

引用格式: Yang Aoli, Zheng Donghai, Wen Jun, *et al.* Progress on L-band Microwave Radiometry Observation and Soil Moisture Retrieval over the Tibetan Plateau[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(5): 983-996. [杨奥莉, 郑东海, 文军, 等. 青藏高原L波段微波辐射观测与土壤水分反演研究进展[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(5): 983-996.]
DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2021.5.0983

青藏高原L波段微波辐射观测与土壤水分反演研究进展

杨奥莉^{1,2}, 郑东海², 文军¹, 陆宣承¹, 杨越¹, 符晴^{2,3}

(1. 成都信息工程大学大气科学学院, 高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都 610000;
2. 中国科学院青藏高原研究所, 青藏高原地球系统科学国家重点实验室国家青藏高原
科学数据中心, 北京 100101;
3. 兰州大学大气科学学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 土壤水分是地气间水热交换的重要变量, 影响着地表感热潜热划分、水分收支和植被蒸腾等过程, 青藏高原土壤水分的研究对于改进高原水分循环和能量平衡的模拟研究具有重要意义。随着SMOS、SMAP等卫星的发射, L波段被动微波遥感技术成为大尺度监测土壤水分的主要手段。分别从L波段星—机—地观测与微波辐射模拟、区域尺度土壤水分观测、卫星产品评估与土壤水分反演算法发展等方面系统回顾和总结了近年来L波段被动微波遥感及其土壤水分反演算法、产品在青藏高原的主要应用与研究进展。在此基础上, 归纳了当前高原L波段被动微波辐射模拟与土壤水分反演存在的问题, 主要包括缺乏高原尺度的微波辐射模拟评估和改进的卫星土壤水分产品、土壤冻结时期的水分监测产品依然缺失等问题。针对存在的问题, 进一步提出了相关建议与展望, 建议今后的研究应加强高原尺度的微波辐射模拟评估与土壤水分产品改进工作, 并积极拓展土壤水分产品在高原水分循环和能量平衡模拟、植被生长与干旱监测的应用研究。

关键词: L波段被动微波遥感; 土壤水分反演; 微波辐射观测与模拟; 冻土; 青藏高原

中图分类号: TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2021)05-0983-14

1 引言

土壤水分是控制地气间水热交换和调节水文循环的关键状态变量, 对地表感热潜热划分、水分收支和植被蒸腾等过程具有重要调节作用^[1]。在气象学中, 土壤水分通过影响地气间水分和能量交换过程, 从而影响行星边界层动力和热力过程, 进而影响大气状态和气候变化。在农业科学中, 土壤水分是影响植被生长的重要因子, 也是衡量作物干旱灾害的重要指标, 通过对土壤水分的有效监测, 有

助于准确实施农田灌溉措施^[2]。因此, 有效、大范围的土壤水分监测对天气的精准预报以及农业部门耕作相关措施的指导具有重要意义。

青藏高原被称为“世界第三极”, 因其特殊的地形和气候特征, 为全球气候变化反应最为敏感的地区之一, 其热力和动力作用对高原周边、亚洲及北半球的天气和气候具有十分重要的影响^[3]。青藏高原又称“亚洲水塔”, 黄河、长江和澜沧江等均发源于此, 其水分保持与高原、亚洲生态系统维持密不可分。土壤水分作为水循环中的重要组成部分, 对

收稿日期: 2020-06-21; 修订日期: 2021-08-31

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41971308, 41871273)和成都信息工程大学(KTVZ201821)。

作者简介: 杨奥莉(1996—), 女, 四川资阳人, 硕士研究生, 主要从事微波遥感的研究。E-mail: 2287622439@qq.com

通讯作者: 郑东海(1986—), 男, 福建泉州人, 研究员, 主要从事陆面水文、微波辐射过程观测与模拟的研究。E-mail: zhengd@itpcas.ac.cn

于理解和研究青藏高原水循环十分重要。此外,青藏高原属于典型的高寒区,冻土分布广泛,冻土中冰和未冻水的共存会极大改变土壤水热性质,从而影响区域水热交换与径流过程^[4-5]。因此,开展对青藏高原土壤水分及冻融变化的监测对于深入认识高原水分循环与能量平衡过程具有重要意义。

由多个土壤水分观测站点组成的地面观测网能够提供较为精确、周期较长的土壤水分观测数据,但由于观测站点数量的限制,其空间代表性有限。目前,青藏高原建有多个区域尺度土壤水分观测网^[6-7],但由于高原复杂的气候与地形,土壤水分呈现较强空间异质性,针对特定区域的观测网不足以完整描述整个高原土壤水分的时空分布特征。自20世纪70年代以来,卫星遥感技术的发展为大范围监测土壤水分提供了新途径,目前土壤水分监测常用的遥感技术包括可见光遥感、热红外遥感和微波遥感等。研究表明,可见光感和热红外遥感在采集地面数据时受大气、云层和植被等影响较大,探测深度只在土壤表层几毫米范围内,而微波遥感不仅具有全天候全天时的观测优势,对云雾、雨雪和植被的穿透能力较强,且对土壤水分变化较为敏感,因而具备大尺度、长时序监测土壤水分的潜力^[8-9]。

目前常用的微波遥感波段包括L(1~2 GHz)、C(4~8 GHz)和X波段(8~12 GHz),相对于C和X波段,L波段波长更长,对植被和土壤具有更强穿透能力,对土壤水分变化更为敏感,因此L波段通常被认为是监测全球表层土壤水分的最佳波段^[9]。近年来,全球陆续发射了多颗L波段微波遥感卫星,例如欧空局(ESA)的土壤水分和海洋盐度卫星(SMOS)^[10]以及美国宇航局(NASA)的Aquarius卫星^[11]和土壤水分主被动卫星(SMAP)^[12]。此外,我国提出的全球水循环观测卫星(WCOM)计划^[13]将有望实现L波段微波遥感的持续观测,并提供更高精度和长时间序列的土壤水分及冻融状态数据集。

基于卫星观测数据,学者们发展了一系列L波段微波辐射传输模型和反演算法,经历了从地面理论算法试验到星载产品校准验证再到全球业务化监测等过程^[9]。针对L波段微波遥感卫星产品的验证,在全球多种下垫面和气候区域开展了大量地基和机载试验,比如在西班牙巴伦西亚葡萄园开展的MELBEX III试验^[14],在德国热河和埃尔夫特河流域开展的SMOS机载验证试验^[15],分别在澳大利亚和美国开展的SMAPEX^[16]和SMAPVEX15^[17]试验

等,这些试验促进了SMOS和SMAP卫星产品的评估和改进^[9]。此外,我国也分别在黑河流域和滦河流域开展了生态水文遥感试验(Heihe Watershed Allied Telemetry Experimental Research, HiWATER)^[18]和L波段主被动土壤水分专题试验^[19],为我国空间地球科学卫星以及民用空间基础设施相关卫星计划的论证实施奠定了技术基础。此外,SMAP卫星团队还收集了多种植被类型和气候区域的地面核心验证网络来评估其产品性能,其中包括位于青藏高原的玛曲土壤水分观测网络^[20]。

青藏高原地区地形复杂,湖泊广泛分布,存在明显的季节冻融变化,并缺乏准确的土壤数据,这些因素给土壤水分反演带来诸多挑战。此外,受RFI干扰、地形起伏、视场混叠等因素的影响,导致卫星如SMOS成像质量一般和有效数据极为稀少^[21]。为了进一步改进SMOS和SMAP卫星产品,Zheng等^[22]在玛曲土壤水分观测网架设了L波段ELBARA-III微波辐射计,至今已开展连续4a的地面亮温观测^[23]。当前,基于高原几个土壤水分观测网络已开展了许多L波段卫星产品与算法的评估研究,比如Dente等^[24]和Chen等^[25]分别评估了SMOS和SMAP土壤水分产品在高原的适用性及其存在的缺陷,Zheng等^[26]评估和改进了当前SMAP土壤水分反演算法的植被和地表粗糙度参数化方案,并发展了土壤未冻水反演算法。这些产品验证与算法改进工作进一步推动了L波段微波遥感的发展及其卫星产品在青藏高原的应用研究。

本研究系统总结了L波段被动微波遥感及其土壤水分反演算法、产品在青藏高原的主要应用及其研究进展,归纳了当前高原L波段被动微波辐射模拟与土壤水分反演存在的问题,并针对存在的问题提出了相关建议与展望。第二节主要介绍了高原地区开展的机载和地基L波段微波辐射观测试验及对星载L波段微波辐射观测的初步验证,并总结了微波辐射模拟研究进展;第三节介绍了高原现有的土壤水分观测网络,并总结了L波段微波遥感卫星土壤水分产品和反演算法的评估与改进的研究进展;在此基础上,总结了青藏高原土壤水分反演研究存在的主要问题,并进行了相关展望。

2 青藏高原L波段微波辐射观测与模拟研究进展

近年来,学者们利用青藏高原机载和地基等平

台收集的L波段辐射观测对卫星观测进行评估,并开展了L波段微波辐射模拟与模型改进研究。本节将详细介绍青藏高原L波段微波辐射观测试验,包括机载和地基试验及其对星载平台观测的评估,并总结当前L波段卫星任务采用的前向模拟算法及其在高原地区的应用与改进。

2.1 L波段微波辐射观测

2.1.1 青藏高原机载和地基观测试验

为了促进青藏高原L波段微波辐射的观测研究,分别在高原东北部的黑河流域和黄河源区东南部的玛曲地区开展了机载和地基试验。在基金委重大研究计划的支持下,为了提高对流域水文和生态过程的观测能力,建立国际领先的流域观测系统,于2012~2015年在黑河流域开展了生态水文遥感试验(Heihe Watershed Allied Telemetry Experimental Research, HiWATER)^[18,27],结合了地面、航空遥感和卫星等多种观测方式。其中,为了发展基于被动微波遥感的流域土壤水分产品,在2012年6月29日~8月2日,开展了多次基于机载PLMR(Polarimetric L-band Multibeam Radiometer)辐射计的观测,收集了黑河流域中上游区域的多角度双极化亮温数据^[28]。试验飞行高度为0.3~3 km,对应地面分辨率为0.1~1 km,辐射计入射角度分别为 $\pm 7^\circ$ 、 $\pm 21.5^\circ$ 和 $\pm 38.5^\circ$,中心频率为1.41 GHz。

为了验证SMOS和SMAP卫星亮温观测和评估及发展微波辐射模型与土壤水分反演算法,Zheng等^[22]于2016年初在玛曲土壤水分观测网架设了L波段ELBARA-III微波辐射计(图1)。辐射计安装在4.8 m的高塔上,天线中心位置约在地面上方6.5 m处,天线波束总体朝南,每30 min以 5° 的步长从 $40^\circ \sim 70^\circ$ 的扫描角度进行水平和垂直极化的亮温测量^[23,29]。辐射计附近布置有微气象观测设备,可以测量多种微气象要素,如太阳辐射、风速、风向、气温、气压和空气湿度等。2016年年底,辐射计附近又分别安装了雨量计和涡动观测系统,用于降水和地表湍流通量的测量。此外,2016年8月加设了垂直土壤水分剖面观测探头,每15 min自动收集一次土壤2.5、5、7.5、10、12.5、15、17.5、20、25、30、35、40、45、50、60、70、80、90和100 cm深度处的水分观测数据^[23]。基于ELBARA-III微波辐射计观测,Zheng等^[22-23,26]开展了L波段微波遥感土壤冻融状态的研究,发展了冻土微波辐射模型与土壤未冻水反演算法,并发现L波段微波辐射计在冻结和融化土壤的采样深度均为2.5 cm。

2.1.2 卫星遥感观测及辐射精度评估

经过长期发展,全球成功发射了3颗搭载L波段微波辐射计的卫星,包括欧空局的SMOS、美国宇航局的Aquarius和SMAP,3颗卫星的主要信息

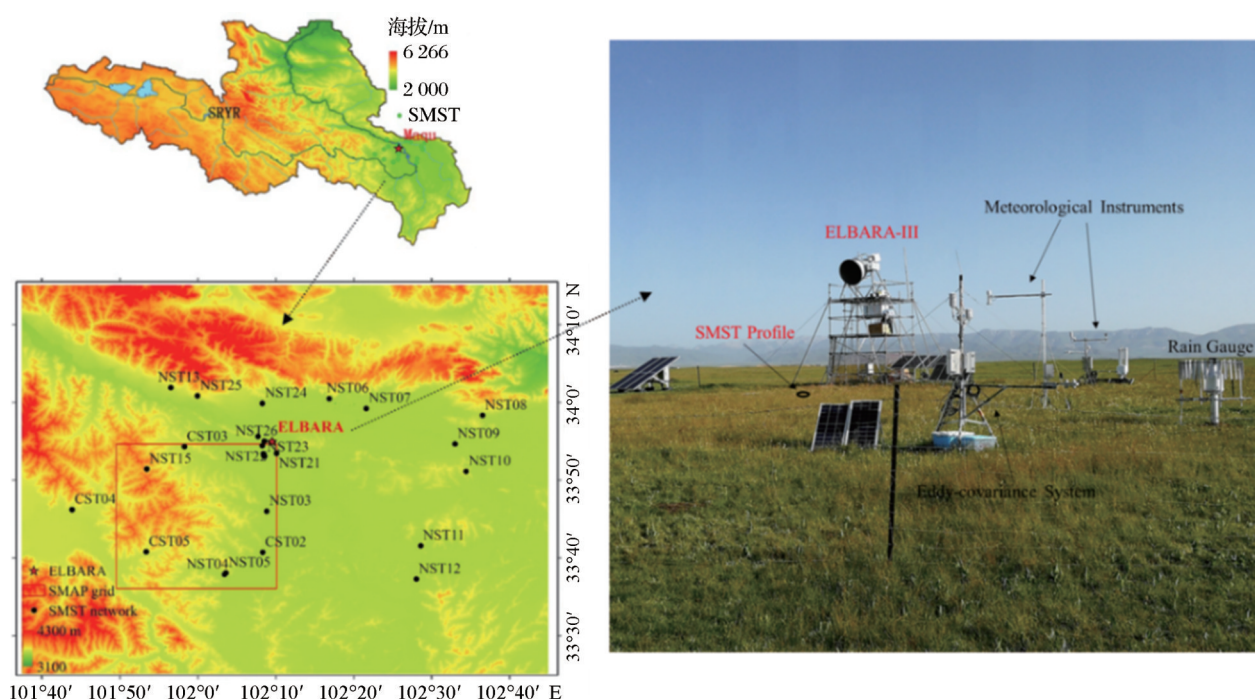


图1 玛曲土壤水分观测网站点位置与分布以及ELBARA-III微波辐射计观测场概况(由Zheng等^[23,29]修改)

Fig.1 Location and distribution of the Maqu soil moisture monitoring network and overview of ELBARA-III field site (modified from zheng *et al.*^[23,29])

如表 1 所示。SMOS 卫星是全球首颗 L 波段被动微波遥感卫星,发射于 2009 年 11 月 2 日,主要目标之一是提供精度为 $0.04 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ 的全球地表土壤水分产品^[10,30]。SMOS 卫星搭载了一个 L 波段微波辐射计(1.41 GHz),在平均高度为 757 km 的太阳同步轨道上运行,提供升轨和降轨数据,对应通过赤道的时间分别为地方太阳时 6:00 和 18:00。微波辐射计采用 Y 形天线,可提供 900 km 测绘带幅宽范围内不同极化方式和入射角($0\sim 55^\circ$)的亮温数据,空间分辨率为 35~50 km。SMOS 卫星提供三级数据,一级数据为仪器亮温数据,包括 L1a、L1b 和 L1c,其中 L1c 经过辐射订正,是一级数据中的最高版本,二级数据为土壤水分相关产品,三级数据为基于二级数据合成的全球土壤水分日变化产品。

Aquarius/SAC-D 是由美国 NASA 和阿根廷 CONAE(Comisión Nacional de Actividades Espaciales)于 2011 年 6 月 10 日联合发起的海洋观测卫星任

务,旨在提供精度为 0.2 个实际盐度单位的每月海洋表面盐度数据,为研究海洋环流、全球水循环和气候之间的耦合等提供数据支持^[11,31]。Aquarius 系统由 3 个双极化 L 波段辐射计(1.41 GHz)和 1 个全极化 L 波段散射计(1.26 GHz)组成,通过 L 波段主被动协同观测,得到全球范围内的土壤水分产品。Aquarius 在离地 657 km 的太阳同步轨道上运行,通过赤道的时间分别为地方太阳时 6:00(降轨)和 18:00(升轨),每隔 7 d 覆盖全球 1 次。Aquarius 传感器观测角度分别为 28.7° 、 37.8° 和 45.6° ,对应空间分辨率分别为 $76 \text{ km} \times 94 \text{ km}$ 、 $84 \text{ km} \times 120 \text{ km}$ 和 $96 \text{ km} \times 156 \text{ km}$ 。Aquarius 任务提供三级数据,一级数据为仪器数据,二级数据包括单轨道的亮温、土壤水分和海洋表面盐度产品,三级数据为二级数据投影到 1° 网格的全球亮温、土壤水分和海洋表面盐度产品。由于电力供应和高度控制系统的故障,Aquarius 任务于 2015 年 6 月 8 日终止。

表 1 SMOS、Aquarius 和 SMAP 卫星主要信息

Table 1 Basic information of SMOS, Aquarius and SMAP satellites

卫星任务	国家/机构	发射时间	设备类型	观测角度	重访周期/d	空间分辨率/km
SMOS	欧洲 ESA	2009.11	L 波段微波辐射计	$0\sim 55^\circ$	1~3	35~50
Aquarius	美国 NASA	2011.06	L 波段微波辐射计与散射计	$28.7^\circ/37.8^\circ/45.6^\circ$	7	$76 \times 94/84 \times 120/96 \times 156$
SMAP	美国 NASA	2015.01	L 波段微波辐射计与合成孔径雷达	40°	2~3	40

SMAP 卫星由美国 NASA 开发,发射于 2015 年 1 月 31 日,主要目的是提供全球范围内高精度和高分辨率的土壤水分和冻融状态数据^[12,32]。SMAP 卫星同时搭载了 L 波段微波辐射计(1.41 GHz)和合成孔径雷达(1.26 GHz),对地表辐射亮温和后向散射系数进行同步测量,进行土壤水分和冻融状态的全球监测,提供分辨率为 $3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$ 、 $9 \text{ km} \times 9 \text{ km}$ 和 $36 \text{ km} \times 36 \text{ km}$ 的卫星产品。SMAP 卫星在离地 685 km 的太阳同步轨道上运行,在地方太阳时 6:00(降轨)和 18:00(升轨)通过赤道,辐射计的观测角度为 40° ,能提供扫描范围内 $40 \text{ km} \times 40 \text{ km}$ 的辐射观测。SMAP 卫星提供四级数据,一级数据为仪器数据,包括亮温数据 L1A_TB、L1B_TB 和 L1C_TB,二级数据为土壤水分反演产品,三级数据为基于二级数据的日合成产品,四级数据为模式同化产品。2015 年 7 月 7 日 SMAP 雷达因故障停止工作,到目前为止,SMAP 辐射计仍稳定工作。

为了验证 L 波段卫星亮温观测在青藏高原地区的精度,将 SMOS 和 SMAP 卫星亮温观测数据和玛曲观测网中 ELBARA-III 微波辐射计观测数据进

行对比分析。图 2 显示了 SMOS、SMAP 和 ELBARA-III 在 2016 年 8 月至 2017 年 7 月亮温观测数据的对比,可以发现亮温与土壤干湿程度及冻融变化显著相关,比如在土壤冻结期间(11 月至次年 2 月)亮温增加,而后随着土壤融化,土壤湿度增加,亮温降低。图中 SMOS 和 SMAP 与 ELBARA-III 亮温趋势基本一致,但 SMAP 观测与 ELBARA-III 观测的一致性更高,Zheng 等^[29]发现两者的相关系数大于 0.87,主要差异由各自扫描范围内的土壤水分状况差异引起。与 SMAP 数据相比,SMOS 数据精度较差,波动较大,这可能与 SMOS 受电磁射频干扰(Radio Frequency Interference, RFI)以及仪器本身稳定性影响有关。

为进一步研究 SMOS 亮温的波动性,图 3 给出了 SMOS 升降轨时刻的亮温偏差情况,该偏差反映的是 SMOS 亮温与模型正向模拟亮温间的均方根误差。从图中可以发现,青藏高原地区 SMOS 亮温均方根误差高达 10~20 K 以上,反映出 SMOS 在高原地区可能受 RFI 和仪器本身稳定性影响比较严重。

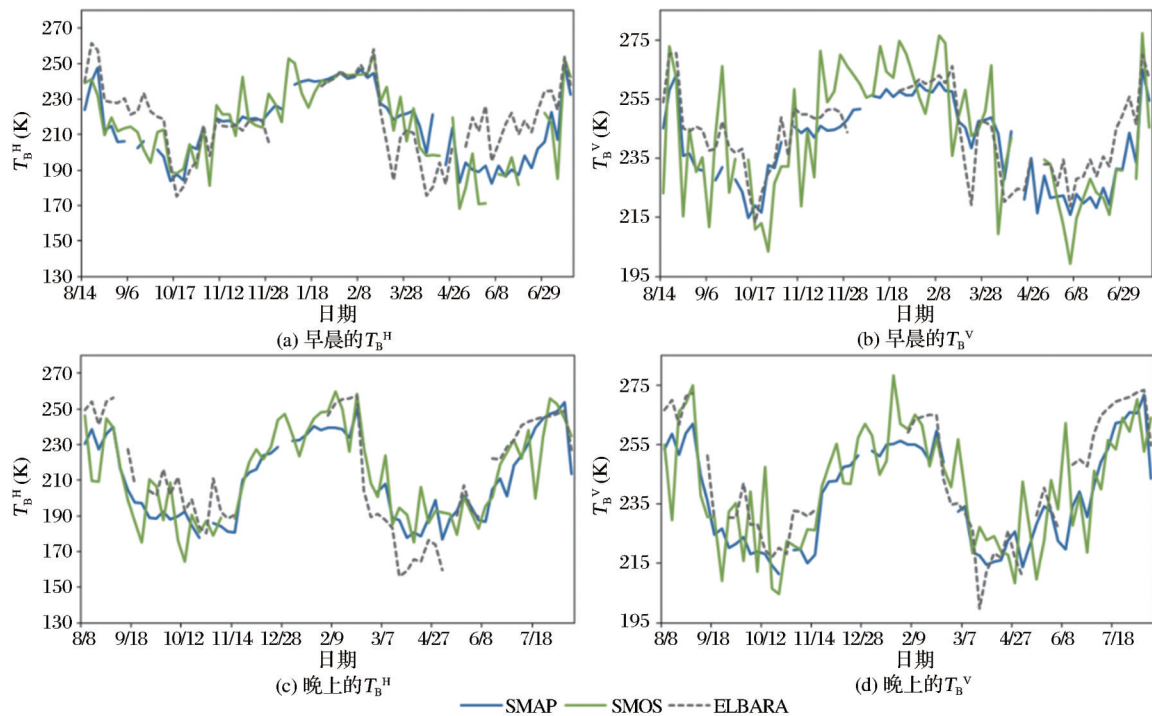


图2 2016年8月至2017年7月SMOS、SMAP和ELBARA-III在早晨6 am(a,b)和晚上6 pm(c,d)过境时刻的水平 T_B^H (a,c)和垂直 T_B^V (b,d)极化观测亮温的比较

Fig.2 Comparisons of SMOS, SMAP and ELBARA-III measured brightness temperature at horizontal (a, c) and vertical (b, d) polarizations during the morning (a, b) and evening(c, d) overpasses between August 2016 and July 2017

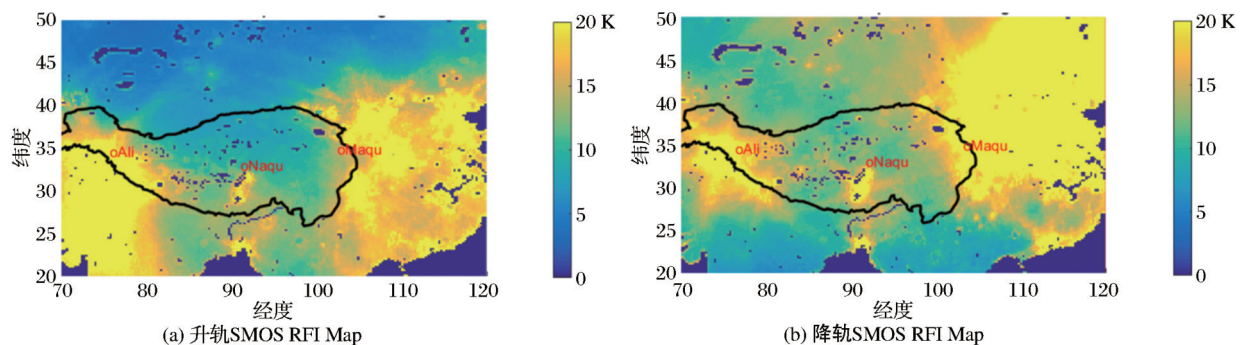


图3 青藏高原及其附近地区SMOS升轨和降轨时刻亮温均方根误差分布图

Fig.3 Spatial distributions of root mean squared errors noted for SMOS over the Tibet Plateau during ascending and descending overpasses

2.2 L波段微波辐射模拟

2.2.1 当前卫星任务采用的前向模拟算法

目前3个L波段卫星任务均采用Mo等^[33]发展的零阶正向微波辐射传输模型— $\tau-\omega$ 用于亮温模拟,该模型中的亮温 T_B^p 由三部分组成:①植被直接向上发射的微波辐射;②植被经地面反射的向上微波辐射;③经植被衰减的土壤微波辐射。模型具体表达如下:

$$T_B^p = (1 - \omega^p)(1 - \gamma^p)T_c + (1 - \omega^p)(1 - \gamma^p)r^p T_c + (1 - r^p)\gamma^p T_g \quad (1)$$

$$\gamma^p = \exp(-\tau^p / \cos(\psi)) \quad (2)$$

其中:上标 p 代表极化方式($p=V$ 为垂直极化; $p=H$ 为水平极化); ω^p 、 γ^p 和 τ^p 分别为不同极化的植被单次散射反照率、透过率和光学厚度; T_c 、 T_g 分别为植被和土壤的有效温度; r^p 为不同极化的粗糙地表反射率; ψ 为卫星观测角度。

表2归纳了当前SMOS、Aquarius和SMAP卫星任务前向模拟算法采用的主要参数化方案,包括粗糙地表反射率、土壤介电常数、土壤有效温度、植被温度、单次散射反照率和光学厚度等的计算。通

常,植被单次散射反照率 ω 由特定植被类型决定,与极化方式无关,如在 SMOS 中,对于稀疏植被下垫面 $\omega=0$,对于森林下垫面 $\omega=0.06\sim 0.08$ 。对于植被光学厚度 τ^p 的计算,在当前 SMOS 算法中 τ^p 是叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)的函数(表 2)^[9],其中的结构参数 b' 和 b'' 取决于特定植被类型;在 Aquarius 和 SMAP 算法中, τ^p 与植被含水量(Vegetation Water Content, VWC)线性相关(表 2)^[34],其中,VWC 由归一化植被指数(Normalized Vegetation Difference Index, NDVI)和植被类型决定。

针对粗糙地表对不同极化微波的反射率 r^p ,目前的卫星任务采用 h-Q-N 模型,其计算公式为^[35-36]:

$$r^p = [(1-Q)r_s^p + Qr_s^q] \exp(-h \cos^N(\psi)) \quad (3)$$

其中: r_s^p 和 r_s^q ($p=H,V;q=V,H$)分别为光滑表面对不同极化微波的反射率,与土壤介电常数有关,可通过菲涅尔方程计算获得。 h 为粗糙高度参数,与地表覆盖类型有关,如在 SMOS 中,对于稀疏植被下垫面 $h=0.1$,对于森林下垫面 $h=0.3$;在 Aquarius 中, h 取为定值 0.1。 Q 表示交叉极化因子,通常取值为 0。 N 表示角度校正常数,其引入是为了更好地解释多角度和双极化测量,在 SMOS 中 N 与极化方式有关,在 Aquarius 和 SMAP 中取为定值 2。

针对被动微波遥感已开发了多种土壤介电常

数模型,如 Dobson 模型^[37]、Wang&Schmugge 模型^[38]和 Mironov 模型^[39]等。当前,SMOS 和 SMAP 卫星采用的是 Mironov 模型,Aquarius 卫星任务采用的是 Wang&Schmugge 模型。目前这些模型仅适用于未冻结土壤,导致卫星任务无法反演冻结期间的土壤液态含水量。

针对土壤有效温度 T_G ,考虑它与土壤温度廓线有关,其表达式如下^[40]:

$$T_G = T_{soil_surf} - (T_{soil_surf} - T_{soil_deep})C_T \quad (4)$$

其中: T_{soil_surf} 和 T_{soil_deep} 分别为土壤表层和深层的温度。当前,SMOS 利用欧洲中尺度天气预报中心(European Centre of Medium Range Weather Forecasting, ECMWF)陆面模式第一和第三层土壤温度作为土壤表层和深层温度,Aquarius 和 SMAP 利用 NASA GEOS-5(Goddard Earth Observation System Model Version 5)第一和第二层土壤温度作为土壤表层和深层温度^[9]。此外, C_T 为拟合参数,在 SMOS 中与土壤水分及参数 W_0 和 b_0 有关,其中,参数 W_0 和 b_0 标准值分别为 $0.3 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ 和 0.3,在 Aquarius 和 SMAP 中 C_T 取值为 0.246^[9]。Aquarius 和 SMAP 假设卫星过境期间大气、植被和近地面土壤处于热量平衡状态,则 T_c 近似等于 T_G ,而 SMOS 则采用 ECMWF 陆面模式输出的表层温度作为 T_c ^[9]。

表 2 SMOS、Aquarius 和 SMAP 卫星任务运行算法的主要组成
Table 2 The main components of SMOS, Aquarius and SMAP algorithms

参数化方案	SMOS(L2 L3)	Aquarius(L2)	SMAP(L2)
粗糙地表反射率	h-Q-N 模型 稀疏植被: $h=0.1$, 森林: $h=0.3$ $Q=0$; $N^V=0$, $N^H=2$	h-Q-N 模型 $h=0.1$ $Q=0$; $N=2$	h-Q-N 模型 $h=f(\text{IGBP})$ $Q=0$; $N=2$
土壤介电常数	L2 V5.5 之后 Mironov 模型 ^[39] $\epsilon_G = f(\text{SM}, T_G, \% \text{ clay})$	Wang&Schmugge 模型 ^[38] $\epsilon_G = f(\text{SM}, T_G, \% \text{ clay})$	Mironov 模型 ^[39] $\epsilon_G = f(\text{SM}, T_G, \% \text{ clay})$
土壤有效温度	$T_G = f(T_{soil_surf}, T_{soil_deep})$ $C_T = (\text{SM} / W_0)^{b_0}$	$T_G = f(T_{soil_surf}, T_{soil_deep})$ $C_T = 0.246$	$T_G = f(T_{soil_surf}, T_{soil_deep})$ $C_T = 0.246$
植被温度	ECMWF 表层土壤温度	$T_c = T_G$	$T_c = T_G$
植被单次散射反照率	稀疏植被: $\omega=0$, 森林: $\omega=0.06\sim 0.08$	$\omega=0.05$	$\omega=f(\text{IGBP})$
植被光学厚度	$\tau^p = b' \cdot \text{LAI} + b''$	$\tau^p = b \cdot \text{VWC}$, $b=0.8$ $\text{VWC} = f(\text{NDVI}, \text{IGBP})$	$\tau^p = b \cdot \text{VWC}$, $b=f(\text{IGBP})$ $\text{VWC} = f(\text{NDVI}, \text{IGBP})$

2.2.2 青藏高原 L 波段微波辐射模拟研究进展

在过去的几年间,国内外学者综合利用机载、地基及星载 L 波段微波辐射观测对当前广泛使用的 $\tau-\omega$ 模型及其参数化方案在青藏高原地区的适用性进行了评估,并发展了适用于高原地区的新的地表粗糙度、植被光学厚度及土壤介电常数参数化方

案,改进了高原不同气候和下垫面类型地区的微波辐射模拟。Zheng 等^[26,41]利用 SMAP 亮温观测评估了当前 SMAP 卫星任务采用的微波辐射传输模型在高原荒漠(阿里观测网)和草地(玛曲观测网)下垫面的适用性,发现 SMAP 模型低估了地表粗糙度影响和高估了植被效应,导致阿里地区全年亮温的

低估,以及玛曲地区暖季亮温的高估和冷季垂直极化亮温的低估。基于此,Zheng等^[26,41]采用Wigner-on等^[42]发展的地表粗糙度参数化方案改进了阿里和玛曲地区的亮温低估问题,并基于离散微波辐射模型模拟发展了新的植被参数化方案,进一步减小玛曲地区的模拟偏差。此外,Zheng等^[43]最新研究发现,在玛曲地区利用2.5 cm单层土壤模型进行辐射模拟与多层土壤模型结果最为吻合。

除了当前广泛使用的 $\tau-\omega$ 模型,学者们基于罗马Tor Vergata大学开发的离散微波辐射模型(Tor Vergata模型)也做了大量关于L波段微波辐射模拟的研究^[22,44-45]。Wang等^[44]利用Tor Vergata模型在玛曲观测网中进行Aquarius卫星任务主被动信号的模拟,发现经参数校准后的Tor Vergata模型亮温和后向散射系数的模拟结果与Aquarius观测间的相关系数分别为0.86和0.68,展现了Tor Vergata模型在玛曲地区的适用性。Bai等^[45]利用经敏感参数校准后的Tor Vergata模型模拟了SMAP卫星的亮温和后向散射系数,发现主被动结合模型的模拟结果与SMAP观测有较好一致性。Zheng等^[22]基于Tor Vergata模型,引进同时适用于冻结和非冻结土壤的四相混合介电常数模型(Four-phase Dielectric Mixing Model)^[46],发现该模型能较好地模拟土壤介电常数,进一步提高了Tor Vergata模型的模拟性能,并揭示了近地面土壤日冻融循环过程是导致微波辐射信号变化的主要因素。

3 青藏高原土壤水分观测和反演研究进展

L波段微波遥感卫星的土壤水分反演算法在青藏高原地区存在一定的误差和局限,为了获取高原

地区更高精度的土壤水分产品,需要进一步评估和改进卫星土壤水分产品和反演算法。其中,高原建立的多个土壤水分观测网收集的原位数据是L波段微波遥感土壤水分产品评估和算法改进的数据基础。本节将详细介绍高原地区土壤水分观测网的具体情况以及L波段微波遥感土壤水分产品评估和反演算法改进的研究进展。

3.1 青藏高原土壤水分观测网

由于土壤水分空间变异性较高,使用单个站点观测值代表区域土壤水分真值误差较大,因此在青藏高原建立了多个土壤水分观测网,包括黑河流域、玛曲、那曲、帕里和阿里观测网等^[6-7,47](图4地形数据来源于“国家青藏高原科学数据中心”(http://data.tpdc.ac.cn)),观测网中分布着密集的土壤水分观测站点,提供了不同土壤层的水分数据。此外,通过土壤采样、实验室测量的方式,这些观测网也提供了区域土壤质地、有机碳含量等信息。表3总结了高原5个土壤水分观测网的基本信息,包括站点数量、气候类型、地表覆盖类型、数据时间分辨率和观测深度等,以下对5个观测网的情况做简要说明。

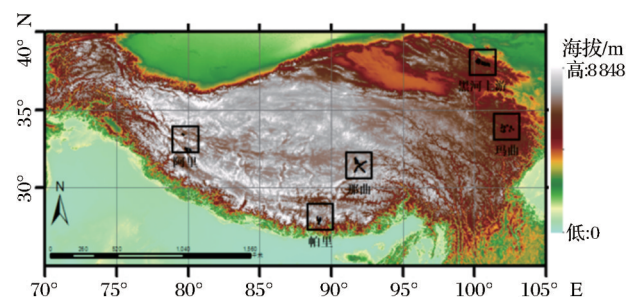


图4 青藏高原土壤水分观测网点分布

Fig.4 Distribution of soil moisture observation networks in the Tibetan Plateau

表3 青藏高原土壤水分观测网基本信息

Table 3 Basic information of the soil moisture observation networks on the Tibetan Plateau

土壤水分观测网	安装时间/年	站点数量/个	气候类型	地表覆盖类型	地理位置	时间分辨率/min	观测深度/cm	参考文献
黑河上游	2013	40	干旱	高山草甸,森林	黑河流域上游	5	4,10,20	Kang,等,2015 ^[47]
玛曲	2008	20	湿润	高山草甸	高原东北边缘	15	5,10,20,40,80	Su,等,2011 ^[6]
那曲	2010	56	半干旱	高山草甸	高原中部	30	5,10,20,40	Yang,等,2013 ^[7]
帕里	2015	25	半干旱	稀疏草地	高原南部	30	5,10,20,40	Chen,等,2017 ^[25]
阿里	2010	20	干旱	荒漠	高原西部	15	5,10,20,40,60	Su,等,2011 ^[6]

黑河是我国第二大内陆河流,流域附近分布着绿洲、荒漠、草地等多种地表覆盖类型。黑河流域上游平均海拔4 869 m,为干旱气候,降水集中在5~

9月,存在多年冻土和季节性冻土,主要被高山草甸、常绿森林和积雪覆盖^[47]。2012年开展的HiWATER试验在黑河上游八宝河流域布置了40个WA-

TER-NET 节点,节点能够进行4、10和20 cm 土壤深度的水分监测,时间分辨率为5 min,相关观测数据发布于“黑河生态水文遥感试验”网站(<http://westdc.westgis.ac.cn/data/df372e4a-7da8-4c9d-8479-75cafb44007f>)。

玛曲土壤水分观测网^[6,48]位于高原东北部的黄河源区,海拔介于3 400~3 800 m,为寒冷湿润气候,地表覆盖类型为高山草甸,年平均气温在1.2℃左右,有较为寒冷的冬季和多雨的夏季。在以玛曲站点为中心的40 km×80 km 范围内,布置了20个土壤水分观测站点^[48],安装了ECH2O 5TM 探头,能进行5、10、20、40和80 cm 深处的土壤水分和温度的测量,时间分辨率为15 min。

那曲土壤水分观测网^[7,25]位于高原中部,平均海拔4 650 m,为半干旱气候,地表覆盖类型为高山草甸,生物量低,土壤有机碳含量高。那曲地区年降水在500 mm 左右,受南亚夏季风的影响,75% 的降水集中在5~10月。那曲地区土壤水分动态变化范围大,且存在典型的冻融循环过程。观测网中布置了56个观测站点,在空间尺度分别为1.0°、0.3°和0.1°的网格中各分布着38、22和9个站点,为土壤水分升降尺度的研究提供观测基础。观测站点安装了ECH2O 5TM 探头,观测深度分别为5、10、20和40 cm,时间分辨率为30 min。

帕里土壤水分观测网^[25]位于高原南部,靠近喜马拉雅山脉北坡,平均海拔4 486 m,为半干旱气候,该地区生物量较低,地表覆盖类型以稀疏草地和裸土为主。帕里地区年平均降水量不足400 mm,受南亚夏季风影响,约85% 的降水集中在5~10月。帕里土壤水分观测网由25个观测站点组成,安装了ECH2O 5TM 探头,观测深度分别为5、10、20和40 cm,时间分辨率为30 min。

阿里土壤水分观测网^[6]位于高原西部,平均海拔4 869 m,为寒冷干旱气候,地表覆盖类型为裸土和荒漠。2010年6月在阿里地区建立了20个土壤水分观测站点,其中4个站点设置在沙漠地区,其余站点位于其东南约100 km 的狮泉河市附近,因此该观测网区域包括从较干到较湿的一系列土壤湿度条件。观测站点安装了ECH2O 5TM 探头,观测深度分别为5、10、20、40和60 cm,时间分辨率为15 min。

3.2 L波段卫星遥感土壤水分产品评估

由于各个L波段微波遥感卫星运行方式、传感器探测方式和仪器精度不同以及土壤水分反演算

法存在差异,导致各个卫星遥感土壤水分产品在青藏高原不同气候和地表覆盖类型区域的适用性各不相同,因此对于卫星遥感土壤水分产品在高原地区的评估十分必要。表4总结了近年来SMOS、Aquarius和SMAP卫星任务土壤水分产品在高原地区的评估情况,评估指标主要包括相关系数R、偏差Bias和均方根误差RMSE。

SMOS卫星是首颗L波段被动微波遥感卫星,学者们对其土壤水分产品在高原地区的适用性做了大量评估。Su等^[6]利用玛曲土壤水分观测网数据对SMOS二级土壤水分产品进行初步评估,发现相关系数可达0.72,均方根误差为0.09 m³m⁻³。Zhao等^[49]利用那曲土壤水分观测网数据评估了SMOS土壤水分产品,发现二、三级产品在SMOS网格尺度(15、25 km)上不确定性较大,在将土壤水分产品平均到100 km 尺度后与站点观测数据相关性更好。Zeng等^[50]同时利用玛曲和那曲土壤水分观测网数据评估了SMOS三级土壤水分产品,发现SMOS观测结果存在较大噪声和偏差,其中降轨数据尤为严重,认为RFI的存在可能是引起SMOS产品偏差的重要因素。此外,评估发现那曲观测网区域反演结果要好于植被覆盖更为密集的玛曲观测网区域。Chen等^[25]同样发现SMOS三级土壤水分产品在那曲观测网区域表现良好,升降轨数据的相关系数分别为0.67和0.73。Liu等^[51]利用黑河、那曲、帕里、玛曲、阿里等5个土壤水分观测网数据评估多种被动微波遥感土壤水分产品时发现SMOS-IC产品受RFI的影响,存在轻微低估,不确定性相对较高。Liu等^[52]进一步基于三角帽方法在青藏高原多个地区对SMOS-IC土壤水分进行评估,同样发现其受RFI的影响较大。总体而言,SMOS卫星土壤水分产品能在一定程度上反映高原土壤水分状况,但高原不同地区表现不一致,且大部分地区存在轻微干偏差,受RFI的影响,土壤水分产品不确定性较高。

针对Aquarius卫星任务的土壤水分产品评估工作相对较少。Li等^[53]利用那曲土壤水分观测网数据对Aquarius三级土壤水分产品进行评估,发现相关系数可达0.77,均方根误差为0.08 m³m⁻³,能较好反映观测网区域内土壤水分的时空变异性。值得注意的是,Aquarius的重访周期为7 d,导致其在研究时间范围内的反演次数有限,且不同轨道、季节和地表覆盖类型对土壤水分产品的影响也很

表 4 SMOS、Aquarius 和 SMAP 卫星任务土壤水分产品在青藏高原的评估总结

Table 4 Summary of SMOS, Aquarius and SMAP soil moisture products validation on the Tibetan Plateau

卫星任务	土壤水分产品	空间分辨率/km	土壤水分观测网	评估指标			参考文献
				R	Bias/m ³ m ⁻³	RMSE/m ³ m ⁻³	
SMOS	L2_SM	25	玛曲	0.72	—	0.09	Su, 等, 2011 ^[6]
	L2_SM	15	那曲	0.41 ^a /0.41 ^d	-0.02 ^a /0.00 ^d	—	Zhao, 等, 2014 ^[49]
	L3_SM	25		0.26 ^a /0.17 ^d	-0.06 ^a /0.03 ^d	—	
	L3_SM	25	玛曲	0.24 ^a /0.20 ^d	-0.03 ^a /0.25 ^d	0.14 ^a /0.37 ^d	Zeng, 等, 2015 ^[50]
			那曲	0.54 ^a /0.43 ^d	-0.07 ^a /0.00 ^d	0.10 ^a /0.14 ^d	
	L3_SM	25	那曲	0.67 ^a /0.73 ^d	-0.02 ^a /-0.01 ^d	0.07 ^a /0.06 ^d	Chen, 等, 2017 ^[25]
			帕里	0.31 ^a /0.37 ^d	-0.02 ^a /-0.04 ^d	0.09 ^a /0.08 ^d	
	SMOS-IC	25	黑河	0.18 ^a /0.30 ^d	-0.04 ^a /-0.12 ^d	0.12 ^a /0.14 ^d	Liu, 等, 2019 ^[51]
			那曲	0.43 ^a /0.47 ^d	-0.13 ^a /-0.05 ^d	0.18 ^a /0.14 ^d	
			帕里	0.60 ^a /0.52 ^d	-0.06 ^a /-0.03 ^d	0.07 ^a /0.09 ^d	
			玛曲	0.49 ^a /0.64 ^d	-0.01 ^a /-0.07 ^d	0.08 ^a /0.11 ^d	
			阿里	0.12 ^a /0.10 ^d	-0.02 ^a /0.00 ^d	0.09 ^a /0.12 ^d	
Aquarius	L3_SM	1°	那曲	0.77	-0.07	0.08	Li, 等, 2015 ^[53]
SMAP	L3_SM_P	36	那曲	0.87 ^d	-0.03 ^d	0.06 ^d	Chen, 等, 2017 ^[25]
			帕里	0.67 ^d	-0.03 ^d	0.04 ^d	
	L3_SM_P	36	黑河	0.64 ^a /0.78 ^d	-0.11 ^a /-0.10 ^d	0.11 ^a /0.11 ^d	Liu, 等, 2019 ^[51]
			那曲	0.84 ^a /0.82 ^d	-0.00 ^a /-0.02 ^d	0.08 ^a /0.07 ^d	
			帕里	0.67 ^a /0.62 ^d	-0.03 ^a /-0.05 ^d	0.05 ^a /0.06 ^d	
			玛曲	0.72 ^a /0.81 ^d	-0.07 ^a /-0.07 ^d	0.09 ^a /0.08 ^d	
			阿里	0.57 ^a /0.34 ^d	-0.04 ^a /-0.05 ^d	0.05 ^a /0.05 ^d	
	L3_SM_P_E	9	那曲	0.88	0.00	0.06	Li, 等, 2018 ^[54]
			玛曲	0.65	0.11	0.13	
	L3_SM_P	36	那曲	0.88	0.00	0.06	
			玛曲	0.64	0.12	0.13	
	L2_SM_A	3		0.21~0.78	-0.12~0.09	0.03~0.17	
	L2_SM_P	36	黑河	0.55~0.78	-0.00~0.09	0.03~0.09	Ma, 等, 2017 ^[55]
	L2_SM_AP	9		0.39~0.81	-0.20~0.03	0.04~0.81	

注:上标 a 和 d 分别表示升轨和降轨数据

显著。

近几年人们对 SMAP 土壤水分产品在高原地区的适用性也做了大量研究。Chen 等^[25]利用那曲和帕里土壤水分观测网数据评估了 SMAP 三级被动土壤水分产品,发现该产品能较好捕捉到土壤水分的振幅和时间变化。Liu 等^[51]利用黑河、那曲、帕里、玛曲、阿里等 5 个土壤水分观测网数据评估了 SMAP 三级被动土壤水分产品,发现其与土壤水分观测数据有较好相关性,均方根误差和偏差值较小,在植被相对稀疏地区的产品精度更高。Li 等^[54]利用那曲和玛曲观测网数据分别评估了 SMAP 三级被动土壤水分产品和三级增强被动土壤水分产品,结果发现两种产品都能捕捉到土壤水分的时间变化和空间分布特征,且表现出较强的相关性,其中增强产品相关性更高,能够提供更多的土壤水分

变化细节。Ma 等^[55]利用黑河流域上中下游 3 个观测网数据对分辨率分别为 3、9 和 36 km 的 SMAP 被动、主动和主被动结合土壤水分产品进行评估,发现 SMAP 产品能展现大部分研究区域的时空变化特征和捕捉到典型降水事件,其中被动土壤水分产品表现最好。此外,研究还发现裸土地区的 SMAP 土壤水分产品表现优于植被覆盖地区,认为植被效应可能是导致产品性能欠佳的因素之一。总体而言,SMAP 卫星土壤水分产品能较好地反映高原多个观测网区域内的土壤水分时空变化特征,精度相对较高。

综合 SMOS、Aquarius 和 SMAP 卫星任务土壤水分产品在青藏高原的评估情况,总结出以下几个特征:① 3 种卫星土壤水分产品在不同气候和地表覆盖类型区域适用性各不相同,但大多数情况下都

能捕捉到土壤水分的振幅和时间变化^[25,50-51];②通过综合分析发现,SMAP卫星产品表现最好,SMOS卫星反演结果存在较大偏差,不确定性相对较高^[25,51];③不同植被覆盖类型对卫星土壤水分产品的影响程度不同,一般来说,产品在裸土区域的精度均优于植被覆盖地区^[49,55]。

3.3 土壤水分反演算法的改进

基于 $\tau-\omega$ 辐射传输模型,学者们发展了许多L波段微波土壤水分反演算法,包括基于L-MEB正向模型的迭代反演算法^[30]、单通道算法(Single Channel Algorithm, SCA)^[32]、双通道算法(Dual Channel Algorithm, DCA)^[32]、地面参数反演模型(Land Parameter Retrieval Model, LPRM)^[56]等。SMOS卫星采用基于L-MEB正向模型的迭代反演算法作为默认算法,该算法考虑了反演参数的先验信息,通过广义最小二乘迭代算法最小化代价函数,同时反演土壤水分和植被光学厚度参数^[30]。目前,Aquarius和SMAP卫星任务分别把基于水平和垂直极化亮温数据的单通道算法作为默认算法,该算法利用观测场景中的有效温度将亮温转换成发射率,对推导出的发射率进行植被和地表粗糙度订正,得到土壤发射率,再利用菲涅尔方程,在土壤介电常数模型中获得土壤水分^[9,32]。通常,卫星土壤水分产品误差来源主要为前向模拟模型和输入参数^[51],通过2.2节中L波段微波辐射模拟的研究综述发现,当前卫星任务采用的前向模拟模型在高原地区仍存在许多问题,例如低估了土壤有效温度和地表粗糙度效应,高估了植被影响,以及所采用的

介电常数模型不适用于冻结土壤等^[22,26,41]。在此基础上,学者们通过改进土壤水分反演算法中的参数化方案或开发新的土壤水分反演算法,以期得到适合高原环境的土壤水分产品。

当前常用的土壤介电常数模型(如Wang&Schmugge模型^[38]和Mironov模型^[39])无法模拟冻结土壤的介电常数,导致卫星任务在土壤冻结期间停止土壤水分反演。Zheng等^[26,29]证实了四相混合介电常数模型对高原地区冻土介电常数计算的适用性,该模型^[46]将湿润土壤的组分分为空气、冰、基质和液态水,能够同时模拟冻结和融化状态下的土壤介电常数。Zheng等^[26,41]通过采用新的地表粗糙度参数化方案改进了SMAP默认反演算法中地表粗糙度效应低估的现象,从而改善了SMAP土壤水分产品在高原荒漠地区(如阿里观测网)和植被覆盖区域冬季冻结时段(如玛曲观测网)的精度。在此基础上,Zheng等^[26,29]进一步引入了新的植被参数化方案,发现玛曲观测网的土壤水分反演得到了进一步改进,无偏均方根误差降低了40%以上。图5显示了2016年8月至2017年7月期间SMAP土壤水分产品、Zheng等^[29]基于改进算法反演的土壤水分与地面观测的对比。从图中可以看出,通过引入四相混合介电常数模型和新的地表粗糙度和植被参数化方案,Zheng等^[29]改进了玛曲地区暖季(5~9月)SMAP土壤水分产品的精度,并成功反演了冷季(10~次年4月)冻结土壤中的水分变化,改善和拓展了SMAP卫星土壤水分产品在高原地区的适用性^[57]。

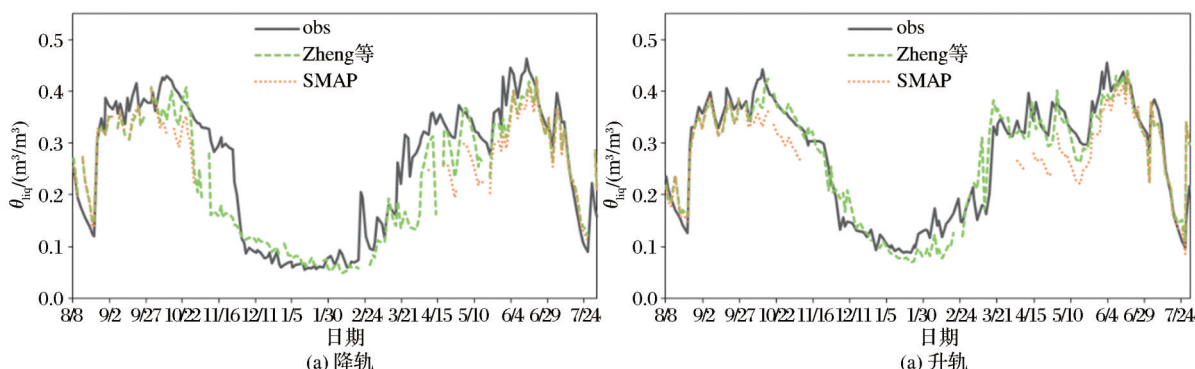


图5 2016年8月至2017年7月SMAP土壤水分产品与Zheng等^[29]反演结果在降轨和升轨时刻的对比

Fig.5 Comparisons between soil liquid water retrievals derived from the SMAP product and Zheng *et al.*^[29] during descending and ascending overpasses

除了通过改进当前卫星反演算法中的参数化方案,学者们还通过开发新的反演算法来改进当前的土壤水分反演精度。Wang等^[44,58]通过结合使用

Aquarius主被动观测数据,利用经参数校准后的Tor Vergata模型进行了玛曲观测网区域的土壤水分反演,发现反演结果能反映研究区域中土壤水分

的变化趋势,为同时利用主被动观测信息提供了较好的研究思路。总体而言,无论是改进卫星反演算法中的参数化方案的研究,还是开发新的反演算法的研究,都一定程度上提高了高原地区L波段微波遥感土壤水分反演的精度。

4 展 望

L波段被动微波卫星遥感观测是当前监测全球土壤水分及其冻融变化的重要手段,能为自然环境复杂的青藏高原地区提供大尺度、长时间序列的土壤水分监测产品。近年来,学者们通过开展地基与机载L波段微波辐射计观测试验和建立区域尺度土壤水分观测网络,对当前L波段卫星辐射观测精度和前向模拟模型,以及土壤水分产品和反演算法在青藏高原的适用性开展了大量的评估和改进工作,取得了一系列的进展,极大地促进了L波段被动微波遥感技术在高原地区的深入应用和发展。然而,当前研究仍存在诸多问题,比如大部分工作集中于卫星土壤水分产品精度的评估,对前向微波辐射模型和土壤水分反演算法的评估和改进工作仅限于站点/格网尺度,目前仍缺乏高原尺度微波辐射模拟评估和改进的卫星土壤水分产品,土壤冻结时期的水分监测产品依然缺失。针对以上研究问题,为了进一步提升和拓展L波段被动微波遥感技术在高原地区的应用,今后应加强以下研究:

(1)开展高原尺度的微波辐射模拟评估,验证和进一步改进当前站点尺度针对卫星前向模拟模型在高原应用上的不足而发展的土壤介电常数模型、地表粗糙度和植被光学厚度等参数化方案,提升高原尺度的微波辐射模拟精度。

(2)基于高原尺度微波辐射模拟的改进,结合当前站点尺度改进和发展的土壤水分反演算法,开展高原尺度土壤水分产品的改进工作,通过使用四相混合介电常数模型等同时适用于冻结和融化土壤的介电常数模型,改进和获取基于L波段被动微波遥感的连续多年完整时间序列(含冻结时期)的土壤水分产品。

(3)开展卫星土壤水分产品的应用研究,如同化卫星土壤水分产品以提高高原尺度水分循环和能量平衡的模拟精度,基于土壤水分产品评估和改进卫星降水产品,以及基于土壤水分产品监测干旱变化和植被生长对干湿变化的响应,进一步拓展L波段被动微波遥感产品在高原的应用。

综上所述,L波段被动微波卫星遥感技术在青藏高原地区的应用仍需要进一步提升和拓展。我国提出的全球水循环观测卫星计划WCOM^[13]将有望实现L波段微波遥感的持续观测,并提供更高精度和长时间序列的土壤水分及冻融状态数据集。近期国内学者在滦河流域开展的大型土壤水分专题试验^[19],在国内首次同步获取了机载L波段主被动微波观测数据,为我国空间地球科学卫星以及民用空间基础设施相关卫星计划的论证实施奠定了技术基础。

参考文献(References):

- [1] Koster R D, Dirmeyer P A, Guo Z, *et al.* Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation[J]. *Science*, 2004, 305(5687): 1138-1140. DOI: 10.1126/science.1100217.
- [2] 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. DOI: 10.1016/j.jag.2018.08.023.
- [3] Wu G, Duan A, Liu Y, *et al.* Tibetan plateau climate dynamics: recent research progress and outlook[J]. *National Science Review: English version*, 2015, 000(001): 100-116. DOI: 10.1093/nsr/nwu045.
- [4] Zheng D, Rogier V D V, Su Z, *et al.* Impact of soil freeze-thaw mechanism on the runoff dynamics of two Tibetan Rivers [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 563: 382-394. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.06.024.
- [5] Zheng D, Rogier V D V, Su Z, *et al.* Evaluation of Noah frozen soil parameterization for application to a Tibetan Meadow ecosystem[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2017, 18(6): 1749-1763. DOI: 10.1175/JHM-D-16-0199.1.
- [6] 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. DOI: 10.5194/hess-15-2303-2011.
- [7] Yang K, Qin J, Zhao L, *et al.* A multiscale soil moisture and freeze-thaw monitoring network on the third pole[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2013, 94(12): 1907-1916. DOI: 10.1175/BAMS-D-12-00203.1.
- [8] Babaeian E, Sadeghi M, Jones S B, *et al.* Ground, proximal and satellite remote sensing of soil moisture[J]. *Reviews of Geophysics*, 2019, 57(2): 530-616. DOI: 10.1029/2018RG000618.
- [9] Wigneron J P, Jackson T J, O'Neill P, *et al.* Modelling the passive microwave signature from land surfaces: A review of recent results and application to the L-band SMOS & SMAP soil moisture retrieval algorithms[J]. *Remote Sensing of Envi-*

- ronment, 2017, 192:238–262. DOI:10.1016/j.rse.2017.01.024.
- [10] 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, 2002, 39(8): 1729–1735. DOI: 10.1109/36.942551.
- [11] Lagerloef G, Colomb F R, Le Vine D, *et al.* The Aquarius/SAC-D mission: Designed to meet the salinity remote-sensing challenge[J]. Oceanography, 2008, 21(1): 68–81. DOI: 10.5670/oceanog.2008.68.
- [12] 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. DOI: 10.1109/JPROC.2010.2043918.
- [13] Shi J, Dong X, Zhao T, *et al.* WCOM: The science scenario and objectives of a global water cycle observation mission[J]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2014:3646–3649. DOI:10.1109/IGARSS.2014.6947273.
- [14] Schwank M, Wigneron J, Lopea-Baeza E, *et al.* L-band radiative properties of vine vegetation at the MELBEX III SMOS Cal/Val Site[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(5): 1587–1601. DOI: 10.1109/TGRS.2012.2184126.
- [15] Montzka C, Bogaen H R, Weihermueller L, *et al.* Brightness temperature and soil moisture validation at different scales during the SMOS validation campaign in the rur and erft catchments, Germany[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(3): 1728–1743. DOI: 10.1109/TGRS.2012.2206031.
- [16] Panciera R, Walker J P, Jackson T J, *et al.* The Soil Moisture Active Passive Experiments (SMAPEX): Toward soil moisture retrieval from the SMAP mission[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(1): 490–507. DOI:10.1109/TGRS.2013.2241774.
- [17] Colliander A, Cosh M H, Misra S, *et al.* Validation and scaling of soil moisture in a semi-arid environment: SMAP validation experiment 2015 (SMAPVEX15)[J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 196: 101–112. DOI: 10.1016/j.rse.2017.04.022.
- [18] Li Xin, Liu Shaoming, Ma Mingguo, *et al.* HiWATER: An integrated remote sensing experiment on hydrological and ecological processes in the Heihe River Basin[J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(5): 481–498. [李新, 刘绍民, 马明国, 等. 黑河流域生态—水文过程综合遥感观测联合试验总体设计[J]. 地球科学进展, 2012, 27(5): 481–498. DOI: 10.1007/s11783-011-0280-z.]
- [19] Zhao T, Shi J, Lv L, *et al.* Soil moisture experiment in the Luan River supporting new satellite mission opportunities[J]. Remote Sensing of Environment, 2020, 240: 111680. DOI: 10.1016/j.rse.2020.111680.
- [20] Colliander A, Jackson T J, Bindlish R, *et al.* Validation of SMAP surface soil moisture products with core validation sites [J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 191: 215–231. DOI:10.1016/j.rse.2017.01.021.
- [21] Zhao T, Shi J, Bindlish R, *et al.* Refinement of SMOS multi-angular brightness temperature toward soil moisture retrieval and its analysis over reference targets[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2015, 8(2): 589–603. DOI: 10.1109/IGARSS.2013.6721089.
- [22] Zheng D, Wang X, Rogier V D V, *et al.* L-band microwave emission of soil freeze-thaw process in the third pole environment[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017, 55(9): 5324–5338. DOI: 10.1109/TGRS.2017.2705248.
- [23] Zheng D, Li X, Wang X, *et al.* Sampling depth of L-band radiometer measurements of soil moisture and freeze-thaw dynamics on the Tibetan Plateau[J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 226: 16–25. DOI:10.1016/j.rse.2019.03.029.
- [24] Dente L, Su Z, Wen J. Validation of SMOS soil moisture products over the Maqu and Twente Regions[J]. Sensors, 2012, 12(12): 9965–9986. DOI: 10.3390/s120809965.
- [25] 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. DOI:10.1002/2016JD026388.
- [26] Zheng D, Wang X, Rogier V D V, *et al.* Impact of surface roughness, vegetation opacity and soil permittivity on L-band microwave emission and soil moisture retrieval in the third pole environment[J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 209(March): 633–647. DOI:10.1016/j.rse.2018.03.011.
- [27] Li X, Cheng G, Liu S, *et al.* Heihe Watershed Allied Telemetry Experimental Research (HiWATER): Scientific objectives and experimental design[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2013, 94(8): 1145–1160. DOI: 10.1175/BAMS-D-12-00154.1.
- [28] Li X, Liu S, Xiao Q, *et al.* A multiscale dataset for understanding complex eco-hydrological processes in a heterogeneous oasis system[J]. Scientific Data, 2017, 4: 170083. DOI:10.1038/sdata.2017.83.
- [29] Zheng D, Wang X, Rogier V D V, *et al.* Assessment of soil moisture SMAP retrievals and ELBARA-III measurements in a Tibetan meadow ecosystem[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letter, 2019, 16(9): 1407–1411. DOI: 10.1109/LGRS.2019.2897786.
- [30] Kerr Y H, Waldteufel P, Richaume P, *et al.* The SMOS soil moisture retrieval algorithm[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(5): 1384–1403. DOI: 10.1109/TGRS.2012.2184548.
- [31] 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. DOI:10.1109/LGRS.2014.2364151.

- [32] O'Neill P, Chan S, Njoku E, *et al.* Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD): level2&3 soil moisture(Passive) data products [EB/OL]. 2015, [Initial Release v.3, October1, Available at <http://smap.jpl.nasa.gov/science/dataproducts/ATBD/>.]
- [33] Mo T, Choudhury B J, Schmugge T J, *et al.* A model for microwave emission from vegetation-covered fields[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1982, 87: 11229-11237. DOI:10.1029/JC087iC13p11229.
- [34] Jackson T J, Schmugge T. Vegetation effects on the microwave emission of soils[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1991, 36:203-212. DOI:10.1016/0034-4257(91)90057-D.
- [35] 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. DOI:10.1029/JC086iC06p05277.
- [36] Wigneron J P, Laguerre L, Kerr Y H. A simple parameterization of the L-band microwave emission from rough agricultural soils[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(8):1697-1707. DOI:10.1109/36.942548.
- [37] Dobson M C, Ulaby F T, Hallikainen M, *et al.* Microwave dielectric behavior of wet soil-part II: dielectric-mixing models[J]. *IEEE Transactions and Geoscience and Remote Sensing*, 1985, 23(1):35-46. DOI:10.1109/TGRS.1985.289498.
- [38] Wang J R, Schmugge T. An empirical model for the complex dielectric permittivity of soils as a function of water content [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1980, 18(4):288-295. DOI:10.1109/TGRS.1980.350304.
- [39] Mironov V L, Kosolapova L G, Fomin S V. Physically and mineralogically based spectroscopic dielectric model for moist soils[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47 (7) : 2059-2070. DOI: 10.1109/TGRS. 2008. 2011631.
- [40] Choudhury B J, Schmugge T J, Mo T. A parameterization of effective soil temperature for microwave emission[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1982, 87 (C2) : 1301-1304. DOI:10.1029/JC087iC02p01301.
- [41] Zheng D, Rogier V D V, Wen J, *et al.* Assessment of the SMAP soil emission model and soil moisture retrieval algorithms for a Tibetan desert ecosystem[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56 (7) : 3786-3799. DOI:10.1109/TGRS.2018.2811318.
- [42] Wigneron J P, Chanzy A, Kerr Y H, *et al.* Evaluating an improved parameterization of the soil emission in L-MEB[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(4):1177-1189. DOI:10.1109/TGRS.2010. 2075935.
- [43] Zheng D, Li X, Zhao T, *et al.* Impact of soil permittivity and temperature profile on L-band microwave emission of frozen soil[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, 59 (5) : 4080-4093. DOI: 10.1109/TGRS. 2020. 3024971.
- [44] Wang Q, Rogier V D V, Su Z. Use of a discrete electromagnetic model for simulating aquarius L-band Active/Passive observations and soil moisture retrieval[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 205: 434-452. DOI: 10.1016/j. rse. 2017. 10.044.
- [45] Bai X, Zeng J, Chen K, *et al.* Parameter optimization of a discrete scattering model by integration of global sensitivity analysis using SMAP active and passive observations [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57 (2):1084-1099. DOI:10.1109/TGRS.2018.2864689.
- [46] Schwank M, Stahl M, Wydler H, *et al.* Microwave L-band emission of freezing soil[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42 (6) : 1252-1261. DOI: 10.1109/TGRS.2004.825592.
- [47] Kang Jian, Jin Rui, Li Xin, *et al.* HiWATER: Waternet observation dataset in the upper reaches of the Heihe River Basin in 2014[DB/OL]. Heihe Plan Science Data Center, 2015.[亢健, 晋锐, 李新, 等. 黑河生态水文遥感试验:黑河流域上游生态水文无线传感器网络 WATERNET 2014年观测数据集 [DB/OL]. 黑河计划数据管理中心, 2015.]
- [48] Dente L, Vekerdy Z, Wen J, *et al.* Maqu network for validation of satellite-derived soil moisture products[J]. *International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation*, 2012, 17:55-65. DOI:10.1016/j.jag.2011.11.004.
- [49] Zhao L, Yang K, Qin J, *et al.* The scale-dependence of SMOS soil moisture accuracy and its improvement through land data assimilation in the central tibetan plateau[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 152:345-355. DOI:10.1016/j.rse.2014.07.005.
- [50] Zeng J, Li Z, Chen Q, *et al.* Evaluation of remotely sensed and reanalysis soil moisture products over the Tibetan Plateau using in-situ observations [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 163:91-110. DOI:10.1016/j.rse.2015.03.008.
- [51] Liu J, Chai L, Lu Z, *et al.* Evaluation of SMAP, SMOS-IC, FY3B, JAXA, and LPRM soil moisture products over the Qinghai-Tibet Plateau and its surrounding areas[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(7). DOI:10.3390/rs11070792.
- [52] Liu J, Chai L, Dong J, *et al.* Uncertainty analysis of eleven multisource soil moisture products in the third pole environment based on the three-corned hat method[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 255(1) :112225. DOI:10.1016/j.rse.2020.112225.
- [53] Li D, Zhao T, Shi J, *et al.* First evaluation of aquarius soil moisture products using in situ observations and GLDAS model simulations[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, 8(12):5511-5525. DOI:10.1109/JSTARS.2015.2452955.
- [54] Li C, Lu H, Yang K, *et al.* The evaluation of SMAP enhanced soil moisture products using high-resolution model simulations and in-situ observations on the Tibetan Plateau [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10 (4) : 1-16. DOI: 10.3390/rs10040535.
- [55] Ma C, Li X, Wei L, *et al.* Multi-scale validation of SMAP

- soil moisture products over cold and arid regions in north-western China using distributed ground observation data [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(4): 327. DOI:10.3390/rs904 0327.
- [56] Owe M, Jeu R D, Walker J P. A methodology for surface soil moisture and vegetation optical depth retrieval using the microwave polarization difference index [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(8): 1643-1654. DOI:10.1109/36.942542.
- [57] Chen Jiali, Zheng Donghai, Pang Guojin, *et al.* Retrieval of soil unfrozen water in Maqu region of Tibetan Plateau based on SMAP brightness temperature measurement [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2020, 35(1): 48-57. [陈家利, 郑东海, 庞国锦, 等. 基于 SMAP 亮温数据反演青藏高原玛曲区域土壤未冻水 [J]. *遥感技术与应用*, 2020, 35(1): 48-57.]
- [58] Wang Q, Rogier V D V, Ferrazzoli P, *et al.* Mapping soil moisture across the Tibetan Plateau plains using Aquarius active and passive L-band microwave observations [J]. *International Journal Applied Earth Observation Geoinformation*, 2019, 77: 108-118. DOI:10.1016/j.jag.2019.01.005.

Progress on L-band Microwave Radiometry Observation and Soil Moisture Retrieval over the Tibetan Plateau

Yang Aoli^{1,2}, Zheng Donghai², Wen Jun¹, Lu Xuancheng¹, Yang Yue¹, Fu Qing^{2,3}

(1. *School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan province, Chengdu 610000, China;*

2. *National Tibetan Plateau Data Center, State Key Laboratory of Tibetan Plateau Earth System Science, Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;*

3. *College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)*

Abstract: Soil moisture is a key variable in quantifying water and heat exchanges between land surface and atmosphere, which also affects the partitioning of surface sensible and latent heat fluxes, and estimations of water budget and vegetation transpiration. Study of soil moisture on the Tibetan Plateau is of great significance to improve the simulation of water and energy budgets on the plateau. After the launch of SMOS and SMAP satellites, L-band passive microwave remote sensing has become the main way of monitoring soil moisture at large scale. This paper reviews and summarizes recent progresses on the L-band microwave radiometry observation and soil moisture retrieval over the Tibetan Plateau, including measurements and simulations of brightness temperature based on ground-, aircraft-based and spaceborne platforms, development of regional-scale soil moisture monitoring networks, evaluation of satellite products and development of soil moisture retrieval algorithms. Based on the reviews, we summarize the main problems exist currently on simulating the L-band microwave emission and retrieving soil moisture on the plateau, such as lack of evaluating microwave emission simulation and improving satellite-based soil moisture retrievals at plateau scale, and absence of soil moisture products for frozen soil conditions. In view of above existing problems, this paper further suggests that future work should pay more attention to improve the L-band microwave emission simulation and soil moisture retrievals at the plateau scale, and to enlarge the applications of soil moisture products, such as to improve the understanding of plateau-scale water and energy budgets, vegetation growth and drought monitoring.

Key words: L-band Passive Microwave Remote Sensing; Soil moisture retrieval; Microwave radiometry observation and simulation; Frozen soil; Tibetan Plateau