

DOI: 10.5846/stxb202001070056

陈泓羽, 吴静, 李纯斌, 李政, 秦格霞. 卫星土壤水分产品在青藏高原地区的适用性评价. 生态学报, 2020, 40(24): 9195-9207.

Chen H Y, Wu J, Li C B, Li Z, Qin G X. Applicability evaluation of satellite soil moisture products in Qinghai-Tibet Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(24): 9195-9207.

卫星土壤水分产品在青藏高原地区的适用性评价

陈泓羽, 吴 静*, 李纯斌, 李 政, 秦格霞

甘肃农业大学资源与环境学院, 兰州 730070

摘要: 为了分析土壤水分产品在青藏高原地区的可靠性和适用性, 利用青藏高原地区地下 5 cm 深度的地面实测土壤水分数据, 结合多种评价指标(相关系数 R 、均方根误差 RMSE、偏差 Bias 和无偏均方根误差 ubRMSE) 对土壤水分主动-被动探测卫星(SMAP)、高级微波扫描辐射计 2(AMSR2)、风云三号(FY-3B)土壤水分产品, 从时间和空间两个方面进行了适用性研究。结果表明:(1) 土壤水分产品均能反映青藏高原的土壤水分变化, 在降水较多的季节, 三种产品精度均有不同程度的下降。(2) 土壤水分产品在夏季和秋季反演效果好于冬季和春季, 并且在秋季与实测值更接近。其中, SMAP 产品在各个区域都能反映土壤水分的季节变化趋势, 并普遍在夏季高估、冬季低估; AMSR2 产品在夏季低估, 冬季明显高估; FY-3B 产品在夏季普遍低估。(3) 土壤水分产品在那曲和狮泉河地区反演结果较好, 在那曲地区与实测值相关性最高; 在玛曲地区表现出较大的不确定性, 虽然相关系数较高, 但 RMSE 和 Bias 同样较高, 整体精度较差; SMAP 产品在阿里地区满足目标精度。综合来看, SMAP 产品在青藏高原地区反演结果较为稳定, 受气候和环境的影响较小, 具有相对较大的 R 和较小的 RMSE 和 Bias。

关键词: 土壤水分; 青藏高原; 土壤水分卫星遥感产品; 适用性

Applicability evaluation of satellite soil moisture products in Qinghai-Tibet Plateau

CHEN Hongyu, WU Jing*, LI Chunbin, LI Zheng, QIN Gexia

College of Resources and Environmental Sciences, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

Abstract: In order to analyze the reliability and applicability of soil moisture products in the Qinghai-Tibet Plateau, the soil moisture data measured at a depth of 5 cm below the ground in the Qinghai-tibet Plateau were used. Combined with a variety of evaluation indicators including Correlation Coefficient R , root mean square error (RMSE), Bias and unbiased root mean square error (ubRMSE), this paper conducted researches on the applicability of soil moisture active-passive detection satellite (SMAP), advanced microwave scanning radiometer 2 (AMSR2) and Fengyun-3B from two aspects of time and space. The results indicated that (1) all kinds of soil moisture products could reflect the changes of soil moisture in the Qinghai-Tibet Plateau. In the season with more precipitation, the accuracy of the three kinds of soil moisture products decreased to different degrees. (2) The inversion effect of soil moisture products in summer and autumn was better than that in winter and spring, and it was closer to the measured value in autumn. Among them, the SMAP could reflect the seasonal variation trend of soil moisture in all regions, while generally overestimated it in summer and underestimated in winter; the AMSR2 underestimated soil moisture in summer and significantly overestimated soil moisture in winter; FY-3B generally underestimated soil moisture in summer. (3) The results of soil moisture products inversion were good in Naqu and Shiquanhe areas. The correlation between the soil moisture products and measured data was the highest in Naqu; while in

基金项目: 国家自然科学基金项目(31760693); 甘肃农业大学学科建设基金(GAU-XKJS-2018-208)

收稿日期: 2020-01-07; 网络出版日期: 2020-11-05

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wujing@gsau.edu.cn

Maqu, the correlation coefficient was higher, but RMSE and Bias were also higher, the overall accuracy was poor. The SMAP met the target accuracy in the Ngari region. To sum up, the inversion results of SMAP products were relatively stable in the Qinghai-Tibet Plateau, and were less affected by climate and environment, with the relatively large R and small RMSE and Bias.

Key Words: soil moisture; Qinghai-Tibet Plateau; satellite remote sensing soil moisture products; applicability

土壤水分在控制地表和大气之间的物质、能量交换中起着重要的作用^[1],大面积土壤水分监测是水文学、生态学、气象学等科学研究中必不可少的内容^[1-4]。因此,长期有效地获取不同时间和空间尺度的土壤水分信息,在探索全球水循环机制、农作物生长、灾害监测与预报等方面发挥着关键作用^[5-7]。

传统的土壤水分监测是通过建立地面观测站点或利用气象站来获取土壤水分数据,这种方法虽然测定的土层多,但只能得到单点的数据,监测范围有限,而且数据的时效性差,耗费大量人力物力^[1,3,6]。随着卫星遥感的发展与完善,可实现及时获取大范围的土壤水分信息。其中,微波遥感具有全天时、全天候、大范围的监测能力,对云、雨、大气有一定的穿透能力^[4,7-10],对于地表土壤水分、植被特性的变化十分敏感,能够在长尺度长时间序列中获取多种地形和地表的土壤水分^[4,10]。基于微波遥感的各种相关产品开发,为分析区域乃至全球尺度土壤水分的时空分布特征提供了大量的基础数据。目前发布全球遥感土壤水分数据的有高级微波散射计(ASCAT)、土壤水分与海洋盐分卫星(SMOS)、土壤水分主动-被动探测卫星(SMAP)、高级微波扫描辐射计(AMSR-E)、高级微波扫描辐射计2(AMSR2)、风云三号(FY-3)气象卫星和欧空局发布的数十年全球卫星观测土壤水分数据集(ESA CCI)^[9]。其中,SMOS采用L-MEB(L-Band Microwave Emission of the Biosphere)正向模型为核心反演土壤水分^[11]。SMAP目前采用V极化单通道算法(SCA-V),使用垂直极化亮度温度观测值来估算地表土壤水分^[12]。AMSR2有基于日本宇航局JAXA的查找表算法^[13]和陆表参数反演模型LPRM算法^[14]的两种土壤水分产品。FY-3B采用参数化的地表发射率模型-Qp反演模型,用于校正地表粗糙度的影响^[15]。由于土壤水分产品通常基于不同的卫星数据和算法,所以各个产品的质量和连续性在空间和时间上都不同。因此,对于土壤水分产品的精度验证是其真实性和可靠性的有效保证,也是更好地使用土壤水分产品的前提。

已有研究者对各种卫星土壤水分产品进行了验证和比较。Jackson等^[16]利用美国四个流域观测网验证了NASA、LPRM、SCA和JAXA这四种基于AMSR-E的土壤水分产品。SCA总体上表现最好, RMSE最低, Bias较小; JAXA在低植被覆盖区性能优于NASA。Al-Yaari等^[17]在全球范围内对SMOS和AMSR-E土壤水分产品与陆地同化系统数据进行了比较,发现SMOS和AMSR-E产品与同化数据在植被稀疏地区的相关性良好,在植被茂密的地区,SMOS产品表现优于AMSR-E。李瑞娟等^[18]在亚洲区域对SMOS和AMSR2土壤水分产品进行验证,发现在湿季土壤水分产品与参考数据相关性更好,在干季出现高纬度高海拔区域缺测值较多的情况。Zeng等^[12]利用美国(LWW)网络、芬兰气象研究所(FMI)网络和罗马尼亚土壤温湿度观测网(RMSN)验证了SMAP土壤水分产品,结果表明SMAP产品与实测值的相关性均大于0.7,总体ubRMSE为 $0.036 \text{ m}^3/\text{m}^3$,满足SMAP产品的目标精度 $0.04 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。Chen等^[19]利用青藏高原那曲和帕里观测网数据对SMAP和SMOS土壤水分产品进行了评估。结果表明SMAP、SMOS产品在那曲网络表现较好, RMSE在可接受的误差范围内, SMAP产品普遍低估了土壤水分。Cui等^[20]利用美国的(LWW)网络和西班牙的(REMEDHUS)网络,对SMAP、SMOS、FY3B和AMSR2产品进行比较。结果表明,在LWW网络中SMAP的表现好于其他产品,其ubRMSE为 $0.027 \text{ m}^3/\text{m}^3$,满足SMAP产品的目标精度 $0.04 \text{ m}^3/\text{m}^3$;在REMEDHUS网络FY-3B产品表现最好,ubRMSE为 $0.025 \text{ m}^3/\text{m}^3$; JAXA产品普遍低估了土壤水分, LPRM产品随季节变化幅度较大。上述研究表明SMAP和SMOS土壤水分产品的性能优于其它产品,与C和X波段相比, L波段对土壤水分更敏感,对植被穿透能力更强。因此, L波段被认为是观测土壤水分的最佳波段^[21-22], 搭载在L波段的SMOS和SMAP

卫星也受到广泛关注。相反,对于我国 FY-3B 土壤水分产品的验证研究较少。

青藏高原是地球第三极^[23],其土壤水分对周边地区亚洲季风气候的形成和维持产生重要影响。使用高精度的土壤水分产品准确掌握高原地区长时间序列、大范围的土壤水分信息,对研究青藏高原土壤水分变化及其对周边地区气候的影响具有重要意义。因此,利用青藏高原地区建立的土壤水分观测网数据,对 SMAP、FY-3B 和 AMSR2 这三种不同机构发布的土壤水分产品,评价其在青藏高原地区的适用性,为青藏高原土壤水分研究的产品数据集选择提供参考。

1 研究区与数据

1.1 研究区概况

青藏高原位于我国的西南部,西起帕米尔高原和喀喇昆仑山脉,东达横断山脉,南起喜马拉雅山脉南缘,北至昆仑山,阿尔金山和祁连山北缘,总面积约为 250 万 km²,平均海拔在 4000 m 以上^[23-25]。年平均气温由东南的 20℃,向西北递减至-6℃以下,气温随高度和纬度的升高而降低。由于印度洋暖湿气流受多重高山阻留,年降水量也相应由 2000 mm 递减至 50 mm 以下^[25]。图 1 为研究区内各观测区域位置示意图,其中,那曲位于青藏高原中部,地势相对平坦,平均海拔 4650 m,属于高原亚寒带季风气候区,年降水量约 500 mm,5—10 月为季风季节,6—8 月全区有大面积降水,占全年降水总量的四分之三,地表覆盖以高寒草地为主^[19,26];玛曲位于青藏高原的东北边缘,海拔在 3430—3750 m 之间,气候湿润寒冷,冬季干燥,夏季多雨,地表覆盖为湿地和草地^[26-27];阿里和狮泉河位于青藏高原西北部,气候干燥,降水稀少,地表多为裸地和稀疏草地^[26]。

1.2 地面观测数据

所用的地面观测数据包括:(1)青藏高原土壤温湿度观测网数据集(Tibet-Obs),由 3 个区域的实测网络组成,包括寒冷半干旱的那曲网络、寒冷潮湿的玛曲网络和寒冷干旱的阿里和狮泉河网络。每个观测站点由美国 Decagon 公司的 EC-TM 电容式探头,每隔 15 min 观测一次距地面 5、10、30、50、80cm 处的土壤水分和土壤温度,数据下载地址为青藏高原科学数据中心(<http://www.tped-atabase.cn/portal/MetaDataInfo.jsp?MetaDataId=249456>)^[26-28]。(2)青藏高原中部多尺度土壤温湿度观测网数据集(CTP-SMTMN),56 个土壤水分和温度观测站均分布在那曲。每个观测站点由一个数据采集器和四个传感器组成,传感器的型号为美国 Decagon 公司的 5TM 或 EC-TM 电容式探头,数据精度为±3%,校正后可达±(1%—2%)^[28],分别埋设在地表以下 0—5、10、20、40 cm 的土层中,每隔 30 min 测量一次土壤水分和土壤温度^[29]。数据下载地址为国际土壤湿度网络(https://ismn.geo.tuwien.ac.at/en/sites/Networks/CTP_SMTMN/)。(3)中国气象数据网提供的各实测网内气象站的月降水量数据,数据下载地址为(<http://data.cma.cn/site/index.html>)。

1.3 土壤水分产品

1.3.1 SMAP 土壤水分产品

“土壤水分主动-被动探测”卫星(SMAP)是美国航空航天局(NASA)专用于全球土壤水分和冻融监测的项目^[16]。卫星于 2015 年 1 月 31 日于戈达德航天飞行中心发射升空,空间分辨率为 40 km,卫星重访周期为 2—3 d,升轨为地方时下午 6:00,降轨为地方时上午 6:00。土壤水分传感器探测深度为 0—5 cm,目标观测精度为 0.04 m³/m³^[30-31]。本文使用了 SMAP L3 增强型被动微波土壤水分产品,空间分辨率为 9 km,数据可在美国冰雪数据中心分布式档案中心(NSIDC DAAC)免费获得(<https://nsidc.org/data/smap/smap-data.html>)。

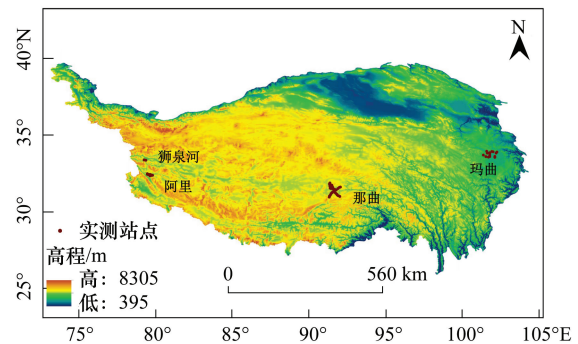


图 1 青藏高原土壤水分观测网站点位置示意图

Fig.1 Location of in situ observation networks in the Qinghai-Tibet Plateau

1.3.2 AMSR2 土壤水分产品

搭载着第二代先进微波辐射成像仪 (AMSR2) 的“全球水圈变化观测卫星 (GCOM-W1)”于 2012 年 5 月 18 日由日本宇航局 (JAXA) 发射进入太空,并于 2012 年 7 月 3 日开始提供观测数据^[32]。升轨为地方时 13:30,降轨为地方时 1:30,官方目标精度 RMSE 小于 $0.06 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ^[33-34]。目前 AMSR2 的两种土壤水分产品已向公众发布:即 JAXA 和 LPRM 土壤水分产品。本文使用的是美国冰雪中心 (NSIDC) 提供的 JAXA 产品数据,空间分辨率为 25 km。数据下载地址为 (<https://nsidc.org/data/NSIDC-0451/versions/2>)。

1.3.3 FY-3B 土壤水分产品

FY-3B 是我国于 2010 年 11 月发射的第二代极地轨道气象卫星,其搭载的微波成像仪 (MWRI) 设置了 10.65, 18.7, 23.8, 36.5, 89.0GHz 5 个频率,每个频率都有水平和垂直 2 种极化模式,空间分辨率为 25 km,升轨为地方时 13:40 降轨为地方时 1:40^[16,35]。本文使用每日 FY-3B 的 3 级产品,空间分辨率为 25 km。数据可通过风云卫星遥感数据服务网 (<http://satellite.nsmc.org.cn/portalsite/default.aspx>) 下载得到。

2 研究方法

2.1 数据预处理

SMAP 和 FY-3B 的原始数据格式为 HDF, AMSR2 数据为 TIFF 格式。首先在 ENVI 中提取土壤水分数据影像,将 HDF 转换为 TIFF 格式,并定义其原始投影格式。对定义投影后的土壤水分升、降轨数据进行影像的拼接,裁剪等预处理。为了确保实测数据和卫星数据之间的时间一致性,对应提取每天卫星过境时间前后各 1h 内的地面观测数据的平均值来分别对比分析升、降轨土壤水分产品。由于微波遥感数据只能反映表层的土壤水分,因此,在验证时选用土壤表层 0—5 cm 的实测土壤水分数据。在对比分析时采用多个实测点的平均值,以降低尺度效应带来的误差。

2.2 评价指标

为更加全面地评估遥感土壤水分产品的可靠性和准确性,本文进行了时间序列分析和一致性分析,选用的评价指标包括相关系数 (R)、均方根误差 (RMSE)、偏差 (Bias) 和无偏均方根误差 (ubRMSE)。其计算公式如下^[36]:

$$R = \frac{\sum_{n=1}^N (SM_n^{\text{sat}} - \overline{SM}^{\text{sat}}) (SM_n^{\text{obs}} - \overline{SM}^{\text{obs}})}{\sqrt{\sum_{n=1}^N (SM_n^{\text{sat}} - \overline{SM}^{\text{sat}})^2} \sqrt{\sum_{n=1}^N (SM_n^{\text{obs}} - \overline{SM}^{\text{obs}})^2}} \quad (1)$$

其中, SM_n^{sat} 为卫星土壤水分值 (m^3/m^3), SM_n^{obs} 为地面观测土壤水分值 (m^3/m^3), N 是参与比较的总样本数,在验证工作中仅使用两个数据集中均具有有效数据的日期进行计算。相关系数 R 值越接近于 +1 代表两个序列的变化趋势越相近。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (SM_n^{\text{obs}} - SM_n^{\text{sat}})^2} \quad (2)$$

RMSE 为土壤水分产品序列与实测值序列的平均误差,表示相对于地面实测结果而言,土壤水分产品反演的准确性,其值越小说明卫星土壤水分值越接近于实测值。

$$\text{Bias} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (SM_n^{\text{obs}} - SM_n^{\text{sat}}) \quad (3)$$

Bias 反映的是土壤水分产品与实测值之间的差异,正偏差表示卫星低估了土壤水分值,负偏差则表示卫星高估了土壤水分值。

在卫星反演过程会出现一些偏差,并对 RMSE 产生影响。因此,可用 ubRMSE 消除 RMSE 的偏差,ubRMSE 计算公式如下:

$$ubRMSE = \sqrt{RMSE^2 - Bias^2} \tag{4}$$

综合来说,较大的 R 值,较小的 Bias 绝对值和 RMSE 值的组合,说明卫星土壤水分值与实测值拟合较好^[24]。

3 结果与分析

3.1 卫星遥感土壤水分产品时间序列分析

使用土壤水分产品数据与实测数据的时间序列图,并参照降水数据,分析土壤水分产品的季节性变化特征和变化幅度。从图 2 那曲观测网可以看出,实测土壤水分从 2015 年 9 月之后开始下降,在 2015 年 11 月—2016 年 3 月处于较低值,3 月之后土壤水分开始上升,5 月—9 月降水成为影响土壤水分变化的主要因素,受降水影响,土壤水分变化曲线出现剧烈波动。从图 2 可以看出,SMAP 的变化趋势与实测土壤水分最为相似,在夏季降水量较大时,能够响应降水的变化,表现出季节变化特征;其升轨数据最大值为 $0.44 \text{ m}^3/\text{m}^3$,最小值为 $0.02 \text{ m}^3/\text{m}^3$,降轨数据最大值为 $0.55 \text{ m}^3/\text{m}^3$,最小值为 $0.09 \text{ m}^3/\text{m}^3$,总体降轨表现好于升轨。AMSR2 升、降轨土壤水分数值较小,其升轨数据最大值为 $0.30 \text{ m}^3/\text{m}^3$,最小值为 $0.05 \text{ m}^3/\text{m}^3$,降轨数据最大值为 $0.32 \text{ m}^3/\text{m}^3$,最小值为 $0.03 \text{ m}^3/\text{m}^3$,降轨数据变化趋势与实测值更接近。AMSR2 产品在秋季和春季较接近实测值;在土壤水分较低、降水较少的冬季数值偏高;在夏季降雨较多时 AMSR2 数值有所增加,但依然低于实测值。FY-3B 的升轨数据最大值为 $0.48 \text{ m}^3/\text{m}^3$,最小值为 $0.06 \text{ m}^3/\text{m}^3$,基本可以描述土壤水分的变化特征,在冬季和春季与实测值较为接近。

玛曲为湿润寒冷区,降水较多,且主要集中在 2016 年 5 月—9 月,土壤水分值相比其他地区较高。从图 3 可以看出,升轨实测土壤水分范围为 $0.1\text{--}0.39 \text{ m}^3/\text{m}^3$,降轨实测土壤水分范围为 $0.09\text{--}0.41 \text{ m}^3/\text{m}^3$,土壤水分

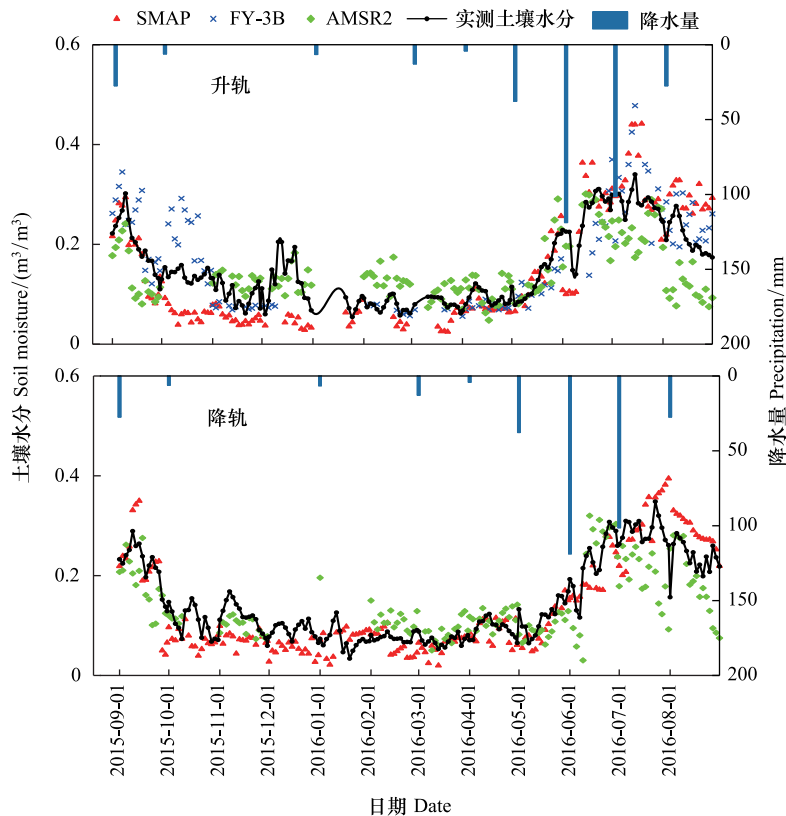


图 2 那曲观测网土壤水分产品时间序列图

Fig.2 Time series plots of soil moisture products in Naqu observation network

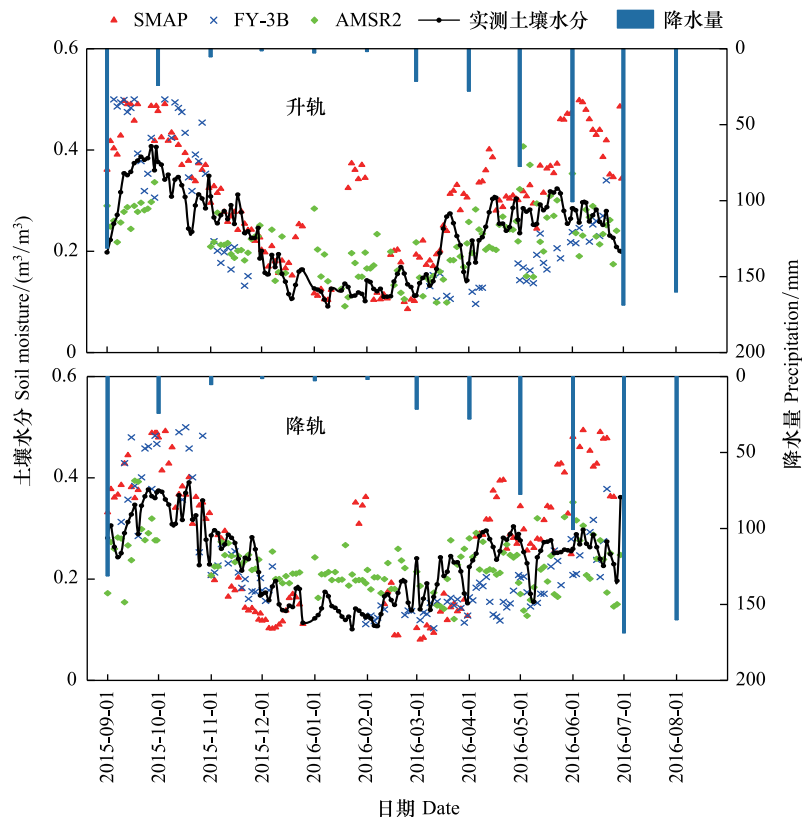


图3 玛曲观测网土壤水分产品时间序列图

Fig.3 Time series plots of soil moisture products in Maqu observation network

产品数值均在 $0.08 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 以上。SMAP 产品的升、降轨数据均能很好地反映土壤水分变化,在秋季的估计值与实测值极为接近,从3月开始随着降水量的增多,SMAP 值也随之增大,但变化过于剧烈且明显高于实测土壤水分;FY-3B 产品升、降轨数据表现出反季节特征,在秋季数值偏高,而在夏季降水较多时低于实测值,并且升轨数据低估现象更明显。AMSR2 产品数据与在那曲地区的变化趋势相似,在冬季明显高于实测值,夏季和秋季低于实测值。

阿里和狮泉河地区气候干燥,降水较少,从图4可以看出在阿里地区土壤水分产品数据在冬季和春季缺失较多。SMAP 升、降轨数据与实测土壤水分的变化曲线基本一致。FY-3B 升轨数据在夏季低估,秋季与实测值接近。AMSR2 产品数据主要集中在夏季,并且有明显的高估倾向,无法反映出全年土壤水分的变化情况。在狮泉河地区(图5)SMAP 和 FY-3B 升轨产品估计值与实测值较为相似,SMAP 降轨数据在夏季高于实测值。AMSR2 产品虽然数据缺失较多但在夏季表现较好。

3.2 卫星土壤水分产品与地面观测数据的一致性分析

分别计算出卫星土壤水分产品与实测土壤水分数据的相关系数(R)、均方根误差(RMSE),偏差(Bias)和无偏均方根误差(ub-RMSE),结果如表1所示。

结合图2和表1可以看出,土壤水分产品在那曲地区的反演精度明显高于其他地区。SMAP 的升、降轨数据都与实测值具有较高的相关性, R 分别为 0.845 和 0.849, Bias 分别 $0.01 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 和 $0.011 \text{ m}^3/\text{m}^3$,与实测值间的差异较小。但 RMSE 和 ubRMSE 均大于 $0.04 \text{ m}^3/\text{m}^3$,未达到官方精度(ubRMSE $<0.04 \text{ m}^3/\text{m}^3$);AMSR2 升轨数据 R 为 0.536, RMSE 和 ubRMSE 值均大于 $0.1 \text{ m}^3/\text{m}^3$,与实测值的相关性较低;降轨数据的 R 为 0.794, RMSE 比升轨数据低 $0.05 \text{ m}^3/\text{m}^3$,降轨数据具有更高的精度,与实测土壤水分的相关性较好。

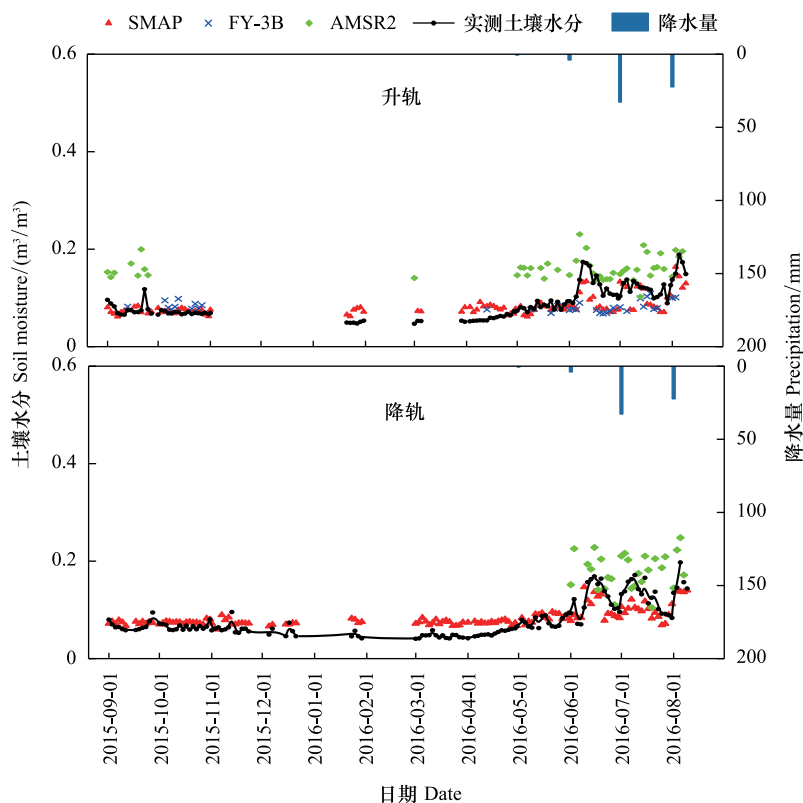


图 4 阿里观测网土壤水分产品时间序列图

Fig.4 Time series plots of soil moisture products in Ngari observation network

表 1 各个实测网土壤水分与土壤水分产品的相关性分析

Table 1 Statistics of soil moisture network measurements and products estimated soil moisture

观测网 Networks	下垫面类型 Surface types	土壤水 分产品 Soil moisture products	升轨 Ascending				降轨 Descending			
			相关系数 Correlation coefficient	均方根 误差 RMSE	偏差 Bias	无偏均 方根误差 ubRMSE	相关系数 Correlation coefficient	均方根 误差 RMSE	偏差 Bias	无偏均 方根误差 ubRMSE
那曲	草地	SMAP	0.845	0.058	0.010	0.057	0.849	0.053	0.011	0.052
		TFY-3B	0.751	0.065	-0.018	0.062	—	—	—	—
		AMSR2	0.536	0.107	0.013	0.106	0.794	0.058	0.012	0.057
玛曲	湿地,草地	SMAP	0.625	0.109	-0.027	0.105	0.712	0.110	-0.067	0.087
		FY-3B	0.732	0.074	0.013	0.073	0.661	0.098	-0.021	0.096
		AMSR2	0.518	0.067	-0.007	0.067	0.509	0.079	0.012	0.078
阿里	稀疏草地	SMAP	0.727	0.024	0.007	0.023	0.755	0.024	-0.007	0.023
		FY-3B	0.183	0.025	0.009	0.024	—	—	—	—
		AMSR2	0.284	0.058	-0.044	0.037	0.386	0.051	-0.033	0.040
狮泉河	荒漠	SMAP	0.319	0.037	-0.009	0.036	0.253	0.045	-0.011	0.044
		FY-3B	0.145	0.024	-0.008	0.022	—	—	—	—
		AMSR2	0.430	0.032	-0.018	0.027	0.431	0.038	-0.012	0.036

RMSE: 均方根误差 Root mean squared error

从散点图(图 6)可以看出,SMAP 和 AMSR2 的升、降轨数据大多数位于参考线下方,且 AMSR2 的降轨数据点位更加分散,SMAP 数据主要集中在 0.05—0.2 m³/m³之间,说明相对于实测值 SMAP 和 AMSR2 有明显的低估倾向;FY-3B 升轨数据的点位较为分散,且广泛位于参考线左侧,明显高估了土壤水分。

玛曲地区,SMAP 产品的升、降轨数据的相关系数较高,R 分别为 0.625 和 0.712,但 RMSE 均大于

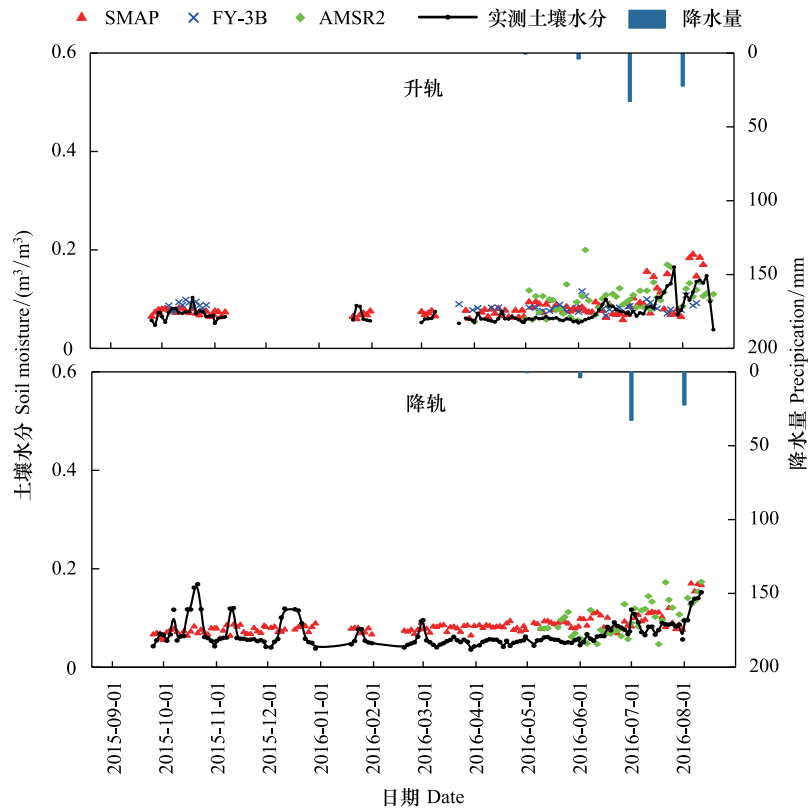


图5 狮泉河观测网土壤水分产品时间序列图

Fig.5 Time series plots of soil moisture products in Shiquanhe observation network

$0.1 \text{ m}^3/\text{m}^3$, ubRMSE 大于 $0.07 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。FY-3B 与 SMAP 相似, R 分别为升轨 0.074, 降轨 0.098, 虽然相关系数较高, 但表现出的 RMSE 和 Bias 值同样较高, 整体与实测值差异较大。AMSR2 产品与实测值相关性较低, 升、降轨数据 R 分别为升轨 0.518, 降轨 0.509, RMSE 和 ubRMSE 值均大于 $0.065 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。

从散点图(图7)也可以看出 SMAP 数据的点位广布在参考线左侧, 且点位动态变化范围较大, 高估了土壤水分, 降轨数据相对实测土壤水分有更明显的高估倾向; AMSR2 数据点位均匀分布在参线两侧, 自身变化范围较小; FY-3B 升轨数据的点位大多集中在参考线下方, 略微低估了土壤水分。

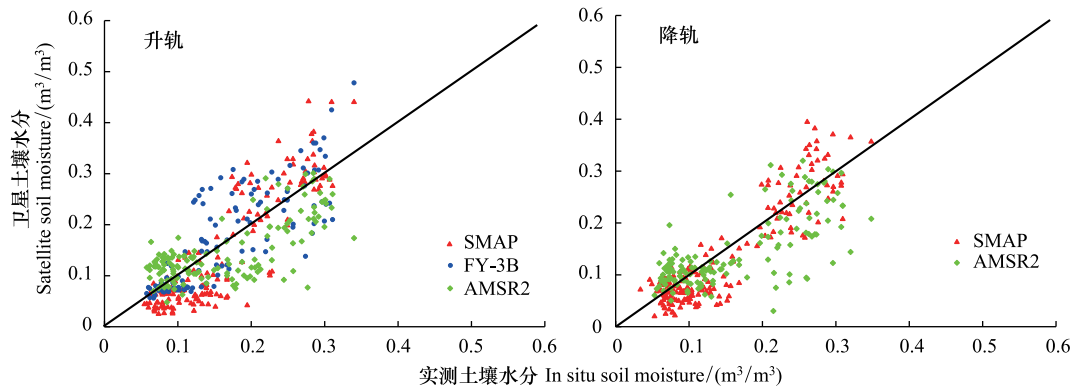


图6 那曲土壤水分产品散点图

Fig.6 Scatter plots of soil moisture products in Naqu observation network

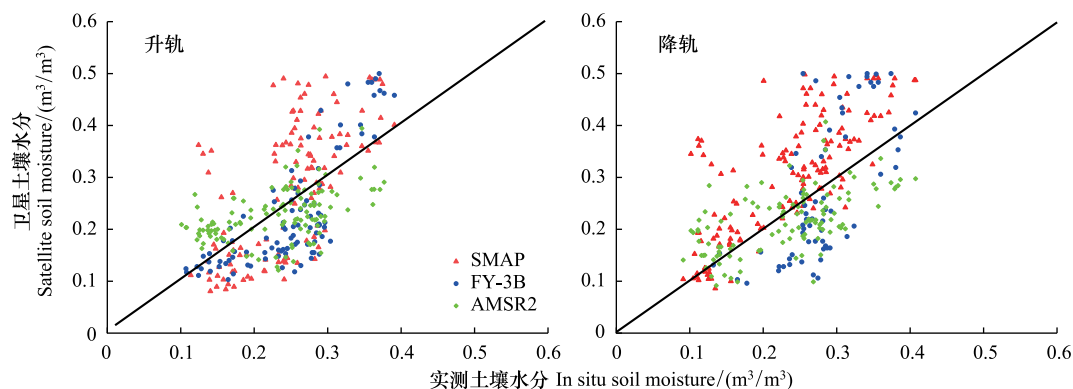


图7 玛曲土壤水分产品散点图

Fig.7 Scatter plots of soil moisture products in Maqu observation network

阿里地区, SMAP 产品更接近实测土壤水分, 其升、降轨产品 R 分别为 0.727 和 0.755, RMSE 均为 $0.024 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 具有较小的误差。AMSR2 产品升、降轨数据 R 分别为 0.284 和 0.386, 与实测值均呈负偏差 ($\text{Bias} < 0$)。从散点图 (图 8) 可以看出 SMAP 与 FY-3B 的升轨数据均在参考线下方, 几乎与 X 轴平行, 均低估了土壤水分; AMSR2 数据基本都位于参考线上方, 高估了土壤水分, 且降水数据高估更为明显。

狮泉河地区, AMSR2 产品的相关系数最高, 升轨 R 为 0.43, 降轨为 0.431; FY-3B 升轨数据与实测值相关性较小, R 为 0.183。从表 1 和图 9 可以看出, 土壤水分产品估计值与实测值均呈负偏差, 散点图中各土壤水分产品数据基本都在参考上方, 均高估了土壤水分。

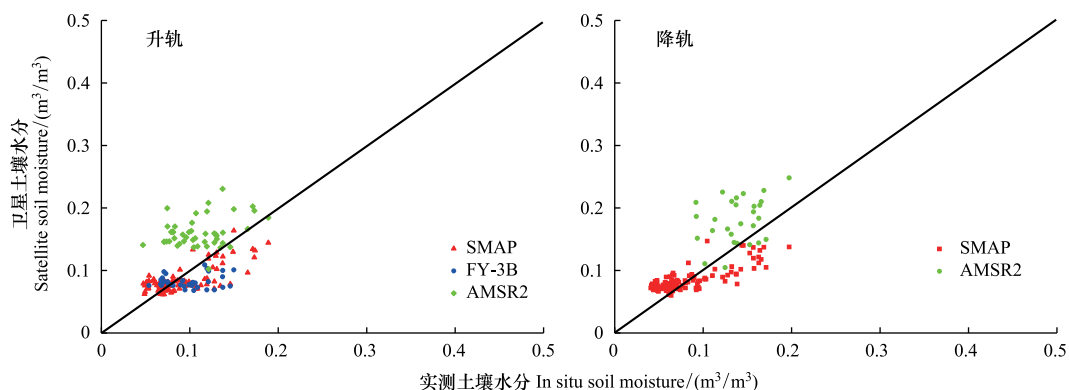


图8 阿里土壤水分产品散点图

Fig.8 Scatter plots of soil moisture products in Ngari observation network

3.3 卫星土壤水分产品的适用性分析

为了进一步分析土壤水分产品在青藏高原地区的适用性, 以土壤水分产品的升轨数据为例, 对不同范围内的卫星土壤水分产品值与地面实测值进行精度验证, 分析土壤水分产品在青藏高原地区适用的土壤水分范围, 结果如表 2 所示。其中, SMAP 产品的土壤水分数值范围为 $0.02\text{—}0.5 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 在青藏高原地区, 当土壤水分产品数值在 $0.02\text{—}0.18 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 之间时, 与地面实测数据相关性较好, R 为 0.641, Bias 为 $0.017 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 略低估土壤水分。SMAP 产品在 $0.34\text{—}0.5 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 之间时, 与实测值相关性较差, R 为 0.238, RMSE 大于 $0.1 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 并有较大的负偏差, 明显高估了土壤水分。

FY-3B 产品的土壤水分数据范围是 $0\text{—}1 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 在青藏高原各研究区的范围为 $0.07\text{—}0.5 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 当 FY-3B 产品数值在 $(0.07\text{—}0.21) \text{ m}^3/\text{m}^3$ 时, 在青藏高原的反演精度较高, 其 R 为 0.771, Bias 为 $0.001 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。FY-

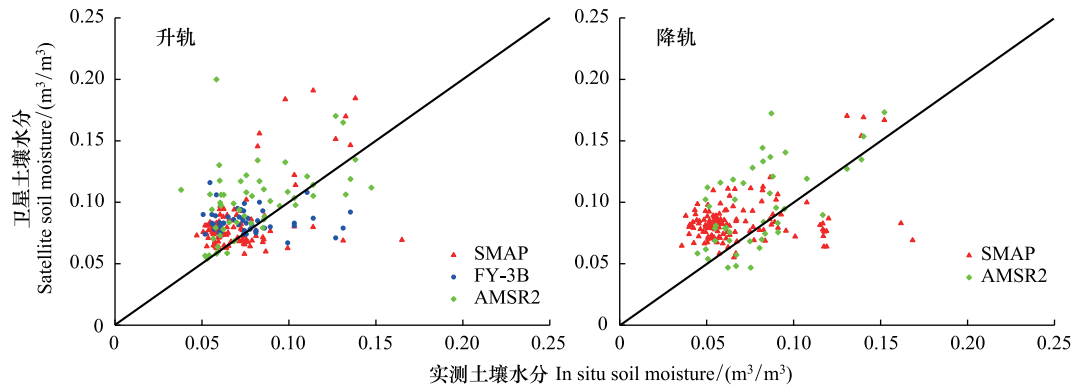


图9 狮泉河土壤水分产品散点图

Fig.9 Scatter plots of soil moisture products in Shiquanhe observation network

3B 产品数值在 $0.35\text{—}0.5\text{ m}^3/\text{m}^3$ 时, R 为 0.638, 但与实测值呈较大的负偏差, Bias 为 $-0.065\text{ m}^3/\text{m}^3$, 明显高估土壤水分。

表2 土壤水分产品适用范围分析表

Table 2 Analysis of the applicable range of soil moisture products

土壤水分产品 Soil moisture products	数值范围 Range of value/ (m^3/m^3)	相关系数 Correlation coefficient	均方根误差 RMSE	偏差 Bias
SMAP	0.02—0.18	0.641	0.046	0.017
	0.18—0.34	0.491	0.054	-0.019
	0.34—0.50	0.238	0.131	-0.109
FY-3B	0.07—0.21	0.771	0.036	0.001
	0.21—0.35	0.108	0.075	-0.047
	0.35—0.50	0.638	0.078	-0.065
AMSR2	0.05—0.16	0.280	0.002	-0.001
	0.16—0.28	0.547	0.063	0.002
	0.28—0.40	0.550	0.055	-0.027

AMSR2 产品的土壤水分数据范围是 $0\text{—}1\text{ m}^3/\text{m}^3$, 在青藏高原各研究区的范围为 $0.05\text{—}0.4\text{ m}^3/\text{m}^3$, 在三种产品中数值偏低。当 AMSR2 产品数值在 $0.16\text{—}0.28\text{ m}^3/\text{m}^3$ 时, 与实测数据的 R 为 0.547, 虽然 Bias 值较小, 但 RMSE 为 $0.063\text{ m}^3/\text{m}^3$ 。其次是 AMSR2 产品数值在 $0.05\text{—}0.16\text{ m}^3/\text{m}^3$ 之间时, 虽然 R 值较小, 但 RMSE 和 Bias 值均不超过 $0.002\text{ m}^3/\text{m}^3$, AMSR2 产品数值为 $0.28\text{—}0.4\text{ m}^3/\text{m}^3$ 时, 精度较差, RMSE 为 $0.055\text{ m}^3/\text{m}^3$, 并与实测值呈负偏差。

经对比分析, SMAP 产品在青藏高原的数值范围为 $0.02\text{—}0.18\text{ m}^3/\text{m}^3$ 时, 与实测数据相关性最好; FY-3B 产品的数值范围为 $0.07\text{—}0.21\text{ m}^3/\text{m}^3$ 时, 在青藏高原的反演精度较高; AMSR2 产品在青藏高原地区的总体精度不高, 当 AMSR2 产品的数值范围为 $0.16\text{—}0.28\text{ m}^3/\text{m}^3$ 时, 与实测数据的相关性略好于其他范围。

4 讨论

从研究结果来看, 土壤水分产品数据在不同区域与实测土壤水分的相关性表现不一致, 土壤水分产品的反演精度可能受到地表覆盖类型、降水和季节的影响。

(1) 同一土壤水分产品在不同地区的精度差异较大, 植被覆盖是影响土壤水分反演的重要因素^[37]。L 波段 (SMAP) 和 X 波段 (FY-3B、AMSR2) 土壤水分产品的反演精度在植被区会受到限制, 并且对 X 波段作用更明显。从研究结果来看, 土壤水分产品在那曲地区与实测值具有较高的相关性, SMAP 升、降轨, FY-3B 升轨

和 AMSR2 降轨数据的 R 均在 0.74 以上, $RMSE$ 均小于 $0.05 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。由于那曲地区地势平坦, 地表覆盖以草地为主, 生物量较低。因此, 土壤水分产品在那曲地区受植被影响较小, 反演效果较好。表 3 列出了与本文研究区相同或气候和地表类型类似地区的研究结果。本文与 Liu 等^[38] 在那曲的研究结果相似, 与实测值的 R 均大于 0.7。在玛曲地区土壤水分产品的 R 略有下降, 玛曲有青藏高原地区面积最大的湿地草原, 气候湿润, 土壤水分含量相对较高, 而 FY-3B 和 AMSR2 产品的土壤水分值远小于实测土壤水分的变化范围, 使得土壤水分产品的 $RMSE$ 偏高。阿里和狮泉河地区地表覆盖多为裸地和荒漠, 植被相对稀疏, 因此植被对土壤水分反演精度的影响较少。其中, SMAP 产品升、降轨数据在阿里地区 R 均在 0.72 以上, $RMSE$ 和 $ubRMSE$ 小于 $0.04 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 达到 SMAP 的目标精度。在狮泉河地区 AMSR2 产品与实测值相关性最高, 其降轨 R 为 0.431。SMAP 与 AMSR2 产品与 Chen 等^[19]、Zhang 等^[39] 和 Lu 等^[40] 在帕里和黑河上游的研究结果类似, 在帕里 SMAP 产品接近目标精度, 而 AMSR2 产品在各研究区均有较大的误差, $RMSE$ 均大于 $0.1 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。

表 3 不同区域土壤水分产品性能对比分析

Table 3 The comparison of soil moisture products in different area

土壤水分产品 Soil moisture products	观测网 Networks	下垫面类型 Surface type	相关系数 Surface type	均方根误差 RMSE	偏差 Bias	参考文献 References
SMAP	那曲	草地	0.816	0.066	-0.019	
FY-3B			0.750	0.116	0.072	[38]
AMSR2-JAXA			0.718	0.168	-0.087	
SMAP	帕里	稀疏草地、裸地	0.670	0.040	-0.013	[19]
AMSR2-JAXA			0.456	0.103	-0.100	
SMAP	黑河上游	高寒草甸、稀疏	0.607	0.063	-0.027	[39]
AMSR2-JAXA		植被、荒地	0.620	0.153	-0.190	[40]
AMSR2-LPRM			0.440	0.221	0.120	
SMAP	八宝河上游	草地	0.441	0.134	-0.107	[39]

(2) 从前文的时间序列图中可以看出, 卫星土壤水分产品能够响应降水的变化, 并且在降水较多的季节出现了土壤水分产品值高于实测值的情况, 其中 SMAP 数据的变化最为剧烈。降水与土壤水分之间有着密切的联系, 降水的强度、时长都会对土壤水分变化产生影响。而且, 微波遥感只能反映土壤表层几厘米的土壤水分, 土壤水分的变化会影响传感器的穿透深度, 王定文等^[41] 研究表明: L 波段微波的穿透深度随土壤水分的增加而减小。当降水发生时, 土壤表层会形成一层薄的饱和含水量的土壤层, 使得卫星上的传感器的探测深度比埋设在地表以下 (0—5 cm) 电容探头的深度更浅, 与实测值相比反映的是更表层的土壤水分, 因此 SMAP 对降水反应更为敏感, 少量降水就能够引起数值的变化。

(3) 从季节来看, SMAP 产品受季节影响较小, 能够反映土壤水分随季节的变化情况。FY-3B 产品在夏季和秋季反演效果较好, 在冬季数据缺失较多。在那曲地区 FY-3B 升轨数据与实测值相关性较好, 在玛曲地区秋季高估, 夏季低估了土壤水分。在阿里和狮泉河地区, 升轨数据在秋季与实测值变化较一致。AMSR2 产品的变化范围较小, 不能较好的反映土壤水分的动态变化, 这与陆峥等^[33] 对 AMSR2 的 JAXA 产品验证结果相似。并且在那曲和玛曲的冬季和春季普遍高估, 夏季低估了土壤水分; 在狮泉河地区夏季反演结果较好。这是由于冬季青藏高原地区地表干燥, 土壤水分处于冻结期, 部分地区被冰雪覆盖, 尤其在阿里和狮泉河冬季无法反演土壤水分。春季受冰雪融化影响, 土壤水分逐渐上升。夏季受降水影响, 土壤水分大范围上升, 土壤水分产品反演效果较好。秋季土壤水分随着降雨量逐渐减少, 土壤水分产品在秋季反演结果较为稳定。但阿里和狮泉河地区常年较干旱, 在夏季土壤水分依然较少, 土壤水分产品普遍出现高估现象。

5 结论

本研究利用 2015 年 9 月—2016 年 8 月青藏高原观测网的实测土壤水分数据集, 分析评价了 SMAP、

AMSR2、FY-3B 土壤水分产品在青藏高原的准确性和适用性,结果表明:

(1) 土壤水分产品的反演效果有明显的季节差异,在夏季和秋季效果好于冬季和春季。SMAP 产品各个观测网都能够反映土壤水分的季节变化趋势;FY-3B 产品在玛曲观测网秋季高估、春季和夏季低估土壤水分;AMSR2 产品在那曲和玛曲观测网的冬季高估、夏季和秋季低估土壤水分,在阿里和狮泉河观测网的夏季高估土壤水分。

(2) 土壤水分产品的反演精度受到降水的影响,三种土壤水分产品与降水量的变化趋势基本一致,均能对较持续的降水做出响应。其中,SMAP 产品对降水更为敏感,变化幅度较大,在降水较多的季节明显高估了土壤水分。

(3) 在植被密度高的区域,SMAP 的表现优于其他两种产品;在地形平坦、植被覆盖较低的区域土壤水分产品反演精度较高。总体而言,SMAP 产品与实测土壤水分相关性最好,反演精度较高,并且降轨数据表现好于升轨;其次是 FY-3B 产品,在植被覆盖较低的区域表现较好,并且升轨表现好于降轨;AMSR2 产品总体精度不高,并且升、降数据趋势相似。

参考文献 (References):

- [1] 全兆远,张万昌. 土壤水分遥感监测的研究进展. 水土保持通报, 2007, 27(4): 107-113.
- [2] 韩念龙,陈圣波,汪自军,包书新,宋金红. 被动微波反演裸露区土壤水分综述. 吉林大学学报:地球科学版, 2007, 37(S1): 155-159.
- [3] 杨涛,宫辉力,李小娟,赵文吉,孟丹. 土壤水分遥感监测研究进展. 生态学报, 2010, 30(22): 6264-6277.
- [4] 高峰,王介民,孙成权,文军. 微波遥感土壤湿度研究进展. 遥感技术与应用, 2001, 16(2): 97-102.
- [5] 杨娜,崔慧珍,向峰. SMOS L2 土壤水分数据产品在我国农区的验证. 河南理工大学学报:自然科学版, 2015, 34(2): 287-291.
- [6] 白瑜,孟治国,赵凯,郑兴明,姜涛. 像元尺度土壤水分监测网络及其对 L 波段土壤水分产品的初步验证结果. 遥感技术与应用, 2018, 33(1): 78-87.
- [7] 钟若飞,郭华东,王为民. 被动微波遥感反演土壤水分进展研究. 遥感技术与应用, 2005, 20(1): 49-57.
- [8] 赵天杰,张立新,蒋玲梅,陈权,张志玉,张勇攀. 利用主被动微波数据联合反演土壤水分. 地球科学进展, 2009, 24(7): 769-775.
- [9] 潘宁,王帅,刘焱序,赵文武,傅伯杰. 土壤水分遥感反演研究进展. 生态学报, 2019, 39(13): 4615-4626.
- [10] 郭英,沈彦俊,赵超. 主被动微波遥感在农区土壤水分监测中的应用初探. 中国生态农业学报, 2011, 19(5): 1162-1167.
- [11] Wigneron J P, Kerr Y, Waldteufel P, Saleh K, Escorihuela M J, Richaume P, Ferrazzoli P, De Rosnay P, Gurney R, Calvet J C, Grant J P, Guglielmetti M, Hornbuckle B, Mätzler C, Pellarin T, Schwank M. L-band microwave emission of the biosphere (L-MEB) model: description and calibration against experimental data sets over crop fields. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 107(4): 639-655.
- [12] Zeng J Y, Chen K S, Bi H Y, Chen Q. A preliminary evaluation of the SMAP radiometer soil moisture product over United States and Europe using ground-based measurements. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(8): 4929-4940.
- [13] Fujii H, Koike T, Imaoka K. Improvement of the AMSR-E algorithm for soil moisture estimation by introducing a fractional vegetation coverage dataset derived from MODIS data. *Journal of the Remote Sensing Society of Japan*, 2009, 29(1): 282-292.
- [14] Owe M, De Jeu R, Holmes T. Multisensor historical climatology of satellite-derived global land surface moisture. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2008, 113(F1): F01002.
- [15] Shi J C, Jiang L M, Zhang L X, Chen K S, Wigneron J P, Chanzy A. A parameterized multifrequency-polarization surface emission model. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(12): 2831-2841.
- [16] Jackson T J, Cosh M H, Bindlish R, Starks P J, Bosch D D, Seyfried M, Goodrich D C, Moran M S, Du J Y. Validation of advanced microwave scanning radiometer soil moisture products. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48: 4256-4272.
- [17] Al-Yaari A, Wigneron J P, Ducharme A, Kerr Y, De Rosnay P, De Jeu R, Govind A, Al Bitar A, Albergel C, Muñoz-Sabater J, Richaume P, Mialon A. Global-scale evaluation of two satellite-based passive microwave soil moisture datasets (SMOS and AMSR-E) with respect to Land Data Assimilation System estimates. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 149: 181-195.
- [18] 李瑞娟,李兆富,郝睿,张舒昱,潘剑君. 亚洲区域 AMSR2 与 SMOS 土壤水分产品对比研究. 遥感技术与应用, 2019, 34(1): 125-135.
- [19] Chen Y Y, Yang K, Qin J, Cui Q, Lu H, La Z, Han M L, Tang W J. Evaluation of SMAP, SMOS, and AMSR2 soil moisture retrievals against observations from two networks on the Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, 122(11): 5780-5792.
- [20] Cui C Y, Xu J, Zeng J Y, Chen K S, Bai X J, Lu H, Chen Q, Zhao T J. Soil moisture mapping from satellites: An intercomparison of SMAP, SMOS, FY3B, AMSR2, and ESA CCI over two dense network regions at different spatial scales. *Remote Sensing*, 2018, 10(1): 33.

- [21] 赵天杰. 被动微波反演土壤水分的 L 波段新发展及未来展望. 地理科学进展, 2018, 37(2): 198-213.
- [22] 王增艳, 王建, 车涛. 机载 L 波段微波辐射计数据反演表层土壤水分研究. 遥感技术与应用, 2017, 32(2): 185-194.
- [23] 范科科, 张强, 史培军, 孙鹏, 余慧倩. 基于卫星遥感和再分析数据的青藏高原土壤湿度数据评估. 地理学报, 2018, 73(9): 1778-1791.
- [24] 刘强, 杜今阳, 施建成, 蒋玲梅. 青藏高原表层土壤湿度遥感反演及其空间分布和多年变化趋势分析. 中国科学: 地球科学, 2013, 43(10): 1677-1690.
- [25] 范科科, 张强, 孙鹏, 宋长青, 朱秀迪, 余慧倩, 申泽西. 青藏高原地表土壤水变化、影响因子及未来预估. 地理学报, 2019, 74(3): 520-533.
- [26] Su Z B, Wen J, Dente L, Van Der Velde R, Wang L, Ma Y, Yang K, Hu Z. The Tibetan Plateau observatory of plateau scale soil moisture and soil temperature (Tibet-Obs) for quantifying uncertainties in coarse resolution satellite and model products. Hydrology and Earth System Sciences, 2011, 15(7): 2303-2316.
- [27] Su Z, De Rosnay P, Wen J, Wang L, Zeng Y. Evaluation of ECMWF's soil moisture analyses using observations on the Tibetan Plateau. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, 118(11): 5304-5318.
- [28] Dente L, Vekerdy Z, Wen J, Su Z. Maqu network for validation of satellite-derived soil moisture products. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2012, 17: 55-65.
- [29] 李尚楠. 基于 SMAP 主被动微波数据的土壤水分协同反演研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- [30] Entekhabi D, Njoku E G, O'Neill P E, Kellogg K H, Crow W T, Edelstein W N, Entin J K, Goodman S D, Jackson T J, Johnson J, Kimball J, Piepmeier J R, Koster R D, Martin N, McDonald K C, Mghaddam M, Moran S, Reichle R, Shi J C, Spencer M W, Thurman S W, Tsang L, Van Zyl J. The soil moisture active passive (SMAP) mission. Proceedings of the IEEE, 2010, 98(5): 704-716.
- [31] Das N N, Entekhabi D, Njoku E G. An algorithm for merging SMAP radiometer and radar data for high-resolution soil-moisture retrieval. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(5): 1504-1512.
- [32] Zeng J Y, Li Z, Chen Q, Bi H Y, Qiu J X, Zou P F. Evaluation of remotely sensed and reanalysis soil moisture products over the Tibetan Plateau using in-situ observations. Remote Sensing of Environment, 2015, 163: 91-110.
- [33] 陆峥, 柴琳娜, 张涛, 崔慧珍, 李婉静. AMSR2 土壤水分产品在黑河流域中上游的验证. 遥感技术与应用, 2017, 32(2): 324-337.
- [34] 叶勤玉, 柴琳娜, 蒋玲梅, 赵天杰. 利用 AMSR2 和 MODIS 数据的土壤冻融相变水量降尺度方法. 遥感学报, 2014, 18(6): 1147-1157.
- [35] 万红, 高硕, 郭鹏. 青藏高原地区 FY-3B 微波遥感土壤水分产品适用性研究. 干旱区资源与环境, 2018, 32(4): 132-137.
- [36] 吴小丹, 闻建光, 肖青, 李新, 刘强, 唐勇, 窦宝成, 彭菁菁, 游冬琴, 李小文. 关键陆表参数遥感产品真实性检验方法研究进展. 遥感学报, 2015, 19(1): 75-92.
- [37] 张钟军, 孙国清, 朱启疆. 植被层对被动微波遥感土壤水分反演影响的研究. 遥感学报, 2004, 8(3): 207-213.
- [38] Liu J, Chai L N, Lu Z, Liu S M, Qu Y Q, Geng D Y, Song Y Z, Guan Y B, Guo Z X, Wang J, Zhu Z L. Evaluation of SMAP, SMOS-IC, FY3B, JAXA, and LPRM Soil Moisture Products over the Qinghai-Tibet Plateau and Its Surrounding Areas. Remote Sensing, 2019, 11(7): 792.
- [39] Zhang L H, He C S, Zhang M M, Zhu Y. Evaluation of the SMOS and SMAP soil moisture products under different vegetation types against two sparse in situ networks over arid mountainous watersheds, northwest China. Science China Earth Sciences, 2019, 62(4): 703-718.
- [40] Lu Z, Chai L N, Liu S M, Cui H Z, Zhang Y H, Jiang L M, Jin R, Xu Z W. Estimating time series soil moisture by applying recurrent nonlinear autoregressive neural networks to passive microwave data over the Heihe River Basin, China. Remote Sensing, 2019, 9(6): 574.
- [41] 王定义, 黄春林, 顾娟. 干旱区地表 L 波段微波辐射特性分析: 穿透深度的影响. 遥感技术与应用, 2016, 31(3): 580-589.