

基于去云处理的祁连山积雪覆盖遥感监测研究

赵明洋^{1,2}, 别强³, 何磊³, 赵传燕⁴

(1 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2 中国科学院大学, 北京 100049)

(3 兰州大学资源环境学院, 甘肃 兰州 730000; 4 兰州大学草地农业系统国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 雪盖信息在生态研究、水资源评价管理以及灾害防治中有重要的作用, MODIS利用冰雪指数(*NDSI*)和阈值提供全球每日积雪产品, 微波遥感传感器 AMSR-E 提供南北半球不受云影响的雪水当量数据。通过融合同一天不同时间过境的 MODIS 积雪产品 MOD10A1 和 MYD10A1 为 MOYD, 融合 MOYD 和 AMSR-E SWE 积雪当量产品产生 MODAM, 以祁连山区气象站观测雪深数据为“真值”, 检验了 2010-2011 年积雪季 MODIS 积雪产品和 AMSR-E 识别积雪的精度, 结果表明: MOYD 产品和 MODAM 使云量减少了 15% 和 100%, 积雪精度和总体精度分别达到了 24%、59% 和 88%、80%, 通过融合多时相和多传感器数据大大提高了积雪监测精度, 此外对祁连山积雪时间分布和不确定进行了分析。

关 键 词: 积雪监测; 祁连山区; MODIS; AMSR-E; 雪盖

中图分类号: TP79

文献标识码: A

文章编号: 1000-6060(2014)02-0325-08(325 ~ 332)

积雪是地表覆盖的重要组成部分, 积雪的高反射性和广泛分布使其成为影响地表辐射平衡的重要因素。在北半球冬季积雪覆盖超过 40%^[1], 如此大范围的积雪覆盖, 显著影响地表能量交换和水循环, 导致气候的变化, 因此雪盖是研究水循环和气候变化的重要输入参数。此外, 雪盖与水资源利用、工程建设、牧区生产等人类活动密切相关^[2-3], 成为环境评价的一项重要指标。随着全球变化研究的深入, 积雪覆盖的研究越来越显得重要和迫切。

1980 年以来, 大量的科学工作者利用遥感数据进行冰雪制图研究, 这些数据包括 Landsat、Spot^[4-5] 和 NOAA-AVHRR 数据, 但都受到了时间分辨率以及大气、水汽、气溶胶等条件的制约^[6]。作为美国国家海洋大气局(NOAA)系列气象卫星的后续卫星, MODIS 传感器分别于 1999 年和 2002 年搭载在 TERRA 和 AQUA 卫星升空运行, AQUA 同时还搭载了 AMSR-E 被动微波辐射计。积雪产品受到了全球从事冰雪圈研究的科研工作者的关注^[7-11]。MODIS

传感器有 36 个波段, 第 1、2 波段分辨率为 250 m, 2 ~ 7 波段分辨率为 500 m, 其余波段分辨率为 1 km^[12]。AMSR-E 传感器从 6.9 GHz 到 89 GHz 共 6 个频率, 12 个波段, 每个频率有水平极化和垂直极化方式, 空间分辨率从 5.4 km 到 56 km。MODIS 和 AMSR-E 能够观测全球陆地、海洋和大气中水循环和能量循环的信息^[13], 其中 MODIS 数据以其高空间和时间分辨率优势在冰雪制图研究中发挥了巨大的作用^[1, 2, 14], 其中冰雪指数(*NDSI*)是冰雪制图研究的热点, 刘海隆^[15]、郝晓华^[16]、刘俊峰^[17]等利用 *NDSI* 指数在冰雪制图研究中取得了很好地成果, 同时研究表明利用 TERRA 和 AQUA 双星可以提高监测精度^[11]。AMSR-E 微波辐射计不受天气, 尤其是云的影响, 也越来越多地用于积雪监测, 研究表明 MODIS 与 AMSR-E 数据相结合可以提高遥感积雪识别能力^[18-20]。MODIS 数据可以较为有效地识别积雪像元, 保证了较为清晰的积雪边界轮廓线, 但 MODIS 影像受云层影响严重, 云层覆盖下的积雪识别成为光学传感器

收稿日期: 2013-07-28; 修订日期: 2013-09-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(91025015; 30770387)

作者简介: 赵明洋(1987-), 男, 辽宁本溪人, 在读硕士, 主要从事资源与环境研究

通讯作者: 赵传燕(1963-), 女, 山东曹县人, 教授, 主要从事生态水文研究。Email: nanzhr@lzu.ac.cn

积雪识别的主要误差来源^[21-22], AMSR-E 数据几乎不受云层影响, 因此可以用于云层覆盖区域积雪像元的识别, 但较低的空间分辨率限制了被动微波数据识别积雪的精度。本文首先对 TERRA 和 AQUA 双星 MODIS 积雪产品融合, 然后结合 MODIS 和 AMSR-E 两者的优点, 对二者融合, 进行祁连山区积雪监测, 达到去云处理而又具有较高空间分辨率的效果。

1 研究区概况

祁连山区位于青藏高原的东北部, 地理位置在 93°30' ~ 103°00'E, 36°30' ~ 39°30'N 之间的范围内, 长约 850 km, 宽约 200 ~ 300 km, 在行政上地跨甘肃和青海两省。东段最高的冷龙岭平均海拔高度为 4 860 m, 西段最高峰为疏勒南山的团结峰, 海拔 5 766 m, 平均海拔为 3 700 m(图 1)。气候垂直分异大, 高山区降水量在 400 ~ 800 mm, 由于低温高寒, 每年约有 15% 的降水以雪的形式降落^[23]。4 500 m 以上终年积雪, 5 000 m 以上发育有现代冰川。山区冰雪融水是许多河流的重要补给来源。

2 数据收集

2.1 MODIS 积雪覆盖数据

在 NSIDC 网站订购下载 MOD10A1(简写 MOD,

TERRA 卫星)和 MYD10A1(简写 MYD, AQUA 卫星) 每日积雪分类产品。MOD 过境时间为 10:30, MYD 过境时间 13:30, 两者相差 3 h 左右, 积雪产品编码 0 表示数据缺失、1 为未定值、11 为黑夜或两极、25 为陆地、37 为内陆水、39 为海洋、50 为云、100 为雪覆盖湖冰、200 为雪、254 为探测器饱和、255 为空值。本文采用了 2010 年 12 月 1 日 ~ 2011 年 3 月 1 日一个积雪季 90 个时相数据, 每个时相由 2 景影像拼接而成。

2.2 AMSR-E 雪水当量数据

在 NSIDC 网站上订购下载的 AMSR-E SWE 影像数据, AMSR-E 数据包括雪水当量数据和质量验证数据, 以 HDF-EOS 文件的格式存储, 分辨率为 25 km, 存储数据范围是 0 ~ 240, 必须将文件中的雪水当量数据乘以 2 才能得到正确的雪水当量值。AMSR-E SWE 雪水当量数据采用 EASE-Grid_north 投影, 数据大小为 721 × 721。AMSR-E 产品编码 1 ~ 240 代表有积雪覆盖的区域, 0 和 248 代表无积雪覆盖的地表, 252、253、254、255 分别代表陆地或不可能是积雪覆盖的区域、湖冰、水体和数据丢失。

2.3 气象站数据

收集位于祁连山区内和在祁连山边缘的 26 个气象站点数据, 气象站点分布见图 1, 大多数站点位于研究区低海拔处, 范围 1 332 ~ 3 367 m。当积雪深度小于 0.5 cm, 认为雪深为 0, 当积雪深度等于或

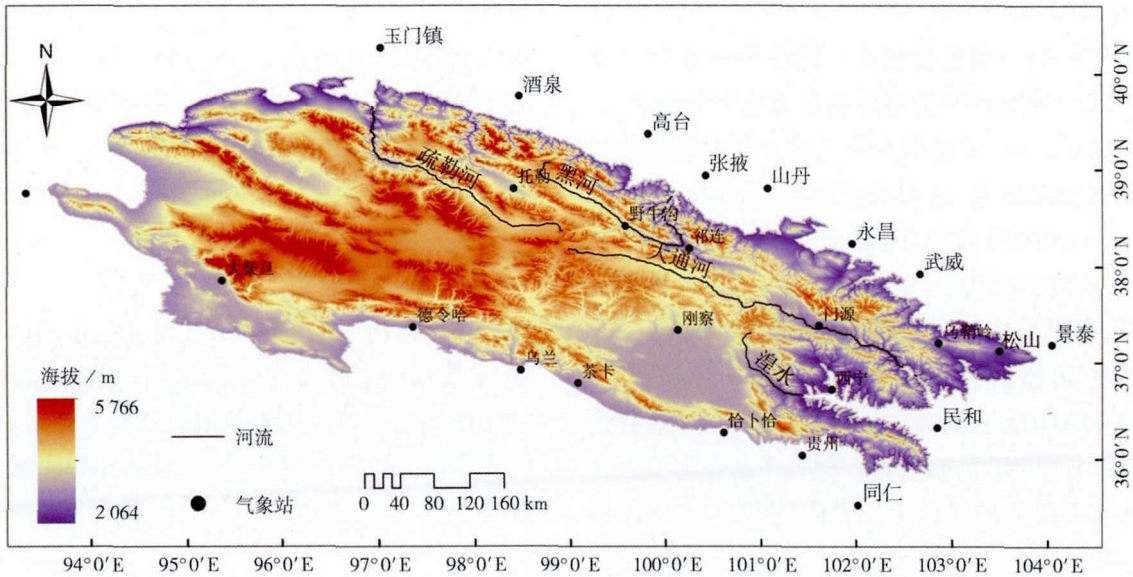


图1 研究区DEM和气象站的分布图
Fig.1 DEM and location of weather stations in the study area

者>0.5 cm,按照中国气象局规则,将观测的积雪深度进行四舍五入的取整处理。气象站点积雪深度的测量不受天气影响,短期内积雪深度变化不明显,本文以气象站点的积雪深度作为验证数据。为了增加验证气象站点的数量,采用部分在祁连山区周边的站点作为补充,影像范围取所有气象站点外接矩形,覆盖所有气象站点。

3 研究方法

3.1 MODIS数据预处理和融合

利用MODIS数据处理软件MRT(MODIS Reprojection Tool),对祁连山地区MODIS/TERRA和AQUA每日积雪分类产品进行拼接和坐标变换处理。同时,将正弦曲线投影转换为地理坐标,椭球体选为WGS84,重采样方法选用最邻近法,图像文件转换为GeoTIFF格式。MOD和MYD卫星过境时间相差3 h,MOD和MYD融合的规则与MOD10A2生产算法相似^[24]。只要同一像素在任何一张影像上标示为雪,那么新合成影像该像素为雪,如果将同一像素在一张影像上标示为“非雪”,在另一张影像上标示为云,那么该像素标示为“非雪”,是尽量减少云对影像信息的掩盖。如果有某些像素在一张影像上缺失,那么直接用另一张影像上的像素作为合成影像。

3.2 AMSR-E数据处理

首先在ENVI 4.8下导入HDF数据,打开SWE将影像保存为img格式,并定义投影为EASE Grid north,在ENVI下将Image数据转为GeoTIFF格式,在ArcCatalog 9.3下将GeoTIFF格式的图像投影定义为EASE Grid north。在ArcGIS下将AMSR-E雪水当量产品的GeoTIFF格式的图像转换为GRID格式,格网分辨率分别设置为25 km。采用ArcMap中的Project Raster投影转换工具将其投影转为Albers等积圆锥投影。将AMSR-E雪水当量产品进行重采样,和MODIS取同样500 m分辨率^[25]。

3.3 MODIS和微波数据协同积雪监测。

图像合成的目的在于结合AMSR-E每日雪水当量产品不受云干扰和MODIS每日积雪分类产品空间分辨率高的特点,尽可能地消除MODIS每日积雪分类产品中云对积雪分类的影响,从而更准确地

反映积雪分布范围。每日合成图像MODAM数据的第*i*行*j*列的象元 T_{ij} 赋值规则见图2。(1)MODIS数据中编码为0、1、4、11、254、255定义为无意义,统一编码为0,若MODIS中象元 T_{ij}^M 值为0,那么合成图像MODAM象元 T_{ij} 赋值为AMSR-E数据的值 T_{ij}^A ; (2)当MODIS中像元值为云,即 T_{ij}^M 值为50时,合成图像MODAM象元 T_{ij} 赋值为AMSR-E数据的值 T_{ij}^A ; (3)当MODIS值为陆地、水体、积雪覆盖的湖冰和积雪时,即 T_{ij}^M 值为25、37、100、200时,合成图像MODAM象元 T_{ij} 赋值为MODIS数据的值 T_{ij}^M 。

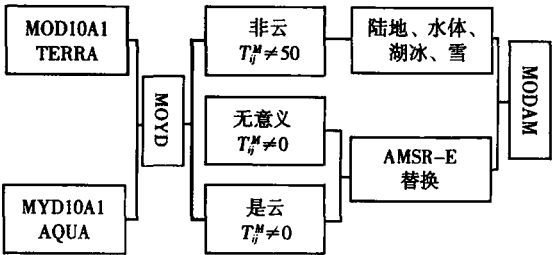


图2 MODIS和AMSR-E积雪产品处理流程图
Fig.2 Flowchart of combination of MODIS and AMSR-E data

3.4 精度评价

在研究区内和周边共26个气象站,利用ArcGIS软件的采样功能,将包含各气象站点的点矢量文件在各时相各积雪影像研究区上进行采样,获取对应各站点的影像上的像元值。把气象站点观测到的数值作为真值,气象台记录的积雪深度作为MODIS、AMSR-E和最后合成数据MODAM的精度评价的地面“真值”,精度检验中一致性是评价原始和经去云处理后影像的信息和“真值”的相似程度,一致性检验中包括总体精度和积雪精度,总体精度(OA)是指在气象站记录为积雪同时影像记录为积雪、气象站记录没有雪和影像记录没有雪的站点数总和除以所有检验点数。积雪一致性(SA)是气象站记录为积雪同时影像记录积雪的站点数除以气象站记录为积雪的总数,积雪非一致性包括多分误差(EU)和漏分误差(EO)。

$$OA = (SS + NN) / T_c \times 100\% \quad , \quad (1)$$

$$SA = SS / T_s \times 100\% \quad , \quad (2)$$

$$EU = NS / T_s \times 100\% \quad , \quad (3)$$

$$EO = SN / T_s \times 100\% \quad , \quad (4)$$

式中:SS为影像和气象站点都为积雪的数量,NN

为影像和气象站点都为陆地的数量, NS 为气象站点没有雪而影像监测为雪的数量, SN 为气象站点是雪而影像监测为非雪的数量, T_c 为所有气象站点的数量, T_s 为所有积雪的气象站点的数量。

4 结果与讨论

4.1 去云处理效果评价

祁连山地区2010年12月1日到2011年2月1日整个积雪季期间,共有90个时相的MODIS每日积雪数据(MOD和MYD)和AMSR-E SWE每日雪水当量数据。由于祁连山位于中低纬度,AMSR-E SWE数据有较大的空白区,本文融合当天和接下来两天的数据,AMSR-E共30个时相。融合TERRA和AQUA平台的MODIS数据可以大大去除云量,用AMSR-E来替换在MODIS是云的区域像素可以彻底的去云对积雪监测的影响。

图3为MOD、MYD和融合后的MOYD图像在祁连山区的云量,祁连山区12月份MOD和MYD平均云量分别为36%、40%,1月份MOD和MYD平均云量分别为56%、60%,2月份MOD和MYD平均云量分别为66%、69%。由于MOD当地时间10:30过境,而MYD是13:30过境,祁连山区在下午的云量要高于上午的云量。融合后MOYD的云量在积雪季三个月份的云量下降到22%、45%和52%,比融合前云量下降14.5%。MOD和MYD积雪季平均云量达到53%,严重制约了积雪监测的精度,通过融合不同时

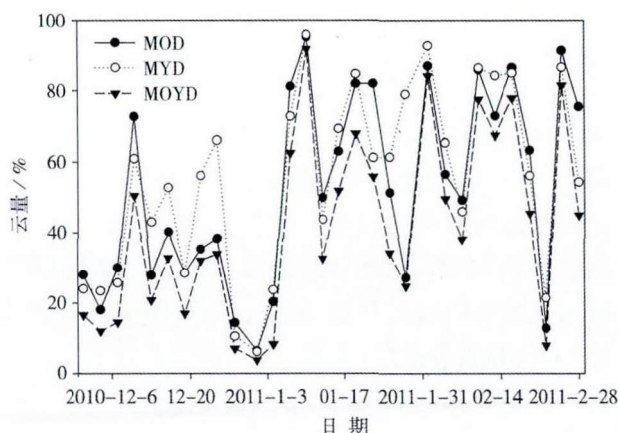


图3 祁连山区2010年12月-2011年3月MODIS每日积雪产品云量变化图

Fig.3 Variation of cloud cover from MOD, MOY, and MOYD data from December in 2010 to March in 2011

间过境的MODIS传感器将平均云量降到40%。

AMSR-E微波遥感可以穿透云层,不受云层的影响,AMSR-E SWE产品和经过AMSE-E SWE与MOYD融合的图像云量为0,彻底消除了云的影响。图4显示了同一天MOD、MYD、MOYD、AMSR-E和MODAM云分布情况,从图4可以看出融合后的MOYD的积雪制图效果有了很大的提升,同时MODAM也更真实的反映了整个地面积雪覆盖情况。

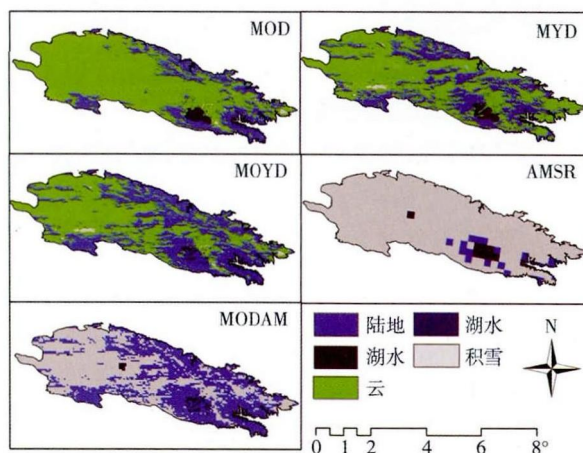


图4 2010年12月15日MODIS和AMSR-E每日积雪产品及合成图

Fig.4 Combination of MODIS and AMSR-E and their daily snow cover product on December 15 in 2010

4.2 积雪监测精度分析

由表1分析可得,在2010-2011年积雪季MYD和MOD积雪分类精度为15%,总体精度介于47%~48%,积雪多分误差为0%,漏分误差达86%,这主要是由于在MOD和MYD中云占的比例很大,MODIS传感器将地面积雪区域由于云的干扰而错分,将TERRA和AQUA卫星的MODIS影像融合生产MOYD,由于前后3个小时的时间差,使得合成影像的云量降低了13%,影像积雪精度和总体精度达到了24%和59%,比单个卫星的精度分别提高9%和12%,漏分误差随着云量的减少而减少,多分误差在TERRA和AQUA两个MODIS传感器都为0,其在陆地识别方面精度较高。搭载于TERRA卫星的AMSR-E微波传感器不受天气的影响,将其和MODIS融合后,积雪产品的识别精度有了很大的提高,积雪精度和总体精度分别达到了88%和80%,较单一MODIS数据分别提高了64%和21%。漏分误差由原来的80%降低到12%,同时AMSR-E引入了20%

的多分误差,这主要是该传感器分辨率为25 km,每一个像元代表的是25 km×25 km面积的雪水当量,对单一站点有多分的情况。

表1 遥感数据产品积雪监测精度分析

指标数据	一致性				非一致性			
	NV	SS	SA	OA	SN	NS	EU	EO
MYD	101	24	15%	48%	136	0	0%	86%
MOD	80	20	15%	47%	112	0	0%	85%
MOYD	90	26	24%	59%	80	0	0%	76%
MODAM	44	120	88%	80%	16	25	18%	12%

4.3 祁连山区积雪时间分布

在监测期内,祁连山区积雪分布呈两峰加一谷的“驼峰”形状,进入12月随着降雪增加和气温的降低,雪盖面积开始扩大,到12月中旬覆盖面积达到一个高峰,占全区面积的40%,到12月底由于持续的干旱,尽管气温持续降低,但雪盖的面积变为最低,雪盖面积不到全区面积的10%,这期间融雪过程明显,平均每天消融1%,由于本融合MOD和MYD过程中采用积雪最大原则,以及MOYD较强的去云能力,故融雪对雪盖精度评价影响很小,可以忽略。进入1月,随着持续的降水和低温的积雪条件,祁连山区积雪覆盖面积快速增加到80%,面积最大时为94%,进入2月下旬祁连山区积雪面积开

始减少。在图5可以看出,山区积雪不仅要有物质积累,而且要有积雪的低温条件,二者缺一不可。积雪的消融有明显的滞后效应,一场降水过后雪的持续性由其所处地理位置和地面覆盖所决定^[24],也受地形的影响,背风坡有利于物质积累,坡向影响地面接受的太阳辐射,进而影响积雪的消耗,坡度和地面覆盖是积雪的立地条件,坡度越平缓、地表覆盖越粗糙越有利于积雪的积累。

4.4 积雪监测精度的不确定性分析

(1) 积雪产品算法对积雪提取的影响。MODIS积雪产品是根据雪盖在可见光波段比土壤、植被、和 水体有较高的反射率,而在短波红外1.6 μm处吸收太阳辐射,呈现出低反射率特性,建立冰雪指数,根据阈值确定冰雪分布范围^[7, 11-12],搭载于TERRA卫星的MODIS的冰雪指数定义为:

$$NDSI = (R_4 - R_6) / (R_4 + R_6) \quad , \quad (5)$$

式中: R_i 表示MODIS第*i*个波段, $NDSI > 0.4$ 可以区分积雪和大部分陆地、云,用 $R^2 > 0.11$ 区分积雪和水体, $R_4 > 0.1$ 区分积雪和北方稠密森林, $R_{26} > 0.1$ 用于区别积雪和卷云。搭载于AQUA卫星的MODIS传感器第6波段出现问题,无法计算 $NDSI$,用第7波段代替第6波段计算差值积雪指数M $NDSI$ 。MODIS中 $NDSI$ 阈值为0.4,部分学者根据不同地方试验^[5, 16],而0.4并非是唯一的标准,不同的植被覆盖,不同的地域其取值不同,郝晓华等研究表明,在祁连山中段MODIS产品采用的阈值0.4偏高,本区域合

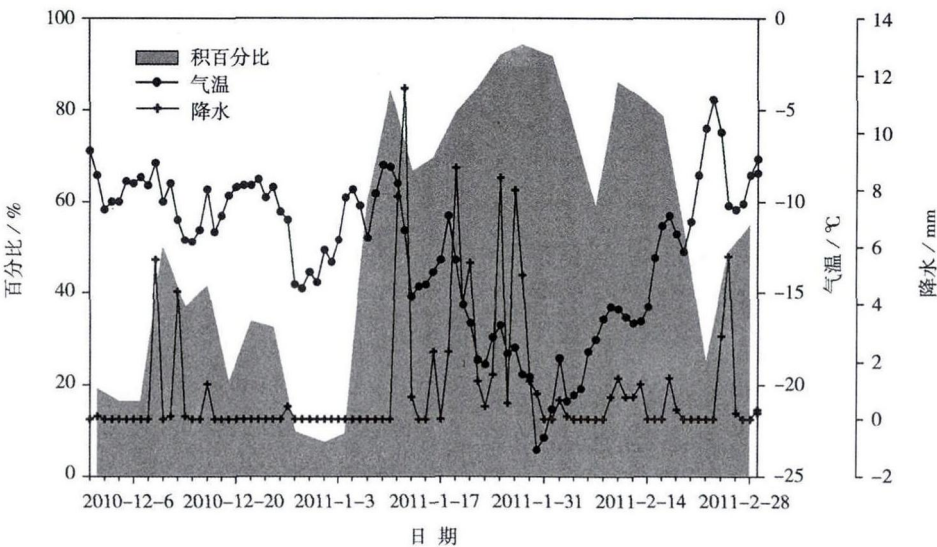


图5 祁连山区2010年12月到2011年3月积雪分布及气温和降水变化图

Fig.5 Temporal distribution of snow cover, and variation of precipitation and temperature in the Qilian Mountain Area

理 *NDSI* 阈值应为 0.33^[16]。因此积雪产品的不同算法和在全球取统一的阈值是导致积雪监测不确定性的因素之一。

(2) 影像分辨率对积雪提取的影响。MODIS 积雪产品的分辨率为 0.5 km, 每一个像素代表了 0.25 km² 面积, 而微波遥感数据 AMSR-E 分辨率为 25 km, 每一个像素代表了 625 km² 面积, 积雪分布受地形和地表覆盖的影响, 具有较高的异质性, 粗分辨率影像不能真实的反映区域积雪覆盖的情况。

(3) 站点分布对精度评价的影响。在积雪监测精度研究中以地面气象站点实测的积雪为“真值”进行验证, 气象站点只代表了观测站某一点的真实值, 不能准确的反映站点所在像元代表区域积雪的平均状况, 所以用站点的值验证像素分布面积上积雪分布情况会带来一定的误差; 其次祁连山区气象站点多分布在低海拔地区, 而非均匀分布, 在积雪评价中带来一定的不确定性。

(4) 云对可见光影像积雪提取的影响。在本研究中 MODIS 影像的总体精度和积雪精度都非常低, 而积雪的漏分误差达到了 80%, 大部分的积雪信息在 MODIS 影像中被云覆盖, 梁天刚、雷小春等在新疆研究中曾报道 MODIS 积雪产品的分类精度达到 60% 以上^[26-27], 主要是因为其研究区海拔低, 而且地势平坦, 云对积雪产品的影响较小。而在祁连山平均海拔 3 700 m, 地势起伏大, 云分布面积占 60%, 大大降低了 MODIS 积雪产品精度, 积雪精度仅为 13%。

5 结论和讨论

在高海拔地势起伏大的祁连山区, 云的分布达到了 60%, 云是制约遥感影像积雪分类精度的主要因素。MODIS 以其较高的空间分辨率在积雪监测中发挥了巨大作用, 但是 MODIS 又容易受天气的影响, 尤其在高海拔云量分布广泛和频繁的区域, 其对地表分类的精度大大降低, 微波遥感数据 AMSR-E 产品, 以其不受天气影响而在各种天气背景下展现出对积雪监测的巨大优势, 但是微波遥感产品的空间分辨率较低, 制约了微波监测积雪的精度。

本研究中由于研究区云量大, MODIS 的总体精度仅为 45%。大量的研究表明通过利用分别搭载于 TERRA 和 AQUA 的 MODIS 传感器时间差, 融合两传感器产品可以减少部分云量^[11,24], 本文研究也得出相同的结论, 融合后云量减少 13%, 分类的积雪精度和总体精度提高 10% 左右。通过融合 MODIS 产品和微波 AMSR-E 产品, 综合利用二者在积雪监测的优势, 达到了去云和保持高分辨率的目的。在本文中对微波数据 AMSR-E 进行重采样, 使之和 MODIS 保持同样大小空间分辨率, 然后将 MODIS 中云的像素替换。通过融合云被完全替换, 积雪精度和总体精度分别达到了 88% 和 80%, 较原 MODIS 数据的精度分别提高了 70% 和 30%, 两种数据融合极大地提高了积雪日监测的精度。

通过时间序列的监测, 发现祁连山区积雪的高峰期为 1 月上旬到 2 月下旬, 期间有持续的低温条件和大量的降水, 积雪高峰期祁连山区积雪覆盖平均为 75%。在对积雪监测精度分析中发现, 积雪监测中的不确定性主要来自于积雪产品算法、影像分辨率以及云对可见光、红外等波段的阻拦等方面, 同时用气象站点实测雪深来评价积雪精度也带来一定的误差。

参考文献 (References)

- [1] ROBINSON D A, KUKLA G. Maximum surface albedo of seasonally snow covered lands in the Northern Hemisphere[J]. *Climate and Applied Meteorology*, 1985, 24(1): 402-411.
- [2] 王建. 卫星遥感雪盖制图方法对比与分析[J]. *遥感技术与应用*, 1999, 14(4): 29-36. [WANG Jian. Comparison and analysis on methods of snow cover mapping by using satellite remote sensing data[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 1999, 14(4): 29-36.]
- [3] 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 Wenshou, QIN Dahe, LIU Mingzhe. Properties and structures of seasonal snow cover in the northwest region of China[J]. *Arid Land Geography*, 2001, 24(4): 310-313.]
- [4] XIAO X, MOORE B, QIN X, et al. Large-scale observation of alpine snow and ice cover in Asia, using multi-temporal VEGETATION sensor data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 23(11): 2213-2228.

- [5] 孙志群,刘志辉,邱冬梅. 基于HJ-1B数据的雪盖提取方法研究[J]. 干旱区地理, 2012, 35(19): 125-132. [SUN Zhiqun, LIU Zhihui, QIN Dongqiu. Methods of extracting snow cover information based on HJ-1B data: a case of the Juntanghu Watershed[J]. Arid Land Geography, 2012, 35(1): 125-132.]
- [6] CAO Y G, LIU C. The development of snow-cover mapping from AVHRR to MODIS[J]. Geography and Geo-Information Science, 2005, 21(5), 15-19.
- [7] 李杨,顾建丽,张璞,等. 准噶尔盆地积雪储量的遥感反演及变化特征分析[J]. 干旱区地理, 2010, 33(4): 623-629. [LI Yang, GU Jianli, ZHANG Pu, et al. Snow cover storage retrieval by remote sensing technology and variation analysis on the Junggar Basin[J]. Arid Land Geography, 2010, 33(4): 623-629.]
- [8] 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 Xuezhi, 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.]
- [9] LAMPKIN D J, YOOL S R. Monitoring mountain snowpack evolution using near surface optical and thermal properties[J]. Hydrological Process, 2004, 18: 3527-3542.
- [10] 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 Lanhan. Theories and methods of snowmelt runoff and its application in arid regions[J]. Arid Land Geography, 2010, 33(4): 684-691.]
- [11] 梁天刚,高新华,黄晓东,等. 新疆北部MODIS积雪制图算法的分类精度[J]. 干旱区研究, 2007, 24(4): 446-452. [LIANG Tiangang, GAO Xinhua, HUANG Xiaodong, et al. Study on the accuracy of MODIS snow cover mapping algorithm in northern Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2007, 24(4): 446-452.]
- [12] GAO Y, LU N, YAO T D. Evaluation of a cloud-gap-filled MODIS daily snow cover product over the Pacific Northwest USA[J]. Journal of Hydrology, 2011, 404(1): 157-165.
- [13] KLEIN A G, BAMETT A C. Validation of daily MODIS snow cover maps of the upper Rio Grande River Basin for the 2000-2001 snow year[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 86(2): 162-176.
- [14] 李金亚,杨秀春,徐斌,等. 基于MODIS与AMSR-E数据的中国6大牧区草原积雪遥感监测研究[J]. 地理科学, 2011, 31(9): 1098-1103. [LI Jinya, YANG Xiuchun, XU Bing, et al. Snow monitoring using MODIS and AMSR-E in six main pastoral areas of China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2011, 31(9): 1098-1103.]
- [15] 刘海隆,王玲,包安明,等. 基于MODIS的玛纳斯河流域冰川积雪覆盖变化特征的分析[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2009, 27(6): 770-774. [LIU Hailong, WANG Ling, BAO Anming, et al. Analysis on snow and ice cover area in Manasi River Basin based on MODIS data[J]. Journal of Shihezi University (nature science), 2009, 27(6): 770-774.]
- [16] 郝晓华,王建,李弘毅. MODIS雪盖制图中NDSI阈值的检验—以祁连山中部山区为例[J]. 2008, 30(1): 134-138. [HE Xiaohua, WANG Jian, LI Hongyi. Evaluation of the NDSI threshold value in mapping snow cover of MODIS: A case study of snow in the middle Qilian Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30(1): 132-138.]
- [17] 刘俊峰,陈仁升. 东北-内蒙古地区基于MODIS单/双卫星积雪数据及常规积雪观测结合的积雪日数研究[J]. 遥感技术与应用, 2006, 26(4): 450-456. [LIU Junfeng, CHEN Rensheng. Studying the MODIS snow covered days by the use of MODIS aqua/terra snow cover products and insitu observations in north eastern and Inner Mongolia region[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2011, 26(4): 450-456.]
- [18] PARAJKA J, BLSCHL G. Spatial-temporal combination of MODIS images potential for snow cover mapping[J]. Water Resources Research, 2008, 44(3), W03406.
- [19] LIANG T G, ZHANG X T, 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(10): 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(4): 23-35.
- [21] LIANG T G, HUANG X D, WU C X, et al. An application of MODIS data to snow cover monitoring in a pastoral area: a case study in Northern Xinjiang, China[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(4): 514-526.
- [22] WANG X, XIE H, LIANG T G. Evaluation of MODIS snow cover and cloud mask and its application in northern Xinjiang, China[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(4), 1497-1513.
- [23] 尹宪志,张强,徐启运,等. 近50年来祁连山区气候变化特征研究[J]. 高原气象, 2009, V28(1): 85-90. [YIN Zhixian, ZHANG Qiang, XU Qiyun, et al. Characteristics of climate change in Qilian Mountains region in recent 50 years[J]. Plateau Meteorology, 2009, 28(1): 85-90.]
- [24] PAUDEL K P, ANDERSEN P. Monitoring snow cover variability in an agropastoral area in the Trans Himalayan region of Nepal using MODIS data with improved cloud removal methodology[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(5): 1234-1246.
- [25] 冯琦胜,张学通,梁天刚,等. 基于MOD10A1和AMSR-E的北疆牧区积雪动态监测研究[J]. 草业学报, 2009, 18(1): 125-133. [FENG Qisheng, ZHANG Xuotong, LIANG Tiangang, et al. Dynamic monitoring of snow cover based on MOD10A1 and AMSR-E in the north of Xinjiang Province, China[J]. Acta Pratacul-turae Sinica, 2009, 18(1): 125-133.]

- [26] MAURER E P, RHOADS J D, DUBAYAH R O, et al. Evaluation of the snow-covered area data product from MODIS[J]. *Hydrological Processes*, 2003, 17(1): 59–71.
- [27] SIMIC A, FERNANDES R, BROWN R, et al. Validation of VEG-ETATION, MODIS, and GOES+SSM/I snow-cover products over Canada based on surface snow depth observations[J]. *Hydrological Process*, 2004, 18(6): 1089–1104.

Estimating snow cover accuracy from MODIS and AMSR-E with cloud removal methodology in Qilian Mountains

ZHAO Ming-yang^{1,2}, BIE Qiang³, HE Lei³, ZHAO Chuan-yan⁴

(1 *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China*; 2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; 3 *College of Earth and Environmental Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China*; 4 *State Key Laboratory of pastoral Agricultural Ecosystem, Institute of Arid Agroecology, School of Life Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China*)

Abstract: Snowcover information is very crucial to ecological research, water resource evaluation and disaster prevention for 40%–60% surface of the northern hemisphere covered by snowcover. Monitoring of the snowcover extent has been a hotspot in snowcover studies. MODIS sensor provides daily snowcover products with high temporal resolution, using snow and ice index (*NDSI*) and classification threshold, but most of these products are disturbed by the clouds that are very common in the alpine areas. The passive microwave remote sensing, AMSR-E, provides daily snowcover products without clouds disturbance, however, the spatial resolution of AMSR-E products are very coarse with 25 km. So the aim of this study is to explore the method to combine the product of MODIS and the AMSR-E and to get the accurate and high special resolution snowcover products. To achieve this purpose, firstly, MOYD data were obtained by combing MODIS snowcover products (i.e., MOD10A1 and MYD10A1) at different transit time in a day, which came from MODIS sensors in TERRA and AQUA satellites. Secondly, MODAM data were derived by combining MOYD and AMSR-E. Lastly, the snowcover depth data observed in 26 weather stations in the Qilian Mountains area were used to test the accuracy of the snowcover products. The results show that the combination of MOD and MYD can reduce the clouds by 15%, while for the MOYD and AMSR-E; this value can be 100%. The results also show that this combination method can improve the classification accuracy of snowcover; the accuracy of snowcover classification of MOYD data is 24% and the overall classification accuracy is 59%. For the MODAM data, the accuracy of snow classification can get to 88% and the overall classification accuracy is 80%. The analysis of the temporal distribution of snowcover in the Qilian Mountains shows that the peak season of snowcover, almost 75% area of the Qilian Mountains is covered by snowcover, from the beginning of January to the late February because of low temperature and the large amounts of snowfall in this period. Through assessing of the uncertainty of snowcover product, the paper finds that the combination of remote sensing products from different time and different remote sensor is very effective in monitoring of the snowcover distribution.

Key Words: snowcover monitoring; the Qilian Mountains area; MODIS; AMSR-E; snowcover