

全球土壤水分产品融合数据集 (2015–2019)

王卓颖¹, 刘杨晓月^{2,3,*}

1. 江西理工大学土木与测绘工程学院, 江西赣州 341000;
2. 广东省科学院广州地理研究所, 广州 501170;
3. 南方海洋科学与工程广东省实验室, 广州 511458

摘要: 在 2015–2019 年 ESA CCI v05.2 多源卫星融合土壤水分产品 (ECV SM, 1d, 0.25°×0.25°) 基础上, 利用 2015 年问世的 SMAP 土壤水分产品对 ECV 进行时空序列插补, 采用重投影、重采样和加权计算实现 ECV SM 的补全与完善。基于欧洲区域的 8 个土壤水分地面实测网络共计 134 个监测站点数值对其结果进行对比分析和验证, 表明融合后的土壤水分产品不仅空间完整性得到显著提升 (提升约 20%), 数据质量也比原始的 ECV SM 有所改善。数据集存储格式为.tif, 由 1,737 个文件组成, 数据量为 6.71 GB。

关键词: 土壤水分; 全球尺度; 逐日数据; 2015–2019

DOI: <https://doi.org/10.3974/geodp.2020.04.01>

数据可用性声明:

本文关联实体数据集已在《全球变化数据仓储电子杂志 (中英文)》出版, 可获取:
<https://doi.org/10.3974/geodb.2020.08.03.V1>

1 前言

土壤水分一般指单位体积土壤中所含液态水的体积, 是全球气候变化、陆地表面水文过程、碳循环的关键物理量之一^[1–4]。土壤水分通过改变土壤热容量, 控制地表蒸发和植被蒸腾, 影响植被生长^[5–7]。因此, 获取土壤水分含量数据不仅对于分析陆地生态系统演替、碳氮水循环过程具有关键科学意义, 而且对于开展旱涝灾害预警、进行农作物估产具有重要实际应用价值^[8–11]。

卫星遥感技术是获取全球尺度、连续时间序列陆地表层土壤水分数据的重要手段, 海量丰富的卫星土壤水分产品为开展全球气候演化分析提供了前所未有的机遇^[12–13]。但受到卫星扫描间隙、射频干扰、植被光学厚度、冰冻季节等影响, 基于卫星遥感反演的土壤水分产品存在大量的空值区域^[14–16]。不同微波波段 (如 C 波段、X 波段、K 波段、Ka 波段、L 波段) 对地表土壤水分的敏感度也不尽相同^[17]。为了提高卫星土壤水分产品的时空序列完整性和数据质量, 欧洲太空局 (European Space Agency, ESA) 在 2010 年起致力于融合多源卫星遥感数据, 形成一套迄今为止时间序列最长的多源卫星数据融合全球地表土壤水

收稿日期: 2020-10-19; 修订日期: 2020-12-11; 出版日期: 2020-12-24

基金项目: 博士后创新人才支持计划 (BX20200100); 国家对地观测科学数据中心 (NODAOP2020002); 南方海洋科学与工程广东省实验室 (广州) 人才团队引进重大专项 (GML2019ZD0301)

*通讯作者: 刘杨晓月 ABB-3889-2020, 广东省科学院广州地理研究所, lyxy@reis.ac.cn

数据引用方式: [1] 王卓颖, 刘杨晓月. 全球土壤水分产品融合数据集 (2015–2019) [J]. 全球变化数据学报, 2020, 4(4): 315–324. <https://doi.org/10.3974/geodp.2020.04.01>.

[2] 刘杨晓月. 全球土壤水分产品融合数据集 (2015–2019) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2020. <https://doi.org/10.3974/geodb.2020.08.03.V1>

分产品（Essential Climate Variable Soil Moisture, ECV SM）^[18-20]。ECV 土壤水分产品的时间序列长度、空间序列完整性以及数据精度相较于单波段卫星土壤水分产品有了显著提升，但与同化产品相比其空间覆盖率仍有较大提升空间。因此，融入新的卫星土壤水分产品是提升 ECV 土壤水分产品空间完整性和数据质量的有效手段。本数据集将 2015 年问世的 L 波段 SMAP（Soil Moisture Active Passive）土壤水分产品^[21]与 ECV 土壤水分产品融合^[22]，经过重投影、重采样和插补^[23-26]，最终得到了 2015 年 3 月 31 日至 2019 年 12 月 31 日全球地表土壤水分 0.25°分辨率逐日数据集。

2 数据集元数据简介

《全球土壤水分产品融合数据集（2015–2019）》^[27]的名称、作者、地理区域、数据年代、时间分辨率、空间分辨率、数据集组成、数据出版与共享服务平台、数据共享政策等信息见表 1。

表 1 《全球土壤水分产品融合数据集（2015–2019）》元数据简表

条目	描述
数据集名称	全球土壤水分产品融合数据集（2015–2019）
数据集短名	Global_SM
作者信息	刘杨晓月 ABB-3889-2020, 广东省科学院广州地理研究所, lyxy@lreis.ac.cn
地理区域	全球
数据格式	.tif
数据集组成	包括 1,737 个数据文件，自 2015 年 3 月 31 日至 2019 年 12 月 31 日期间每天有一个数据文件，以 SM-yyyymmdd.tif 形式命名，如 SM-20160101.tif 是 2016 年 1 月 1 日的全球土壤水分融合数据
基金项目	博士后创新人才支持计划（BX20200100）；国家对地观测科学数据中心（NODAOP2020002）；南方海洋科学与工程广东省实验室（广州）人才团队引进重大专项（GML2019ZD0301）
数据计算环境	Python 2.7
出版与共享服务平台	全球变化科学研究数据出版系统 http://www.geodoi.ac.cn
地址	北京市朝阳区大屯路甲 11 号 100101, 中国科学院地理科学与资源研究所
数据共享政策	全球变化科学研究数据出版系统的“数据”包括元数据（中英文）、通过《全球变化数据仓储电子杂志（中英文）》发表的实体数据和通过《全球变化数据学报（中英文）》发表的数据论文。其共享政策如下：（1）“数据”以最便利的方式通过互联网系统免费向全社会开放，用户免费浏览、免费下载；（2）最终用户使用“数据”需要按照引用格式在参考文献或适当的位置标注数据来源；（3）增值服务用户或以任何形式散发和传播（包括通过计算机服务器）“数据”的用户需要与《全球变化数据学报（中英文）》编辑部签署书面协议，获得许可；（4）摘取“数据”中的部分记录创作新数据的作者需要遵循 10% 引用原则，即从本数据集中摘取的数据记录少于新数据集总记录量的 10%，同时需要对摘取的数据记录标注数据来源 ^[28]
数据和论文检索系统	DOI, DCI, CSCD, WDS/ISC, GEOSS, China GEOSS, Crossref

3 数据研发方法

3.1 数据来源

本数据集中所采用的 ECV 土壤水分产品为基于多源主动微波（ERS-1、ERS-2、MetOp-A、ASCAT）和被动微波产品（SMMR、SSM/I、TMI、AMSR-E、AMSR-2、Windsat、

SMOS) 融合的全球逐日土壤水分产品^[21]。本数据集采用的 SMAP 土壤水分产品为基于 L 波段被动微波辐射计反演的 2015–2019 年全球逐日土壤水分产品, 空间分辨率为 36 km^[22]。大量已有研究表明 L 波段对地表土壤水分的敏感度优于其他微波波段, 对地面的穿透深度与土壤水分地面监测传感器的埋深最为接近。研发机构从 SMAP 卫星传感器设计到反演算法构建均强化了对地面人为射频的抗干扰能力, 经验证表明, SMAP 土壤水分产品的数值精度和时空序列拟合度均优于构成 ECV 的每种卫星土壤水分产品^[23, 29–31]。

数据集评价过程中使用的土壤水分地面实测数据源于国际土壤水分网络^[32], 本研究选用的 8 个土壤水分地面实测网络的基本属性信息如表 2 所示。

表 2 土壤水分地面实测网络基本属性信息

名称	所在国家	站点数量	区域气候	主要土地覆被类型
REMEDHUS	西班牙	20	温带海洋气候	耕地、灌丛
FR_Aqui	法国	4	地中海气候	耕地、林地
FMI	瑞典	20	亚寒带针叶林气候	稀树草原
HOBE	丹麦	27	温带海洋气候	耕地、林地
BIEBRZA_S	波兰	18	温带大陆性气候	草地、湿地
TERENO	德国	5	温带海洋气候	耕地、林地
RMSN	罗马尼亚	19	温带大陆性气候	耕地、林地
SMOSMANIA	法国	21	地中海气候	多类型混合

3.2 研究方法

本研究旨在提高 ECV 土壤水分产品数据完整性同时促进数据精度稳中有升。首先, 利用土壤水分地面实测数据对 SMAP 和 ECV 土壤水分产品进行质量评价。对实测土壤水分数据采取质量控制措施, 实测值一般以小时为单位测定土壤含水量, 仅当一天内有效数据超过 12 小时才认定为有效数据, 计算加权平均值得到各网络各站点日尺度土壤水分实测值。选取拟合优度 (R)、偏差 (Bias) 和无偏均方根误差 (ubRMSE) 作为误差参数来系统验证 ECV、SMAP 数据精度。结果表明 SMAP 升降轨土壤水分产品精度显著优于 ECV 数据, 可作为 ECV 插补的优质数据源。第二, 为提高有效数据百分比, 计算 SMAP 升轨与降轨数据的加权平均得到日尺度 SMAP 土壤水分产品。对 SMAP 进行投影转换和空间重采样, 使其与 ECV 空间属性一致。第三, 基于 Python 读取并遍历 ECV 日尺度数据, 检索空值区域。第四, 采用逐日数据逐行逐列遍历的方式, 使用与 ECV 空间属性一致的 SMAP 日尺度土壤水分产品对 ECV 进行插补, 得到融合的全球土壤水分产品, 并对该产品的空间完整性和数据精度进行评价验证。具体数据研制流程如图 1 所示:

4 数据结果与验证

4.1 数据集组成

数据集包含 1,737 个文件, 格式为.tif, 时间范围从 2015 年 3 月 31 日到 2019 年 12 月 31 日, 空间范围覆盖全球, 时间分辨率为日尺度, 空间分辨率为 0.25°×0.25° (约 25 km×25 km)。数据单位为 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, 即单位体积土壤的含水量, 取值范围是[0,1]。文件命名方式为 SM-yyyyymmdd.tif。

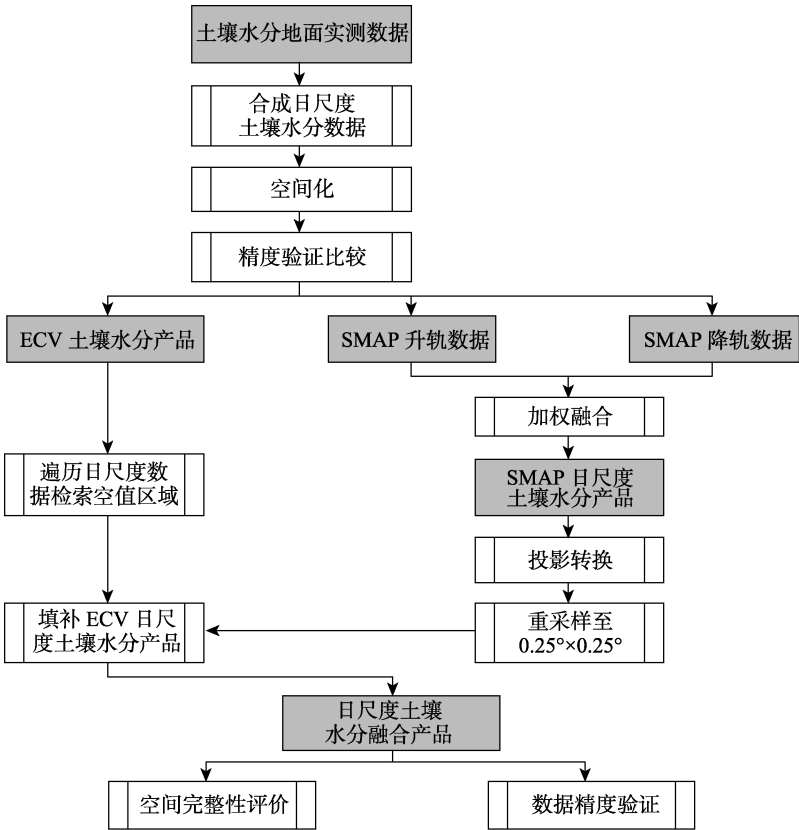


图 1 土壤水分产品融合算法流程图

4.2 数据结果

图 2 为 ECV 土壤水分产品与融合后的土壤水分产品对比，由图可知，土壤水分的时空分布特征与区域季相节律周期高度吻合，主要取值范围是 $0\text{--}0.5\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ 。以 2016 年 1 月 1 日、4 月 1 日、7 月 1 日、10 月 1 日的数据作为融合产品在冬、春、夏、秋四季的样例，比较可得融合后的土壤水分产品空间覆盖完整性较原始 ECV 土壤水分产品有非常显著的改善。冬春季节高纬度地区地表温度恒定在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下，地表为冻土状态，微波仅能测定土壤中液态水的含量，故表现为空值。格陵兰岛和南极大陆终年被冰雪覆盖，同样表现为空值。

4.3 数据结果验证

4.3.1 完整性评价

由图 3 可知，融合后土壤水分产品的全球地表覆盖率较 ECV 土壤水分产品显著提升约 20%，填补了 ECV 在亚马孙热带雨林、刚果盆地热带雨林地区的土壤水分数据空白，为进行土壤水分时空尺度连续分析提供便利。同时，可以观察到土壤水分高覆盖率区域主要分布在 $60^{\circ}\text{S}\text{--}60^{\circ}\text{N}$ 的中低海拔、非植被密集覆盖之处。高寒气候区冬季寒冷漫长，微波信号无法测得液态水回波信号；此外，微波信号难以穿透植被密集覆盖区 $(>5\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2})$ 。

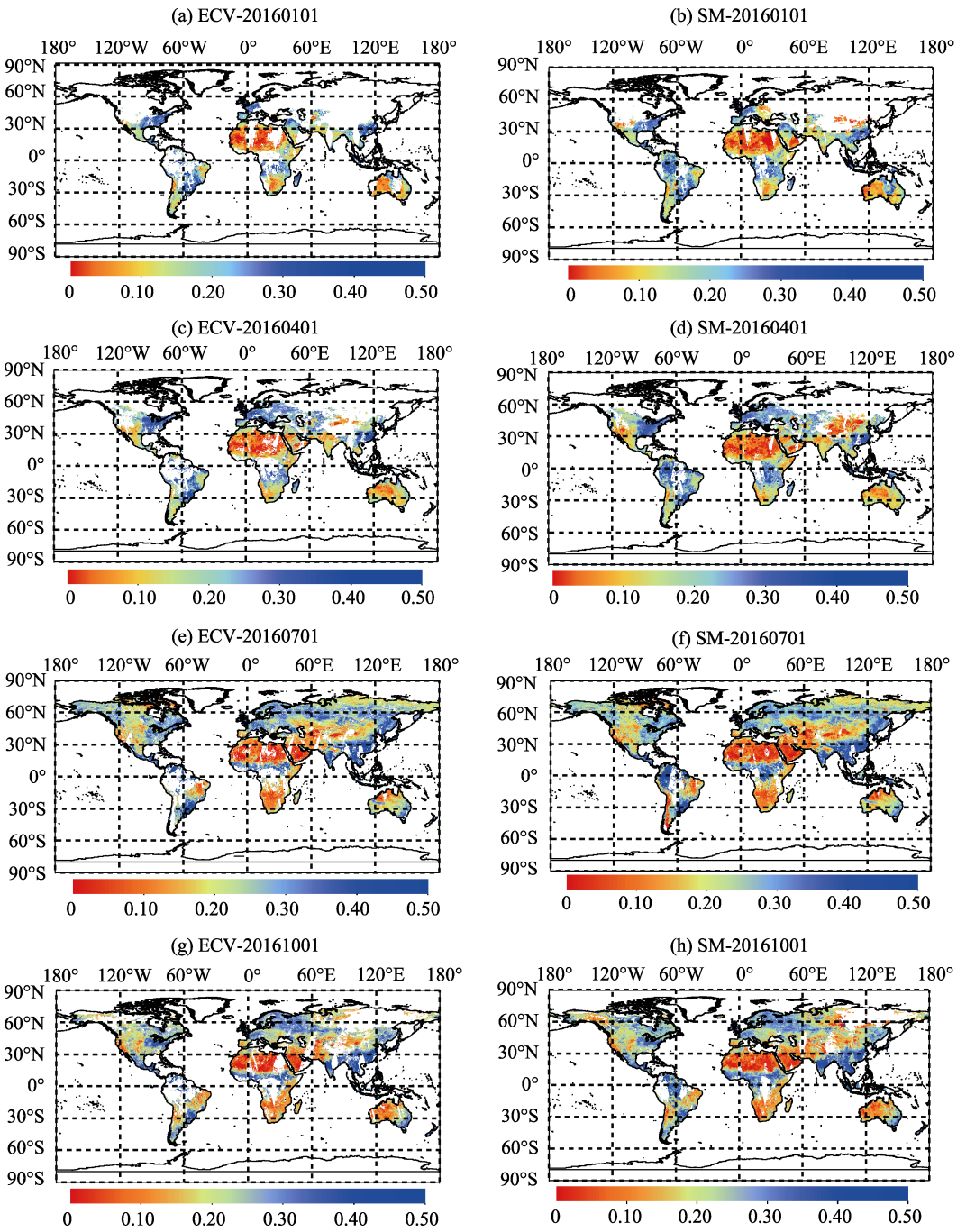


图 2 ECV 土壤水分产品（1 月(a)、4 月(c)、7 月(e)、10 月(g)）与融合后的土壤水分产品（1 月(b)、4 月(d)、7 月(f)、10 月(h)）（单位： $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ）

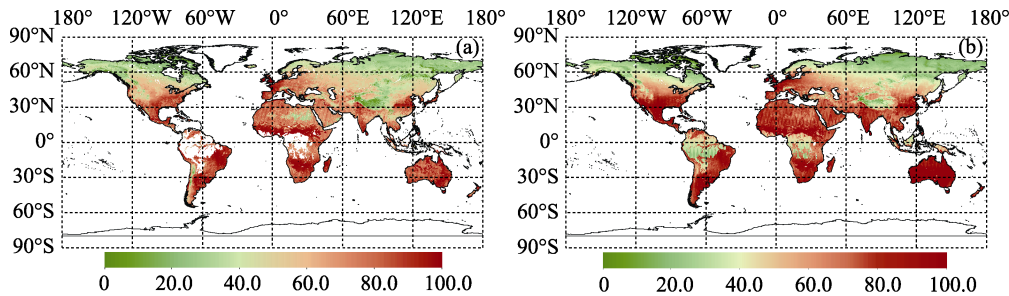


图 3 ECV 土壤水分产品(a)与融合后的土壤水分产品(b)空间覆盖率 (单位: %)

4.3.2 精度验证

利用取自 8 个土壤水分网络共计 134 个站点实测数据, 对 ECV 和 SMAP 升 (A)、降 (D) 轨土壤水分产品开展验证评价。结果如图 4-6 所示, 图中自上而下的水平线分别代表最大值、上四分位、中位数、下四分位和最小值, 虚线是均值, 点代表异常值。SMAP 土壤水分产品拟合优度和偏差的评价结果优于 ECV, 无偏均方根误差的评价结果与 ECV 相当, 充分表明 SMAP 土壤水分产品的质量可靠性, 可以作为有效的融合数据来改善 ECV 土壤水分产品的完整性。

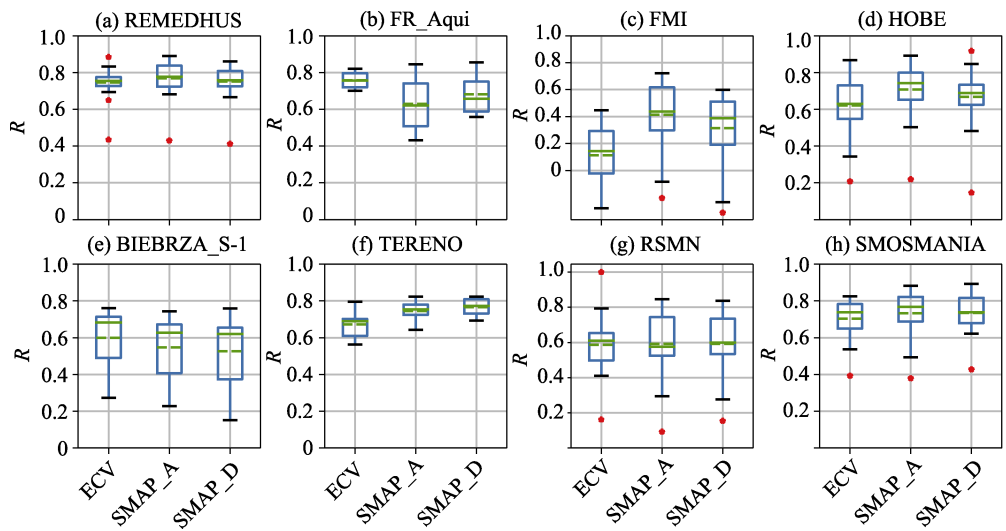


图 4 ECV 和 SMAP 土壤水分产品拟合优度 (R) 验证结果对比图

利用实测数据对土壤水分融合结果进行精度验证, 验证结果如表 3 所示, 融合土壤水分产品与 ECV 土壤水分产品精度水平相当^[33], 在 REMEDHUS、FR_Aqui、RSMN 和 SMOSMANIA 的精度优于 ECV, 能够有效捕捉土壤水分时空序列演化趋势, 精确拟合土壤水分地面实测值^[34]。总体来说, 土壤水分融合结果可以准确反映地面实测数据的分布情况及数值变化。

为进一步分析融合土壤水分产品取值分布与地面实测数据的拟合情况, 本研究绘制了实测数据、ECV、土壤水分融合产品的概率分布函数曲线 (Probability Distribution Function,

PDF)。如图 7 所示，三类土壤水分数据的取值均符合正态分布，地面实测数据（黑线）的取值离散化较为显著，相比而言，ECV 土壤水分产品（红线）取值聚集现象明显，而土壤水分融合产品（蓝线）能够有效调整 ECV 数据取值过于密集分布情况，与实测值曲线更为接近。

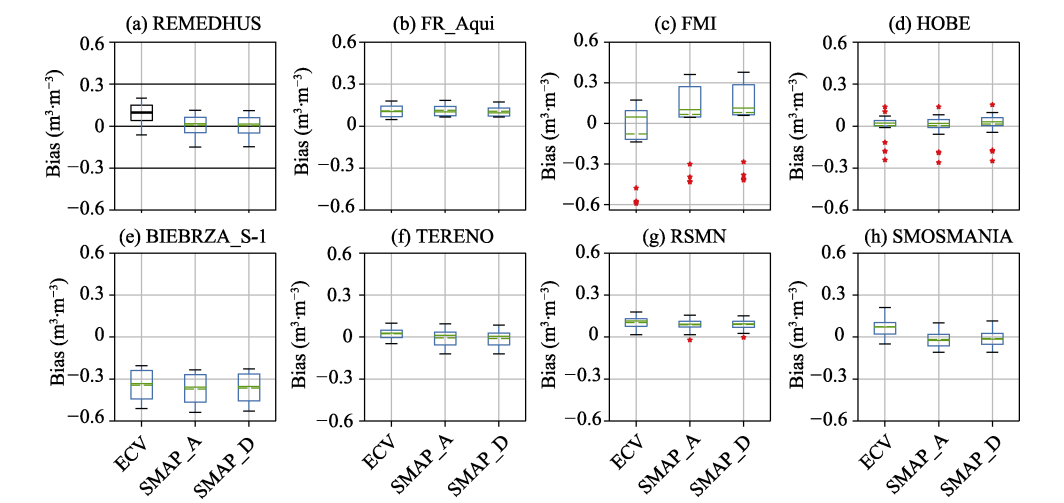


图 5 ECV 和 SMAP 土壤水分产品偏差（Bias）验证结果对比图

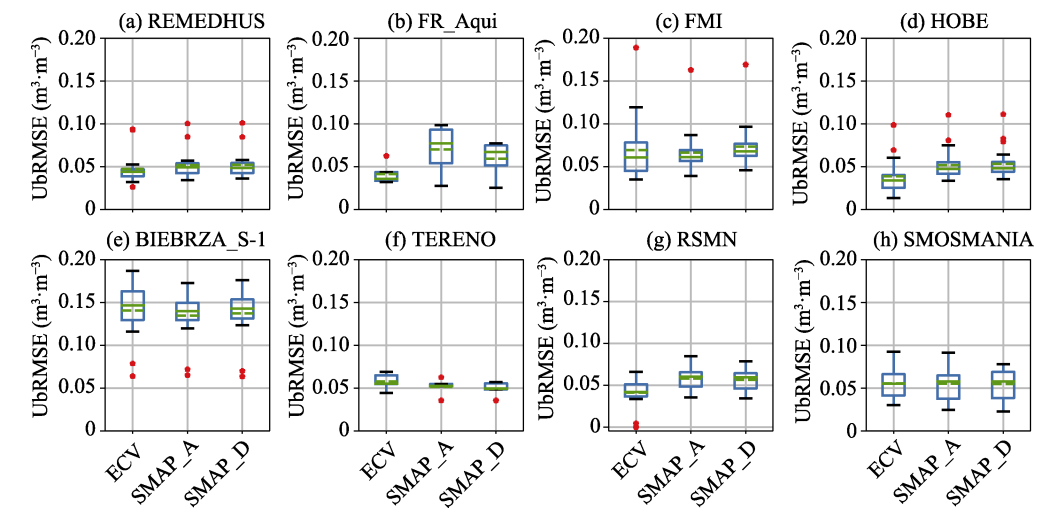


图 6 ECV 和 SMAP 土壤水分产品无偏均方根误差（ubRMSE）验证结果对比图

表 3 ECV 融合土壤水分产品精度评价结果统计表

土壤水分实测网络	拟合优度 R	偏差 Bias	无偏均方根误差 ubRMSE	拟合优度 R	偏差 Bias	无偏均方根误差 ubRMSE
REMEDHUS	0.75	0.09	0.05	0.77	0.08	0.04
FR_Aqui	0.76	0.11	0.04	0.77	0.11	0.04
FMI	0.11	-0.08	0.07	-0.04	0.00	0.06
BIEBRZA_S-1	0.60	-0.34	0.14	0.58	-0.35	0.13
TERENO	0.67	0.02	0.06	0.57	0.02	0.06
RSMN	0.56	0.11	0.05	0.58	0.10	0.05
SMOSMANIA	0.62	0.08	0.10	0.68	0.07	0.06

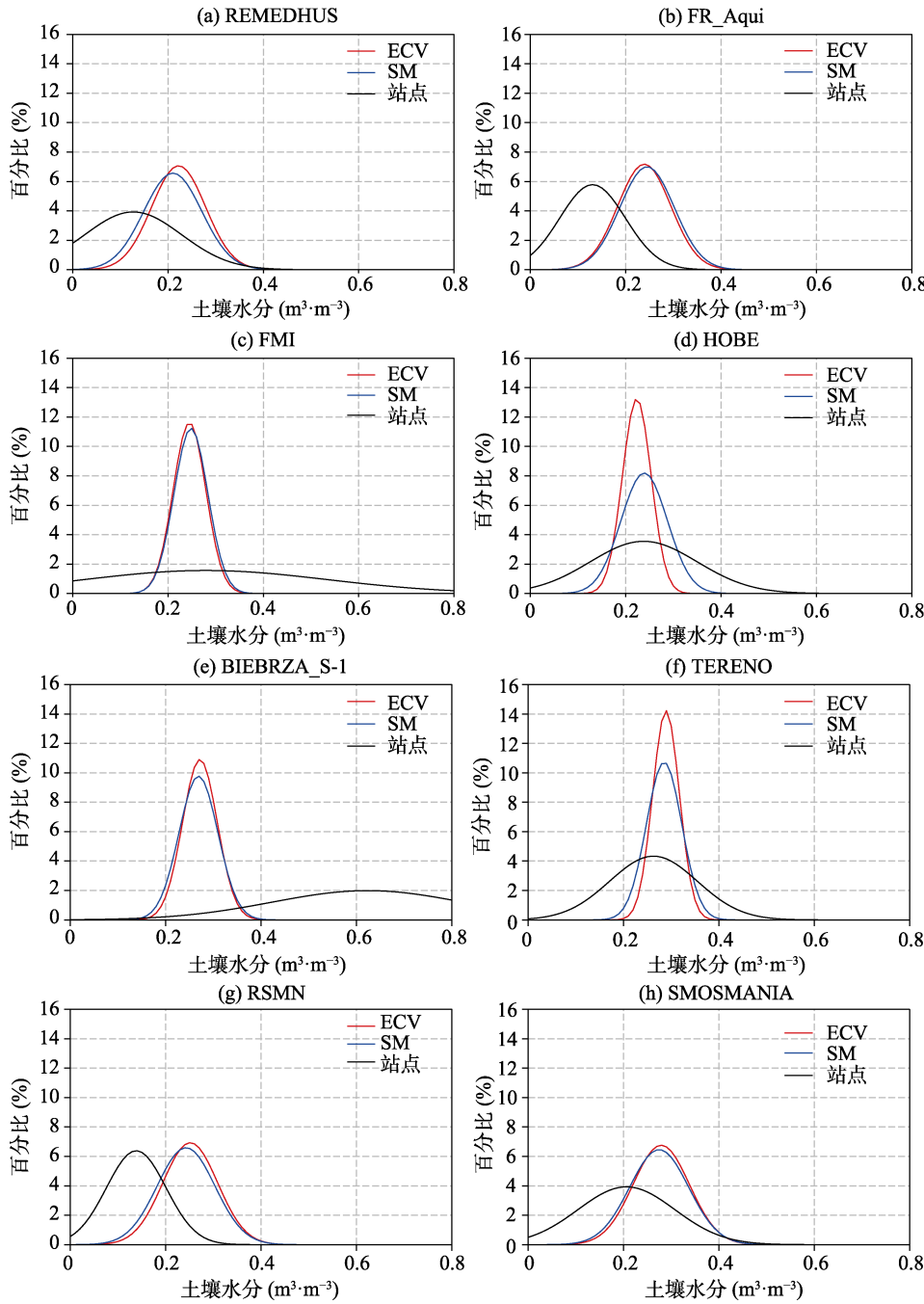


图7 ECV 土壤水分产品与融合后的土壤水分产品 PDF 概率密度分布图

5 讨论和总结

为保证数据质量，在土壤水分融合前后利用分布在 8 个实测网络的 134 个站点实测数据对 ECV、SMAP 升降轨以及融合后的土壤水分产品进行了验证，结果表明本研究获得的土壤水分融合结果能够有效拟合地面实测数据的取值和时空序列演化趋势。本研究的主要

贡献是在保证精度和稳定性的基础上提升了 ECV 土壤水分产品的空间的覆盖完整性, 得到一种高精度、高地表覆盖率的土壤水分融合产品。

本研究以地面站点实测数据作为“理想真值”验证卫星土壤水分产品精度。然而, 站点尺度数据与 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 分辨率栅格像元的空间代表性差异巨大, 且在下垫面性质复杂的区域尤为显著。因此, 基于地面站点实测数据的精度评价能够在一定程度上检验土壤水分融合产品的质量, 但不能完全准确地等价于数据集精度。

空值图斑是卫星土壤水分产品普遍存在的现象, 本研究基于高精度 SMAP 对 ECV 土壤水分产品进行插补, 是提升卫星土壤水分产品空间覆盖率的有效方式之一。基于数学模型构建土壤水分与多源地表参数 (如降水、气温、植被指数) 的映射关系反演土壤水分也是重要的卫星土壤水分插补方法, 有待进一步深入研究。

作者分工: 王卓颖采集和处理了数据、验证了数据精度、撰写了数据论文; 刘杨晓月对数据集的研制做了总体设计、构建了模型和算法等。

参考文献

- [1] Mei, S. Y., Walker, J. P., Rüdiger, C., *et al.* A comparison of SMOS and AMSR2 soil moisture using representative sites of the OzNet monitoring network [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 195: 297–312.
- [2] Tang, R., Li, Z. L., Tang, B. An application of the Ts–VI triangle method with enhanced edges determination for evapotranspiration estimation from MODIS data in arid and semi-arid regions: implementation and validation [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(3): 540–551.
- [3] Liu, Y., Yao, L., Jing, W., *et al.* Comparison of two satellite-based soil moisture reconstruction algorithms: a case study in the state of Oklahoma, USA [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 10(2): 1–18.
- [4] Liu, Y., Jing, W., Wang, Q., *et al.* Generating high-resolution daily soil moisture by using spatial downscaling techniques: a comparison of six machine learning algorithms [J]. *Advances in Water Resources*, 2020, 141: 103601.
- [5] Dong, J., Crow, W. T., Tobin, K. J., *et al.* Comparison of microwave remote sensing and land surface modeling for surface soil moisture climatology estimation [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 242: 111756.
- [6] Rigden, A., Mueller, N., Holbrook, N., *et al.* Combined influence of soil moisture and atmospheric evaporative demand is important for accurately predicting US maize yields [J]. *Nature Food*, 2020, 1(2): 127–133.
- [7] 邴龙飞, 苏红波, 邵全琴等. 近 30 年来中国陆地蒸散量和土壤水分变化特征分析[J]. *地球信息科学学报*, 2012, 14(1): 1–13.
- [8] Lakshmi, V., Piechota, T., Narayan, U., *et al.* Soil moisture as an indicator of weather extremes [J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(11): 1–4.
- [9] Liu, J., Shi, C., Sun, S., *et al.* Improving land surface hydrological simulations in China using CLDAS meteorological forcing data [J]. *Journal of Meteorological Research*, 2019, 33(6): 1194–1206.
- [10] Qin, J., Yang, K., Lu, N., *et al.* Spatial upscaling of in-situ soil moisture measurements based on MODIS-derived apparent thermal inertia [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 138: 1–9.
- [11] 刘苏峡, 邢博, 袁国富等. 中国根层与表层土壤水分关系分析[J]. *植物生态学报*, 2013, 37(1): 1–17.
- [12] Dorigo, W., Wagner, W., Albergel, C., *et al.* ESA CCI soil moisture for improved earth system understanding: state-of-the art and future directions [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 203: 185–215.
- [13] Liu, Y., Yang, Y., Jing, W., *et al.* Comparison of different machine learning approaches for monthly satellite-based soil moisture downscaling over northeast China [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(1): 31.
- [14] Draper, D. W. Radio frequency environment for earth-observing passive microwave imagers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing*, 2018, 11(6): 1913–1922.

- [15] Piepmeier, J. R., Johnson, J. T., Mohammed, P. N., *et al.* Radio-Frequency interference mitigation for the Soil Moisture Active Passive Microwave Radiometer [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2014, 52(1): 761–775.
- [16] Zou, X., Zhao, J., Weng, F., *et al.* Detection of radio-frequency interference signal over land from FY-3B microwave radiation imager (MWRI) [J]. *Advances in Meteorological Science & Technology*, 2013, 50(12): 4994–5003.
- [17] Sabaghy, S., Walker, J. P., Renzullo, L. J., *et al.* Spatially enhanced passive microwave derived soil moisture: capabilities and opportunities [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 209: 551–580.
- [18] Hollmann, R., Merchant, C. J., Saunders, R., *et al.* The ESA climate change initiative: satellite data records for essential climate variables [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2013, 94(10): 1541–1552.
- [19] Dorigo, W. A., Gruber, A., Jeu, R. A. M. D., *et al.* Evaluation of the ESA CCI soil moisture product using ground-based observations [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 162(2): 380–395.
- [20] Chakravorty, A., Chahar, B. R., Sharma, O. P., *et al.* A regional scale performance evaluation of SMOS and ESA-CCI soil moisture products over India with simulated soil moisture from MERRA-Land [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 186: 514–527.
- [21] ESA CCI Soil Moisture [DB/OL]. <https://www.esa-soilmoisture-cci.org/>.
- [22] SMAP Data [DB/OL]. <https://nsidc.org/data/smap/smap-data.html>.
- [23] Spencer, M., Wheeler, K., White, C., *et al.* The Soil Moisture Active Passive (SMAP) mission L-Band radar/radiometer instrument [A]. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2010 IEEE International, 2010: 3240–3243.
- [24] O'Neill, P., Entekhabi, D., Njoku, E., *et al.* The NASA Soil Moisture Active Passive (SMAP) mission: Overview [A]. *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2010 IEEE International, 2010: 1210–1223.
- [25] Ma, H., Zeng, J., Chen, N., *et al.* Satellite surface soil moisture from SMAP, SMOS, AMSR2 and ESA CCI: a comprehensive assessment using global ground-based observations [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 231: 111215.
- [26] Liu, Y., Yang, Y., Jing, W. Potential applicability of SMAP in ECV soil moisture gap-filling: a case study in Europe [J]. *IEEE Access*, 2020, 8(133): 114–127.
- [27] 刘杨晓月. 全球土壤水分产品融合数据集(2015–2019)[J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2020. <https://doi.org/10.3974/geodb.2020.08.03.V1>.
- [28] 全球变化科学研究数据出版系统. 全球变化科学研究数据共享政策[OL]. <https://doi.org/10.3974/dp.policy.2014.05> (2017年更新).
- [29] Stillman, S., Zeng, X. Evaluation of SMAP soil moisture relative to five other satellite products using the climate reference network measurements over USA [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2018, 99: 1–10.
- [30] 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.
- [31] Zhang, X., Zhang, T., Zhou, P., *et al.* Validation analysis of SMAP and AMSR2 soil moisture products over the United States using ground-based measurements[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(2): 104.
- [32] International Soil Moisture Network. <https://ismn.geo.tuwien.ac.at/en/>.
- [33] Cui, C., Xu, J., Zeng, J., *et al.* Soil moisture mapping from satellites: an inter-comparison of SMAP, SMOS, FY3B, AMSR2, and ESA CCI over two dense network regions at different spatial scales [J]. *Remote Sensing*, 2017, 10(2): 33.
- [34] Burgin, M. S., Colliander, A., Njoku, E. G., *et al.* A comparative study of the SMAP passive soil moisture product with existing satellite-based soil moisture products [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2017, 55(5): 2959–2971.