

引用格式: Wang Zuoliang, Wen Jun, Liu Rong, *et al.* Evaluation of the Applicability of Different Dielectric Models for Soil Moisture Retrieval based on the Ground-based Radiometer Measurements[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2020, 35(1): 97-110. [王作亮, 文军, 刘蓉, 等. 基于地基微波辐射计数据评估不同土壤介电模型反演土壤湿度的适用性[J]. 遥感技术与应用, 2020, 35(1): 97-110.]
doi: 10.11873/j.issn.1004-0323.2020.1.0097

基于地基微波辐射计数据评估不同土壤介电模型反演土壤湿度的适用性

王作亮^{1,2}, 文 军³, 刘 蓉¹, 李振朝¹, 郑东海⁴, 王 欣¹

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院 中国科学院寒旱区陆面过程与气候变化重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 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 610225;

4. 中国科学院青藏高原研究所 国家青藏高原科学数据中心, 北京 100101)

摘要:以青藏高原开展的L波段地基微波辐射(ELBARA-III型)综合观测试验为依据,基于 τ - ω 辐射传输模型评估了Wang-Schmugge、Mironov、Dobson和Four-Phase 4种土壤介电模型对L波段微波亮温模拟及土壤湿度反演的影响。结果表明:相同植被和粗糙度参数化方案条件下,4种土壤介电模型对微波亮温模拟存在明显差异,当土壤湿度小于 $0.23 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ 时,Wang-Schmugge模型与其他3种土壤介电模型微波亮温模拟结果差异最为显著,水平和垂直极化微波亮温模拟最大差值可达8.0 K和4.4 K;当模拟土壤湿度大于 $0.23 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ 时,Four-phase模型模拟的微波亮温显著高于其他3种土壤介电模型模拟结果;当土壤湿度饱和时,4种土壤介电模型间水平和垂直极化微波亮温模拟最大差值约为6.1 K和4.8 K,且4种土壤介电模型对水平极化微波亮温模拟的差异比垂直极化模拟的差异更为显著。而基于4种介电模型的土壤湿度反演对比试验表明,水平极化条件下基于Wang-Schmugge模型反演土壤湿度,较其他参数化方案,能有效减轻反演土壤湿度对观测土壤湿度的低估,Mironov模型减轻了垂直极化条件下反演土壤湿度对观测值的高估程度。在现有 τ - ω 模型参数化方案的基础上,总结了4种土壤介电模型在青藏高原典型草地地下垫面的适用性,将为星载L波段辐射计青藏高原土壤湿度反演应用提供客观的土壤介电模型方案选取依据。

关键词: L波段;被动微波;微波亮温;土壤介电模型;土壤湿度反演

中图分类号: TP721.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2020)01-0097-14

1 引言

土壤湿度是区域乃至全球能量和水循环中的关键参量,是陆面、水文、农业以及气候等相关研究最重要的变量之一^[1-2]。土壤湿度数据的准确性将直接影响陆面和气候模型描述陆—气间的水、能量

及碳等物质交换状态的准确程度^[3-4]。目前,为了获取准确的土壤湿度信息,研究人员开展了众多的科研试验,包括单个站点观测及单个站点组成的网络观测、地基和航空及卫星平台微波遥感等试验,以达到获取高质量土壤湿度数据的目的^[5-6]。研究表明,基于L波段(1~2 GHz)被动微波反演土壤湿度

收稿日期:2019-11-03;修订日期:2020-01-12

基金项目:国家自然科学基金项目(41971308、41675017),国家自然科学基金培育项目(91737103)资助。

作者简介:王作亮(1990—),男,甘肃景泰人,工程师,主要从事青藏高原土壤湿度观测模拟研究。E-mail: zuoliangwang@lzb.ac.cn。

通讯作者:文 军(1964—),男,甘肃临洮人,教授,主要从事陆面过程与气候变化及卫星遥感相关研究。E-mail: jwen@cuit.edu.cn。

的方法,是目前获取区域或全球尺度土壤湿度数据最有效的途径之一^[7-8]。

被动微波辐射传输理论模型构成了被动微波遥感的理论基础。Mo等^[9]为了模拟植被覆盖含水土壤下垫面的微波亮温,假设下垫面土壤表层与植被冠层为整体且温度为常量,表层土壤与植被冠层温度相等且发射极化微波辐射,将微波亮温等效为植被直接发射的微波辐射,植被发射经地面反射的微波辐射,土壤发射经植被衰减后的微波辐射,在此基础上提出了 τ - ω 零阶辐射传输模型^[9]。该模型使用灵活且适用性广,因此, τ - ω 模型被应用于多种被动微波遥感反演土壤湿度算法,包括近年发射的土壤湿度与海水盐度卫星(Soil Moisture and Ocean Salinity mission, SMOS)^[10]和土壤水分主被动探测卫星(Soil Moisture Active-Passive, SMAP)^[11]。土壤的介电常数(ϵ_s)、有效温度(T_{eff})、地表粗糙度因子(h)和土壤表层植被光学厚度(τ)是利用 τ - ω 模型反演土壤湿度的关键参数,而能够实现L波段微波亮温反演土壤湿度的重要前提是水的介电常数($\epsilon_w \approx 80$)和干燥土壤的介电常数($\epsilon_r \approx 4$)之间的差异^[12]。因此,可靠的土壤介电模型对反演获取高质量土壤湿度数据至关重要^[13-14]。

要准确描述土壤的介电特性非常复杂。为此,研究人员在理论和试验的基础上建立了多种土壤介电模型^[15]。Wang等^[16]通过大量的试验,将土壤水分分为束缚水含量和自由水含量,结合土壤的物理结构建立了土壤基质、空气、束缚水和自由水4种介质混合的Wang-Schmugge土壤介电模型^[16]。土壤由于变湿的过程中,水分子开始被吸附在土壤颗粒上不能自由移动,这部分水称为束缚水,继续增加土壤水分,当水分超过一定的阈值时,水分子可以自由移动,这部分水称为自由水。由于束缚水的介电常数难以获取,Wang-Schmugge模型将束缚水介电常数用冰的介电常数替代,使得计算过程简化。由于模型没有实质体现束缚水的介电特性,从而给模型引入计算误差^[17]。Dobson等^[18]基于1.4~18 GHz的实验数据,建立了Dobson土壤介电模型。Dobson模型在实验数据的基础上结合了Birchak土壤折射率原理^[19],建立了半经验土壤介电模型。Dobson模型和Wang-Schmugge模型都将土壤湿度区分为结合水和自由水,但不同的是Dobson模型将束缚水对介电常数的贡献拟合为自由水表示,同样没有实质计算束缚水的介电常数。为充分体现自由水和

束缚水介电常数的差异,Mironov等^[20]基于理论推导建立了适用性更广泛的通用折射率混合模型,该模型与上述2种模型最大的区别在于Mironov土壤介电模型结合Debye方程分别计算了结合水和自由水的介电常数,Debye方程描述了介电常数实部与虚部、介质损耗角正切值等物理量与交变电场频率的关系,被广泛应用于不同介质介电常数的计算。因此,Mironov土壤介电模型实质性体现了土壤中束缚水的介电常数特性,是目前已有的理论土壤介电模型之一。此后,Mironov等^[21-23]在该折射率混合模型的基础上进行了多次改进,提高了模型的模拟精度,使得模型理论性更强且适用性更广。在最近的研究中,Mironov等^[24]为解决土壤冻结状态(-1~-30℃)下L波段(1.4 GHz)微波反演土壤湿度的难题,将温度和土壤质地结合,发展出可以适用于土壤冻结和融化状态的Mironov土壤介电模型。除Mironov土壤介电模型可以同时适用于土壤冻结和融化状态的土壤湿度反演外,Stähli等^[25]开展基于时域反射法(Time Domain Reflectometry, TDR)研究冻土液态水和溶质迁移试验,其将土壤分为基质、液态水、冰和空气4种组分并将土壤温度与土壤介电模型结合,建立Four-phase土壤介电模型也适用于土壤冻结和融化状态土壤湿度反演。此后多项研究将该模型用于SMAP卫星及ELBARA地基被动微波反演土壤冻结和融化状态下的土壤湿度并获得了较好的反演结果^[26-28]。区别于其他3种介电模型的是Four-phase模型没有区分自由水和束缚水,而是将土壤水分划分为自由水和冰两种情况。上述4种土壤介电模型计算过程中土壤质地等参数易于获取,使用过程灵活且适用性广,已经被广泛应用于主动和被动微波遥感反演土壤湿度算法。

综上所述,土壤介电模型的适用性是反演获取高精度土壤湿度数据的重要基础。但是,由于当前已有的土壤介电模型各自的建立背景与方式不同,从而造成其适用范围存在差异,也各有优缺点,针对同一土壤不同土壤介电模型可能计算得到的介电常数存在很大的差异^[6,17,29]。为提升我国黄河上游重要的水源涵养地——玛曲地区区域土壤湿度观测数据质量,为研究该区域土壤湿度变化对我国黄河流域水分循环、气候变化以及高原生态可持续发展提供基础支撑,本研究将利用已在该区域开展的地基微波辐射计(ELBARA-III型,L波段)观测

数据评估不同土壤介电模型在反演表层土壤湿度的适用性。期望研究结果能为该区域星载微波遥感反演获取高质量土壤湿度数据提供技术参考。

2 研究区域和数据

2.1 研究区域

本研究开展观测试验的区域位于黄河源水源涵养核心区玛曲地区(33°54' N, 102°09' E)。该地区作为黄河重要的产流区补充了黄河上游水量的45.0%,也因此被称为“黄河蓄水池”^[30]。该区域平均海拔约为3 300 m,植被下垫面以高寒草地为主,土壤类型以粉砂壤土和砂壤土为主,是黄河上游最主要水源地,而且该地区的沼泽湿地是中国最大的高原泥炭沼泽集中分布区之一,对黄河上游地区的生态环境和区域社会经济有着十分重要的影响^[31]。该地区1967~2017年平均年降水量约为604 mm,年平均气温约为2℃,属高原亚寒带半湿润大陆性季风气候。

2.2 L波段微波辐射计(ELBARA-III)

本研究所用地基微波辐射计(ELBARA-III型, L波段)是瑞士联邦森林—积雪研究所为欧空局(European Space Agency, ESA)研发的一款狄克型L波段微波辐射计($f=1.41$ GHz, $\lambda=21$ cm),主要用于SMOS卫星发射前调试及SMOS卫星在轨期间开展地面验证试验,为验证SMOS卫星数据和改进L波段卫星遥感反演土壤水分反演算法及L波段被动微波辐射传输模型提供重要的地面试验数据^[32]。最新的研究开展了ELBARA-III地基观测验证SMAP卫星观测结果^[33]。ELBARA-III采用了最优的双极化(p =水平极化-H,垂直极化-V)锥形天线设计(直径1.4 m,天线长度2.7 m, -3 dB波束宽度为12°),两个同步信道(1.40~1.418 GHz, 1.409~1.427 GHz)增强频带内的噪声信号识别,自带冷源和热源标定,将信号干扰和观测误差降至最低^[34]。ELBARA-III亮温观测的绝对误差小于1.0 K,可敏感响应大于0.1 K的微波亮温变化。2016年中国科学院寒旱区陆面过程与气候变化重点实验室与欧空局开展SMOS卫星地面验证观测相关科研合作^[35],在玛曲地区架设L波段被动微波辐射计ELBARA-III。ELBARA-III天线朝南以4.8 m铁塔为安装平台,微波辐射计自身高度1.7 m,如图1(a)和1(d)所示。ELBARA-III以30 min的时间间隔和5°角度步长开展从40°~70°观测角的地面扫

描观测,同时,每天23时55分以155°的仰角开展1次天空背景辐射观测,用于标定ELBARA-III自身的冷源。在本次评估研究中,选取了ELBARA-III 2016年7月1日至8月20日期间50°观测角观测的双极化微波亮温。通过对比观测场内的称重式雨量计T200B数据和植被叶面湿度计DLWS观测,剔除了植被截留水分对辐射观测的影响。ELBARA-III微波亮温观测的视场如图1(e)所示。基于Pellarin等^[36]发展的参数化方案评估大气下行辐射对研究时段内ELBARA-III观测微波亮温的贡献约为0.004~0.65 K,因此本研究忽略了大气下行辐射的影响。

2.3 土壤温度和湿度数据

土壤湿度观测采用了美国Campbell公司生产的CS616土壤湿度传感器,CS616传感器体积含水量(Volumetric Water Content, VWC)观测分辨率小于0.1% $m^3 \cdot m^{-3}$ ^[37],观测数据时间间隔30 min,全年不间断运行,观测剖面的垂直深度分布为2、5、10、20及40 cm,如图1(c)所示。为了获得更准确的土壤湿度数据,对CS616传感器获得的土壤湿度采用传统的烘干称重法进行校准,从而使得本研究所用观测数据可靠性得到保证。需要指出的是,最新的研究一致表明,无论是高土壤水分含量或低含量条件下^[27,38],甚至是冻结期间^[39],L波段的有效反演深度小于5 cm,因此,本研究在亮温模拟时选取2 cm深度处的土壤湿度观测作为研究期的土壤湿度真实值,在分析土壤介电模型对微波亮温反演土壤湿度的影响时选取了2 cm和5 cm观测土壤湿度。

温度观测廓线是通过美国decagon公司生产的5TM传感器和EM50数据采集器获取,传感器精度为0.1℃,数据输出时间间隔与ELBARA-III相同为30 min,观测温度廓线垂直分布深度为5、10、15、20、25、35、45、55、65、75、100和150 cm,如图1(b)所示。

2.4 植被参数

Zheng等^[13,33]研究表明,SMAP默认反演算法中植被光学厚度参数化方案在青藏高原草地下垫面条件下高估了植被对亮温模拟和土壤湿度反演的影响。而基于离散模型模拟发现,植被叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)和植被光学厚度(τ)有着很好的线性关系($\tau=0.025 \cdot LAI$),该线性关系较SMAP默认反演算能有效降低对植被影响的高估。基于此,可依据LAI实际观测获得青藏高原草地下

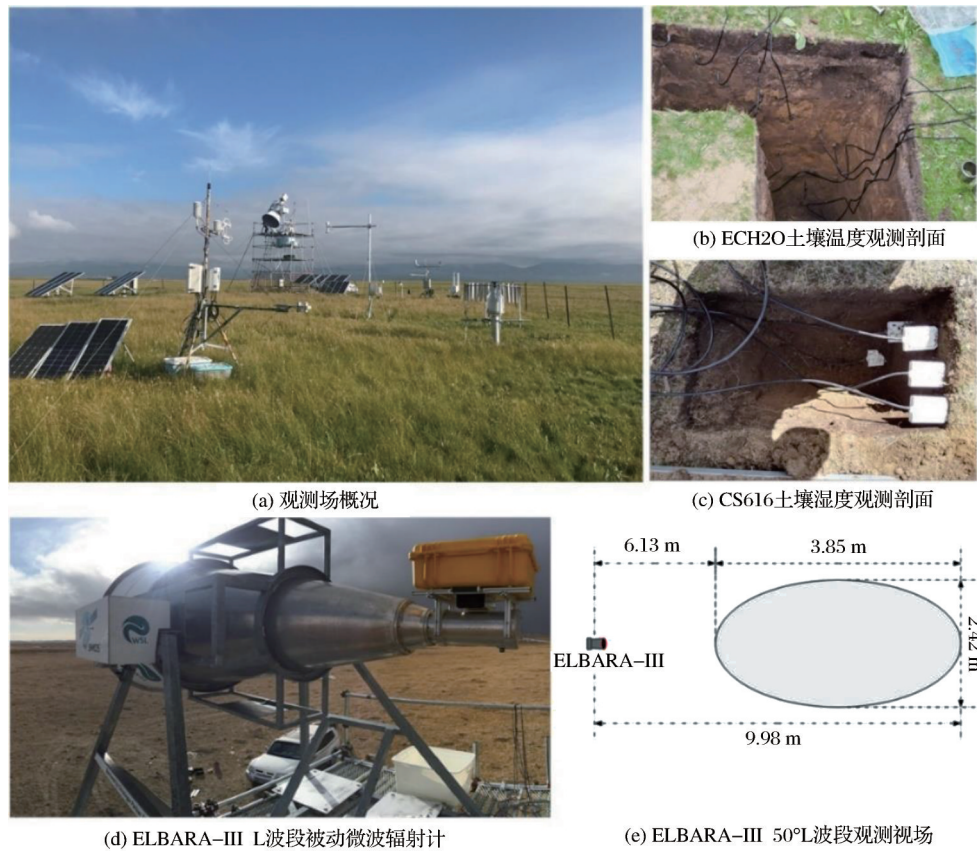


图 1 地表被动微波遥感综合观测试验概况

Fig.1 Overview of field data and L-band passive microwave remote sensing instrument used in this study

垫面情况的植被光学厚度。使用的 LAI 数据来源于同时期的 MODIS 产品 (https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table/)。为提升 LAI 数据的可靠性,本研究在 2016 年 6 月 27 日、7 月 12 日和 8 月 17 日对观测场的多个位置植被采样,采用传统的“样方”试验的方法获得实际的 LAI 值^[40],校准 MODIS 产品数据后通过线性插值获得研究区域连续的 LAI 值。为区分 τ - ω 辐射传输模型中植被温度和土壤温度,在本研究中使用 SI-111 红外温度计观测的温度作为植被温度。SI-111 是一种表面红外温度计,其在 $-10.0 \sim 65.0$ °C 下绝对误差为 ± 0.2 °C,由于观测场植被密集,土壤表面被植被完全覆盖,因此,本研究认为 SI-111 观测的温度即为植被温度。

3 研究方法

3.1 τ - ω 辐射传输模型

τ - ω 模型是使用最为广泛的零阶正向微波辐射传输模型^[27],该模型中的微波亮温(TB_p)由 3 部分组成:第 1 部分为植被直接发射的微波辐射,第 2 部分为植被发射经地面反射的微波辐射,第 3 部分为土

壤发射经植被衰减后的微波辐射。模型表达如下^[9]:

$$TB_p = (1 - \omega_p)(1 - \Gamma_p)T_v + (1 - \omega_p)(1 - \Gamma_p)r_p\Gamma_pT_v + (1 - r_p)\Gamma_pT_s \quad (1)$$

$$\Gamma_p = \exp(-\tau_p / \cos(\varphi)) \quad (2)$$

其中: ω_p 表示不同极化下的植被单次散射反照率,对于草地 $\omega = 0.05$ ^[11]。 p 极化方式($p=H$,为水平极化; $p=V$ 为垂直极化), T_v 为植被有效温度, Γ_p 为不同极化微波的植被透过率, φ 为 ELBARA-III 观测角度。 T_s 为土壤有效温度,本研究基于 5 cm 至 150 cm 土壤温度观测廓线,结合 Choudhury 等根据辐射传输理论提出的有效温度积分表达式计算试验场地的土壤有效温度,其表达式改写如下^[39]:

$$T_{eff} = \int_0^\infty T_s(z) \alpha(z) \exp\left[-\int_0^z \alpha(z') dz'\right] dz \quad (3)$$

其中: $T_s(z)$ 为深度(z)的热力学温度,衰减系数 $\alpha(z)$ 与该深度土壤介电常数实部(ϵ')和虚部(ϵ'')及观测波长(λ)相关,其表达式如下:

$$\alpha(z) = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \epsilon''(z) / 2\sqrt{\epsilon'(z)} \quad (4)$$

针对粗糙地表对不同极化微波的反射率 r_p ,其

计算方法如下^[39]:

$$r_p = [(1-Q) \cdot r_p^s + Q \cdot r_q^s] \cdot \exp[-h \cdot \cos^N(\varphi)] \quad (5)$$

其中: r_p^s 和 r_q^s 分别表示光滑表面对不同极化微波的反射率,其中($p=H, V; q=V, H$),该反射率是关于反射面介质介电常数的方程,可以通过菲涅尔方程计算获得^[39], Q 表示交叉极化因子。 h 为粗糙度参数,无量纲单位。最新的研究针对该模型中部分参数的取值给出了新的方案,Wigneron等^[41]基于试验数据,建立了地表有效粗糙度因子(h)和均方根高度(S_D)的关系,在本研究中取值 $S_D = 15.6 \text{ mm}$ ^[11]。该经验方程可以用于1.4~90 GHz的微波相关计算中,因此具有更好的频率适用范围,其表述方式如下:

$$h = \left(\frac{0.9437 \cdot S_D}{0.8865 \cdot S_D + 2.2913} \right)^6 \quad (6)$$

Lawrence等基于数值模拟方法对该模型进行了评估,并对极化交叉因子(Q)提出了新的计算方法^[42]:

$$Q = 0.1771 \cdot h \quad (7)$$

同时,对角度校正常数(N)的取值也给出了新的参数化方案:

$$N_H = 1.615 \cdot (1 - \exp(-h/0.359)) - 0.238 \quad (8)$$

$$N_V = 0.767 \cdot h - 0.099 \quad (9)$$

Zheng等^[13,33]分别基于SMAP和ELBARA-III观测对比了上述参数化方案和SMAP默认参数化方案,发现SMAP方案低估了粗糙度影响,而上述方案能够有效降低这种低估,因此在本研究中采用上述参数化方案来评估介电模型。

在基于 τ - ω 辐射传输模型反演土壤湿度的过程中,方程(5)描述的粗糙地表对不同极化微波反射率(r_p)是其中重要的参数之一,而求解方程(5)的关键在于电磁波反射面介质的介电常数。在本研究中反射面介质为被植被覆盖的土壤,同时土壤介电常数将直接影响土壤有效温度的计算结果。因此,土壤介电常数的准确性是获取高质量土壤湿度的关键。

3.2 土壤介电模型

复介电常数的实部和虚部分别是对介质中电磁波能量的储存和损耗能力的量化表示,在一定的微波频率和土壤粗糙度条件下土壤介电常数决定其电磁波发射情况。而土壤介电模型是描述介电常数的最主要方式,目前土壤介电模型主要包括经验、半经验和物理模型,但各模型建立的背景和方

式不同且适用范围及计算结果等均存在明显差异,因此本研究将开展以下4种土壤介电模型对L波段被动微波遥感反演土壤湿度结果影响的评估。

3.2.1 Wang-Schmugge 模型

Wang等^[16]通过分析1.4 GHz和5 GHz等多个频率条件下,温度约为293.0 K的土壤介电常数试验数据后,发现针对某种组分固定的土壤,在一定的土壤湿度临界值范围内,土壤介电常数随土壤湿度变化缓慢,土壤湿度超出临界值后,土壤介电常数随土壤湿度增加快速增加。同时发现,沙土和粘土含量对土壤介电常数变化存在明显的影响。并将该临界值作为束缚水(θ_{bw})和自由水(θ_{fw})分割点(θ_i),结合土壤的物理结构,建立了束缚水、自由水、空气和土壤基质混合的土壤介电模型,当土壤含水量(θ_c)小于 θ_i 时,土壤的介电常数表达为:

$$\varepsilon = \theta_c \varepsilon_{bw} + (P - \theta_c) \varepsilon_a + (1 - P) \varepsilon_r \quad (10)$$

$$\varepsilon_{bw} = \varepsilon_i + (\varepsilon_w - \varepsilon_i) \frac{\theta_c}{\theta_i} \cdot \gamma \quad (11)$$

当 θ_c 大于 θ_i 时,土壤的介电常数表达为:

$$\varepsilon = \theta_i \varepsilon_{bw} + (\theta_c - \theta_i) \varepsilon_w + (P - \theta_c) \varepsilon_a + (1 - P) \varepsilon_r \quad (12)$$

$$\varepsilon_{bw} = \varepsilon_i + (\varepsilon_w - \varepsilon_i) \gamma \quad (13)$$

其中:土壤孔隙度(P)取值为 $0.50 \text{ m}^3/\text{m}^3$, $\varepsilon_a = 1 + 0j$, $\varepsilon_r = 5.5 + 0.2j$, ε_w 和 $\varepsilon_i = 3.2 + 0.1j$ 分别表示空气、水、基质和冰的复介电常数, j 为虚数单位, γ 为试验拟合经验参数,本研究中取值为0.43。

3.2.2 Dobson 模型

Dobson等根据已有的研究,基于Brichak复折射率模型,将土壤介电常数描述为土壤各组分介电常数的体积加权之和,即土壤基质、空气、自由水和结合水介电常数的体积加权之和,混合介质的介电常数表述如下^[18]:

$$\varepsilon^a = V_r \varepsilon_r^a + V_a \varepsilon_a^a + V_{fw} \varepsilon_{fw}^a + V_{bw} \varepsilon_{bw}^a \quad (14)$$

其中: a 为形状参数,这里取值为0.65。 r, a, fw, bw 分别表示土壤基质、空气、自由水及束缚水, ε 为介电常数, V 表示各组分的体积比。由于束缚水的计算非常复杂,所以通过拟合参数 β 将束缚水与自由水对微波的影响全部等效为土壤含水量为 θ_v 的自由水的影响,因此可得如下方程:

$$\theta_v^\beta \varepsilon_{fw}^a = V_{fw} \varepsilon_{fw}^a + V_{bw} \varepsilon_{bw}^a \quad (15)$$

将上述假设同Debye方程结合从而获取混合介质的介电常数。

3.2.3 Mironov 模型

Mironov模型与Dobson模型均以折射率混合

模型为基础,不同的是 Dobson 模型则是在理论的基础增加了半经验参数且合并自由水和束缚水对土壤介电常数的影响。而 Mironov 介电模型是按照折射率混合模型理论推导而来,分别考虑了基质、空气、自由水和结合水对混合介质介电常数的影响。Mironov 模型对土壤的不同组分的复折射率按照体积加权求和,获得湿润土壤的总复折射率,进而根据复折射率和介电常数的关系 $n^* = \sqrt{\epsilon}$, 可以求得湿润土壤的介电常数。其中湿润土壤总的复折射率 n^* 可以描述为:

$$n^* = \sqrt{\epsilon_m} = \sqrt{\epsilon_r} V_r + \sqrt{\epsilon_a} V_a + \sqrt{\epsilon_w} V_w \quad (16)$$

其中: ϵ_r 、 ϵ_a 、 ϵ_w 、 ϵ_m 分别为土壤基质、空气、水分及上述 3 种介质混合后的土壤介电常数, V 为各组分体积比。结合土壤的复介电常数性质和复介电常数与折射率的关系以及 Debye 方程可以获取土壤介电常数。

3.2.4 Four-phase 模型

Four-phase 模型将湿润的土壤组分分为空气、液态水、冰和基质,该模型可以适用于土壤冻融状态下的土壤介电常数计算,其模型的数学表达如下^[25-26]:

$$\epsilon_s^a = (\theta_p - \theta_c) \epsilon_a^a + \theta_{liq} \epsilon_{liq}^a + (\theta_c - \theta_{liq}) \epsilon_{ice}^a + (1 - \theta_p) \epsilon_r^a \quad (17)$$

其中: $\epsilon_{air} = 1$, $\epsilon_{ice} = 3.2 + j \cdot 0.1$, $\epsilon_r = 5.5 + j \cdot 0.2$ 分别表示空气、冰和基质的介电常数。 θ_p 为土壤孔隙度, θ_{liq} 为液态水含量, θ_c 为土壤总的含水量。同样,结合 Debye 方程可获取土壤介电常数。

上述模型计算过程中的土壤质地等关键参数取值如表 1 所示,其中,沙土含量和粘土含量及体密度均通过野外原状土采样后在实验室测量获取,土壤基质密度依据 Wang 等^[16]试验取值为 2.65 g/cm^3 。

3.2.5 评估方法及反演方案

基于上述土壤介电模型方案,首先开展理论条件下的介电常数随土壤湿度和温度变化的模拟和响应特征分析,开展当前植被和粗糙度参数化方案条件下,多土壤介电模型对微波亮温模拟的影响评估,然后选取 2 cm 和 5 cm 观测土壤湿度评估 4 种土壤介电模型条件下反演土壤湿度效果,并计算模拟结果与观测结果之间的均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE)、无偏均方根误差 (unbiased Root Mean Square Error, ubRMSE)、偏差 (Bias)、决定系数 (R^2)。其中,无偏均方根误差 (ubRMSE) 是为了能够消除偏差且突出无偏均方根误差而反应验证精度的统计量。

本研究采用的土壤湿度反演方案是单频道单极化反演算法 (Single Channel Algorithm, SCA), 该算法基于某一观测角下的水平极化微波亮温或垂直极化微波亮温观测,对土壤湿度进行迭代求解。该算法较双极化非线性迭代求解方案 (Land Parameter Retrieval Model, LPRM) 和双极化 (Multi-Temporal Dual Channel Algorithm, MT-DCA) 等多参数同时求解算法具有更强的稳定性,不易受到非线性迭代过程和代价函数极值问题的影响^[7,44], 因此,本研究选取 SCA 作为土壤湿度反演算法。

表 1 辐射传输模型中的土壤及植被参数

Table1 Values of key parameters for soil and vegetation in radiation transfer model

土壤基质密度 /(g/cm ³)	孔隙度 /m ³ ·m ⁻³	植被单次散射反照率	沙土含量 /%	粘土含量 /%	体密度 /(g/m ³)	频率 /GHz	观测角 /°
2.65	0.50	0.05	32.30	10.50	1.12	1.41	50.0

4 结果分析

4.1 土壤介电常数模拟分析

土壤湿度是影响介电常数的关键因素。因此,结合本研究区域的实际情况分别模拟 4 种土壤介电模型在:①频率 1.4 GHz,土壤温度为 290.65 K (5 cm 平均土壤温度)时,土壤湿度从 0 增至 $0.50 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ (5.0 cm 饱和含水量)的土壤介电常数;②频率 1.4 GHz,土壤湿度为 $0.21 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ (5.0 cm 平均土壤湿度)时,土壤温度从 283.0 K (5.0 cm 最低温度)增至 298.0 K (5.0 cm 最高温度)的土壤介电常数。

图 2(a)和(b)是模拟情形①时所获得的介电常数实部和虚部变化特征,结果显示,在土壤极干的条件下 Dobson 模型模拟的土壤介电常数实部和虚部均小于其他 3 种模型;当土壤水分达到饱和时 Mironov 模型模拟的介电常数实部和虚部均大于其他 3 种土壤介电模型模拟结果。在确定的植被和粗糙度参数化方案条件下,无论哪种介电模型,介电常数的实部和虚部都随土壤湿度增加而迅速增大,且实部变化量较虚部变化更明显。同时,随着土壤湿度的增大各土壤介电模型模拟的介电常数结果出现明显差异,其中,当土壤湿度饱和时(等于

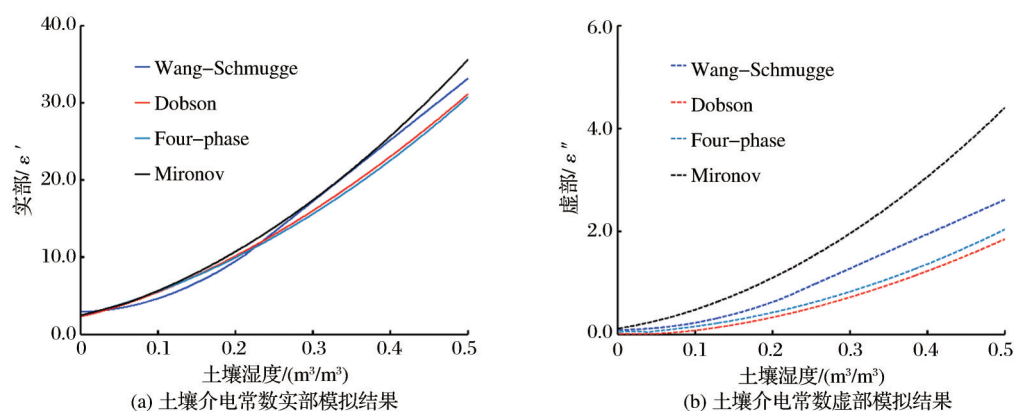


图 2 频率为 1.4 GHz 模拟情形①土壤湿度对介电常的影响
Fig.2 Simulation case at 1.4 GHz, the changing characteristic of dielectric constant as soil moisture corresponding to the Scene 1th

0.50 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) 时 Mironov 模型和 Four-phase 模型模拟的实部差值最大为 4.9, 此时, Mironov 和 Dobson 模型模拟结果的虚部差值最大为 2.6。

为了进一步分析各土壤介电模型随土壤湿度变化的差异对微波亮温模拟的影响, 首先, 选取通过“样方法”3 次实地测量的 LAI 平均值 ($\text{LAI} = 5.4 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$) 为植被参数化方案输入参数, 并在条件①的基础上, 开展双极化微波亮温的模拟, 评估土壤介电模型的差异对微波亮温模拟造成的影响。如图 3 所示, 在相同土壤湿度条件下, 不同的土壤介电模型条件下模拟的微波亮温结果存在明显差异, 当土壤湿度介于 0.03~0.23 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ 时, Wang-Schmugge 模型的微波亮温均大于其他 3 种模型的模拟值, 针对 Dobson 模型在土壤湿度分别为 0.13 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ 和 0.14 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ 时, 该模型模拟的水平极化和垂直极化微波亮温与 Wang-Schmugge 模型模拟结果差值为 8.0 K 和 4.4 K。当土壤湿度大于 0.23 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ 但未饱和时, 基于 Four-phase 模型模拟微波亮温明显大于其他 3 种模型, 而 Mironov 模型模拟微波亮温小于其他 3 种模型。Four-phase 模型和 Mironov 模型的模拟差异在土壤湿度饱和时达到最大, 其中水平极化、垂直极化最大差值分别为 6.1 K 和 4.8 K。因此, 在青藏高原原地下垫面条件下, 不同土壤介电模型所模拟的微波亮温存在显著差异, 而水平极化微波亮温模拟较垂直极化对土壤介电模型间差异的响应更为明显。

温度也是影响土壤介电常数的主要因素。图 4(a) 和 (b) 是对应模拟情形②获取的土壤介电常数实部与虚部的变化特征。4 种介电模型模型的实部和虚部变化趋势基本一致, 其中, Mironov 模型的实

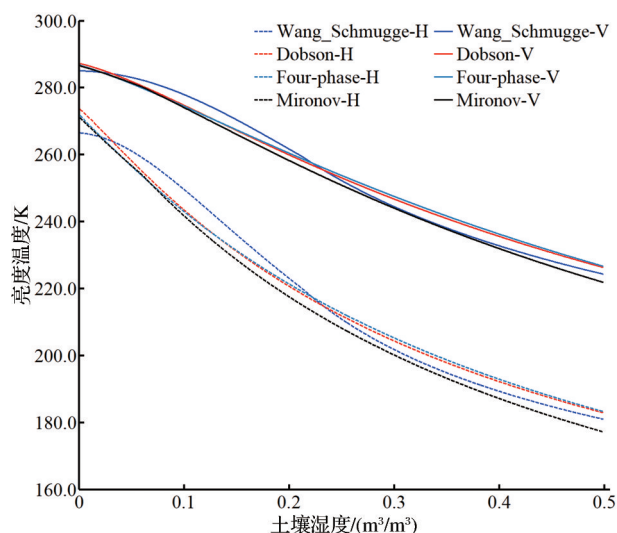


图 3 频率为 1.4 GHz 时模拟情形①土壤介电模型间差异对微波亮温模拟的影响
Fig.3 Simulation case at 1.4 GHz, the effect of dielectric models' differences on brightness temperature as soil moisture increasing, corresponding to the Scene 1th

部和虚部受温度变化影响较其他 3 种介电模型更小。当温度为 298.0 K 时, Wang-Schmugge 模型和 Mironov 模型实部差异达到最大值为 1.3, 而虚部最大差异则出现在 Mironov 模型与 Dobson 模型间, 其差值为 0.9。依据土壤湿度和温度分别对土壤介电常数影响的分析结果表明, 土壤湿度变化对介电常数的影响远大于土壤温度变化, 因此, 由土壤温度引起土壤介电常数模型间的差异而造成微波亮温模拟的差异在本研究中不涉及讨论。

4.2 观测微波亮温与模拟微波亮温比较

土壤介电模型作为 $\tau-\omega$ 模型的重要组成部分, 其适用性将直接决定模拟微波亮温和反演土壤湿度的精度。为进一步评估土壤介电模型间的差异

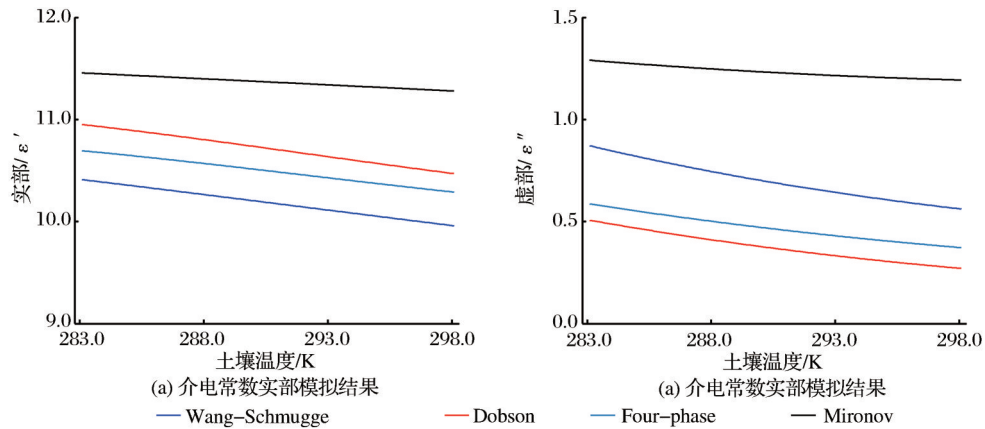


图4 频率为 1.4 GHz 模拟情形(2)温度对介电常的影响

Fig.4 Simulation case at 1.4 GHz, The effect of thermodynamic temperature on dielectric constant, corresponding to the Scene 2th

对真实条件下微波亮温模拟的影响,本研究将 2 cm 深度处观测的土壤湿度作为 L 波段有效探测深度上的基准湿度,开展正向地表辐射亮温的模拟分析,首先开展正向地表辐射量温的模拟分析。图 5(a)和(b)显示了各介电模型条件下微波亮温的模拟结果,模拟与观测微波亮温的变化趋势一致性较高 ($R^2 > 0.85$),但垂直极化模拟结果普遍高估微波亮温 ($\text{Bias} > 1.53 \text{ K}$),而水平极化模拟结果均低估微波亮温 ($\text{Bias} < -0.07 \text{ K}$),各土壤介电模型在水平极化和垂直极化条件下模拟结果和观测结果的相关性无明显差别,但精度统计结果表明(图 6 所示),无论是哪种土壤介电模型,对应水平极化微波亮温模拟的误差(RMSE、ubRMSE)都大于垂直极化微波亮温,这是由于水平极化微波亮温更容易受到地表粗糙度的影响^[27]。较另外 2 种土壤介电模型, Wang-Schmugge 模型在水平极化偏差最小为值 -0.07 K ,而 Mironov 模型在垂直极化的偏差最小值为 1.53 K , Four-phase 模型在水平极化条件的模拟误差(RMSE、ubRMSE)均小于其他 3 种模型模拟结果。综上所述,实际微波亮温模拟过程中,选择不同的土壤介电模型,对微波亮温模拟具有显著的影响。

4.3 土壤湿度反演结果评估

图 7(a)和(b)分别是垂直和水平极化观测微波亮温条件下基于 4 种土壤介电模型反演的土壤湿度,图中显示无论对应哪种土壤介电模型,利用观测的垂直极化微波亮温的反演结果与 2 层(2 cm 和 5 cm)观测土壤湿度变化的趋势较水平极化更好。统计结果(表 2 和表 3)也表明 L 波段在其他参数化方案一致的条件不同土壤介电模型反演的土壤湿度与 2 cm 土壤湿度的一致性($0.79 \leq R^2 \leq 0.85$)略

优于 5 cm 土壤湿度($0.76 \leq R^2 \leq 0.80$)。这与最新的基于 L 波段地基微波辐射计有效反演深度的研究结果相符合^[27,38-39]。针对水平极化反演结果(图 7(a)),表 2 统计结果显示,在青藏高原典型草地下垫面条件下,在地表粗糙度及植被光学厚度相同参数化方案条件下,4 种土壤介电模型反演的土壤湿度均明显低估实际土壤湿度($\text{Bias} < -0.027$)。其中, Wang-Schmugge 模型反演结果与 2 cm 和 5 cm 观测土壤湿度的相关性相对较好,且 RMSE、ubRMSE、Bias 3 项统计参数也表明该模型的反演结果略好于其他 3 种土壤介电模型反演结果。而根据 4.1 节分析的介电常数对微波亮温模拟的影响,不同土壤湿度条件下 Wang-Schmugge 模型对微波亮温的影响呈现不同的效果,在土壤含水量较小时,模拟的微波亮温大于其他 3 种土壤介电模型,因此,在土壤含水量较小时,同等微波亮温条件下 Wang-Schmugge 模型可以提升水平极化微波亮温反演土壤湿度值,从而有效降低在当前参数化方案条件下,水平极化微波亮温反演土壤湿度的低估程度。因此,选择 Wang-Schmugge 模型将有助于提高青藏高原典型下垫面水平极化微波亮温观测反演土壤湿度的精度。

针对垂直极化反演结果,图 7(b)显示 4 种介电模型反演土壤湿度的结果与 2 层土壤湿度观测具有良好的一致性($R^2 \geq 0.79$),但是误差较大(RMSE 大于 $0.061 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)。而 Mironov 模型获得了垂直极化条件下的最佳土壤湿度反演结果(统计参数见表 3)。Mironov 模型与观测土壤湿度偏差小于其他 3 种介电模型反演结果,而 Four-phase 模型反演结果与观测土壤湿度偏差大于其他 3 种模型反演结果,这与 4.1 节微波亮温模拟对不同土壤介电模型的响

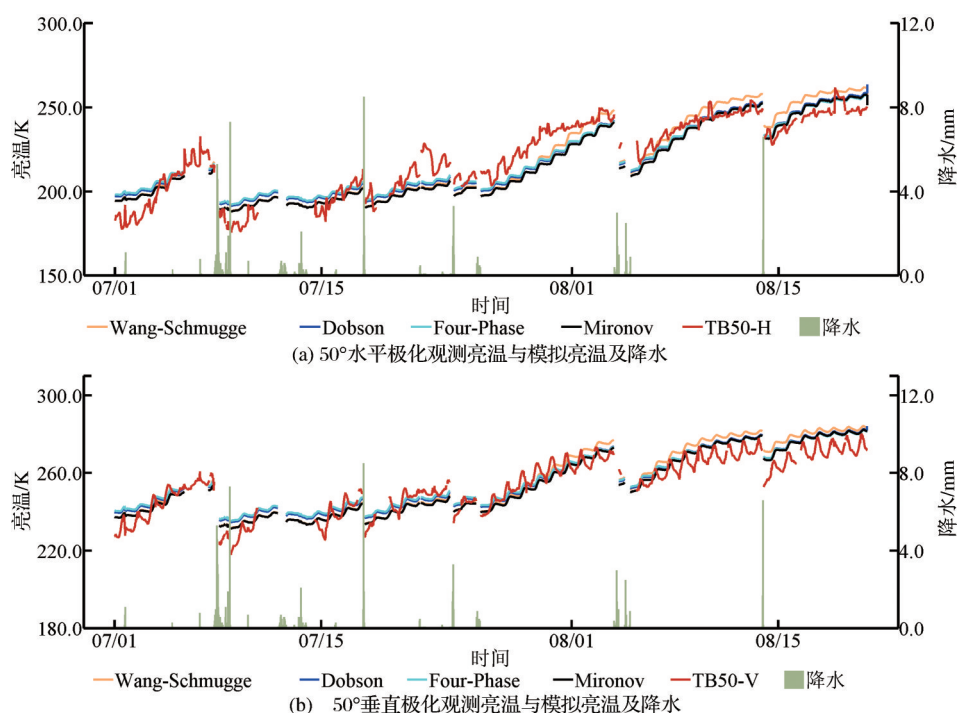


图 5 ELBARA-III 50°入射角观测微波亮温与不同介电模型条件下模拟的微波亮温时间序列

Fig.5 The ELBARA-III observed brightness temperature at 50° incident angle and the simulated brightness temperature based on the four dielectric models

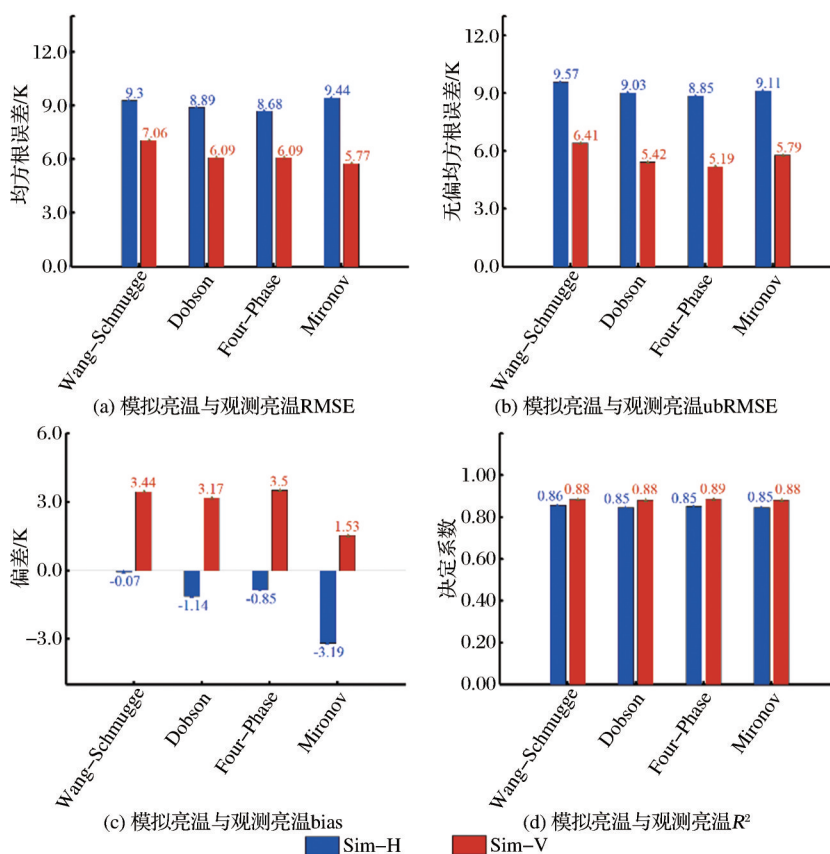


图 6 4种介电模型条件下模拟微波亮温与50°水平和垂直极化观测微波亮温统计结果

Fig.6 Statistics of simulated brightness temperature by brightness temperature measurement against four dielectric models

应相吻合,因为,当土壤水分较少时,2种模型对微波亮温模拟计算的影响并不明显,但当土壤水分含量较高时,Four-phase模型模拟微波亮温始终大于Mironov模型模拟结果。而当微波亮温相同时,Four-phase模型对应的土壤湿度大于Mironov模型

的对应的土壤湿度。综上所述,在当前参数化方案条件下,Four-phase土壤介电模型增加了垂直极化条件下土壤湿度反演值的高估程度,而Mironov模型减小了反演土壤湿度对观测土壤湿度的高估程度。

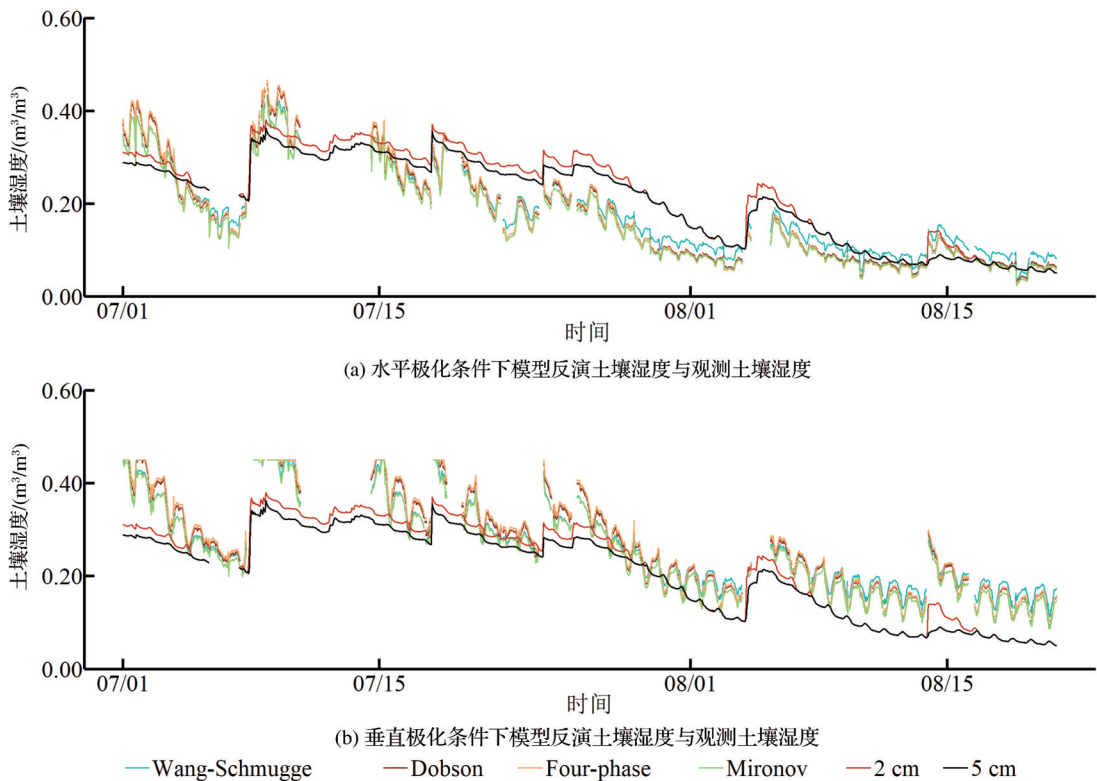


图 7 在水平和垂直极化条件下,4种土壤介电常数模型反演的土壤湿度与2 cm和5 cm观测土壤湿度时间序列

Fig.7 Time series of soil moisture retrieved based on four permittivity models and observed soil moisture at 2 cm and 5 cm depth

表 2 水平极化条件下不同土壤介电模型反演土壤湿度与观测土壤湿度的统计结果
Table 2 Statistics of soil moisture between H-polarization retrieval and measurement at 2 cm and 5 cm for different permittivity models

		2 cm				5 cm			
	土壤介电模型	RMSE	ubRMSE	bias	R^2	RMSE	ubRMSE	bias	R^2
		/m ³ ·m ⁻³	/m ³ ·m ⁻³	/m ³ ·m ⁻³		/m ³ ·m ⁻³	/m ³ ·m ⁻³	/m ³ ·m ⁻³	
TB-H	Wang-Schmugge	0.052	0.045	-0.027	0.80	0.047	0.044	-0.016	0.78
	Dobson	0.061	0.051	-0.036	0.78	0.057	0.052	-0.025	0.76
	Four-phase	0.061	0.052	-0.035	0.79	0.058	0.054	-0.024	0.77
	Mironov	0.065	0.048	-0.046	0.79	0.059	0.048	-0.034	0.77

5 讨 论

本研究基于详尽的地表综合观测试验,从理论介电常数模拟和L波段微波亮温模拟及土壤湿度反演3个角度,量化评估了4种土壤介电模型间的差异对青藏高原草地下垫面在非冻结期观测亮温模拟和土壤湿度反演的影响。其中,被评估的介电常

数模型包括Mironov理论推导介电常数模型和Four-phase、Wang-Schmugge、Dobson半经验介电常数模型,这4种模型模拟的L波段亮温与观测的亮温、反演的土壤湿度与观测的土壤湿度在一定程度上保持了较好的一致性,但各模型间RMSE、Bias等统计参数差异显著。特别需要指出的是,在青藏

表 3 垂直极化条件下不同土壤介电模型反演土壤湿度与观测土壤湿度的统计结果
Table3 Statistics of soil moisture between V-polarization retrieval and measurement at 2 cm and 5 cm
for different permittivity models

		2 cm				5 cm			
土壤介电模型		RMSE /m ³ ·m ⁻³	ubRMSE /m ³ ·m ⁻³	Bias /m ³ ·m ⁻³	R ²	RMSE /m ³ ·m ⁻³	ubRMSE /m ³ ·m ⁻³	Bias /m ³ ·m ⁻³	R ²
TB-V	Wang-Schmugge	0.074	0.046	0.059	0.81	0.083	0.046	0.071	0.79
	Dobson	0.076	0.045	0.063	0.84	0.088	0.048	0.074	0.82
	Four-phase	0.080	0.045	0.067	0.85	0.091	0.048	0.079	0.82
	Mironov	0.061	0.043	0.046	0.84	0.072	0.045	0.057	0.82

高原草地下垫面条件下,4种介电常数模型对模拟水平和垂直极化L波段微波亮温存在不同的影响,且4种模型对利用不同极化微波亮温反演土壤湿度也存在不同的影响,对于这种影响的内在机理在今后的研究中还需要进一步讨论。

同时,研究工作仍然存在两处不足:即文中仅讨论了土壤介电模型对L波段微波亮温模拟和土壤湿度反演的影响,未考虑多种植被光学厚度和地表粗糙度方案耦合的影响;其次,由于青藏高原广泛分布着季节性冻土和多年冻土,开展冻融过程中土壤水分相态迁移对介电模型的影响非常必要。此外,微波亮温以及土壤湿度反演结果显示的日变化比实际观测的亮温和土壤湿度日变化剧烈,造成这种现象的主要原因是红外温度计观测的植被冠层顶温度不能完全代表植被层温度,同时CS616受温度等因素影响也存在日变化观测误差。因此,今后的工作将以本研究为基础,设置更为合理的观测试验,并针对土壤介电模型,植被模型和粗糙度方案开展耦合比较,开展表层土壤冻融转换期间的液态水分含量的反演研究,同时,依据全球土壤水分主被动探测任务卫星(SMAP)和土壤湿度与海水盐度卫星(SMOS)的观测数据,将研究成果扩展到星载微波辐射计像元尺度(~30 km)上,以期通过对全年土壤水分的连续监测,为青藏高原的干旱预警及生态恢复提供客观可靠的土壤湿度数据来源。

6 结 语

本研究基于 τ - ω 辐射传输模型和给定植被光学厚度及地表粗糙度等参数化方案条件下,结合地基微波辐射计(ELBARA-III型,L波段)试验观测数据,分析了利用Wang-Schmugge、Mironov、Dobson、Four-phase土壤介电模型对L波段微波亮温反演青藏高原高寒草地下垫面土壤湿度结果的影响,主要结论如下:

(1)土壤介电常数模拟结果表明,在非冻结期,土壤湿度变化对土壤介电常数的影响远大于土壤温度造成的影响,而水平极化微波亮温正向模拟对4种土壤介电模型差异的响应略大于垂直极化。

(2)基于本研究所用的前向模型模拟微波亮温结果表明,基于4种土壤介电模型模拟的微波亮温与观测微波亮温在同一极化条件下其统计相关性无明显差别,但其精度统计结果存在显著差异。因此,土壤介电模型间的差异对微波亮温模拟存在不可忽略的影响。

(3)针对本研究所用的反演方法,基于4种土壤介电模型条件下,土壤湿度反演结果的对比分析表明,无论针对哪种土壤介电模型,垂直极化观测的微波亮温反演土壤湿度与观测土壤湿度的一致性均优于水平极化的反演结果。其中,在水平极化条件下,选择Wang-Schmugge模型将有助于提高青藏高原典型下垫面水平极化微波亮温观测反演土壤湿度的精度;而在垂直极化条件下,Four-phase土壤介电模型较其他3种土壤介电模型加大了反演土壤湿度对观测土壤湿度的高估程度,而Mironov模型则能有效降低这种高估的趋势。

参考文献(References):

- [1] Seneviratne S I, Corti T, Davin E L, *et al.* Investigating Soil Moisture-Climate Interactions in a Changing Climate: A Review[J]. *Earth Science Reviews*, 2010, 99(3/4):125-161.
- [2] Wen Jun, Lan Yongchao, Su Zhongbo, *et al.* Advances in Observation and Modeling of Land Surface Processes over The Soure Region of Yellow River[J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(6):575-585.[文军,蓝永超,苏中波,等.黄河源区陆面过程观测和模拟研究进展[J].*地球科学进展*, 2011, 26(6):575-585.]
- [3] Entekhabi D, Njoku E G, Neill P E O, *et al.* The Soil Moisture Active Passive (SMAP) Mission[J]. *Proceedings of the*

- IEEE, 2010, 98(5): 704-716.
- [4] Zhao Yizhou, Ma Yaoming, Huang Zhen, *et al.* The Retrieval of Soil Moisture from TRMM/ TMI Data in Central of Tibetan Plateau[J]. Plateau Meteorology, 2007, 26(5): 952-957. [赵逸舟, 马耀明, 黄镇, 等. 利用 TRMM/TMI 资料反演青藏高原中部土壤湿度[J]. 高原气象, 2007, 26(5): 952-957.]
- [5] 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.
- [6] Zhao Tianjie. Passive Microwave Remote Sensing of Soil Moisture[D]. Beijing: Beijing Normal University, 2012. [赵天杰. 被动微波遥感土壤水分[D]. 北京: 北京师范大学, 2012.]
- [7] 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 Environment, 2017, 192(1): 238-262.
- [8] Wen J, Jackson T J, Bindlish R, *et al.* Retrieval of Soil Moisture and Vegetation Water Content Using SSM/I Data over a Corn and Soybean Region[J]. Journal of Hydrometeorology, 2005, 6(6): 854-863.
- [9] 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(C13): 11229-11237.
- [10] 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.
- [11] O'Neill P, Njoku E, Jackson T, *et al.* SMAP Algorithm Theoretical Basis Document: Level 2 & 3 Soil Moisture (Passive) Data Products[Z]. In: Jet Propulsion Lab., California Inst. Technol., Pasadena, CA, USA, JPL D-66480, 2015.
- [12] Shi Xiaokang, Wen Jun, Wang Lei, *et al.* Application of AMSR-E Brightness Temperature Data in Observation and Simulation of Soil Moisture Variation over Northeast Plateau[J]. Plateau Meteorology, 2010, 29(3): 545-553. [史小康, 文军, 王磊, 等. AMSR-E 卫星微波亮温数据在高原东北部土壤湿度观测和模拟中的应用[J]. 高原气象, 2010, 29(3): 545-553.]
- [13] Zheng D, Wang X, Van Der Velde R, *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(1): 633-647.
- [14] Jin Xiao, Yang Wen, Zhao Jianqi. Study on the Permittivity Mixing Model of Freezing Soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(3): 570-579. [靳潇, 杨文, 赵剑琦. 冻结土壤介电常数混合模型机理研究[J]. 冰川冻土, 2018, 40(3): 570-579.]
- [15] Van Dam R L, Borchers B, Hendrickx J M H. Methods for Prediction of Soil Dielectric Properties [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5794: 188-197.
- [16] Wang J R, Schmugge T J. 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.
- [17] Liu Jun, Zhao Shaojie, Jiang Lingmei, *et al.* Research Progress on Dielectric Constant Model of Soil at Microwave Frequency[J]. Remote Sensing Information, 2015, 30(1): 5-13. [刘军, 赵少杰, 蒋玲梅, 等. 微波波段土壤的介电模型研究进展[J]. 遥感信息, 2015, 30(1): 5-13.]
- [18] Dobson M C, Ulaby F T, Hallikainen M T, *et al.* Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil-Part II: Dielectric Mixing Models[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1985, 23(1): 35-46.
- [19] Birchak J R, Gardner C G, Hipp J E, *et al.* High Dielectric Constant Microwave Probes for Sensing Soil Moisture [J]. Proceedings of the IEEE, 1974, 62(1): 93-98.
- [20] Mironov V L, Dobson M C, Kaupp V H, *et al.* Generalized Refractive Mixing Dielectric Model for Moist Soils[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(4): 773-785.
- [21] Mironov V, Kerr Y, Wigneron J P, *et al.* Temperature and Texture Dependent Dielectric Model for Moist Soils at 1.4 GHz[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2013, 10(3): 419-423.
- [22] Mironov V L, Bobrov P P, Fomin S V. Dielectric Model of Moist Soils with Varying Clay Content in the 0.04 to 26.5 GHz Frequency Range[C]// 2013 International Siberian Conference on Control and Communications, Krasnoyarsk, Russia, 2013.
- [23] 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.
- [24] Mironova V L, Kosolapova L G, Lukin Y I, *et al.* Temperature and Texture Dependent Dielectric Model for Frozen and Thawed Mineral Soils at A Frequency of 1.4 GHz[J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 200(1): 240-249.

- [25] Stähli M, Stadler D. Measurement of Water and Solute Dynamics in Freezing Soil Columns with Time Domain Reflectometry[J]. Journal of Hydrology, 1997, 195(1):352-369.
- [26] Schwank M, Stähli 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.
- [27] 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(1):16-25.
- [28] Zheng D, Wang X, Van Der Velde R, *et al.* L-Band Microwave Emission of Soil Freezing-Thaw Process in the Third Pole Environment[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017, 55(9):5324-5338
- [29] Sun Yayong. Synergetic Inversion of Surface Soil Moisture based on C/L Band Active and Passive Microwave Remote Sensing[D]. Beijing: China Institute of Water Resource and Hydropower Research, 2018.[孙亚勇. 基于 C 和 L 波段主被动微波遥感的土壤水分协同反演研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2018.]
- [30] Chen Zixuan. Effects of Artificial Interference on Plant Diversity and Productivity in Maqu Degraded Alpine Meadow[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2008.[陈子萱. 人工扰动对玛曲高寒沙化草地植物多样性和生产力的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2008.]
- [31] Xiong Yuanqing, Wu Pengfei, Zhang Hongzhi, *et al.* Dynamics of Soil Water Conservation during the Degradation Process of the Zoige Alpine Wetland [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(19):5780-5788.[熊远清, 吴鹏飞, 张洪芝, 等. 若尔盖湿地退化过程中土壤水源涵养功能[J]. 生态学报, 2011, 31(19): 5780-5788.]
- [32] Schwank M, Wiesmann A, Werner C, *et al.* ELBARA II an L-Band Radiometer System for Soil Moisture Research[J]. Sensors, 2010, 10(1):584-612.
- [33] Zheng D, Wang X, Velde R V D, *et al.* Assessment of Soil Moisture SMAP Retrievals and ELBARA-III Measurements in a Tibetan Meadow Ecosystem [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2019, 99(1):1-5.
- [34] Christian M, Weber D, Max W, *et al.* ELBARA, the ETH L-Band Radiometer for Soil-Moisture Research [C]//IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Toulouse, France, 2003.
- [35] European Space Agency. SMOS Gets Help from Tibet [EB/OL]. http://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/SMOS/SMOS_gets_help_from_Tibet, 29/01/2016, 23/06/2019.
- [36] Pellarin T, Kerr Y H, Wigneron J. Global Simulation of Brightness Temperatures at 6.6 and 10.7 GHz over Land based on SMMR Data Set Analysis [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(9):2492-2505.
- [37] Campbell. CS616 Water Content Reflectometer [EB/OL]. <https://www.campbellsci.com/cs616-reflectometer>, 2002, 27/06/2019.
- [38] Escorihuela M J, Chanzy A, Wigneron J P, *et al.* Effective Soil Moisture Sampling Depth of L-band Radiometry: A Case Study [J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(5):995-1001.
- [39] Roy A, Toose P, Williamson M, *et al.* Response of L-Band Brightness Temperatures to Freeze/Thaw and Snow Dynamics in A Prairie Environment from Ground-based Radiometer Measurements [J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 191: 67-80.
- [40] He Y, Guo X, Wilmschurst J F. Comparison of Different Methods for Measuring Leaf Area Index in a Mixed Grassland [J]. Canadian Journal of Plant Science. Revue Canadienne De Phytotechnie, 2007, 87(4): 803-813.
- [41] 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.
- [42] 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(NC6): 5277-5282.
- [43] Wigneron J, 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.
- [44] Wigneron J P, Kerr Y, Waldteufel P, *et al.* L-Band Microwave Emission of the Biosphere (L-MEB) Model: Description and Calibration Against Experimental Data Sets over Crop Fields [J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 107(4): 639-655.

Evaluation of the Applicability of Different Dielectric Models for Soil Moisture Retrieval based on the Ground-based Radiometer Measurements

Wang Zuoliang^{1,2}, Wen Jun³, Liu Rong¹, Li Zhenchao¹, Zheng Donghai⁴,
Wang Xin¹

(1. *Key Laboratory of Land Surface Process and Climate Change in Cold and Arid Regions, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. College of Atmospheric Sciences, Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China;

4. National Tibetan Plateau Data Center, Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Based on soil moisture and freeze/thaw comprehensive experiments conducted at the north-eastern part of the Tibetan Plateau, the L-band brightness temperature, the in-situ soil moisture and temperature, vegetation leaf area index are measured simultaneously for the purpose of evaluating performances on forward brightness temperature simulation and soil moisture retrieval using four dielectric constant models, including Wang-Schmugge, Mironov, Dobson, and Four-Phase model. The forward brightness temperature simulations indicate that the difference of simulated brightness temperature between Wang schmugge model and the other three dielectric constant models is most significant at lower soil moisture content condition (soil moisture is less than $0.23 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$), nevertheless, the difference of Mironov model simulation is most significant in contrast with the ones of other three models at higher soil moisture condition (soil moisture is greater than $0.23 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$). The practical retrieval of soil moisture from the ground-based radiometer measurements indicate that Wang-Schmugge model can effectively reduce the underestimation of soil moisture at the horizontal polarization, this resulted an improvement to the accuracy of retrieved soil moisture. Mironov model can reduce the underestimation of retrieved soil moisture at the vertical polarization. In accordance with a state-of-the-art parameterization scheme, the evaluation of performances of four dielectric constant models at the typical alpine meadow is potential for selecting optimum soil moisture retrieval by using soil dielectric model from space-borne L-band radiometer observation over the Tibetan Plateau

Key words: L-Band; Passive microwave; Microwave brightness temperature; Soil permittivity model; Soil moisture retrieval