

doi: 10.6046/gtzyyg.2020102

引用格式: 闵文彬, 彭骏, 李施颖. 青藏高原 FY-3C 卫星积雪产品评估[J]. 国土资源遥感, 2021, 33(1): 145-151. (Min W B, Pen J, Li S Y. The evaluation of FY-3C snow products in the Tibetan Plateau [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2021, 33(1): 145-151.)

# 青藏高原 FY-3C 卫星积雪产品评估

闵文彬<sup>1</sup>, 彭骏<sup>1</sup>, 李施颖<sup>2</sup>

(1. 中国气象局成都高原气象研究所/高原与盆地暴雨旱涝灾害四川重点实验室, 成都 610071; 2. 四川省气象探测数据中心, 成都 610071)

**摘要:** 选取2018年10月1日—2019年4月30日作为积雪研究期, 利用青藏高原地区118个气象台站的积雪观测数据, 对风云三号C星(FY-3C)多仪器融合的雪盖(multi-sensor synergy snow cover, MULSS\_SNC)和微波成像仪的雪水当量(microwave radiation imager snow water equivalent, MWRIX\_SWE)产品进行评估, 以了解产品的区域可靠性。结果表明: MULSS\_SNC和MWRIX\_SWE雪盖判识准确率分别为87.18%和72.32%, 召回率分别为66.67%和49.63%, 误判率分别为12.81%和27.68%, 漏判率分别为33.33%和50.37%; 对于积雪混合像元或积雪深度不足0.5 cm的卫星像元, MULSS\_SNC和MWRIX\_SWE都倾向于无雪判识, 1 cm以下雪盖漏判率高达60%以上; MULSS\_SNC在积雪深度达2 cm以上时, 召回率可达到89.09%, 而MWRIX\_SWE产品在积雪深度达5 cm以上时, 积雪判识召回率才达到63.37%。MWRIX\_SWE反演的青藏高原地区雪深与地面观测值误差很大, 不存在线性正相关关系, 不建议直接使用。

**关键词:** MULSS\_SNC; MWRIX\_SWE; 评估; 青藏高原

**中图法分类号:** TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-070X(2021)01-0145-07

## 0 引言

积雪作为冰冻圈的重要组成部分之一, 在气候变化和水资源中扮演着重要角色。积雪的累积和消融影响水资源循环, 积雪的高反射率、低导热率特性影响地表能量平衡和气候系统变化。因此, 准确、及时掌握积雪的时空变化对于气候变化预测、水资源管理等至关重要。目前, 积雪观测数据主要来自传统的地面站点观测和卫星遥感观测。在我国青藏高原地区, 积雪观测站点少, 空间分布不均匀, 观测时间不连续, 不足以提供区域积雪分布和变化特征信息。卫星遥感成为该地区积雪监测的理想手段, 能够实现积雪宏观、快速和周期性的监测。人们可利用光学遥感数据提取雪盖信息<sup>[1-6]</sup>, 利用微波遥感数据反演雪深和雪水当量<sup>[7-10]</sup>, 及时掌握研究区的积雪动态, 认识研究区的积雪和雪水当量的时空分布特征<sup>[11-13]</sup>。然而, 可见光遥感依赖于太阳光, 受云层影响严重, 在天空有云状况下无法工作; 被动微波遥感虽具有穿透性及全天候工作特点, 不受天气

状况的影响, 但空间分辨率低, 主要用于全球雪深、积雪覆盖范围和雪水当量的研究, 在区域性的积雪动态监测和积雪研究中, 卫星遥感积雪产品精度还有许多需要改进的地方, 不同传感器、不同反演算法之间存在较大偏差<sup>[14-20]</sup>。所以, 目前遥感积雪产品在区域性应用之前, 必须经过真实性检验和精度评估, 它是评价遥感产品质量、可靠性和适用性的唯一手段, 是提高遥感产品精度、改善遥感产品质量的主要依据, 更是推动遥感产品应用范围和应用水平的重要保障。

我国风云三号系列气象卫星不仅提供遥观测资料, 还提供大量的业务化产品, 包括积雪监测产品, 并实现了广泛的数据共享。本研究以地面积雪观测数据为参考, 开展FY-3C多仪器融合数据的积雪覆盖产品(multi-sensor synergy snow cover, MULSS\_SNC)和微波成像仪的雪深雪水当量产品(microwave radiation imager snow water equivalent, MWRIX\_SWE)在青藏高原地区的精度检验和评估分析, 这对于风云三号气象卫星积雪产品在研究区的应用是必不可少的, 具有非常重要的意义。

收稿日期: 2020-04-13; 修订日期: 2020-08-19

基金项目: 中国气象局风云三号(02)批气象卫星地面应用系统工程应用示范分系统项目“青藏高原固态水资源遥感监测与评估业务应用示范”(编号: FY-3(02)-UDS-1.11.1)资助。

第一作者: 闵文彬(1966-), 女, 教授级高级工程师, 主要从事卫星遥感技术应用研究。Email: wenbinmin@sina.com。

# 1 数据与评估方法

## 1.1 数据来源

本文使用的卫星反演积雪产品取自国家气象科学数据共享服务平台 (<http://data.cma.cn/site/index.html>), 要检验的 FY-3C 多仪器融合的积雪覆盖产品 (MULSS\_SNC) 空间分辨率为 1 km, FY-3C

微波成像仪的雪深和雪水当量产品 (MWRIX\_SWE) 空间分辨率为 25 km。作为检验参考值的地面积雪观测数据取自全国综合气象信息共享平台 (China integrated meteorological information sharing system, CIMISS), 包括西藏、青海和四川境内的 118 个气象台站, 台站分布见图 1, 海拔跨度较大, 从 1 370 m 到 4 800 m。

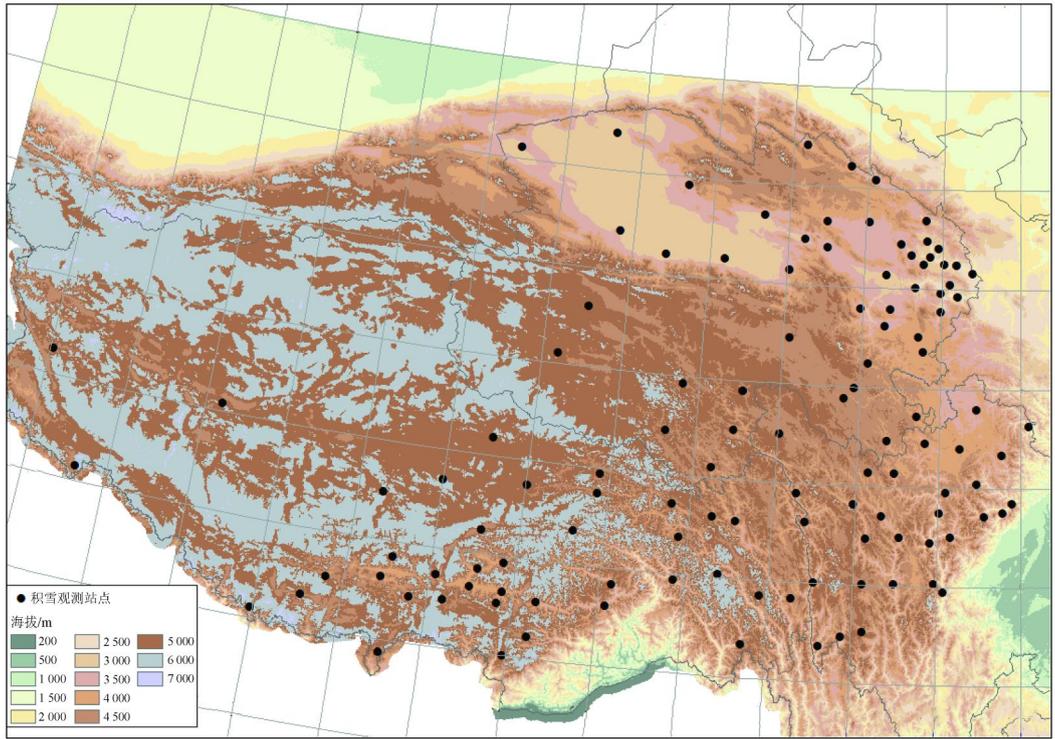


图 1 青藏高原积雪观测站点分布示意图

Fig. 1 Distribution of snow observation stations in Qinghai - Tibet Plateau

## 1.2 评估方法

### 1.2.1 地面观测参考值

根据地面雪深观测规范, 当气象站四周视野地面被雪覆盖超过一半时观测雪深, 当雪深达到或超过 5 cm 时观测雪压。台站雪深观测记录为 99990 表示有少量积雪, 地面积雪深度观测记录为 0 表示气象站四周视野地面被雪覆盖超过一半, 但雪深不足 0.5 cm。本文把台站雪深观测记录为 99990 和 0, 即有少量积雪或雪深不足 0.5 cm 的气象站对应的卫星像元看作部分积雪像元, 把雪深观测记录大于或等于 0.5 cm 的气象站对应的卫星像元看作积雪像元, 把无积雪气象站对应的卫星像元看作陆地像元。

### 1.2.2 卫星积雪覆盖产品评估

以气象站积雪观测数据作为参考, 主要对 MULSS\_SNC 和 MWRIX\_SWE 的积雪和陆地像元进行积雪覆盖有/无验证。将 FY-3C 积雪产品正确

判识的积雪像元数记为  $N_a$ 、误判为积雪的像元数记为  $N_b$ 、漏判的积雪像元数记为  $N_c$ , FY-3C 积雪产品正确判识的陆地像元数记为  $N_d$ , 则有<sup>[10]</sup>

卫星产品判识的总体精度为:

$$\frac{N_a + N_d}{N_a + N_b + N_c + N_d} \times 100\% \quad (1)$$

对卫星判识结果而言, 卫星产品雪盖判识准确率为:

$$\frac{N_a}{N_a + N_b} \times 100\% \quad (2)$$

对地面积雪观测而言, 卫星产品雪盖判识召回率为:

$$\frac{N_a}{N_a + N_c} \times 100\% \quad (3)$$

卫星产品雪盖误判率为:

$$\frac{N_b}{N_a + N_b} \times 100\% \quad (4)$$

卫星产品雪盖漏判率为:

$$\frac{N_c}{N_a + N_c} \times 100\% \quad (5)$$

### 1.2.3 卫星反演雪深和雪水当量产品评估

研究认为地面雪深和雪压观测值为真值,对观测点所对应卫星像元的雪深和雪水当量作验证与评估,雪水当量=雪压/水的密度。参照中华人民共和国气象行业标准中的气象卫星定量产品质量评价指标内容,本文选取的评价指标有:

1) 平均偏差 *Bias*。是指待评估卫星反演产品数据与对应地面观测数据差值的平均值,即

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - G_i)}{N} \quad (6)$$

2) 平均绝对误差 *MAE*。是将卫星反演产品数据与对应地面观测数据差值取绝对值后再求平均值,即

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |S_i - G_i|}{N} \quad (7)$$

3) 均方根误差 *RMSE*。反映待评估卫星反演产品数据对应地面观测数据的偏差,即

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (S_i - G_i)^2}{N}} \quad (8)$$

4) 相关系数 *Corr*。反映待评估卫星反演产品数据对地面观测数据之间的相关关系密切程度,即

$$Corr = \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - \bar{S})(G_i - \bar{G})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (S_i - \bar{S})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (G_i - \bar{G})^2}} \quad (9)$$

5) 平均相对误差 *MRE*。即

$$MRE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{S_i - G_i}{G_i} \right| \quad (10)$$

式中: *N* 为地面和卫星观测比对样本总数; *S<sub>i</sub>* 为卫星反演估计值; *G<sub>i</sub>* 为地面观测值;  $\bar{S}$  和  $\bar{G}$  分别为卫星反演估计值和地面观测值的平均值。

## 2 FY-3C 积雪产品评估分析

### 2.1 MULSS\_SNC 雪盖产品

表 1 为 MULSS\_SNC 判别结果,2018 年 10 月—2019 年 4 月 118 个台站共有 25 016 个地面观测样本。

表 1 MULSS\_SNC 判识结果

Tab.1 The identification results of MULSS\_SNC

地面观测样本数/个	MULSS_SNC 像元数/个				
	积雪	陆地	云及其他	参与评估	
积雪	3 147	864	432	1851	1 296
陆地	1 548	127	847	574	974
部分积雪	20 321	353	13 091	6 877	13 444
合计	25 016	1 344	14 370	9 302	15 714

假设 MULSS\_SNC 雪盖产品的云像元判识准确,不考虑卫星误将积雪判识为云的情况,也不评估部分积雪的混合像元情况,只对 2 270 个积雪和陆地卫星像元进行评估。根据公式(1) - (5)可计算出,MULSS\_SNC 雪盖产品总体精度为 75.37%、雪盖判识准确率为 87.18%、召回率为 66.67%、雪盖误判率为 12.81%、漏判率为 33.33%。部分积雪像元只有 2.63% 被判识为积雪像元,97.37% 被判识为无雪的陆地像元。

### 2.2 MWRIX\_SWE 积雪判识

将 MWRIX\_SWE 产品的反演值大于 0 的卫星像元作为积雪像元看待,利用地面积雪观测数据对其有/无积雪判识准确率进行分析。从表 2 可见,有 9 121 个卫星像元缺数据,参与评估的只有 15 895 个像元。MWRIX\_SWE 产品判识有 4 085 个积雪像元,其中 998 个积雪像元与地面观测一致,误判 382 个,判识的 2 705 个积雪像元对应地面为部分积雪;MWRIX\_SWE 产品判识的陆地像元有 11 810 个,其中漏判了 1 013 个积雪像元,正确判识陆地像元 613 个,将 10 184 个部分积雪像元判识为了陆地。去掉缺数据的卫星像元,只统计参与评估的数据,根据公式(1) - (5)计算出,MWRIX\_SWE 产品总体精度为 53.59%;积雪像元判识准确率为 72.32%、召回率为 49.63%、误判率为 27.68%、漏判率为 50.37%。79.01% 的部分积雪像元被判识为陆地。

表 2 MWRIX\_SWE 判识结果

Tab.2 The identification results of MWRIX\_SWE

地面观测样本数/个	MWRIX_SWE 像元数/个				
	积雪	陆地	缺数据	参与评估	
积雪	3 147	998	1 013	1 136	2 011
陆地	1 548	382	613	553	995
部分积雪	20 321	2 705	10 184	7 432	12 889
合计	25 016	4 085	11 810	9 121	15 895

### 2.3 不同深度的积雪判识

表 3 给出了 FY3C 积雪产品不同积雪深度的检验结果,表中不同深度积雪判识的召回率、漏判率和漏判百分比都是针对地面观测样本而言的,漏判百分比为某一深度的卫星漏判的积雪像元数占卫星漏判的积雪像元总数的比例。从分析结果可见,积雪深度在[0.5,1]cm 的有 460 个像元,MULSS\_SNC 产

品正确判识出 168 个,漏掉 292 个,积雪判识召回率只有 36.52%,漏判率高达 63.48%,漏判数占总漏判像元数的 67.59%;积雪深度在(1,2] cm 之间的 185 个像元中,MULSS\_SNC 产品正确判识出 116 个,漏掉 69 个,判识召回率为 62.70%,漏判率为 37.30%,漏判百分比为 15.97%;当积雪深度达到 2 cm 以上时,MULSS\_SNC 产品对不同深度的雪盖判识召回率都达到 80% 以上,漏判率小于 20%。积雪深度 2 cm 以上的 651 个像元中,MULSS 产品正确判识出 580 个,漏掉 71 个,判识召回率达到 89.09%,漏判率为 10.91%,漏判百分比为 16.44%。

由表 3 对参与评估的 2 011 个 MWRIX\_SWE 像元的分析结果可见,积雪深度在[0.5,1] cm 的有 723 个像元,MWRIX\_SWE 产品正确判识出 238 个,

漏掉 485 个,判识召回率只有 32.92%,漏判率高达 67.08%,漏判数占总漏判像元数的 47.88%;积雪深度在(1,2] cm 之间的 286 个像元中,MWRIX\_SWE 产品正确判识出 125 个,漏掉 161 个,判识召回率为 43.71%,漏判率为 56.29%,漏判百分比为 15.89%;积雪深度在(2,3] cm 之间的 214 个像元中,MWRIX\_SWE 产品正确判识出 101 个,漏掉 113 个,判识召回率为 47.20%,漏判率为 52.80%,漏判百分比为 11.15%。MWRIX\_SWE 对积雪深度在 3 cm 以下的积雪像元漏报率很高,超过了 50%。积雪深度 5 cm 以上 1 002 个像元中,MWRIX\_SWE 产品正确判识出 635 个,漏掉 367 个,判识召回率达到 63.37%,漏判率 36.63%,漏判百分比 36.23%。

表 3 不同积雪深度的 FY-3C 积雪产品检测结果

Tab. 3 The evaluation results of FY3C snow cover products with different snow depth

积雪深度/cm	[0.5,1]	(1,2]	(2,3]	(3,4]	(4,5]	(5,6]	(6,8]	(8,10]	>10	>2	合计
MULSS_SNC 判识结果											
地面积雪像元数/个	460	185	118	103	69	50	77	48	186	651	1 296
判识正确像元数/个	168	116	99	83	61	44	71	41	181	580	864
召回率/%	36.52	62.70	83.90	80.58	88.41	88.00	92.21	85.42	97.31	89.09	66.67
漏判像元数/个	292	69	19	20	8	6	6	7	5	71	432
漏判率/%	63.48	37.30	16.10	19.42	11.59	12.00	7.79	14.58	2.69	10.91	33.33
漏判百分比/%	67.59	15.97	4.40	4.63	1.85	1.39	1.39	1.62	1.16	16.44	100
MWRIX_SWE 反演结果											
地面积雪像元数/个	723	286	214	154	119	67	110	72	266	1 002	2 011
判识正确像元数/个	238	125	101	85	75	48	85	49	192	635	998
SWE 召回率/%	32.92	43.71	47.20	55.19	63.03	71.64	77.27	68.06	72.18	63.37	49.63
SWE 漏判像元数/个	485	161	113	69	44	19	25	23	74	367	1 013
SWE 漏判率/%	67.08	56.29	52.80	44.81	36.97	28.36	22.73	31.94	27.82	36.63	50.37
SWE 漏判百分比/%	47.88	15.89	11.15	6.81	4.34	1.88	2.47	2.27	7.31	36.23	100

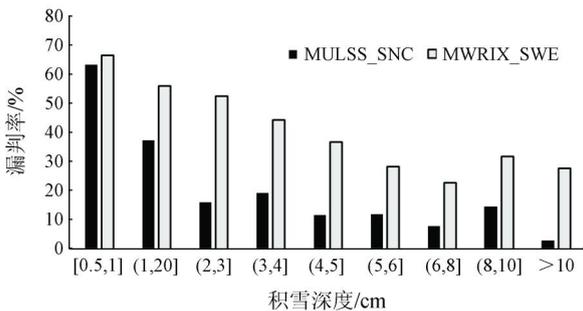


图 2 FY3C 积雪产品不同积雪深度的漏判率  
Fig. 2 The missing rate of FY3C snow cover products with different snow depth

通过表 4 和图 2 的 MULSS\_SNC 和 MWRIX\_SWE 产品检验结果对比可见,对于相同深度的积雪像元,MULSS\_SNC 产品雪盖判识召回率都比 MWRIX\_SWE 产品的高,漏报率低;当积雪深度达到 2 cm 以上时,MULSS\_SNC 产品雪盖判识召回率接近 90%,比 MWRIX\_SWE 高出 25%,漏报百分比低 50%。

## 2.4 MULSS\_SNC 与 MWRIX\_SWE 积雪合成产品雪盖判识准确率

假如 MWRIX\_SWE 卫星像元地表面单一,将其 25 km 像元反演值均匀插值到 1 km,与 MULSS\_SNC 产品空间匹配,利用 MWRIX\_SWE 监测的积雪像元替代 MULSS\_SNC 的云像元,减小 MULSS\_SNC 产品的云影响,得到 MULSS\_SNC 和 MWRIX\_SWE 合成产品。从表 4 可见,合成积雪产品总体精度为 64.85%、雪盖判识准确率为 83.08%、召回率为 61.54%、误判率为 16.92%、漏判率为 38.46%,将 89.77% 的部分积雪像元判为陆地像元。虽然雪盖合成产品的精度不比 MULSS\_SNC 高,但能判识出的积雪像元明显多于单一用 MULSS\_SNC 和 MWRIX\_SWE 的判识结果,可在一定程度上弥补 MULSS\_SNC 的云和 MWRIX\_SWE 无数据的影响,获得更多的积雪信息。当然,MULSS\_SNC 和 MWRIX\_SWE 产品不同分辨率的空间匹配势必造成判识结果差异,这里将微波与光学产品简单结合应用,只是下一步工作的思路测验而已。

表 4 MULSS\_SNC 和 MWRIX\_SW 合成的雪盖产品的判识结果

Tab. 4 The identification results of synthetic products of MULSS\_SNC and MWRIX\_SWE

地面观测样本数/个	合成产品像元数/个				
	积雪	陆地	MWRIX 无数据	参与评估	
积雪	3 147	1 419	887	841	2 306
陆地	1 548	289	751	508	1 040
部分积雪	20 321	1 332	11 694	7 295	13 026
合计	25 016	3 040	13 332	8 644	16 372

### 2.5 MWRIX\_SWE 的雪深和雪水当量定量分析

由图 3 的地面观测与卫星反演雪深散点图可知,当地面雪深达到 60 cm 以上时,MWRIX\_SWE 反演雪深值却不足 10 cm,严重偏小;反之,MWRIX\_SWE 反演雪深值达到 60 cm 以上时,地面观测值也不足 10 cm。即,不论是地面观测还是卫星反演雪深达到 60 cm 以上,二者偏差都达到 50 cm 以上,偏差很大。而且地面观测与卫星反演雪深的判定系数  $R^2$  为 0.022 8,说明二者没有正相关关系。将地面雪深数据作为参考值,误差分析得知,MWRIX\_SWE 反演雪深的平均偏差为 6.05 cm,偏差值范围 -151 cm ~ 72.4 cm;绝对误差为 11.76 cm;均方根误差 18.41 cm;平均相对误差高达 486.16%。

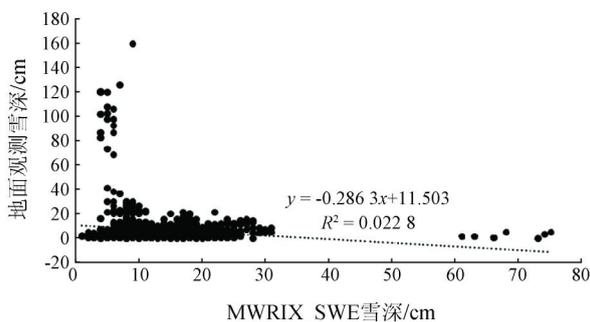


图 3 地面观测与 MWRIX\_SWE 雪深散点图

Fig. 3 The scatter map of snow depth from ground observation and MWRIX\_SWE

接下来,在 998 组 MWRIX\_SWE 积雪对比数据中,剔除出卫星反演或地面观测积雪深度大于 60 cm 的 25 组数据,对余下 973 组数据进行统计分析,偏差范围在 -37 ~ 27.4 cm,平均偏差为 7.54 cm;绝对误差为 9.78 cm;相关系数为 -0.04。图 4 为 60 cm 以下地面观测与卫星反演雪深散点图,从中可以看出,地面观测与卫星反演雪深值之间相关性仍然不好。误差和相关分析结果都表明 MWRIX\_SWE 的雪深产品在青藏高原地区不可直接使用。分析结果表明,被动微波积雪产品不受天气状况的影响,但空间分辨率低,主要用于全球雪深、积雪覆盖范围和雪水当量的研究,在区域性的积雪动态监测中还存在较大偏差<sup>[12]</sup>。

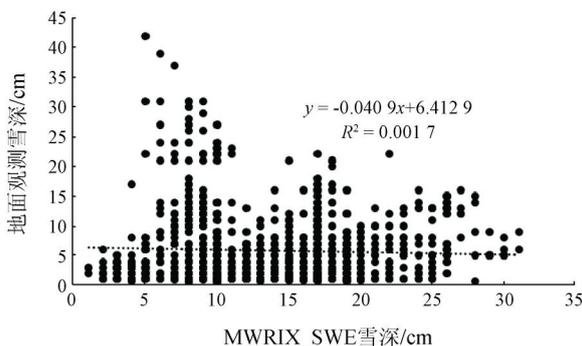


图 4 60 cm 以下地面观测与卫星反演雪深散点图

Fig. 4 The scatter map of snow depth from ground observation and satellite inversion below 60cm

鉴于以上分析结果,目前 FY3C 卫星反演雪深产品可靠较差,而且地面雪压观测值与 MWRIX\_SWE 的雪水当量值有效配对样本数较少,只有 22 个,本文就不再定量评估雪水当量产品。

### 3 结论

利用青藏高原 118 个气象站积雪观测数据,对 FY-3C 的 MULSS\_SNC 雪盖产品和 MWRIX\_SWE 雪深与雪水当量产品进行评估分析,得出如下结论:

1) MULSS\_SNC 产品的总体精度为 75.37%,积雪判识准确率为 87.18%,召回率为 66.67%,雪盖误判率为 12.81%,雪盖漏判率为 33.33%,97.37% 的部分积雪混合像元被判识为无雪。

2) MWRIX\_SWE 产品对像元有无积雪判识的总体精度为 53.59%,积雪像元判识准确率为 72.32%,召回率为 49.63%,雪盖误判率为 27.68%,雪盖漏判率为 50.37%,79.01% 部分积雪混合像元被判识为无雪。

3) 利用 MWRIX\_SWE 产品对 MULSS\_SNC 产品进行消云处理后的雪盖合成产品总体精度为 64.85%、积雪准确率为 83.08%、雪盖召回率为 61.54%、误判率为 16.92%、漏判率为 38.46%,89.77% 的部分积雪混合像元被判识为无雪。

4) 积雪深度在 1 cm 以下时,MULSS\_SNC 产品判识召回率只有 36.52%,漏判率高达 63.48%,漏判数占总漏判像元数的 67.59%;积雪深度达 2 cm 以上时,MULSS\_SNC 产品判识召回率达到 89.09%,漏判率为 10.91%,漏判百分比为 16.44%。

5) 积雪深度在 1 cm 以下时,MWRIX\_SWE 产品判识召回率只有 32.92%,漏判率高达 67.08%,漏判百分比为 47.88%;积雪深度在 3 cm 以下时,漏报率都很高,超过了 50%。积雪深度达到 5 cm 以上时,判识召回率才达到 63.37%,漏判率为 36.63%。

漏判百分比为 36.23%。

6) MWRIX\_SWE 卫星反演雪深的平均偏差为 6.05 cm, 偏差值范围 -151 ~ 72.4 cm; 绝对误差为 11.76 cm; 均方根误差 18.41 cm; 平均相对误差高达 486.16%; 卫星反演雪深值与地面观测值之间相关系数为 -0.15; 不论是地面观测值, 还是 MWRIX\_SWE 卫星反演雪深值达到 60 cm 以上, 二者偏差都达到 50 cm 以上。

参考文献 (References):

[1] 李震, 张文煜, 孙文新, 等. NOAA/AVHRR 数据的雪盖信息提取与复台[J]. 遥感技术与应用, 1995, 10(4): 19 - 24.  
Li Z, Zhang W Y, Sun W X. Extracting the information of snow - cover from NOAA/AVHRR data and overlaying with vector data [J]. Remote Sensing Technology and Application, 1995, 10(4): 19 - 24.

[2] 延昊, 张国平. 混合像元分解法提取积雪盖度[J]. 应用气象学报, 2004, 15(6): 665 - 671.  
Yan H, Zhang G P. Unmixing method applied to NOAA/AVHRR data for snow cover estimation [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2004, 15(6): 665 - 671.

[3] 梁天刚, 吴彩霞, 陈全功, 等. 北疆牧区积雪图像分类与雪深反演模型的研究[J]. 冰川冻土, 2004, 26(2): 160 - 165.  
Liang T G, Wu C X, Chen Q G, et al. Snow classification and monitoring models in the pastoral areas of the Northern Xinjiang [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(2): 160 - 165.

[4] 张永宏, 任伟, 曹庭, 等. FY - 3/VIRR 资料积雪多阈值综合判识方法研究[J]. 遥感技术与应用, 2015, 30(6): 1076 - 1084.  
Zhang Y H, Ren W, Cao T, et al. Method of snow multi - threshold comprehensive discrimination with FY - 3/VIRR data [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2015, 30(6): 1076 - 1084.

[5] 陈文倩, 丁建丽, 孙永猛, 等. 基于 NDSI - NDVI 特征空间的积雪面积反演研究[J]. 冰川冻土, 2015, 37(4): 1059 - 1066.  
Chen W Q, Ding J L, Sun Y M, et al. Retrieval of snow cover area based on NDSI - NDVI feature space [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(4): 1059 - 1066.

[6] 庞海洋, 孔祥生, 汪丽丽, 等. ENDSI 增强型雪指数提取积雪研究[J]. 国土资源遥感, 2018, 30(1): 63 - 71. doi: 10. 6046/gtzyyg. 2018. 01. 09.  
Pang H Y, Kong X S, Wang L L, et al. A study of the extraction of snow cover using nonlinear ENDSI model [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2018, 30(1): 63 - 71. doi: 10. 6046/gtzyyg. 2018. 01. 09.

[7] 王功雪, 蒋玲梅, 武胜利, 等. FY - 3B 与 FY - 3C/MWRI 交叉定标及雪深算法应用[J]. 遥感技术与应用, 2017, 32(1): 49 - 56.  
Wang G X, Jiang L M, Wu S L, et al. Intercalibrating FY - 3B and FY - 3C/MWRI for synergistic implementing to snow depth retrieval algorithm [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2017, 32(1): 49 - 56.

[8] 李长春, 徐轩, 包安明, 等. 基于 FY3B - MWRI 数据新疆区域积雪深度反演[J]. 遥感技术与应用, 2018, 33(6): 1030 -

1036.  
Li C C, Xu X, Bao A M, et al. The study on snow depth retrieval in Xinjiang region based on FY3B - MWRI data [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2018, 33(6): 1030 - 1036.

[9] 沙依然, 外力, 毛峰峰. 基于 AMSR2 被动微波积雪参量高精度反演方法研究[J]. 冰川冻土, 2016, 38(1): 145 - 158.  
Sayran W L, Mao W Y. A research on the method of deriving high - precision snow parameters from AMSR2 passive microwave remote sensing data [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(1): 145 - 158.

[10] 陈鹤, 车涛, 戴礼云. 基于 FY - MWRI 的中国西部被动微波积雪判识算法[J]. 遥感技术与应用, 2018, 33(6): 1037 - 1045.  
Chen H, Che T, Dai L Y. Snow identification algorithm based on FY - MWRI in Western China [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2018, 33(6): 1037 - 1045.

[11] 文军, Dai Mo, Deroin Jean - Paul, 等. 利用 MODIS 和 ASAR 资料估算青藏高原念青唐古拉山脉地区冰雪范围及厚度[J]. 冰川冻土, 2006, 28(1): 54 - 61.  
Wen J, Dai M, Deroin J P, et al. Extent and depth of snow cover over the Nyainqêntangha Range derived from ASAR and MODIS data [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(1): 54 - 61.

[12] 孙燕华, 黄晓东, 王玮, 等. 青藏高原积雪及雪水当量的时空变化[J]. 冰川冻土, 2014, 36(6): 1337 - 1344.  
Sun Y H, Huang X D, Wang W, et al. Spatio - temporal changes of snow cover and snow water equivalent in the Tibetan Plateau during 2003 - 2010 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(6): 1337 - 1344.

[13] 除多, 达娃, 拉巴卓玛, 等. 基于 MODIS 数据的青藏高原积雪时空分布特征分析[J]. 国土资源遥感, 2017, 29(2): 117 - 124. doi: 10. 6046/gtzyyg. 2017. 02. 17.  
Chu D, Da W, Laba Z M, et al. An analysis of spatial - temporal distribution features of snow cover over the Tibetan Plateau based on MODIS data [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2017, 29(2): 117 - 124. doi: 10. 6046/gtzyyg. 2017. 02. 17.

[14] Wang X W, Xie H J, Liang T G, 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.

[15] 柏延臣, 冯学智, 李新, 等. 基于被动微波遥感的青藏高原雪深反演及其结果评价[J]. 遥感学报, 2001, 5(3): 161 - 165.  
Bo Y C, Feng X Z, Li X, et al. The retrieval of snow depth in Qinghai - Xizang (Tibet) Plateau from passive microwave remote sensing data and its results assessment [J]. Journal of Remote Sensing, 2001, 5(3): 161 - 165.

[16] 肖雄新, 张廷军. 基于被动微波遥感的积雪深度和雪水当量反演研究进展[J]. 地球科学进展, 2018, 33(6): 590 - 605.  
Xiao X X, Zhang T J. Passive microwave remote sensing of snow depth and snow water equivalent: Overview [J]. Advances in Earth Science, 2018, 33(6): 590 - 605.

[17] 蒋洪波, 秦其明, 张宁, 等. 不同积雪深度与面积对积雪覆盖遥感反演的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(12): 3342 - 3346.  
Jiang H B, Qin Q M, Zhang N, et al. Effect of different snow depth

- and area on the snow cover retrieval using remote sensing data[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(12): 3342-3346.
- [18] 晋锐, 李新, 马明国, 等. 陆地定量遥感产品的真实性检验关键技术及试验验证[J]. 地球科学进展, 2017, 32(6): 630-642.
- Jin R, Li X, Ma M G, et al. Key methods and experiment verification for the validation of quantitative remote sensing products[J]. Advances in Earth Science, 2017, 32(6): 630-642.
- [19] 王轩, 郝晓华, 王建, 等. 中国地区 AVHRR 长时间序列积雪范围产品精度评估[J]. 遥感技术与应用, 2018, 33(6): 994-1003.
- Wang X, Hao X H, Wang J, et al. Accuracy evaluation of long time series AVHRR snow cover area products in China[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2018, 33(6): 994-1003.
- [20] 侯小刚, 郑照军, 李帅, 等. 近 15 年新疆逐日无云积雪覆盖产品生成及精度验证[J]. 国土资源遥感, 2018, 30(2): 214-222. doi:10.6046/gtzyyg.2018.02.29.
- Hou X G, Zheng Z J, Li S, et al. Generation of daily cloudless snow cover product in the past 15 years in Xinjiang and accuracy validation[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2018, 30(2): 214-222. doi:10.6046/gtzyyg.2018.02.29.

## The evaluation of FY-3C snow products in the Tibetan Plateau

MIN Wenbin<sup>1</sup>, PEN Jun<sup>1</sup>, Li Shiyong<sup>2</sup>

(1. Institute of Plateau Meteorology, CMA/Heavy Rain and Drought - Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610071, China; 2. Sichuan Meteorological Sounding Data Center, Chengdu 610071, China)

**Abstract:** In order to understand the regional reliability of the Fengyun-3C (FY-3C) satellite snow products, the authors used the snow cover data of 118 meteorological stations in the Tibetan Plateau from October 1, 2018 to April 30, 2019 to evaluate the snow cover (MULSS\_SNC) and snow water equivalent (MWRIX\_SWE) products. The results show that, for snow cover pixels of MULSS\_SNC and MWRIX\_SWE, the accuracy rate is 87.18% and 72.32% respectively, the recall rate is 66.67% and 49.63% respectively, the false rate is 12.81% and 27.68% respectively, and the missing rate is 33.33% and 50.37% respectively. In terms of mixed pixels or pixels with snow depth less than 0.5 cm, both MULSS\_SNC and MWRIX\_SWE tend to identify with no snow, and the missing rate of snow depth less than 1 cm is up to 60%. When the snow depth of MULSS\_SNC is more than 2 cm, the recall rate can reach 89.09%. However, for MWRIX\_SWE, only when the snow depth is more than 5 cm can the snow recall rate reach 63.37%. The snow depth in the Tibetan Plateau from MWRIX\_SWE has a large error with ground observations, and there is no linear positive correlation, so it is not recommended to use it directly.

**Keywords:** MULSS\_SNC; MWRIX\_SWE; evaluation; Tibetan Plateau

(责任编辑: 李瑜)