

doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2020.08.006

姜少杰,宋海清,李云鹏,等.内蒙古地区 FY-3B/3C 微波遥感土壤水分数据产品的融合与评估[J].中国农业气象,2020,41(8):529-538

内蒙古地区 FY-3B/3C 微波遥感土壤水分数据产品的融合与评估*

姜少杰¹, 宋海清¹, 李云鹏^{1**}, 潘学标², 姜会飞²

(1. 内蒙古自治区生态与农业气象中心, 呼和浩特 010051; 2. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘要: 土壤水分是陆-气耦合系统的重要组成部分, 土壤水分监测在气候、水文、农业等领域具有重要意义。与站点资料相比, 遥感数据能够较好地反应区域格点上土壤水分的变化。基于 2018 年作物生长季 (5-10 月) 观测站点表层 (0-10cm) 土壤水分逐日观测资料, 选用与观测站点资料时空一致的 FY-3B 升轨/降轨、FY-3C 升轨/降轨、AMSR2、SMOS 卫星土壤水分产品, 对各遥感数据进行检验。首先利用加权平均法对 FY-3B 升轨/降轨、FY-3C 升轨/降轨产品数据进行融合, 然后利用随机森林方法融合形成 FY-3B/3C 数据集, 对比评价 AMSR2、SMOS、FY-3B/3C 在内蒙古地区的适用性。结果表明: FY-3B 升轨/降轨、FY-3C 升轨/降轨中日间的数据质量好于夜间, 通过加权平均融合后的 FY-3B 和 FY-3C 数据质量无显著改善, 利用随机森林模型融合形成的 FY-3B/3C 数据产品质量得到显著提升。在雨季和高植被覆盖区 (东北部), SMOS、AMSR2、FY-3B/3C 三个数据产品中 FY-3B/3C 数据质量均好于 SMOS 和 AMSR2。整体来看, SMOS 在内蒙古中部和东南部地区适用性较好, AMSR2 在全区适用性较差, FY-3B/3C 在全区适用性最好。

关键词: FY-3B/3C; 土壤水分; 数据融合; 遥感监测; 适用性

Data Fusion and Evaluation of Soil Moisture Products from FY-3B/3C Microwave Remote Sensing in Inner Mongolia

JIANG Shao-jie¹, SONG Hai-qing¹, LI Yun-peng¹, PAN Xue-biao², JIANG Hui-fei²

(1. Ecological and Agricultural Meteorology Center of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010051, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193)

Abstract: Soil moisture is one of the most important components of land-atmosphere coupling system, and soil moisture monitoring plays a significant part in climate, hydrology, and agriculture. Active microwave and passive microwave are two basic microwave approaches which are used to monitor soil moisture. As of now, the passive microwave method is widely used due to its longer wavelengths and stronger penetrating power. It was considered that the passive microwave retrieved method could work well in effectively monitoring spatial and temporal changes of soil moisture in large-scale areas. However, the data retrieved by satellites needs further evaluation and verification. At present, various microwave methods have been proposed for soil moisture retrieve, and a number of corresponding soil moisture products have also been published. Compared to station-based data, remote sensing data can better reveal the dynamic change of soil moisture in a certain region at grid points. Based on the observed data of station-based soil moisture at the upper soil layer (0-10cm) during the growing season (May-October) in 2018, this paper collected and examined the remote sensing datasets from FY-3B, FY-3C, AMSR2 and SMOS which were

* 收稿日期: 2020-01-06 **通讯作者李云鹏, E-mail: lyp5230@163.com

基金项目: 国家重点研发计划重大自然灾害监测预警与防范专项 (2018YFC1506606); 内蒙古自治区科技计划项目 (201602103); 国家自然科学基金项目 (41775156); 内蒙古自治区气象局科技创新项目 (nmqkjcx201702; nmqkjcx201806); 内蒙古自治区自然科学基金面上项目 (2017MS0410; 2018MS04005); 内蒙古科技重大专项 (2020ZD0005); 内蒙古科技计划项目 (2019GG016)

第一作者联系方式: 姜少杰, E-mail: jiang470004510@163.com

consistent with the station-based data in time and space. Furthermore, the applicability of FY-3B/3C fusion in different regions of Inner Mongolia was evaluated, which may provide a reliable scientific basis for the application of soil moisture products based on Fengyun Satellites and other related researches. The ascending and descending data of FY-3B and FY-3C were fused respectively by employing weighted average method. In order to evaluate and compare the applicability of remote sensing datasets from AMSR2, FY-3B/3C and SMOS in Inner Mongolia, FY-3B/3C datasets were then formed by random forest method. The results showed that daytime data were of better quality than night data of FY-3B ascending/descending and FY-3C ascending/descending. The data quality of fused FY-3B and FY-3C processed by weighted average method exhibited no significantly improved. And the data quality of FY-3B/3C products formed by random forest models was significantly enhanced. In the rainy season of high vegetation coverage area (NE), the quality of FY-3B/3C data products were better than those of SMOS and AMSR2. Overall, in Inner Mongolia, SMOS is more applicable in Middle (M) and Southeast (SE) regions, AMSR2 has poor applicability in the whole region, while FY-3B/3C performs the best.

Key words: FY-3B/3C; Soil moisture; Data fusion; Remote sensing monitoring; Applicability

土壤水分是陆-气耦合系统中能量和水分传递的重要参量,是水循环中的重要指标^[1-4]。土壤水分与全球气候相互反馈^[5-7]、气候变化引起土壤水分变化,直接影响陆面热量和水分,从而导致大气环流变化,大气环流又影响全球气候变化。土壤水分是植物生长发育的主要水分来源,是直接反映作物生长、土壤干旱、水资源存储能力的关键要素^[8-9]。因此,在水分缺乏的地区,土壤水分的监测和校正对该地区合理利用水资源具有重要的指导作用。

传统水分观测主要基于陆面站网,可以有效观测站点的土壤水分动态变化,但对于获取区域大尺度土壤水分的时空变化较为困难。从 20 世纪 70 年代开始,微波反演的方法得到应用,美国国家航空航天局(NASA)对地表亮温和土壤水分之间的关系进行了相关研究。微波遥感方法分为主动微波方法和被动微波方法,后者应用较为广泛,其遥感波长更长,穿透力较强。同时微波辐射计方法能够在更大的区域观测,具有观测周期短、对土壤水分湿度监测更加精确等优势。被动微波遥感反演方法可以有效解决大尺度区域上格点土壤水分的时空变化问题^[10-11],但对于卫星反演的数据需进一步评估和检验。目前已有较多微波方法进行土壤水分反演,并获得了相应的土壤水分产品。

国内外对不同卫星土壤水分产品的评估工作开展较多,目前应用较为广泛的卫星/传感器有微波先进散射仪(ASCTA)、先进微波扫描辐射计地球观测系统(AMSR-E)、先进微波扫描辐射计 2(AMSR2)^[4, 12-15]、欧空局土壤湿度和海水盐度

SMOS^[2, 15-17]、中国的风云卫星 FY-3B 和 FY-3C^[18-20]。Cui 等^[19]利用两个土壤水分观测网对青藏高原地区的 FY-3B/MWRI 反演数据进行验证,同时与基本气候变量(ECV)进行对比检验,发现 FY-3B 升轨的数据质量明显优于降轨的数据质量,在冻土期和植被指数(NDVI)较低的地区 FY-3B 升轨数据要优于 ECV。Chen 等^[21]利用青藏高原 2 个地面观测站网对 SMAP、SMOS、AMSR-2 反演的土壤水分产品进行评价,研究表明 SMOS 能够较好地反应青藏高原地区土壤水分的时空变化,MSOS 在半湿润地区(那曲)表现较好,但在半干旱区域(帕里)表现较差,AMSR-2 在青藏高原对时空变化的反应较差。Liu 等^[22]对 SMMR、SSM/I、TRMM 和 AMSR-E 卫星数据通过亮温反演并对反演数据进行融合,融合数据表明澳大利亚近地水文中有较强的厄尔尼诺-南方涛动现象。万红等^[23]通过评估 FY-3B 土壤水分产品在青藏高原的适用性表明, FY-3B 的土壤水分产品与青藏高原地区的降水分布一致,土壤水分产品在各个季节都能够较好地反应青藏高原地区的土壤水分变化。徐作敏等^[20]利用变分法对 FY-3C 土壤水分进行研究,结果表明 FY-3C 土壤水分产品在时空分布上能够较为准确地反映实际情况,通过变分法订正后的土壤水分产品的准确性得到提高。目前,国内外对 FY-3B 和 FY-3C 土壤水分产品评估和融合的研究报道仍较少。本研究利用内蒙古生态与农业气象中心提供的 2018 年 5 月 1 日-10 月 31 日的土壤水分实测数据,对 FY-3B、FY-3C 产品进行验证并融合形成 FY-3B/3C 土壤水分产品,将 FY-3B/3C、

SMOS 和 AMSR2 土壤水分产品进行对比验证分析，评价 FY-3B/3C 融合在内蒙古不同区域的适用性，为基于风云卫星土壤水分产品的相关研究和应用提供支持。

1 资料与方法

1.1 数据及其来源

地面观测资料为内蒙古自治区（97°12′–126°04′E，37°24′–53°23′N，海拔 1000m 以上）地面自动站 2018 年作物生长季（5–10 月）0–10cm 土壤体积含水量逐日观测数据。数据经过筛选和质量控制，将土壤水分大于 $0.5\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ 的数据进行剔除，并将不合理站点去除，为了减少灌溉等不确定因素的影响，最终筛选出 37 个固定地段自动站有效观测数据。由于区域内气候差异大，将整个研究区分为东北（NE）、东南（SE）、中部（M）、西部（W）4 个分区，不同区域站点分布见图 1。

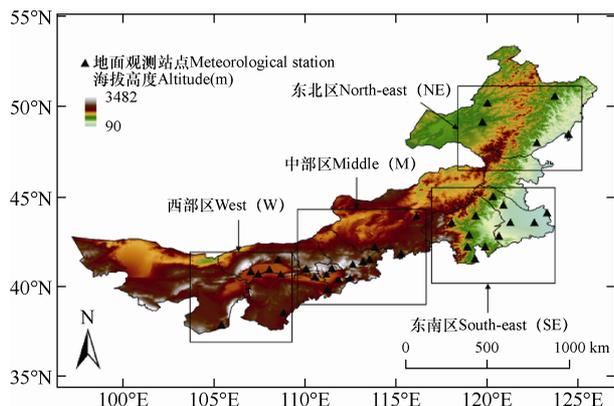


图 1 内蒙古自治区气象站点分布及研究分区

Fig. 1 Distribution of meteorological stations and research subregions in Inner Mongolia Autonomous Region

FY-3B 和 FY-3C 卫星由中国发射，搭载的为微波辐射成像仪（MWRI），MWRI 有 5 个频率，每个频率有两个极化模式。MWRI 能够测量 10.65GHz–89GHz 的水平垂直偏振亮度温度。通过亮温反演分别获得 FY-3B 升轨（13:30）/降轨（1:30）和 FY-3C 升轨（22:30）/降轨（10:30）的土壤水分产品。选用 FY-3B 升轨/降轨和 FY-3C 升轨/降轨土壤水分日值产品，其空间分辨率为 $25\text{km}\times 25\text{km}$ ，数据下载于中国国家气象卫星中心（<http://satellite.nsmc.org.cn/PortalSite/Data/DataView.aspx>）。欧空局发射的 SMOS 主要用来观测地表水和海盐度，SMOS 搭载的为合成孔径微波成像辐射计

（MIRAS），该卫星的中心频率为 1.143GHz，能够有效避免人为辐射噪音和环境的干扰，保证监测的精度^[24]。选用 SMOS 的日值土壤水分产品，其空间分辨率为 $0.25^\circ\times 0.25^\circ$ ，数据下载于欧空局（<https://smos-diss.esa.int/oads/access>）。日本宇宙航空开发机构（JAXA）发射的地球水环境变化监测卫星“GCOM-W1”上搭载 AMSR2 传感器，提供地球水和能量循环的长期监测数据^[10]。选用 AMSR2 日值土壤水分产品，其空间分辨率为 $0.25^\circ\times 0.25^\circ$ ，数据下载于美国国家航空航天局（<https://search.earthdata.nasa.gov/search>）。

采用 6 套土壤水分日产品数据集，即 FY-3B 升轨/降轨、FY-3C 升轨/降轨、SOMS 和 AMSR2，数据覆盖时间为 2018 年 5 月 1 日–10 月 31 日。土壤水分产品取值范围为 $0\sim 0.5\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ ，其中-999 为空值。以内蒙古自治区地面土壤水分观测站网同期实测数据为参照，对比评价 SMOS、AMSR2 以及融合产品 FY-3B/3C 在内蒙古地区的适用性。

1.2 数据融合与评估方法

1.2.1 融合方法

通过编程处理对遥感数据和观测站点的数据进行空间匹配。由于卫星空间分辨率与站点不完全匹配，需要利用遥感像元内土壤水分值与像元内站点的土壤水分进行位置临近匹配，以减少空间误差。同时，需要利用遥感过境日数据与该日站点土壤水分进行时间匹配。根据 FY-3B 升轨/降轨和 FY-3C 升轨/降轨数据分别通过加权平均法进行数据融合形成 FY-3B、FY-3C 数据集，加权平均要求卫星观测传感器相一致，观测物体要一致。两星升轨和降轨土壤水分数据融合方程分别为

$$z_1 = 0.5y_1 + 0.5y_2 \quad (1)$$

$$z_2 = 0.5y_3 + 0.5y_4 \quad (2)$$

式中， y_1 和 y_2 分别为 FY-3B 升轨和降轨数据， y_3 和 y_4 分别为 FY-3C 升轨和降轨数据， z_1 和 z_2 分别为融合后 FY-3B 和 FY-3C 土壤水分数据。

根据站点观测数据，利用随机森林（RF）模型对 FY-3B、FY-3C 数据集进行二次融合，获得 FY-3B/3C 数据集。随机森林模型是一种由多个决策树模型组成的集成机器学习方法。该模型的基础模型为决策树模型，决策树模型是通过递归将训练样本划分成为较小的子集构建树。随机森林从原始训练集中使用 Bootstrapping 方法随机放回采样取出 m 个

样本, 共进行 n 次采样。生成 n 个训练集并构建 n 个决策树进行训练, 根据每个决策树最好的特征进行分裂, 由生成的多个决策树构建成随机森林, 最终根据多颗决策树的均值决定预测结果。

$$y = RF(x_1, x_2) \tag{3}$$

式中, x_1 、 x_2 作为遥感融合数据的特征值, 分别为 FY-3B、FY-3C 的土壤水分产品, y 为模型的输出值, 即土壤水分预测值 FY-3B/C。

1.2.2 评估方法

根据地面观测站网数据, 利用 Python Linear Model 中 Linear Regularization Model 方法对 FY-3B 升轨/降轨、FY-3C 升轨/降轨, 以及升轨/降轨融合后的 FY-3B、FY-3C 土壤水分产品进行评估和验证。利用 Python 的 Linear Regularization Model 方法分别评估比较 FY3B/3C、SMOS、AMSR2 的结果, 分析 FY-3B/3C 数据产品在内蒙古地区的适应性, 利用最小二乘法, 获得线性回归方程, 分别计算偏差(Bias)、相关系数 (r)、均方根误差 (RMSE) 等指标。

$$\hat{a} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i y_i - n \bar{x} \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i^2 - n \bar{x}^2)} \tag{4}$$

$$\hat{b} = \bar{y} - \hat{a}x \tag{5}$$

式中, x_i 为单个点数的特征值, \hat{a} 和 \hat{b} 是模型学习参数, y_i 为模型的预测结果。利用地面站点对 FY-3B/3C、MSOS、AMSR2 进行对比评估, 验证 FY-3B/3C 在内蒙古地区的适用性。

2 结果与分析

2.1 FY-3B/C 土壤水分数据的融合

2.1.1 各星升轨/降轨数据的融合

2018 年作物生长季 (5-10 月) 整个研究区域内 FY-3B 卫星升轨/降轨和 FY-3C 卫星升轨/降轨的样本数量分别为 4270、3315 个和 3853、4150 个。按照“邻近”原则, 选取与站点匹配的格点数据进行相关分析, 结果见图 2。由图中可见, FY-3B 卫星升轨、降轨以及两者以等权重融合 (式 3) 后的 FY-3B 数据与邻近站点土壤含水量间的相关系数 (R) 分别为 0.41、0.36 和 0.40, 偏差 (Bias) 分别为 $0.026\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 、 $0.045\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 和 $0.033\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, 均方根误差 (RMSE) 分别为 $0.098\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 、 $0.108\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 和 $0.100\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 。FY-3C 卫星升轨、降轨以及两者以等权重融合 (式 4) 后的 FY3C 数据与邻近站点土壤含水量间的相关系

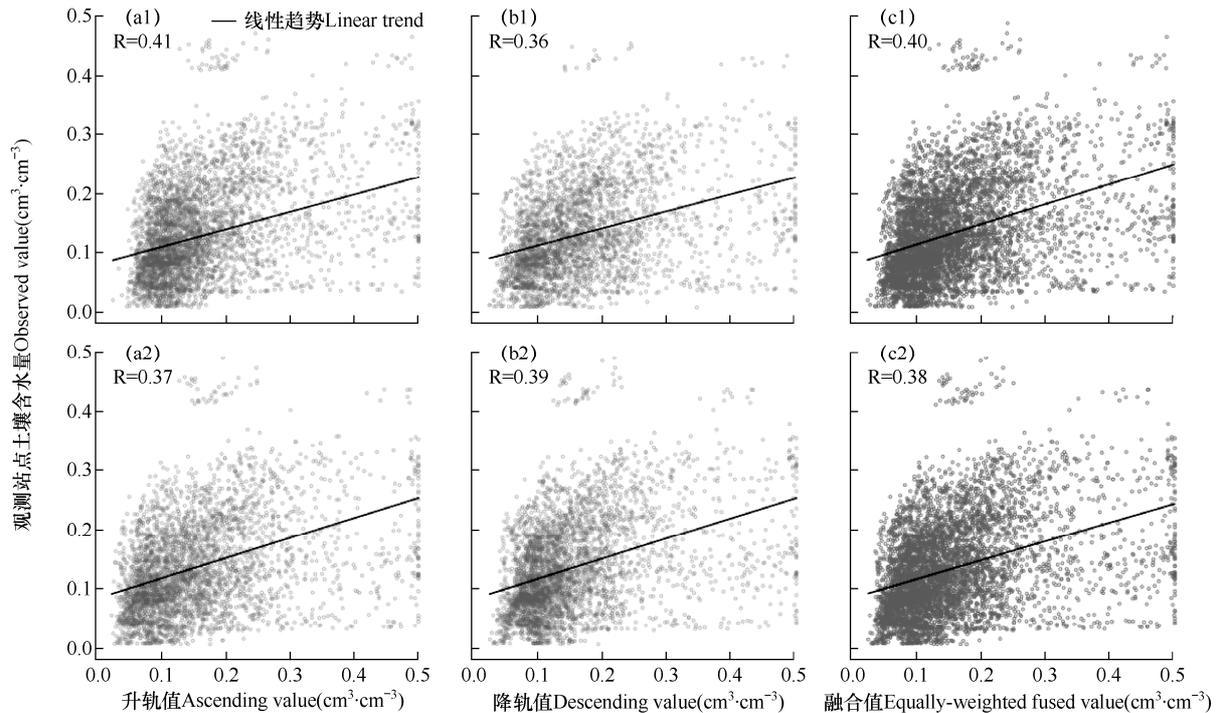


图 2 内蒙古区域 2018 年 5-10 月 FY-3B (1) 和 FY-3C (2) 卫星的升轨 (a)、降轨 (b) 及两者等权重融合 (c) 土壤水分与邻近观测站点实测值的相关分析

Fig. 2 Correlation analysis of soil moisture between the ascending(a) and descending(b) of FY-3B(1) and FY-3C(2), equally-weighted fused value(c) and observed value in corresponding station in Inner Mongolia during May to October, 2018

数 (R) 分别为 0.37、0.39 和 0.38, 偏差 (Bias) 分别为 $0.035\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ 、 $0.029\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 $0.032\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$, 均方根误差 (RMSE) 分别为 $0.105\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ 、 $0.099\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 $0.101\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ 。可见, FY-3B 升轨 (13: 00) 数据要好于降轨 (1: 30) 数据, FY-3C 降轨 (10: 30) 数据要好于升轨 (22: 30) 数据, 对于同一卫星而言, 白天的数据质量好于夜间的數據质量。升轨与降轨土壤水分数据融合后的 FY-3B 和 FY-3C 数据样本分别为 5609 个和 5652 个, 数据集中程度更高, 数据质量优于夜间卫星数据质量, 但差于白天数据。

2.1.2 两星数据融合

图 3 显示, FY-3B 和 FY-3C 两星融合后的数据 FY-3B/3C 的样本数量为 6176 个, 将两星所有数据按照随机森林模型进行融合, 两星融合后的数据 FY-3B/3C 与邻近站点土壤含水量间的相关系数 (R) 为 0.90, 偏差 (bias) 为 $-0.0003\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$, 均方根误差 (RMSE) 为 $0.037\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ 。由图可见, 通过随机森林模型对数据进行融合后, 与 FY-3B 和 FY-3C 相比, 融合后的数据 FY-3B/3C 相关系数得到显著提升, 绝对误差 (bias) 显著减小, 同时均方根误差也显著减小。

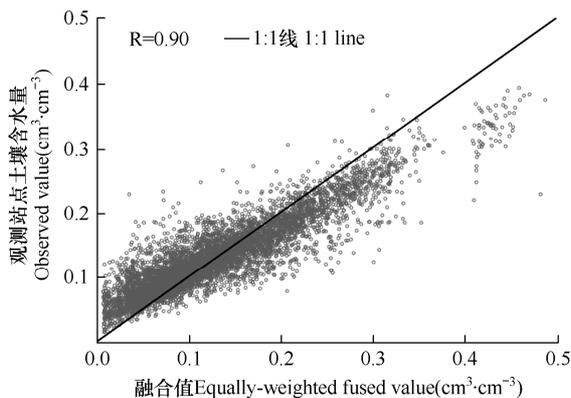


图 3 2018 年 5-10 月 FY-3B 和 FY3C 两星土壤水分数据融合值与邻近观测站点土壤实测水分的相关分析

Fig. 3 Correlation analysis of soil moisture value of FY-3B, FY-3C and observed value in corresponding station in Inner Mongolia during May to October, 2018

2.2 FY-3B/C 土壤水分融合数据的分区评估

2.2.1 与站点实测值对比

根据图 1 中区域划分方式, 按区域计算

FY-3B/3C 系列、SMOS、AMSR2 数据, 并与站点实测数据进行比较, 各区域遥感数据和实测数据为各区内数据的平均值。由图 4 可见, 在西部区域, 与实测值相比, FY-3B/3C 变异程度最小, SMOS 数据的变异程度最大, AMSR2 的土壤水分偏干, 其余数据集的土壤水分偏湿。中部区域上, 与观测值相比, FY-3B/3C 变异程度最小, AMSR2 变异程度最大, SMOS、AMSR2 偏干, 其余数据集的土壤水分偏湿。东南区域上, 与观测值相比, FY-3B/3C 变异程度最小, AMSR2 变异程度最大, FY-3B/3C、SMOS、AMSR2 土壤水分偏干, 其余数据集的土壤水分偏湿。东北区域上, FY-3B/3C 变异程度最小, FY-3C 变异程度最大, FY-3B/3C、SMOS 土壤水分偏干, 其余数据集的土壤水分偏湿。从月份上看, 5-7 月和 9-10 月各遥感数据值与站点实测值较为接近, 7-9 月各遥感数据值与站点实测值相差较大。

2.2.2 与其它卫星数据对比

图 5 显示, 各区域内 FY-3B/3C、AMSR2、SMOS 数据与站点实测数据相关性比较中, 以 FY-3B/3C 的相关性最好, SMOS 次之, AMSR2 最差。不同区域中, 东北区域的相关性均较差, 中部区域相关性均较好。由表 1 可知, 东北区域内, FY-3C 升轨和 SMOS 数据集与实测数据间相关显著 ($P < 0.05$), 其余数据集与实测数据间均为极显著相关 ($P < 0.01$); 东南区域内, SMOS 数据集与实测数据间均未通过显著性检验, 其余数据集与实测数据间均为极显著相关 ($P < 0.01$); 中部和西部区域上, 遥感数据集与实测数据间均为极显著相关 ($P < 0.01$)。在西部区域上, FY-3B/3C 数据的 R、RMSE、Bias 最好, SMOS 最差, 中部区域上, FY-3B/3C 的 R、RMSE、Bias 最好, SMOS 和 AMSR2 的 R、RMSE、Bias 均较好, 东南区域上, FY-3B/3C 的 R、RMSE、Bias 指标最好, AMSR2 的最差, 东北区域上, FY-3B/3C 的 R、RMSE、Bias 最好, SMOS 较差, AMSR2 无法反演出有效数据。FY-3B 和 FY-3C 经过随机森林模型融合后, 数据质量得到极大提升, 但东北区域数据质量较差, 所以融合后与观测数据的相关系数提升幅度最小, 东南和中部区域上融合后的相关系数提升较大。

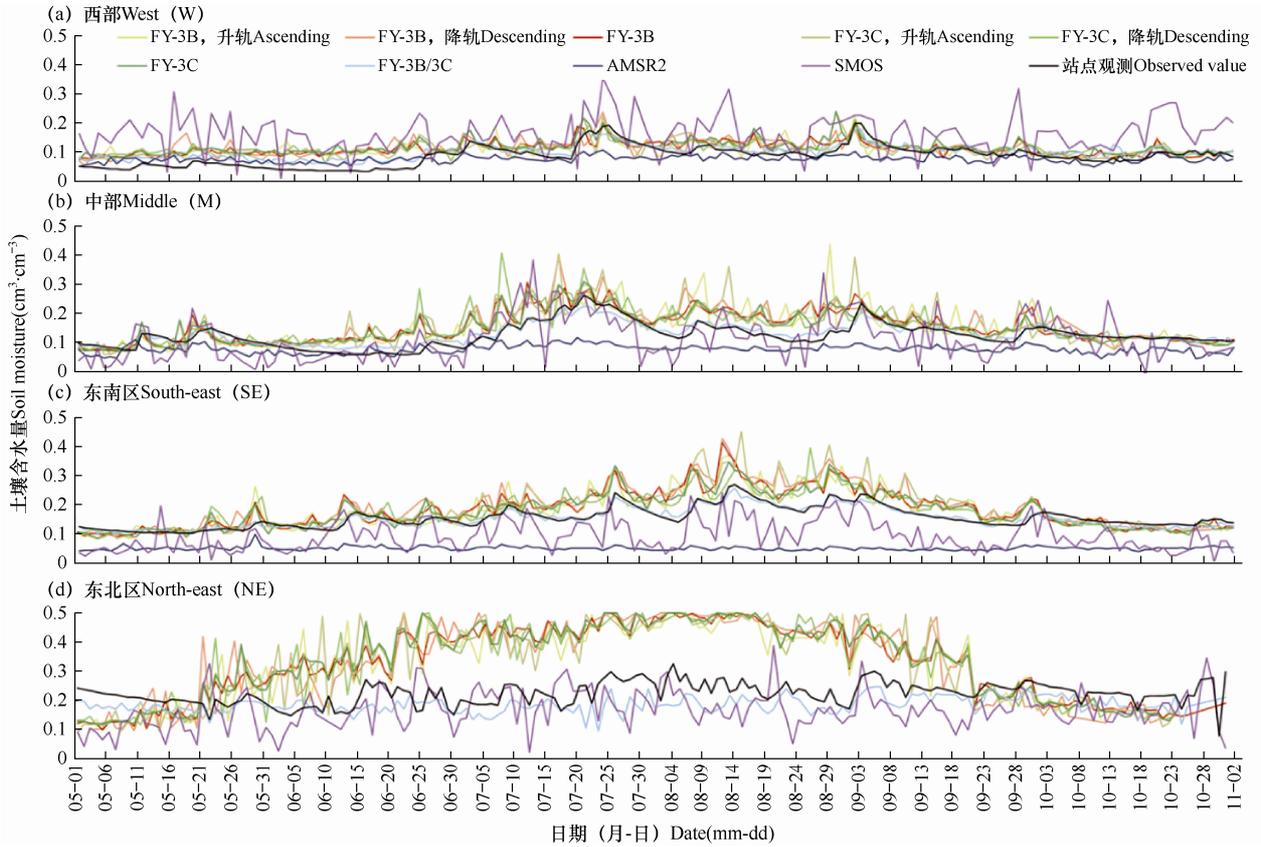


图 4 2018 年 5-10 月 4 个区域 0-10cm 土壤湿度 (FY 卫星和实测) 时间序列

Fig. 4 Daily series of 0-10cm soil moisture (FY-3B/3C and measured) in four subregions during May to October, 2018

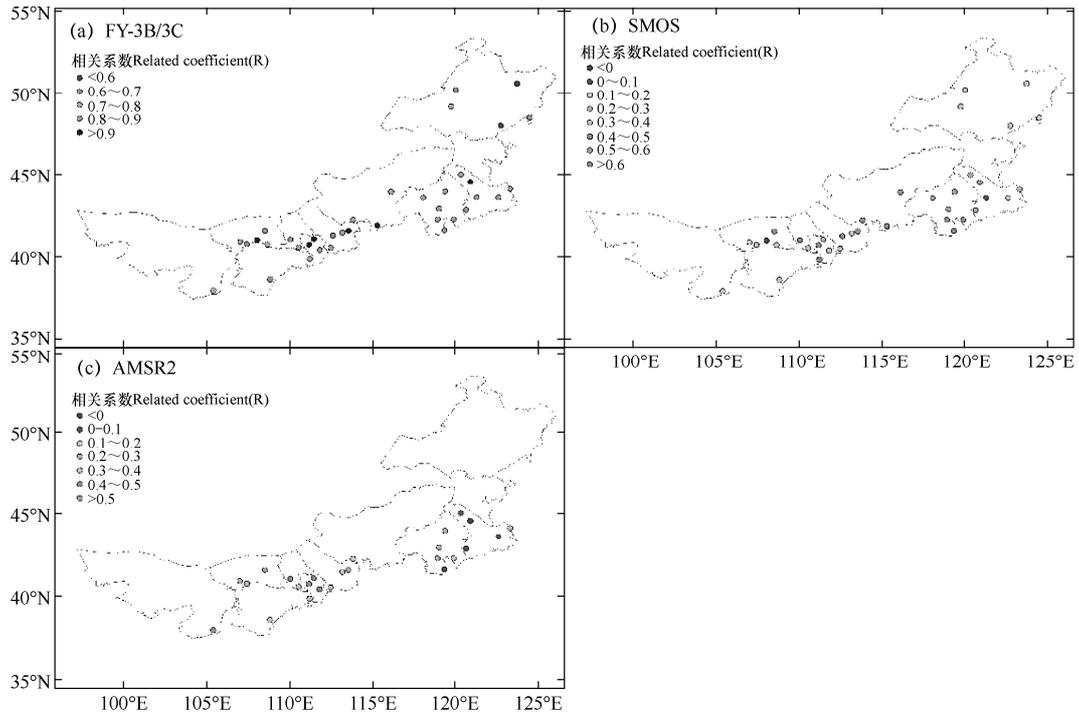


图 5 2018 年 5-10 月各站实测土壤水分与 FY-3B/3C、SMOS、AMSR2 土壤水分数据的相关系数

Fig. 5 Related coefficient between the observed soil moisture and derived value from FY-3B/3C, SMOS and AMSR2 at each station during May to October, 2018

表 1 2018 年 5–10 月 内 蒙 古 不 同 区 域 0–10cm 日 平 均 土 壤 水 分 遥 感 数 据 与 站 点 观 测 值 间 关 系 分 析

Table 1 Related analysis of 0–10cm daily soil moisture between derived remote sensing and observed in each subregion during May to October, 2018

区域 Subregion	数据来源 Data source	相关系数 R	均方根误差 RMSE (cm ³ ·cm ⁻³)	相对偏差 BIAS (cm ³ ·cm ⁻³)	站点与像元匹配个数 Match number of station and pixel
东北 North-east	FY-3B, 升轨 Ascending	0.25**	0.152	0.093	474
	FY-3B, 降轨 Descending	0.23**	0.169	0.109	281
	FY-3B	0.26**	0.158	0.102	547
	FY-3C, 升轨 Ascending	0.19*	0.169	0.106	383
	FY-3C, 降轨 Descending	0.23**	0.159	0.099	434
	FY-3C	0.25**	0.164	0.109	543
	FY-3B/3C	0.48**	0.051	-0.038	604
	AMSR2	-	-	-	-
	SMOS	0.18*	0.089	-0.056	764
东南 South-east	FY-3B, 升轨 Ascending	0.82**	0.044	0.020	1511
	FY-3B, 降轨 Descending	0.84**	0.057	0.039	1319
	FY-3B	0.84**	0.047	0.026	2025
	FY-3C, 升轨 Ascending	0.84**	0.056	0.030	1437
	FY-3C, 降轨 Descending	0.84**	0.041	0.023	1481
	FY-3C	0.87**	0.040	0.022	2041
	FY-3B/3C	0.96**	0.010	-0.004	2149
	AMSR2	0.09	0.109	-0.063	1780
	SMOS	0.58**	0.076	-0.103	1501
中部 Middle	FY-3B, 升轨 Ascending	0.68**	0.052	0.028	1401
	FY-3B, 降轨 Descending	0.69**	0.056	0.036	1067
	FY-3B	0.73**	0.045	0.027	1843
	FY-3C, 升轨 Ascending	0.64**	0.061	0.035	1252
	FY-3C, 降轨 Descending	0.68**	0.050	0.027	1372
	FY-3C	0.76**	0.043	0.026	1887
	FY-3B/3C	0.96**	0.014	0.003	2081
	AMSR2	0.62**	0.059	-0.048	1245
	SMOS	0.57**	0.062	-0.014	1641
西部 West	FY-3B, 升轨 Ascending	0.54**	0.037	0.022	884
	FY-3B, 降轨 Descending	0.56**	0.043	0.028	648
	FY-3B	0.64**	0.037	0.024	1194
	FY-3C, 升轨 Ascending	0.56**	0.039	0.023	781
	FY-3C, 降轨 Descending	0.69**	0.037	0.027	863
	FY-3C	0.67**	0.039	0.029	1181
	FY-3B/3C	0.92**	0.020	0.012	1342
	AMSR2	0.56**	0.032	0.069	1098
	SMOS	0.27**	0.095	-0.012	846

注: *、**分别表示相关系数通过 0.05、0.01 水平的显著性检验。—表示在东北区域上无相应指标。

Note: * is $P < 0.05$, ** is $P < 0.01$. — represents there are no correlation indicator in Northeast region. R is correlation coefficient, BIAS is deviation rate, RMSE is root mean square error.

3 结论与讨论

利用 2018 年内蒙古地区作物生长季 (5–10 月)

观测站点日平均表层土壤水分 (0–10cm) 对 9 套遥感数据集进行评估验证, 将 FY-3B 和 FY-3C 进行融

合, 比较 FY-3B/3C、SMOS 和 AMSR2 数据集在不同区域上的优势及劣势, 评估 FY-3B/3C 在内蒙古地区的适用性。

通过对 FY-3B 升轨/降轨和 FY-3C 升轨/降轨评估发现, FY 卫星在白天的数据质量要优于夜间质量, 印证了 Cui 等^[19]研究。将升轨和降轨数据通过等权重法进行融合, 融合后数据样本数量得到提升, 数据质量无显著改善。通过随机森林模型对 FY-3B 和 FY-3C 融合后, 融合后的数据与观测值相关性得到显著提升 ($R=0.9$), RMSE 和 Bias 显著降低, 数据质量显著提升。

从不同区域时间序列上看, 西部区域上, FY-3B/3C 与站点实测值更为接近, SMOS 与站点实测值差异较大。其它区域上, AMSR2 数据与站点实测值差异较大, 数据质量较差。观测期内 (5–10 月), 以 7–9 月各个数据集与观测值差异最大, 遥感数据反演受到地形、降水、植被等因素影响较为敏感^[10,12,25–27]。随着降水和植被覆盖度从西部到东北递增, FY-3B 和 FY-3C、SMOS 和 AMSR2 遥感数据与站点观测数据的差异逐渐变大, 经过随机森林方法融合后的 FY-3B/3C 数据在降雨季和高植被覆盖区误差明显减小。

根据区域分析, 经过融合的 FY-3B/3C 在各个区域上具有明显的优势, 数据质量好于其它数据集。整体来看, SMOS 在中部和东南部 (半干旱和半湿润地区) 适用性较好, AMSR2 在内蒙古地区适用性较差, FY-3B/3C 在内蒙古地区适用性好^[21,28–29]。

本研究在对数据进行评估时, 观测的站点数据相对较少, 时间序列不足, 对数据评估结果存在一定的偶然性, 可以增加陆面模式的土壤水分产品对遥感数据进行评估^[6,12,30]。在利用随机森林模型进行拟合时, 由于时间序列不足, 模型的适用性还有待进一步验证。从空间上看, 东部区域土壤水分总体相对较差, 从时间上看, 7–9 月土壤水分总体较差, 这主要受到降水和植被覆盖的影响, 尤其 7–9 月东北区域上表现较为明显。由于土壤水分反演受到较多因素的影响, 反演产品的数据准确性较低, 所以利用融合产品可以有效提高土壤水分准确性, 整体来看 FY-3B/3C 在不同区域上优势较为明显。在对遥感数据进行验证时, 由于遥感数据的空间分辨率在 25km, 而站点和遥感数据按照空间位置临近匹配, 遥感数据和站点数据空间存在一定差异, 可

以进一步降低遥感的空间分辨率, 提高反演产品的精度^[5,26,31]及遥感数据和站点数据匹配的准确性。

参考文献 References

- [1] McColl K A, Alemohammad S H, Akbar R, et al. The global distribution and dynamics of surface soil moisture[J]. *Nature Geoscience*, 2017, 10(2): 100-104.
- [2] Al Bitar A, Leroux D, Kerr Y H, et al. Evaluation of SMOS soil moisture products over continental US using the SCAN/SNOTEL Network[J]. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(5): 1572-1586.
- [3] Assouline S. Infiltration into soils: conceptual approaches and solutions[J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(4): 1755-1772.
- [4] Sahoo A K, Houser P R, Ferguson C, et al. Evaluation of AMSR-E soil moisture results using the in-situ data over the little river experimental watershed, georgia[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(6): 3142-3152.
- [5] 马柱国, 符淙斌, 谢力, 等. 土壤湿度和气候变化关系研究中的某些问题[J]. *地球科学进展*, 2001, 16(4): 563-568.
Ma Z G, Fu Z B, Xie L, et al. Some problems in the study on the relationship between soil moisture and climatic change [J]. *Advances in Earth Science*, 2001, 16(4): 563-568. (in Chinese)
- [6] 宋海清, 李云鹏, 张静茹, 等. 内蒙古地区多种土壤湿度资料的初步评估[J]. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(8): 139-144.
Song H Q, Li Y P, Zhang J R, et al. Evaluation of ERA5 reanalysis soil moisture over Inner Mongolia[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016, 30(8): 139-144. (in Chinese)
- [7] Seneviratne S I, Corti T, Davin E L, et al. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: a review [J]. *Earth-Science Reviews*, 2010, 99(3-4): 125-161.
- [8] 姚艳丽, 傅玮东, 邢文渊, 等. 基于 MODIS 资料的新疆土壤水分遥感应应用研究[J]. *中国农业气象*, 2011, 32(S1): 161-164.
Yao Y L, Fu W D, Xing W Y, et al. Research on the remote sensing of soil moisture based on MODIS data in Xinjiang[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2011, 32(S1): 161-164. (in Chinese)
- [9] 贺俊杰, 王英舜, 李云鹏, 等. 利用 EOS/MODIS 植被供水指数监测锡林郭勒地区土壤湿度[J]. *中国农业气象*, 2013, 34(2): 243-248.
He J J, Wang Y S, Li Y P, et al. Soil moisture monitoring with

- EOS/MODIS VSWI product in Xilingol[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2013, 34(2): 243-248. (in Chinese)
- [10] Zhang X, Zhao J, Sun Q, et al. Soil moisture retrieval from AMSR-E data in Xinjiang, China: models and validation [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2011, 4(1): 117-127.
- [11] Nicolai-Shaw N, Zscheischler J, Hirschi M, et al. A drought event composite analysis using satellite remote-sensing based soil moisture [J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 203: 216-225.
- [12] Kim H, Parinussa R, Konings A G, et al. Global-scale assessment and combination of SMAP with ASCAT (active) and AMSR2 (passive) soil moisture products [J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 204: 260-275.
- [13] Parinussa R M, Holmes T R H, Wanders N, et al. A preliminary study toward consistent soil moisture from AMSR2 [J]. Journal of Hydrometeorology, 2015, 16(2): 932-947.
- [14] Kolassa J, Gentile P, Prigent C, et al. Soil moisture retrieval from AMSR-E and ASCAT microwave observation synergy (part 2): product evaluation [J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 195: 202-217.
- [15] Karthikeyan L, Pan M, Wanders N, et al. Four decades of microwave satellite soil moisture observations (part 2): product validation and inter-satellite comparisons [J]. Advances in Water Resources, 2017, 109: 236-252.
- [16] Srivastava P K. Satellite soil moisture: review of theory and applications in water resources [J]. Water Resources Management, 2017, 31(10): 3161-3176.
- [17] Lee J H, Zhao C F, Kerr Y. Stochastic bias correction and uncertainty estimation of satellite-retrieved soil moisture products [J]. Remote Sensing, 2017, 9(8): 847.
- [18] Liao M, Zhang P, Yang G L, et al. Preliminary validation of the refractivity from the new radio occultation sounder GNOS/FY-3C [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2016, 9(2): 781-792.
- [19] Cui Y K, Long D, Hong Y, et al. Validation and reconstruction of FY-3B/MWRI soil moisture using an artificial neural network based on reconstructed MODIS optical products over the Tibetan Plateau [J]. Journal of Hydrology, 2016, 543: 242-254.
- [20] 徐作敏, 唐世浩, 王昊. 基于变分法的 FY-3C 土壤水分产品适用性分析 [J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(S1): 68-74.
- Xu Z M, Tang S H, Wang H. Applicability analysis of FY-3C's soil moisture based on variational correction method [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(S1): 68-74. (in Chinese)
- [21] Chen Y, Yang K, Qin J, et al. Evaluation of SMAP, SMOS, and AMSR2 soil moisture retrievals against observations from two networks on the Tibetan Plateau [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2017, 122(11): 5780-5792.
- [22] Liu Y Y, van Dijk A I J M, de Jeu R A M, et al. An analysis of spatiotemporal variations of soil and vegetation moisture from a 29-year satellite-derived data set over mainland Australia [J]. Water Resources Research, 2009, 45(7): 4542-4548.
- [23] 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.
- Wan H, Gao S, Guo P. Applicability evaluation of FY-3B remote sensing soil moisture products in the Tibetan plateau [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(4): 132-137. (in Chinese)
- [24] 李瑞娟, 李兆富, 郝睿, 等. 亚洲区域 AMSR2 与 SMOS 土壤水分产品对比研究 [J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(1): 125-135.
- Li R J, Li Z F, Hao R, et al. A regional-scale performance evaluation of SMOS and AMSR2 soil moisture products over Asia [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2019, 34(1): 125-135. (in Chinese)
- [25] Lin L F, Ebtehaj A M, Flores A N, et al. Combined assimilation of satellite precipitation and soil moisture: a case study using TRMM and SMOS data [J]. Monthly Weather Review, 2017, 145(12): 4997-5014.
- [26] Knipper K R, Hogue T S, Franz K J, et al. Downscaling SMAP and SMOS soil moisture with moderate-resolution imaging spectroradiometer visible and infrared products over southern Arizona [J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2017, 11(2): 026021.
- [27] Park S, Im J, Park S, et al. AMSR2 soil moisture downscaling using multisensor products through machine learning approach [A]. 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) [C]. Milan, Italy: IEEE, 2015: 1984-1987.
- [28] Su Z, Wen J, Dente L, et al. The Tibetan Plateau observatory of

- plateau scale soil moisture and soil temperature(Tibet-Obs) for quantifying uncertainties in coarse resolution satellite and model products[J].Hydrology and Earth System Sciences,2011,15(7):2303-2316.
- [29]Chen Y Y,Yang K,Qin J,et al.Evaluation of AMSR-E retrievals and GLDAS simulations against observations of a soil moisture network on the central Tibetan Plateau[J].Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2013,118(10):4466-4475.
- [30]邓明珊,孟宪红,马英赛,等.基于 GLDAS 产品的青藏高原土壤湿度特征分析[J].干旱气象,2018,36(4):595-602.
- Deng M S,Meng X H,Ma Y S,et al.Analysis on soil moisture characteristics of Tibetan Plateau based on GLDAS [J].Journal of Arid Meteorology,2018,36(4):595- 602.(in Chinese)
- [31]Khodayar S,Coll A,Lopez-Baeza E.An improved perspective in the spatial representation of soil moisture:potential added value of SMOS disaggregated 1 km resolution "all weather" product[J].Hydrology and Earth System Sciences,2019, 23(1):255-275.