

引用格式: Wang Qi, Chai Linna, Zhao Shaojie, *et al.* Inversion of Winter Wheat Optical Depth based on Multi-angular Microwave Brightness Temperature[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2015, 30(3): 424-430. [王琦, 柴琳娜, 赵少杰, 等. 基于多角度微波辐射亮温数据反演冬小麦光学厚度[J]. 遥感技术与应用, 2015, 30(3): 424-430.] doi: 10.11873/j.issn.1004-0323.2015.3.0424

# 基于多角度微波辐射亮温数据反演冬小麦光学厚度

王琦<sup>1,2,3</sup>, 柴琳娜<sup>1,2,3</sup>, 赵少杰<sup>1,2,3</sup>, 张涛<sup>1,2,3</sup>

(1. 北京师范大学遥感科学国家重点实验室, 北京 100875;  
2. 北京师范大学遥感与地理信息系统研究中心, 北京 100875;  
3. 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京 100875)

摘要: 基于高级积分方程模型(Advanced Integrated Emission Model, AIEM), 构建了包含宽范围土壤参数的C波段(6.925 GHz)多角度裸露土壤发射率模拟数据库, 利用该模拟数据分析了不同观测角度的裸露土壤发射率极化差之间的关系。在此基础上, 结合 $\omega-\tau$ 零阶辐射传输模型发展了C波段低矮植被光学厚度反演算法, 并利用地基微波辐射计观测数据开展了冬小麦的光学厚度反演。结果显示, 冬小麦光学厚度反演结果与实测冬小麦 LAI 在变化趋势上具有较好的一致性, 反演算法具有一定的可行性。

关键词: 被动微波遥感; 光学厚度; 多角度亮温; AIEM 模型; 冬小麦

中图分类号: TP 722.6 文献标志码: A 文章编号: 1004-0323(2015)03-0424-07

## 1 引言

作为地表的主要覆盖类型之一, 植被在维持人类生产生活、调节气候以及保持生态系统平衡中发挥着重要作用。其中, 植被光学厚度是反映植被生长状态、反演土壤水分的关键参数。由于植被光学厚度对植被的生长变化敏感且呈现正相关, 在实际应用中常用植被光学厚度的变化趋势来反映植被的生长状况, 因此, 发展一种可行性较高的植被光学厚度反演算法, 对于农情监测、植被生物量估算和土壤水分反演等具有重要的现实意义。遥感作为一种综合、宏观、快速、实时的观测手段, 是监测地表参数的有效工具之一。利用遥感手段实现对区域以及全球尺度地表参数的实时估算具有重要的现实意义。

在早期的研究中, Jackson 等<sup>[1]</sup>提出的植被含水量与植被光学厚度之间的线性关系(式(1))已被广泛应用于利用光学遥感技术反演低矮植被光学厚度

的研究中。

$$\tau = b \cdot W \quad (1)$$

其中:  $\tau$  为植被光学厚度,  $W$  为植被含水量, 参数  $b$  是一个常量, 它的取值取决于植被的类型和观测频率。例如, Wigneron 等<sup>[2]</sup>通过构建叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)与植被含水量之间的经验关系, 结合式(1)实现了由叶面积指数 LAI 对植被光学厚度的反演。Jackson 等<sup>[3]</sup>通过构建归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)与植被含水量之间的经验关系, 结合式(1)也实现了由 NDVI 对植被光学厚度的反演。但由于光学遥感数据只能反映植被冠层的信息, 且数据受云雾的影响较大, 想要获取连续的光学遥感数据比较困难, 而被动微波遥感以其全天时全天候的工作特点和对地表的穿透能力, 在大尺度地面参数监测方面得到了深入研究和广泛应用<sup>[4-5]</sup>。

在以往关于植被光学厚度遥感反演的研究中,

收稿日期: 2014-01-05; 修订日期: 2015-03-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171259), 国家重点基础研究发展计划(2013CB733406)。

作者简介: 王琦(1990-), 男, 江苏盐城人, 硕士研究生, 主要从事被动微波遥感植被方面的研究。E-mail: wangqi7096@163.com。

通讯作者: 柴琳娜(1980-), 女, 湖北荆门人, 博士, 讲师, 主要从事被动微波遥感理论和应用研究。E-mail: chai@bnu.edu.cn。

多是围绕在轨传感器 AMSR-E 的波段设置开展的。Owe 等<sup>[6]</sup>利用 Becker 和 Choudhury<sup>[7]</sup>提出的微波极化差异指数 MPDI (Microwave Polarization Difference Index), 结合微波辐射传输方程, 采用 C 波段亮温数据反演了植被光学厚度和土壤水分。李震等<sup>[8]</sup>利用改进的 MPDI 与植被光学厚度之间的关系, 基于 AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer on EOS) 的亮温数据针对中国区反演了植被光学厚度和土壤水分。但由于 MPDI 自身受到土壤发射率变化的影响, 所以基于 MPDI 反演的植被光学厚度很大程度上也受到了土壤信号的影响。AMSR-E<sup>[9]</sup>官方通过迭代算法, 基于 AMSR-E 传感器的亮温数据生成了植被光学厚度产品, 但该植被光学厚度产品是土壤水分反演的附属产品, 在提高土壤水分产品精度的同时牺牲了植被光学厚度产品的精度, 因此极大地限制了该植被光学厚度产品在大尺度植被监测中的应用。近年来, 赵天杰等<sup>[10]</sup>利用施建成等<sup>[11]</sup>提出的多频率微波植被指数 (Microwave Vegetation Indices, MVIs), 基于 AMSR-E 多频率亮温数据反演了植被光学厚度。由于 MVIs 不受土壤信号的影响, 因此该植被光学厚度反演算法从很大程度上弥补了前人工作的不足。

2009 年, 欧空局成功发射了 L 波段多角度被动微波传感器 SMOS (Soil Moisture Ocean Salinity mission), 为面向土壤水分和海洋盐度研究提供了大量的 L 波段多角度地表微波辐射亮温数据。目前, 在针对 SMOS 传感器的植被参数遥感研究中, 张宁等<sup>[12]</sup>结合施建成等<sup>[11]</sup>提出的多频率微波植被指数 MVIs, 发展了多角度微波植被指数, 并基于 SMOS L 波段多角度亮温数据反演了植被光学厚度。SMOS 官方也为用户提供了植被光学厚度产品, 但显然, SMOS 传感器提供的多角度信息在植被参数的遥感反演中还未得到广泛深入的应用, 基于多角度遥感信息的植被参数反演方法也有待丰富与提高。

本文利用模型模拟的方法, 发展了基于多角度亮温的 C 波段不受土壤发射信号影响的低矮植被光学厚度反演算法。该算法基于高级积分方程模型 (Advanced Integrated Emission Model, AIEM)<sup>[13]</sup>, 构建包含宽范围土壤参数的 C 波段 (6.925 GHz) 多角度裸露土壤发射率模拟数据库, 利用该模拟数据分析了不同观测角度的裸露土壤发射率极化差之间的关系, 并结合  $\omega-\tau$  零阶辐射传输模型发展得到。文中利用新发展的低矮植被光学厚度反演算法以及 C 波段地基微波辐射计观测数据开展了冬小麦的光

学厚度反演。同时, 配套同步测量的冬小麦叶面积指数 LAI 被用于对光学厚度的反演结果进行对比分析 (图 1)。结果显示, 冬小麦光学厚度反演结果与实测冬小麦 LAI 在变化趋势上具有较好的一致性, 反演算法具有一定的可行性。本文研究成果为 SMOS 多角度遥感数据在低矮植被光学厚度反演中的应用提供了参考方法。

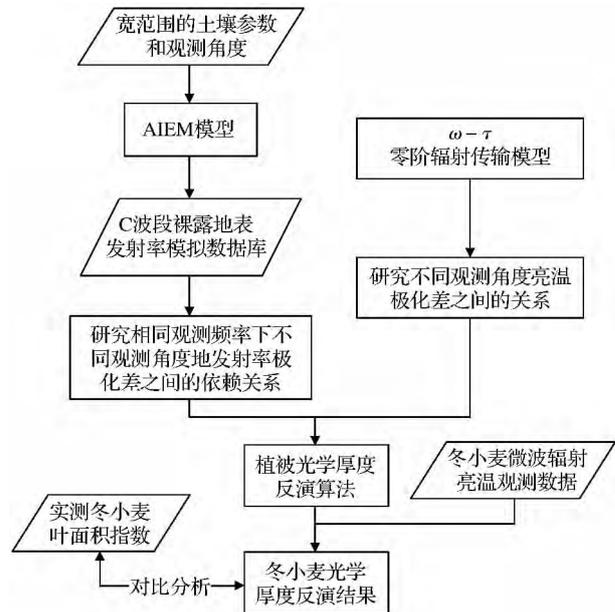


图 1 冬小麦光学厚度反演技术路线

Fig. 1 The route of inversion of winter wheat optical depth

## 2 模型与方法

### 2.1 不同观测角度下裸露土壤发射率极化差之间的关系

为了消除土壤发射率对植被信号的影响, 本文对 C 波段不同观测角度的裸露土壤发射率极化差之间的依赖关系进行了研究。首先, 基于高级积分方程模型 (Advanced Integrated Emission Model, AIEM)<sup>[13]</sup> 模拟了 C 波段  $1\sim 60^\circ$  观测角度下, 包括各种土壤含水量和地表粗糙度的裸露土壤发射率模拟数据库, 输入参数如表 1 所示。

表 1 裸露土壤发射率模拟数据库参数变化范围  
Table 1 Parameter ranges of the simulation database of bare soil emissivity

输入参数	最小值	最大值	步长
观测角度/ $^\circ$	1	60	1
体积含水量/%	2	44	2
均方根高度/cm	0.25	3	0.25
相关长度/cm	2.5	30	2.5
总数据量: $60 \times 22 \times 12 \times 12 = 190\ 080$			

通过对模拟数据的研究发现,C波段不同观测角度的裸露土壤发射率极化差之间存在良好的线性关系(式(2)),且角度相差越小(约 $15^\circ$ 以内)不同观测角度的裸露土壤发射率极化差之间的相关性越好(图2)。

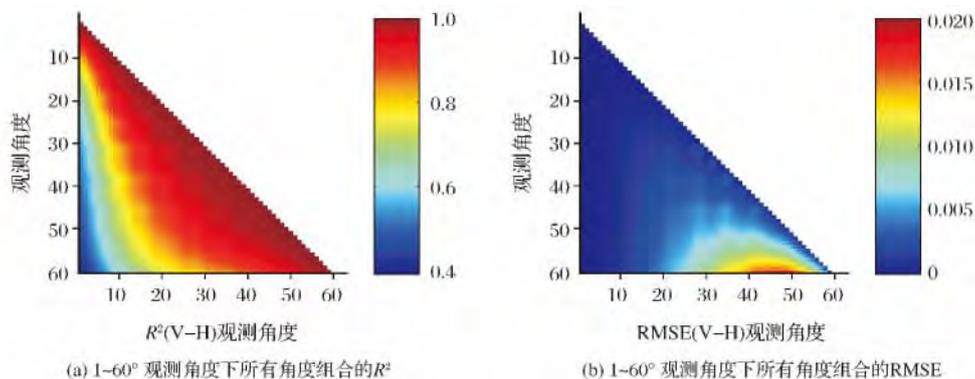


图2 裸露土壤发射率极化差在不同观测角度之间的相关性( $R^2$ )和均方根误差(RMSE)

Fig.2 The correlation( $R^2$ ) and root mean square error (RMSE) of the bare soil emissivity polarization differences between observation angles

## 2.2 模型及算法构建

本研究采用 $\omega - \tau$ 零阶辐射传输模型反演植被光学厚度。 $\omega - \tau$ 零阶辐射传输模型是辐射传输方程的零阶解,并且没有考虑植被层内的一次及多次散射,因此该模型被广泛应用于对低频微波辐射信号的描述。当不考虑植被覆盖度和大气影响的情况时,在某观测频率 $f$ 和观测角度 $\theta$ 下,辐射计测量到的亮温可以表示为:

$$Tb_p(f, \theta) = \epsilon_p^v(f, \theta) \cdot T_v + \epsilon_p^s(f, \theta) \cdot L_p \cdot (1 - \epsilon_p^s(f, \theta)) \cdot T_v + \epsilon_p^s(f, \theta) \cdot L_p \cdot T_s \quad (3)$$

式(3)中第一项代表植被层自身向上的辐射亮温,第二项为植被层向下经地表反射又被植被层衰减后的辐射亮温,第三项代表地表辐射亮温被植被层衰减后的信号。其中, $f$ 为观测频率, $\theta$ 为观测角度, $Tb_p$ 为亮度温度,下标 $p$ 代表极化方式(V/H), $\epsilon_p^s$ 为地表发射率, $\epsilon_p^v$ 为植被层的发射率,并且 $\epsilon_p^v = (1 - \omega_p)(1 - L_p)$ , $L_p = \exp(-\tau_p/\cos\theta)$ 为植被层的透过率, $T_v$ 和 $T_s$ 分别为植被和地表的物理温度。重新整理式(3)后,可以将其表示为地表发射率的线性函数:

$$Tb_p(f, \theta) = [\epsilon_p^v(f, \theta) \cdot (1 + L_p) \cdot T_v] + [L_p \cdot (T_s - \epsilon_p^s(f, \theta) \cdot T_v)] \cdot \epsilon_p^s(f, \theta) \quad (4)$$

在研究中做了如下假设:①假设植被层随机均匀分布,植被信号不存在极化差异,即 $\omega_v = \omega_H = \omega$ , $\tau_v = \tau_H = \tau$ , $L_v = L_H = L$ , $\epsilon_v^v = \epsilon_H^v = \epsilon^v$ 。这一假设已被广泛用于利用被动微波遥感技术反演土壤水分和植被参数的研究中(Owe等<sup>[6]</sup>;Paloscia等<sup>[14]</sup>;

$$\epsilon_v^s(\theta_2) - \epsilon_H^s(\theta_2) = p(\theta_1, \theta_2) \cdot [\epsilon_v^s(\theta_1) - \epsilon_H^s(\theta_1)] \quad (2)$$

其中: $\epsilon_p^s$ 为裸露土壤发射率,下标 $p$ 代表极化方式(H/V), $\theta_1, \theta_2$ 为不同的观测角度, $p(\theta_1, \theta_2)$ 为系数,可以通过对不同观测角度的裸露土壤发射率极化差进行线性回归得到。

Njoku等<sup>[15]</sup>;van de Griend等<sup>[16]</sup>)。②认为低矮植被的植被温度与地表温度近似相等,即 $T_v = T_s = T_e$ (Zhao等<sup>[10]</sup>;Shi等<sup>[11]</sup>;Jackson等<sup>[17]</sup>)。③对于C波段(6.925 GHz)而言,认为低矮植被的单散射反照率 $\omega \approx 0$ (Zhao等<sup>[10]</sup>;Jackson等<sup>[17]</sup>)。

综上,式(4)可改写为:

$$Tb_p(\theta) = [(1 - L^2(\theta)) \cdot T_e] + [L^2(\theta) \cdot T_e] \cdot \epsilon_p^s(\theta) \quad (5)$$

假设植被信号不存在极化差异,因此,依据式(5),某一观测角度下辐射计观测到的亮温极化差为:

$$Tb_v(\theta) - Tb_H(\theta) = L^2(\theta) \cdot T_e \cdot (\epsilon_v^s(\theta) - \epsilon_H^s(\theta)) \quad (6)$$

则不同观测角度下辐射计观测亮温的极化差异比值为:

$$\frac{Tb_v(\theta_2) - Tb_H(\theta_2)}{Tb_v(\theta_1) - Tb_H(\theta_1)} = \frac{e^{-2\tau/\cos\theta_2}}{e^{-2\tau/\cos\theta_1}} \cdot \frac{\epsilon_v^s(\theta_2) - \epsilon_H^s(\theta_2)}{\epsilon_v^s(\theta_1) - \epsilon_H^s(\theta_1)} \quad (7)$$

整理式(7)可得基于多角度亮温的低矮植被光学厚度反演算法如式(8):

$$\tau = \frac{1}{2} \cdot \ln \left[ p(\theta_1, \theta_2) \cdot \frac{Tb_v(\theta_1) - Tb_H(\theta_1)}{Tb_v(\theta_2) - Tb_H(\theta_2)} \right] \cdot \frac{\cos\theta_1 \cdot \cos\theta_2}{\cos\theta_1 - \cos\theta_2} \quad (8)$$

## 3 实验

为了对本研究发展的植被光学厚度反演算法进行可行性分析与验证,2013年5~6月,利用北京师范大学遥感科学国家重点实验室购置的车载多频率

微波辐射计 TMMR (Truck-mounted Multi-frequency Microwave Radiometer)<sup>[18]</sup>在河北省保定市清苑县附近的农田中(38°42′13″N, 115°23′17″E)对处于灌浆期的冬小麦开展了多波段多角度微波辐射亮温观测实验,获取了长时间序列的冬小麦亮温观测数据,并建立了实验配套参数测量数据集。

用于此次观测实验的车载多频率微波辐射计 TMMR 由德国 RPG(Radiometer Physics GmbH)公司研制,于 2007 年投入使用,具备多频率双极化多角度的观测能力。辐射计的 4 个中心频率分别为 6.925、10.65、18.7、36.5 GHz,各个频率对应的半功率波束宽度分别为 6.85°、6.11°、10.25°、10.25°。该辐射计通过可升降的液压平台装载在卡车上,灵活性较好,经过液氮校准 TMMR 的测量精度达到 1 K 以内,能够保证数据的观测质量,为研究提供了可靠的地面实测数据,已被广泛应用于微波遥感研究中。

实验中可能存在的观测误差来自于两部分,天空背景的辐射和辐射计车体的影响。天空辐射经过地表反射会进入辐射计,从而影响辐射计的观测信号。因此在每次实验前,首先利用辐射计对天空进行多角度观测,得到天空各个角度的微波辐射亮温值,从而利用该天空扫描数据对地面实验数据进行大气校正;另一方面,辐射计观测平台的辐射可能会对亮温产生影响,经过实验前对辐射计的定标测量,认为辐射计观测平台的辐射对观测的影响很小,在测量误差允许范围内。

此次地面观测实验在一块 30 m×40 m 的冬小麦样地上共进行了连续 30 d 的观测。由于冬小麦样地存在明显的行垄结构,为了消除行垄结构对测量数据的影响,观测实验对不同方位角的多个视场进行了观测,最后取平均值作为该冬小麦样地的观测值。车载多频率微波辐射计在对冬小麦样地进行观测的过程中采用平行于垄和垂直于垄两种观测方位。当车载多频率微波辐射计垂直于垄观测时,方位角设定为 210°~330°(辐射计以车头方向为 0°,顺时针旋转),步长为 10°,扫描角设定为 20°~60°,步长为 1°。当车载多频率微波辐射计平行于垄观测时,方位角设定为 230°~310°(辐射计以车头方向为 0°,顺时针旋转),步长为 10°,扫描角设定为 20°~60°,步长为 1°。车载多频率微波辐射计在对冬小麦样地进行观测的过程中天线始终升高至距地面高度 6.5 m。

在辐射计观测的同时,在辐射计观测视场外选取了一块冬小麦长势与辐射计观测视场内接近的区域,在该区域开展了地面配套参数的同步测量。在

地面配套参数的同步测量中,采用 JM624u 铂电阻温度计测量了表层 0~1 cm 土壤的温度,利用环刀取土法获取了观测区域表层 0~5 cm 的土壤样品,采用烘干法测量了土壤样品以及冬小麦样品的含水量,另外,采用 LAI2000 同步实测了观测区域冬小麦的 LAI。在进行冬小麦 LAI 测量前对 LAI2000 进行了天空校准,在测量冬小麦 LAI 的过程中,采用“Z”字形路线(图 3)在冬小麦冠层以下多个位置进行测量,并采用多次测量求平均的方式得到当天冬小麦的 LAI 参数。

本研究主要应用冬小麦灌浆期间 C 波段双角度双极化微波辐射亮温观测数据,以及配套参数数据集中冬小麦 LAI 测量数据和冬小麦含水量测量数据(表 2)。观测场景如图 3 所示。

表 2 冬小麦样地配套参数表

Table 2 Sampling plot supporting parameters of winter wheat

日期	冬小麦		日期	冬小麦	
	LAI	含水量 /kg·m <sup>-2</sup>		LAI	含水量 /kg·m <sup>-2</sup>
2013.5.19	3.43	1.55	2013.5.29	4.31	3.24
2013.5.20	3.54	2.07	2013.5.30	5.00	3.55
2013.5.21	4.23	2.81	2013.5.31	4.27	3.61
2013.5.22	4.39	3.76	2013.6.1	4.42	3.38
2013.5.23	4.26	2.57	2013.6.2	4.06	3.71
2013.5.24	3.63	3.00	2013.6.3	4.64	3.60
2013.5.25	4.03	2.72	2013.6.4	5.07	4.00
2013.5.26	—	—	2013.6.5	4.86	3.12
2013.5.27	4.64	3.88	2013.6.6	4.40	3.79
2013.5.28	—	—			



(图中灰色框内分别为亮温观测区、LAI 测量区、植被及土壤样品采样区,LAI 测量区中的黑线为 LAI 测量路线示意)

图 3 辐射计及观测场景示意

Fig. 3 TMMR and observation scene

## 4 结果与讨论

由 2.2 节中的式(8)可知,理论上只要获取了某一频率下两个不同观测角度的双极化亮温数据以及

对应的系数  $p(\theta_1, \theta_2)$ , 就可以实现对植被光学厚度的反演。在本文 2.1 节中通过对地表发射率模拟数据的研究表明, C 波段不同观测角度的裸露土壤发射率极化差之间存在良好的线性关系, 且角度相差越小(约  $15^\circ$  以内)不同观测角度的裸露土壤发射率极化差之间的相关性越好(图 2)。因此, 结合实验观测过程中的实际情况, 基于 2.1 节中的土壤发射率模拟数据库, 对观测角度为  $30^\circ$  和  $40^\circ$  时, 土壤发射率极化差之间的线性关系进行了研究, 结果表明, 观测角度为  $30^\circ$  和  $40^\circ$  时, 土壤发射率极化差之间存在较好的线性关系 ( $R^2 = 0.9876$ ), 如图 4 所示。

综上, 本文采用 C 波段 6.925 GHz 频率下观测角为  $30^\circ$  和  $40^\circ$  的双极化冬小麦样地微波辐射亮温观测数据, 结合 2.2 节中的式(8)计算了冬小麦样地

的植被光学厚度, 其中,  $p(40^\circ, 30^\circ) = 0.51$ 。将计算得到的观测期间冬小麦光学厚度与观测期间实测的冬小麦 LAI 进行了对比分析, 结果如图 5 所示。

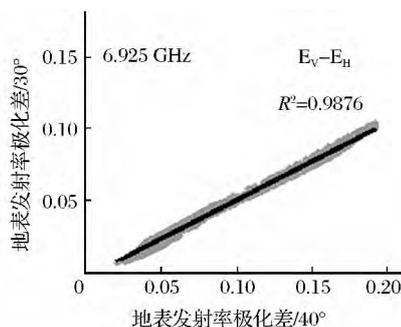
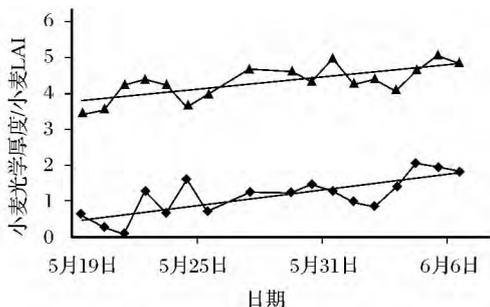
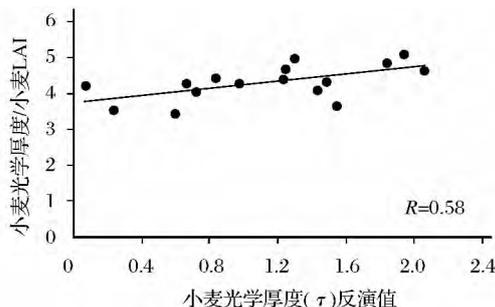


图 4 观测角为  $30^\circ$  和  $40^\circ$  时土壤发射率极化差之间关系  
Fig. 4 The relationship of bare soil emissivity polarization difference between observation angles of  $30^\circ$  and  $40^\circ$



(a) 冬小麦光学厚度变化趋势与冬小麦 LAI 变化趋势对比



(b) 冬小麦光学厚度与 LAI 之间的关系

—●— 小麦光学厚度  $\tau$  反演结果      —▲— 实测小麦 LAI

图 5 冬小麦光学厚度与冬小麦 LAI 对比分析图

Fig. 5 Image comparative analysis between the winter wheat optical depth and the winter wheat LAI

从图 5(a)中可以看出, 由实验数据反演出来的观测期间冬小麦光学厚度( $\tau$ )变化趋势与观测期间冬小麦 LAI 变化趋势、冬小麦生长趋势吻合较好, 具有较好的一致性, 且冬小麦光学厚度反演结果处于合理的变化范围内<sup>[6,8]</sup>。通过计算, 冬小麦光学厚度( $\tau$ )与冬小麦 LAI 的相关系数  $R = 0.58$ (图 5(b))。

观测期间冬小麦光学厚度( $\tau$ )变化趋势、冬小麦 LAI 变化趋势总体上都呈现波动上升的态势, 且变化趋势一致。随着冬小麦进入灌浆期, 其含水量、密度和叶片厚度都逐渐增加, 冬小麦光学厚度( $\tau$ )和叶面积指数(LAI)也逐渐增加。反演结果表明, 本文反演的冬小麦光学厚度能够较为真实地反映冬小麦的生长状况。这也表明, 基于本文发展的植被光学厚度反演算法结合双极化多角度被动微波遥感亮温数据在植被光学厚度反演以及植被长势监测上具有较好的可行性和较大的应用潜力。

从图 5 还可以看出, 冬小麦光学厚度变化趋势、冬小麦 LAI 变化趋势总体上除了呈现上升趋势外

均存在波动现象, 波动现象导致了图中个别点位的冬小麦光学厚度反演结果与冬小麦 LAI 测量值的变化趋势不同, 例如图中 5 月 20 日冬小麦 LAI 测量值接近 4 且呈现增长趋势而冬小麦光学厚度反演结果却接近于 0 且呈现下降趋势, 光学厚度存在被低估的可能。这一现象说明在反演冬小麦光学厚度的过程中存在误差, 导致冬小麦光学厚度反演结果在较小的范围内偏离“真值”, 同时也说明在实测冬小麦 LAI 的过程中存在一定误差。

分析误差产生原因如下: (1) 冬小麦光学厚度在反演过程中假设植被信号不存在极化差异, 即  $\epsilon_v^v = \epsilon_H^v = \epsilon^v$ 。尽管实验样区内的冬小麦长势均一, 冬小麦冠层基本满足随机均匀分布的假设, 但实验过程中辐射计 TMMR 实际获取到的冬小麦微波辐射特征与理想条件下的假设仍然存在一定的偏差。导致将辐射计观测到的冬小麦亮温数据应用于本文发展的冬小麦光学厚度反演算法时, 计算得到的冬小麦光学厚度会在较小的范围内偏离“真值”, 出现一定

程度上的“高估”或“低估”;(2)在用 LAI2000 实测冬小麦 LAI 的过程中,由于仪器自身的精度、采样调查的局限性以及冬小麦个体间存在差异等问题,给实测冬小麦 LAI 带来了误差,导致了冬小麦 LAI 实测数据在较小的范围内偏离“真值”;

(3)由于实验过程中冬小麦的微波辐射亮温与 LAI 并非在同一个观测视场内测量,虽然在实验中尽量保证 LAI 测量区域与冬小麦亮温观测区域样方一致,但在一定程度上仍引入了误差。

### 5 结 语

本文以宽范围的土壤参数和观测角度作为 AI-EM 高级积分方程模型的输入文件,构建了 C 波段多角度裸露土壤发射率模拟数据库。基于该模拟数据库,通过回归分析得到了 C 波段不同观测角度土壤发射率极化差之间的线性关系,并结合  $\omega-\tau$  零阶

辐射传输模型构建了低矮植被光学厚度反演算法。该反演算法的植被信号不受土壤发射信号的影响,仅取决于植被特性(如植被覆盖度、生物量、散射体大小特性和植被层的几何结构等)。在算法发展过程中所做的植被信号不存在极化差异的假设对冬小麦光学厚度反演的影响较小,冬小麦光学厚度反演结果与实测冬小麦 LAI 在趋势上具有较好的一致性。基于该算法利用双极化多角度被动微波遥感亮温数据在植被光学厚度反演以及植被长势监测上具有较好的可行性。

另外,将反演得到的观测期间冬小麦光学厚度与观测期间实测冬小麦含水量进行了对比分析,结果表明,由实验数据反演得到的观测期间冬小麦光学厚度( $\tau$ )与冬小麦实测含水量在趋势上也具有较好的一致性(图 6(a))。通过计算,冬小麦光学厚度( $\tau$ )与冬小麦实测含水量的相关系数  $R=0.67$ (图 6(b))。

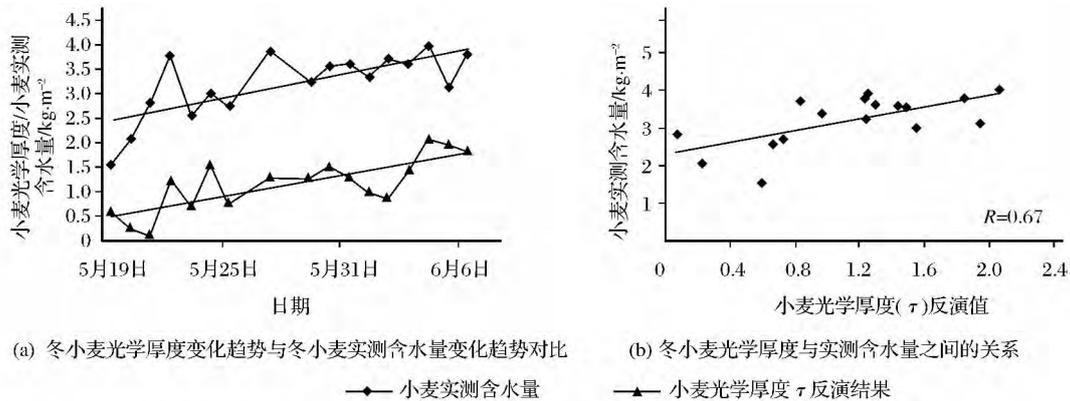


图 6 冬小麦光学厚度与冬小麦实测含水量对比分析图

Fig. 6 Image comparative analysis between the winter wheat optical depth and the measurement of winter wheat water content

由于冬小麦光学厚度( $\tau$ )与冬小麦含水量之间存在较好的相关性(图 6),同时,冬小麦光学厚度又能够较好地反映冬小麦长势。因此,在今后的工作中,将针对中国区域内典型的植被结构,结合成熟的植被辐射模型,构建不同植被类型条件下植被光学厚度与植被含水量之间的关系,针对不同植被类型实现由植被光学厚度对植被含水量的反演,从而为植被覆盖区域地表参数(包括土壤含水量、地表温度等)的反演提供可靠的输入参数。

致谢:感谢北京师范大学地理学与遥感科学学院的杨俊涛、王舒、寇晓康、刘军、陈西羽、叶勤玉和闫爽等同学对本次实验的大力支持!

参考文献 (References):

[1] Jackson T J, Schmugge T J. Vegetation Effects on the Micro-

wave Emission of Soils[J]. Remote Sensing of Environment, 1991, 36(3): 203-212.

[2] 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.

[3] Jackson T J, Vine D M Le, Starks P J, et al. Soil Moisture Mapping at Regional Scales Using Microwave Radiometry: The Southern Great Plains Hydrology Experiment[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(5): 2136-2151.

[4] Mao Kebiao, Tang Huajun, Zhou Qingbo, et al. A Survey of Soil Moisture Retrieval by Passive Microwave Remote Sensing[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2007, 22(3): 466-470. [毛克彪,唐华俊,周清波,等. 被动微波遥感土壤水分反演研究综述[J]. 遥感技术与应用, 2007, 22(3): 466-470.]

[5] Zhang Tingjun, Jin Rui, Gao Feng. Overview of the Satellite Remote Sensing of Frozen Ground: Visible-thermal Infrared and Radar Sensor [J]. Advances in Earth Science, 2009, 24

- (9):963-972. [张廷军,晋锐,高峰. 冻土遥感研究进展[J]. 地球科学进展,2009,24(9):963-972.]
- [6] Owe M, Jea R D E, Walker J. 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.
- [7] Becker F, Choudhury B J. Relative Sensitivity of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Microwave Polarization Difference Index (MPDI) for Vegetation and Desertification Monitoring[J]. Remote Sensing of Environment,1988,24(2):297-311.
- [8] Li Zhen, Wang Lei. Vegetation Optical Estimation from Microwave Radiometer Data[J]. Journal of Ezhou University,2006,13(3):3-7. [李震,王磊. 星载微波辐射计计算植被光学厚度研究[J]. 鄂州大学学报,2006,13(3):3-7.]
- [9] Njoku E G. AMSR Land Surface Parameters Algorithm Theoretical Basis Document (version 3.0) [M]. Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA, 1999.
- [10] Zhao T, Zhang L, Bindlish R, *et al.* Estimating Vegetation Water Content During a Growing Season of Cotton[C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2011:791-794.
- [11] Shi J, Jackson T J, Tao J, *et al.* Microwave Vegetation Indices for Short Vegetation Covers from Satellite Passive Microwave Sensor AMSR-E[J]. Remote Sensing of Environment,2008,112(12):4285-4300.
- [12] Zhang N, Shi J, Sun G, *et al.* A Simple Algorithm for Retrieval of the Optical Thickness at L-Band from SMOS Data[J]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium,2012:198-201.
- [13] Chen K, Wu T D, Tsang L, *et al.* Emission of Rough Surfaces Calculated by the Integral Equation Method with Comparison to Three-dimensional Moment Method Simulations[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2003,41(1):90-101.
- [14] Paloscia S, Macelloni G, Santi E. Soil Moisture Estimates from AMSR-E Brightness Temperatures by Using a Dual-Frequency Algorithm[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2006,44(11):3135-3144.
- [15] Njoku E G, Chan S K. Vegetation and Surface Roughness Effects on AMSR-E Land Observations[J]. Remote Sensing of Environment,2006,100(2):190-199.
- [16] Vandegriend A A, Wigneron J. On the Measurement of Microwave Vegetation Properties: Some Guidelines for a Protocol[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2004,42(10):2277-2289.
- [17] Jackson T J. Measuring Surface Soil Moisture Using Passive Microwave Remote Sensing [J]. Hydrological Processes,1993,7(2):139-152.
- [18] Zhao S, Zhang L, Zhang Z. Design and Test of a New Truck-Mounted Microwave Radiometer for Remote Sensing Research[J]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium,2008, II :1192-1195.
- [19] Chen Liang, Du Jinyang. DTM Extraction from ALS Data in Densely Vegetated Slopes Using Wavelet Algorithm [J]. Remote Sensing Information,2010,(1):13-16. [陈亮,杜今阳. L波段多角度微波植被指数研究[J]. 遥感信息,2010,(1):13-16.]
- [20] Chen L, Shi J, Wigneron J P, *et al.* A Parameterized Surface Emission Model at L-Band for Soil Moisture Retrieval[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Letters,2010,7(1):127-130.

## Inversion of Winter Wheat Optical Depth based on Multi-angular Microwave Brightness Temperature

Wang Qi<sup>1,2,3</sup>, Chai Linna<sup>1,2,3</sup>, Zhao Shaojie<sup>1,2,3</sup>, Zhang Tao<sup>1,2,3</sup>

- (1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;  
2. Research Center for Remote Sensing and GIS, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;  
3. School of Geography and Remote Sensing, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** Based on the Advanced Integrated Emission Model (AIEM) this study established simulation database of multi-angular bare soil emissivity at band-C which contains a wide range of soil parameters, and uses the simulation data to analyze the relationship of the bare soil emissivity polarization differences between observation angles. Therefore, this paper used  $\omega$ - $\tau$  model to develop an inversion method to estimate vegetation optical depth, and using the measured values obtained by ground based microwave radiometer to invert winter wheat optical depth. The analysis result shows that the trend of inversion value of winter wheat optical depth is consistent well with the trend of measured values of LAI of winter wheat, which proves that the inversion method is feasible.

**Key words:** Passive microwave remote sensing; Optical depth; Multi-angular brightness temperature; AIEM Model; Winter wheat