

# TAU-OMEGA 遥感辐射模型改进与参数化

马红章, 孟庆涛, 刘素美

(中国石油大学(华东)理学院, 青岛 266580)

**摘要:** 大尺度地表土壤水分信息的获取对水资源管理、农业生产以及气候变化等相关研究具有重要意义。TAU-OMEGA ( $\tau-\omega$ ) 模型是利用被动微波遥感技术进行大尺度土壤水分信息提取的常用模型。由于  $\tau-\omega$  模型忽略了植被层的体散射作用, 该模型仅适用于 L 波段, 存在 C 波段适用性差及模型参数无法定量计算的问题。针对此问题, 该研究在分析植被冠层对微波散射机制的基础上, 通过增加反映冠层多次散射作用的辐射添加项对  $\tau-\omega$  模型进行了改进, 成功解决了模型在 C 波段的适用性问题; 通过理论推导, 得出了模型  $\omega$  参数的理论计算方法, 基于模拟数据集, 实现了基于冠层叶面积指数的模型  $\omega$  和  $\tau$  参数的计算, 解决了  $\tau-\omega$  模型中  $\omega$  参数无法根据遥感数据进行定量计算的问题。以玉米冠层为例, 在 C 波段 (6.6 GHz), 改进的  $\tau-\omega$  模型对地表微波辐射亮温的模拟值与实测数据保持了较好的一致性, 模拟误差较改进前有了极大的下降, V 极化均方根误差为 3.02 K, H 极化均方根误差为 3.94 K, 结果表明了该研究提出的模型改进与参数化方案的合理性, 研究结果为联合光学和被动微波遥感数据进行大尺度土壤水分反演奠定了基础。

**关键词:** 土壤水分; 遥感; TAU-OMEGA 模型; 双矩阵算法; 体散射

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202309086

中图分类号: TP722.5

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-11-0292-07

马红章, 孟庆涛, 刘素美. TAU-OMEGA 遥感辐射模型改进与参数化[J]. 农业工程学报, 2024, 40(11): 292-298. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202309086 <http://www.tcsae.org>

MA Hongzhang, MENG Qingtao, LIU Sumei. Improvement and parameterization of the TAU-OMEGA radiation model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(11): 292-298. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202309086 <http://www.tcsae.org>

## 0 引言

土壤水分是陆地水圈状态的決定因素之一, 土壤水分信息的获取对水资源管理、农业生产以及气候变化等相关研究意义重大<sup>[1-3]</sup>。被动微波遥感技术现已成为进行大尺度地表土壤水分反演的主要技术手段之一。由于植被层对土壤微波辐射信号的散射影响, 显著降低了高频波段被动微波遥感土壤水分的精度<sup>[4-5]</sup>, 因此, 发展地表微波辐射传输模型对理解植被冠层微波散射机理, 提高植被覆盖条件下的土壤水分反演精度至关重要。

有植被覆盖的地表可简化为植被介质层与土壤介质层的复合层, 常用的土壤介质层的微波辐射物理模型包括有限元方法模型 (finite element model, FEM)<sup>[6]</sup>、小斜面近似模型 (small slope approximation model, SSAM)<sup>[7]</sup>、积分方程模型 (integral equations model, IEM)<sup>[8]</sup> 和改进的积分方程模型 (advanced integral equation model, AIEM)<sup>[9]</sup>。植被层微波散射模型已由简单的连续型模型发展到复杂的离散型模型。连续型模型多将植被层简化为覆盖在土壤层上的连续的、水平均一的介质层, 以 TAU-OMEGA 微波辐射传输模型 (简称  $\tau-\omega$  模型) 和水云模型为代表

的连续型模型忽略了植被介质层对微波的散射作用, 模型简单、输入参数少, 容易实现反解, 已被广泛应用于低频 (如 L 波段) 微波遥感土壤水分的研究中<sup>[10-12]</sup>。离散型微波模型通常具有一定尺寸和空间分布的介电圆盘和介电圆柱体等散射体的集合来刻画植被层, 基于电磁场理论计算植被介质层的微波散射特性参数。离散型微波模型通常输入参数多, 反解难度大, 一般多用于地表微波散射辐射特性的模拟和规律分析中。ULABY 等<sup>[13]</sup> 根据一阶辐射传输理论提出的 MIMICS 模型 (michigan microwave canopy scattering model, MIMICS, 以及 FERRAZZOLI 等<sup>[14]</sup> 基于双矩阵算法提出的高阶微波辐射模型 (matrix-doubling model, MDM) 是离散型模型的典型代表, 被广泛应用。MDM 考虑了植被层内以及植被层与地表层之间的微波多次散射效应, 多个观测试验证实了 MDM 在 L 波段、C 波段甚至更高的 X 频段上均有较好的模拟精度<sup>[15-17]</sup>。

$\tau-\omega$  模型在土壤水分反演的应用中存在 2 个主要的问题: 1)  $\tau-\omega$  模型在 C 波段的适用性差。随着微波频率的升高, 植被冠层对微波的散射增强, KURUM 等<sup>[18]</sup> 研究表明在 C 波段植被层的微波散射导致  $\tau-\omega$  模型不再适用; 2)  $\tau-\omega$  模型中冠层反照率  $\omega$  参数和光学厚度  $\tau$  参数随植被类型和冠层结构的变化而变化, 不易确定<sup>[19-20]</sup>。根据  $\omega$  和  $\tau$  参数的物理定义, 从理论上可以基于电磁波与介质的散射理论进行计算, 如 MDM 等高阶离散微波物理模型, 但由于  $\tau-\omega$  模型本身忽略了植被层的微波散射

收稿日期: 2023-09-11 修订日期: 2023-11-01

基金项目: 山东省自然科学基金项目 (ZR2021MD067); 中央高校基本科研项目 (22CX03011A); 国家自然科学基金项目 (41971292)

作者简介: 马红章, 副教授, 研究方向为多源遥感协同机理与建模。

Email: mahzh@upc.edu.cn

作用，通过理论方法计算得到的 $\omega$ 和 $\tau$ 参数不适用于原 $\tau-\omega$ 模型。相关研究表明，通过与实测数据匹配的方法得到的冠层 $\omega$ 等效值与通过理论方法计算得到的 $\omega$ 参数之间存在一定的差异<sup>[21-22]</sup>。

基于此，为了解决模型在 C 波段适用性差及模型参数无法定量计算的问题，本研究以玉米冠层为例，在分析植被冠层对微波散射过程的基础上，通过增加反映冠层多次散射作用的辐射项解决 $\tau-\omega$ 模型在 C 波段的适用性问题；通过对 MDM 散射模型模拟数据集的分析，以实现 $\omega$ 和 $\tau$ 参数化的定量计算，以期为联合光学和被动微波遥感数据进行大尺度土壤水分反演提供支持。

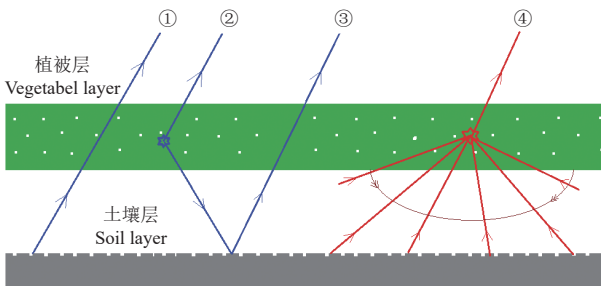
## 1 模型与数据

### 1.1 $\tau-\omega$ 模型

植被覆盖地表的微波辐射来自植被层和土壤层， $\tau-\omega$ 模型描述了 3 个最主要的辐射分量，如图 1 中的分量①~③。分量①为观测方向上的土壤层辐射能量透过植被层直接到达传感器的部分；分量②为观测方向植被层的直接辐射；分量③为植被层的下行辐射经土壤层反射至观测方向后再透过植被层的部分，其表达式为<sup>[23]</sup>

$$T_{B0}(\theta, P) = e_s(\theta, P) \cdot T_s \cdot e^{-\tau/\cos(\theta)} + T_{veg} \cdot [1 - \omega(\theta)] \cdot [1 - e^{-\tau/\cos(\theta)}] \cdot [1 + e^{-\tau/\cos(\theta)}] \cdot [1 - e_s(\theta, P)] \quad (1)$$

式中 $T_{B0}$ 为地表微波辐射亮温，K； $\theta$ 为观测天顶角，(°)； $e_s(\theta, P)$ 为土壤层发射率， $P$ 表示极化方式， $T_s$ 和 $T_{veg}$ 分别为土壤温度和植被温度，K； $\omega$ 和 $\tau$ 分别为植被层单散射反照率和光学厚度。



注：①为透过植被层后的观测向土壤层辐射；②为植被层观测向的直接辐射；③为被土壤层反射至观测向的植被层下行辐射，再透过植被层的部分；④为被植被层散射到观测向的土壤上行辐射，该分量被 $\tau-\omega$ 模型忽略。  
Note: Component ① is the radiation of the soil layer in the observation direction after passing through the vegetation layer; Component ② is the direct radiation in the observed direction of the vegetation layer; Component ③ is the part of the descending radiation of the vegetation layer reflected by the soil layer to the observation direction and then passed through the vegetation layer. Component ④ is the upward soil radiation scattered by the vegetation layer to the observed direction, which is ignored by the  $\tau-\omega$  model.

图 1 辐射分量贡献示意图

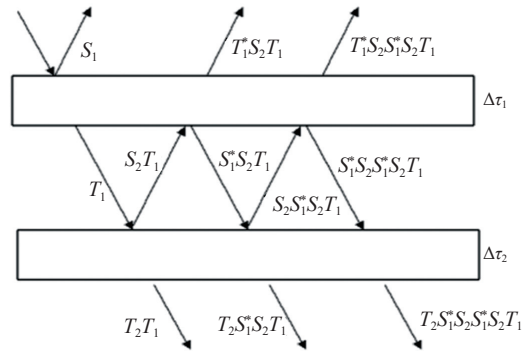
Fig.1 Schematic of radiation component contribution

对于农作物植被层，在 L 波段 $\omega$ 一般取经验值 0，而 $\tau$ 一般被简化为归一化植被指数（normalized difference vegetation index, NDVI）、叶面积指数（leaf area index, LAI）或冠层等效水厚度（canopy equivalent water thickness, CEWT）等植被特征参数的线性方程<sup>[24-25]</sup>。

$e_s(\theta, P)$ 直接采用 AIEM 模型计算，AIEM 模型中的土壤介电参数由 DOBSON 模型计算<sup>[26]</sup>。

### 1.2 MDM 模型

在 MDM 模型中，植被层被看作介电圆盘和介电圆柱体的集合体，介电圆盘的散射矩阵采用广义 Rayleigh-Gans 近似计算，介电圆柱体的散射矩阵则采用无限长介电圆柱体近似方法计算。植被层内部的多次散射通过 Matrix Doubling 算法来计算。如图 2 表示，植被冠层被分割成  $N$  个无限薄子层，薄子层的散射是单次的，对于某特定的入射方向，相邻 2 个薄子层 $\Delta\tau_1$ 和 $\Delta\tau_2$ 之间经过多次散射后的后向散射矩阵和前向透射矩阵可用式（2）和式（3）计算<sup>[14]</sup>。



注： $S_n$ 和 $S_n^*$ 分别表示第  $n$  薄子层上行和下行散射矩阵； $T_n^*$ 和 $T_n$ 分别为第  $n$  薄子层上行和下行透射矩阵。

Note:  $S_n$  and  $S_n^*$  represent the uplink and downlink scattering matrices of the  $n$  thin sublayer;  $T_n^*$  and  $T_n$  are the uplink and downlink transmission matrices of the  $n$  thin sub layer, respectively.

图 2 多次散射示意图

Fig.2 Diagram of multiple scattering

$$S = S_1 + T_1^* S_2 T_1 + T_1^* S_2 S_1^* S_2 T_1 + \dots = S_1 + T_1^* S_2 (1 - S_1^* S_2)^{-1} T_1 \quad (2)$$

$$T = T_2 [1 + S_1^* S_2 + (S_1^* S_2)^2 + \dots] T_1 = T_2 (1 - S_1^* S_2)^{-1} T_1 \quad (3)$$

式中 $S$ 为冠层后向散射矩阵； $T$ 为冠层前向透射矩阵。通过反复迭代计算，模型最终可输出整个植被层的前向半球散射 $k_a$ 、后向半球散射 $k_b$ 、透过率 $T_r(\theta)$ 和发射率 $e_{veg}(\theta)$ 。

电磁辐射沿 $\theta$ 方向入射冠层，冠层吸收的系数为 $k_a(\theta)$ ， $k_a(\theta) = e_{veg}(\theta)$ ，透射率为 $T_r(\theta)$ ，冠层总散射系数为 $k_s(\theta)$ ， $k_s = k_b + k_d$ ，则根据能量守恒有：

$$k_s(\theta) + T_r(\theta) + k_a(\theta) = 1 \quad (4)$$

式中 $T_r(\theta) = e^{-\tau/\cos(\theta)}$ 。根据 $\omega$ 的定义， $\omega = \frac{k_s}{k_s + k_a}$ ，因此，植被冠层 $\omega$ 参数可由式（5）计算：

$$\omega(\theta) = 1 - \frac{e_{veg}(\theta)}{1 - T_r(\theta)} \quad (5)$$

### 1.3 试验数据

2010 年 6—8 月期间，在中国科学院怀来遥感站（115°46'59"E；40°20'55"N，海拔高度 488.3 m）开展了不同生长期玉米样地多角度微波辐射观测试验，用 C 波段微波辐射计从幼苗期、拔节期到花期共进行了 8 次堇

向45°方位的微波辐射亮温数据测量,观测场景与数据如图3所示(亮温数据为3次重复测量的平均结果)。C波段微波辐射计(中心频率6.6 GHz;带宽400 MHz;-3 dB波束角15°;测量精度小于2 K;驻波比≤1.30;极化隔离度>25 dB)被安装在高架塔三维测量平台上,观

测垂直高度17 m,观测天顶角20°~60°,间隔5°。试验中测量的植被层和土壤层的配套参数包括土壤0~5 cm的水分含量与温度、土壤粗糙度、冠层叶面积指数、叶片温度与含水量,玉米秆高度与直径等,具体参数见表1。

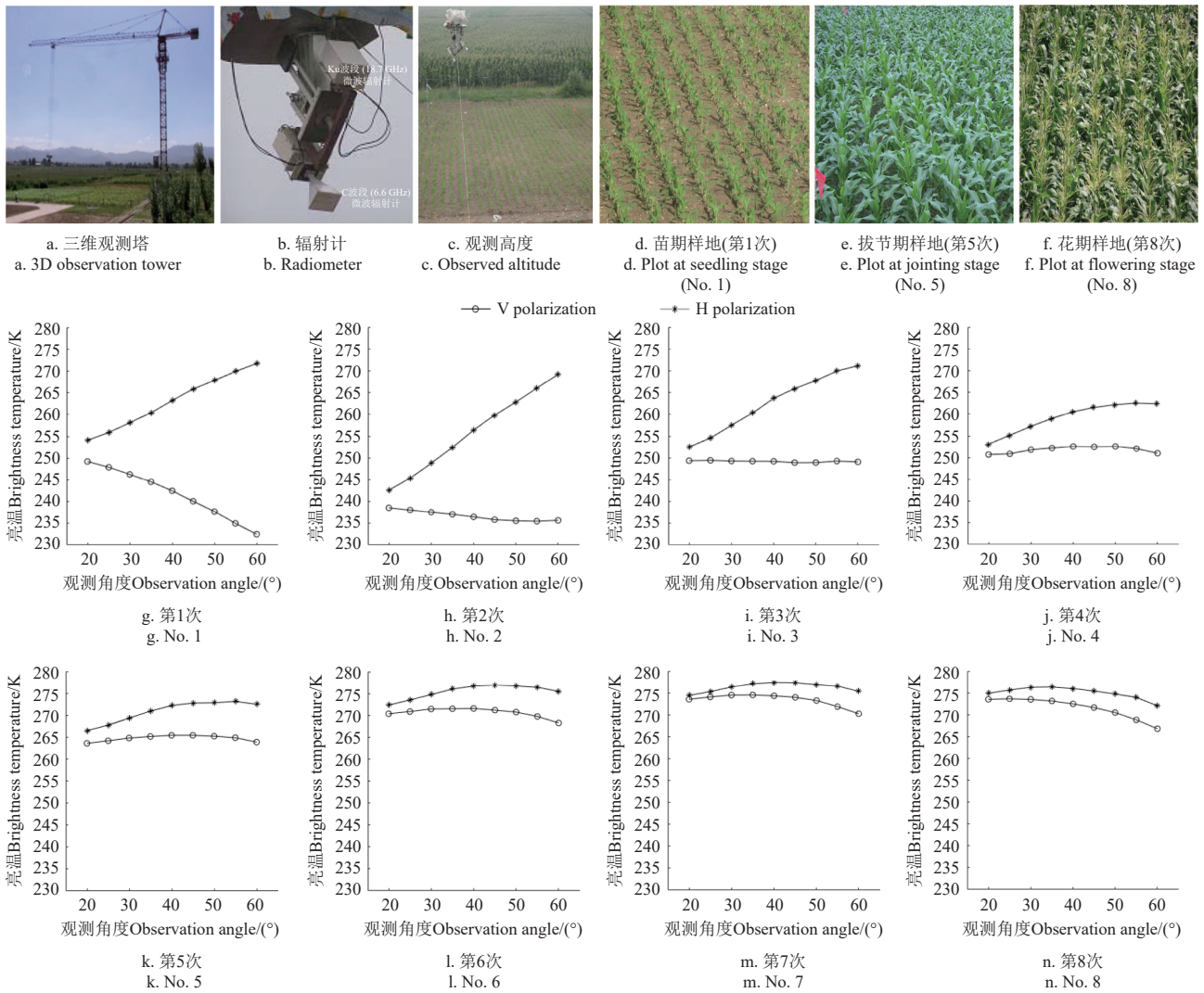


图3 试验观测平台、植被状况与玉米生育期8次样地亮温观测数据

Fig.3 Observation platform, vegetation status and in-situ brightness temperature data of eight times during growing stage of maize

表1 玉米生育期8次测量参数值

Table 1 In-situ measured parameters of eight times during growing stage of maize

参数 Parameters	1	2	3	4	5	6	7	8
土壤含水率 Soil moisture/ (cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup> )	0.14	0.18	0.13	0.15	0.14	0.13	0.14	0.12
叶面积指数 Leaf area index (LAI)	0.18	0.52	1.14	1.58	2.15	2.54	3.29	3.6
冠层平均含水率 Canopy water content/%	84	83	83	82	81	81	80	78
株高 Plant height/m	0.23	0.34	0.46	0.65	0.83	1.05	1.33	1.66
冠层温度 Canopy temperature/°C	30.4	22.1	27.2	17.8	24.6	25.6	25.3	22.9
玉米秆直径 Maize stalk diameter/cm	0.7	1.1	1.65	2.0	2.3	2.35	2.4	2.5
玉米秆高度 Maize stalk height/cm	16	24	34	45	58	71	91	116
生物量 Biomass/ (g·m <sup>-2</sup> )	74.4	386.8	1 180.7	1 696.0	2 022.2	2 165.7	3 581.2	4 696.7
土壤温度 Soil temperature/°C	28.8	22.8	23.9	21.3	23.9	24.2	23.6	22.5
砂土体积分数 Sand volume fraction/%	50	50	50	50	50	50	50	50
黏土体积分数 Clay volume fraction/%	15	15	15	15	15	15	15	15
土壤容重 Soil bulk density/ (g·cm <sup>-3</sup> )	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
土壤粗糙度均方根高度 Soil roughness root mean square height/ cm	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.71	0.71	0.71
土壤粗糙度相关长度 Soil roughness correlation length /cm	58	58	58	58	58	61	61	61

## 2 方法与结果

### 2.1 模型的改进方法

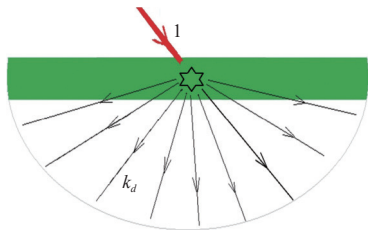
植被层对 C 波段及以上频段的微波辐射的散射作用不可忽略，在考虑植被层内多次散射的情况下，以  $\Delta T_B(\theta, P)$  表示非观测向的土壤辐射到达植被层后被植被层散射到观测方向的部分（图 1 中④分量），则  $\tau-\omega$  模型改进为

$$T_{B0}(\theta, P) = e_s(\theta, P) \cdot T_s \cdot e^{-\tau/\cos(\theta)} + T_{veg} \cdot [1 - \omega(\theta)] \cdot [1 - e^{-\tau/\cos(\theta)}] \cdot [1 + e^{-\tau/\cos(\theta)} \cdot [1 - e_s(\theta, P)]] + \Delta T_B(\theta, P) \quad (6)$$

如图 4 所示，单位能量的电磁波以角度  $\theta$  入射到植被层，经冠层散射后，前向半球散射为  $k_d$ ，则根据光路可逆原理，上行半球辐射被植被层散射至  $\theta$  方向的部分可近似用各向上行辐射平均值的  $k_d$  倍来表示，因此，④分量可用式 (7) 表示。

$$\Delta T_B(\theta, P) = T_s \cdot k_d(\theta) \cdot \int_{\phi=0}^{\pi/2} e_s(\phi, P) \cdot d\phi \quad (7)$$

式中  $\int_0^{\pi/2} e_s(\phi, P) d\phi$  表示土壤各向辐射率的平均值， $\phi$  为土壤微波辐射角度，文中采用 3 个角度（25°、45°和 65°）土壤辐射率的平均值来代替。



注：1 指单位能量。  $k_d$  是前半球散射。  
Note: 1 is unit energn.  $k_d$  is forward scattering toward hemispheres.

图 4 冠层散射路径示意图

Fig.4 Schematic of the canopy scattering path

### 2.2 模型的参数化方法

为了简化  $\omega$  和  $\tau$  参数计算，本研究采用 MDM 模型的模拟数据对冠层  $\omega$  和  $\tau$  进行参数化。基于玉米的各生长期试验观测数据，利用 LAI 的二次多项式拟合得到秆直径和秆长度参数的经验方程，利用表 2 的输入参数，由 MDM 模型计算不同 LAI 冠层的前向半球散射  $k_d$ 、后向半球散射  $k_b$ 、透过率  $T_r(\theta)$  和发射率  $e_{veg}(\theta)$  等数据。结合式 (4) 和式 (5) 即可得到不同观测角度下 LAI 与  $k_d$ 、 $\omega$  和  $\tau$  相对应的数据集。

表 2 高阶微波辐射模型模型输入参数

Table 2 Input parameters of matrix-doubling model (MDM)

参数 Parameter	值 Value
观测角度 View angle / (°)	5°~85° (间隔 5°)
频率 Frequency / GHz	6.6
LAI	0.1~6.0 (间隔 0.1)
叶片半径 Leaf disc radius/cm	1.3
叶片厚度 Leaf disc thickness/cm	0.022
叶片含水率 Leaf moisture content %	82
玉米秆含水率 Maize stalk moisture %	78
玉米秆直径 Maize stalk diameter /cm	-0.19 LAI <sup>2</sup> + 1.22 LAI + 0.51
玉米秆长度 Maize stalk length /cm	4.45 LAI <sup>2</sup> + 10.27 LAI + 15.96

基于对模拟数据的分析发现，无论是 V 极化还是 H 极化， $\omega$  参数随着冠层 LAI 的增大而递减，同时该参数受入射角度影响不可忽略，随着入射角度的增加  $\omega$  参数先变小再变大，并且入射角度对  $\omega$  参数影响程度随着冠层 LAI 的增加而逐渐减弱；冠层  $\tau$  参数与冠层 LAI 呈现较好的线性关系且与入射角度无关；冠层前向半球散射  $k_d$  随着冠层透过率和反照率的增大先增大后减小。经回归分析， $\omega$  和  $\tau$  参数经验模型可用式 (8) 和式 (9) 表示：

$$\omega_p(\theta) = \frac{a_p \cdot \cos(\theta)^2 + b_p \cdot \cos(\theta) + c_p}{LAI + d_p} \quad (8)$$

$$\tau_p = f_p \cdot LAI \quad (9)$$

式中  $a_p$ 、 $b_p$ 、 $c_p$ 、 $d_p$ 、 $f_p$  均为待定系数。

同理，冠层前向半球散射  $k_d$  可用如式 (8) 所示的  $\omega$  和  $\tau$  的函数表示。

$$k_{dP}(\theta) = \frac{h_p \cdot e^{-\tau_p/\cos(\theta)} \cdot \omega_p(\theta) \cdot (1 - e^{-\tau_p/\cos(\theta)}) + j_p}{e^{-\tau_p/\cos(\theta)} + m_p} \quad (10)$$

式中  $h_p$ 、 $y_p$ 、 $m_p$  均为待定系数。

表 3 列出了模型系数，与 MDM 模拟数据得到的  $\omega$  值（式 (8)）相比较，经验模型对 V 极化和 H 极化的  $\omega$  预测精度均方根误差（root mean square error, RMSE）分别为 0.002 3 和 0.001 7， $R^2$  均大于 0.99；对  $\tau$  预测精度 RMSE 分别为 0.013 0（V 极化）和 0.026 0（H 极化）， $R^2$  均大于 0.99。对  $k_d$  预测精度 RMSE 分别为 0.002 1（V 极化）和 0.003 0（H 极化）， $R^2$  分别为 0.97（V 极化）和 0.95（H 极化）。

表 3 不同极化方式模型系数  $a_p \sim m_p$

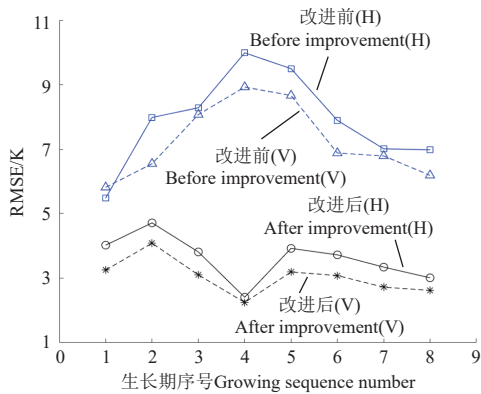
Table 3 Model coefficients for different polarization model (PM)

PM	$a_p$	$b_p$	$c_p$	$d_p$	$f_p$	$h_p$	$j_p$	$m_p$
V	0.204	-0.120	0.763	2.457	0.324	0.666	0.143E-2	0.868E-1
H	0.491	-0.294	0.701	2.738	0.365	0.624	0.126E-2	0.813E-1

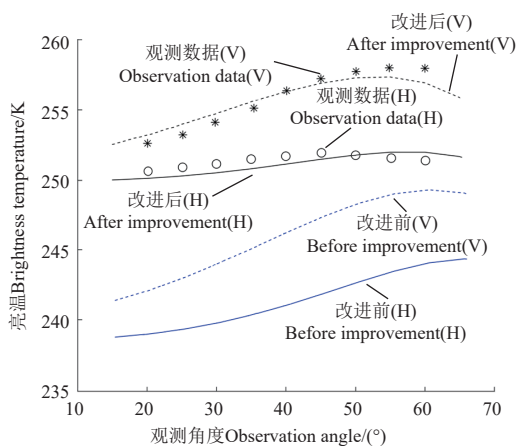
### 2.3 结果与分析

基于本文提出的  $\omega$  和  $\tau$  参数化模型（式 (8) 和式 (9)），首先，由样地实测 LAI 参数计算得到冠层  $\omega$  和  $\tau$  参数，再利用改进前、后  $\tau-\omega$  模型进行样地各观测角度下的微波辐射亮温的模拟。图 5a 为改进前（式 (1)）和改进后  $\tau-\omega$  模型（式 (6)）对各生长期样地的微波辐射亮温模拟值与亮温实测值的 RMSE 变化，模型改进前玉米冠层模拟数据与实测值的 RMSE，V 极化 7.27 K，H 极化 7.92 K，模型改进后各生长期 V 极化 RMSE 为 3.02 K，H 极化为 3.94 K，结果表明改进后的  $\tau-\omega$  模型以及模型的参数化方法的合理性。在各个生长期，V 极化辐射亮温模拟误差略低于 H 极化，这主要是因为土壤粗糙度对 V 极化影响要弱于对 H 极化的影响。模型改进前，辐射亮温模拟误差从第 1 次到第 4 次呈现逐渐上升的趋势，是因为随着冠层的生长，冠层对土壤辐射的散射作用强于对土壤辐射的吸收作用，而改进前的模型忽略了冠层与土壤层间的体散射项，导致随着冠层散射作用的增强，模拟值误差变大。模型改进前和模型改进后的辐射亮温模拟误差从第 5 次到第 8 次，模拟误差均呈现逐渐下降

的趋势,其原因在于两个方面,其一,模型参数的参数化方法是把植被冠层等效为随机分布的散射介质层为前提条件的,随着玉米冠层逐渐变浓密,冠层趋向均一性;其二,随着冠层的生长,冠层对土壤微波辐射的衰减作用超过对土壤微波辐射的散射作用,土壤的微波辐射对观测亮温的贡献逐渐变小,从而也减弱了土壤粗糙度对模拟结果的影响。



a. 各生长期平均模拟精度  
a. Average simulation accuracy of each growing stage



b. 不同角度下的模拟精度(第4次)  
b. Simulation accuracy at different angles (No. 4)

图5 模型改进前后的亮温模拟结果对比

Fig.5 Comparison of brightness temperature simulation results before and after model improvement

如图5b展示了模型改进前、后场景辐射亮温模拟值与亮温观测值随角度的变化,以第4次测定结果为例。由LAI计算得到的冠层 $\omega$ 和 $\tau$ 参数直接用于改进后的 $\tau-\omega$ 模型,模型模拟亮温与实测亮温保持较好的一致性,V极化RMSE=2.25 K,H极化RMSE=2.41 K;而改进前 $\tau-\omega$ 模型模拟的V极化和H极化亮温比观测亮温平均低近10 K,造成该差异的原因主要是改进前 $\tau-\omega$ 模型本身没有考虑冠层的体散射效应,即改进前 $\tau-\omega$ 模型缺少了土壤上行辐射被冠层散射至观测向的部分,这说明了改进前 $\tau-\omega$ 模型无法使用由LAI计算的冠层 $\omega$ 参数,只能用经验的等效 $\omega$ 值来补偿冠层的体散射项。随观测角度的减小模拟亮温误差变大,这是因为随着观测角度的增大,冠层的观测路径长度变大,导致土壤上行辐射被冠层散射至观测向的部分减小。改进后的 $\tau-\omega$ 模型对玉米

样地C波段V极化和H极化微波辐射亮温的模拟误差RMSE均小于3 K,由此可推测模型模拟误差导致的土壤水分反演误差可降低到1.5%以下,这极大提升了模型在土壤水分提取上的潜力。目前由于缺少相应数据,改进后模型在土壤水分反演中的实际应用效果还有待进一步验证。

### 3 结论

在基于被动微波遥感技术的植被覆盖区土壤水分信息提取中,植被层对微波辐射信号的散射及吸收导致微波辐射亮温对土壤水分敏感性下降,影响了土壤水分的提取精度。随着微波频率的升高,植被冠层对微波辐射的散射作用增强,使TAU-OMEGA( $\tau-\omega$ )模型在C波段的应用受到限制。为了解决模型在C波段适用性差及模型参数无法定量计算的问题,本文以玉米冠层为例,在 $\tau-\omega$ 模型的基础上,通过增加反映冠层多次散射作用的辐射添加项对 $\tau-\omega$ 模型进行了改进并基于冠层叶面积指数对模型参数进行了参数化,结果表明:

1) 植被层对微波体散射作用通过非观测向的土壤辐射到达植被层后被植被层散射到观测方向的辐射添加项来近似,使改进后的 $\tau-\omega$ 模型可适用于C波段被动微波遥感。

2) 以玉米冠层为例,基于高阶微波辐射模型模拟数据库实现了冠层 $\omega$ 和 $\tau$ 的参数化并直接应用于改进的 $\tau-\omega$ 模型,改进后的 $\tau-\omega$ 模型对6.6 GHz地表亮温模拟值与实测数据保持了较好的一致性,模拟误差较改进前有了较大的下降,V极化均方根误差为3.02 K,H极化均方根误差为3.94 K,表明模型的改进与参数化方案的合理性。

本研究对 $\tau-\omega$ 模型的改进考虑了冠层对土壤辐射的体散射作用,使模型在C波段的适用性问题得到解决。模型改进中,未考虑植被层与土壤层两者间的多次散射,随着微波频率的进一步升高,植被层与土壤层间的多次散射会变强,因此模型在C以上的高频波段的表现还需开展试验进一步验证。

#### [参考文献]

- [1] 徐岩,吕猛,桂晶晶,等.经典BRUTSAERT模型应用于土壤水分检测的适用性探讨[J].农业工程学报,2023,39(21):54-65  
XU Yan, LYU Meng, GUI Jingjing, et al. Applicability of BRUTSAERT's model in soil moisture detection[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(21): 54-65. (in Chinese with English abstract)
- [2] 杨锡震,陈俊英,张秋雨,等.基于小波特征和冬小麦生理参数的土壤水分高光谱模型优化[J].农业工程学报,2023,39(10):66-75  
YANG Xizhen, CHEN Junying, ZHANG Qiuyu, et al. Optimization of the soil moisture model based on hyperspectral

- inversion by integrating wavelet features and growth parameters of winter wheat[J]. [Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering \(Transactions of the CSAE\)](#), 2023, 39(10): 66-75. (in Chinese with English abstract)
- [3] 郭交, 刘健, 宁纪锋, 等. 基于 Sentinel 多源数据的农田地表土壤水分反演模型构建与验证[J]. [农业工程学报](#), 2019, 35(14): 71-78  
GUO Jiao, LIU Jian, NING Jifeng, et al. Construction and validation of soil moisture retrieval model in farmland based on Sentinel multi-source data[J]. [Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering \(Transactions of the CSAE\)](#). 2019, 35(14): 71-78. (in Chinese with English abstract)
- [4] 郑曼迪, 刘忠, 许昭辉, 等. 基于微波遥感的土壤水分反演估算研究进展[J]. [土壤学报](#), 2024, 61(1): 16-28  
ZHENG Mandi, LIU Zhong, XU Zhaohui, et al. Research progress of soil moisture estimation based on microwave remote sensing[J]. [Acta Pedologica Sinica](#), 2024, 61(1): 16-28. (in Chinese with English abstract)
- [5] 马红章, 张临晶, 孙林, 等. 光学与微波数据协同反演农田区土壤水分[J]. [遥感学报](#), 2014, 18(3): 673-685  
MA Hongzhang, ZHANG Lingjing, SUN Lin, et al. Farmland soil moisture inversion by synergizing optical and microwave remote sensing data[J]. [Journal of Remote Sensing](#), 2014, 18(3): 673-685. (in Chinese with English abstract)
- [6] LAWRENCE H, DEMONTOUX F, WIGNERON J P. Evaluation of a numerical modeling approach based on the finite-element method for calculating the rough surface scattering and emission of a soil layer[J]. [IEEE Geosci. Remote Sensing Letter](#), 2011, 8(5): 953-957.
- [7] BRACAGLIA M, FERRAZZOLI P, GUERRIERO L. A fully polarimetric multiple scattering model for crops[J]. [Remote Sensing of Environment](#), 1995, 54(3): 170-179.
- [8] SHI J, CHEN K S, QIN L. A parameterized surface reflectivity model and estimation of bare-surface soil moisture with L-band radiometer[J]. [IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing](#), 2002, 40(12):2674-2686.
- [9] CHEN K S, WU T D, TSANG L. The emission of rough surfaces calculated by the integral equation method with a comparison to a three-dimensional moment method simulations[J]. [IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing](#), 2003, 41(1): 90-101.
- [10] 马腾, 韩玲, 刘全明. 考虑地表粗糙度改进水云模型反演西班牙农田地表土壤含水率[J]. [农业工程学报](#), 2019, 35(24): 129-135  
MA Teng, HAN Ling, LIU Quanming. Inversion of surface soil moisture content of Spanish farmland using modified water cloud model[J]. [Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering \(Transactions of the CSAE\)](#), 2019, 35(24): 129-135. (in Chinese with English abstract)
- [11] 蔡庆空, 李二俊, 陶亮亮, 等. PROSAIL 模型和水云模型耦合反演农田土壤水分[J]. [农业工程学报](#), 2018, 34(20): 117-123.  
CAI Qingkong, LI Erjun, TAO Liangliang, et al. Farmland soil moisture retrieval using PROSAIL and water cloud model[J]. [Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering \(Transactions of the CSAE\)](#), 2018, 34(20): 117-123. (in Chinese with English abstract)
- [12] KURUN M. Quantifying scattering albedo in microwave emission of vegetated terrain[J]. [Remote Sensing of Environment](#), 2013, 129(1): 66-74.
- [13] ULABY F T, EIRAYES M A. Microwave dielectric spectrum of vegetation, Part II: Dual-dispersion model[J]. [IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing](#), 1987, 25(5): 550-557.
- [14] FERRAZZOLI P, GUERRIERO L. Passive microwave remote sensing of forests: A model investigation[J]. [IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing](#), 1996, 34(2): 433-443.
- [15] 王井利, 高天娇, 李荣平, 等. 基于光学遥感和微波遥感的土壤水分反演模型研究[J]. [气象与环境学报](#), 2023, 39(1): 73-82  
WANG Jingli, GAO Tianjiao, LI Rongping, et al. Research on soil moisture retrieval model based on optical remote sensing and microwave remote sensing[J]. [Journal of Meteorology and Environment](#), 2023, 39(1): 73-82. (in Chinese with English abstract)
- [16] GUERRIERO L, FERRAZZOLI P, VITTUCCI C, et al. L-band passive and active signatures of vegetated soil: Simulations with a unified model[J]. [IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing](#), 2016, 9(6): 2520-2531.
- [17] WIGNERON J P. 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, 238-262.
- [18] KURUM M, LANG R H, O'NEILL P E, et al. A First-order radiative transfer model for microwave radiometry of forest canopies at L-band[J]. [IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing](#), 2011, 49(9): 3167-3179.
- [19] RAWAT K S, SINGH S K. Retrieval of surface roughness over cropped area using modified water cloud model (MWCM), OH model and SAR Data[J]. [Journal of the Indian Society of Remote Sensing](#), 2022, 4(50): 735-746.
- [20] MIADENOVA I E, JACKSON T J and NJOKU E. Remote monitoring of soil moisture using passive microwave-based techniques theoretical basis and overview of selected algorithms for AMSR-E[J]. [Remote Sensing of Environment](#), 2014, 114(11): 197-213.
- [21] ZHANG T, Comparison of three active microwave models of forest growing stock volume based on the idea of the water cloud model [J]. [Remote Sensing](#), 2023, 15(11): 238-262.
- [22] 赵天杰. 被动微波反演土壤水分的 L 波段新发展及未来展

- 望[J]. *地理科学进展*, 2018, 37(2): 198-213
- ZHAO Tiaojie. Recent advances of L-band application in the passive microwave remote sensing of soil moisture and its prospects[J]. *Progress in Geography*, 2018, 37(2): 198-213. (in Chinese with English abstract)
- [23] ULABY F T, SARABANDI K, MCDONALD K M, et al. Michigan microwave canopy scattering model[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1990, 11(7): 1223-53.
- [24] WANG S, WIGNERON J P, JIANG L M, Global-scale evaluation of roughness effects on C band AMSR-E observations[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(5):5734-5757.
- [25] PIEPMEIER J R. SMAP L-band microwave radiometer: Instrument design and first year on orbit[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(4): 1954-1966.
- [26] DOBSON M C, FAWWAZ T, MARTTI 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.

## Improvement and parameterization of the TAU-OMEGA radiation model

MA Hongzhang , MENG Qingtao , LIU Sumei

(College of Science, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

**Abstract:** Soil moisture information was of great significance for water resources management, agricultural production, and climate change. Passive microwave remote sensing had gradually become one of the most important technical means to obtain surface soil moisture. The TAU-OMEGA model had been successfully applied in global soil moisture inversion using L band passive microwave data but there would be some problems, such as the poor performance of the model and the uncertainty of the model parameter at C-band. Based on the analysis of the mechanism of microwave scattering by vegetation canopy, this study realized the quantitative calculation of multiple scattering effect of the model on canopy by adding the radiation addition term of unobserved radiation of soil scattered by vegetation layer to the observation direction, which greatly improved the simulation accuracy of the model in C-band and successfully solved the applicability problem of the model in C-band. Through theoretical deduction, the theoretical calculation formula of the important parameters of the model was obtained. Based on the simulation data set of the physical model, the quantitative calculation of the parameters of the model was realized by canopy leaf area index (LAI), so that the model parameters could be quantitatively calculated in large areas according to the LAI products obtained from satellite remote sensing data. In this study, a C-band (6.6 GHz) microwave radiometer was used to verify the simulation accuracy of the model before and after the improvement. The data included the observation results of 8 times from seedling stage to flowering stage of maize. The results showed that in the case of using the model parameters based on quantitative calculation of LAI, the microwave radiation brightness temperature of surface would be seriously underestimated by the model before the improvement, while the simulated value of surface microwave radiation brightness temperature of the improved model was in good agreement with the measured data. The simulation error of the model before improvement showed a trend of first increasing and then decreasing from seedling stage to flowering stage, because the body scattering term of canopy on soil radiation was ignored by the Before the improvement of the model, resulting in a larger error of simulation value with the enhancement of canopy scattering effect. With the further growth of the canopy, the attenuation effect of the canopy on the soil microwave radiation exceeded the scattering effect on the soil microwave radiation, and the contribution of the soil microwave radiation to the observed brightness temperature gradually decreased. The average RMSE of the model before improvement in eight growth stages of maize canopy was 7.27 K for V polarization and 7.92 K for H polarization. After the improvement, the average root mean square error (RMSE) of V polarization and H polarization were 3.02 K and 3.94 K respectively. It could be inferred that the soil moisture inversion error caused by the model simulation error could be reduced to less than 1.5%, which greatly improves the potential of the model in soil moisture extraction, according to the simulation errors of the improved model for the brightness temperature of microwave radiation in the C-band V polarization and H polarization of the corn plot. The results also showed that the model improvement and parameterization scheme proposed in this study are reasonable, and the research results laid a foundation for the large-scale soil moisture inversion by combining optical and passive microwave remote sensing data.

**Keywords:** soil moisture; remote sensing; TAU-OMEGA model; double matrix algorithm; body scattering