

# SMOS 和 SMAP 卫星土壤水分产品的 对比评价与差异分析\*

孟越, 王大刚, 林泳恩, 杜懿, 张智, 王大洋, 林泽群

中山大学地理科学与规划学院, 广东 广州 510006

**摘要:** 为了对比分析 SMOS (soil moisture and ocean salinity) 和 SMAP (soil moisture active passive) 遥感产品土壤含水量数据的质量与精度, 本文基于来自美国本土的 3 种测站网络 CRN (climate reference network)、SCAN (soil climate analysis network) 和 SNOTEL (snowpack telemetry network) 的 261 个站点实测数据, 从整体与分站点两个角度进行评价, 并探究影响二者表现差异的不同影响因子。结果表明: ① 对两种卫星遥感水分产品进行整体评价或按照站点进行评价时, SMAP 表现均优于 SMOS; ② 同一土壤水分产品在不同土地覆盖类型下的精度差异较大, 不同土壤水分产品对于同种土地覆盖类型的响应不同; ③ 季节变化下温度和降水变化, 从而影响卫星反演精度; ④ 地形与海拔变化也会引起卫星产品反演水平的变化, 随着海拔高度升高, 卫星观测的准确性降低。综合来看, 目前直接利用卫星观测获取的土壤含水量与实测值之间仍存在一定差异, 未来我们应进一步提高卫星观测数据的准确性。

**关键词:** 土壤含水量; 土壤水分卫星遥感产品; 对比评价; 差异分析

**中图分类号:** P426.68 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0139 (2022) 05-0009-13

## Comparative evaluation and difference analysis of SMOS and SMAP satellite remote sensing soil moisture products

MENG Yue, WANG Dagang, LIN Yongen, DU Yi, ZHANG Zhi, WANG Dayang, LIN Zequn

School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China

**Abstract:** To compare and evaluate the quality and accuracy of soil moisture data of SMOS (soil moisture and ocean salinity) and SMAP (soil moisture active passive) remote sensing products, using the actual measurement of 261 stations from three types of stations in the United States, i. e., CRN (climate reference network), SCAN (soil climate analysis network), and SNOTEL (snowpack telemetry network), the different influencing factors that affect the performance were explored from the perspectives of the whole and the individual sites. The results show that: 1) When the two satellite remote sensing moisture products are evaluated as a whole or according to sites, SMAP performs better than SMOS. 2) The accuracy of the same soil moisture product varies greatly under different land cover types; different soil moisture products have different responses to the same land cover type. 3) The temperature and precipitation changes under seasonal changes, which affect the accuracy of satellite inversion. 4) The terrain and altitude changes also cause changes in the inversion level of satellite products. As the altitude increases, the accuracy of satellite observations decreases. In general,

\* 收稿日期: 2021-07-08

录用日期: 2021-08-16

网络首发日期: 2022-01-27

基金项目: 国家自然科学基金 (51779278)

作者简介: 孟越 (1997年生), 女; 研究方向: 水文水资源; E-mail: mengy36@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 王大刚 (1975年生), 男; 研究方向: 陆面过程模拟; E-mail: wangdag@mail.sysu.edu.cn

there is still some difference between the soil moisture directly obtained from satellite observation and the station data. In the future, we should further improve the accuracy of satellite observation data.

**Key words:** soil moisture; satellite remote sensing soil moisture products; comparative evaluation; difference analysis

土壤含水量是地球生态系统中至关重要的参数变量,在地表与大气之间水循环及能量流动中发挥着非常重要的作用<sup>[1]</sup>,是连接水文过程、生物生态过程和生物地球化学过程中的重要纽带<sup>[2-4]</sup>。在水文模型中,土壤含水量的大小通常能够影响下渗速率以及径流速率,其值的准确程度会很大程度上影响洪水模拟预报的精度<sup>[5]</sup>。在陆面模式中,土壤含水量是影响地表土壤水蒸发速率、决定根层下渗速率的重要参数之一,它的误差大小会直接影响陆面模式模拟和预报陆表水热平衡的精确程度。由于土壤含水量影响陆表蒸散发,进而影响地面对大气的水汽输送和能量传输甚至气压变化,因而对局地降水、气温等气象要素也有重要影响。

土壤含水量目前可通过多种方式获取,传统监测方法是通过观测站点或气象站来获取数据,除此之外还有模型法和遥感监测法。站点观测数据准确性高、误差小,与真实值较为接近,可近似代表真实值。但是,公众通常较难获取此类测站数据,并且由于各种各样的条件限制,该类测站的数量通常较少,导致其可获取的数据量较少。而且,由于土壤与植被的空间异质性较强,该类数据通常只能代表范围较小的区域,在大尺度区域上的应用比较有限。因此,该类数据虽然可靠性强、准确度高,但公众可获取性较差、分布不够均匀,通常不能充分反映土壤含水量随着时空的变化。模型法通过建立水分平衡公式求解土壤含水量,该方法可以获取实时快捷的土壤水分信息,但实验的模拟过程繁琐,且实验参数复杂<sup>[6-7]</sup>。遥感卫星能够实时、不间断地覆盖地球表面<sup>[8]</sup>,因此遥感监测的即时性、便捷性要明显优于前二者。随着近年来遥感技术的飞速进步,重复获取同一遥感像元数据的时间可缩短至3 d,大大地节约了人力、物力成本。当前基于卫星的土壤含水量数据分为主动微波遥感数据和被动微波遥感数据两种,被动微波遥感以其对土壤水分的敏感性和在白天或夜间全天候条件下收集土壤水分信息的能力,已成为监测区域和全球土壤水分的有效方法<sup>[8]</sup>。近年来,基于L波段(1.4 GHz,

21 cm)的微波卫星遥感产品在不同植被覆盖度下的地区获得了新的全球土壤含水量数据<sup>[9-11]</sup>,L波段被认为是土壤水分监测的最佳波段<sup>[12-14]</sup>,因为L波段比其他高频波段(如C波段、X波段等)对土壤含水量以及植被和土壤渗透的敏感性更高<sup>[13-16]</sup>。新的L波段数据集包括:欧洲航天局(ESA, European space agency)的SMOS(soil moisture and ocean salinity)<sup>[11]</sup>和来自美国国家航空航天局(NASA, national aeronautics and space administration)的SMAP(soil moisture active passive)<sup>[17]</sup>。

已有学者对不同卫星土壤水分产品进行了对比验证。González-Zamora等基于密集测站网络和稀疏测站网络数据对Aquarius卫星和SMOS卫星数据进行验证分析,结果表明SMOS整体表现更佳;除此之外测站网络的疏密程度会影响卫星产品的对比验证。Zeng等<sup>[18]</sup>通过美国(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络(RMSN)对SMAP卫星产品数据进行了验证,整体ubRMSE为0.036 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>。Cui等<sup>[19]</sup>通过美国和西班牙的部分测站网络对比了SMAP、SMOS、FY3B和AMSR2卫星产品,SMAP在美国网络表现较好,ubRMSE为0.027 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>。在我国也有学者进行了相关研究,杨娜等<sup>[20]</sup>在中国农区验证了SMOS卫星数据的准确性,结果证明其反演效果在干旱季节受降水影响较大。白瑜等<sup>[21]</sup>在吉林省农田区域对比了SMAP和SMOS,实验证明两种卫星土壤水分产品均随降水事件的发生而出现高估现象。以上实验结果表明不同土壤水分产品表现差距较大,且不同遥感卫星数据的观测质量相去甚远<sup>[5]</sup>,利用卫星遥感获取的土壤含水量数据存在准确性较低的问题。因此,对卫星遥感数据进行对比评价与差异分析变得尤为重要。目前,针对新的L波段卫星土壤水分产品的研究集中于产品对比<sup>[22-25]</sup>和单一区域适用性分析<sup>[18, 26-27]</sup>,对于SMAP和SMOS两种卫星土壤水分产品在美国大区域范围质量评价及其影响因素的研究仍较少。

为改进土壤含水量数据遥感监测的反演算法和理解相关遥感数据的质量精度,本文基于美国本土的3种测站信息网络:CRN(climate reference

network)、SCAN(soil climate analysis network)和 SNOTEL(snowpack telemetry network), 对比评价 SMOS和SMAP遥感产品土壤含水量数据的质量与精度, 并从不同角度分析其影响因子。

## 1 研究区域与数据

### 1.1 研究区域概况

美国位于西半球, 位于北纬 $25^{\circ}\sim 49^{\circ}$ 之间, 由美国本土大陆、阿拉斯加半岛和夏威夷群岛组成, 幅员辽阔, 地形复杂, 整体地势由东向西由低海拔地区向高山地区爬升。一般地形特征可概括为“两侧高, 中部低”, 东西两侧高, 中部低, 无东西向山脉。美国本土大陆地形大致可分为: 东部的阿巴拉契亚山脉和大西洋低地, 中部的密西西比河平原和西部的科迪勒拉山脉。大部分地区属于温带和亚热带, 各地气候差异较大, 大体可分为5个气候区: 东北部沿海温带气候区、东南部亚热带气候区、中部平原大陆性气候区、西部高原干燥气候区和太平洋沿岸海洋性气候区。本文的研究区域为美国本土大陆地区。

### 1.2 地面观测数据

本研究所用地面观测数据: 1) CRN测站网络: 目前由美国海洋与气象局(NOAA, national oceanic and atmospheric administration)维护和运行的气象气候监测网络, 旨在为科学研究工作者提供气温及降水的高质量科研数据。其于2011年安装了监测土壤含水量及土壤温度的设备, 包括5个标准深度: 5、10、20、50和100 cm。2) SCAN测站网络: 来自美国国家土壤调查中心(NRCS, natural resources conservation service), 该数据已被

广泛地应用于遥感土壤含水量数据的精度评价以及遥感数据的有效利用等研究中。3) SNOTEL测站网络: 同样来自美国国家土壤调查中心(NRCS), 其大多分布在多山的地带, 如洛基山系、科罗拉多山脉, 这些地带通常有较好的植被覆盖, 并且部分地区的地表土壤温度可能会低于 $0^{\circ}\text{C}$ , 因此SNOTEL测站所监测的数据通常用作雪情研究。

本文选取2015年4月1日至2018年12月31日期间来自CRN、SCAN和SNOTEL三种测站网络的261个站点的实测数据作为真值, 其中CRN测站共49个, SCAN测站共75个, SNOTEL测站共137个, 位于美国本土大陆不同的气候区和地形区, 如图1所示。

### 1.3 卫星数据

SMOS卫星<sup>[28]</sup>于2009年11月2日在俄罗斯北部发射, 这是第一个通过微波L波段进行测量提供全球观测的卫星。SMOS具有两个特点<sup>[29]</sup>: 一是采用多角度探测方式, 可解决遥感反演过程中观测个数小于未知量个数的问题; 二是采用L波段(1.4 GHz)的低频观测, 较其他波段而言对土壤含水量更加敏感<sup>[30]</sup>。SMOS主要任务是探测全球表层土壤含水量和海洋表面盐度, 有助于探究大气与海洋、陆地之间的水气循环过程。SMOS的太阳同步轨道高度为757 km, 上升赤道穿越时间为当地时间06:00, 下降赤道穿越时间为当地时间18:00。由于卫星在升轨降轨运行时, 其绕地球公转的方式不同, 如监测地球的角度以及距地距离可能不一致, 因此它们的数据精度亦可能存在差别。卫星在升轨运行时离地面距离近, 信号衰弱

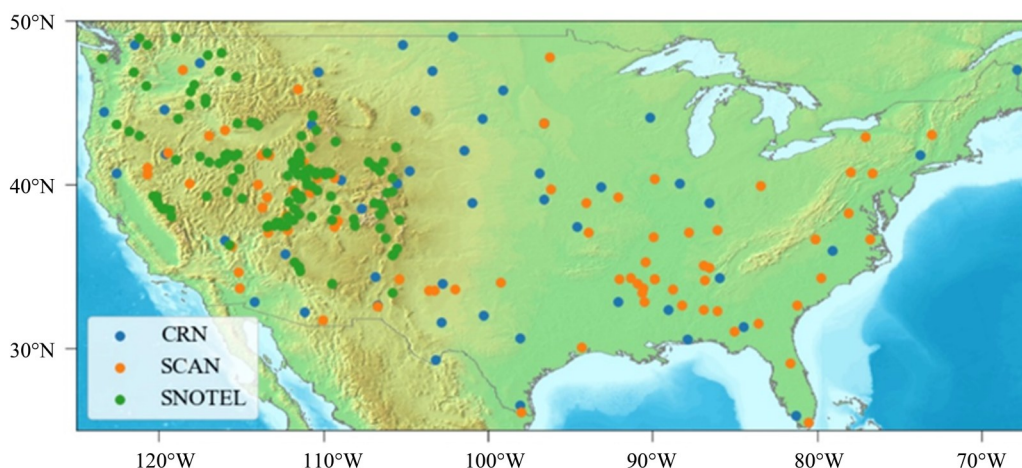


图1 站点位置分布图(美国地形底图来自网站<https://mapserver.org/>)

Fig. 1 The map of site location

比较少,因此,本文使用的是该SMOS数据的升轨运行数据。

SMAP<sup>[31]</sup>卫星由NASA研制,于2015年4月开始同时使用雷达采集和辐射计提供数据,其可在1~3 d的时间分辨率以及3、10和40 km的空间分辨率下提供土壤表层5 cm的土壤含水量。SMAP遥感卫星优于先前L波段卫星的显著特征为:其先进的硬件设施可以高速采集频谱图数据,采集数据之后就可以使用基于峰度的算法来减轻射频数据中由人为排放源引起的地面干扰<sup>[32]</sup>。同时,SMAP也是目前在轨的最新的土壤含水量监测卫星。SMAP卫星主要任务同样是探测全球土壤含水量,帮助理解区域水、能量及碳循环的交互过程,改善对地表水热通量、北半球净碳通量等的量化估算,提升对气象气候、洪水、干旱等的监测和预报能力。

本文SMOS数据来自巴塞罗那专家中心(BEC, Barcelona expert centre)的BEC\_BIN\_SM\_A\_NOMINAL\_4H9\_003版本, <https://earth.esa.int/cogateway/missions/smos>; SMAP数据来自NASA管辖的国家冰雪数据档案中心(NSIDC, national snow and ice data center)的SMAP\_L3\_SM\_P\_R16\_510\_001版本, <https://www.nasa.gov/smap>,是二十面体斯奈德相等面积(ISEA, icosahedron Snyder equal area)网格的土壤含水量数据,二者分辨率均为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ,时间序列与测站数据一致,为2015年4月1日至2018年12月31日。

#### 1.4 土地覆盖类型数据

本文所使用土地覆盖类型数据为欧空局提供的Land\_Cover\_CCI数据集合,数据下载地址为<https://cds.climate.copernicus.eu/>。该数据集具有长期一致、年度更新和全球覆盖的特点,对于土地核算、森林检测和荒漠化等多种应用和研究具有重要意义。该数据集提供了全球范围的土地覆盖地图,将土地表面分为22个类别,这些类别是使用联合国粮食及农业组织的土地覆盖分类系统(LCCS, land cover classification system)定义的。为确保连续性,这些土地覆盖地图与欧洲空间局气候变化倡议(CCI, climate change initiative)从1990年代到2015年制作的地图一致,因此本文2016年前数据使用版本为Version 2.0.7,2016年后数据使用版本为Version 2.1.1。数据类型为网格数据,空间分辨率为300 m,对数据进行重采样至与卫星数据同一分辨率。采样结果证明2015—

2018年间各站点土地覆盖类型无变化,因此各站点各匹配一种土地覆盖类型。

#### 1.5 降水数据

本文所使用降水数据来自北美土地数据同化系统(NLDAS, North American land data assimilation system), <https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets?keywords=NLDAS>。NLDAS目前以近实时(约4 d滞后)在 $0.125^{\circ}$ 网格上运行,可每小时获取一次数据,数据集可以追溯到1979年1月。本文数据使用版本为:NLDAS2.0.125d.v1,空间分辨率为 $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$ ,每1 h获取一次数据。对数据进行重采样至与卫星数据同一分辨率,并对一天内24 h的数据求和得到当日降水量。

## 2 研究方法

### 2.1 数据预处理

1) 数据处理:借助Matlab对数据进行读取,并利用Python语言进行数据处理和计算。

2) 站点筛选:本研究针对美国本土大陆地区,因此删除本土大陆以外的站点。除此之外,删除数据完整性不大于50%的站点,保留数据有效值多的站点,并考虑站点尽可能均匀分布于整个美国大陆地区。

3) 时空匹配:卫星观测的土壤含水量数据为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 格点的瞬时数据,而站点观测数据是在空间上固定点的连续观测值。本实验以观测站点为中心划取 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 方格,划取区域内出现唯一点则作为该点卫星观测值,若划取区域内出现多个点则取平均值。对于连续的站点观测数据则取卫星对应过境时间的平均值作为实测值。由于微波遥感数据只能反映表层的土壤含水量,因此在验证时选用土壤表层0~5 cm的实测土壤含水量数据。

### 2.2 评价指标

为了定量评估遥感土壤水分产品的准确性和可靠性,本实验使用了6种评价指标,包括:相关系数( $R$ )<sup>[33]</sup>、均方根误差(RMSE)<sup>[34]</sup>、无偏均方根误差(ubRMSE)<sup>[35]</sup>、平均相对误差(MRE)<sup>[36]</sup>、归一化纳什效率系数(NNSE)<sup>[37]</sup>和偏离率(Bias)<sup>[38]</sup>。其计算公式如下

$$R = \frac{E\left\langle\left(\varphi_s(t) - E\langle\varphi_s(t)\rangle\right) \cdot \left(\varphi_i(t) - E\langle\varphi_i(t)\rangle\right)\right\rangle}{\tau_s \cdot \tau_i}, \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{E\left\langle\left(\varphi_s(t) - \varphi_i(t)\right)^2\right\rangle}, \quad (2)$$

$$\text{ubRMSE} = \sqrt{E\left\langle \left( (\varphi_s(t) - E\langle \varphi_s(t) \rangle) - (\varphi_i(t) - E\langle \varphi_i(t) \rangle) \right)^2 \right\rangle}, \quad (3)$$

$$\text{MRE} = E\left\langle \left| \frac{\varphi_s(t) - \varphi_i(t)}{\varphi_i(t)} \right| \right\rangle, \quad (4)$$

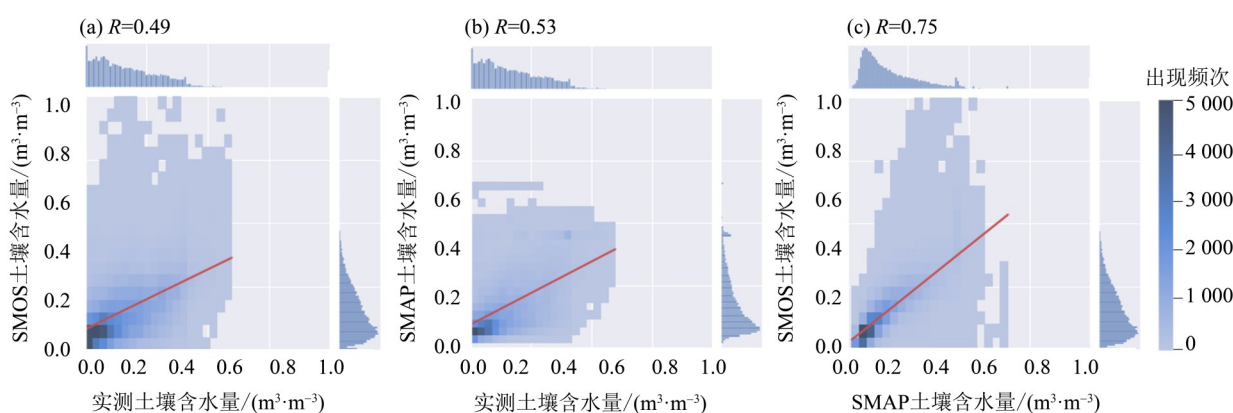
$$\text{NNSE} = \frac{E\langle (\varphi_i(t) - E\langle \varphi_i(t) \rangle)^2 \rangle}{E\langle (\varphi_i(t) - E\langle \varphi_i(t) \rangle)^2 \rangle + E\langle (\varphi_s(t) - \varphi_i(t))^2 \rangle}, \quad (5)$$

$$\text{Bias} = E\langle \varphi_s(t) \rangle - E\langle \varphi_i(t) \rangle, \quad (6)$$

式中 $E\langle \cdot \rangle$ 为期望值,  $t$ 为观测时间,  $\varphi_s(t)$ 为 $t$ 时间下卫星观测的土壤含水量值,  $\varphi_i(t)$ 为 $t$ 时间下站点观测的土壤含水量值,  $\tau_s$ 和 $\tau_i$ 分别为卫星观测值和站点观测值的标准差。综合来说,  $R$ 和NNSE值较大且RMSE、ubRMSE、MRE和Bias值较小, 说明卫星土壤水分值与实测值拟合较好<sup>[39]</sup>。

### 3 结果与分析

对两种卫星遥感水分产品进行整体评价, 绘制实测土壤含水量与卫星遥感产品土壤含水量以及两种卫星遥感产品之间的散点图, 并绘制土壤含水量相应频次条形图(如图2)。图2中颜色的深浅代表该位置点的数量, 红线为全部点的拟合直线。把全部数据放到一起整体来看, SMOS、SMAP数据与站点实测数据的相关系数分别为0.49、0.53, SMOS与SMAP整体相关系数 $R=0.75$ , SMAP与站点观测的相关性更强。SMOS和SMAP对土壤含水量的观测值均有不同程度的低估和高估现象, 总体而言, 卫星观测的低估情况比高估情况更多, 这一点SMOS更加明显, SMAP整体观测值高于SMOS。实测土壤含水量为 $0\sim 0.6 \text{ m}^3/\text{m}^3$ , 出现频率随土壤含水量升高而降低; SMAP土壤含水量为 $0\sim 0.7 \text{ m}^3/\text{m}^3$ , 而SMOS土壤含水量为 $0\sim 1 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。



图中色块的深浅对应不同频次, 色块越深则频次越高;

小图上侧和右侧的条形图描述了坐标轴对应土壤含水量的出现频次高低变化。

图2 SMOS和SMAP土壤含水量与实测土壤含水量整体评价散点图

Fig. 2 Scatter plots of overall evaluation

将卫星观测的土壤含水量数据与站点观测数据作差求得误差值(误差值=卫星观测值-站点观测值), 将站点实测土壤含水量值分为6个区间:  $0\sim 0.1$ ,  $0.1\sim 0.2$ ,  $0.2\sim 0.3$ ,  $0.3\sim 0.4$ ,  $0.4\sim 0.5$ 和 $0.5\sim 0.6 \text{ m}^3/\text{m}^3$ , 统计各个实测区间的卫星误差值并绘制成箱形图, 结果如图3所示。当站点实测土壤含水量小于 $0.1 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 时, SMOS和SMAP的观测值往往比实测值偏高, 误差值离群点较多; 当站点实测值介于 $0.1\sim 0.2 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 之间时, 两种卫星观测均表现最佳, 误差最小; 当土壤含水量站点实测值大于 $0.2 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 时, 随着土壤含水量升高,

卫星观测值的低估呈增强趋势, 误差值也呈增大趋势。将两种卫星观测数据进行对比, 当站点实测数据小于 $0.1 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 时SMOS平均误差略小于SMAP, 当站点实测数据大于 $0.1 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 时, SMAP平均误差均小于SMOS, 当站点实测数据介于 $0.4\sim 0.5 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 之间时二者的平均误差值差距最大。

对SMOS和SMAP两种卫星数据分别计算整体评价指标, 即对全部站点的全时间序列计算指标值, 结果见表1。由计算结果可以看出, 除Bias值二者表现相近, 绝对值几乎相同( $< 0.001 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ), 其他指标中SMAP表现均优于SMOS。结果表明, SMAP

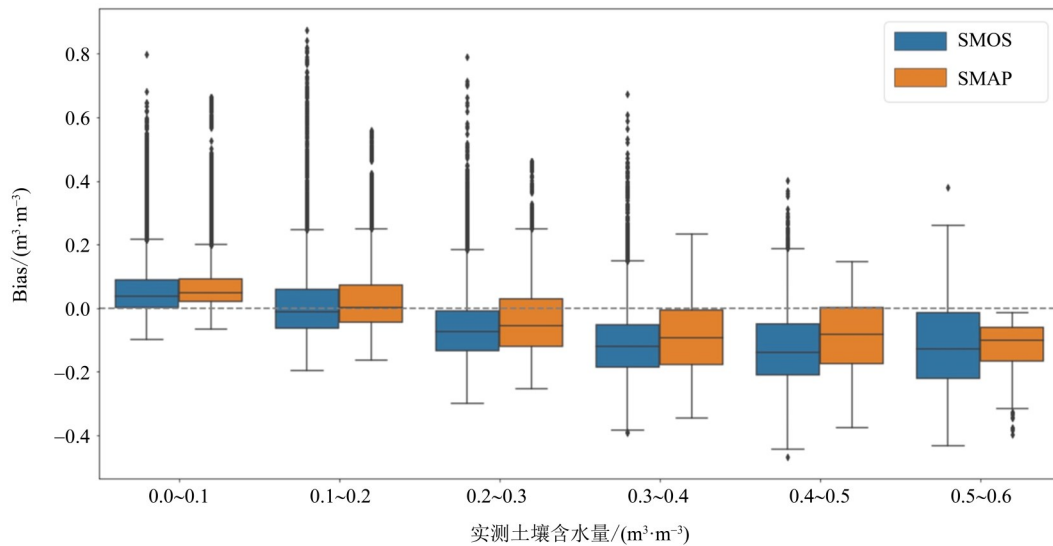


图3 各实测区间误差箱形图

Fig. 3 Box plots of the error of each measured interval

表1 全部站点全时间序列整体指标计算结果<sup>1)</sup>

Table 1 The calculation results of the overall index of all stations and full time series

模型	R	RMSE		MRE	Bias	NNSE
		ubRMSE	( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ )			
SMOS	0.485	0.125	0.125	2.196	-0.008	0.499
SMAP	0.534	0.117	0.117	2.601	0.009	0.530

卫星比SMOS卫星的土壤含水量更加接近站点观测值, SMAP整体观测更加准确。但从具体数据也可以看出, 如SMOS的 $R=0.485$ , SMAP的 $R=0.534$ , 均介于 $0.4\sim0.6$ 之间, 二者均与站点观测数据呈中等程度相关, 相关性程度并不强, 说明两种卫星观测数据与实测数据之间仍存在一定差异。

对各个站点的全时间序列求各项指标值, 结果如图4所示。SMOS各个站点的 $R$ 平均值为 $0.42$ , SMAP各个站点的 $R$ 平均值为 $0.56$ , 二者均呈现中等强度相关, SMAP的整体相关性更强且 $R$ 值分布更集中。二者均出现了 $R<0$ 的离群点。SMAP和SMOS的 $R$ 最大值分别为 $0.94$ 和 $0.85$ ; 各个站点的RMSE平均值分别为 $0.114 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 和 $0.105 \text{ m}^3/\text{m}^3$ , 两者的RMSE分布范围相近, 但SMAP的整体更小表现更佳。SMOS和SMAP在ubRMSE指标上的差距更加明显, SMOS的ubRMSE平均值为 $0.086 \text{ m}^3/\text{m}^3$ , SMAP的ubRMSE平均值为 $0.066 \text{ m}^3/\text{m}^3$ , 且SMAP的ubRMSE分布更集中, SMAP表现优于SMOS。二者MRE差距同样较小, 但SMOS的分布范围更集中且表现更好, SMAP的MRE最大值到达 $70.225 \text{ m}^3/\text{m}^3$ , 而

SMOS的MRE最大值为 $31.924 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。SMOS的NNSE平均值为 $0.351$ , SMAP的NNSE平均值为 $0.414$ , SMAP的整体NNSE更大且表现更好。SMOS和SMAP的Bias分布范围差距较小, SMOS的Bias平均值为 $-0.003 \text{ m}^3/\text{m}^3$ , SMAP的Bias平均值为 $0.013 \text{ m}^3/\text{m}^3$ , SMOS的整体Bias更小。

总体而言, SMOS和SMAP对各个站点的全时间序列求得的指标值主要在 $R$ 、ubRMSE和NNSE三个指标上体现出较大差距, SMAP观测数据在各个站点的整体表现优于SMOS。但是, 从MRE和Bias两项指标也可以看出, 两种卫星观测数据在不同站点的表现均有较大差距, SMAP对于土壤含水量的观测表现也并不稳定。

## 4 卫星产品表现的影响因子

### 4.1 土地覆盖类型影响

为进一步探究两种卫星土壤水分产品在不同站点表现差异的影响因子, 引入欧空局提供的土地覆盖类型数据, 将全部站点划分为10种土地覆盖类型, 如表2所示。

计算不同土地覆盖类型下的站点指标值, 绘制成箱形图(如图5), 计算各土地覆盖类型下各指标值平均值, 生成表3。

同一土壤水分产品在不同土地覆盖类型下的精度差异较大。植被覆盖是影响土壤水分反演的重要因子<sup>[40]</sup>。SMOS和SMAP两种卫星土壤水分产品的反演精度在植被覆盖区都会受到限制。从实验结果来看, 土壤水分产品在农田(编号1~3),

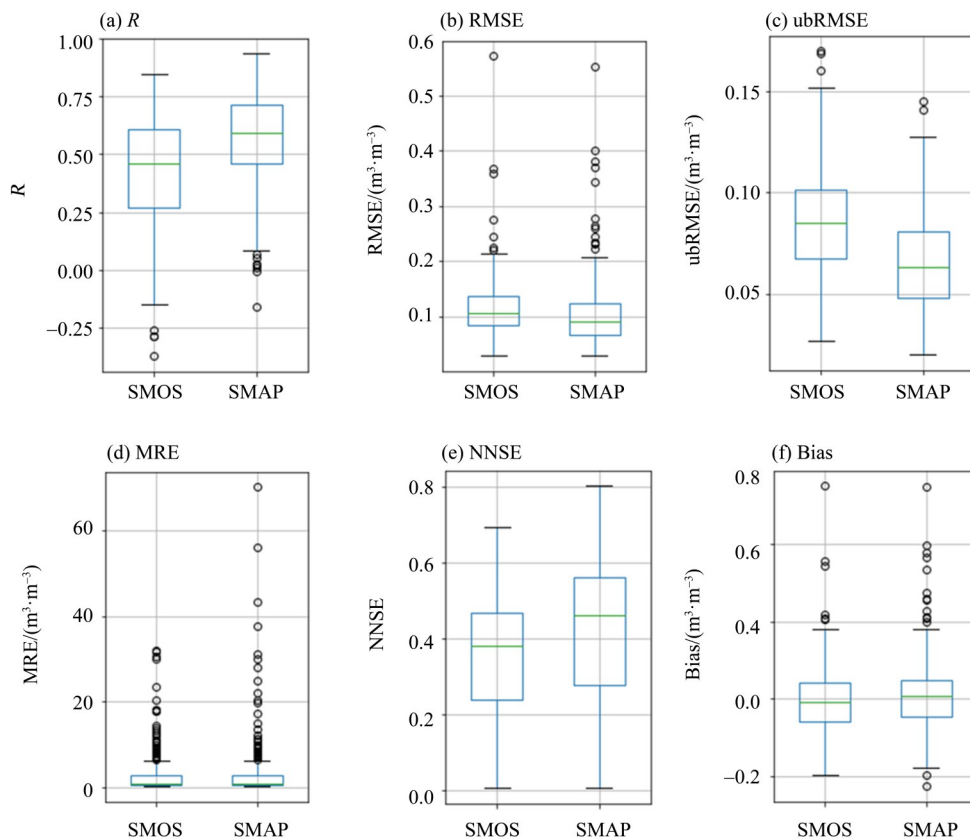


图 4 分站点计算指标箱形图

Fig. 4 Box plots of calculation indicators for different stations

表 2 不同编号对应土地覆盖类型

Table 2 Different numbers correspond to land cover types

编号	土地覆盖类型
1	旱作农田
2	镶嵌农田(>50%)/天然植被(乔木、灌木、草本)(<50%)
3	镶嵌天然植被(乔木、灌木、草本)(>50%)/农田(<50%)
4	乔木覆盖, 阔叶落叶 (>15%)
5	乔木覆盖, 针叶常绿 (>15%)
6	乔木覆盖, 针叶落叶 (>15%)
7	乔木覆盖, 混合叶形(阔叶和针叶)
8	灌木
9	草地
10	无覆盖区(裸土等)

灌木(编号8), 草地(编号9)和无覆盖区(编号10)具有较高的相关性和拟合度, 相关系数  $R$  值平均值均大于 0.55,  $ubRMSE$  平均值均小于  $0.08 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。这些地区地势平坦, 地表覆盖植物多为低矮的农作物、灌木、草地或无覆盖物, 生物量较低。因此, 土壤水分产品受植被影响较小, 反演效果也更好。这一结论与 Al-Yaari 等<sup>[9]</sup> 得出的 SMOS 和

AMSR-E 土壤水分产品在植被稀疏地区反演结果相关性更好的观点一致。然而, 土壤水分产品在乔木覆盖类型下(编号4~7)具有较低的相关性和拟合度, 尤其在针叶落叶林类型下(编号6),  $RMSE$ 、 $ubRMSE$ 、 $MRE$  和  $Bias$  值均大于其他土地覆盖类型,  $NNSE$  值同时也达到最小。这些地区植被覆盖密度大, 且树木高大茂盛, 生物度高, 卫

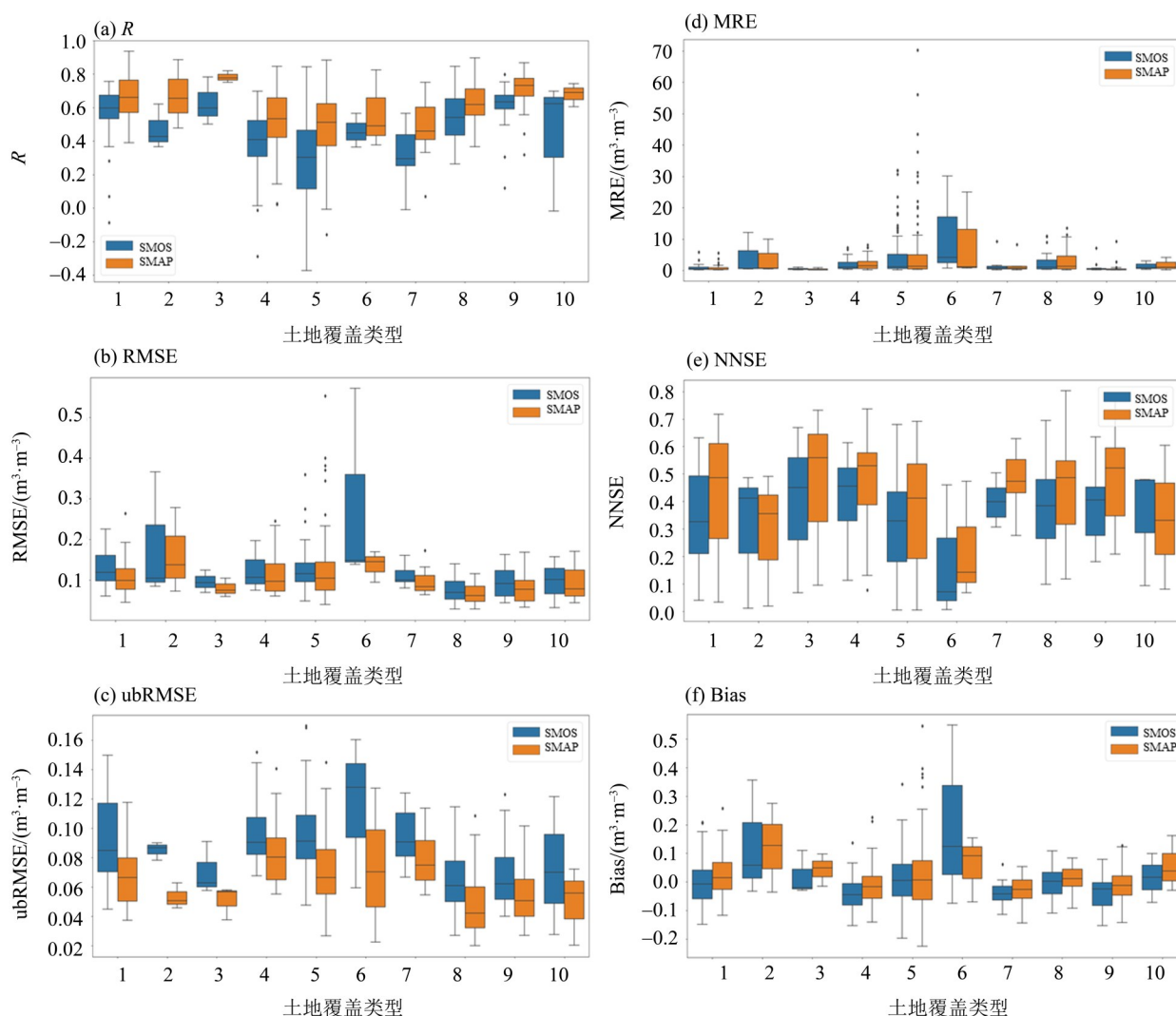


图5 不同土地覆盖类型站点计算指标箱形图

Fig. 5 Box plots of calculation indicators for different land cover types

表3 不同土地覆盖类型下各指标平均值<sup>1)</sup>

Table 3 Average values of indicators under different land cover types

土地覆 盖类型	RMSE		ubRMSE		MRE		NNSE		Bias		R	
	SMOS	SMAP	SMOS	SMAP	SMOS	SMAP	SMOS	SMAP	SMOS	SMAP	SMOS	SMAP
1	0.126	0.106	0.090	0.066	0.898	0.887	0.336	0.430	0.004	0.027	0.551	0.664
2	0.185	0.162	0.085	0.053	4.391	3.729	0.303	0.288	0.127	0.122	0.470	0.673
3	0.096	0.080	0.070	0.051	0.504	0.439	0.396	0.461	0.020	0.044	0.626	0.783
4	0.118	0.112	0.097	0.083	1.957	2.298	0.419	0.469	-0.039	-0.014	0.382	0.512
5	0.124	0.124	0.095	0.070	4.503	5.704	0.315	0.366	0.006	0.022	0.289	0.478
6	0.286	0.136	0.116	0.073	11.656	8.973	0.179	0.227	0.199	0.059	0.460	0.564
7	0.110	0.096	0.094	0.079	1.650	1.524	0.401	0.482	-0.036	-0.029	0.321	0.478
8	0.077	0.065	0.062	0.049	2.418	2.865	0.372	0.441	-0.002	0.008	0.534	0.632
9	0.093	0.078	0.068	0.054	0.675	0.749	0.396	0.487	-0.036	-0.010	0.617	0.710
10	0.096	0.097	0.073	0.049	1.417	1.847	0.350	0.338	0.014	0.056	0.434	0.679

1) 表中RMSE, ubRMSE, MRE和Bias的单位均为 $\text{m}^3/\text{m}^3$ 。

星产品误差较大, 反演效果不佳。

不同土壤水分产品对于同种土地覆盖类型的响应不同。植被覆盖对于SMOS的影响效果要大于SMAP, 在各土地覆盖类型下, SMAP整体表现更佳。除此之外, SMAP在植被覆盖度较高地区的反演效果更加稳定, 较SMOS的优势也更加明显, 二者差距更大。

#### 4.2 季节影响

对各月内全部站点进行指标计算, 绘制各指标随时间变化的折线图, 并参照各月降水数据, 绘制如图6所示。各指标随时间序列呈现出周期性变化, 在Cui等<sup>[23]</sup>的研究中同样发现卫星土壤水分产品随季节变化幅度较大。分析其呈现季节性周期变化规律的原因如下:

温度对于卫星观测产生影响。RMSE与ubRMSE两个指标变化趋势一致, 且周期性特征明显, 冬季指标增大而夏季减小, 说明冬季卫星反演效果较差而夏季较好。冬季气温较低且地表干燥, 土壤水分处于冻结期, 部分地区被冰雪覆盖, 冰冻和积雪影响并降低了卫星反演精度。除此之外, 随着季节变化, 两种卫星数据的表现差异也呈现周期性变化, 夏季时SMOS和SMAP观测表现相近, 而

冬季时SMAP明显优于SMOS。这说明, 低温和冰冻积雪等对SMOS卫星观测的影响要远大于SMAP, 这很可能是造成两种卫星表现差异的重要原因。

降水强度和时长对于卫星观测产生影响。当降水发生变化时, 指标值随之产生波动。由于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<sup>[41]</sup>, L波段微波的穿透深度随土壤水分增加而减小。两种土壤水分产品均与降水量的变化呈现一致趋势, 当雨季来临降水增强时, 土壤水分大范围且大幅度上升, 卫星反演的精度大大降低; 而随着雨季结束各地区降水量和降水强度明显下降, 土壤水分也随之下落, 卫星反演的效果变好。这是由于, 当降水发生时, 土壤表层形成一层饱和含水量土壤层, 此时卫星传感器的探测深度要小于站点设置的探头深度, 与实测值相比, 卫星反映的是更表层的土壤水分。除此之外, 结合两种产品对比折线图也说明SMOS产品准确性受降水影响更大, 变化幅度更大, 在降水强度和降水量较大时对于土壤含水量的高估现象更加明显, 这很可能是造成两种卫星表现差异的另一重要原因。

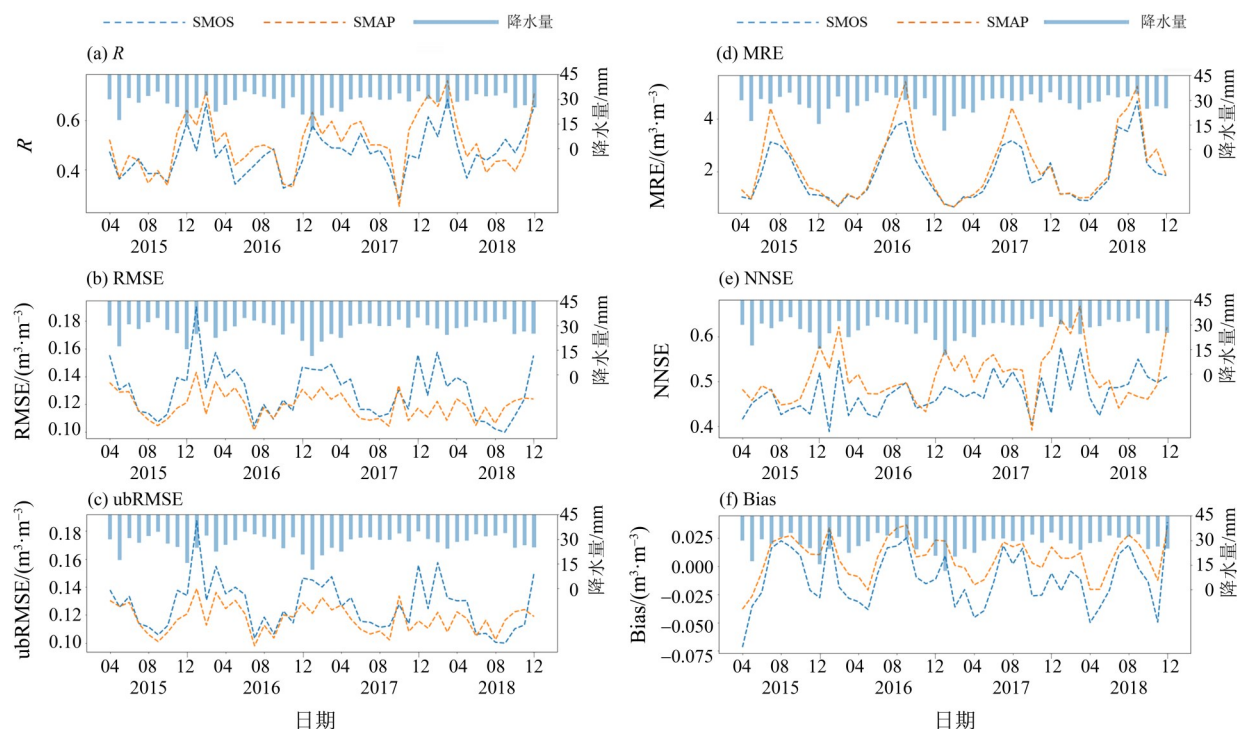


图6 各指标时间序列图

Fig. 6 Time series graphs of each indicator

#### 4.3 地形与海拔影响

对各个站点分别计算各项指标并绘制在地图

上(见图7), 发现各指标在地理位置上均呈现较为统一的分布规律。西部和东部沿海地区的卫星观

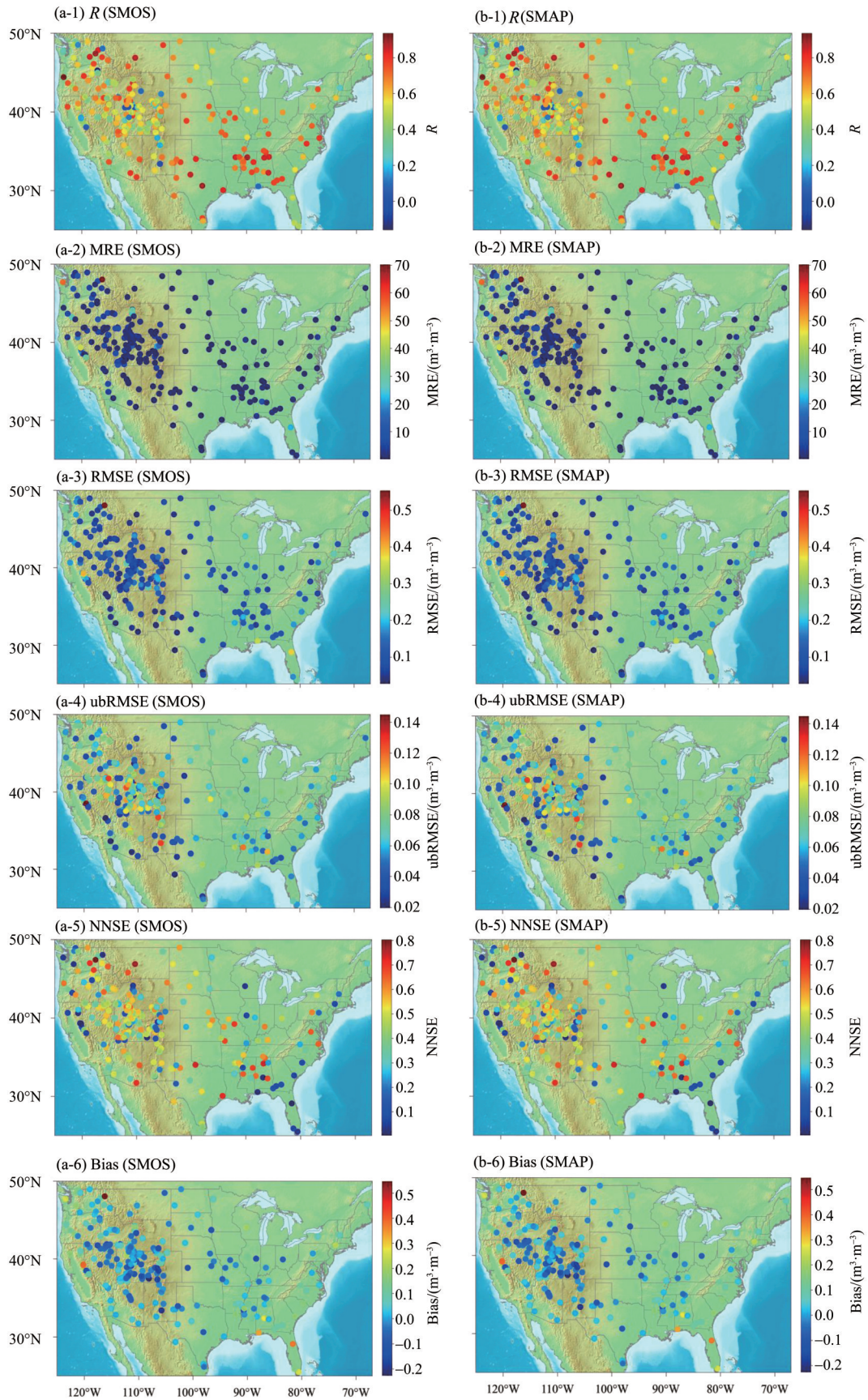


图 7 各指标空间分布图

Fig. 7 The spatial distribution maps of each indicator

测数据表现更差,西北部和东南部表现最差,中部地区卫星观测数据更加准确。这很可能与地形分布以及海拔高度有关:位于东部的阿巴拉契亚山脉和西部的科迪勒拉山脉附近的站点反演效果较差,而位于沿海大西洋低地和中部密西西比河平原的站点反演效果较好。这说明,随着海拔高度升高,卫星观测的准确性降低。其原因如下:

反演结果较差的阿巴拉契亚山脉和科迪勒拉山脉均具有坡度较大的地形,当坡度较大时,降雨后水分会随地形坡度,由地势较高区域向地势较低处流动,土壤含水量也会受此影响,山顶土壤含水量较低而山脚较高,山腰处因植被对于土壤水分的拦截而较为稳定。

海拔较高的地区,往往温度较低,在一些极高海拔地区甚至会出现土壤冰冻的现象,这会影响土壤表层的介电常数,从而导致卫星检索算法的介电质模型失效,最终导致卫星反演精度降低。李瑞娟等<sup>[25]</sup>的研究同样证明了卫星土壤水分产品在高海拔区域存在缺测值较多的问题。除此之外,由图可知在这些高海拔地区SMOS的指标表现结果更差,这说明,相对于SMAP卫星而言,SMOS卫星的检索算法有可能在土层出现封冻的情形下适应性更差。

## 5 结 论

本文基于2015年4月1日至2018年12月31日期间来自CRN、SCAN和SNOTEL三种测站网络的261个站点的实测数据,对比评价了SMOS和SMAP遥感产品土壤含水量数据的质量与精度,并从不同角度分析其表现差异的影响因子,得出如下主要结论:

1) 对两种卫星土壤水分产品进行对比评价时,SMAP表现均优于SMOS。卫星观测的低估情况比高估情况更多,这一点SMOS更加明显,SMAP整体观测值高于SMOS。当站点实测值介于

0.1~0.2 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>之间时,两种卫星遥感产品表现最佳;当站点实测数据介于0.4~0.5 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>之间时,SMOS和SMAP表现差距最大。

2) 土地覆盖类型是影响卫星反演土壤水分数据精度的一个重要因子。①同一土壤水分产品在不同土地覆盖类型下的精度差异较大,在地势平坦、地表覆盖植物较低矮或无覆盖物、生物量较低的地区反演精度更高;②不同土壤水分产品对于同种土地覆盖类型的响应不同,植被覆盖对于SMOS的影响效果要大于SMAP,且SMAP在植被覆盖度较高地区的反演效果较SMOS更加稳定。

3) 季节变化同样影响卫星数据的反演精度。①温度对于卫星观测产生影响:冬季气温较低且地表干燥,土壤水分冻结且部分被冰雪覆盖,降低了卫星反演精度;低温和冰冻积雪等对SMOS卫星观测的影响大于SMAP,是造成两种卫星遥感产品精度差异的重要原因。②降水的强度和时长对于卫星观测产生影响:降水强度增大且降水量增多时,由于表层形成饱和和含水量土壤层使得卫星反演精度降低;SMOS产品准确性受降水影响更大,在降水强度和降水量较大时对于土壤含水量的高估现象更加明显,是造成两种卫星遥感产品精度差异的另一重要原因。

4) 地形与海拔变化也会引起卫星产品反演水平的变化。随着海拔高度升高,卫星观测的准确性降低,其原因有①降水后水分随地形坡度由高到低流动,山顶土壤含水量低而山脚高,山腰处因植被拦截而较为稳定。②由于海拔或者纬度的原因存在土壤表层封冻的复杂情况,这会导致土壤表层的介电常数出现异常,从而导致卫星检索算法的介电质模型无法使用,最终导致土壤含水量的观测结果不准确。除此之外,根据本文的研究数据,相对于SMAP卫星而言,SMOS卫星的检索算法有可能在土层出现封冻的情形下适应性更差。

## 参考文献:

- [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).
- [2] DALY E, PORPORATO A. A review of soil moisture dynamics: From rainfall infiltration to ecosystem response[J]. *Environmental Engineering Science*, 2005, 22(1):9-24.
- [3] DOUVILLE H, CHAUVIN F. Relevance of soil moisture for seasonal climate predictions: A preliminary study [J]. *Climate Dynamics*, 2000, 16 (10/11) : 719-736.
- [4] SCHMUGGE T, GLOERSEN P, WILHEIT T, et al. Remote sensing of soil moisture with microwave radi-

- ometers[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1974, 79(2):317-323.
- [5] 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.
- [6] 姚其华, 邓银霞. 土壤水分特征曲线模型及其预测方法的研究进展[J]. *土壤通报*, 1992(3):142-145.
- [7] ARYA L M, PARIS J F. A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1981, 45(6):1023-1030.
- [8] 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.
- [9] AL-YAARI A, WIGNERON J P, KERR Y, et al. Testing regression equations to derive long-term global soil moisture datasets from passive microwave observations[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 180:453-464.
- [10] KERR Y H, WIGNERON J P, DELWART S, et al. The SMOS mission: new tool for monitoring key elements of the global water cycle[J]. *The Proceedings of IEEE*, 2010, 98(5):666-687.
- [11] 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.
- [12] 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 & Remote Sensing*, 2002, 39(8):1729-1735.
- [13] NJOKU E G, JACKSON T J, LAKSHMI V, et al. Soil moisture retrieval from AMSR-E[J]. *IEEE Transactions Geoscience & Remote Sensing*, 2003, 41(2):215-229.
- [14] WANG J R, CHOUDHURY B J. Remote sensing of soil moisture content, over bare field at 1.4 GHz frequency[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 1981, 86(C6):5277-5282.
- [15] KERR Y H. Soil moisture from space: Where are we?[J]. *Hydrogeology Journal*, 2007, 15(1):117-120.
- [16] OWE M, VAN D G A A. Comparison of soil moisture penetration depths for several bare soils at two microwave frequencies and implications for remote sensing[J]. *Water Resources Research*, 1998, 34(9):2319-2327.
- [17] ENTEKHABI D, REICHLER R H, KOSTER R D, et al. Performance metrics for soil moisture retrievals and application requirements[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2009, 11(3):832-840.
- [18] GONZALEZ-ZAMORA A, SANCHEZ N, MARTINEZ-FERNANDEZ J, et al. Validation of SMOS and Aquarius soil moisture using two in situ networks in Spain [C]//2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium(IGARSS):4738-4741.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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[J]. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 2015, 34(2):287-291.
- [22] 白瑜, 孟治国, 赵凯, 等. 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[J]. *遥感技术与应用*, 2018, 33(1):78-87.
- [23] FENG X, LI J, CHENG W, et al. Evaluation of AMSR-E retrieval by detecting soil moisture decrease following massive dryland re-vegetation in the Loess Plateau, China[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 196:253-264.
- [24] CUI C, XU J, ZENG J, et al. Soil moisture mapping from satellites: an intercomparison of SMAP, SMOS, FY3B, AMSR2, and ESA CCI over two dense network regions at different spatial scales[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(1):33-51.
- [25] JACKSON T J, COSH M H, BINDLISH R, et al. Validation of advanced microwave scanning radiometer soil moisture products[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2010, 48(12):4256-4272.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 陈泓羽,吴静,李纯斌,等. 卫星土壤水分产品在青藏高原地区的适用性评价[J]. *生态学报*, 2020, 40(24): 9195–9207.
- [29] KERR Y, PHILIPPE W, WIGNERON J, et al. The SMOS mission: new tool for monitoring key elements of the global water cycle [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2010, 98(5): 666–687.
- [30] 陈勇强,杨娜,胡新,等. SMOS与SMAP过境时段表层土壤水分的稳定性研究[J]. *遥感技术与应用*, 2020, 35(1): 58–64.
- [31] 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.
- [32] KERR Y H, WALDTEUFEL P, WIGNERON J P, et al. The SMOS mission: new tool for monitoring key elements of the global water cycle [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2010, 98(5): 666–687.
- [33] O'NEILL P, CHAN S, YUEH S, et al. evaluation of the validated soil moisture product from the SMAP radiometer [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2016, 98(5): 125–128.
- [34] BENESTY J, CHEN J, HUANG Y, et al. Pearson correlation coefficient [M]//*Noise Reduction in Speech Processing*. Heidelberg: Springer, 2009: 1–4.
- [35] WANG W, LU Y. Analysis of the mean absolute error (MAE) and the root mean square error (RMSE) in assessing rounding model [C]// *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 2018, 324(1): 012049.
- [36] ENTEKHABI D, REICHLER R H, KOSTER R D, et al. Performance metrics for soil moisture retrievals and application requirements [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2010, 11(3): 832–840.
- [37] STENSURUD E, FOSS T, KITCHENHAM B, et al. An empirical validation of the relationship between the magnitude of relative error and project size [C]//*Proceedings of 8th IEEE Symposium on Software Metrics*. Ottawa, Canada, 2002.
- [38] NOSSENT J, BAUWENS W. Application of a normalized Nash–Sutcliffe efficiency to improve the accuracy of the Sobol' sensitivity analysis of a hydrological model [C]//*Geophysical Research Abstracts*. Vienna, Austria, 2012.
- [39] LAUW H W, LIM E, WANG K. Bias and controversy: beyond the statistical deviation [C]//*Proceedings of the Twelfth ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. Philadelphia, USA, 2006.
- [40] 刘强,杜今阳,施建成,等. 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[J]. *中国科学:地球科学*, 2013(10): 1677–1690.
- [41] 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[J]. *遥感学报*, 2004, 8(3): 207–213.
- [42] 王定文,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[J]. *遥感技术与应用*, 2016, 31(3): 580–589.

(责任编辑 秦社彩)