仅为 0.03。而当云持续时间 >20 d 时, 平均绝对误差 >0.15(图 4b), 尽管这种情况出现的概率很低。以云覆盖像元随云持续时间的分布频率为权重, 得到去云算法的总体平均绝对误差为 0.092。可见, 本文的基于三次样条函数插值的去云算法具有较高的精度。

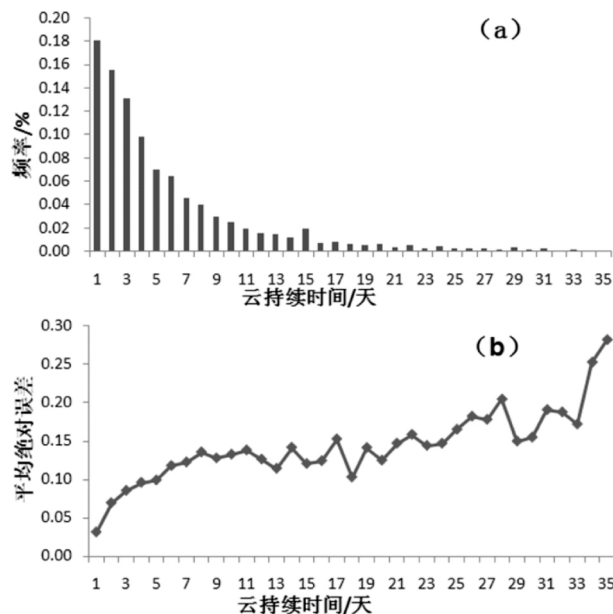


图4 研究区云覆盖像元频率分布

(a) 和去云算法的平均绝对误差分布(b)图

Fig.4 The frequency of cloud covered pixels over the study area (a) and the mean absolute errors of cloud removal methodology (b) under different cloud durations

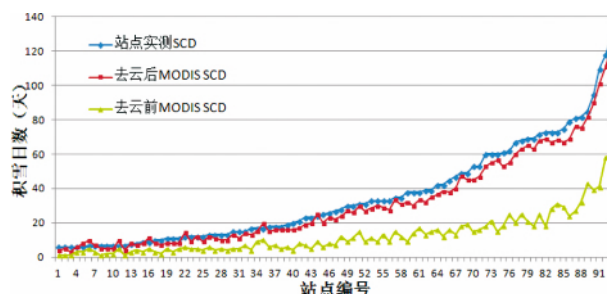


图5 MODIS 与地面观测积雪日数对比

Fig.5 Comparisons between MODIS derived snow-covered days (SCD) and in-situ SCD

图 5 为近 8 年(2001—2008) 去云前/后 MODIS 提取的平均积雪日数与平均观测积雪日数的对比结

果。由于云覆盖的影响,去云前的产品所得到的 MODIS 积雪日数均低于地面站点实测积雪日数,其平均一致性为 43.32%,平均绝对误差为 22.6 d。去云后产品得到的 MODIS 积雪日数与地面观测积雪日数具有很好的一致性,平均一致性为 87.03%,平均绝对误差为 3.8 d;可见,本文去云算法得到的逐日无云 MODIS 积雪面积比例产品可以较准确的监测研究区的积雪日数信息。

3.2 积雪日数时空分布特征

3.2.1 积雪日数空间分布特征

利用 2001—2011 年青藏高原的逐日无云 MODIS 积雪面积比例数据,计算了青藏高原逐年的积雪日数影像(图 6)。积雪日数大于 60 天的地区被认为是稳定积雪区,也是雪水资源的主要来源地^[22]。从图可以看出,青藏高原积雪分布受地形影响空间异质性较大,很多地方呈小斑块分布;青藏高原积雪日数较高的地区(稳定积雪区)主要分布在

几大山脉地区,包括喜马拉雅山、喀喇昆仑山、昆仑山、祁连山、唐古拉山以及横断山地区。其中喀喇昆仑山、昆仑山脉西部地段、喜马拉雅山脉、以及横断山脉的西部地带是主要积雪分布地区,积雪日数在 120 天以上。而广阔的青藏高原中部腹地由于受到四周高山地形的遮挡,水汽输入较少,是积雪分布较少的地区。因而,形成了四周山地积雪多,而中部腹地积雪少的空间分布格局。

表 1 统计了近 11 年研究区各分类积雪日数所占的面积百分比。可以看出,近 11 年青藏高原各类积雪日数区间所占面积的年际波动比较明显;年均稳定性积雪分布面积(积雪日数 > 60)占 27.24%,其中积雪日数在 60—120 天、120—240 天、以及 240—365 天的面积百分比分别为 12.53%、10.39%、4.31%;在 72.76% 的不稳定性积雪(积雪日数 < 60)分布区中,其积雪日数主要分布在 0—20 天以内(占 47.56%)。

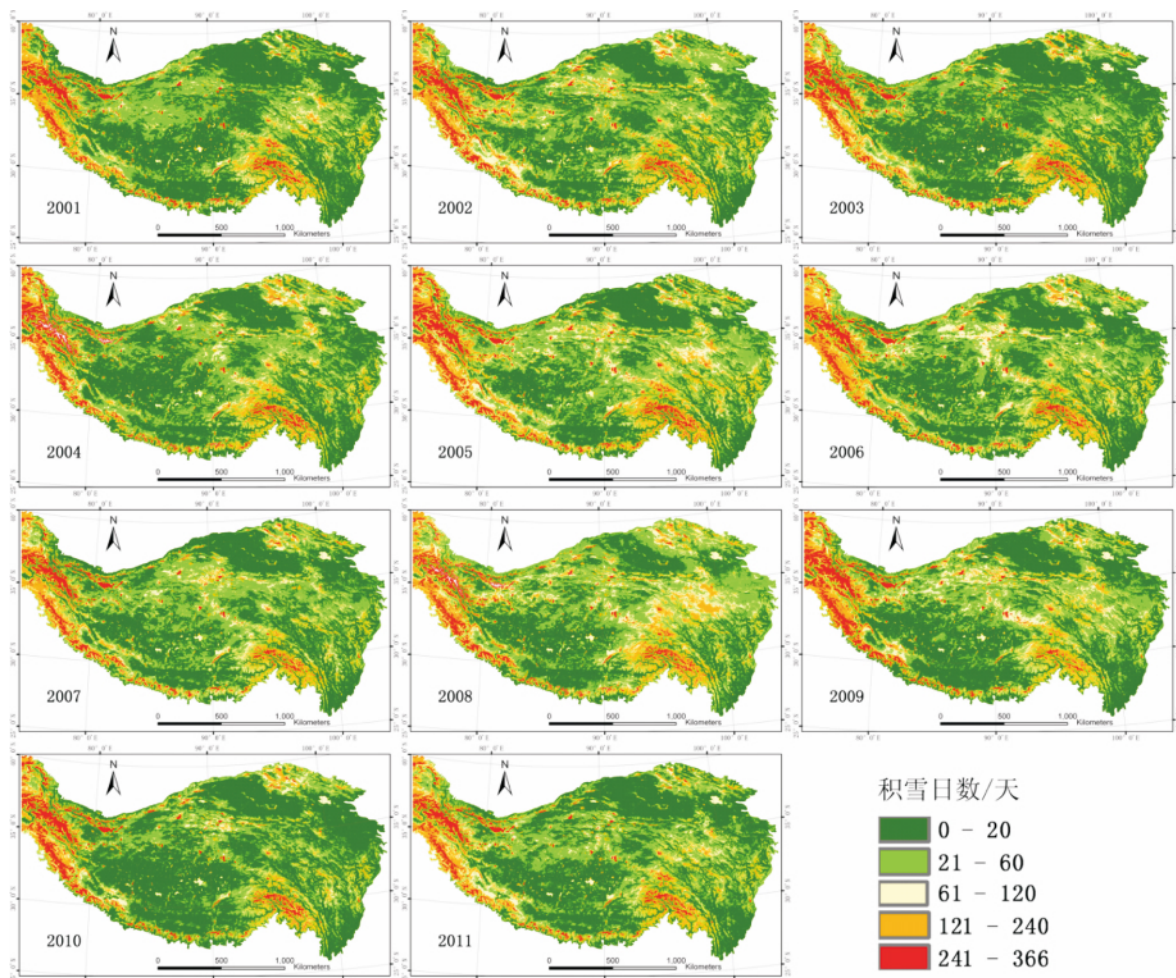


图 6 青藏高原 2001—2011 年积雪日数分布

Fig. 6 The spatial distribution of snow covered days (SCD) over the Tibetan Plateau from 2001 to 2011

表 1 青藏高原逐年积雪分类面积(%) 统计
Tab.1 Statistical results of the snow cover areas under different snow covered days over the Tibetan Plateau

年	积雪日数(天)				
	0-20	20-60	60-120	120-240	240-366
2001	53.51	24.17	9.66	8.98	3.69
2002	43.04	27.61	13.42	11.37	4.56
2003	54.92	21.04	9.89	9.75	4.39
2004	48.79	25.37	11.38	9.73	4.72
2005	39.49	26.82	15.25	13.24	5.20
2006	44.48	26.38	13.87	11.31	3.97
2007	47.55	27.39	12.44	9.09	3.53
2008	37.46	29.27	16.35	12.47	4.46
2009	46.07	24.65	13.87	10.65	4.76
2010	57.44	20.24	9.91	8.02	4.38
2011	50.42	24.28	11.83	9.72	3.75
平均	47.56	25.20	12.53	10.39	4.31

3.2.2 积雪日数年际变化特征

对 2001—2011 年的积雪日数影像逐象元进行趋势分析,得到的近 11 年青藏高原积雪日数的变化趋势及其显著性水平分布图(图 7)。统计积雪日数趋势分析的结果得出:34.14% 的地区积雪日数呈下降的趋势,但仅 5.56% 的地区的呈显著下降趋势,通过 $P=0.05$ 的显著性检验;其中积雪日数显著下降,而且年均下降天数超过 3 天(即 $Slope < -3$) 的地区主要分布在横断山脉以西的地区、南部喜马拉雅山脉、以及喀喇昆仑山脉的北部地区;24.75% 的地区积雪日数呈增长趋势,其中呈显著增加($P < 0.05$)的面积占 3.9%。显著增加而且年均增长天数超过 3 天的地区主要分布在喀喇昆仑山以南、北部祁连山脉、以及昆仑山与唐古拉山之间的部分地区;约 41.11% 的地区积雪日数基本保持不变($0.5 > Slope > -0.5$)。

图 8 为 2001—2011 年青藏高原不同高程带的平均积雪日数变化。可以看出,积雪日数基本上随着高程的升高而增大;不同高程带的平均积雪日数变化虽然没有明显的增加或者降低的趋势,但其呈现显著的年际波动特征。而且,不同高程带(特别是 5 500 m 以下的地区)积雪日数的年际波动具有相似的变化趋势,2002、2005、2008、2011 年为积雪日数较高的年份,而 2001、2003、2007、2010 为积雪日数较低的年份。

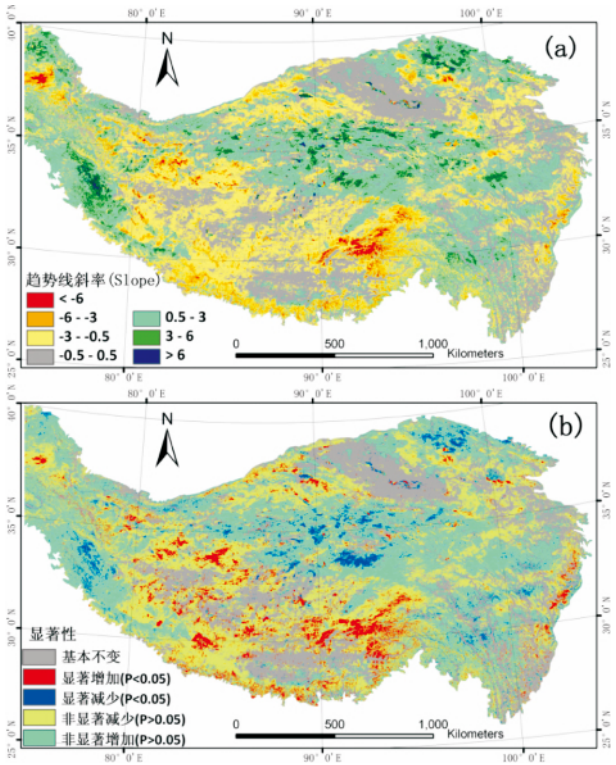


图 7 2001—2011 年青藏高原积雪日数变化趋势(a) 和显著性分布图(b)

Fig.7 Snow covered days (SCD) trend over the Tibetan Plateau from 2001 to 2011: (a) trend; and (b) significance of the trend

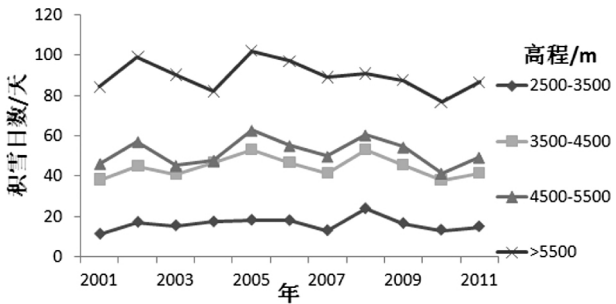


图 8 青藏高原不同高程带平均积雪日数年际变化

Fig.8 Interannual variation of the average snow covered days (SCD) for different elevation zones of the Tibetan Plateau

4 结论

在对 2001—2011 年逐日 MODIS 积雪面积比例产品进行了去云处理的基础上,获得了青藏高原逐年的积雪日数分布图,并对其时空分布特征作了分析,得到以下主要结论:

(1) 基于三次样条函数插值的 MODIS 积雪面积比例产品去云算法,能够有效地获取云遮蔽象元的积雪面积信息。精度验证表明,云覆盖像元的云

持续时间越短,该算法的去云精度越高;在本研究区,该去云算法的总体平均绝对误差为 0.092;去云后的 MODIS 积雪面积比例产品所提取的积雪积雪日数与地面观测积雪日数高度一致,平均一致性为 87.03%,平均绝对误差为 3.8 天。

(2) 青藏高原积雪日数的空间分布受地形影响较大。稳定积雪区主要分布在四周的高山地区,而广阔的中部腹地积雪日数较低。高原西部的喀喇昆仑山和昆仑山,南部的喜马拉雅山和横断山是丰雪区。年均稳定性积雪分布面积(积雪日数 > 60) 占 27.24%。

(3) 近 11 年,青藏高原 34.14% 的地区积雪日数呈下降的趋势(5.56% 的地区显著下降),其中,年均下降天数超过 3 天(且 $P < 0.05$) 的地区主要分布在喀喇昆仑山脉的北部地区、南部喜马拉雅山、以及横断山脉以西的地区;24.75% 的地区积雪日数呈增长趋势(3.9% 的地区显著增加),年均增长天数超过 3 天(且 $P < 0.05$) 的地区主要分布在喀喇昆仑山以南的地区、北部祁连山脉、以及昆仑山与唐古拉山之间的部分地区。青藏高雪积雪日数的年际波动较大,而且不同高程带平均积雪日数的年际变化趋势基本相似。

参考文献(References)

- [1] FOSTER J L, SUN C, WALKER J P, et al. Quantifying the uncertainty in passive microwave snow water equivalent observations[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 94: 187–203
- [2] 王建,李硕. 气候变化对中国内陆干旱区山区融雪径流的影响[J]. *中国科学 D 辑 地球科学*, 2005, 35(7): 664–670 [WANG Jian, LI Shuo. Effect of climate change on snowmelt runoff in mountainous regions of inland rivers in northwestern china[J]. *Science in China: Series D Earth Sciences*, 2005, 35(7): 664–670]
- [3] LIU J F, CHEN R S. Studying the spatiotemporal variation of snow-covered days over China based on combined use of MODIS snow-covered days and in situ observations[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2011, 106: 355–363
- [4] PU Z X, XU L, SALOMONSON V V. MODIS/Terra observed seasonal variations of snow cover over the Tibetan Plateau[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34, L06706.
- [5] QIN D H, LIU S Y, LI P J. Snow cover distribution, variability and response to climate change in western China[J]. *Journal of Climate*, 2006, 19: 1820–1833
- [6] 魏文寿,秦大河,刘明哲. 中国西北地区季节性积雪的性质与结构[J]. *干旱区地理*, 2001, 24(4): 310–313 [WEI Wen-shou, QIN Dahe, LIU Mingzhe. Properties and structure of the seasonal snow cover in the northwest regions of China[J]. *Arid Land Geography*, 2001, 24(4): 310–313]
- [7] 包安明,陈晓娜,李兰海. 融雪径流研究的理论与方法及其在干旱区的应用[J]. *干旱区地理*, 2010, 33(5): 684–691 [BAO Anming, CHEN Xiaona, LI Lanhai. Theories and methods of snowmelt runoff and its application in arid regions[J]. *Arid Land Geography*, 2010, 33(5): 684–691]
- [8] 李培基. 青藏高原积雪对全球变暖的响应[J]. *地理学报*, 1996, 51(3): 260–265 [LI Peiji. Response of Tibetan snow cover to global warming[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1996, 51(3): 260–265]
- [9] 韦志刚,黄荣辉,陈文,等. 青藏高原地面站积雪的空间分布和年代际变化特征[J]. *大气科学*, 2002, 26(4): 496–508 [WEI Zhigang, HUANG Ronghui, CHEN wen, et al. Spatial distributions and interdecadal variations of the snow at the Tibetan Plateau weather stations[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2002, 26(4): 496–508]
- [10] ZHANG Y, LI T, WANG B. Decadal change of the spring snow depth over the Tibetan Plateau: the Associated circulation and its Influence on the East Asian Summer Monsoon[J]. *Journal of Climate*, 2004, 17: 2780–2793
- [11] RODELL M, Houser P R. Updating a land surface model with MODIS derived snow cover[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2004, 5: 1064–1075
- [12] HALL D K, JAMES L, FOSTER, et al. Snow cover, snowmelt timing and stream power in the Wind River Range, Wyoming[J]. *Geomorphology*, 2012, 137: 87–93
- [13] 林金堂,冯学智,肖鹏峰,等. 基于 MODIS 数据的玛纳斯河山区雪盖年际波动特征研究[J]. *干旱区地理*, 2011, 34(6): 975–982 [LIN Jintang, FENG Xuezh, XIAO Pengfeng, et al. Inter-annual fluctuation of snow cover in mountainous area of Manas River basin based on MODIS[J]. *Arid Land Geography*, 2011, 34(6): 975–982]
- [14] 王增艳,车涛. 2002—2009 年中国干旱区积雪时空分布特征[J]. *干旱区研究*, 2012, 29(3): 465–471 [WANG Zengyan, CHE Tao. Spatiotemporal distribution of snow cover in arid regions in China[J]. *Arid Zone Research*, 2012, 29(3): 465–471]
- [15] WANG X, XIE H, LIANG T, et al. Comparison and validation of MODIS standard and new combination of Terra and Aqua snow cover products in Northern Xinjiang, China[J]. *Hydrological Processes*, 2009, 23(3): 419–429
- [16] GAO Y, XIE H J, YAO T D, et al. Integrated assessment of multi-temporal and multi-sensor combinations for reducing cloud obscuration of MODIS snow cover products for the Pacific Northwestern USA[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114: 1662–1675
- [17] XIE H, WANG X, LIANG T. Development and assessment of combined Terra and Aqua snow cover products in Colorado Plateau, USA and northern Xinjiang, China[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2009, 3, 033559
- [18] HALL D K, RIGGS G A, FOSTER J L, et al. Development and evaluation of a cloud-gap-filled MODIS daily snow-cover product[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114: 496–503

- [19] LIANG T, ZHANG X, XIE H, et al. Toward improved daily snow cover mapping with advanced combination of MODIS and AMSR – E measurements[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112: 3750 – 3761
- [20] GAO Y, XIE H J, LU N, et al. Toward advanced daily cloud-free snow cover and snow water equivalent products from Terra – Aqua MODIS and Aqua AMSR – E measurements[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 385: 23 – 35
- [21] 王增艳, 车涛. 中国干旱区积雪面积产品去云处理方法验证与评估[J]. *干旱区研究*, 2012, 29(2): 312 – 319 [WANG Zengyan, CHE Tao. Validation and Assessment of cloud obscuration reduction of snow cover products in arid areas in China[J]. *Arid Zone Research*, 2012, 29(2): 312 – 319]
- [22] 李培基, 米德生. 中国积雪的分布[J]. *冰川冻土*, 1983, 5(4): 9 – 18 [LI Peiji, MI Desheng. Distribution of snow cover in china [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1983, 5(4): 9 – 18]
- [23] RIGGS G A, HALL D K, SALOMONSON V V. MODIS snow products user guide collection 5 [EB/OL]. 2006, <http://modis-snow-ice.gsfc.nasa.gov/sugkc2.html>.
- [24] SALOMONSON V V, APPEL I. Estimating the fractional snow covering using the normalized difference snow index [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89: 351 – 360
- [25] HALL D K, RIGGS G A. Accuracy assessment of the MODIS snow products [J]. *Hydrological Processes*, 2007, 21: 1534 – 1547
- [26] MODIS Reprojection Tool (MRT). User's manual, release 4.0 [EB/OL]. 2008, http://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/content/.../MRT_Users_Manual.pdf.
- [27] STOW D, DAESCHNER S, HOPE A, et al. Variability of the seasonally integrated normalized difference vegetation index across the north slope of Alaska in the 1990s. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(5): 1111 – 1117
- [28] 宋怡, 冯明国. 基于 SPOT VEGETATION 数据的中国西北植被覆盖变化分析[J]. *中国沙漠*, 2007, 27(1): 89 – 93 [SONG Yi, MA Mingguo. 2007. Variation analysis of vegetation cover in the Northwest of China Based on SPOT VEGETATION data. *Journal of Desert Research*, 2007, 27: 89 – 93]
- [29] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002, 48 – 51 [XU Jianhua. *Mathematical methods in contemporary geography* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002, 48 – 51]

Extraction and Spatiotemporal Analysis of Snow Covered Days over Tibetan Plateau Based on MODIS Data

TANG Zhiguang¹, WANG Jian², WANG Xin¹, LI Chaokui¹, LIANG Ji¹, PENG Huanhua¹

(1. National – Local Joint Engineering Laboratory of Geo-spatial Information Technology, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Northwest Institute of Eco – Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Based on Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) daily fractional snow cover (FSC) data, in this paper the spatiotemporal distribution of snow covered days (SCD) over Tibetan Plateau (TP) was examined from 2001 to 2011. Firstly, we described a cloud removal methodology using cubic spline interpolation algorithm to fill in data gaps caused by clouds. Then the yearly SCD images were extracted using the cloud removed MODIS FSC data, and the spatiotemporal distribution of the SCD in the study area was analyzed. The results were as follows: (1) The cloud removal methodology was efficient in cloud reduction and retrieve the FSC information of these cloud covered pixels (overall mean absolute error of the retrieved FSC data is 0.092). There was a high consistency between MODIS – derived SCD and in-situ observed SCD, and the mean absolute error was 3.82 days. (2) The spatial distribution of SCD over the TP was far from uniformity. In the peripheral mountainous area (especially the mountains in the southern and western of TP), snow cover distributes extensively had a long duration (with a high SCD). But in the vast interior area, snow cover was rare and with a very low SCD. About 27.24% of the TP are stable snow cover areas. (3) A very high interannual variability of SCD was found in the 11 years. About 34.14% (5.56% with a significant decline) and 24.75% (3.9% with a significant increase) of the study area showed declining and increasing trend in SCD, respectively.

Key words: MODIS; Tibet Plateau; snow covered days; spatiotemporal changes