

风云卫星微波遥感土壤水分产品适用性验证分析

杨纲, 郭鹏, 李西灿, 万红, 孟春红

(山东农业大学 信息科学与工程学院, 山东 泰安 271018)

摘要:土壤水分是水文过程、生物生态过程和生物地球化学过程的关键因子,大面积土壤水分的长期观测对于研究旱涝监测,水资源管理和作物产量预测等至关重要。基于美国俄克拉荷马州西南部地区 ARS(Agricultural Research Service)水文监测网络中 LWREW(Little Washita Experimental Watershed)和 FCREW(Ft.Cobb Reservoir Experimental Watershed)两个地区 35 个地面监测站的实测数据,对比分析了 2016 年 5 月 1 日至 2018 年 5 月 31 日的 FY-3B,FY-3C 和 AMSR-2 土壤水分产品在该区域的适用性。结果表明:FY-3B 和 FY-3C 土壤水分产品在 LWREW 和 FCREW 地区大部分时间都存在高估,FY-3B 土壤水分产品在 LWREW 和 FCREW 地区的平均偏差(Bias)均值分别为 $0.057\ 0\ \text{m}^3/\text{m}^3$, $0.048\ 4\ \text{m}^3/\text{m}^3$,FY-3C 土壤水分产品在 LWREW 和 FCREW 地区的平均偏差(Bias)均值分别为 $0.060\ 2\ \text{m}^3/\text{m}^3$, $0.053\ 2\ \text{m}^3/\text{m}^3$,且在降水较多的季节,高估现象更为明显。JAXA(Japan Aerospace Exploration Agency)的 AMSR-2 土壤水分产品在 LWREW,FCREW 地区存在低估,在两个地区平均偏差(Bias)均值分别为 $-0.100\ 5\ \text{m}^3/\text{m}^3$ 和 $-0.100\ 3\ \text{m}^3/\text{m}^3$ 。在 LWREW 地区 FY-3B 升轨土壤水分产品表现最好,与地面实测地表水分的相关系数($R=0.664\ 8$)较高,并且有着较低的均方根($\text{RMSE}=0.075\ 5\ \text{m}^3/\text{m}^3$)和平均偏差($\text{Bias}=0.061\ 6\ \text{m}^3/\text{m}^3$)。在 FCREW 地区 AMSR-2 升轨土壤水分产品表现最好,有着最高的相关系数($R=0.726\ 1$)和最低的无偏均方根($\text{ubRMSE}=0.035\ 7\ \text{m}^3/\text{m}^3$)。总体上,FY-3B,FY-3C,JAXA 土壤水分产品都能够反映出 LWREW,FCREW 地区土壤水分随季节和降水变化的趋势。

关键词:微波遥感;土壤水分;风云;AMSR-2;适用性

中图分类号:S152.7

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)01-0104-08

Assessment on Applicability of Soil Moisture Products of Fengyun Satellite Microwave Remote Sensing

YANG Gang, GUO Peng, LI Xican, WAN Hong, MENG Chunhong

(College of Information Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018, China)

Abstract: Soil moisture is a key variable in hydrological processes, bioecological processes, and biogeochemical processes. Long-term observations of soil moisture over large areas are critical to research on flooding and drought monitoring, water resource management, and crop yield forecasts. This paper is based on the measured data of 35 ground monitoring stations in the Agricultural Research Service (ARS) hydrological monitoring network of Southwest Oklahoma, USA, LWREW (Little Washita Experimental Watershed) and FCREW (Ft. Cobb Reservoir Experiment Watershed). The applicability of moisture products of FY-3B, FY-3C and AMSR-2 soil from May 1, 2016 to May 31, 2018 in this region was analyzed and compared. The results show that the soil moisture products of FY-3B and FY-3C are overestimated compared to the measured soil moisture in LWREW and FCREW areas, the average biases of the FY-3B soil moisture products in the two regions are $0.070\ \text{m}^3/\text{m}^3$ and $0.048\ 4\ \text{m}^3/\text{m}^3$, and the average biases of the FY-3C soil moisture products in the two regions are $0.060\ 2\ \text{m}^3/\text{m}^3$ and $0.053\ 2\ \text{m}^3/\text{m}^3$. In the seasons with more precipitation, the retrieval results of FY-3B and FY-3C products increased significantly, and JAXA soil moisture products underestimated the soil moisture in LWREW and FCREW areas, with an average biases of $-0.100\ 5\ \text{m}^3/\text{m}^3$ and $-0.100\ 3\ \text{m}^3/\text{m}^3$ in both regions. In the LWREW area, the FY-3B ascending orbital soil moisture product

收稿日期:2019-01-23

修回日期:2019-03-14

资助项目:国家自然科学基金“多源微波遥感土壤水分产品一致性融合方法”(41501409);山东省自然科学基金“基于 MODIS 与微波遥感数据的农业干旱监测研究”(ZR2015DL003)

第一作者:杨纲(1992—),男,山东泰安人,硕士,研究方向为微波土壤水分验证。E-mail:1587749175@qq.com

通信作者:郭鹏(1985—),男,山东东平人,博士,副教授,主要从事微波遥感地表参数反演及真实性验证方面的研究。E-mail:guopeng@sdau.edu.cn

performed best, with the higher correlation coefficient ($R=0.664\ 8$), the lower root mean square ($RMSE=0.075\ 5\ m^3/m^3$) and the average bias ($0.061\ 6\ m^3/m^3$). In the FCREW area, JAXA had the best performance, with the highest correlation coefficient ($R=0.726\ 1$) and lowest unbiased root mean square (ubRMSE $=0.035\ 7\ m^3/m^3$). In general, FY-3B, FY-3C, and JAXA soil moisture products are able to reflect the seasonal changes of soil moisture in the LWREW and FCREW areas.

Keywords: microwave remote sensing; soil moisture; FengYun; AMSR-2; applicability

土壤水分是陆地水循环中活跃的部分,是水文过程、生物生态过程和生物地球化学过程的关键变量,在地表水蒸发和渗流扮演着极其重要角色^[1]。大面积土壤水分的长期观测对于旱涝监测,水资源管理和作物产量预测的研究至关重要^[2]。因此,精确测量土壤水分有着极其重要的现实意义。

传统上获取地表土壤水分通过重量采样或 TDR 传感器^[3]等不同的测量技术,虽然能准确测量单点的土壤水分信息,但很难实现大范围持续监测。遥感方法能够持续大范围观测,可见光和热红外遥感观测土壤水分易受天气条件和植被的影响,而微波遥感能够穿过植被表层进行全天候土壤水分观测,并且微波遥感根据土壤介电特性来反演土壤水分,物理基础更加坚实^[4]。因此,微波遥感被认为是目前探测土壤水分最有效的手段^[4]。

自 20 世纪 70 年代末以来,一系列主动和被动微波卫星或传感器被用于土壤水分地监测。如先进微波散射计 ASCAT (the Advanced Scatterometer),先进微波扫描辐射计 AMSR-E (the Advanced Microwave Scanning Radiometer-Earth Observing System),星载极化微波辐射计 WindSat, AMSR-2 (the Advanced Microwave Scanning Radiometer 2), 欧空局的土壤水分和海洋盐度卫星 SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity), 中国的风云三号 B 星 (FY-3B) 和 C 星 (FY-3C) 以及 NASA (National Aeronautics and Space Administration) 最新的土壤水分主被动计划 SMAP (the Soil Moisture Active Passive) 都已用于全球土壤水分的监测。在此基础上,国际上已有多种机构针对不同的传感器发布了多种微波卫星土壤水分数据产品,如欧空局发布的 SMOS 土壤水分产品^[5],日本宇航局 JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) 发布的 AMSR-2 土壤水分产品^[6],以及中国的国家气象中心发布的 FY-3B 和 FY-3C 土壤水分产品等,并且已有较多的学者开展了卫星土壤水分产品精度验证工作。崔慧珍等^[7]基于中国根河地区的土壤水分地表观测评估和分析了 AMSR-2, SMOS 和 SMAP 土壤水分产品,结果表明 JAXA 的 AMSR-2 土壤水分产品严重低估了土壤水分并且有

0.089~0.099 m^3/m^3 的恒定偏差。崔宸阳等^[8]利用两个密集土壤水分监测网对比分析了在不同尺度下 SMAP, SMOS, FY-3B, AMSR-2 等土壤水分产品的表现,结果表明 SMAP 被动土壤水分产品在 Little Washita 流域 (LWW) 网络区域优于其他产品,无偏均方根 (ubRMSE) 为 $0.027\ m^3/m^3$, 而 FY-3B 土壤湿度在 REMEDHUS 网络区域表现最佳, ubRMSE 为 $0.025\ m^3/m^3$ 。JAXA 的 AMSR-2 产品在大部分时间都低估了土壤湿度。庄媛等^[9]以自动土壤水分观测站土壤湿度作为验证数据,对 2012 年中国区域 ASCAT, WIND-SAT, FY-3B, SMOS 等 4 种微波遥感土壤湿度产品按省份进行评估研究。结果表明, ASCAT 质量最优,在中国大多数地区与观测数据的相关系数较高,归一化标准偏差较小; WINDSAT 其次,质量优于 FY-3B, 而 SMOS 在中国大部分地区质量差,受无线电频率干扰严重。我国的风云 3 号 C 星 (FY-3C) 土壤水分产品适用性的验证较少,尤其是在国外地区的验证更少。本文利用美国俄克拉荷马州西南部地区的 Agricultural Research Service (ARS) 监测网络提供的 2016 年 5 月 1 日到 2018 年 5 月 31 日的土壤水分实测数据,对 FY-3B, FY-3C 和日本宇航局的 JAXA-AMSR-2 土壤水分产品进行对比验证分析,评价其在俄克拉荷马州西南部地区的适用性,为基于 FY-3B, FY-3C 土壤水分产品的相关研究和应用提供支持。

1 数据与方法

1.1 研究区和地面观测资料

本研究中用于验证 FY-3B, FY-3C 和 AMSR-2 土壤水分产品的地面实测土壤水分数据来自美国 ARS 水文监测网络 (<http://ars.mesonet.org/>)。ARS 网由 FCREW 和 LWREW 两个试验区组成,目前提供有效数据的测站有 35 个^[10-11]。其中 LWREW 试验区已被长期用于土壤水分地研究,其观测数据已经验证了多种卫星土壤水分产品的精度^[12]。Little Washita Watershed 位于美国大平原地区俄克拉荷马州的西南部,面积约为 $610\ km^2$, 半湿润气候,平均年降水量为 $750\ mm$, 土地利用类型

主要是草地。LWREW 试验区目前有 20 个监测站提供监测数据, 站点相隔约 5 km。FCREW 网于 2005 年部署, 现有 15 个可监测数据的测站。ARS 水文监测网中的测站每 5 min 测量一次地表土壤水分(5 cm, 25 cm, 45 cm)、土壤温度(5 cm, 10 cm, 15

cm, 30 cm) 以及每天的降雨数据。由于微波数据只能反映表层几 cm 的土壤水分, 另外还考虑到降水对土壤水分的影响, 所以本研究选用地表 5 cm 实测土壤水分和每天的降水数据。ARS 网的地理位置及站点分布情况如图 1 所示。

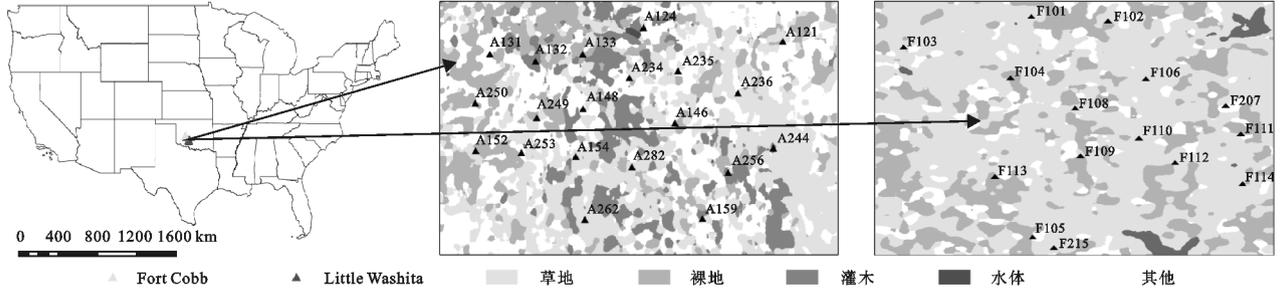


图 1 ARS 观测网地理位置及观测站点分布

1.2 土壤水分产品

1.2.1 FY-3B 与 FY-3C 土壤水分产品

FY-3B 和 FY-3C 卫星分别于 2010 年 11 月 4 日和 2013 年 9 月 23 日成功发射。FY-3B 和 FY-3C 卫星都搭载了微波辐射成像仪(MWRI), MWRI 是一款十通道五频被动辐射计系统, 它测量自 10.65 GHz 到 89 GHz 的水平垂直偏振亮度温度, FY-3B 的升轨时间约为下午 13:30, 降轨时间为上午 1:30, FY-3C 升轨时间约为下午 22:30, 降轨时间约为上午 10:30。

目前, FY-3C 发布的土壤水分产品包括: MWRI 土壤水分日产品、MWRI 土壤水分月产品和 MWRI 土壤水分旬产品, 而 FY-3B 只有 MWRI 土壤水分日产品。本文使用 FY-3B 和 FY-3C 土壤水分日产品, 包括升轨和降轨, 这些数据可以在国家卫星气象中心下载获取(<http://satellite.nsmc.org.cn/PortalSite/Default.aspx>)。FY-3B 和 FY-3C 土壤水分产品均采用 EASE-Grid 投影, 土壤水分产品数据格式为 HDF5。在目前的 FY-3 官方算法中, 利用双极化的 X 波段 10.7 GHz 通道亮温数据反演土壤湿度。对于裸土区, 采用参数化的地表发射率模型 Qp 反演模型^[13], 而对于植被覆盖地区则采用归一化差分植被指数和植被含水量的经验关系估算植被光学厚度对植被进行校正^[14], 然后利用裸土算法反演土壤水分。

1.2.2 JAXA-AMSR-2 土壤水分产品

AMSR-2 传感器搭载于 GCOM-W1(Global Change Observation Mission-1 st Water) 卫星, 于 2012 年 5 月 18 日由日本宇航局(JAXA)发射, 并于 2012 年 7 月 3 日开始获得科学数据。AMSR-2 是一种先进的圆锥式扫描微波辐射成像仪。它的 14 个亮温观测通道分布于 7 个不同的中心频率: 6.925, 7.3, 10.65, 18.7, 23.8, 36.5, 89.0 GHz^[15]。当地的升轨和降轨过境时间大约为下午 13:30 和上午 1:30。

JAXA 提供了 0.1° 和 0.25° 两种空间分辨率的 AMSR-2 土壤水分产品。为了与 FY 土壤水分产品的空间分辨率保持一致, 本文使用土壤水分产品来自 GCOM-W 数据服务中心(<https://gcom-w1.jaxa.jp/auth.html>) 0.25° AMSR-2 土壤水分标准产品。JAXA 利用查找表方法和多通道亮温值来估计地表土壤水分^[6]。首先利用前向辐射传输模型生成一个亮温值数据库, 该数据库涵盖了多频率和多极化植被和土壤条件, 这些数据集被用来创建查找表。然后利用 10.65 GHz 的微波极化率(PI)和 36.5 GHz, 10.65 GHz 两个频率下水平极化的土壤湿度指数(ISW)来估算土壤水分。

1.3 土壤水分产品评价指标

利用地面观测值对卫星土壤水分产品进行验证评价时, 通常选用 4 种误差指标^[8], 分别为均方根误差(RMSE), 平均偏差(Bias), 无偏均方根误差(ubRMSE)以及相关系数(R), 公式为:

$$RMSE = \sqrt{E\langle (\theta_{\text{satellite}}(t) - \theta_{\text{in-situ}}(t))^2 \rangle} \quad (1)$$

式中: $E\langle \cdot \rangle$ 代表线性平均算子; t 是观测时间; $\theta_{\text{satellite}}(t)$ 表示在时间 t 下卫星反演的土壤水分; $\theta_{\text{in-situ}}(t)$ 是在 t 时间下测站实测的平均值; RMSE 代表卫星数据与地面观测值间的绝对误差。

$$Bias = E\langle (\theta_{\text{satellite}}(t) - \theta_{\text{in-situ}}(t)) \rangle \quad (2)$$

Bias 表示土壤水分反演值与实测值间的平均差。

$$ubRMSE = \sqrt{E\langle ((\theta_{\text{satellite}}(t) - E\langle \theta_{\text{satellite}}(t) \rangle) - (\theta_{\text{in-situ}}(t) - E\langle \theta_{\text{in-situ}}(t) \rangle))^2 \rangle} \quad (3)$$

当实测值被视为真实值时, ubRMSE 消除了其可能附加偏差, 代表了随机误差。

$$R = \frac{E\langle (\theta_{\text{satellite}}(t) - E\langle \theta_{\text{satellite}}(t) \rangle) \cdot (\theta_{\text{in-situ}}(t) - E\langle \theta_{\text{in-situ}}(t) \rangle) \rangle}{\sigma_{\text{satellite}} \cdot \sigma_{\text{in-situ}}} \quad (4)$$

式中: $\sigma_{\text{satellite}}$ 和 $\sigma_{\text{in-situ}}$ 分别指卫星土壤水分产品(FY-3B、FY-3C和JAXA-AMSR-2)与实测之间的标准偏差。 R 表示卫星土壤水分产品与实测值间的相关程度。

1.4 数据处理方法

使用地面观测点测量的数据验证卫星像元的土壤水分时存在尺度不匹配问题,为了更好地解决空间不匹配问题,本文将每个观测网的所有站点取平均作为验证土壤水分的真值。为了使地面观测数据与卫星数据产品时间匹配,地面观测数据取卫星过境时间前后 10 min 的均值与卫星反演值进行比较分析。为了定量比较卫星土壤水分产品在俄克拉荷马州地区的适用性,分别计算 FY-3B、FY-3C、JAXA-AMSR-2 土壤水分产品与 ARS 观测网实测值的相关系数(R),均方根误差(RMSE),无偏均方根(ubRMSE)和平均偏差(Bias)。

2 结果与分析

2.1 LWREW 试验区 3 种土壤水分产品时间序列分析

对 LWREW 试验区 2016 年 5 月 1 日至 2018 年 5 月 31 日实测土壤水分与 FY-3B、FY-3C 和 AMSR-2(JAXA)3 种土壤水分产品数据进行时间序列对比,见图 2 和图 3 所示。由于 FY-3B 和 JAXA-AMSR-2 的升降轨时间相同,在进行分析时,将 FY-3B 和 JAXA-AMSR-2 放在一起进行对比分析。从图中可以看出,观测站点的实测土壤水分(图中实线和点线)随着降水量的变化而变化,受降水影响,并呈现出明显的季节性变化。整个研究的时间范围内,实测土壤水分变化范围为 $0.08 \sim 0.35 \text{ m}^3/\text{m}^3$,在降水集中的季风季节,主要是 5—9 月份,实测土壤水分随降水量变化波动明显,在降水量较多的时刻实测土壤水分较高。总体上 3 种土壤水分产品对降水的变化响应敏感,能较好的反映出降水随时间的变化趋势。其原因可能是卫星微波遥感土壤水分产品仅仅能够反映土壤表层的土壤水分,而少量的降雨就足以引起估算地表层土壤水分的变化,因此传感器可以较好的捕捉到表层土壤水分的变化。但是 FY-3B、FY-3C、JAXA-AMSR-2 土壤水分产品又具有不同的表现,FY-3B、FY-3C 土壤水分产品大多数时间对实测土壤水分存在高估,而 JAXA-AMSR-2 绝大多数时间对土壤水分存在低估。

分析图 2、3 可以得出,JAXA-AMSR-2 升轨土壤水分产品在变化趋势上与实测土壤水分更为接近,其升轨产品最大值为 $0.237 \text{ m}^3/\text{m}^3$,最小值为 $0.029 \text{ m}^3/\text{m}^3$,均值为 $0.084 \text{ m}^3/\text{m}^3$,实测土壤水分最大值为 $0.344 \text{ m}^3/\text{m}^3$,最小值为 $0.081 \text{ m}^3/\text{m}^3$,均值为

$0.173 \text{ m}^3/\text{m}^3$,在 3 种土壤水分产品中,其与同时段地面实测数据变化趋势最为接近。JAXA-AMSR-2 降轨土壤水分产品在变化趋势上与实测土壤水分也较接近,但 JAXA-AMSR-2 降轨土壤水分产品的土壤水分值较低且动态范围小,最大值为 $0.164 \text{ m}^3/\text{m}^3$,最小值为 $0.024 \text{ m}^3/\text{m}^3$,均值为 $0.062 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。FY-3B 升轨土壤水分产品(图 2)比 FY-3B 降轨土壤水分产品(图 2)的动态变化范围更大,其中 FY-3B 升轨反演的土壤水分最大值为 $0.431 \text{ m}^3/\text{m}^3$,最小值为 $0.109 \text{ m}^3/\text{m}^3$,均值为 $0.237 \text{ m}^3/\text{m}^3$,降轨最大值为 $0.378 \text{ m}^3/\text{m}^3$,最小值为 $0.111 \text{ m}^3/\text{m}^3$,均值为 $0.223 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。FY-3B 升降轨土壤水分产品在连续降雨的时刻,卫星反演的土壤水分值明显大于实测土壤水分,但是在降水较少甚至没有降水的时刻,反演值与实测值较为接近。对于 FY-3C 土壤水分产品,FY-3C 升轨土壤水分产品(图 3)比 FY-3C 降轨土壤水分产品(图 3)变化幅度更强烈。其中 FY-3C 升轨最大值为 0.409 ,最小值为 $0.121 \text{ m}^3/\text{m}^3$,均值为 $0.229 \text{ m}^3/\text{m}^3$,FY-3C 降轨最大值为 0.405 ,最小值为 $0.124 \text{ m}^3/\text{m}^3$,均值为 $0.172 \text{ m}^3/\text{m}^3$,并且 FY-3C 土壤水分产品的变化趋势与 FY-3B 土壤水分产品变化趋势相似,在降水较多时刻,反演值高于实测值,而降水较少时反演值与实测值较为接近。特别地,FY-3B 和 JAXA-AMSR-2 升轨土壤水分产品的均值均大于降轨土壤水分产品的均值。其原因可能是植被茂盛的土壤表层昼夜温差变化较大^[16],而且 LWREW 区域多为草地和牧场,昼夜温差变化较大。

2.2 FCREW 试验区 3 种土壤水分产品时间序列分析

图 4 和图 5 为 2016 年 5 月至 2018 年 5 月 FCREW 试验区 FY-3B、FY-3C 和 JAXA-AMSR-2 卫星土壤水分产品数据与土壤水分观测网实测地表土壤水分的时间序列对比图。FCREW 试验区实测土壤水分也能很好地反映降水的变化,在降水密集时,实测土壤水分会骤然增高,随着雨水下渗,土壤水分迅速下降。从图 4、图 5 中可以看出,在连续降水的时刻,地表土壤水分反演结果出现较大偏差。原因可能是,连续地降水使表层土壤水分达到最高,使得微波有效深度减少,此时传感器获取的是地表的土壤水分,而实测土壤水分是地下 5 cm 处的数据。同样,在 FCREW 试验区,FY-3B、FY-3C 和 JAXA-AMSR-2 卫星土壤水分产品能够反映出地表土壤水分随降水变化情况,并且 FY-3B 和 FY-3C 土壤水分产品在 FCREW 区域对实测土壤水分存在高估,而 JAXA-AMSR-2 土壤水分产品对土壤水分存在低估。FY-3B 升轨比降轨的土壤水分变化范围更大,FY-3B

升轨反演的土壤水分最大值为 $0.458 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 最小值为 $0.126 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 均值为 $0.228 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 降轨最大值为 $0.405 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 最小值为 $0.142 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 均值为 $0.219 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。FY-3C 升轨和降轨变化趋势相似, FY-3C 升轨反演土壤水分最大值为 $0.463 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 最小值为 $0.139 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 均值为 $0.232 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 降轨最大值为

$0.490 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 最小值为 $0.137 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 均值为 $0.221 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。JAXA-AMSR-2 升轨比降轨的土壤水分波动范围更大, JAXA-AMSR-2 升轨反演的土壤水分最大值为 $0.252 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 最小值为 $0.040 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 均值为 $0.082 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 降轨最大值为 $0.196 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 最小值为 $0.031 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 均值为 $0.065 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。

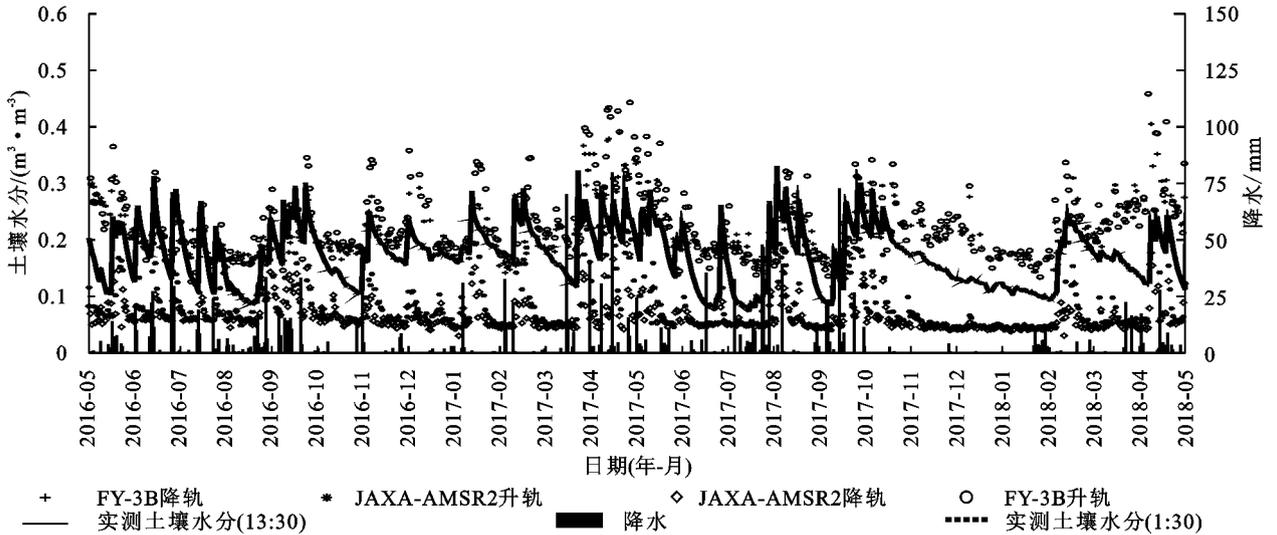


图 2 LWREW 站点观测值与 JAXA, FY-3B 升降轨土壤水分数据时间序列对比

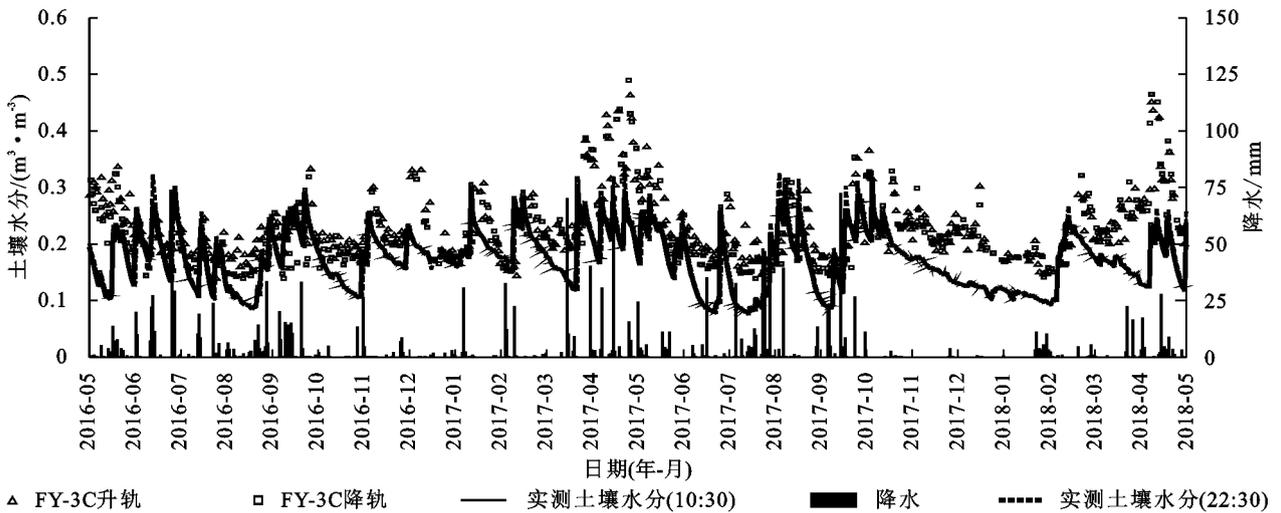


图 3 LWREW 站点观测值与 FY-3C 升降轨土壤水分数据时间序列对比

2.3 3 种土壤水分产品与站点实测数据一致性分析

为了进一步分析 FY-3B, FY-3C 和 JAXA-AMSR-2 土壤水分产品的精度, 对卫星反演得到的土壤水分数据与 LWREW, FCREW 区域的实测土壤水分绘制散点图(图 6, 图 7), 并计算 3 种卫星产品的误差指标(RMSE, Bias, ubRMSE 和 R), 见表 1, 表 2。

在 LWREW 区域(图 6 和表 1), 虽然 FY-3B 升轨土壤水分产品高估了地面实测土壤水分, Bias 为 $0.0616 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 但 FY-3B 升轨土壤水分产品精度优于 JAXA-AMSR-2 土壤水分产品和 FY-3C 土壤水分产品, FY-3B 升轨土壤水分产品比 JAXA-AMSR-2 产品有更低的均方

根($\text{RMSE}=0.0755 \text{ m}^3/\text{m}^3$), 比 FY-3C 产品有更高的相关系数($R=0.6648$)。JAXA-AMSR-2 土壤水分产品低估了地面实测土壤水分(图 6), 但 JAXA-AMSR-2 升轨土壤水分产品与实际测量值表现出较好的一致性, 无偏均方根值为 $0.0346 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 比 FY-3B 和 FY-3C 小。JAXA-AMSR-2 降轨土壤水分产品有着最高的相关系数和最小的无偏均方根分别为 0.682 和 $0.0346 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。FY-3B 降轨土壤水分产品有着最小的平均偏差为 $0.0523 \text{ m}^3/\text{m}^3$, FY-3C 降轨土壤水分产品有着最小的均方根为 $0.0683 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。并且从表 1 中可以看出 FY-3B 升轨(下午 13:30)、FY-3C 降轨(上午 10:30)和 JAXA-

AMSR-2 升轨(下午 13:30)土壤水分产品的 ubRMSE 和 R 值分别优于 FY-3B 降轨(上午 1:30)、FY-3C 升轨(下午 22:30)和 JAXA-AMSR-2 降轨(上午 1:30)土壤水分产品。这与卫星反演值在夜晚时间的精度要优

于白天的预期结果矛盾,但是该结果与前人的结果一致。Brocca 等^[17]研究指出原因可能是由于在白天时温度更高使得植被更加透明,从而导致植被对于从土壤发射的能量衰减更少。

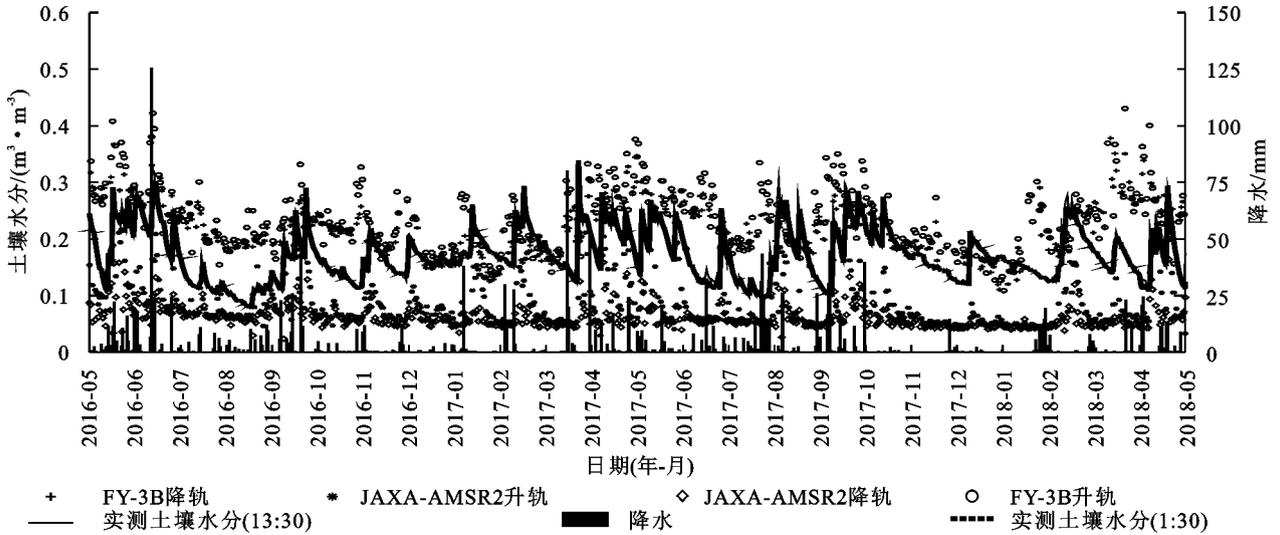


图 4 FCREW 站点观测值与 JAXA, FY-3B 升降轨土壤水分数据时间序列对比

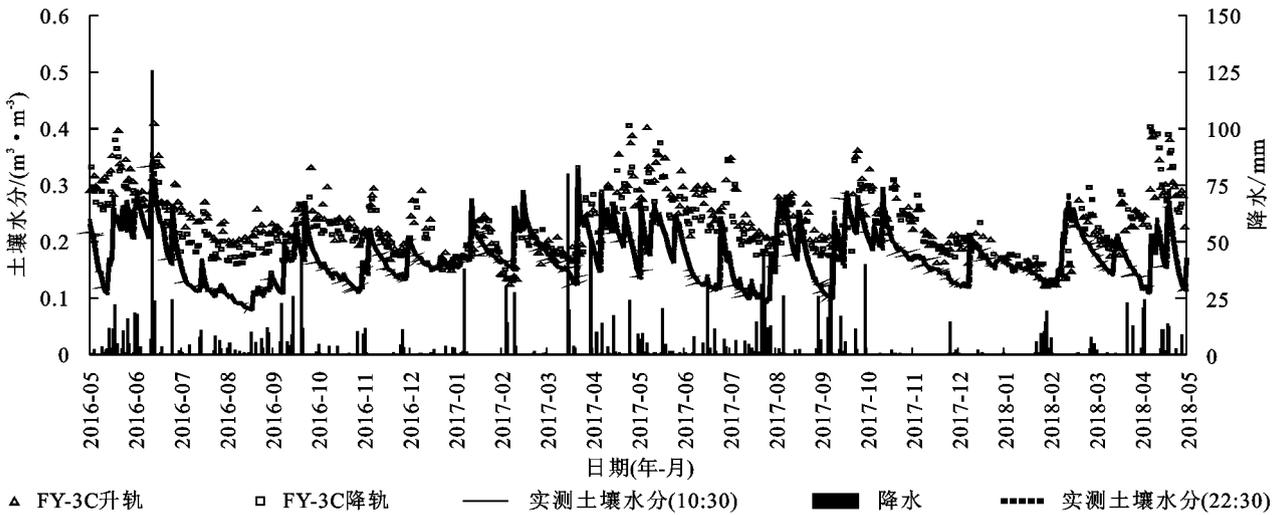


图 5 FCREW 站点观测值与 FY-3C 升降轨土壤水分数据时间序列对比

在 FCREW 区域(图 7 和表 2),FY-3B 和 FY-3C 土壤水分产品对实测土壤水分存在明显高估,升降轨平均偏差都在 $0.05 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 以上,JAXA-AMSR-2 土壤水分产品存在低估,升降轨平均偏差高于 $0.09 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。与 LWREW 区域观测结果相似,3 种土壤水分产品升轨的 R 值分别优于相应的降轨土壤水分产品。JAXA-AMSR-2 降轨土壤水分产品有着最高的相关系数和最小的无偏均方根分别为 0.726 1 和 $0.035 7 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。FY-3B 降轨土壤水分产品有着最小的均方根和平均偏差分别为 $0.065 4 \text{ m}^3/\text{m}^3$, $0.045 5 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。

综合来看,在 LWREW 试验区,FY-3B 升轨土壤水分产品表现最好,这可能是由于 FY-3B 算法使用了一种截然不同的方法来校正地表粗糙度的影响,这种方法可

能在 LWREW 观测网比其他土壤水分算法更有效,而 JAXA 土壤水分算法的是将地表粗糙度在全球设定为一个恒定值^[18]。在 LWREW 观测地区,降雨比较频繁,受降水影响,地表粗糙度发生频繁变化。因此,地表粗糙度的恒定假设将不可避免地给卫星土壤水分反演带来误差。相比于 FY-3C,在使用同种算法的情况下,FY-3B 卫星与 FY-3C 卫星不同的过境时间造成的精度不同。而在 FCREW 观测地区,JAXA-AMSR-2 升轨土壤水分产品表现最好,这可能是由于 FCREW 观测区与 LWREW 观测区的植被类型和降水的频率不同,且对于 JAXA 算法,采用微波极化差指数和土壤水指数将地表温度的影响降到最低,这种算法可能更适用于 FCREW 试验区。

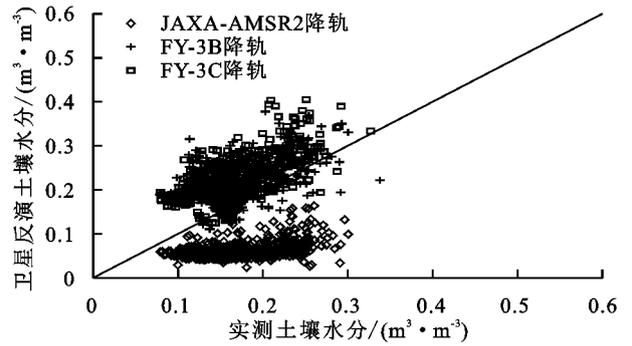
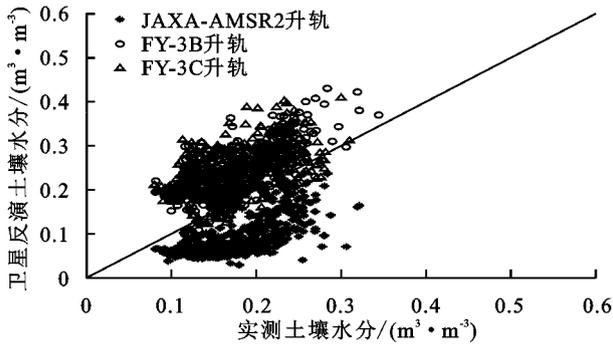


图 6 LWREW 站点实测土壤水分与卫星反演土壤水分散点图

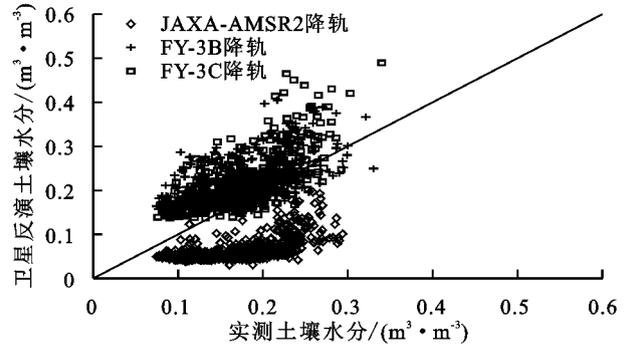
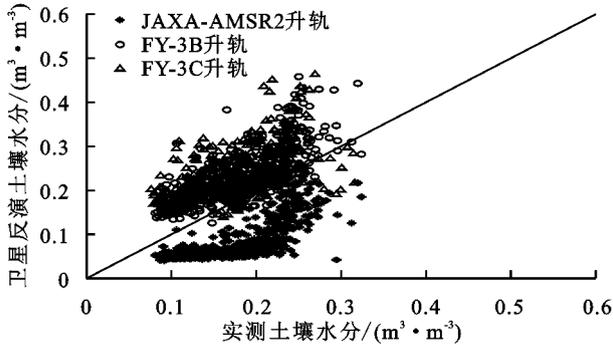


图 7 FCREW 站点实测土壤水分与卫星反演土壤水分散点图

表 1 FY-3B, FY-3C 和 JAXA AMSR-2 土壤水分产品在 LWREW 区域的误差指标

产品	RMSE/ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	Bias/ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	R	ubRMSE/ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	N
FY-3B 升轨土壤水分	0.0755	0.0616	0.6648	0.0436	455
FY-3B 降轨土壤水分	0.0719	<u>0.0523</u>	0.4518	0.0493	412
FY-3C 升轨土壤水分	0.0834	0.0661	0.506	0.0509	432
FY-3C 降轨土壤水分	<u>0.0683</u>	0.0543	0.6607	0.0413	449
JAXA 升轨土壤水分	0.0961	-0.09	<u>0.6820</u>	<u>0.0346</u>	612
JAXA 降轨土壤水分	0.1180	-0.111	0.4551	0.0410	585

注: Bias 表示平均偏差, RMSE 表示均方根误差, ubRMSE 表示无偏均方根, R 表示相关性, N 表示有效数值, 其中带下划线的数据为表现最好, 下同。

表 2 FY-3B, FY-3C 和 JAXA 土壤水分产品在 FCREW 区域的误差指标

产品	RMSE/ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	Bias/ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	R	ubRMSE/ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	N
FY-3B 升轨土壤水分	0.0676	0.0513	0.7137	0.0439	458
FY-3B 降轨土壤水分	<u>0.0654</u>	<u>0.0455</u>	0.5627	0.0470	416
FY-3C 升轨土壤水分	0.0775	0.0593	0.5773	0.0499	418
FY-3C 降轨土壤水分	0.066	0.0470	0.6825	0.0464	450
JAXA 升轨土壤水分	0.0997	-0.0931	<u>0.7261</u>	<u>0.0357</u>	585
JAXA 降轨土壤水分	0.1147	-0.1074	0.6050	0.0403	571

3 讨论

本研究基于美国两个试验区的实测土壤水分对 FY-3B, FY-3C 和 JAXA-AMSR-2 土壤水分产品进行了验证分析, FY-3B, FY-3C 和 JAXA-AMSR-2 土壤水分产品整体上都能捕获实测降水的变化趋势, FY-3B 和 FY-3C 对实测土壤水分有一定的高估,

JAXA-AMSR-2 对实测土壤水分明显的低估。其原因可能是利用站点所测的土壤水分验证卫星反演的土壤水分, 存在较大的尺度效应。监测站提供点位置的土壤水分测量, 实测点的尺度通常几 cm, 而卫星上的微波传感器测量一个卫星足迹内的平均土壤湿度, 如风云和 AMSR-2 卫星像元尺度约为 25 km, 地表土壤水分的空间异质性, 会使得卫星足迹的空间平均

土壤水分与基于点的现场测量产生差异。其次,现场土壤水分和卫星观测之间的传感器深度不匹配也可能对评估结果产生不确定性。FY-3B, FY-3C 和 JAXA-AMSR-2 利用 X 波段反演土壤水分,通常情况下, X 波段对地表的穿透深度为 0~1 cm,而本文采用的地表实测的土壤水分为地面以下 5 cm,这会使得卫星与实测值存在垂直尺度上不匹配的问题。最后,不同的土壤水分反演算法以及算法中不同的输入参数(地表粗糙度,植被光学厚度,地表温度等)造成卫星反演土壤水分具有不同的表现。JAXA 算法中通过归一化差分植被指数计算植被含水量,并假设植被含水量与植被光学厚度线性相关来获取植被光学厚度。然而,光学数据易受天气制约,并且通过经验关系获得的植被光学厚度,这都对算法有一定限制。JAXA 算法中对地表粗糙度这一参数处理为定值。风云算法中假定土壤温度和植被冠层相等,并且根据 36.5 GHz 下垂直极化亮温之间的线性关系估算地表温度,算法中对粗糙度地处理是利用 Q_p 模型来消除地表粗糙度。风云算法中对植被光学厚度地获取与 JAXA 类似。

本研究通过将多点实测值平均的方法来减小尺度效应产生的误差,这也是目前主流验证方法,但是由于被动微波遥感空间分辨率很低,一个像元大小为 $25\text{ km} \times 25\text{ km}$,因此这种方式不能完全消除实测点不足带来的尺度上的误差。因此,在进一步的研究中还要考虑空间尺度转换相关方法,如块状克里金插值方法,利用站点间土壤水分测量的空间相关结构来计算区域范围内的土壤水分,也可利用地面模型模拟的土壤水分空间格局进行升尺度到卫星尺度,还可基于热惯量的方法,将原位数据与高分辨率的卫星热信号的土壤湿度合并进行尺度上升,地面观测升尺度方法将会有效的减小验证中空间尺度不匹配造成的影响。

4 结论

(1) FY-3B 和 FY-3C 土壤水分产品的在大部分时间对 LWREW, FCREW 两个试验区都有不同程度的高估, FY-3B 产品的平均偏差在两个地区的均值分别为 $0.057\ 0\ \text{m}^3/\text{m}^3$, $0.048\ 4\ \text{m}^3/\text{m}^3$, FY-3C 产品的平均偏差在两个地区的均值分别为 $0.060\ 2\ \text{m}^3/\text{m}^3$, $0.053\ 15\ \text{m}^3/\text{m}^3$ 。FY-3B 和 FY-3C 土壤水分产品总体上都能够反映出 LWREW, FCREW 地区实测土壤水分随降水变化的趋势。

(2) JAXA-AMSR-2 土壤水分产品对 LWREW, FCREW 两个地区的土壤水分存在明显地低估,在 LWREW, FCREW 地区升、降轨平均偏差分别为

$-0.100\ 5\ \text{m}^3/\text{m}^3$ 和 $-0.100\ 3\ \text{m}^3/\text{m}^3$,但总体上 JAXA-AMSR-2 土壤水分产品仍然能够反映出 LWREW, FCREW 地区地表土壤水分随降水的变化趋势。

(3) 根据计算的误差指标, FY-3B 升轨和 JAXA 升轨土壤水分产品在 LWREW, FCREW 地区分别表现最好。在 LWREW 地区, FY-3B 升轨土壤水分产品有着较高的相关系数为 0.664 8, 较低的均方根 $0.067\ 6\ \text{m}^3/\text{m}^3$ 和平均偏差 $0.051\ 3\ \text{m}^3/\text{m}^3$ 。在 FCREW 地区 JAXA-AMSR-2 升轨土壤水分产品有着最高的相关系数和最小的无偏均方根分别为 0.726 1, 0.035 7 m^3/m^3 , 说明该地区 JAXA-AMSR-2 升轨土壤水分产品与地面实测值更接近。

参考文献:

- [1] 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[J]. 地理科学进展, 2018, 37(2): 198-213.
- [2] 全兆远, 张万昌. 土壤水分遥感监测的研究进展[J]. 水土保持通报, 2007, 7(4): 107-113.
- [3] Vereecken H, Huisman J A, Pachepsky Y, et al. On the spatio-temporal dynamics of soil moisture at the field scale [J]. Journal of Hydrology, 2014, 516(4): 76-96.
- [4] 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[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(4): 132-137.
- [5] Kerr Y H, Waldteufel P, Richaume P, et al. The SMOS soil moisture retrieval algorithm[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2012, 50(5): 1384-1403.
- [6] Koike T, Nakamura Y, Kaihotsu I, et al. Development of an advanced microwave scanning radiometer (AMSR-E) algorithm of soil moisture and vegetation water content[J]. Ann J. Hydra. Eng., JSCE, 2004, 48: 217-223.
- [7] Cui H, Jiang L, Du J, et al. Evaluation and analysis of AMSR-2, SMOS, and SMAP soil moisture products in the Genhe area of China[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2017, 122(16): 8650-8666.
- [8] Cui C, Xu J, Zeng J, et al. Soil moisture mapping from satellites: An intercomparison of SMAP, SMOS, FY3B, AMSR-2, and ESA CCI over two dense network regions at different spatial scales [J]. Remote Sens, 2018, 10(1), 33; <https://doi.org/10.3390/rs10010033>.
- [9] 庄媛, 师春香, 沈润平, 等. 中国区域多种微波遥感土壤湿度产品质量评估[J]. 气象科学, 2015, 35(3): 289-296.
- [10] Elliott R L, Schiebe F R, Crawford K C, et al. A unique data capability for natural resources studies[C]// International Winter Meeting of the American Society of Agricultural Engineers, Chicago, IL, 1993: 14-17.

- [12] Dietze E, Wünnemann B, Hartmann K, et al. Early to mid-Holocene lake high-stand sediments at Lake Donggi Cona, northeastern Tibetan Plateau, China[J]. *Quaternary Research*, 2013, 79(3):325-336.
- [13] 李占宏. 内蒙古沙化土地表土粒度特征及其可蚀性颗粒研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2007.
- [14] 马媛, 丁树文, 邓羽松, 等. 五华县崩岗洪积扇土壤分形特征及空间变异性研究[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(5):279-285.
- [15] 徐志明, 曲宏伟, 王靖雯, 等. 太阳能光伏板积灰的最佳清周期[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(6):1-4.
- [16] Qasem H, Betts T R, Müllejans H, et al. Dust-induced shading on photovoltaic modules[J]. *Progress in Photovoltaics Research & Applications*, 2014, 22(2):218-226.
- [17] 孙家欢, 王涛, 薛娴, 等. 降尘对中国北方主要城市光伏电站发电量的影响[J]. *中国沙漠*, 2016, 36(4):932-942.
- [18] Ferrada P, Araya F, Marzo A, et al. Performance analysis of photovoltaic systems of two different technologies in a coastal desert climate zone of Chile[J]. *Solar Energy*, 2015, 114:356-363.
- [19] 邓月超. 基于微热管阵列的光伏光热幕墙及其建筑一体化技术研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2016.
- [20] Alboteanu L. Energy efficiency of stand alone photovoltaic systems used in electrical drive for positioning ramps of anti hail missile[C]// *International Symposium on Electrical & Electronics Engineering*. IEEE, 2010.
- [21] 徐振兴, 石景晨, 周平. 大型并网光伏电站选址分析[J]. *中国市场*, 2011, 41(3):67-68.
- [22] 袁方, 张振师, 卜崇峰, 等. 毛乌素沙地光伏电站项目区风速流场及风蚀防治措施[J]. *中国沙漠*, 2016, 36(2):287-294.
- [23] 杨建振. 陕北毛乌素沙地生物结皮的土壤水分效应及其人工培育技术初探[D]. 西安: 西北农林科技大学, 2010.
- [24] 郭彩贇, 韩致文, 钟帅, 等. 库布齐沙漠新材料沙障的风速廓线特征[J]. *水土保持通报*, 2017, 37(5):260-265.
- [25] 李玉宝, 汪季, 王鹿振, 等. 一种可以分层采取土壤样品的取土器[P]. CN102062702, 2011.
- [26] 高广磊, 丁国栋, 赵媛媛, 等. 4 种粒径分级制度对土壤体积分形维数测定的影响[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2014, 22(6):1060-1068.
- [27] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. *科学通报*, 1993, 20(38):1896-1899.
- [28] 丁国栋. *风沙物理学*[M]. 北京: 中国林业出版社, 2010.
- [29] 马成忠, 邓继峰, 丁国栋, 等. 不同初植密度樟子松人工林对毛乌素沙地南缘土壤粒度特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(1):230-235.
- [30] 李少华, 高琪, 王学全, 等. 光伏电站厂干扰下高寒荒漠草原区植被和土壤变化特征[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(6):325-329.
- [31] 董治宝, 李振山. 风成沙粒度特征对其风蚀可蚀性的影响[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1998, 4(4):1-5.
- [32] 李锦荣, 孙保平, 高永, 等. 基于空气动力学的沙袋沙障气流畅场模拟[J]. *北京理工大学学报*, 2010, 30(6):749-752.
- [33] 包慧娟, 李振山. 风沙流中风速纵向脉动的试验研究[J]. *中国沙漠*, 2004, 24(2):132-135.

(上接第 111 页)

- [11] Starks P J, Fiebrich C A, Grimsley D L, et al. Upper Washita River experimental watersheds: Meteorologic and soil climate measurement networks[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2014, 43(4):1239-1249.
- [12] Jackson T J, Cosh M H, Bindlish R, et al. Validation of advanced microwave scanning radiometer soil moisture products[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(12):4256-4272.
- [13] Shi J, Jiang L, Zhang L, et al. A parameterized multi-frequency-polarization surface emission model [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2006, 43(12):2831-2841.
- [14] Zhang N, Shi J, Sun G, et al. A simple algorithm for retrieval of the optical thickness at L-band from SMOS data [C]// *2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. IEEE, 2012:198-201.
- [15] Kachi M, Hori M, Maeda T, et al. Status of validation of AMSR-2 on board the GCOM-W1 satellite [C]// *2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*. IEEE, 2014:110-113.
- [16] 席家驹, 文军, 田辉, 等. AMSR-E 遥感土壤湿度产品在青藏高原地区的适用性[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(13):194-202.
- [17] Brocca L, Hasenauer S, Lacava T, et al. Soil moisture estimation through ASCAT and AMSR-E sensors: An inter-comparison and validation study across Europe[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(12):3390-3408.
- [18] Zeng J, Chen K S, Bi H, et al. A preliminary evaluation of the SMAP radiometer soil moisture product over United States and Europe using ground-based measurements[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(8):4929-4940.