

引 用 格 式:Yu Xiaoqi,Qiu Yubao,Ruan Yongjian,*et al.* Validation and Comparison of Binary Cloudless Snow Products in High Asia[J].Remote Sensing Technology and Application,2017,32(1):37-48.[于小淇,邱玉宝,阮永俭,等.高亚洲地区无云积雪遥感二值产品对比和精度验证分析[J].遥感技术与应用,2017,32(1):37-48.]
doi:10.11873/j.issn.1004-0323.2017.1.0037

高亚洲地区无云积雪遥感二值产品对比和精度验证分析

于小淇^{1,2},邱玉宝²,阮永俭²,石利娟²,拉巴卓玛³

(1.辽宁工程技术大学,测绘与地理科学研究生学院,辽宁 阜新 123000;
2.中国科学院遥感与数字地球研究所 数字地球重点实验室,北京 100094;
3.西藏高原大气环境科学研究所,西藏 拉萨 850000)

摘要:以青藏高原为核心的高亚洲地区是我国重要的积雪分布区域,也是气候变化的敏感区域。高精度的积雪遥感监测产品可更好地理解区域水和能量循环过程,提升气候、环境分析和水资源应用潜力,然而由于高亚洲地区地形复杂,高原局部气候变化快,当前所发布的积雪产品的算法各有所长,不同产品的精度评价所采用的评估方法、参考数据和精度指标不统一,这为积雪数据产品应用及评价带来挑战。选择目前国内外已经发布的较为典型的 IMS、MODIS 无云积雪产品等 3 种数据,开展基于流域的时空交叉对比分析,并采用同一套地面参考数据集及综合性指标,进行了精度验证和对比研究。结果表明:利用不同数量的地面观测数据进行验证时,3 种积雪产品表现都较为稳定,总精度都能达到 85% 以上,IMS 和与微波观测相结合的无云(A-MODIS)产品召回率较高,而 MODIS 积雪产品的准确度较高,权衡参数 F 值较高;在积雪季初期 3 种产品积雪覆盖面积和趋势吻合,后期融雪期出现较大差异,IMS 与 A-MODIS 产品相较于 MODIS 产品有高估现象,认为与云覆盖及微波数据的质量有很大关系,总体来看 IMS 产品与 MODIS 积雪产品精度相接近,但 MODIS 积雪产品数据质量较高。该项研究可为积雪遥感产品在高亚洲地区应用提供客观的分析和评价。

关 键 词:积雪遥感产品;高亚洲地区;精度评价;IMS;MODIS

中图分类号:TP 75 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2017)01-0037-12

1 引 言

陆地积雪是全球变化的敏感因子,是冰冻圈中季节性变化最为快速的因子之一。以青藏高原为主的高亚洲地区是气候变化的敏感区,也是我国主要的积雪区,该地区的积雪影响着东亚大气环流及天气系统,尤其在青藏高原地区,其冰雪融水更是农业灌溉及南亚众多河流的命脉^[1-3]。因此高质量的积雪资料是高原积雪和遥感动态监测研究的重要基

础,遥感作为宏观、快速准确监测积雪的主要手段,能够获得越来越多的卫星遥感数据,积累长时序的多源遥感积雪产品^[4]。

目前国内外多源卫星能够提供较高分辨率的积雪产品,可广泛应用于积雪面积变化监测,而高亚洲地区地理环境独特,同时相同范围的不同产品间的差异较大,例如部分积雪产品中利用微波数据不受云层干扰的特点加入了微波数据的判别^[5-6];而有些产品根据时间及空间连续性等特征来判别积雪^[7]。

收稿日期:2016-07-13;修订日期:2016-11-29
基金项目:中国科学院国际合作局对外合作重点项目(131CHKYSB20160061),国家自然科学基金项目(41371351)和国家自然科学基金重点项目(ABCC 计划,41120114001),公益性(气象)行业专项(GYHY201206040)项目联合资助。
作者简介:于小淇(1992—),女,辽宁抚顺人,硕士研究生,主要从事遥感应用研究。E-mail:642861071qi@sina.com。
通讯作者:邱玉宝(1978—),男,江西兴国人,副研究员,主要从事环境遥感应用、极地和寒区信息服务研究。E-mail:qiuyb@radi.ac.cn。

然而微波数据是否准确,各种积雪产品能否代表高亚洲地区最接近真实的积雪覆盖情况还有待于探究。因此积雪产品的验证及交叉对比研究具有重要的意义,可为积雪遥感产品在高亚洲地区的应用提供客观的分析和评价。

近年来遥感积雪产品的验证和精度对比评估研究在国际上已得到密切的关注,在 2014 年和 2015 年两年间,在欧洲和美国连续召开了两次全球性的积雪遥感数据产品的精度验证和产品比较大会议(Inter-Comparison)^[8],利用多种现有公开的算法开展积雪制图工作,在积雪面积、覆盖度及雪水当量上分别开展了产品数据的验证^[9-18]。但是在中国地区尤其是地形复杂的高亚洲地区,积雪数据产品的验证及产品间的交叉对比研究并不全面。目前使用的数据来源各不相同,比较单一,存在不同的争论^[3],而且中高纬度国家或地区积雪深,覆盖范围广,验证精度很高,可对于高亚洲地区来说难度更大。验证的指标与方法都是遥感数据产品检验的重要环节,评价指标是准确量化遥感产品精度的重要手段,指标体系的构建和完善在验证评价中有关键性的作用,可突出对区域性、流域性的积雪覆盖环境的分析^[19-20]。但在不同区域验证不同产品的条件下,所用指标也不尽相同,

导致多种产品无法直接比对,不能更加深入地了解产品适用性。

因此针对上述问题,本文选择了几种具有代表性的遥感数据产品,开展精度分析和交叉对比验证,主要针对 MODIS 青藏高原逐日无云积雪面积数据集、IMS 雪冰产品、与 AMSR-E 微波数据结合的青藏高原地区 MODIS 逐日无云积雪产品 3 种积雪面积遥感数据,采用统一的验证精度指标体系及参考数据,分析当前积雪产品的精度,并从空间分布、年际变化等方面讨论高亚洲地区积雪覆盖的情况。

2 研究区与数据

2.1 高亚洲地区

本文以高亚洲地区(High Asia)为研究区,位于亚洲中部,主要包括青藏高原主体及周边部分山系,西起兴都库什山和天山山脉,东至喜马拉雅山脉,范围横跨约 45 个经度,纵贯约 22 个纬度,平均海拔 4 000~5 000 m,拥有除极圈外全球最大的冰雪储量^[21](图 1)。青藏高原以及以其为主体的高海拔区域,地形独特,有诸多高度悬殊的山峰、冰川、高山湖泊和沼泽,不仅是长江、黄河、澜沧江等重要河流的发源地,也是我国三大积雪分布中心之一,对我国西部和中亚地区的气候环境影响巨大。

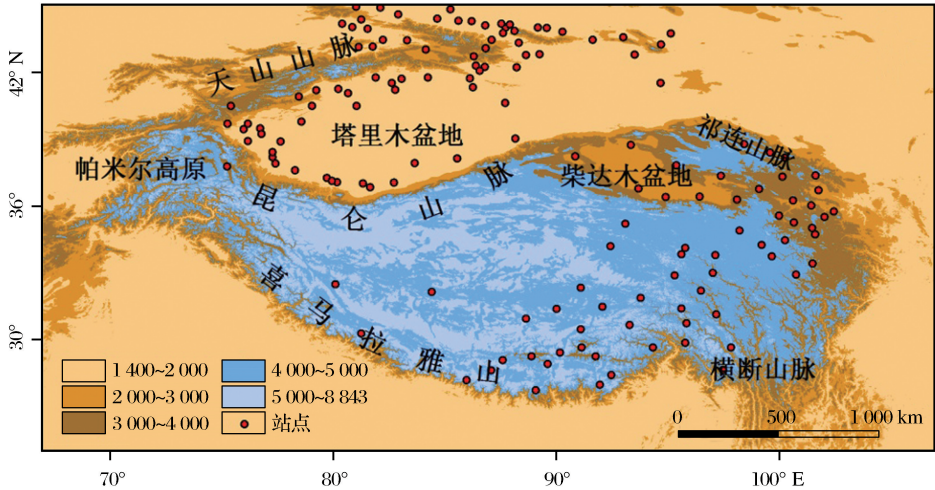


图 1 研究区范围和站点数据分布情况
Fig.1 Study area and site data distribution

高亚洲地区地形的复杂引起热量水汽不均,因此积雪分布也极不均匀。积雪主要集中在西部的昆仑山脉、高原北部的天山、以及南部的喜马拉雅山、东南部的念青唐古拉山脉附近。高原中部腹地包括柴达木盆地以及北部的临近高原的塔里木盆地,由于受四周高山地形的影响,水汽输送较少,是

积雪的小值区域。总之青藏高原地区独特复杂的地形以及积雪破碎的情况,使得积雪遥感动态监测面临着很大的挑战。

2.2 积雪遥感产品的选择

在国际上,积雪遥感产品应用逐渐从较为单一的算法研发转向以积雪遥感数据产品(积雪制图)的

综合多种传感器的反演和估算方向发展。表 1 为目前主要的一些积雪面积遥感数据产品。从中可以看出,目前国际上开发的积雪算法及产品多种多样,但是由于算法原理的差异、对比验证时所用的指标差异、利用不同验证方法等原因,导致对于积雪产品没

有统一的认识。以高亚洲地区为例,该地区地势险峻,多为人类活动较少的高原及山区,且积雪浅又斑驳,大尺度分辨率的积雪产品不能很好地识别真实的积雪覆盖情况,所以由于各种产品的来源、理论方法不同,导致了产品的精度差异。

表 1 目前主要的积雪面积遥感数据产品
Table 1 The main snow area data products

类别	产品	空间 分辨率	覆盖 范围	时间 分辨率	时期	传感器	参考
基于 MODIS 数据 产品	MOD10A1 MYD10A1	500 m	全球	每日	2002 年~至今	MODIS	NASA(D.Hall) ^[22]
	青藏高原地区 MODIS 逐日无云积雪产品	500 m	青藏 高原	每日	2002~2015 年	MODIS	CS Data (邱玉宝,等) ^[23]
	青藏高原地区 MODIS 逐日无云积雪产品	500 m	青藏 高原	每日	2002~2010 年	MODIS	WestDC (黄晓东,等) ^[24]
多源 数据 融合	NOAA IMS	1 km	全球	每日	2014 年~至今	GOES-E&W,MeteoSat,	NOAA (Helfrich) ^[11,26]
		4 km			2004 年~至今	MTSAT,NOAA,AVHRR,	
		24 km			1997~2004 年	MODIS,ASCAT,AMSU	
	Terra-Aqua-IMS	500 m	青藏 高原	每日	2001~2013 年	GOES-E&W,MeteoSat, MTSAT,NOAA,AVHRR, MODIS,ASCAT,AMSU	Zhang ^[27]

本文所用的积雪遥感数据产品分别为 NOAA IMS 积雪产品^[11,26]、MODIS 青藏高原每日无云积雪产品^[23]、以及与微波数据 AMSR-E 结合的 MODIS 每日无云积雪产品^[24],为便于区分,文中将用 A-MODIS 来代表该产品。

目前在众多的积雪遥感产品中,MODIS 数据以其分辨率高及数据量完整的优势被广泛使用,除此之外,其他积雪数据产品大多需要利用多种数据互相融合,共同判别。其中 IMS 交互式多传感器雪冰制图系统(Interactive Multisensor Snow and Ice Mapping System)由美国国家海洋和大气管理局(NOAA)制作,可提供北半球积雪、海冰和湖冰范围^[28];MODIS 是 Terra 和 Aqua 卫星上都装载的重要传感器^[29],用于对陆表、生物圈、固态地球、大气和海洋进行长期全球观测。

本文所选的积雪产品有两种是基于 MODIS 数据而得到的衍生产品。其一是依据积雪的时间及空间连续性特征得到 MODIS 无云产品,通过对 MODIS 原始数据进行上下午合成,临近日合成,空间四像元、八像元判别,最大积雪陆地范围掩膜以及拟合预期雪线等方法得到最终的无云产品;其二是与被动微波数据 AMSR-E 相结合即 A-MODIS 产品,产品是在上下午合成,临近日分析及 SNOWL 方法判别的基础上,利用 AMSR-E 雪水当量产品进行对比

分析;另一种则为多源传感器数据融合即 IMS 产品,产品通过预处理系统将数据存放在内部服务器中,读取转换后再由产品操作办公室进一步分析确定。表中所列 Terra-Aqua-IMS 积雪产品仍是在 MODIS 数据基础上,加入了 IMS 产品的判别,因此没有选择该种产品之间对比判别生成的新数据,而且本文所用数据是由 3 种不同的方法生成的数据,具有一定的代表性。文中采用 2009~2010 年积雪季的积雪遥感数据产品进行分析验证,IMS 产品的空间分辨率为 4 km。

2.3 地面台站数据

本文所用地面观测数据为中国气象台站地面雪深资料数据集,数据集以 cm 为单位记录气象站点每天积雪的深度,包括台站号、经纬度、海拔及平均温度等信息,时间序列从 2002~2014 年,用于积雪产品验证的站点分布在中国青海省、西藏自治区及部分新疆地区,共计 173 个站点。台站雪深数据大于 0 则为积雪深度;等于 0 则无积雪,即陆地;32700 表示微量积雪,本文将 32700 统一赋为无雪;32766 表示为缺测数据,站点分布见图 1。

3 验证方法和精度指标

3.1 积雪产品交叉对比和验证方法

目前国内外多源卫星能够提供多种较高分辨率

的积雪产品,在数据产品检验中需要相对真值作为验证数据,而产品验证的方法有以下 3 种:

(1) 以地面站点观测数据为“真值”的验证方法。地面台站的观测数据具有真实准确的优点,可作为积雪的真实值来进行对比验证,而且可以得到长期的站点数据^[30],对某一区域做长时间序列分析,了解长时间内积雪变化的情况。适用于多云情况下无法通过光学传感器判别地面积雪真实情况的环境条件。

(2) 以更高分辨率数据作为“真值”的验证方法。自然界地表普遍存在着异质性,当遥感图像分辨率较低时,像元中则会含有较多的地物类型

而不止是包含积雪或陆地信息,即积雪覆盖度产品。高分辨率数据代表了“面”上的信息,可以更加准确地描述积雪的空间分布特征^[31]。验证时需选取晴空条件下,典型、平均分布在研究区域的数据,将高分辨率分类图聚合到待检验产品像元尺度上进行对比。

(3) 交叉对比验证。在没有地面测量数据的支持下,将时相接近的不同产品统一到相同的投影坐标系和空间分辨率下,通过不同产品之间的相互比较来评估产品的精度^[19],验证需要选取时间、地理位置一致的参考产品,验证精度是相对于参考产品的相对精度。

表 2 积雪遥感产品验证方法的优缺点
Table 2 Advantages and disadvantages of the method of validation

验证方法	优点	缺点
地面观测数据为真值	具有稳定性和时间连续性,便于长时间序列分析,能反映年际变化,地面观测不受云覆盖的影响 ^[30]	复杂环境下台站分布不均匀,对空间异质性的代表性较弱,有时会发生停测、漏测现象,地面站点数据与积雪产品数据存在尺度误差 ^[31]
高分辨率数据为真值	解决了地面点一中低分辨率像元之间的尺度不匹配问题 ^[19-32]	有较大的重访周期,受云覆盖的影响,分类结果的不精确和聚合会影响验证结果的可靠性
交叉对比验证	真实性检验成本很低,几乎适用于所有参数	只能获取产品的相对精度,结果取决于参照产品的精度,需要考虑传感器间波段差异、波谱响应差异等 ^[19]

由于文中所用积雪数据均为无云产品,时间为一个积雪季,且积雪产品之间研究范围相近,可以转为相同投影等条件,本文采用产品间交叉对比和以地面观测数据为真实值的方法,对产品进行交叉检验,从产品间的对比差异分析其相对的精度情况,探讨在积雪覆盖情况方面存在的差异及原因,再根据现有的地面站点观测资料分别对 3 种遥感积雪产品验证,利用积雪分类总精度、准确度、召回率及 F 值指标进一步验证积雪产品的精度情况。

3.2 积雪精度指标

积雪数据及产品验证评价是促进积雪产品发展和水文模型建设的逻辑起点,所以指标体系的构建和完善在验证评价中有关键性的作用,可突出对区域性、流域性的积雪覆盖环境的分析。在指标的选择上,要能够全面反映积雪的基本特征与总体状态,结合普适性指标和特色性指标,避免评价指标之间的交叉重复,同时提高验证结果的准确性^[19-20]。

在积雪产品验证的过程中有不同的指标,甚至在同样的地区所得到的验证结果也参差不齐,但通过分析发现,所用指标大同小异,虽然名称不同但有相同的意义。其中积雪面积产品指标总体可以分为 6 类,包括总分类精度(Accuracy)、召回率(Recall)、

积雪分类精度(Precision)、F 值^[10,25],以及多测误差和漏测误差。

总精度(Accuracy)即准确度,表示一个像素被正确分类的概率(可能性),但是当图像中有大面积的无雪区域时,这一指标可能会带来误导。如若图像中只有 10%积雪像元,那么总精度亦会由于大部分像元被分为无雪而达到 90%。召回率(Recall)表示检测到积雪像素的概率,即正确分类出的积雪像元数与实际所有积雪样本像元数的比值。积雪分类精度(Precision)表示正确分类出的积雪像元数与分类出的所有积雪像元的比值^[10]。召回率和分类精度是相互影响的,召回率高表明正确分类的积雪像元数相对于地面站点观测的准确性较高,而精度高则表明正确分类的积雪像元数相对于积雪产品中总积雪数的准确性较高,由于两个指标相互制约,通常会根据需要来选择一个合适的度,寻求中间的一个平衡点。因此采用 F 值,是召回率和积雪分类精度的调和平均值,能够较好地反映广泛无雪区域的缺失或错误分类的雪的情况;多测误差表示影像识别为积雪但地面站点数据为无雪;漏测误差代表影像上识别为无雪而地面站点数据为有雪。

在二值积雪产品中,①地面台站记录和积雪图像均有雪(雪深>0)的样本数 a;②地面台站记录有

雪而图像分为无雪的样本数 b , 即漏测数; ③地面台站记录无雪而图像分为有雪类型的样本数 c ; ④地面台站记录和图像均无雪的样本数 d 。则遥感积雪面积产品指标公式如表 3, 本文所用指标为积雪分类总精度、准确度、召回率及 F 值。

4 结果与分析

4.1 基于站点积雪观测的对比验证

文章利用相同的参考数据对三种不同的积雪遥感产品进行了验证, 研究区内共 173 个地面观测站点, 通过随机抽取部分站点来验证产品精度。由于 A-MODIS 青藏高原无云积雪产品范围较小, 研究区内只有 76 个站点, 所以 80 个站点以后没有精度结果。从图 2 可以看出, 青藏高原 MODIS 无云积雪产品与 IMS 产品精度相近, 而 IMS 产品在不同站点个数的情况下精度的浮动略大, 而 MODIS 积雪产品呈缓慢上升的趋势。站点个数是随机抽取的, 但从图中看出三种产品的精度趋于稳定, 没有出现因为站点数量的多寡而产生较大浮动的情况, 因

此总体来说积雪遥感产品较为稳定。

图 2 中(c)和(d)分别为相同站点个数条件下召回率及准确度曲线, 从图中可以看出产品间的差别, IMS 产品和 A-MODIS 产品的召回率较高而精确度较低, MODIS 产品的召回率较低而准确度较高, 由此就需要进一步理解召回率与精确度之间的关系。

表 3 积雪面积产品验证指标一览表		
Table 3 Validation index list of snow area products		
验证指标及公式		
统计指标	总精度	$Accuracy = \frac{a+d}{a+b+c+d} \times 100\%$
	召回率	$Recall = \frac{a}{a+b} \times 100\%$
	多测误差	$OA = \frac{c}{c+d} \times 100\%$
	准确度	$Precision = \frac{a}{a+c} \times 100\%$
	漏测误差	$UA = \frac{b}{a+b} \times 100\%$
	F 值	$f = 2 \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall} = \frac{2a}{2a + b + c}$

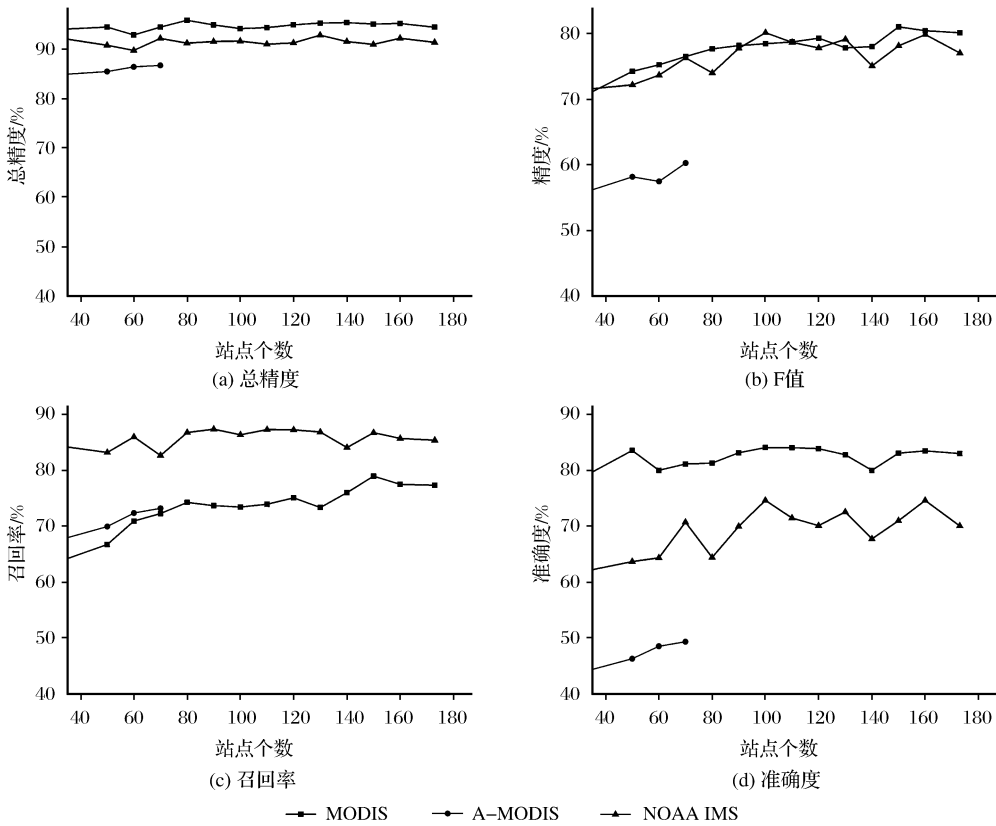


图 2 抽取部分站点后产品的精度

Fig.2 Accuracy of the products after extraction part of the site

IMS 产品是多源数据的结合, 其中包括光学遥感数据与微波数据, 微波具有较强的透过性, 与微波

数据结合的 A-MODIS 产品以及多种数据融合的 IMS 产品相较于 MODIS 产品有更多的积雪覆盖,

导致统计指标中 b 值小, c 值大, 即召回率高而精确度低。也就是说通过与“真值”对比, 例如站点观测了 20 个雪像素, 而积雪产品识别(召回)了 30 个, 其中有 18 个雪像素, 那么其召回率为 18 : 20 能够达到很高, 但精确度则为 18 : 30, 说明其准确度是较低的。MODIS 每日无云积雪产品没有结合其他数据, 只在原始数据的基础上通过一系列的方法测试, 控制每一步骤所产生结果的精度达到去云的目的, 所以该产品的雪量相对于 IMS 产品和 A-MODIS 产品较少, 通过验证结果来看其召回率低而精确度高。通过平衡两种指标(F 值), 能够发现 MODIS 产品与 IMS 产品的精度都比较稳定, 不能因为其一种指标精度低而认为该产品差, 在使用产品数据时可根据用户需求选择不同的产品数据。

4.2 积雪产品数据间的交叉对比研究

4.2.1 积雪时空分布对比

图 3 选取了 3 种产品在同一积雪季中积雪初期, 中期及融雪后期的积雪覆盖情况, 可以看出在同

一天时间里, 不同的积雪产品积雪覆盖情况是不同的。积雪初期选取时间为 11 月 6 日, MODIS 产品与 A-MODIS 产品对比相差不大, 在高纬度地区即天山山脉、帕米尔高原一带 A-MODIS 产品积雪较多, 而 IMS 产品中积雪覆盖明显较大, 集中在青藏高原北部昆仑山脉, 塔里木盆地及祁连山脉地区。到次年 1 月 30 日, 约为积雪最大时期, 可以明显看出积雪量大幅度增加, 从图中能够发现 IMS 产品与 MODIS 产品较为一致, IMS 产品在天山山脉及藏东南地区积雪较多, 而 A-MODIS 产品在塔里木盆地地区积雪较多。融雪后期选取时间为 4 月 20 日, 融雪期间三种产品差别较大, IMS 产品在昆仑山脉, 祁连山脉, 横断山脉及巴颜喀拉山脉地区都有很大程度的积雪覆盖, 而 MODIS 产品积雪最少, A-MODIS 产品在青藏高原中部积雪较多。因此也可以看出, 在积雪季后期即融雪期, 积雪产品之间产生较大差异, 且积雪集中在高海拔山区, 盆地相对于山区积雪分布较少。

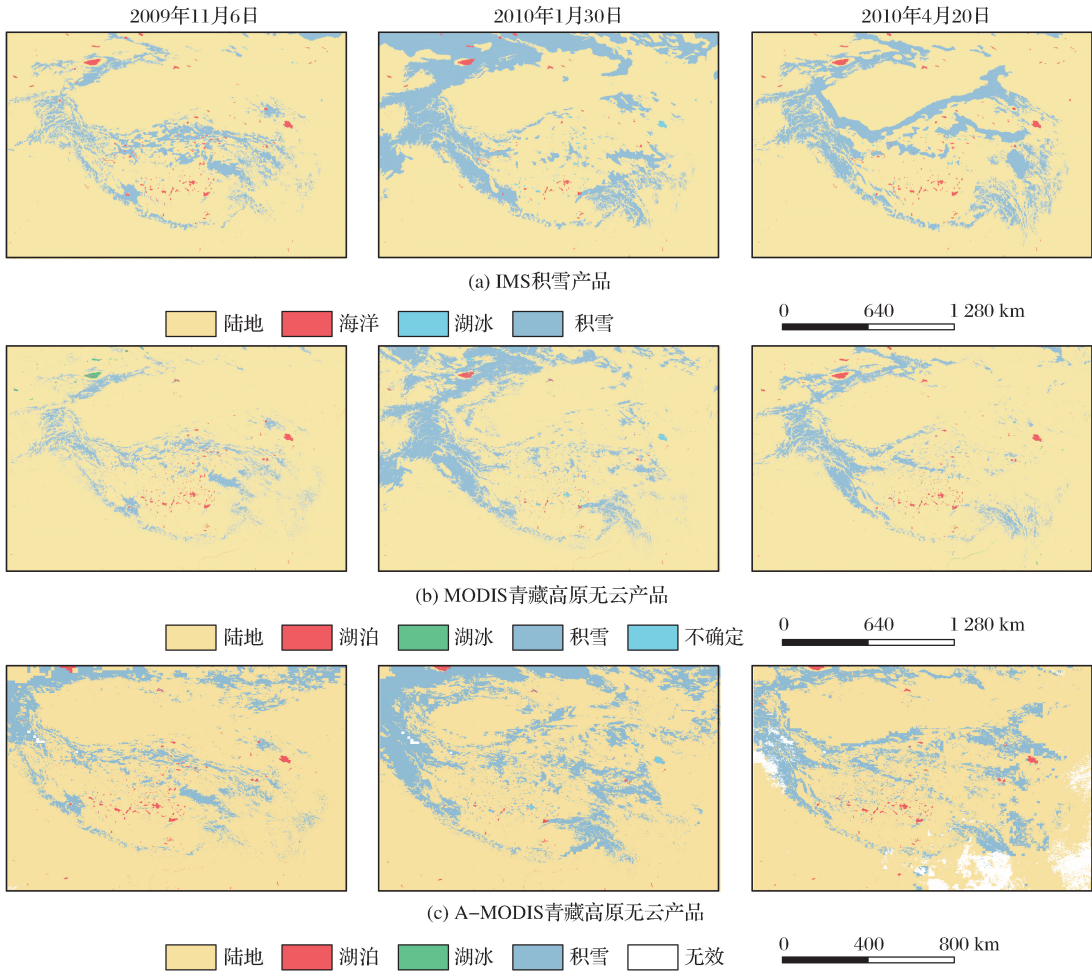


图 3 3 种积雪产品同一时间积雪空间分布对比

Fig.3 Comparison of spatial distribution of snow products

4.2.2 积雪面积遥感产品年内变化

青藏高原是我国地势三阶的最高阶,高原向南、向东、向西倾斜,成为我国长江、黄河、澜沧江、雅鲁藏布江、恒河、印度河等国际主要大江大河的发源地和分水岭,高原的东南部、东部和南部为湿润和半湿润地区,河网密度大,且多为外流河,高原西部和北

部属于干旱、半干旱地区,多为季节性的河流,多为内流河。本文依据不同河流流域将该地区分为 12 个地区,包括 9 个外流河流域(河西、恒河、黄河、湄公河、萨尔温江、雅鲁藏布江、长江、阿姆河、印度河)和 3 个内流河流域(柴达木、内部流域、塔里木)^[33],如图 4 所示。

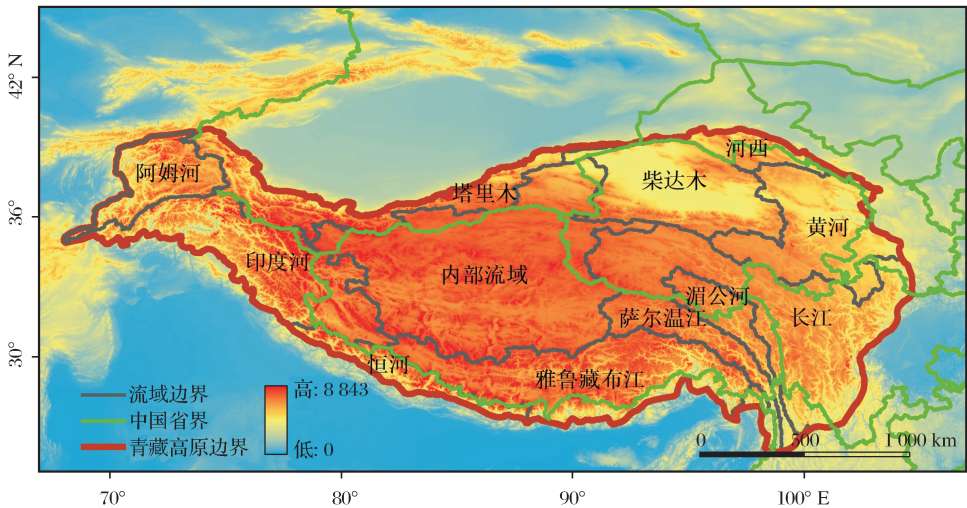


图 4 青藏高原流域分布图
Fig.4 Distribution map of the Tibetan Plateau

将青藏高原 MODIS 每日无云积雪产品、与 AMSR-E 结合的 MODIS 积雪产品 (A-MODIS) 及 IMS 积雪产品三种数据根据上图划分的流域统一裁剪,得到相同的范围,并统计了 2009~2010 年不同产品中的积雪面积情况,见图 5,由于与 AMSR-E 结合的 MODIS 产品总体范围较小,无法包含整个阿姆河及印度河流域,因此采用其他 10 个流域进行统计分析。

通过青藏高原各流域地区积雪覆盖的面积大小来计量积雪的分布情况,从图中可以看出,三种遥感积雪产品从整体趋势来看,积雪覆盖的情况较为吻合,但由于产品的分辨率不同,两种基于 500 m 分辨率的 MODIS 数据生成的数据产品能更加细致地刻画出积雪覆盖的变化情况,且能够看出 IMS 产品的积雪覆盖普遍高于其他两种积雪产品。

从河流流域来看,除河西流域、湄公河流域以及萨尔温江流域外,在其他流域三种积雪产品的面积变化趋势都较为一致,尤其在恒河、内部流域、雅鲁藏布江及长江流域。究其原因,可能是由于喜马拉雅山脉一带处于恒河及雅鲁藏布江流域,它的平均海拔高达 6 000 m,山脉南斜面恒河、印度河平原 6 000~7 000 m 以上高山构成一道巨大的屏障,拦

截了印度洋西南季风,山上雪线较低,积雪长期不融化且覆盖范围大,光学及微波传感器易于识别;而长江流域源于唐古拉山主峰南侧的冰川,是唐古拉山脉最大的冰川分布中心,主峰范围内各峰均为冰川覆盖并连成一片;高原中部腹地包括柴达木盆地,以及北部的临近高原的塔里木盆地,由于受四周高山地形的影响,水汽输送较少,是积雪的小值区域,雪量较少,因此结果也相差较小。

而河西流域处于气候过渡带,远离海洋且降水稀少,变率较大,由于受青藏高原气候和荒漠气候的影响,使该地区冷热剧变,蒸发强烈;而湄公河流域和萨尔温江流域位于藏东南地区,受地形及大气环流影响,气候比较复杂,上游地处高原,冰雪期长,下游地势较低,炎热多雨,而中游垂直气候,流域受气候影响年内变化大。因此积雪覆盖情况较不稳定,不同产品之间得到的结果有些偏差。

4.3 分析与讨论

从积雪产品的年内面积变化曲线图中展现了不同积雪数据产品的变化趋势,但积雪产品之间对比的差异并不是很明显,尤其在积雪季后期,因此在本节从以上流域中选择一些较典型流域,每两种产品之间进行对比,如图 6 所示。

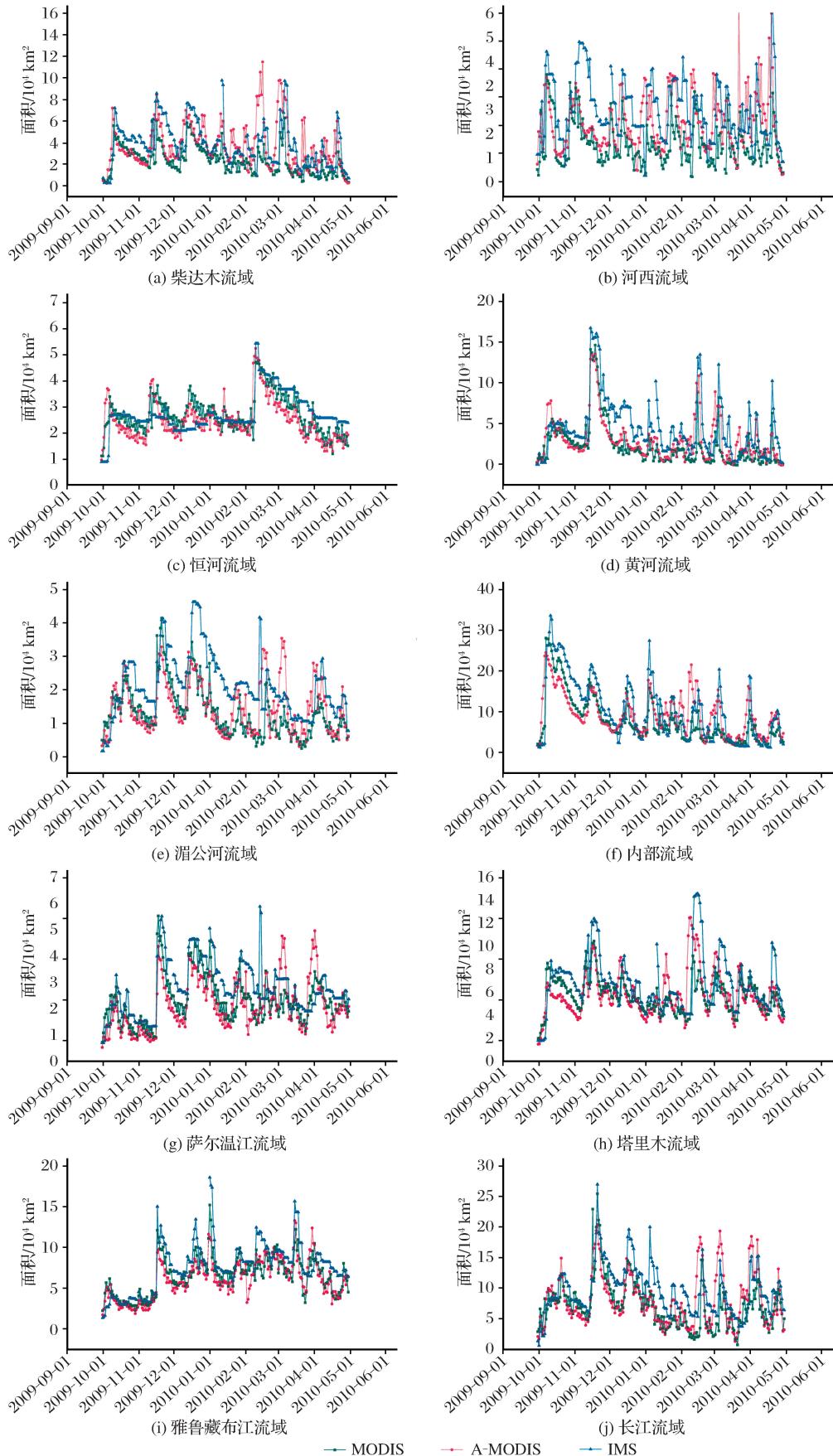
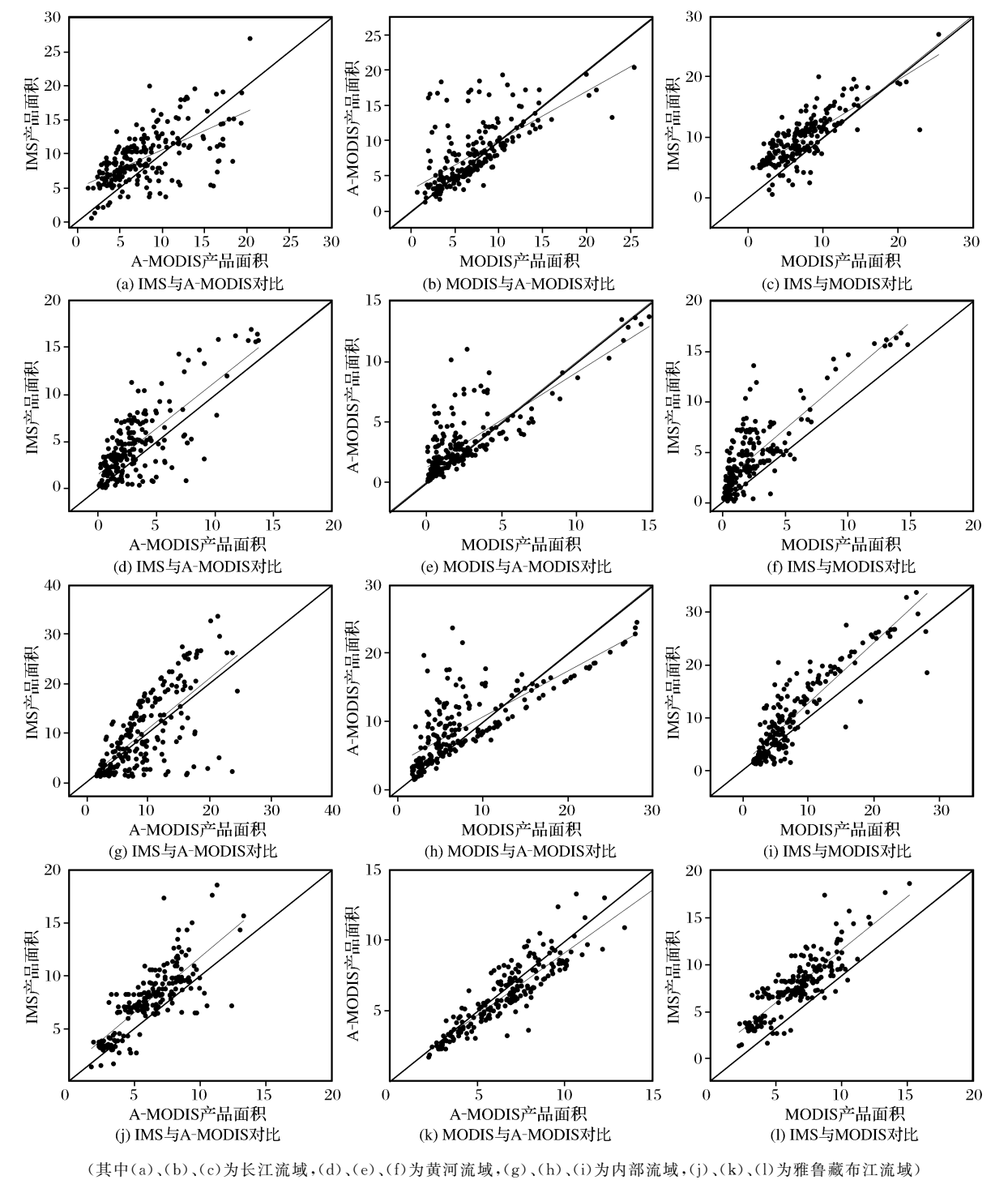


图 5 2009~2010 年 3 种积雪产品不同流域积雪面积

Fig.5 Snow cover area of different basins during 2009~2010



(其中(a)、(b)、(c)为长江流域,(d)、(e)、(f)为黄河流域,(g)、(h)、(i)为内部流域,(j)、(k)、(l)为雅鲁藏布江流域)

图 6 不同流域产品之间对比

Fig.6 Comparison of products in different watersheds

A-MODIS 产品与 IMS 产品相比较,可发现两种产品较为接近,在黄河流域及雅鲁藏布江流域的拟合情况较好,IMS 产品稍有高估,长江流域差些,而内部流域几乎贴近 1 : 1 对角线,效果较好。MODIS 产品与 A-MODIS 产品相比较,除了雅鲁藏布江流域较好其他流域都较为离散,A-MODIS 产品有一些偏差较大的离散点,很大程度上高估了

积雪覆盖面积。而 MODIS 产品与 IMS 产品相比较拟合程度较好,偏差大的散点少,而且 IMS 产品的积雪面积整体偏高。在黄河流域及内部流域地区,当积雪面积较小时,可认为是积雪初期或融雪期,点的拟合曲线斜率很大,尤其在黄河流域接近垂直,在 MODIS 产品有较小波动时 IMS 产品的积雪面积有很大增加。

结合地面观测验证与积雪产品空间分布差别和年内变化,初冬积雪时期,产品间的差异较小,积雪变化曲线较为一致,与 AMSR-E 数据结合的 MODIS 产品在初期积雪覆盖最小,IMS 产品最大,而 3~5 月份融雪时期,3 种产品的差异较大,原因可能是在积雪初期新雪反射率高,NDSI 等算法能够较为容易地判别积雪,而在融雪期间,积雪逐渐变得斑驳分散,产生积雪融水或变得灰暗,再次下雪时可能由于融化或升华速率较快,积雪难以被准确监测。另外也与云覆盖有较大的关系,从图 7 中可以看出在一个积雪季中,前期云覆盖较少,尤其在 11~12 月晴空天气较多,而后期云覆盖明显增加,最高超过 80%,这种几乎都被云覆盖条件下无法识别地面的积雪覆盖情况,因此可以判定不同的去云算法原理是导致产品差异的原因,这一点与图 5 中的产品对比图也较为吻合。

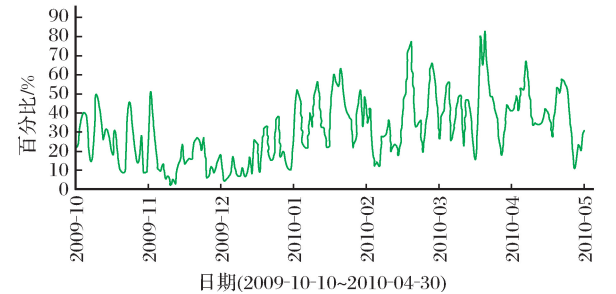


图 7 2009~2010 年积雪季中云覆盖百分比^[21]
Fig.7 Percentage of cloud cover in snow season

3 种积雪产品中,IMS 产品与 A-MODIS 产品均利用了微波数据与光学数据结合判别的方法,微波数据能够穿透云层不受云覆盖影响的特点使其较多应用于积雪判别中,但被动微波遥感数据空间分辨率粗,云量较大时,两者结合的精度完全依赖于微波积雪产品的精度,从图 8 中可以发现,被动微波 AMSR-E 数据与 MODIS 有较大的出入,在青藏高原地区有很大的高估现象,从图 5 中也可以看出在相同流域内,IMS 与 A-MODIS 产品积雪面积更大,从算法原理上来看,IMS 产品使用了多源的数据融合,并且中间加入了人工分析来确定积雪和海冰覆盖的地区,因此产品精度可能较高^[27-28]。MODIS 产品通过时间、空间连续性原理结合高程实现了去云效果,没有利用其他产品的参照对比积雪覆盖可能低估,但产品的准确度会较好。

5 结 语

高亚洲地区受到高山复杂地形和各种局部气候

因素等影响,积雪常常呈现破碎斑驳状态,目前各种积雪遥感产品不断发展,但是在高亚洲地区的精度情况不够明朗,本文通过对积雪产品的空间分布特征分析,分流域分析及地面观测数据验证精度,对比验证得到以下结论。

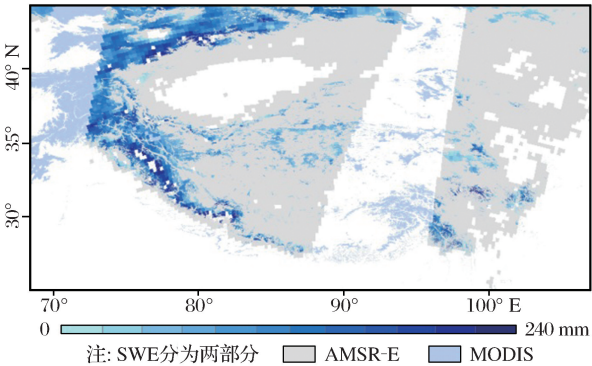


图 8 青藏高原地区雪水当量^[21]
Fig.8 Snow water equivalent in Tibet

- (1) 文中选用了 4 个验证指标来对积雪产品进行评价分析,其中 3 种产品的积雪分类总精度都较高,达到 85% 以上,最高可达 95% 左右,但通过分析表明总精度指标并不能很好地适用于高亚洲地区,代表性不强;IMS 产品和 A-MODIS 产品的召回率较高,识别能力较强;MODIS 产品的准确率较高,但积雪覆盖存在低估。通过平衡指标 F 值来判断,IMS 产品与 MODIS 产品精度相近,在产品应用过程中应根据需要来选择。
- (2) 本文选择积雪产品均为积雪二值产品,所采用的各种去云算法也都较为成熟,从时间特征、空间特征、高程与微波数据等多种数据的融合,去云算法已经很难达到突破,精度也很难得到进一步提高,而积雪产品中往往一个像元内存在多个组分,即积雪覆盖度产品,能够更加精确地表明积雪覆盖的情况,因此发展积雪覆盖度产品及利用高分辨率数据对其验证可以更好地理解青藏高原地区的积雪特征及分布情况,是下一阶段中需要不断完善和研究的问题。
- (3) 验证产品精度利用了地面站点观测数据作为真实值,这种验证方法受到了一些质疑,认为其没有说服力,但高分数据受云覆盖的影响,在多云条件下无法用其作为参考数据,因此有局限性。所以在晴空条件下建议采用高分数据,可得到更精确的结果,而从长时间或有云覆盖情况来看,地面观测数据是一种较好的选择。

参考文献(References):

[1] Qin Dahe.Chinese Climatic and Environmental Evolution (Vol-

- ume)[M].Beijing:Science Press,2005.[秦大河.中国气候与环境演变(上卷)[M].北京:科学出版社,2005].
- [2] Qin Dahe,Ding Yongjian.Cryospheric Changes and Their Impacts:Present,Trends and Key Issues[J].Advances in Climate Change Research,2009,5(4):187-195.[秦大河,丁永建.冰冻圈变化及其影响研究—现状、趋势及关键问题[J].气候变化研究进展,2009,5(4):187-195].
- [3] Qiu Yubao,Guo Huadong,Peng Jun.A Comparative Analysis of the Parameters of Snow Cover in the West of China,the Qinghai Tibet Plateau and the North China[R].Meteorological Research and Southwest Regional Academic Exchange Meeting in 2010.[邱玉宝,郭华东,彭俊.中国西部、青藏高原和北方区积雪参数产品对比分析研究[R].2010 年高原山地气象研究暨西南区域学术交流会,2010.].
- [4] Estilow T,Young A,Robinson D.A Long-term Northern Hemisphere Snow Cover Extent Data Record for Climate Studies and Monitoring[J].Earth System Science Data,2015,7(1):137-142.
- [5] 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.
- [6] Huang X D,Hao X H,*et al.*A New MODIS Daffy Cloud Free Snow Cover Mapping Algorithm on the Tibetan Plateau[J].Sciences in Cold & Arid Regions,2014,6(2):116-123.
- [7] Laba Z,Qiu Y B,Cidan Basang,*et al.*The Validation of MODIS Daily Snow Cover Products after Cloud Removal in Tibet Autonomous Region[J].Journal of Glaciology and Geocryology,2016,38(1):159-169.
- [8] ESA,ENVEO,NSIDC,GCW.2nd International Satellite Snow Products Intercomparison Workshop[EB/OL].<https://earth.esa.int/web/sppa/activities/qa4eo/snowpex/meetings-workshops>.2015.9.
- [9] Metsämäki S.Introduction to GlobSnow Snow Extent Products with Considerations for Accuracy Assessment[J].Remote Sensing of Environment,2015,156:96-108.
- [10] 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.
- [11] Chen C,Tarendra L,Romanov P.Validation of NOAA-Interactive Multisensor Snow and Ice Mapping System (IMS) by Comparison with Ground-based Measurements over Continental United States[J].Remote Sensing,2012,4:1134-1145.
- [12] Romanov P.GMASI Algorithm Theoretical Basis Document.2016 [DB/OL].<http://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/snow/HTML/snow.htm>.
- [13] Gina R.Henderson.Two New Snow Products:NASA MEaSUREs and MODIS Collection-6 Snow Cover.Links:<http://nsidc.org/data/docs/measures/nsidc-0530/index.html>,2015.9.
- [14] 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(3):496-503.
- [15] Hori M.Evaluation of Updated JXAM5 Snow Cover Extent Product Using Ground based Snow Depth Information[DB/OL].<http://kuroshio.eorc.jaxa.jp/JASMES/index.html>.2015.9.
- [16] Solberg R.Advancements and Validation of the Global CryoClim Snow Cover Extent Product [DB/OL].http://www.cryoclim.net/cryoclim/index.php/Snow_product_samples.
- [17] Samantha P.Assessment of H-SAF MSG/SEVIRI Snow Cover Product over the UK.2015.9[DB/OL].<http://hsaf.meteoam.it/user-documents.php>.
- [18] Sean R. Helfrich. Recent Advancements to the Interactive Multisensor Snow and Ice Mapping System(IMS).2015.9.
- [19] Wu Xiaodan, Wen Jianguang,*et al.* Advances in Validation Methods for Remote Sensing Products of Land Surface Parameters[J].Journal of Remote Sensing,2015,19(1):76-92.[吴小丹,闻建光等.关键陆表参数遥感产品真实性检验方法研究进展[J].遥感学报,2015,19(1):75-92.]
- [20] Wu Xiaodan, Xiao Qing, Wen Jianguang,*et al.* Advances in Uncertainty Analysis for the Validation of Remote Sensing Products:Take Leaf Area Index for Example[J].Journal of Remote Sensing,2014,18(5):1011-1023.[吴小丹,肖青,闻建光.遥感数据产品真实性检验不确定性分析研究进展[J].遥感学报,2014,18(5):1011-1023.]
- [21] Qiu Yubao.Evaluation of Snow Cover Observation and Remote Sensing Product Data in the Tibetan Plateau[C]//The Third Session of the CAS-NASA High Asia Global Change Space Observatory—A Study on the Changes of Snow and Ice and Natural Disasters in the High Asian Mountains on Earth Observation.[邱玉宝.青藏高原积雪观测与遥感产品数据评价[C]//第三届 CAS-NASA 高亚洲全球变化空间观测研讨会——基于地球观测的高亚洲山区冰雪与自然灾害变化研究,2016.3].
- [22] Hall D K.Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for the MODIS Snow and Sea Ice-Mapping Algorithms[Z].September,2001.
- [23] Zhang Huan,Qiu Yubao,Zheng Zhaojun,*et al.*Comparative Study of the Feasibility of Cloud Removal Methods based on MODIS Seasonal Snow Cover Data over the Tibetan Plateau[J].Journal of Glaciology and Geocryology,2016,38(3):714-724.[张欢,邱玉宝,郑照军,等.基于 MODIS 的青藏高原季节性积雪去云方法可行性比较研究[J].冰川冻土,2016,38(3):714-724.]
- [24] Huang Xiaodong, Hao Xiaohua, Wang Wei,*et al.* Algorithms for Cloud Removal in MODIS Daily Snow Products[J].Journal of Glaciology and Geocryology,2012,34(5):1118-1126.[黄晓东,郝晓华,王玮,等.MODIS 逐日积雪产品去云算法研究[J].冰川冻土,2012,34(5):1118-1126.]
- [25] 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.
- [26] Ramsay B H.The Interactive Multisensor Snow and Ice Mapping System.NOAA Science Center[DB/OL].Products Ac-

- cessible at: <http://climate.rutgers.edu/snowcover>.
- [27] Yu J, Zhang G, Yao T, *et al.* Developing Daily Cloud-free Snow Composite Products from MODIS Terra-Aqua and IMS for the Tibetan Plateau[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2015, 54(4).
- [28] Liu Xun, Jin Xin, Ke Changqing. Accuracy Evaluation of the IMS Snow and Ice Products in Stable Snow Covers Regions in China[J]. *Journal of Glaciology & Geocryology*, 2014, 36(3): 500-507. [刘洵, 金鑫, 柯长青. 中国稳定积雪区 IMS 雪冰产品精度评价[J]. *冰川冻土*, 2014, 36(3): 500-507.]
- [29] Tang Zhiguang, Wan Jian, Liang Ji, *et al.* Monitoring of Snow-line Altitude over the Tibtan Plateau based on MODIS Data [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2015, 30(4): 767-774. [唐志光, 王建, 梁继, 等. 基于 MODIS 的青藏高原雪线高度遥感监测[J]. *遥感技术与应用*, 2015, 30(4): 767-774.]
- [30] Liu Yujie, Zheng Zhaojun, Wang Libo, *et al.* Remote Sensing on Snow Cover and Variation Analyzing in West of China[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2003, 8(1): 114-123. [刘玉洁, 郑照军, 王丽波. 我国西部地区冬季雪盖遥感和变化分析[J]. *气候与环境研究*, 2003, 8(1): 114-123.]
- [31] Wu H, Li Z L. Scale Issues in Remote Sensing: A Review on Analysis[J]. *Processing and Modeling. Sensors*, 2009, 9(3): 1768-1793.
- [32] Hall D K, Riggs G A. Accuracy Assessment of the MODIS Snow Products [J]. *Hydrological Processes*, 2007, 21(12): 1534-1547.
- [33] Wan W, Long D, Hong Y, *et al.* A Lake Data Set for the Tibetan Plateau from the 1960s, 2005, and 2014 [DB/OL]. *Sci. Data* 3: 160039. doi: 10.1038/sdata.2016.39 (2016).

Validation and Comparison of Binary Cloudless Snow Products in High Asia

Yu Xiaoqi^{1,2}, Qiu Yubao², Ruan Yongjian², Shi Lijuan², Laba Zhuoma³

(1. *Liaoning Technical University, college of surveying and geoinformation, Liaoning Fuxin 123000, China*;

2. *Institute of Remote Sensing and Digital Earth Chinese Academy of Sciences,*

Key Laboratory of Digital earth, Beijing 100094, China;

3. *Atmospheric Environmental Science Research Institute of Tibet plateau, Lhasa, Tibet 850000, China*)

Abstract: The High Asia region with Qinghai-Tibet Plateau as the core area is an important national snow distribution area and sensitive area for climate change. Snow remote sensing and monitoring products with high precision can help us get better understanding of the regional water and energy cycle process and improve climate, environmental analysis and water resources application potential. However, because of complex terrain in high Asia region, rapid climate change in local plateau and different algorithm of snow products issued currently, the evaluation method, reference data and accurate indicators applied by precision evaluation of different products, which brings challenge for snow products application and evaluation. This paper chooses relatively typical three kinds of data of IMS, MODIS, A-MODIS products which have been issued at home and abroad, carries out the space-time cross comparative analysis based on watershed and uses the same set of ground reference data set and comprehensive index for precision validation and comparative analysis. The results show that in the validation with the use of different amounts of ground observation data, the performance of these three kinds of products is relatively stable. Their total accuracy can reach more than 85%. The recall rate of IMS and A-MODIS product based in microwave observations is higher, while the accuracy and trade-off parameter F value are higher; the snow cover area and trend of these three kinds of products in the early snow season are identical, which have large difference at later stage. Compared to MODIS product, IMS and A-MODIS products are much higher than they actually are, showing that it has great relationship with the quality of cloud cover and microwave data. On the whole, the accuracy of IMS product and MODIS products is close, but the data quality of MODIS snow product is higher. The study can provide objective analysis and assessment for the application of snow remote sensing and monitoring products in the high Asia region.

Key words: Remote sensing snow products; High Asia; Accuracy evaluation; IMS; MODIS