

中国干旱区积雪面积产品去云处理方法验证与评估^①

王增艳^{1,2}, 车涛¹

(1. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要: 针对 MODIS 每日积雪产品中云覆盖现象严重这一问题, 以中国干旱区作为研究对象, 结合 AMSR-E 被动微波雪深数据, 采用多时相、多传感器数据融合的方法进行去云处理, 获取 MODIS 每日 4 d 8 d 和 MODIS 与 AMSR-E 融合后的每日 4 d 与 8 d 共 6 种新的积雪产品, 并分别提取其积雪持续日数 (SCD)。对比结果显示, MODIS 与 AMSR-E 多传感器的阈值法 4 日融合产品在融合算法效率、云去除效果和融合后保持较高分类精度方面均有较好表现, 其融合后的无云产品在全天气条件下具有 96% 的整体分类精度、80% 的雪分类精度和 99% 的陆地分类精度, 大大高于研究区原 MODIS Terra-Aqua 每日融合积雪产品全天候条件下 64%、32% 和 70% 的整体、雪、陆分类精度; 并且由其提取的积雪持续日数不仅在最大程度上保持了原 MODIS 产品高的空间分辨率, 而且精度较高, 对研究区积雪的空间分布状况有很好反映。

关键词: 积雪面积; 产品; 持续日数 (SCD); MODIS; 空间分辨率; 去云处理; 干旱区; 中国

积雪是地表最活跃且具有多重属性的自然因素, 对地球能量、辐射平衡和水文循环有重要影响。在干旱区积雪意义尤为重要, 一方面高山雪冰融水是干旱区主要的水资源补给方式之一, 另一方面干旱区冬季积雪范围大、持续时间长, 对干旱区农牧业有直接的影响。因此, 对干旱区积雪进行长期的监测与研究很有必要⁽¹⁾。MODIS 积雪产品具有较高的时间分辨率和空间分辨率以及全球覆盖、数据时间序列长和获取免费等优势⁽²⁾, 但是很多研究发现: 尽管晴空条件下 MODIS 每日积雪产品与地面实际观测数据或其他更高空间分辨率产品吻合精度高, 但考虑到高的云覆盖度影响, 其全天候条件下的分类精度大幅降低, 很大程度上限制了它在应用中的效果⁽³⁻⁵⁾。

目前, 为获取具有更好应用前景的低云、无云覆盖的积雪产品, 研究者们提出了多种方法, 2003 年, Riggs 等提出的云识别模板改进算法, 可以降低积雪产品中的云、雪分类混淆, 但是它对云覆盖的去除效果并不显著⁽⁶⁾; 2008 年, Wang 等提出了一种利用地面气象站观测资料对云覆盖区像元整体进行雪、陆比例划分的方法⁽⁵⁾, 它能估算出云覆盖区的雪覆盖多少, 却不能获得积雪的空间分布; 在降低云覆盖、获取云覆盖区积雪分布状况方面表现较好的是时-

空滤波器和多源数据融合的方法⁽⁷⁾。空间滤波器方法通过采用一个固定大小的滤波窗口, 将原产品中的云覆盖像元用窗口中出现次数最多的非云像元类别替换, 它去除研究区面积较小的零星云体效果明显, 但无法消除面积较大的云体。时间滤波器也称多时相数据融合, 它通过考虑云体在不同时相的位置差异, 获取时段内的最大积雪面积。其中, MODIS 每日产品融合, 即 Terra 和 Aqua 产品融合, 可以降低 10%~20% 的云覆盖⁽⁸⁻⁹⁾; 固定日数的多日产品融合能降低每日产品中大部分的云覆盖, 但是随合成日期增加, 融合产品对持续时间较短的积雪事件的探测能力有所下降, 对积雪面积也有不同程度的高估⁽⁷⁾。2009 年, Xie 等发展了一种具有灵活合成日数的多日融合方法, 其融合日数由最长融合日数和最大云覆盖比例来确定, 这种方法对时间分辨率的牺牲小于固定日数的多日产品融合, 但它无法消除云覆盖持续时间超过最长融合日数阈值的云像元⁽⁹⁾。多传感器数据融合一般指 MODIS 和 AMSR-E 数据的融合, 它结合 MODIS 产品高空间分辨率和 AMSR-E 产品不受云覆盖影响的优势⁽¹⁰⁾, 获取无云积雪产品⁽¹¹⁻¹²⁾, 但被动微波空间分辨率低, 融合产品的实际空间分辨率下降。

本文以中国干旱区为研究对象, 针对 MODIS 每

① 收稿日期: 2011-09-25; 修订日期: 2011-12-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(40971188)

作者简介: 王增艳(1987-)女, 河南济源人, 在读硕士研究生, 主要从事冰冻圈积雪遥感研究。E-mail: w457365@126.com

通讯作者: 车涛。E-mail: chetao@lzb.ac.cn

日积雪产品中的云覆盖问题,结合 AMSR-E 被动微波雪深产品,采用多时相、多传感器数据融合的方法进行去云处理,获取新的融合积雪产品,并提取其积雪日数参数。之后,对新的融合积雪产品进行云去除效果、云去除后分类精度和积雪日数提取差异的对比,获得最适合该研究区的数据融合方法及产品,为进一步进行研究区积雪分布制图和分析奠定基础。

1 研究区及数据介绍

1.1 研究区

中国干旱区定义为自然地理学所划分的西北干旱区内、年降水量小于 200 mm、干燥度大于 3.5 的地区,它地处中纬度欧亚大陆中心,35°~50°N,73°~106°E,总面积占全国土地面积的 22%。中国干旱区远离海洋,四周为巨大山系所环抱,降水稀少,且垂直地带性明显,气候十分干旱。在中国干旱区,

积雪的时空分布极不均匀。首先,高大山体大面积的冰川和永久积雪十分发育;其次,受地形及环流影响,新疆北部地区冬春季节性积雪丰富,是我国三大稳定积雪中心之一,此外,在南部的塔里木盆地边缘和河西走廊地区也有季节性积雪的存在。这些高山雪冰资源及季节性积雪的存在,深刻影响着干旱区河川径流的形成和变化,是干旱区最为重要的水资源补给方式之一^[13]。

1.2 气象站积雪日观测数据

实测数据由研究区 77 个气象站提供,其积雪日的定义按气象要素观测规范,将观测员视野范围内 50% 以上面积被积雪覆盖的观测日记录为有雪日,否则为无雪日。观测数据从 2003-01-01~2008-12-31,共 6 a,每日观测代表的是一天中积雪的平均状态,与对应日期遥感影像的积雪观测匹配。从图 1 可以看出,气象站大部分分布在海拔 2 000 m 以下,2 000 m 以上的站点仅有 7 个。

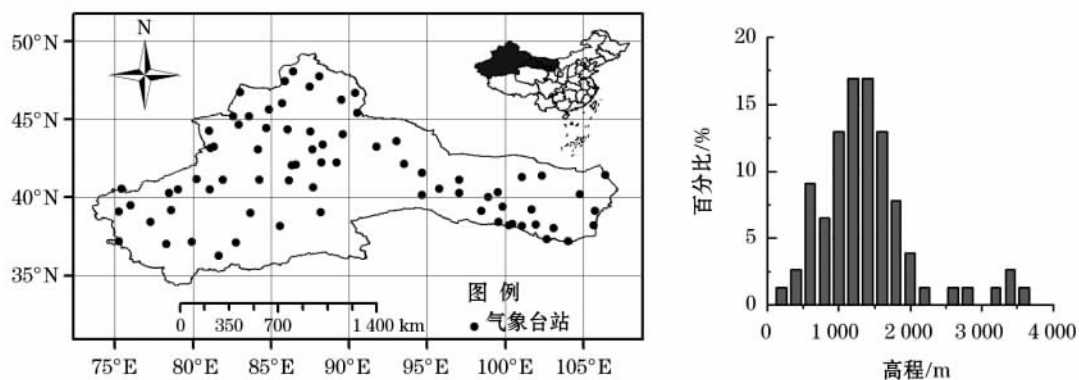


图 1 研究区气象站位置及高程分布

Fig. 1 Locations and altitudes of the meteorological stations in the study area

1.3 遥感数据

1.3.1 MODIS 积雪产品 该产品来源于美国国家雪冰数据中心(National Snow and Ice Data Center, NSIDC),研究区在正弦地图投影(SIN: sinusoidal projection)坐标系中涉及的影像有 9 幅,编码分别为 H22-26V04 和 H23-26V05,其原始数据格式为 hdf,空间分辨率为 500 m^[14],所采用的时间范围为 2002-08-01~2010-07-31,共 8 个水文年份,2 904 景 Terra 影像和 2 921 景 Aqua 影像,数据缺失 19 景。对原始数据的预处理主要是对原产品中各类别进行重新分类,新的类别划分标准如表 1 所示。

1.3.2 基于 AMSR-E 数据的中国雪深长时间序列数据集^[15] 数据来源于国家自然科学基金委员会

“中国西部环境与生态科学数据中心”(http://westdc.westgis.ac.cn),其雪深数据由 AMSR-E 被动微波亮温资料反演获得,空间分辨率为 0.25°。其预处理主要包括像元重采样和雪陆类别划分,将原数据中雪深超过 0 cm 的像元标记为积雪,反之则标记

表 1 MODIS 标准积雪产品类别重新划分标准

Tab. 1 Rules of reclassification of MODIS standardized snow cover products

MODIS 标准积雪产品分类	重分类类别
200(积雪)	5(积雪)
100(湖冰)、37(水体)、39(海洋)	3(水体)
25(陆地)	2(陆地)
50(云)	1(云)
0, 1, 11, 254, 255	0(无意义)

为陆地,并将原始像元大小重采样至 0.005°,以便于同 MODIS 数据融合。

2 云覆盖去除方法

云覆盖去除采用数据融合方法,分为两类:一是多时相数据融合,包括 Terra/Aqua 每日数据融合、灵活多日阈值法数据融合(最长 4 d、最长 8 d)两种;二是多传感器数据融合,即 MODIS 与 AMSR-E 产品数据融合。图 2 为数据处理及产品制备的流程。

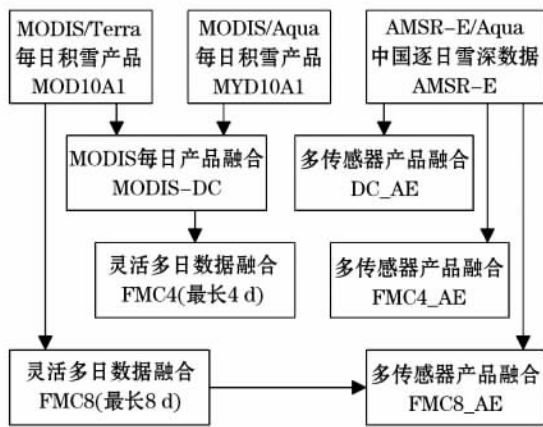


图 2 MODIS 与 AMSR-E 多时相、多传感器数据融合处理及产品制备流程图

Fig. 2 Flow chart of multi-temporal and multi-sensor combinations of MODIS and AMSR-E

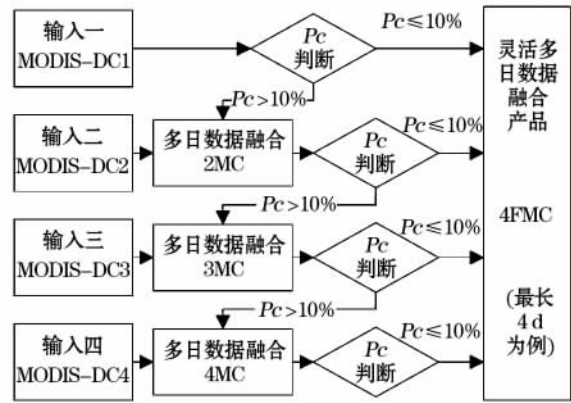
2.1 Terra/Aqua 每日数据融合

每日产品融合是把同一日的 MOD10A1/Terra 和 MYD10A1/Aqua 通过一定的规则合成为 MODIS 每日融合产品,简称 MODIS-DC 产品。合成算法服从优先级原则⁽⁹⁾,将同一像元点处 MOD10A1 和 MYD10A1 产品中优先级低的类别替换为优先级高的类别,产品中各类别的优先级为:积雪 > 水体 > 陆地 > 云 > 不确定,云的优先级较低。当某一日的 MOD10A1 或 MYD10A1 存在缺失时不进行融合,直接将当日的 MOD10A1 或 MYD10A1 作为融合结果参与下一步运算。

2.2 灵活多日阈值法数据融合

灵活多日阈值法数据融合将连续多日的 MODIS 每日融合结果 MODIS-DC 作为输入数据,融合算法规则与每日数据相同。不过该算法的时间窗口由两个阈值来控制,即最大云覆盖比例 $P_{c_{max}}$ 和最长

融合日数 N ,图 3 是以最长 4 d 阈值法数据融合为例说明该算法的流程,算法中的 $P_{c_{max}} = 10\%$, $N = 4$,其融合产品表述为 FMC4。



以最长 4 d 融合为例,图中 MODIS-DC_i 表示第 i 日的 MODIS 每日融合产品; nMC 表示 n 日 MODIS 融合产品。

图 3 灵活多日阈值法数据融合流程图

Fig. 3 Flow chart of flexible multi-day threshold combinations

2.3 多传感器数据融合

多传感器数据融合,即利用 AMSR-E 无云积雪产品将 MODIS 积雪产品中被云覆盖的地区用低空间分辨率的 AMSR-E 数据替换。它结合了 MODIS 高空间分辨率和 AMSR-E 不受云覆盖影响的优点,获得 3 种无云积雪产品 DC_AE, FMC4_AE 和 FMC8_AE。

2.4 云覆盖去除效果评价

云、雪覆盖度 P_c 和 P_s 可以反映不同融合方法的云去除效果,其表达如下:

$$P_c = \frac{N_c}{N} \tag{1}$$

$$P_s = \frac{N_s}{N} \tag{2}$$

式中: N_c 和 N_s 分别代表影像中的云、雪像元个数; N 为像元总数。

表 2 遥感影像与气象站点积雪观测的误差矩阵

Tab. 2 Error matrix of remote sensing observations and in-situ observations at the meteorological stations

	影像 - 积雪	影像 - 陆地	影像 - 云
站点 - 积雪	a	b	e
站点 - 陆地	c	d	f

注: a, b, c, d, e, f 分别代表各分类类别的像元个数

融合产品的分类精度计算选择研究区 77 个气

象站点的实测积雪数据作为“真值”,其中影像低估误差 IU 即影像上将积雪错分为陆地,影像高估误差 IO 即影像上将陆地错分为积雪,是评估影像上分类错误的常用参数,其数学表达式如下:

$$IU = \frac{b}{a + b + c + d} \quad (3)$$

$$IO = \frac{c}{a + b + c + d} \quad (4)$$

式中: a b c d 分别为表 2 中特定类别的像元个数。

此外,评估遥感影像分类精度的参数还包括整体分类精度和类别分类精度,文中即积雪和陆地的分类精度,通常 MODIS 产品仅考虑晴空下的分类精度,但为与 MODIS 和 AMSR-E 的融合无云积雪产品作比较,选择了两类精度,即晴空条件和全天气条件下的整体分类精度、雪分类精度、陆地分类精度 O_c , Sc Lc 和 O_a Sa La , 其数学表达式如下:

$$O_c = \frac{a + d}{a + b + c + d} \quad (5)$$

$$O_a = \frac{a + d}{a + b + c + d + e + f} \quad (6)$$

$$Sc = \frac{a}{a + b} \quad (7)$$

$$Sa = \frac{a}{a + b + e} \quad (8)$$

$$Lc = \frac{d}{c + d} \quad (9)$$

$$La = \frac{d}{c + d + f} \quad (10)$$

式中: a b c d e 和 f 分别为表 2 中各特定类别的像元个数。

3 结果及讨论

3.1 融合产品云去除效果比较

图 4 和图 5 分别表示一个水文年份中 6 种融合积雪产品以及 AMSR-E 积雪产品逐月平均的云、雪覆盖度变化。从图 4 可以看出,融合后的 MODIS 每日积雪产品受云覆盖影响仍十分严重,尤其在 12 ~ 3 月,云覆盖度均在 40% 以上;与每日产品相比,多日融合产品可以大大降低其云覆盖,特别是非主要积雪期的 4 ~ 11 月,其云覆盖度均在 10% 以下,而在云覆盖度略高的 12 ~ 3 月,两者均在 20% 以下;两种多日融合产品相比,云覆盖度降低效果在 4 ~

11 月几乎不存在任何差别,而在 12 ~ 3 月 8 d 产品比 4 d 产品多降低约 5% 的云覆盖。

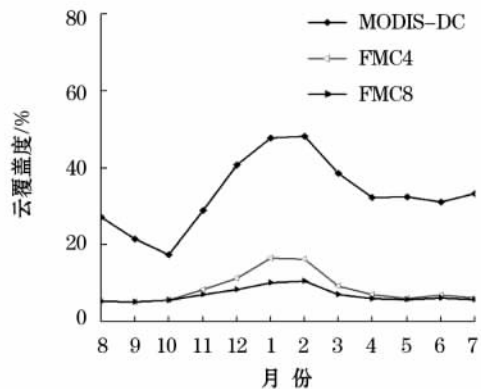


图 4 研究区各融合积雪产品 2003 - 2008 年 6 a 平均逐日云覆盖度对比

Fig.4 Mean monthly cloud coverage of all the combined snow cover area products during the period of 2003 - 2008

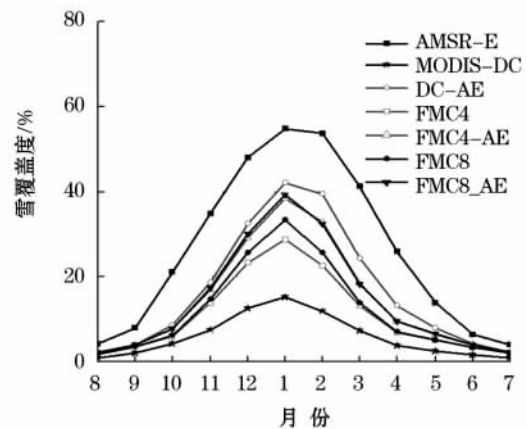


图 5 研究区各融合积雪产品 2003 - 2008 年 6 a 平均逐日雪覆盖度对比

Fig.5 Mean monthly of snow coverage of all the combined snow cover area products

从图 5 雪覆盖度的对比可以看出,受高云覆盖度影响,MODIS 每日积雪产品的雪覆盖度最低;被动微波 AMSR-E 积雪产品探测到的积雪面积最大,其雪覆盖度超过 20% 的月份从当年 10 月开始至次年 4 月,在 12 ~ 3 月其可探测的雪覆盖度甚至在 40% 以上;其余 5 种多日、多传感器融合产品中,以 MODIS 和 AMSR-E 每日融合产品获得的雪覆盖度最高,两种多传感器多日融合产品获得的雪覆盖度差异很小,在 12 ~ 3 月的平均值均为 30%,略高于单一传感器多日融合产品的 22% (4 d 产品) 和 25% (8 d 产品),而稍低于多传感器每日融合产品中的雪覆盖(35%)。

3.2 融合积雪产品分类精度对比

3.2.1 不同融合积雪产品分类精度对比 表 3 是根据中国干旱区 77 个气象站的实测积雪数据,通过与各融合积雪产品对应像元点处影像分类数据的对比、统计,获得的各产品的分类精度。

首先,MODIS 融合积雪产品、AMSR-E 积雪产品和 MODIS 与 AMSR-E 多传感器融合积雪产品相比,MODIS 融合产品的错分误差最低,其每日产品在晴空下具有极高的整体(98%)和陆地(近 100%)分

类精度,以及相对较高的雪分类精度(约 82%),而考虑到云覆盖像元,MODIS 每日和多日融合产品的整体和雪、陆分类精度均大大降低,其降低幅度分别为 34%、50%、30% 和 8%、16%、5%。4 d 和 8 d 产品的分类精度相差不大;AMSR-E 产品的高估误差显著,导致其雪分类精度提高,而陆地分类精度降低;多传感器融合产品错分误差与精度均介于 MODIS 与 AMSR-E 产品之间,不过其产品不受云覆盖影响,全天候条件下的分类精度明显高于 MODIS 产品。

表 3 研究区各融合积雪产品分类精度对比

Tab.3 Compared results of classification accuracy of different snow cover products for the study area

积雪产品	错分误差		晴空条件下精度			全天候条件下精度		
	低估	高估	整体	雪	陆	整体	雪	陆
MODIS-DC	0.01	0.00	0.98	0.82	1.00	0.64	0.32	0.70
FMC4	0.02	0.00	0.97	0.78	0.99	0.88	0.59	0.93
FMC8	0.03	0.01	0.96	0.78	0.99	0.89	0.64	0.94
AMSR-E	0.02	0.12				0.86	0.89	0.86
DC_AE	0.02	0.04				0.94	0.85	0.96
FMC4_AE	0.03	0.01				0.96	0.80	0.99
FMC8_AE	0.03	0.01				0.96	0.79	0.99

其次,每日、4 d 与 8 d 产品相比,MODIS 融合产品的错分误差随合成日期增加而微弱增加,晴空条件下,各分类精度略微下降,而全天候条件下各分类精度显著提高,其融合产品的整体精度和雪、陆分类精度分别提高了 24%、27%、23% 和 25%、32%、24%;MODIS 与 AMSR-E 融合产品的高估误差随合成日期的增加而降低,整体精度和陆地分类精度随合成日期增加而微弱增加,雪分类精度随合成日期增加而略微降低,与单一传感器产品相比,其全天候条件下具有最高的分类精度。

3.2.2 不同高程下不同融合积雪产品分类精度对比 中国干旱区属大陆性干旱气候区,降水稀少,区内大部分积雪以季节性积雪为主;同时,山地冰川和永久性积雪十分发育;这两种不同性质的积雪与海拔间关系密切。图 6 将中国干旱区 77 个气象站点按其海拔高度不同分为 2 000 m 以下和以上两部分,分别进行分类精度的统计,得到图 6(a, b)。

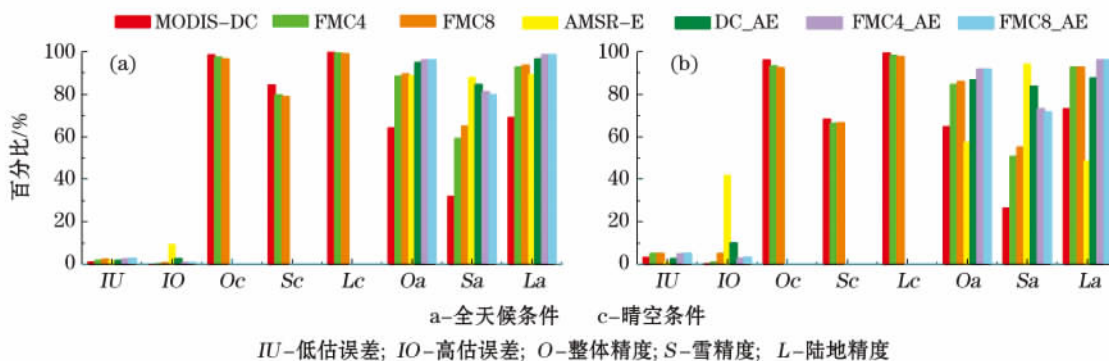
图 6 显示,MODIS 各融合产品的分类精度随海拔升高整体有下降趋势,以雪分类精度的下降最为明显,降低约 14%;AMSR-E 积雪产品的分类精度对高程的变化最为敏感,其高估误差随海拔升高大幅增加,从 2 000 m 以下的 9% 升高到 2 000 m 以上的 42%。2 000 m 以上站点的雪分类精度提高约 6%,

但整体精度和陆地分类精度分别降低约 30% 和 40%;MODIS 与 AMSR-E 产品融合后,其每日产品的雪分类精度随海拔变化不大,而整体及陆地分类精度随海拔升高降低约 8%,合成产品的精度随高程上升而降低,其中整体、雪、陆分类精度的降低幅度分别为 4%、8% 和 3%。

3.3 不同积雪产品积雪日数对比

季节性积雪日数包括 3 个参数,即初雪日、终雪日和积雪持续日数,其中影像上各像元点处的积雪持续日数定义为一个水文年份中影像上该像元点处积雪类别出现的日数之和。据此进行了 7 种积雪产品 8 a 平均积雪持续日数制图,其差异统计见表 4。

从图 7 可以看出,7 种积雪产品中,AMSR-E 产品空间分辨率最低,为 25 km,但其提取的积雪日数参数最能直观体现研究区积雪的空间分布状况,特别是研究区内的 4 大山系,包括北部阿尔泰山,中部天山、南部昆仑山和祁连山所在地区,积雪持续日数较高,一般在 180 d 以上,局部高海拔地区,积雪持续日数更高,达 300 d 以上,为永久积雪区;由表 4 得出,与其他产品相比,AMSR-E 产品提取的积雪日数在范围和数值上均存在明显的高估,特别是积雪持续日数在 120 d 以上地区的高估。



(a) 研究区 2 000 m 以下各产品分类精度对比 (b) 研究区 2 000 m 以上各产品分类精度对比
 图 6 研究区不同高程范围各融合积雪产品分类精度对比

Fig. 6 Compared results of classification accuracy of different snow cover products in different ranges of altitude

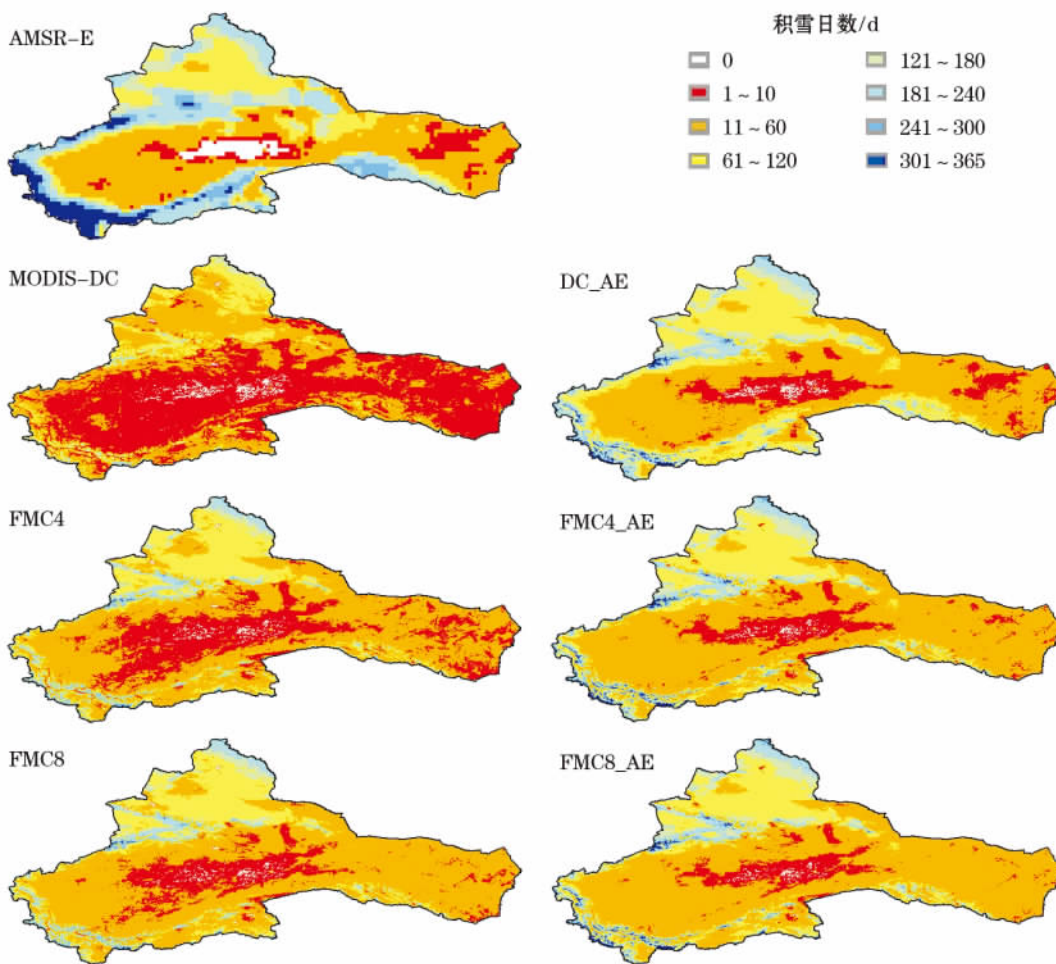


图 7 由各积雪产品提取的中国干旱区 2002 - 2009 年 8 a 平均积雪持续日数分布

Fig. 7 Distribution of the averaged SCD extracted from different snow cover products in arid areas in China during the period of 2002 - 2009

MODIS 融合产品空间分辨率最高,为 500 m。从图 7 与表 4 可以看出,MODIS 产品提取积雪日数存在一个明显的问题,即积雪持续日数的低估,特别是在高海拔的山区,与 MODIS 和 AMSR-E 融合产品

提取的积雪日数相比,其每日、4 d 和 8 d 产品分别会造成整个研究区平均约 41 d、13 d 和 10 d 的低估。这类误差一方面与 MODIS 产品中的云覆盖像元有关,产品中云覆盖像元越多,低估越明显,可见,

表 4 不同积雪产品提取的积雪持续日数间差异统计

Tab. 4 Difference of SCD extracted from different snow cover products

雪盖产品	研究区平均 积雪持续日数/d	不同积雪日数区间像元数占研究区全部像元数百分比/%						
		0 d	1~60 d	61~120 d	121~180 d	181~240 d	241~300 d	301~365 d
MODIS-DC	22.5	2.6	86.1	8.9	2.3	0.2	0.0	0.0
FMC4	42.3	2.6	73.1	16.4	4.3	2.5	1.0	0.1
FMC8	47.2	2.6	71.3	17.0	5.2	2.6	1.1	0.2
AMSR-E	100.4	2.4	45.0	17.3	14.4	11.2	4.8	4.9
DC_AE	63.3	1.2	58.9	24.0	10.2	3.7	1.2	1.0
FMC4_AE	55.8	1.3	68.2	17.8	7.2	3.0	1.1	1.2
FMC8_AE	57	1.5	67.9	17.8	7.3	3.1	1.1	1.3

MODIS 每日产品对积雪日数低估最为显著,不过在高海拔的山区,积雪日数的低估还有另一方面原因,即 MODIS 雪分类算法,由于 MODIS 全球雪分类算法中统一将归一化积雪指数 NDSI 的阈值设置为 0.4,高于山区的实际情况,造成山区积雪的漏分⁽¹⁶⁾。

MODIS 与 AMSR-E 融合产品的实际空间分辨率介于 500~25 000 m 之间,图 7 可以看出,每日产品积雪日数的空间分辨率最粗,积雪日数的高估明显(表 4),其积雪持续日数在 60~240 d 的像元数明显高于 4 d 和 8 d 融合产品,这是因为每日产品中直接用 AMSR-E 替换的云覆盖像元较多,而 4 d 和 8 d 产品首先经 MODIS 多日融合,已经将大部分影像中的云覆盖比例降低至 10% 以下,因此与 AMSR-E 产品的融合对最终产品和积雪日数提取时带入的误差有限。此外,与 MODIS 低云覆盖度的融合产品相比,多传感器融合产品为无云产品,不存在云覆盖像元造成的积雪日数低估,它提取的积雪日数在所有产品中最为可靠,不过它对 MODIS 积雪产品在山区因分类算法本身造成的积雪漏分没有进行修正。

4 结论

(1) MODIS 每日融合积雪产品受云覆盖影响严重,云覆盖度在一年中主要积雪月份(12~3 月)可达 40% 以上,降低了雪、陆探测能力。此外,该产品虽然在晴空条件下分类精度较高(约 98%),但考虑到云覆盖影响后,其分类精度大幅降低(约 34%)。

(2) 阈值法融合后的 MODIS 4 d 和 8 d 产品的云覆盖度大幅下降,平均云覆盖度在 4~11 月低于 10%,12~3 月稍高,介于 10%~20%。两者相比,8 d 产品在主要积雪月份可以额外降低研究区约

5% 的云覆盖,同时提高约 3% 的雪覆盖,但两者分类精度间差异很小。

(3) AMSR-E 积雪产品不受云覆盖影响,在所有无云产品中观测的积雪面积最大,但站点精度验证表明,该产品对积雪有较大的高估,特别是在海拔超过 2 000 m 的地区,高估误差达 40% 以上,这虽然提高了其在高海拔地区的雪分类精度,但大大降低了陆地分类的精度,整体精度也有一定程度的下降。

(4) MODIS 与 AMSR-E 的融合积雪产品,可以完全消除 MODIS 产品中的云覆盖,不过其每日产品的精度随海拔变化下降明显,在高于 2 000 m 的地区,其高估误差在 10% 以上,整体及陆地分类精度降低约 8%,其余两种多日融合产品无论是在云去除能力,还是在保持较高分类精度方面均有较好表现,且差异不大,不过考虑到 4 d 和 8 d 融合算法的合成效率,4 d 产品要优于 8 d 产品。

(5) 不同融合产品提取积雪日数的制图及统计对比也表明,由 MODIS 与 AMSR-E 4 d 融合产品提取的积雪持续日数,不仅最大程度上保持了原 MODIS 产品高的空间分辨率,而且提取积雪日数精度较高,对研究区积雪状况的空间分布有很好反映。

致谢:感谢美国国家数据中心(NSIDC)提供 MODIS 每日积雪数据,感谢中国西部环境与生态科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn>)提供中国雪深长时间序列数据集。

参考文献(References):

- (1) Liang T, Huang X, Wu C, 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): 1 514-1 526.
- (2) Hall D K, Riggs G A, Salomonson V V, et al. MODIS snow-cover products (J). *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83: 181-194.

- (3) Parajka J ,Bloschl G. Validation of MODIS snow cover images over Austria (J). *Hydrology and Earth System Sciences* ,2006 ,10: 679 – 689.
- (4) Hall D K ,Riggs G A. Accuracy assessment of the MODIS snow-cover products (J). *Hydrological Processes* ,2007 ,21: 1 534 – 1 547.
- (5) Wang X ,Xie H ,Liang T. Evaluation of MODIS snow cover and cloud mask and its application in northern Xinjiang ,China (J). *Remote Sensing of Environment* 2008 ,112(4) : 1 497 – 1 513.
- (6) Riggs G ,Hall D. Reduction of cloud obscuration in the MODIS snow data product (C) //Stowe. *Proceeding of the 59th Eastern Snow Conference*. USA: Vermont 2002: 205 – 212.
- (7) Parajka J ,Bloschl G. Spatio-temporal combination of MODIS images potential for snow cover mapping (J). *Water Resources Research* 2008 44 ,W03406 ,doi: 10. 1029/2007WR006204.
- (8) 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.
- (9) 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 ,doi: 10. 1117/1. 3265996.
- (10) 李新 车涛. 积雪被动微波遥感研究进展 (J). *冰川冻土* 2007 , 29(3) : 487 – 496. (Li Xin ,Che Tao. A review on passive microwave remote sensing of snow cover (J). *Journal of Glaciology and Geocryology* 2007 29(3) : 487 – 496.)
- (11) 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(10) : 3 750 – 3 761.
- (12) Gao Y ,Xie H ,Lu N ,et al. Toward advanced new daily products of cloud-free snow cover and snow water equivalent from Terra-Aqua MODIS and Aqua AMSR-E measurements (J). *Journal of Hydrology* 2010 385(1/4) : 23 – 35.
- (13) 陈曦. 中国干旱区自然地理 (M). 北京: 科学出版社 2010: 23 – 47. (Chen Xi. *Physical Geography of Arid Land in China* (M). Beijing: Science Press 2010: 23 – 47.)
- (14) Riggs G A ,Hall D K ,Salomonson V V. MODIS Snow Products User Guide Collection 5 (EB/OL). <http://modis-snow-ice.gsfc.nasa.gov/sugkc2.html> 2006.
- (15) Che T ,Li X ,Jin R ,et al. Snow depth derived from passive microwave remote – sensing data in China (J). *Annals of Glaciology* , 2008 49(1) : 145 – 154.
- (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). *冰川冻土* ,2008 30(1) : 132 – 138. (Hao 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.)

Validation and Assessment of Cloud Obscuration Reduction of Snow Cover Products in Arid Areas in China

WANG Zeng-yan^{1,2} , CHE Tao¹

(1. *Cold and arid regions environment and engineering research institute , Chinese academy of sciences , Lanzhou 730000 , China;*

2. *Graduate University , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100049 , China)*

Abstract: Cloud coverage in daily snow cover products is a main obstacle in using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). In this study, the multi-temporal and multi-sensor combination approaches are applied to reduce cloud obscuration with Aqua Advanced Microwave Scanning Radiometer for NASA'S Earth Observing System (AMSR-E) snow depth products introduced as the auxiliary data to develop 6 new kinds of snow cover products. Different snow cover duration days(SCD) maps are developed from these combined products. The results are as follows: (1) MODIS and AMSR-E 4-day threshold-combined snow cover product performed well in algorithm efficiency, cloud-reducing effect and capability in maintaining relatively high spatiotemporal resolutions; (2) Under all weather conditions, the overall, snow and land accuracies of the resulted cloud-free products were 96%, 80% and 99%, and they were significantly higher than 64%, 32% and 70% of the original MODIS Terra and Aqua combination product, respectively; (3) The SCD map generated from this product could not only maintain a high spatial resolution of the original MODIS product, but also could precisely reflect the spatial distribution of the snow cover status in the study area.

Key words: snow covers; product SCD; MODIS; spatial resolution; cloud obscuration reduction; arid area; China