

卫星多频土壤湿度和植被光学厚度观测

赵天杰¹, 彭志晴¹, 胡路², 施建成³

1: 中国科学院空天信息创新研究院, 北京, 中国

2: 南京大学, 南京, 中国

3: 中国科学院空间科学中心, 北京, 中国

地表土壤湿度 (SSM) 和植被光学厚度 (VOD) 是陆地生态系统中的关键变量。微波遥感提供了一种独特的方式来获取全球 SSM 和 VOD 的数据, 利用了各种航天传感器, 包括高级微波扫描辐射计 (AMSR-E)、土壤湿度和海洋盐度卫星 (SMOS)、AMSR2 和土壤湿度主被动卫星 (SMAP) 等。这些微波传感器在不同频率下运行, 具有不同的植被穿透能力, 并可能提供土壤-植物-大气连续体 (SPAC) 系统的重要信息。

在本研究中, 我们应用多通道协同算法 (MCCA) 对 AMSR-E/2 和 SMAP 观测数据进行处理, 得到了一致的 SSM 和 VOD 产品。MCCA 的主要思想是将核心通道上的土壤和植被之间的关系应用于协同通道, 具有三个特点: (1) 与其他反演算法使用迭代过程反演 VOD 不同, 提出了一个解析解来求解植被透射率, 然后推导 VOD; (2) 提出了一个通用函数来描述不同通道 (频率、极化和入射角) 之间的 VOD 关系; (3) 协同通道上的亮度温度 (T_b) 是根据核心通道上的 T_b 基于 τ - ω 模型的双极化版本推导出来的, 不依据任何假设。

SMAP MCCA 反演结果与其他 SSM 和 VOD 产品 (MT-DCA 版本 5, 以及来自 SMAP Level-3 版本 8 产品的 DCA、SCA-H、SCA-V 和 SMAP-IB) 进行了比较, 显示出类似的空间模式。MCCA 推导的 SSM 具有最低的无偏均方根误差 $ubRMSE$ 为 $0.055 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 其次是 SMAP-IB 和 DCA ($0.061 \text{ m}^3/\text{m}^3$), 整体 Pearson 相关系数为 0.744 (SMAP-IB 的 $R=0.764$, 在与国际土壤湿度网络 ISMN 的原位观测进行对比时表现最佳)。在广泛使用的验证空间网络 SCAN 中也发现了类似的准确性。MCCA 生成了垂直和水平极化的 VOD。虽然极化 VOD 的幅度低于其他产品, 但发现 MCCA 极化 VOD 与活性生物量和冠层高度具有良好的线

性关系，尽管在热带森林的活性生物量关系中存在部分饱和，但在冠层高度关系中不存在。L 波段 VOD 的极化差异主要集中在植被茂密和干旱地区。

AMSR-E/2 MCCA 反演结果与其他 SSM 产品（AMSR-ANN、CCI-passive v07.1、LPRMC/X、JAXA）在 ISMN 土壤湿度网络上进行了比较。尽管 MCCA 的 R 值(0.709)略低于 LPRM-X(0.735)，但在 $RMSE=0.074 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ， $ubRMSE=0.073 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 和偏差= $0.007 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 方面，MCCA 取得了最佳成绩。对于间接评估与地上生物量（AGB）和 MODIS NDVI 相关的 VOD，MCCA 产品表现与其他产品（LPRM-C/X、VODCA-C/X/Ku）相当。MCCA 推导的 VOD 在大多数地区与 AGB 呈现出平滑的非线性密度分布，并且与 MODIS NDVI 具有高的时间相关性，特别是对于 H 极化的 VOD。MCCA 推导的 VOD 可以在微波频谱上合理地呈现出变化（VOD 随着微波频率增加而增加），这优于 LPRM 和 DCA。

此外，考虑到现有的土壤湿度产品是使用不同的算法和来自不同频率的被动微波观测数据反演的，公平比较不同微波频率传感器的感知能力和深度是具有挑战性的。本研究通过比较 SMAP MCCA 和 AMSR2 MCCA 来解决上述问题。评估涉及将卫星土壤湿度与 40 个全球分布的土壤湿度观测网络进行比较，包括区域（密集网络）或网格尺度。研究结果首先表明，与网格尺度相比，MCCA SMAP 和 AMSR2 土壤湿度产品在区域尺度上表现出更好的性能。其次，我们首次提供了证据表明，随着植被覆盖增加，SMAP 优于 AMSR2，两者的感知能力均降低。此外，全球土壤湿度干旱过程的分析表明，与 AMSR2 相比，SMAP 表现出更低的土壤湿度流失率，延长的土壤湿度保持时间和比 AMSR2 更高的凋萎点，这表明 L 波段的贡献深度超过了卫星尺度上的 C、X 和 Ku 波段。

总的来说，本研究开发的 MCCA 产品在地表土壤湿度（SSM）和植被光学厚度（VOD）方面表现良好。对于同时考虑 SSM 和 VOD 效应的研究，例如 SPAC 系统中的水通量，这是至关重要的。此外，该检索是基于每日遥感观测数据实施的，一旦每日 Tb 更新，MCCA 就可以提供连续的每日数据。预计 MCCA 算法可以扩展到即将到来的 Copernicus 成像微波辐射计（CMIR）任务的观测中。