

引用格式: Fan Yue, Qiu Jianxiu, Dong Jianzhi, *et al.* Error Characteristics of Microwave Soil Moisture Products based on Triple Collocation and Its Spatial-temporal Pattern[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2020, 35(1): 85-96. [范悦, 邱建秀, 董建志, 等. 基于 Triple Collocation 方法的微波土壤水分产品不确定性分析与时空变化规律研究[J]. 遥感技术与应用, 2020, 35(1): 85-96.]  
doi: 10.11873/j.issn.1004-0323.2020.1.0085

## 基于 Triple Collocation 方法的微波土壤水分产品不确定性分析与时空变化规律研究

范悦<sup>1,2,3</sup>, 邱建秀<sup>1,2,3</sup>, 董建志<sup>4</sup>, 张小虎<sup>5</sup>, 王大刚<sup>1,2,3</sup>

- (1. 中山大学地理科学与规划学院 广东省城市化与地理环境空间模拟重点实验室, 广东 广州 510275;  
2. 广东省地质过程与矿产资源探查重点实验室, 广东 广州 510275;  
3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519000;  
4. 美国农业部 水文遥感实验室, 马里兰州 20705;  
5. 南京农业大学国家信息农业工程技术中心 南京农业大学, 江苏 南京 210095)

**摘要:** 土壤水分是连接地—气系统的重要状态变量, 微波遥感为准确获取大面积土壤水分信息提供新的技术手段。准确解读微波土壤水分产品质量、深入了解其误差的时空分布特征是通过数据同化等方法将其融入陆面模型, 从而成功应用于地球科学领域的重要先决条件。基于 Triple Collocation(TC)方法检验了风云三号C星(FY-3C)、土壤水分主被动卫星(SMAP)及高级微波散射计(ASCAT)这3种常用微波土壤水分产品在中国陆域的质量, 并通过 Hovmöller 图评估了3套产品捕捉土壤水分时空变化的能力。结果显示: ① TC方法得到的分析结论与地面实测资料的验证结果一致, 整体上 SMAP 优于 ASCAT 和 FY-3C, 不同土地利用类型下 SMAP 信噪比均最高, 三者的 TC 信噪比分别为 1.668 dB、-0.316 dB 和 -2.182 dB, 同时三者与实测值的相关系数分别为 0.514、0.501 和 0.209; ② FY-3C 和 ASCAT 产品的精度在中国西北地区整体优于南部地区, 3种产品均能较好地刻画土壤水分随纬度和经度变化的情况, 3种产品展现的季节波动整体高于实测, 其中 FY-3C 的季节波动在3种产品中最为剧烈; ③ FY-3C 的质量比 ASCAT 和 SMAP 更易受到植被影响, 但在裸土区 FY-3C 优于 ASCAT。本研究基于 TC 分析提供了全国范围内3种主流微波土壤水分产品的误差和信噪比的空间分布, 并通过 Hovmöller 图评估了其描述土壤水分时空变化的能力。研究结论可为微波土壤水分产品的同化研究提供一定参考。

**关键词:** 风云三号; SMAP; ASCAT; Triple Collocation; 土壤水分

**中图分类号:** TP75 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2020)01-0085-12

### 1 引言

土壤水分在全球气候变化研究、水文预报和农业干旱监测等领域中有着至关重要的作用。具体而言, 土壤水分通过调节土壤呼吸影响着土壤碳储

存量, 从而成为气候变化预测的一个重要因子<sup>[1]</sup>; 在水文领域, 土壤水分可为水文模型的径流预测和洪水预报提供准确的初始状态<sup>[2]</sup>; 在农业领域, 土壤水分是开展农业干旱监测、作物估产、灌区探测和灌溉量估算等<sup>[3-5]</sup>所需的重要信息。因此, 获取大面积、

收稿日期: 2019-12-20; 修订日期: 2020-01-17

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41971031), 国家自然科学基金青年项目(41501450)。

作者简介: 范悦(1994—), 女, 重庆开州人, 硕士研究生, 主要从事遥感土壤水分产品验证研究。E-mail: fany26@mail2.sysu.edu.cn。

通讯作者: 邱建秀(1986—), 女, 福建上杭人, 博士, 副教授, 主要从事水文数据同化、微波土壤水分反演研究。E-mail: qiu Jianxiu@mail.sysu.edu.cn。

长时间序列的高精度土壤水分数据对上述相关领域研究影响深远。遥感手段的日臻成熟为获取高质量的土壤水分数据提供了有力保障。目前应用较多的遥感土壤水分产品主要分为被动微波产品、主动微波产品以及主—被动融合产品。被动微波产品主要包括国外的 AMSR-E<sup>[6]</sup>、AMSR2<sup>[7]</sup>、SMOS<sup>[8]</sup>、SMOS-IC<sup>[9-10]</sup>、SMAP\_P<sup>[11]</sup>、Aquarius<sup>[12]</sup>和我国的风云(FY)气象卫星系列产品,主动微波产品主要有 ASCAT<sup>[13]</sup>、SMAP\_A<sup>[11]</sup>等,主—被动融合产品则主要有 ESA CCI<sup>[14]</sup>、SMAP\_AP<sup>[11]</sup>等。而将遥感土壤水分产品成功应用于不同研究领域的前提条件,在于准确辨识各产品的误差特性及其随时空变化的规律。

目前,土壤水分产品的不确定性分析方法主要有两类。一是传统的基于土壤水分原位观测进行验证,其优点在于可以将地面实测值作为“真值”验证卫星土壤水分产品,获得的结果准确度较高。缺点则在于大范围的实测值获取成本高,长时间序列数据难以获取,观测站点所代表的点尺度和遥感产品的区域尺度难以匹配(对于空间分辨率较低的微波产品,尺度不匹配问题更为突出)<sup>[15]</sup>,这些都增加了实测验证的困难。第二类则不依赖于地面的土壤水分实测数据,其发展历程从原来较为单一的时间序列分析和较为主观的空间一致性分析,演化至具有严密数学机理的三重配置(Triple Collocation, TC)<sup>[16]</sup>法及同化增量法<sup>[17]</sup>。在验证采用的数据源方面,倾向于采用多源遥感观测等辅助数据(热红外遥感土壤水分产品、植被指数等)对微波遥感数据的附加价值(Added Value)进行评估<sup>[18-19]</sup>。例如 Crow 等<sup>[20]</sup>采用同化 AMSR-E 后得到的根层土壤水分与遥感植被指数 NDVI 的滞后秩相关系数的改进程度这一指标来评估微波数据的精度。在研究尺度方面, Miralles 等<sup>[21]</sup>采用遥感数据、陆面模型模拟及地面稀疏点观测 3 套误差独立的数据,采用 TC 方法确定了单点观测向遥感观测的尺度上推(Up-scaling)过程中产生的点观测随机采样误差,定量化校正了采样误差对验证结果的影响,从而为无资料区(Ungaaged Basin)及资料稀缺区进行土壤水分验证提供了新的思路。

TC 法基于相互独立且与真实值线性相关的 3 套数据估算土壤水分时间序列的信噪比、误差值和相关系数,不需要大面积、高密度的实测数据,对无观测资料区的土壤水分验证尤为重要。此外,该方

法的复杂程度适中,介于地面验证与同化增量法之间,便于在实际应用中开展。尽管该方法基于不同的组合条件下计算得出的误差结果并非唯一值,但这不影响各产品之间的相互比较。因此,结合地面验证法与 TC 法这两种验证方法综合地分析遥感产品不确定性可以获得对遥感数据更为准确的评估结果。

已有部分研究通过地面站点观测或 TC 方法验证不同区域的遥感土壤水分产品。如 Hajj 等<sup>[22]</sup>在法国西南部通过实测站点验证 SMAP、SMOS、ASCAT 的土壤水分产品,发现 ASCAT 和 SMAP 产品的精度相当,两者与地面观测值的相关系数  $R$  都约为 0.57;而 Al-Yaari 等<sup>[23]</sup>在法国西南部通过实测站点的观测验证了 ASCAT 与地面站点的相关性约为 0.72。Miyaoka 等<sup>[24]</sup>通过 TC 法计算出 ASCAT 在全球的误差和信噪比分布,并认为 ASCAT 比 SMOS 更适用于数据同化。Chen 等<sup>[25]</sup>通过 TC 法对比了 SMAP、ASCAT 和 SMOS 在全球的误差分布,认为 SMAP 在 3 种数据中最优。然而,目前的验证/对比研究大多集中于 SMAP、SMOS、AMSR2 和 ASCAT 等产品,对于风云系列(尤其是 FY-3C)的土壤水分产品误差研究比较少。因此,本文旨在结合地面验证法和 TC 法评估并对比 FY-3C、SMAP、ASCAT 这 3 套主流土壤水分产品,获取全国范围内产品的误差和信噪比空间分布,以期为同化以上产品进入生态水文模型、碳循环模型等提供参考和依据。

## 2 数据与方法

### 2.1 卫星数据

#### 2.1.1 SMAP 土壤水分数据

土壤水分主被动卫星(SMAP)<sup>[11]</sup>于 2015 年由美国国家航空航天局发射成功,升—降轨时间分别为当地时间晚上 6 点和早上 6 点。其搭载的 L 波段微波辐射计可通过单通道 V 极化的反演算法提供空间分辨率为 36 km 的土壤水分日产品<sup>[26]</sup>。考虑到清晨地表温度在二维平面和垂直剖面上更为均匀<sup>[27]</sup>,造成 SMAP 降轨数据质量通常优于升轨数据<sup>[25]</sup>,因此本研究选取 SMAP L3 级 36 km 空间分辨率的降轨(清晨)土壤水分数据。为统一各卫星的土壤水分产品时间序列,选取的 SMAP 产品时间覆盖范围为 2015 年 3 月 31 日至 2018 年 6 月 30 日。由于该时段内 SMAP 只有微波辐射计正常工作,故只采用 SMAP 卫星的被动微波土壤水分产品。

### 2.1.2 FY-3C 土壤水分数据

风云三号C星(FY-3C)是我国于2013年发射的第二代极轨气象卫星,升—降轨时间分别为当地时间晚上10:00和早上10:00。该产品由其搭载的微波成像仪(MWRI)观测到的X波段亮温数据反演生成,反演算法为改进的单通道算法,并基于Qp模型校正了地表粗糙度的影响<sup>[28-29]</sup>。本研究采用的FY-3C日数据产品由中国气象局国家卫星气象中心提供,空间分辨率为25 km,研究选取FY-3C MWRI L2级升轨(夜间)数据,并且重采样到与SMAP相同的36 km空间分辨率。

### 2.1.3 ASCAT 土壤水分数据

高级微波散射计(ASCAT)是搭载于METOP卫星的主动微波传感器,工作波段为C波段。本文的ASCAT土壤水分数据提取自欧空局气候变化倡议项目(ESA CCI)的土壤水分产品(v04.4),该产品由主动微波产品、被动微波产品和主—被动融合产品组成。其中,主动产品中包含空间分辨率为 $0.25^\circ$ 的土壤水分饱和度数据<sup>[14]</sup>,原始数据通过变化检测方法<sup>[30]</sup>反演得到。采用ESA CCI同时提供的来自于世界土壤数据库(HWSD)的土壤孔隙度信息将其转换为土壤体积含水量。由于温度对主动微波反演土壤水分的影响甚微<sup>[31]</sup>,所以此产品融合了升轨和降轨的数据。时间序列为2015年3月31日至2018年6月30日,并同样重采样至36 km空间分辨率。

### 2.1.4 MERRA2 土壤水分数据

再分析数据是由NASA全球建模与同化办公室发布的MERRA2(Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications)大气再分析数据集<sup>[32]</sup>。其通过GEOS-5(Goddard Earth Observing System Model)同化实地观测数据和卫星观测数据,提供空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.625^\circ$ 的表层5 cm土壤水分模拟值。本研究选取2015年3月31日至2018年6月30日期间的日均土壤水分值,并将其重采样至36 km空间分辨率。

## 2.2 地面观测数据

地面实测数据来源于国家气象局共2 043个观测站点,各站点在10、20、30、40和50 cm土壤深度进行逐小时的土壤体积含水量观测,观测仪器为DZN1、DZN2和DZN3型自动土壤水分观测仪,受可获取的观测数据长度限制,研究中采用2017~2018年期间的观测资料。为匹配遥感数据的空间分辨率,研究中计算微波数据各像元内对应的所有

站点序列的平均值,以提高验证精度。各站点只选取表层10 cm的土壤水分数据,并进行逐日平均。图1为全国实测站点空间分布以及代表性站点的位置。代表性站点的选取详见3.1节。

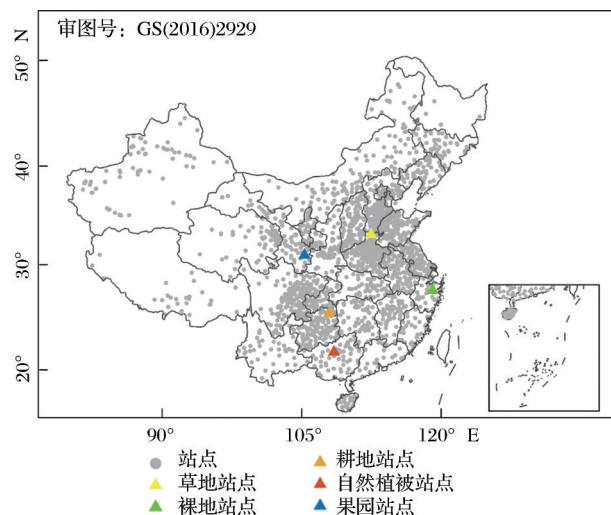


图1 全国实测站点分布图  
Fig.1 Distribution of ground sites over China

## 2.3 辅助数据

### 2.3.1 土地利用类型

土地利用数据是中分辨率成像光谱仪(MODIS)2016年500 m国际地圈生物圈(IGBP)土地利用分类产品(MCD12Q 1.006),将其重采样至36 km空间分辨率。进一步将常绿针叶林(Evergreen Needleleaf Forests)、常绿阔叶林(Evergreen Broadleaf Forests)、落叶针叶林(Deciduous Needleleaf Forests)、落叶阔叶林(Deciduous Broadleaf Forests)和混交林(Mixed Forests)合并为森林;稀树草原(Savannas)和多树草原(Woody Savannas)合并为稀树草原;耕地(Croplands)和耕地/自然植被镶嵌(Cropland/Natural Vegetation Mosaics)合并为耕地。共分为森林、稀树草原、草地、耕地和裸地五大类。

### 2.3.2 叶面积指数

叶面积指数(LAI)数据采集自时间分辨率为4 d的MODIS 500 m叶面积指数产品(MCD15A3H.006),时间选取同土壤水分产品时间范围一致,计算2015年3月31日至2018年6月30日的平均值,最后将其重采样至36 km空间分辨率。

## 2.4 Triple collocation 方法

运用TC方法验证卫星土壤水分产品需满足4个前提条件<sup>[33]</sup>:①假设3个卫星土壤水分产品均和同一土壤水分真值线性相关;②卫星土壤水分产品



的时间序列应具有稳定性,即均值和方差不随时间变化而变化;③卫星土壤水分产品的误差与土壤水分真值误差相互独立;④3个卫星土壤水分产品间误差相互独立。因此,其误差模型可写作如下<sup>[34]</sup>:

$$Y_i = Y_i' + \varepsilon_i = \beta_i t + \varepsilon_i \quad (1)$$

其中: $t$ 代表土壤水分真值, $\varepsilon_i$ 代表随机误差, $\beta_i$ 代表卫星土壤水分相对于真值的偏差系数, $Y_i$  ( $i \in \{1, 2, 3\}$ )代表3个相互独立的时间序列集。

根据协方差计算公式,在前提假设③和④的条件下,协方差可简化如下:

$$C_{ij} = \text{Cov}(Y_i, Y_j) = \begin{cases} \beta_i \beta_j \sigma_i^2, & \text{for } i \neq j \\ \beta_i^2 \sigma_i^2 + \sigma_{\varepsilon_i}^2, & \text{for } i = j \end{cases} \quad (2)$$

其中: $\sigma_{\varepsilon_i}^2$ 是随机误差方差。引入变量 $\lambda_i = \beta_i \sigma_i$ ,等式(2)可以简写为:

$$C_{ij} = \begin{cases} \lambda_i \lambda_j, & \text{for } i \neq j \\ \lambda_i^2 + \sigma_{\varepsilon_i}^2, & \text{for } i = j \end{cases} \quad (3)$$

因此,各卫星土壤水分产品的误差值 $\sigma_{\varepsilon_i}$ 可估计为:

$$\sigma_{\varepsilon_1} = \sqrt{C_{11} - \frac{C_{12}C_{13}}{C_{23}}} \quad (4)$$

$$\sigma_{\varepsilon_2} = \sqrt{C_{22} - \frac{C_{12}C_{23}}{C_{13}}} \quad (5)$$

$$\sigma_{\varepsilon_3} = \sqrt{C_{33} - \frac{C_{13}C_{23}}{C_{12}}} \quad (6)$$

基于协方差方法,通过变量 $\lambda_i$ 可同时推算出信噪比<sup>[33]</sup>:

$$SNR_{ub_i}(\text{dB}) = 10 \lg(SNR_{ub_i}) = 10 \lg\left(\frac{\beta_i^2 \sigma_i^2}{\sigma_{\varepsilon_i}^2}\right) \quad (7)$$

其中: $SNR_{ub_i}$ 代表取对数之后的信噪比,单位为dB,

$SNR_{ub_i}$ 指的是无偏信噪比( $SNR_{ub_i} = \frac{\text{Var}(Y_i')}{\text{Var}(\varepsilon_i)}$ )。

为满足前提假设③和④,本研究中配置的每一组三分量数据集原则上由主动微波数据、被动微波数据和再分析数据共同构成,即:SMAP-ASCAT-

MERRA2 或 FY3C-ASCAT-MERRA2。而为满足前提假设②,本研究对原始时间序列进行预处理,计算每天的土壤水分值与以该天为中心的前后15 d的滑动平均之差,从而组成移除季节信号的新的时间序列。计算TC误差和信噪比时只保留样本数目超过100且与另两套产品的时间序列相关性都 $\geq 0.1$ 的像元。

## 2.5 Hovmöller 图

Hovmöller图是同时显示研究变量(如本研究中为土壤水分)时空分布特征的平面图<sup>[35]</sup>,可以直接显示土壤水分在一段时间内如何随经度或纬度变化。考虑到地面观测数据的时间覆盖范围有限及高纬地区冰雪期内土壤水分缺值的情况,本研究只采用Hovmöller图绘制并分析2017年生长季内,各微波产品与地面实测土壤水分的时一空分布(季节—纬度和季节—经度)的异同。

## 3 结果分析

### 3.1 基于地面实测数据的验证

基于全国2 043个地面观测站点在2017~2018年生长季期间的土壤水分实测资料对FY-3C、SMAP和ASCAT微波产品进行验证,并只保留与地面实测的相关系数通过0.05显著性水平检验的样本进行统计,结果如图2所示(其中SMAP、FY-3C和ASCAT的样本数分别为1 274、961和1 354)。总体而言,SMAP具有最高相关系数R(0.514),最低平均偏差Bias( $-0.002 \text{ m}^3/\text{m}^3$ )和最小无偏均方根误差ubRMSE( $0.058 \text{ m}^3/\text{m}^3$ )。ASCAT与实测数据也具有较好的相关性,其平均相关系数为0.501,ubRMSE为 $0.065 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ,仅次于SMAP。但其平均偏差( $0.029 \text{ m}^3/\text{m}^3$ )在三者中最高,这是由于本研究为将ASCAT从原始的土壤水分饱和度转换为体积含水量,采用了HWSD的土壤孔隙度产品,这可

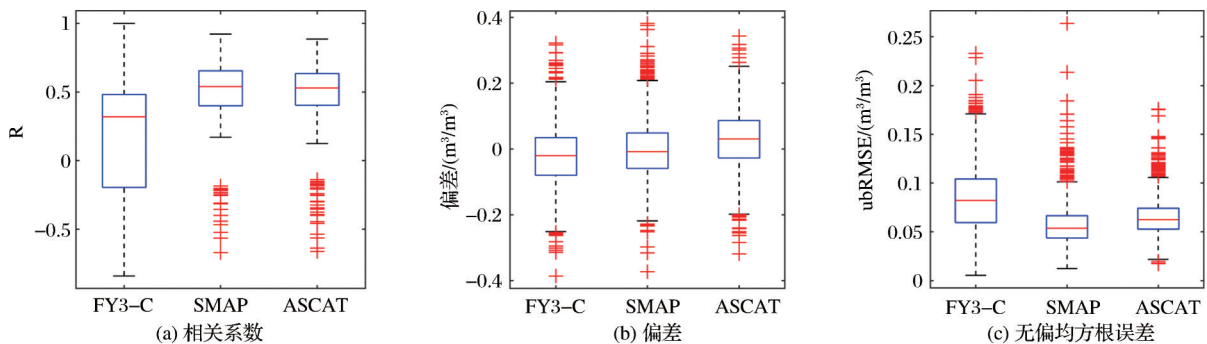


图2 基于地面实测的验证结果(只保留相关系数通过0.05显著性水平检验的站点)

Fig.2 Boxplot of in-situ validation (only include sites with R significant at 0.05 level)

能是导致 ASCAT 高估土壤水分的原因之一<sup>[36]</sup>。而 FY-3C 与地面观测值的相关系数最低,为 0.209, ubRMSE ( $0.085 \text{ m}^3/\text{m}^3$ )也高于其他卫星。FY-3C 的平均偏差为  $-0.021 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ,表明其整体上对土壤水分实测值低估,但低估程度不显著。

其次,本研究选取不同地表覆盖类型的代表站点对比微波产品与实测值的时间序列。要求选取的站点在研究时段内具有尽可能完整的观测序列,故从满足该条件的各类站点中随机选取一个代表站点进行展示。图 3 分别为 2017 年生长季期间草

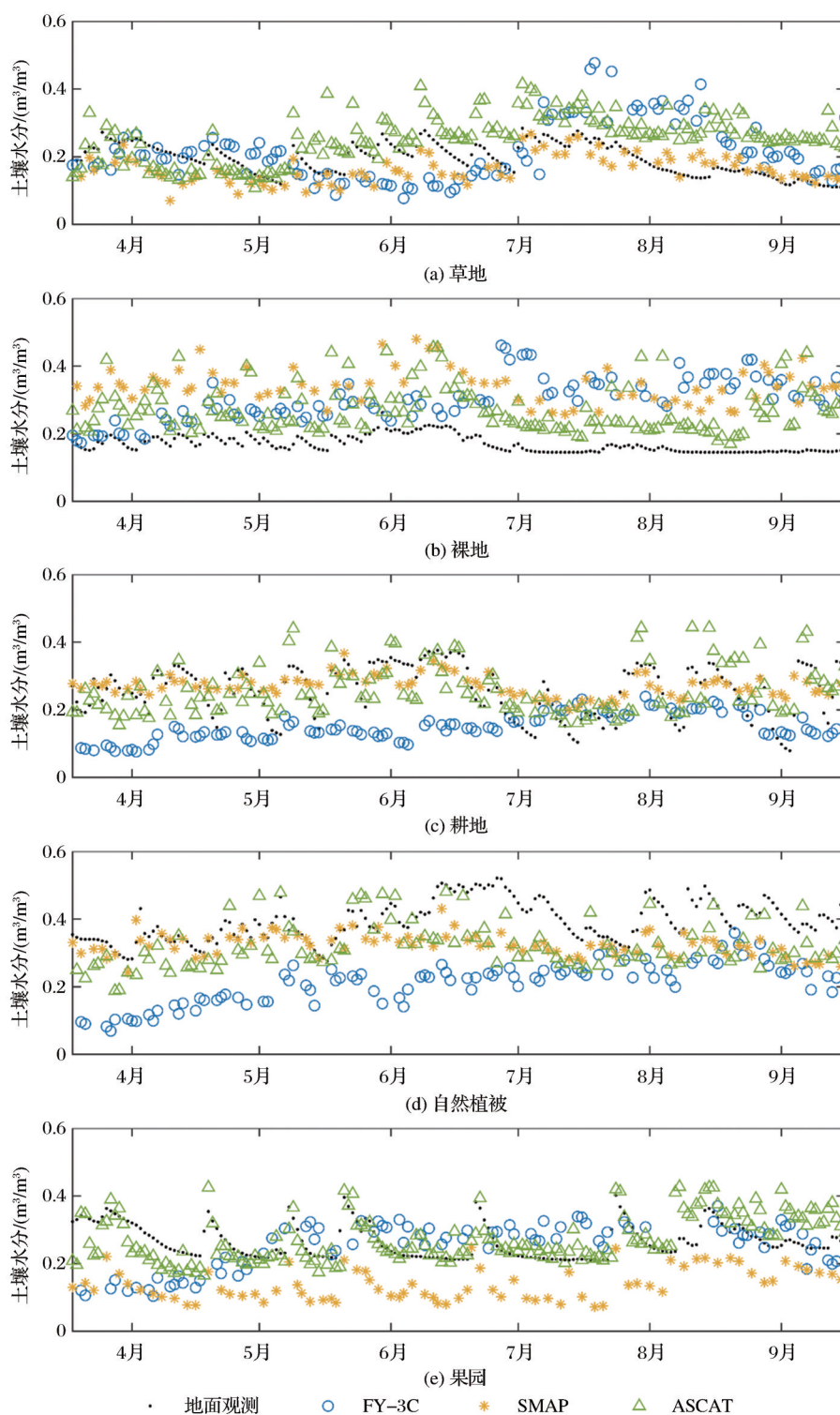


图 3 2017 年生长季期间不同下垫面类型的地面实测时序与微波土壤水分时序对比

Fig.3 Evolution of microwave soil moisture retrievals and ground observation during growth season of 2017

地、裸地、耕地、自然植被和果园站的具体情况。当下垫面为草地时,SMAP和ASCAT与实测数据波动吻合度较高,FY-3C则在6~7月明显低于实测值,而在7~8月明显高于实测值。裸地站微波产品均高于实测数据,呈现出明显的高估现象。当地表覆盖为自然植被时,地面观测值均高于微波产品,但各微波产品的波动情况与实测数据较为吻合。当地表覆盖为人工用地(耕地和果园)时,站点土壤水分展现出由灌溉引起的明显波动。耕地站点ASCAT和SMAP与实测数据波动范围类似且数值较吻合,FY-3C则在7月以前明显低估实测值。果园站点ASCAT和FY-3C与实测数据较为吻合,但FY-3C在5月前明显低于实测土壤水分。

### 3.2 基于TC方法的不确定性分析

如2.4节所述,本研究基于SMAP-ASCAT-MERRA2和FY3C-ASCAT-MERRA2两个组合进行计算,因此在进行TC误差分析之前应先验证两个组合得出的ASCAT分析结果的相关性,结果如图4所示。ASCAT基于SMAP组合和基于FY-3C得出的误差值和信噪比都显著相关( $p < 0.001$ ),相关系数R分别为0.81和0.44。结果表明TC结果具有稳定性,在本研究的后续分析中ASCAT的误差值和信噪比均基于ASCAT-SMAP-MERRA2这一组合。

基于TC分析,各微波土壤水分产品在全国的信噪比和误差值空间分布如图5和图6所示。从整体上看,SMAP数据质量最优,其信噪比为正值的像元数占全部有值区域的81%,这表明SMAP在中国大多区域数据质量良好,较少包括干扰信息。其

全国平均信噪比为1.668 dB,在3种产品中最高,对应于最小的平均误差 $0.025 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。ASCAT的信噪比中正值占比为42%,其全国平均信噪比为-0.316 dB,稍次于SMAP。FY-3C信噪比为正值的比例仅为23%,全国平均信噪比为-2.182 dB。FY-3C和ASCAT在中国区域正信噪比占比不足一半,且其全国范围内的平均信噪比均小于零,表明这两个产品整体上包含了更多的干扰信息。综上,TC分析结果表明,与实测验证结果一致,在中国区域,SMAP总体优于ASCAT和FY-3C。

从空间分布上看,SMAP在大部分区域信噪比均为正值。FY-3C和ASCAT均表现为在西北干旱一半干旱区域比中国南部具有更高的信噪比,其中FY-3C表现则更为明显,其在西南地区的信噪比几乎都为负值。误差值总体上呈现出沿海区域和南部地区误差值高于内陆(如新疆)区域。并且ASCAT在我国南部各省(贵州、湖南、江西、浙江)的误差值明显高于另两套被动微波产品,这可能与ASCAT对土壤水分的高估有关。根据3.1节的实测验证结果可知,ASCAT的平均偏差为正值且最大,其对土壤水分有明显的高估,土壤水分值越高,误差值相应地也可能更大。

### 3.3 不同土地利用类型的产品不确定性分析

3种微波产品在不同土地利用类型下的信噪比统计结果如图7所示。其中SMAP在各种土地利用类型下的信噪比均为最优,SMAP和FY-3C的平均信噪比分别在草地和裸地达到最高,分别为2.084 dB和1.089 dB,其中裸地也是FY-3C平均信噪比为正值的唯一地类。这两种被动微波产品信噪比最差

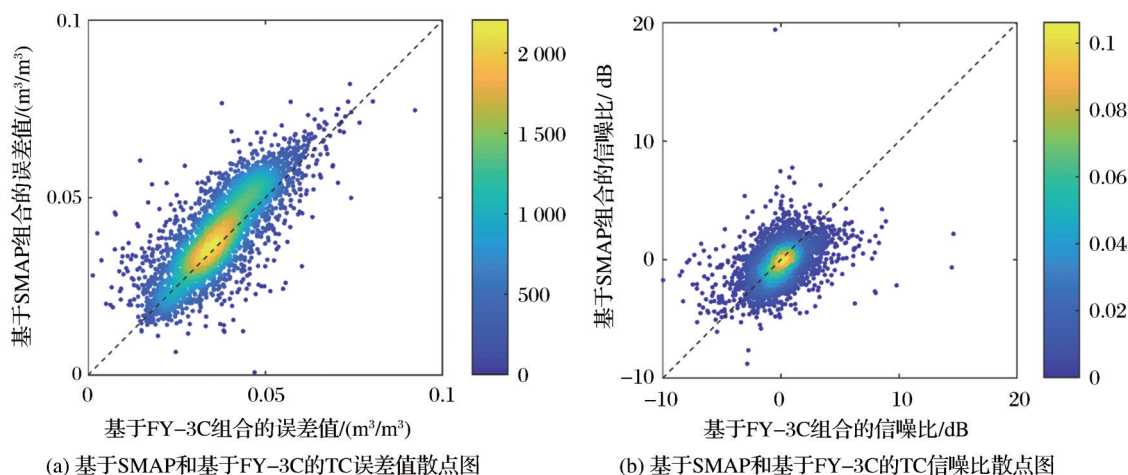


图4 基于SMAP和基于FY-3C的TC结果散点图,颜色代表数据点的核密度估计结果

Fig.4 Scatter plot of TC results based on SMAP and FY-3C, color shading is kernel density estimation



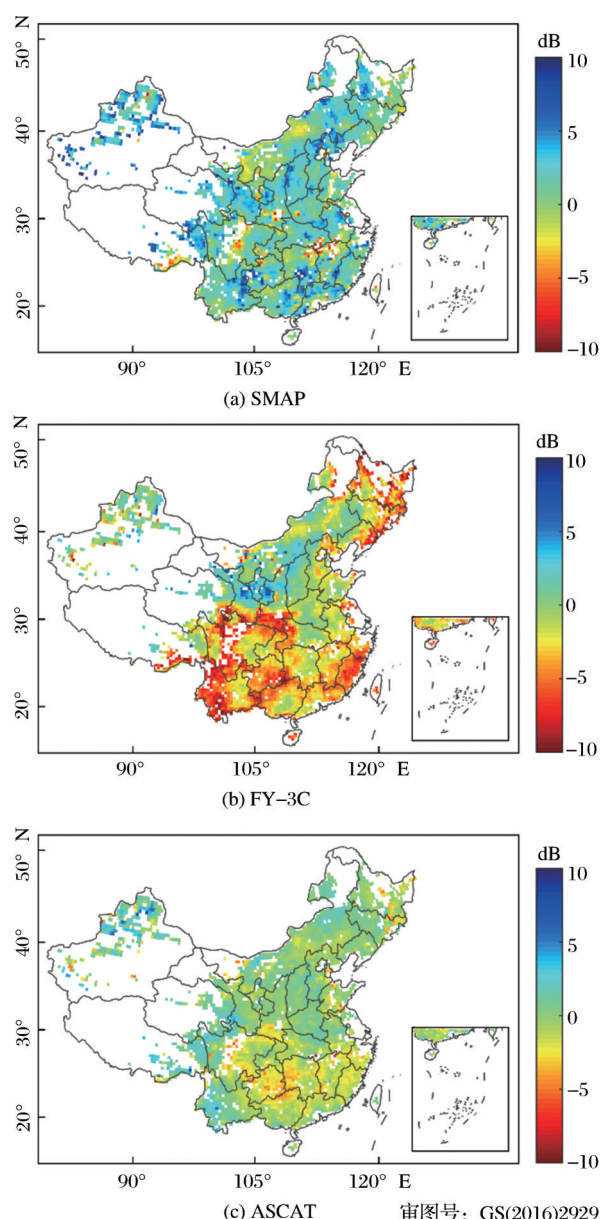


图 5 3 种微波产品的信噪比空间分布图  
Fig.5 Spatial distribution of TC-based SNR estimates of three microwave products

的地类皆为森林,两者在森林中的平均信噪比分别为 1.022 dB 和-4.294 dB。随着植被覆盖度的降低, FY-3C 信噪比的增幅可达 5.384 dB,这表明 FY-3C 受植被影响明显。主动微波 ASCAT 质量最好的区域为草地,其次是裸地,最差的是稀树草原。ASCAT 在草地和稀树草原的平均信噪比相差 1.418 dB,远低于 FY-3C,说明 ASCAT 受植被影响不如 FY-3C 明显,其产品精度同时受到下垫面其他因素如土壤粗糙度的影响。

### 3.4 微波土壤水分产品的时-空变化分析

在深入了解微波土壤水分产品不确定性的基

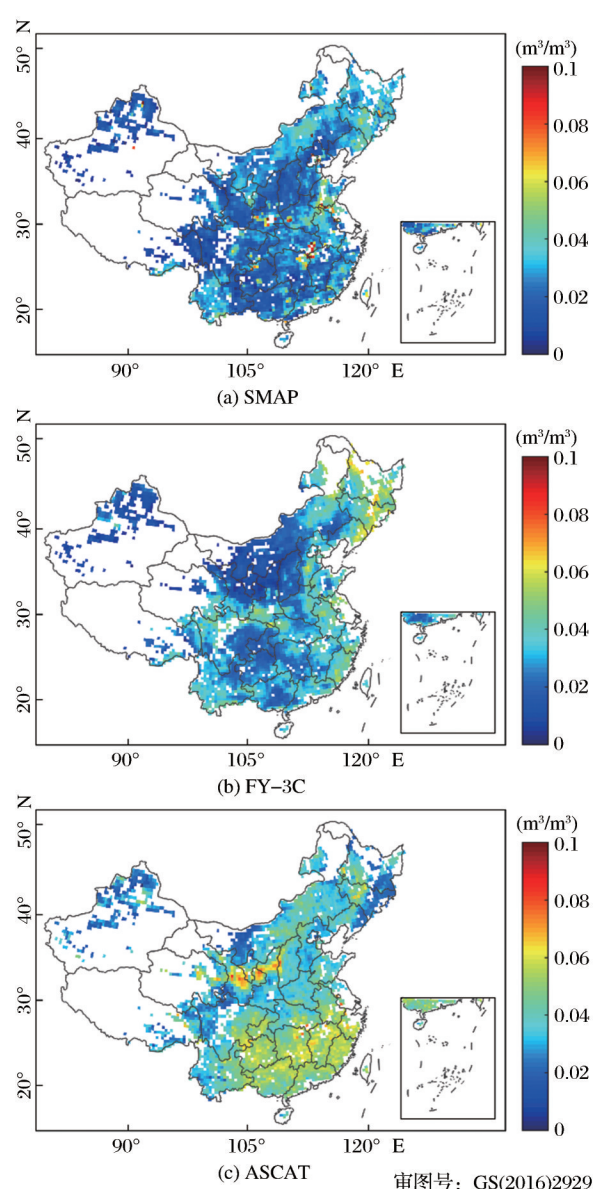


图 6 3 种微波产品的误差值空间分布图  
Fig.6 Spatial distribution of TC-based error estimates of three microwave products

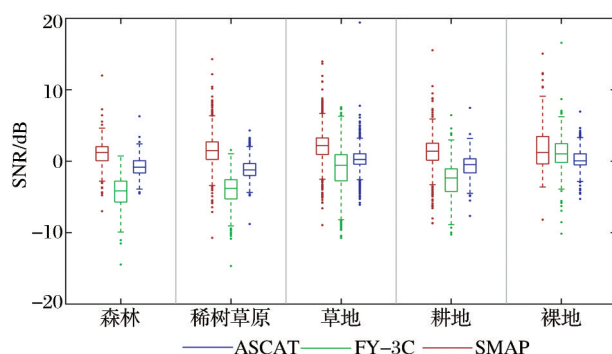


图 7 不同土地利用类型下各微波土壤水分产品的信噪比  
Fig.7 SNR of microwave soil moisture products with different land use types

础上,本节进行土壤水分产品的时—空变化规律分析。图8展示的是土壤水分的季节—纬向变化规律,总体而言,各微波产品与地面实测的季节—纬向变化规律一致,其纬向梯度和季节变化分别反映距海洋远近和海陆季风带来的降水差异。具体来看,地面观测数据表明25°N以南区域土壤水分的季节变化不明显,SMAP在此区域的季节变化与实测数据较为吻合,但SMAP土壤水分反演值明显高于实测,且在3套微波产品中最高。25°~50°N之间,FY-3C的纬向梯度和季节波动明显强于SMAP和ASCAT,并刻画了30°~35°N区域在8月出现的湿度中心。50°N以北对应黑龙江北部和内蒙古北部少数地区,地面站点在此区域出现较多缺测值,FY-3C与ASCAT反演结果认为该地区的湿润中心从5月延续至9月,这点与SMAP有所不同。

图9展示土壤水分的季节—经向变化,微波产品和实测土壤水分在100°E以西(新疆、西藏、甘肃

和青海等地)均明显低于中部和东部地区,同样也反映海陆季风引起的降水差异造成土壤水分的不同。但3套产品所刻画的湿度中心在经度和时间上均有所不同,其中SMAP与FY-3C体现的湿度中心在数值范围上较接近,但分别出现在130°E以东和120°~130°E之间,时间上分别出现在4~8月和5~9月;ASCAT所刻画的湿度中心在130°E附近,时间出现在6~9月。总体而言,3套微波产品均比实测土壤水分变化更明显,而与季节—纬向变化类似,FY-3C在3套产品中的经向梯度和季节变化也最为强烈。

## 4 讨论

由不同土地利用类型下的信噪比分析结果可知,SMAP和FY-3C信噪比最差的类型为森林,最好的分别为草地和裸地,而ASCAT最差的为稀树草原。为更深入探讨植被对3套微波产品的影响,

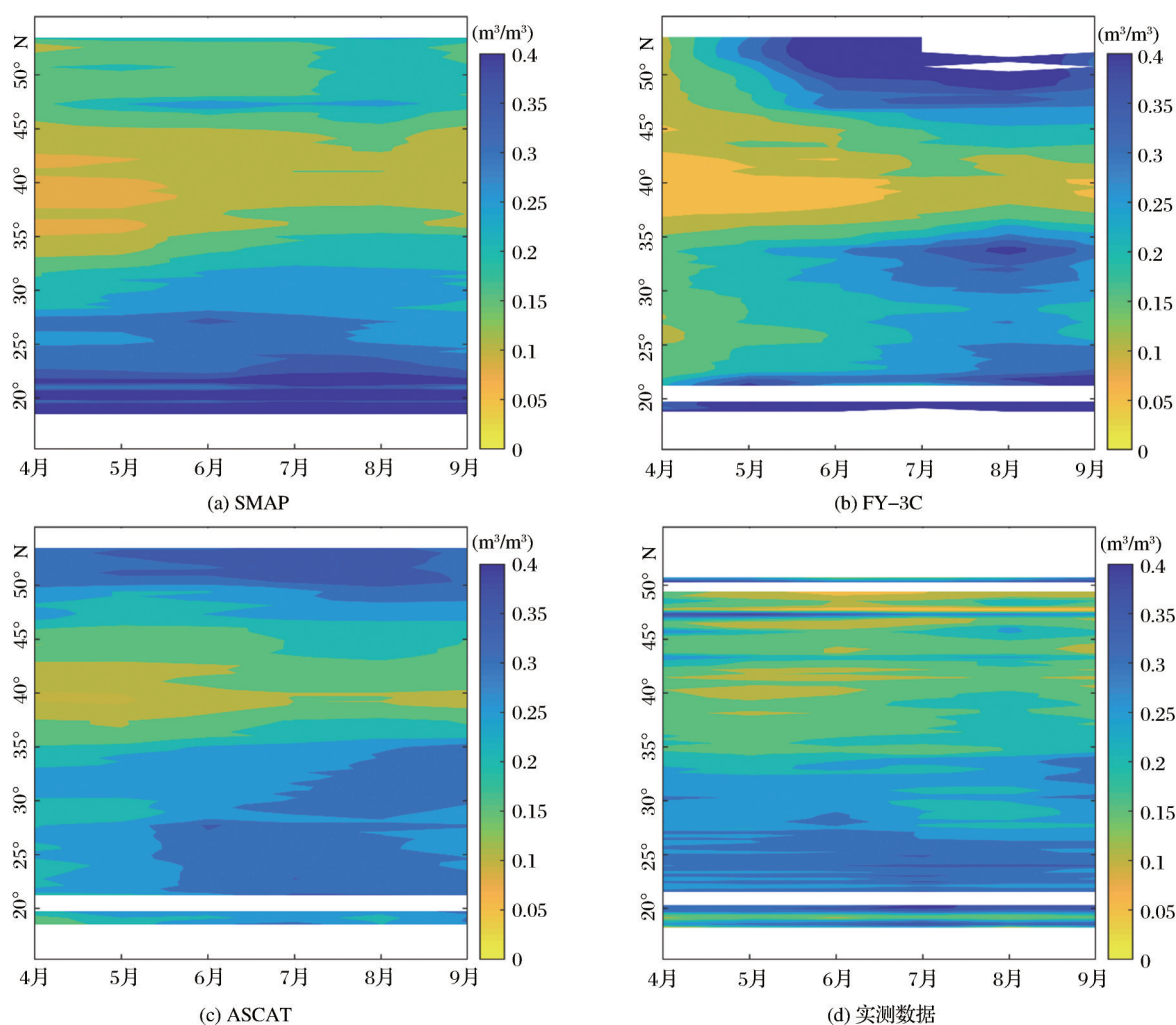


图8 土壤水分序列季节—纬向分布

Fig.8 Seasonal-latitudinal distribution of soil moisture



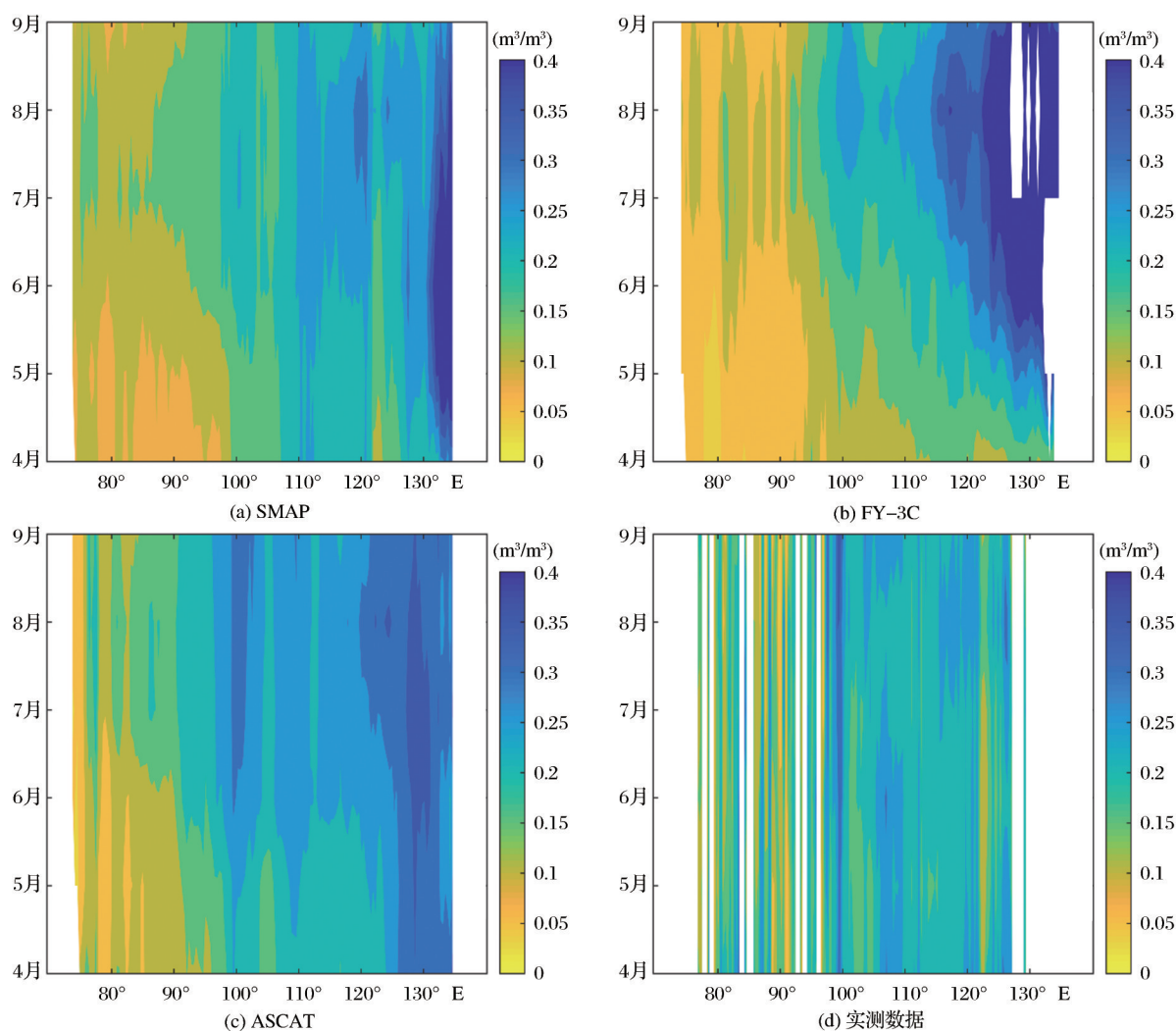


图 9 土壤水分序列季节-经向分布

Fig.9 Seasonal-longitudinal distribution of soil moisture

本节分析不同等级植被覆盖下各微波产品的表现情况。植被分级的原则为确保每一级都有一定数量的样本,因此按照 25%、50%、75% 分位数将多年平均 LAI 划分为 0~0.26(极低植被覆盖), 0.26~0.61(低植被覆盖), 0.61~1.15(中等植被覆盖), 1.15~4.74(高植被覆盖)共 4 级。

由图 10 所示, SMAP 在不同植被覆盖度下的信噪比均高于 ASCAT 和 FY-3C, 总体上 ASCAT 的信噪比要高于 FY-3C。随着植被覆盖度的增加, 各卫星产品的信噪比都在逐渐降低。但 SMAP 和 ASCAT 随着植被覆盖度增加, 信噪比呈平缓稳定下降趋势。FY-3C 受植被影响最为严重, 随植被覆盖度增加呈急剧下降趋势。但在极低植被区(0~0.26), FY-3C 的平均信噪比略高于 ASCAT, 说明在极低植被覆盖下 FY-3C 的土壤水分信息精度更高。这与 3.3 节中裸地的情况吻合, 即当地表覆盖

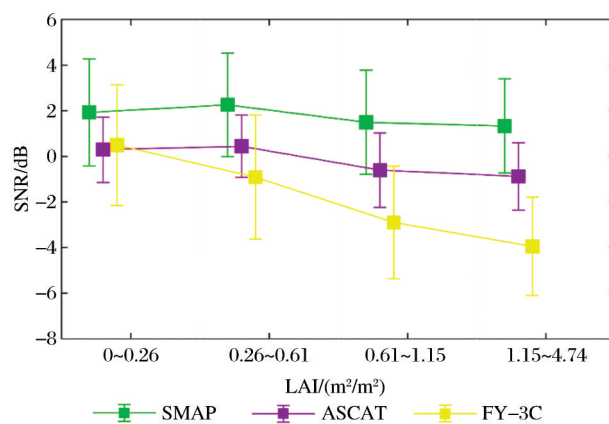


图 10 不同等级植被覆盖度下各微波产品的信噪比

Fig.10 Changes of SNR of microwave products with different levels of vegetation coverage

为裸地时, FY-3C 信噪比的中位数高于 ASCAT。

微波土壤水分产品的误差源除了下垫面植被散射, 还包括辐射频率干扰(Radiation Frequency In-

terference, RFI)、土壤粗糙度的影响、反演算法的不足以及输入参数本身的误差。本研究只讨论了植被对各产品的信号干扰情况,发现 SMAP 在不同植被覆盖度下的质量均最优,这可能与 SMAP 的工作波段及反演算法有关。其工作波段为 L 波段,穿透植被的能力强于 ASCAT 和 FY-3C 所采用的 C 波段和 X 波段,获取的地表信息较多。同时,SMAP 具有专门探测 RFI 的子系统,在反演土壤水分时缓解了 RFI 的很大一部分干扰效应。

## 5 结 语

本研究通过实测验证法和 TC 法评估了 FY-3C、SMAP 和 ASCAT 这 3 种常用微波土壤水分产品在中国陆域的质量,并且得出了各产品的误差和信噪比空间分布图。此外,借助 Hovmöller 图探讨了各产品捕获土壤水分时空动态的能力。主要的结论包括:

(1) 两种验证方法均表明 SMAP 的质量优于 ASCAT 和 FY-3C。3 种产品与地面实测值的相关系数分别为 0.514、0.501 和 0.209;TC 法估算的平均信噪比分别为 1.668 dB、-0.316 dB 和 -2.182 dB。

(2) FY-3C 和 ASCAT 的信噪比在中国整体表现为西北地区高于南部地区的空间分布,ASCAT 的误差值在南方高植被覆盖区较另两种产品更高。

(3) 相较地面实测,3 种产品均能捕捉到土壤水分在纬向和经向上随季节的总体变化,但 3 种产品的纬向和经向梯度有较大差异,刻画的湿度中心在时间上也有所不同。其中 FY-3C 的空间梯度和季节波动最为强烈。

(4) 被动微波产品 SMAP 和 FY-3C 质量最好的区域为草地和裸土等低植被区,最差的地区为森林;随着植被覆盖增加,3 种遥感产品信噪比均呈下降趋势。FY-3C 受植被的影响比 ASCAT 和 SMAP 更大,但在极低植被区表现优异。

本文验证了常用的 FY-3C、SMAP、ASCAT 微波土壤水分产品并进行了相互对比,通过 TC 方法提供了中国陆域各产品的误差和信噪比分布图,此研究结果可为后续数据同化融合微波产品时的误差确定提供参考。

## 参考文献(References):

- [1] Falloon P, Jones C D, Ades M, *et al.* Direct Soil Moisture Controls of Future Global Soil Carbon Changes: An Important Source of Uncertainty[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2011, 25(3): 1-14.
- [2] Pauwels V R N, Hoeben R, Verhoest N E C, *et al.* The Importance of the Spatial Patterns of Remotely Sensed Soil Moisture in the Improvement of Discharge Predictions for Small-Scale Basins Through Data Assimilation[J]. *Journal of Hydrology*, 2001, 251(1): 88-102.
- [3] Zhang X, Qiu J, Leng G, *et al.* The Potential Utility of Satellite Soil Moisture Retrievals for Detecting Irrigation Patterns in China[J]. *Water*, 2018, 10(11): 1505. doi:10.3390/w10111505.
- [4] Kumar S V, Peters-Lidard C D, Santanello J A, *et al.* Evaluating the Utility of Satellite Soil Moisture Retrievals over Irrigated Areas and the Ability of Land Data Assimilation Methods to Correct for Unmodeled Processes[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2015, 19(11): 4463-4478.
- [5] Brocca L, Tarpanelli A, Filippucci P, *et al.* How Much Water is Used for Irrigation? A New Approach Exploiting Coarse Resolution Satellite Soil Moisture Products[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, 73: 752-766.
- [6] 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.
- [7] Kachi M, Naoki K, Hori M, *et al.* AMSR2 Validation Results[C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Piscataway, NJ: IEEE, 2013: 831-834.
- [8] Kerr Y H, Waldteufel P, Wigneron J P, *et al.* Soil Moisture Retrieval from Space: The Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) Mission[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(8): 1729-1735.
- [9] Fernandez-Moran R, Al-Yaari A, Mialon A, *et al.* SMOS-IC: An Alternative SMOS Soil Moisture and Vegetation Optical Depth Product[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(5): 457. doi: 10.3390/rs9050457.
- [10] Fernandez-Moran R, Wigneron J P, De Lannoy G, *et al.* A New Calibration of the Effective Scattering Albedo and Soil Roughness Parameters in the SMOS SM Retrieval Algorithm[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2017, 62: 27-38.
- [11] Entekhabi D, Njoku E G, O'Neill P E, *et al.* The Soil Moisture Active Passive (SMAP) Mission[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2010, 98(5): 704-716.
- [12] Bindlish R, Jackson T, Cosh M, *et al.* Global Soil Moisture from the Aquarius/SAC-D Satellite: Description and Initial Assessment[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, 12(5): 923-927.
- [13] Wagner W, Hahn S, Kidd R, *et al.* The ASCAT Soil Mois-

- ture Product: A Review of its Specifications, Validation Results, and Emerging Applications [J]. *Meteorologische Zeitschrift*, 2013, 22(1): 5-33.
- [14] Liu Y Y, Parinussa R M, Dorigo W A, *et al.* Developing an Improved Soil Moisture Dataset by Blending Passive and Active Microwave Satellite-based Retrievals[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15(2): 425-436.
- [15] Dorigo W A, Scipal K, Parinussa R M, *et al.* Error Characterisation of Global Active and Passive Microwave Soil Moisture Data Sets[J]. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2010, 7(4): 5621-5645.
- [16] Stoffelen A. Toward the True Near-Surface Wind Speed: Error Modeling and Calibration Using Triple Collocation [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1998, 103(C4): 7755-7766.
- [17] Crow W T, Bindlish R, Jackson T J. The Added Value of Spaceborne Passive Microwave Soil Moisture Retrievals for Forecasting Rainfall-runoff Partitioning [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(18). doi: 10.1029/2005GL 023543.
- [18] Hain C R, Crow W T, Mecikalski J R, *et al.* An Intercomparison of Available Soil Moisture Estimates from Thermal Infrared and Passive Microwave Remote Sensing and Land Surface Modeling [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116 (D15). doi: 10.1029/2011JD015633.
- [19] Hain C R, Crow W T, Anderson M C, *et al.* An Ensemble Kalman Filter Dual Assimilation of Thermal Infrared and Microwave Satellite Observations of Soil Moisture into the Noah Land Surface Model[J]. *Water Resources Research*, 2012, 48 (11): W11517.
- [20] Crow W T, Kumar S V, Bolten J D. On the Utility of Land Surface Models for Agricultural Drought Monitoring [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, 16(9): 3451-3460.
- [21] Miralles D G, Crow W T, Cosh M H. Estimating Spatial Sampling Errors in Coarse-scale Soil Moisture Estimates Derived from Point-Scale Observations[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2010, 11(6): 1423-1429.
- [22] El Hajj M, Baghdadi N, Zribi M, *et al.* Evaluation of SMOS, SMAP, ASCAT and Sentinel-1 Soil Moisture Products at Sites in Southwestern France [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(4): 569. doi: 10.3390/rs10040569.
- [23] Al-Yaari A, Dayau S, Chipeaux C, *et al.* The AQUi Soil Moisture Network for Satellite Microwave Remote Sensing Validation in South-Western France [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(11): 1839. doi: 10.3390/rs10111839.
- [24] Miyaoka K, Gruber A, Ticconi F, *et al.* Triple Collocation Analysis of Soil Moisture from Metop-A ASCAT and SMOS Against JRA-55 and ERA-Interim [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, 10(5): 2274-2284.
- [25] Chen F, Crow W T, Bindlish R, *et al.* Global-Scale Evaluation of SMAP, SMOS and ASCAT Soil Moisture Products Using Triple Collocation [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 214: 1-13.
- [26] Chan S K, Bindlish R, O'Neill P E, *et al.* Assessment of the SMAP Passive Soil Moisture Product [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(8): 4994-5007.
- [27] Draper C S, Walker J P, Steinle P J, *et al.* An Evaluation of AMSR - E Derived Soil Moisture over Australia [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(4): 703-710.
- [28] Zhu Y, Li X, Pearson S, *et al.* Evaluation of Fengyun-3C Soil Moisture Products Using In-Situ Data from the Chinese Automatic Soil Moisture Observation Stations: A Case Study in Henan Province, China [J]. *Water*, 2019, 11(2): 248.
- [29] Shi J, Jiang L, Zhang L, *et al.* Physically based Estimation of Bare-Surface Soil Moisture with the Passive Radiometers [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(11): 3145-3153.
- [30] Wagner W, Lemoine G, Rott H. A Method for Estimating Soil Moisture from ERS Scatterometer and Soil Data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 70(2): 191-207.
- [31] Liu Y Y, Dorigo W A, Parinussa R M, *et al.* Trend-Preserving Blending of Passive and Active Microwave Soil Moisture Retrievals [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 123: 280-297.
- [32] Reichle R H, Draper C S, Liu Q, *et al.* Assessment of MER-RA-2 Land Surface Hydrology Estimates [J]. *Journal of Climate*, 2017, 30(8): 2937-2960.
- [33] Gruber A, Su C H, Zwieback S, *et al.* Recent Advances in (Soil Moisture) Triple Collocation Analysis [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016, 45: 200-211.
- [34] Mccoll K A, Vogelzang J, Konings A G, *et al.* Extended Triple Collocation: Estimating Errors and Correlation Coefficients with Respect to an Unknown Target [J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(17): 6229-6236.
- [35] Hovmöller E. The Trough-and-Ridge Diagram [J]. *Tellus*, 1949, 1(2): 62-66.
- [36] Al-Yaari A, Wigneron J P, Dorigo W, *et al.* Assessment and Inter-Comparison of Recently Developed/Reprocessed Microwave Satellite Soil Moisture Products Using ISMN Ground-Based Measurements [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 224: 289-303.



## Error Characteristics of Microwave Soil Moisture Products based on Triple Collocation and Its Spatial-temporal Pattern

Fan Yue<sup>1,2,3</sup>, Qiu Jianxiu<sup>1,2,3</sup>, Dong Jianzhi<sup>4</sup>, Zhang Xiaohu<sup>5</sup>, Wang Dagang<sup>1,2,3</sup>

(1. *Guangdong Provincial Key Laboratory of Urbanization and Geo-simulation, School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;*

2. *Key Laboratory of Mineral Resource & Geological Processes of Guangdong Province, Guangzhou 510275, China;*

3. *Southern Laboratory of Ocean Science and Engineering (Guangdong, Zhuhai), Zhuhai 519000, China;*

4. *USDA-ARS Hydrology and Remote Sensing Laboratory, Beltsville, MD 20705-2350 USA;*

5. *National Engineering and Technology Center for Information Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)*

**Abstract:** Soil moisture is an important state variable connecting the land surface-atmosphere system, and its information can be efficiently acquired by the new technique of microwave remote sensing. Accurate interpretation of the microwave soil moisture products qualities and in-depth understanding of their temporal and spatial distributions are important prerequisites for their successful application in earth science through data assimilation. In this study, three microwave soil moisture products, FengYun-3C (FY-3C), Soil Moisture Active Passive (SMAP) and Advanced Scatterometer (ASCAT), were evaluated over China based on the triple collocation (TC) method. The abilities of three products to obtain temporal and spatial variations of soil moisture were illustrated by Hovmöller diagram. The results show that: (1) SMAP generally outperforms ASCAT and FY-3C, with highest TC-based signal-to-noise ratio (SNR) under different land use types. The TC-based SNRs are 1.668dB, -0.316dB and -2.182dB for SMAP, ASCAT and FY-3C respectively; and their correlation coefficients with ground observations are 0.514, 0.501 and 0.209, respectively. (2) The accuracies of FY-3C and ASCAT in Northwest China are overall higher than those in the southern China. All three products can capture the latitudinal and longitudinal gradients of soil moisture, whereas their seasonal fluctuations are higher than those of in-situ measurements. Among three products, FY-3C shows highest spatial gradient and strongest seasonal fluctuations. (3) FY-3C product performance is more susceptible to vegetation coverage than ASCAT and SMAP, but it outperforms ASCAT in barren areas. The results of our study could provide useful insights for assimilating microwave soil moisture products into land surface models to improve hydrological prediction.

**Key words:** FengYun 3C; SMAP; ASCAT; Triple Collocation; Soil moisture