裸露地表微波热采样深度统计模型

赵少杰[1]，张涛[2]，蒋玲梅[3]，柴琳娜[1]

1. 地表过程与资源生态国家重点实验室 北京师范大学地理科学学部,北京 100875;
2. 自然资源部国土卫星遥感应用中心,北京 100048;
3. 遥感科学国家重点实验室 遥感与地理信息系统研究中心 北京师范大学地理科学学部,北京 100875

摘 要： 被动微波遥感反演土壤水分对应的土壤深度是土壤水分产品真实性检验和应用中必须确定的问题。本研究利用理论模型对影响土壤热采样深度的参数进行了分析。在此基础上，通过回归分析的方法发展了一个估算被动微波遥感土壤热采样深度的统计模型，并通过微波辐射测量实验对模型进行了验证。研究证明，理论模型模拟裸露地表发射率平均误差为0.032，基于理论模型发展的热采样深度统计模型的误差在0.5 cm左右。该统计模型可以通过土壤含水量、温度、质地和观测频率4个较容易获取的参数计算土壤微波辐射的热采样深度，为被动微波遥感土壤水分产品的真实性检验工作中地面土壤水分测量以及土壤水分遥感产品的应用提供参考。

关键词： 被动微波遥感，热采样深度，统计模型，土壤水分，真实性检验

引用格式： 赵少杰,张涛,蒋玲梅,柴琳娜.2020.裸露地表微波热采样深度统计模型.遥感学报,24(3): 290-301

Zhao S J, Zhang T, Jiang L M and Chai L N. 2020. A statistical model for estimating microwave thermal sampling depth of bare soil. Journal of Remote Sensing(Chinese), 24(3): 290-301[DOI:10.11834/jrs.20209237]

1 引 言

土壤水是全球水循环、能量循环的重要组成部分，是陆地与大气之间水热能量交换的关键参数之一（Brubaker和Entekhabi，1996）。高精度的土壤水分产品有助于理解陆地水循环过程，并在气候变化研究、水资源管理、水文模型发展、植被生长监测、洪涝和干旱监测等工作中发挥重要作用（Viterbo和Betts，1999；Fennessy和Shukla，1999；Dirmeyer等，2000）。近40年来，被动微波遥感广泛应用于土壤水分监测中，多个星载微波辐射计观测计划相继实施，为全球尺度的土壤水分监测提供了丰富的数据，同时也对土壤水分产品精度提出了要求。例如，AMSR-E（Advanced Microwave Scanning Radiometer for Earth Observing System）的土壤水分产品目标精度为0.06 cm^3/cm^3（Njoku等，2003），SMOS（Soil Moisture and Ocean Salinity）土壤水分产品的精度要求为0.04 cm^3/cm^3（Jackson等，2012）。因此，如何对被动微波遥感的土壤水分产品进行真实性检验，合理评价反演精度成为被动微波遥感研究中的重要课题（Jackson等，2010；Wang等，2019）。

微波具有穿透特性，微波辐射计接收的土壤微波辐射来自于地表以下一定深度内的土壤层。这个土壤层的厚度对于不同的观测频率和地表状况是不同的（Njoku等，2003）。目前，在验证被动微波遥感反演土壤水分的算法时，由于土壤水分传感器埋设的方式不同，并且受测量传感器感应土体大小的限制，有的采用的是土壤水分传感器水平放置于某经验深度（例如距地表5 cm）处测量的的土壤水分值（Lee和Anagnostou，2004；Jackson等，2010，2012；Gherboudj等，2012；Al Bitar等，2012）或有的采用的是土壤水分传感器垂直插入地表测量的地表至5 cm或6 cm深度的土壤水分的平均值（Njoku和Li，1999；Njoku等，2003；Bindlish等，2006；Panciera等，2008；Li等，2010；Mialon等，2012）。在实际应用中，若不考虑土壤水分、温度和土壤类型以及反演所采

收稿日期： 2019-07-08；**预印本：** 2019-10-29

基金项目： 国家自然科学基金(编号：41871228,41801287)

第一作者简介： 赵少杰,1984年生,男,工程师，研究方向为微波遥感反演土壤含水量及冻土遥感。E-mail：shaojie.zhao@bnu.edu.cn

通信作者简介： 张涛,1987年生,男,工程师,研究方向为被动微波遥感土壤水分反演。E-mail：zhangtao@mail.bnu.edu.cn

用的频率的差异，以固定深度处的土壤水分观测值验证遥感反演的结果，则可能给验证结果的分析带来误差。因此，获得与被动微波遥感反演的土壤水分相匹配的土壤水分实测值对土壤水分产品的真实性检验具有重要意义。

在主动微波遥感中，电磁波入射至土壤层，经土壤层散射的回波信号被传感器接收，常用“穿透深度”来表示电磁波对地表的穿透能力。在被动微波遥感中，采用“采样深度”是表示影响微波辐射计观测值的土壤层厚度的一种更有效的方法（Nedeltchev，1999）。Wilheit （1978）基于分层地表相干微波辐射模型的模拟提出了热采样深度（Thermal sampling depth）和反射率采样深度（Reflectivity sampling depth）的概念。热采样深度是指辐射计观测到的微波辐射绝大多数来自该深度以上的土壤；反射率采样深度是指与具有均一剖面的土壤层对比，根据不同的深度计算非均一剖面的土壤反射率，当二者相等时的土壤深度。这两种采样深度的定义和计算方法不同。研究发现，反射率采样深度主要受到土壤介电常数实部的影响，约为电磁波波长的1/10—1/7；热采样深度受土壤介电常数虚部的影响更明显，其值一般比反射率采样深度大。（Wilheit， 1978）。Nedeltchev （1999）通过分析实验数据发现热采样深度可以更客观的表征被动微波对土壤的有效穿透能力。Newton等 （1982）提出了等效土壤含水量的概念，定义了等效含水量采样深度，即地表至该深度处的平均土壤含水量与等效土壤含水量相等，其定义和计算方法本质上与热采样深度是相同的。在1.4 GHz的观测频率下，干土的等效含水量采样深度约为20 cm，而湿土的等效含水量采样深度只有几厘米。Owe和Van de Griend （1998）利用微波辐射计观测具有不同土壤含水量剖面的地表，并测量不同深度的土壤含水量与辐射计的观测或反演值对比发现1.67 GHz的波段亮温与0—5 cm和0—8 cm的土壤含水量的相关性都很高，而5 GHz波段与0—2 cm的土壤含水量有很好的相关性。Laymon等 （2001）利用L波段和S波段的微波辐射计观测了两周时间内土壤水分变化过程，通过对比反演的土壤含水量与实测的地表至不同深度土壤含水量的平均值发现当土壤体积含水量小于0.3 cm^3/cm^3时，L波段的采样深度在5 cm左右，并随着土壤水分的增大而减小。

以往的研究中，采用实验的方法研究土壤微波辐射的采样深度，只能估计一个大致的范围；通过理论模型计算土壤微波辐射的采样深度较为繁琐。本研究的目标是根据热采样深度的定义，通过理论模型的模拟，分析影响土壤微波辐射热采样深度的因素，并在此基础上发展估算土壤热采样深度的统计模型，从而能够通过统计模型能够根据地表状况迅速估算地表微波辐射的热采样深度。

2 理论基础与实验

2.1 热采样深度的定义

在微波遥感中，经常使用穿透深度来描述电磁波对介质的穿透能力（Ulaby等，1982）。假设一束平面波垂直由空气入射至土壤表面，在空气—土壤界面处发生散射和透射，一部分电磁波由地表散射返回地面，另外一部分穿透界面进入土壤中。如果在土壤界面处，电磁波的透射功率为$P(0)$，在深度η处经过衰减后的功率为$P(\eta)$，若

$$\frac{P(\eta)}{P(0)}=\frac{1}{\mathrm{e}} \tag{1}$$

那么土壤厚度η即为穿透深度。如果忽略土壤中的散射，对于$\varepsilon''/\varepsilon' < 0.1$的材料介质来说，穿透深度可以由下式计算（Ulaby等，1982）

$$\eta \cong \frac{\lambda\sqrt{\varepsilon'}}{2\pi\varepsilon''} \tag{2}$$

式中，λ为入射波在空气中的波长，ε'和ε''分别表示材料介质的介电常数实部和虚部。

为了说明热采样深度的定义，考虑如下实验场景：利用地基微波辐射计观测覆盖一定厚度土壤的铝板。由于铝板的发射率很低（Page等，2003），因此当铝板上的土壤层很薄时，辐射计观测的亮温值较小。随着铝板上方覆盖土壤厚度的增加，辐射计观测的亮温逐渐增大，并最终趋于平稳，此时亮温为$T_{B\max}$。当土壤层厚度达到z时的亮温T_{Bz}满足下式

$$\frac{T_{Bz}}{T_{B\max}}=0.9 \tag{3}$$

即铝板上覆盖厚度为z的土壤层的亮温贡献为总亮温的90%，此时土壤层的厚度z定义为此状态下土壤微波辐射的热采样深度（Nedeltchev，1999）。

2.2 理论模型

考虑3层媒质的微波辐射：第1层为空气，第2层和第3层分别为具有不同介电常数和温度的介质（图1），利用辐射传输理论计算最终进入到媒质一（空气）的辐射信号。亮度温度$T_B(\theta_1,p)$由两项组成（Ulaby等，1981）

$$T_B(\theta_1,p)=T_{B2}(\theta_1,p)+T_{B3}(\theta_1,p) \tag{4}$$

式中，$T_{B2}(\theta_1,p)$和$T_{B3}(\theta_1,p)$分别表示由第2层和第3层的发射的贡献。其中，θ_1表示入射角度，p表示极化方式。该模型考虑了两个界面间的多次散射，辐射计观测到的亮温（Ulaby等，1981）。

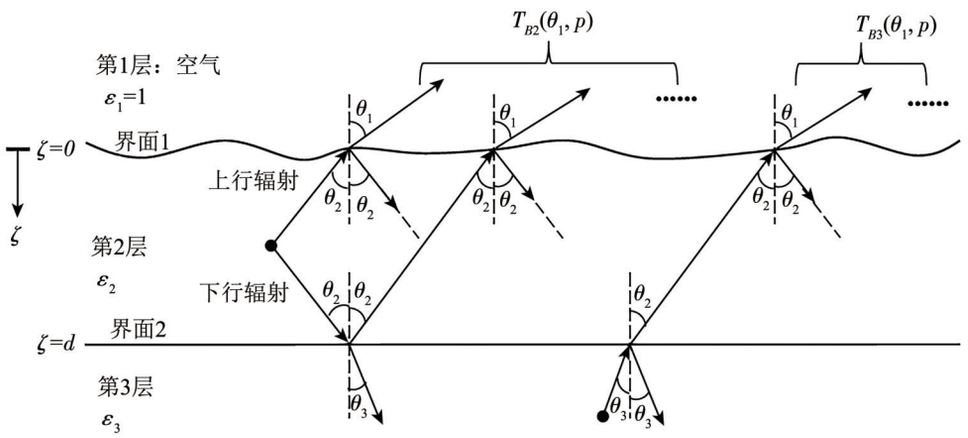


图1 3层介质微波辐射传输过程

Fig.1 The microwave radiation transfer process of three layered media

$$T_B(\theta_1,p)=\frac{(1-\Gamma_1)}{(1-\Gamma_1\Gamma_2/L_2^2)}\left[\left(1+\frac{\Gamma_2}{L_2}\right)(1-a)\left(1-\frac{1}{L_2}\right)T_2+\frac{(1-\Gamma_2)T_3}{L_2}\right] \tag{5}$$

式中，Γ_1和Γ_2分别为界面1和界面2的反射率，L_2为第2层的衰减因子，a为单次散射反照率，T_2和T_3分别为第2层和第3层的物理温度。

本研究将空气、土壤和铝板分别看作理论模型中的3层介质。根据以往对铝板发射率的观测结果，假设铝板的发射率为0.02（柴琳娜等，2013），忽略土壤的单散射反照率。土壤表面的发射利用Choudhury等（1979）发展的粗糙地表微波辐射模型来描述。该模型利用一个表示粗糙度的参数h来表示表面粗糙度对光滑地表反射率的影响。

$$\Gamma_1=\Gamma_{\text{smooth}}exp(-h\cdot\cos^2\theta_1) \tag{6}$$

式中，Γ_{smooth}表示光滑地表的反射率，可以由菲涅尔公式计算。粗糙度参数h与波长λ和地表均方根高度σ有关。土壤的介电常数由Dobson模型（Dobson等，1985）模拟得到。

2.3 理论模型的验证

为了对理论模型进行验证，开展了裸露土壤微波辐射观测实验。实验地点位于河北省清苑县农田中（38°42′10.21″ N，115°23′18.23″ E）。实验使用的车载多频率微波辐射计TMMR （Truck-mounted Multi-frequency Microwave Radiometer）具备多频率、双极化（H极化和V极化）、多角度（天顶角—90°—90°，方位角0°—360°）的观测能力。辐射计的4个频率为6.925 GHz、10.65 GHz、18.7 GHz和36.5 GHz （张涛等，2015）。经过校准，其测量的误差在1 K以内，能够保证观测数据的质量。

实验中可能存在的观测误差主要来自于大气的下行辐射。大气下行辐射经地表反射会被辐射计接收，从而影响辐射计的对地观测信号。因此在实验时，利用辐射计对天空进行多角度观测，得到大气各角度的下行辐射亮温，在处理地面数据时利用观测的下行辐射进行大气校正（张涛等，2015）。

2010-09-18至2010-09-29利用TMMR开展了裸露土壤微波辐射观测实验。实验选择大小为10 m×20 m的农田作为辐射计的观测视场。辐射计

升高至天线中心距离地面5.45 m，此时样地大小能够满足辐射计观测角度20°—70°的—3 dB视场观测要求。实验前将裸地表层约30 cm的土壤翻耕、人工整平土壤表面。由于9月18日有小雨，因此使得土壤表面更加平整，且视场内土壤含水量增大。实验中，每隔几个小时利用辐射计观测裸露土壤的微波辐射，跟踪土壤变干的过程，获取不同土壤湿度条件下各个频率的微波辐射亮温。对于每次观测，辐射计的观测角度从20°变化至70°，间隔5°。在辐射计观测的同时，利用铂金电阻温度计（精度为0.1℃）测量不同深度的土壤温度（0—0.5 cm、0.5—1 cm、1—2 cm、2—3 cm、3—5 cm）。同时采集相同深度下的土壤样本，利用烘干法测量土壤含水量和土壤容重。经实验室测量，实验地点的土壤类型为粉土，其中砂粒和粘粒含量分别为14.89%和25.29%。

由于实验前降雨的作用，9月18日的土壤表层湿度比较大，深层土壤相对干燥。9月19日，由于土壤水分的下渗，使得0—5 cm的土壤层内土壤水分比较均一。而后土壤表面水分蒸发作用明显，使得土壤表层比较干燥，深层土壤相对较湿。因此在数据选取时，为了尽可能减小不均一土壤剖面对微波辐射亮温的影响，选择了9月19日下午15时的辐射计多角度观测数据来验证理论模型。为了尽量避免小观测角度时车体的影响和大观测角度下辐射计旁瓣信号的干扰，选择入射角度在30°—60°的观测数据用于模型验证。

验证时，将0—5 cm土壤层的温度和水分的平均值作为理论模型的输入，模拟得到各频率双极化多入射角度条件下的发射率与辐射计实测值进行比较（图1）。表1列出了各通道发射率的观测值与模拟值的均方根误差，各通道发射率的平均模拟误差为0.032。对比结果表明本研究采用的理论模型比较可靠，能够满足模拟研究的需要。

表1 TMMR各通道发射率观测值与理论模型模拟值的均方根误差

Table 1 The RMSEs of observed and simulated emissivities on different frequencies and polarizations of TMMR

频率/GHz	V	H
6.925	0.056	0.037
10.65	0.041	0.028
18.7	0.007	0.037
36.5	0.013	0.035

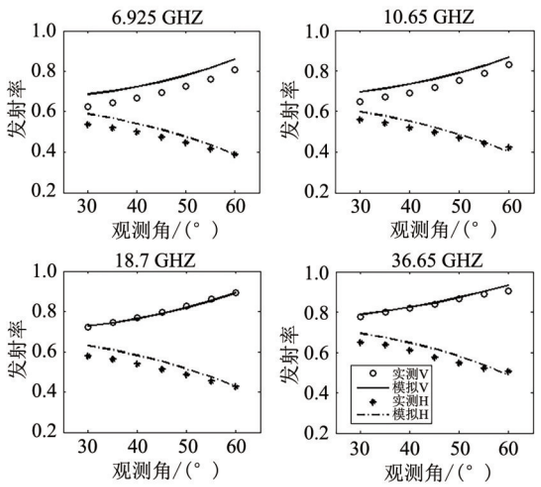


图2 不同观测角度下辐射计观测发射率与模型模拟发射率比较

Fig.2 The observations and simulations of emissivity in different viewing angles

3 统计模型的发展

3.1 热采样深度的影响因素

土壤对电磁波衰减作用的强弱直接决定了热采样深度的大小。土壤对电磁波的衰减作用越大，电磁波在土壤中的穿透能力越弱，热采样深度越小；反之，热采样深度越大。影响土壤对电磁波衰减作用的主要因素是土壤介电常数。为了寻找土壤热采样深度与其可能的影响因素之间的关系，利用2.2节所述的理论模型构建了包含宽取值范围土壤参数、频率和热采样深度的模拟数据库，并对土壤水分、土壤质地、土壤温度和电磁波的频率对热采样深度的影响进行敏感性分析，以寻找敏感参数，为热采样深度建模提供基础。4个参数的取值范围和取值间隔如表2所示（共226800组数据）。参照AMSR-E传感器的配置，将入射角度设置为55°。由于并不是垂直入射，因此不同极化的辐射信号在空气—土壤界面的反射率会略有差别，计算得到的热采样深度也略有差异。由于地表的V极化亮温大于H极化亮温，从热采样深度的定义考虑，仅采用V极化的亮温计算土壤热采样深度。

在分析土壤质地对热采样深度的影响时，选取30种不同质地的土壤，涵盖了典型的砂土、粉土和粘土类型。为了用一个参数来反映土壤质地对热采样深度的影响，利用土壤的比表面积来表

征土壤质地。一般来说，土壤中的粘粒含量越高，土壤比表面积越大。土壤比表面积可以由土壤质地来计算（Ersahin等，2006）

$$S = 0.042 + 4.23 \cdot clay + 1.12 \cdot silt - 1.16 \cdot sand \quad (7)$$

式中，S表示土壤比表面积，单位为m^2/g；*clay*，*silt*和*sand*分别表示土壤的粘粒含量、粉粒含量和砂粒含量，单位为%。

表2 模型输入参数

Table 2 The parameters settings of theoretical model

参数	单位	取值范围	取值间隔
土壤体积含水量	cm^3/cm^3	0.04—0.44	0.02
土壤质地	—	30种土壤(砂粒含量20%—40%;粉粒含量取值20%—60%;粘粒含量取值20%—60%;步长均为5%)	
土壤温度	℃	2—40	2
频率	GHz	6—40	2

图3—图6分别显示了土壤水分、土壤质地、土壤温度和观测频率4个因素对热采样深度的影响。从图3中可以看出，热采样深度随土壤体积含水量的增大而减小。这是因为在其他参数不变的条件下，土壤水分含量增加会增大土壤介电常数（Hallikainen等，1985），从而使土壤对电磁波的衰减作用变强。因此，随着土壤体积含水量的增加热采样深度就会越来越小。以10.65 GHz的变化曲线为例，当土壤水分从0.04 cm^3/cm^3增加到0.44 cm^3/cm^3时，热采样深度从12.15 cm降低到0.61 cm。频率越低，热采样深度降低的幅度越明显。

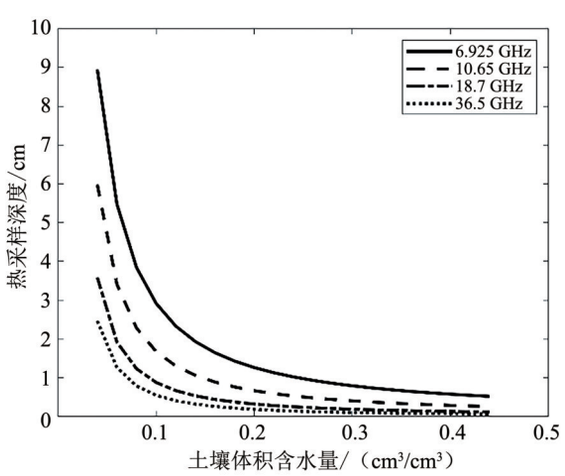


图3 土壤体积含水量对热采样深度的影响

Fig.3 The effect of soil moisture on thermal sampling depth

（其他输入参数：砂粒含量=30%，粘粒含量=30%，温度=20℃）

（Other parameters: sand content=30%, clay content=30%, temperature=20℃）

图4显示了观测频率为10.65 GHz时，土壤质地（用土壤的比表面积表示）对热采样深度的影响。热采样深度随着土壤比表面积的增大有增大趋势。一般来说，水分在土壤中主要以束缚水和自由水两种形式存在。束缚水是指由于土壤的吸附力而保持在土壤颗粒周围的水分。根据水分距离土壤颗粒的远近不同，所受的吸附力大小不同。越靠近土壤颗粒表面，受到的吸附力越强。吸附力的存在使束缚水分子与入射电磁波相互作用方式与自由水分子有很大不同，从而导致束缚水和自由水介电特性的差异。在其他参数不变的条件下，土壤比表面积的不同，则土壤中束缚水和自由水的比例不同。土壤比表面积越大，土壤对水的吸附能力越强，从而有更多的自由水成为束缚水，土壤的介电常数变小（Hallikainen等，1985），对电磁波的衰减作用随之减弱。因此随着土壤比表面积的增大，热采样深度有变大的趋势（图4）。由于土壤颗粒组成计算的比表面积是离散化的，导致了热采样深度随着比表面积的变化曲线呈现了锯齿状的特征。从模拟数据可以看到，虽然土壤比表面积与热采样深度之间并非单调变化关系，但土壤质地对热采样深度的影响较小。

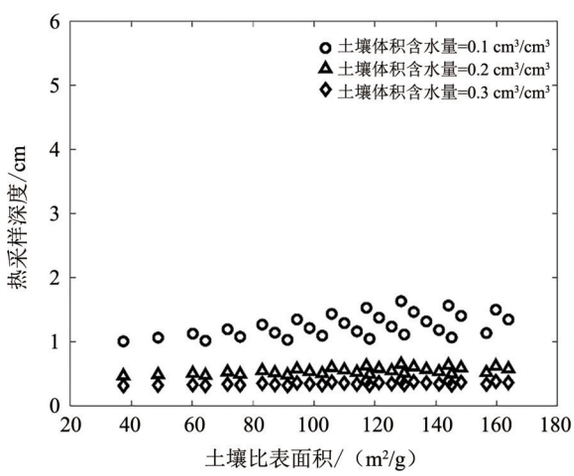


图4 土壤质地对热采样深度的影响

Fig.4 The effect of soil specific surface area on thermal sampling depth

（其他输入参数：频率=10.65 GHz，温度=20℃）

（Other input parameters: frequency=10.65 GHz, temperature=20℃）

土壤温度对热采样深度的影响主要是由于土壤温度的变化改变了土壤中水的介电常数。随着温度的升高，土壤中水的介电常数减小（Stogryn，1971；Klein和Swift，1977），从而导致热采样深度增大（图5）。

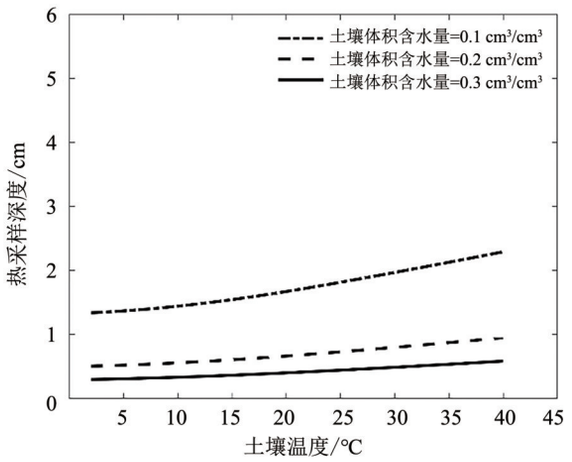


图5 土壤温度对热采样深度的影响

Fig.5 The effect of soil temperature on thermal sampling depth

（其他输入参数：砂粒含量=30%，粘粒含量=30%，频率=10.65 GHz）

（Other parameters: sand content=30%, clay content=30%, frequency=10.65 GHz）

图6显示了观测频率对热采样深度的影响。频率越高，土壤对电磁波的衰减作用越强，热采样深度越小。这个趋势与以往的研究结果一致（Njoku和Entekhabi，1996）。

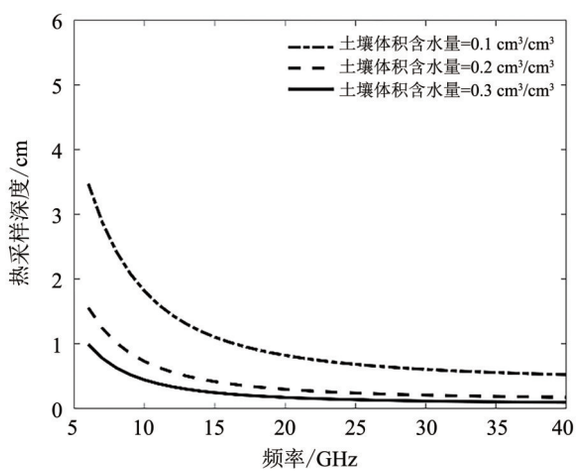


图6 观测频率对热采样深度的影响

Fig.6 The effect of frequency on thermal sampling depth

（其他输入参数：砂粒含量=30%，粘粒含量=30%，温度=20℃）

（Other parameters: sand content=30%, clay content=30%, temperature=20℃）

3.2 统计模型的建立

根据热采样深度影响因素的分析，各参数在合理变化范围内变化时，土壤体积含水量对热采样深度的影响最大，频率次之，最小的是土壤温度和土壤质地。因此，首先分析热采样深度与土壤体积含水量的关系。从图3可以看出，随着土壤含水量的增大，热采样深度急剧下降，下降速度随土壤体积含水量增大减小，并最终趋于平稳。通过回归分析发现，热采样深度与土壤体积含水量的关系可以由指数函数的形式来描述。

$$z = A \cdot m_v^{\ B} \tag{8}$$

式中，z为热采样深度，单位为cm；m_v表示土壤体积含水量，单位为cm^3/cm^3。在不同土壤含水量条件下，通过曲线拟合可以回归得到系数A和B的值。由于相同的土壤含水量变化时，不同频率、温度和质地的热采样深度的变化是不同的，因此系数A和B与其他参数有关。基于30种土壤在不同温度条件下A和B的取值与频率的关系，拟合得到了回归系数A和B与频率的关系。

$$\begin{aligned} A &= a_1 \cdot \exp(a_2 \cdot f) + a_3 \\ B &= b_1 + b_2 / f \end{aligned} \tag{9}$$

式中，f为频率，单位为GHz；a_1，a_2，a_3，b_1和b_2为回归系数，它们在不同的温度和质地条件下的取值不同。由于热采样深度对土壤温度和质地的敏感性最低，因此将两个参数一起考虑，利用多元回归分析的方法建立了回归系数与温度和土壤比表面积的关系。

$$\begin{aligned} a_1 &= 0.035 \cdot T + 0.325 \\ a_2 &= -0.277 \\ a_3 &= 0.018 \\ b_1 &= -1.523 \\ b_2 &= 0.008 \cdot S + 0.029 \cdot T + 0.945 \end{aligned} \tag{10}$$

式中，T表示土壤温度，单位为℃；S表示土壤比表面积，单位为m^2/g。综上，式（8）—式（10）即计算热采样深度的统计模型。该模型利用容易获取的4个参数（土壤体积含水量、土壤温度、土壤比表面积和频率）即可计算热采样深度。

4 统计模型的验证

4.1 热采样深度测量实验

2012-03-27利用TMMR开展了热采样深度测量实验。实验中将辐射计升高至天线中心距地面4.75 m处。为了避免车体阴影的影响，辐射计由北向南观测。辐射计的视场可以根据辐射计波束宽度和天线的位置几何计算得到。为了尽量减小辐射计4个频率在地面的观测视场，设定观测角度为45°。图7显示了辐射计4个频率的-10 dB的视场大小。在辐射计的视场内放置8块1 m×2 m大小的铝

板，分为两行平行紧密放置，组合成一个4 m×4 m大小的区域。铝板组成的区域能够完全覆盖辐射计4个频率的观测视场。

图7 热采样深度测量实验TMMR观测视场图

Fig.7 Footprint of the TMMR in the experiment of thermal sampling depth

实验前，将土壤晒干后过筛以保证实验用土壤中无杂草和落叶等杂质。为了尽可能避免实验中土壤温度和水分变化，实验选择在晚间进行。实验时，首先测量没有土壤覆盖的铝板亮温作为背景值，而后分多次覆盖一定厚度的土壤进行观测。对于每个厚度的土壤样本，人工将其表面整平。而后利用TMMR测量4个频率的亮温。在辐射计观测的同时，利用铂金电阻温度计测量土壤的物理温度。同时采集土壤样本，利用烘干法测量土壤含水量和土壤容重。辐射计测量完毕后，利用多次测量求平均的方法得到铝板上覆盖土壤的厚度。

4.2 实验数据分析与讨论

在热采样深度实验中，共测量了5种不同厚度土壤的视场（铝板可以认为是土壤厚度为0的情况）。实验过程中土壤厚度的和温度变化如图8所示。实验从20：26开始观测第一个厚度的土壤样本，至21：46完成最后一个样本的观测。在此期间，土壤温度的变化范围从7.75℃变化到8.45℃，变化幅度小于1℃。因此，可以假定实验期间土壤温度没有变化，取其均值为8.1℃。由于实验前土壤经过晒干处理，且实验持续时间较短，4次土壤厚度的土壤水分变化不大。烘干法测量的土壤体积含水量为0.04 cm^3/cm^3。

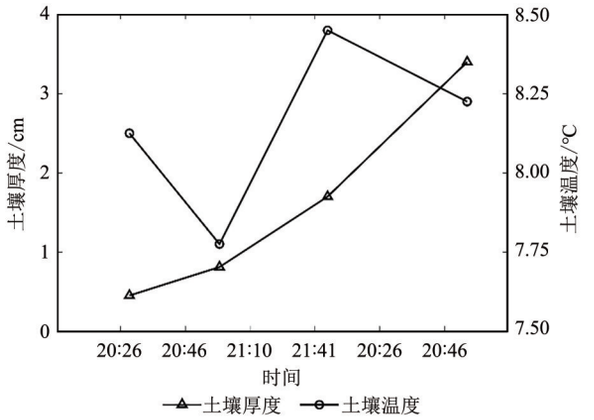


图8 实验中土壤厚度和温度的随时间变化

Fig.8 The variation of soil layer depth and temperature during the experiment time

通过以上分析可知，在实验期间，土壤温度、水分、质地等因素都可以认为是不变的。因此土壤厚度是影响土壤覆盖铝板视场在某一频率发射率变化的唯一变量。随着铝板上覆盖的土壤厚度不断增加，辐射计观测的发射率随之升高一直到稳定状态。然而，由于材料和工作量的限制，无法实现将土壤厚度增加到发射率达到稳定值。因此采用最小二乘法，将实验观测的5个土壤样本与发射率拟合得到发射率随土壤厚度变化的曲线。图9显示了在6.925 GHz，10.65 GHz，18.7 GHz和36.5 GHz下，实验观测和拟合的土壤发射率随土壤厚度的变化，其中点为实验的观测值，曲线为最小二乘拟合的结果。从图9中可以看出，随着土壤厚度的增加，4个频率的发射率逐渐变大，并且高频的曲线比低频更容易到达稳定值。

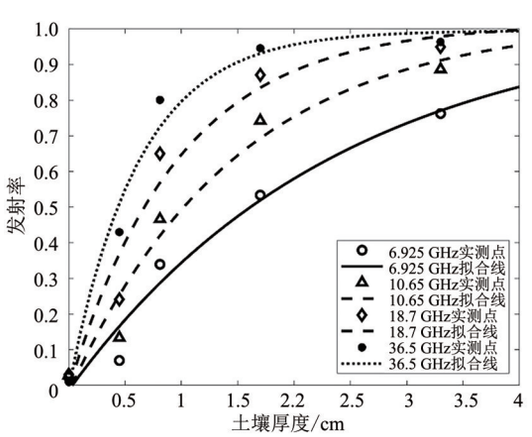


图9 发射率随土壤厚度的变化

Fig.9 The emissivity variations with the depth of soil layer

利用最小二乘法拟合得到的发射率与土壤厚度之间的关系，可以方便的计算在某一土壤厚度下的发射率值。根据热采样深度的定义，即可求得实验测得的土壤热采样深度值。由于实验中土壤温度和水分变化不大，因此将实验中测量的土壤水分、温度和质地信息代入本文发展的统计模型中可以计算模型估算的热采样深度值。由于模型和实测的热采样深度的入射角度不同，因此需要计算实折射角（Ulaby等，1981）将二者统一到垂直入射的情况下比较4个频率的对比结果如图10所示。从图10中可以看出，除36.5 GHz外，二者的计算结果吻合较好。4个频率条件下计算结果的总体均分根误差为0.48 cm。

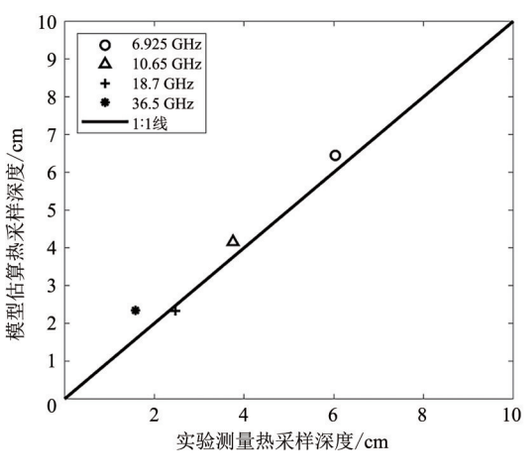


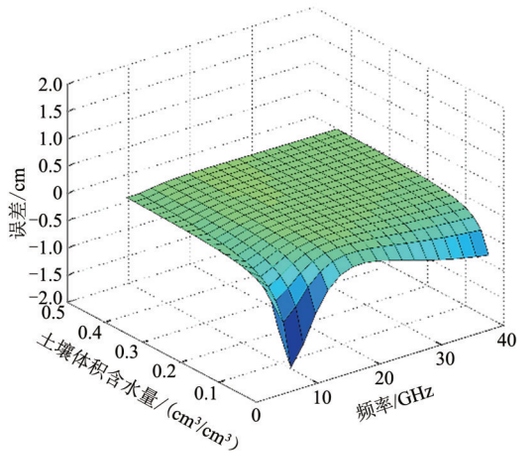
图10 热采样深度统计模型验证结果

Fig.10 The validation results of the statistical model for estimating thermal sampling depth

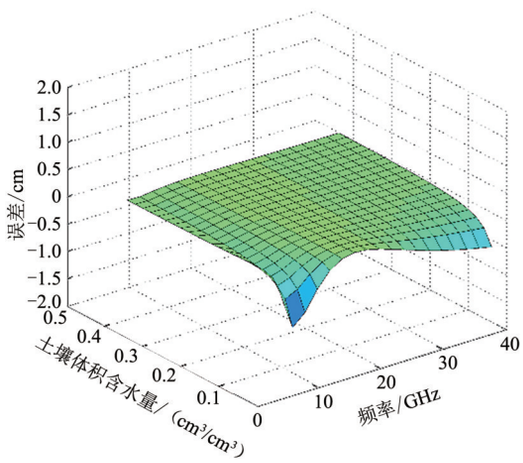
由于统计模型是根据理论模型发展来的，因此模型中的假设可能会导致热采样深度模型计算值与实测值之间存在差异。在理论模型中假定土壤层的单散射反照率为0，即不考虑考虑土壤介质内部的体散射。对于低频波段，波长较长，远大于土壤颗粒的大小，因此可以忽略土壤内部的体散射作用。但是对于高频波段而言，波长较短，土壤颗粒和颗粒之间的空隙有可能会引起体散射作用，并且对较干的土壤尤为明显（Ulaby等，1986）。因此相对于低频的验证结果，36.5 GHz的模型计算值与实测值对比结果较差。若不考虑36.5 GHz的验证结果，其他3个波段的模型计算值与实测值的均方根误差为0.34 cm。

需要指出的是，由于在统计模型中需要同时输入土壤温度和水分两个变量来计算热采样深度，因此开展地面实验来验证该模型时需要保证在整个实验中铝板上不同厚度的土壤样本的温度和水分相同。否则，不同厚度的土壤样本就处在不同的温度和水分条件下，辐射计的观测值无法放在一起进行拟合和分析。因此，实验中选择了比较干燥的土壤（土壤体积含水量为0.04 cm^3/cm^3），在晚上温度相对稳定的情况下开展实验，以保证不同厚度的土壤样本处于相同温度和水分条件。

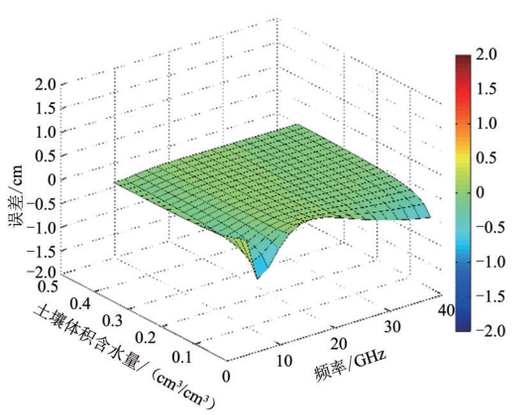
为了评价其他土壤含水量情况下统计模型的模拟精度，本文利用模拟数据对热采样深度统计模型的估算结果进行了误差评价，基于模拟数据库中宽范围的土壤体积含水量和频率设置（表2）在3种土壤质地条件下（（1）砂粒含量=40 %，粘粒含量=30 %；（2）砂粒含量=30 %，粘粒含量=40 %；（3）砂粒含量=30 %，粘粒含量=30 %）比较了热采样深度统计模型的计算值和理论模型的模拟值。3种质地条件下两种方式得到的热采样深度的均方根误差依次为0.23 cm，0.12 cm和0.10 cm。图11显示3种土壤质地条件下热采样深度统计模型计算值与理论模型模拟值的差值随土壤水分和频率的变化。从图11中可以看出，对于3种土壤质地，在频率较低且土壤比较干燥时（土壤体积含水量<0.1 cm^3/cm^3），统计模型的精度相对较低（误差>1 cm）。这是由于当频率减小或土壤变干时，土壤介电常数变小，导致电磁波的衰减作用也相应减弱，热采样深度迅速增大（图3和图6）。统计模型的回归时产生的不确定性也变大，因此降低了统计模型精度。其他大多数情况下，统计模型的计算值与理论模型的模拟值之间差别较小。由此可以推断，本文发展的统计模型在高含水量条件下的误差更小。



(a) 砂粒含量=40%,粘粒含量=30%
(a) Sand content=40%, clay content=30%



(b) 砂粒含量=30%,粘粒含量=40%
(b) Sand content=30%, clay content=40%



(c) 砂粒含量=30%,粘粒含量=30%
(c) Sand content=30%, clay content=30%

图11 3种土壤质地条件下热采样深度统计模型的计算值与理论模型模拟值的差值随土壤体积含水量和频率的变化
Fig.11 The difference between estimations and calculations of thermal sampling depth using statistical model and theoretical model

5 结 论

微波对地表具有一定的穿透能力，这种特点既增加了微波遥感从地表获取的信息量，同时也增加了数据解译的复杂性。在被动微波遥感中，准确描述热采样深度有助于在土壤水分反演产品的真实性检验中确定土壤含水量测量的方式。本文首先定义了热采样深度来表示影响微波辐射计观测亮温的土壤层厚度。而后基于理论模型对可能影响热采样深度的参数进行了分析。根据分析结果，利用回归分析方法发展了一个估算热采样深度的统计模型。利用车载多频率微波辐射计开展实验结果显示，理论模型模拟的多频率多角度的发射率的误差为0.032，模型的模拟精度较好。热采样深度统计模型估算值与实验测量值的均方根误差为0.542 cm，说明本文发展的热采样深度的统计模型能够较准确地估算地表微波辐射的热采样深度。该模型可以通过输入4个较容易获取的参数—土壤体积含水量、土壤温度、土壤比表面积和观测频率—更方便地计算一定土壤和观测条件下的热采样深度，从而为被动微波遥感土壤水分产品的真实性检验工作中地面土壤水分测量以及土壤水分遥感产品的应用提供参考。

本文发展的统计模型是在理论模型的基础上利用回归分析的方法得到的。在模型的发展和验证中尚存在几个问题：

(1) 模型发展的初衷是将其结果应用于土壤水分反演结果的真实性检验过程中，以期能够改善土壤水分反演真实性检验的可靠性。但在模型发展过程中，仅以AMSR-E传感器的参数配置为参考，在模拟分析时设置的频率范围为6—40 GHz。因此，这个频率范围也是本文热采样深度统计模型的适用范围。而近年来，对土壤水分更敏感的L波段传感器SMOS、SMAP、Aquarius等相继发射(Kerr等，2001；Entekhabi等，2010)，接下来的工作将尝试把统计模型适用的频率范围拓展至L波段。

(2) 模型发展时未考虑土壤层内的体散射，而将土壤层的单散射反照率设置为零。这一假设

使模型应用于比较干燥的地表时可能会产生一定的误差。

（3）本研究中热采样深度统计模型中把地表至热采样深度处的土壤层看作具有均一土壤水分的单层，而自然状态下的表层土壤水分一般是随深度变化的。后续工作中，需要考虑不同土壤剖面情况下热采样深度的计算问题。

参考文献（References）

Al Bitar A, Leroux D, Kerr Y H, Merlin O, Richaume P, Sahoo A and Wood E F. 2012. Evaluation of SMOS soil moisture products over continental U.S. using the SCAN/SNOTEL network. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 50(5): 1572-1586 [DOI: 10.1109/TGRS.2012.2186581]

Bindlish R, Jackson T J, Gasiewski A J, Klein M and Njoku E G. 2006. Soil moisture mapping and AMSR-E validation using the PSR in SMEX02. Remote Sensing of Environment, 103(2): 127-139 [DOI: 10.1016/j.rse.2005.02.003]

Brubaker K L and Entekhabi D. 1996. Analysis of feedback mechanisms in land-atmosphere interaction. Water Resources Research, 32(5): 1343-1357 [DOI: 10.1029/96WR00005]

Chai L N, Zhang L X, Shi J C and Wu F M. 2013. Equivalent scattering albedo estimation of cotton and soybean. Journal of Remote Sensing, 17(1): 17-33（柴琳娜, 张立新, 施建成, 吴凤敏. 2013. 棉花和大豆等效散射反照率估算. 遥感学报, 17(1): 17-33）[DOI: 10.11834/jrs.20131358]

Choudhury B J, Schmugge T J, Chang A and Newton R W. 1979. Effect of surface roughness on the microwave emission from soils. Journal of Geophysical Research, 84(C9): 5699-5706 [DOI: 10.1029/JC084iC09p05699]

Dirmeyer P A, Zeng F J, Ducharne A, Morrill J C and Koster R D. 2000. The sensitivity of surface fluxes to soil water content in three land surface schemes. Journal of Hydrometeorology, 1(2): 121-134 [DOI: 10.1175/1525-7541(2000)001<0121:TSOSFT>2.0.CO;2]

Dobson M C, Ulaby F T, Hallikainen M T and El-Rayes M A. 1985. Microwave dielectric behavior of wet soil-Part II: dielectric mixing models. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, GE-23(1): 35-46 [DOI: 10.1109/TGRS.1985.289498]

Entekhabi D, Njoku E G, O'Neill P E, Kellogg K H, Crow W T, Edelstein W N, Entin J K, Goodman S D, Jackson T J, Johnson J, Kimball J, Piepmeier J R, Koster R D, Martin N, McDonald K C, Moghaddam M, Moran S, Reichle R, Shi J C, Spencer M W, Thurman S W, Tsang L and Van Zyl J. 2010. The soil moisture active passive (SMAP) mission. Proceedings of the IEEE, 98(5): 704-716 [DOI: 10.1109/JPROC.2010.2043918]

Ersahin S, Gunal H, Kutlu T, Yetgin B and Coban S. 2006. Estimating specific surface area and cation exchange capacity in soils using fractal dimension of particle-size distribution. Geoderma, 136(3/4): 588-597 [DOI: 10.1016/j.geoderma.2006.04.014]

Fennessy M J and Shukla J. 1999. Impact of initial soil wetness on seasonal atmospheric prediction. Journal of Climate, 12(11): 3167-3180 [DOI: 10.1175/1520-0442(1999)012<3167: IOISWO>2.0.CO;2]

Gherboudj I, Magagi R, Goita K, Berg A A, Toth B and Walker A. 2012. Validation of SMOS data over agricultural and boreal forest areas in Canada. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 50(5): 1623-1635 [DOI: 10.1109/TGRS. 2012.2188532]

Hallikainen M T, Ulaby F T, Dobson M C, El-Rayes M A and Wu L K. 1985. Microwave dielectric behavior of wet soil-part 1: empirical models and experimental observations. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, GE-23(1): 25-34 [DOI: 10.1109/TGRS.1985.289497]

Jackson T J, Bindlish R, Cosh M H, Zhao T J, Starks P J, Bosch D D, Seyfried M, Moran M S, Goodrich D C, Kerr Y H and Leroux D. 2012. Validation of soil moisture and ocean salinity (SMOS) soil moisture over watershed networks in the U.S. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 50(5): 1530-1543 [DOI: 10.1109/TGRS.2011.2168533]

Jackson T J, Cosh M H, Bindlish R, Starks P J, Bosch D D, Seyfried M, Goodrich D C, Moran M S, and Du J Y. 2010. Validation of advanced microwave scanning radiometer soil moisture products. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 48(12): 4256-4272 [DOI: 10.1109/TGRS.2010.2051035]

Kerr Y H, Waldteufel P, Wigneron J P, Martinuzzi J, Font J and Berger M. 2001. Soil moisture retrieval from space: the Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) mission. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39(8): 1729-1735 [DOI: 10.1109/36.942551]

Klein L and Swift C. 1977. An improved model for the dielectric constant of sea water at microwave frequencies. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 25(1): 104-111 [DOI: 10.1109/TAP.1977.1141539]

Laymon C A, Crosson W L, Jackson T J, Manu A and Tsegaye T D. 2001. Ground-based passive microwave remote sensing observations of soil moisture at S-band and L-band with insight into mea-

surement accuracy. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39(9): 1844-1858 [DOI: 10.1109/36.951075]

Lee K H and Anagnostou E N. 2004. A combined passive/active microwave remote sensing approach for surface variable retrieval using tropical rainfall measuring mission observations. Remote Sensing of Environment, 92(1): 112-125 [DOI: 10.1016/j. rse. 2004.05.003]

Li L, Gaiser P W, Gao B C, Bevilacqua R M, Jackson T J, Njoku E G, Rudiger C, Calvet J C and Bindlish R. 2010. WindSat global soil moisture retrieval and validation. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 48(5): 2224-2241 [DOI: 10.1109/TGRS.2009.2037749]

Mialon A, Wigneron J P, De Rosnay P, Escorihuela M J and Kerr Y H. 2012. Evaluating the L-MEB model from long-term microwave measurements over a rough field, SMOSREX 2006. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 50(5): 1458-1467 [DOI: 10.1109/TGRS.2011.2178421]

Nedeltchev N M. 1999. Thermal microwave emission depth and soil moisture remote sensing. International Journal of Remote Sensing, 20(11): 2183-2194 [DOI: 10.1080/014311699212182]

Newton R W, Black Q R, Makanvand S, Blanchard A J and Jean B R. 1982. Soil moisture information and thermal microwave emission. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, GE-20(3): 275-281 [DOI: 10.1109/TGRS.1982.350443]

Njoku E G and Entekhabi D. 1996. Passive microwave remote sensing of soil moisture. Journal of Hydrology, 184(1/2): 101-129.

Njoku E G, Jackson T J, Lakshmi V, Chan T K and Nghiem S V. 2003. Soil moisture retrieval from AMSR-E. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 41(2): 215-229 [DOI: 10.1109/TGRS.2002.808243]

Njoku E G and Li L. 1999. Retrieval of land surface parameters using passive microwave measurements at 6-18 GHz. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 37(1): 79-93 [DOI: 10.1109/36.739125]

Owe M and Van de Griend A A. 1998. Comparison of soil moisture penetration depths for several bare soils at two microwave frequencies and implications for remote sensing. Water Resources Research, 34(9): 2319-2327 [DOI: 10.1029/98WR01469]

Page L, Jackson C, Barnes C, Bennett C, Halpern M, Hinshaw G, Jarosik N, Kogut A, Limon M, Meyer S S, Spergel D N, Tucker G S, Wilkinson D T, Wollack E and Wright L E. 2003. The optical design and characterization of the microwave anisotropy probe. The Astrophysical Journal, 585(1): 566-586 [DOI: 10.1086/346078]

Panciera R, Walker J P, Kalma J D, Kim E J, Hacker J M, Merlin O, Berger M and Skou N. 2008. The NAFE'05/CoSMOS data set: toward SMOS soil moisture retrieval, downscaling, and assimilation. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 46 (3): 736-745 [DOI: 10.1109/TGRS.2007.915403]

Stogryn A. 1971. Equations for calculating the dielectric constant of saline water (correspondence). IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 19(8): 733-736 [DOI: 10.1109/TMTT.1971.1127617]

Ulaby F T, Moore R K and Fung A K. 1981. Microwave Remote Sensing Active and Passive-Volume I: Microwave Remote Sensing Fundamentals and Radiometry. Massachusettes: Addison-Wesley Publishing Company: 159-163

Ulaby F T, Moore R K and Fung A K. 1982. Microwave Remote Sensing: Active and Passive, Volume II: Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory. Norwood: Artech House: 846-847

Ulaby F T, Moore R K and Fung A K. 1986. Microwave Remote Sensing Active and Passive-Volume III: from Theory to Applications. Norwood: Artech House: 1552.

Viterbo P and Betts A K. 1999. Impact of the ECMWF reanalysis soil water on forecasts of the July 1993 Mississippi flood. Journal of Geophysical Research, 104(D16): 19361-19366 [DOI: 10.1029/1999JD900449]

Wang J, Jiang L M, Kou X K, Cui H Z and Yang J W. 2019. Downscaling method for near-surface freeze/thaw state monitoring in Genhe area of China. Journal of Remote Sensing, 23(6): 1209-1222 (王健, 蒋玲梅, 寇晓康, 崔慧珍, 杨建卫. 2019. 根河地区冻融监测和降尺度算法的验证分析. 遥感学报, 23(6): 1209-1222) [DOI: 10.11834/jrs.20198097]

Wilheit T T. 1978. Radiative transfer in a plane stratified dielectric. IEEE Transactions on Geoscience Electronics, 16(2): 138-143 [DOI: 10.1109/TGE.1978.294577]

Zhang T, Zhao S J, Zhang L X, Zhang Z J, Jiang L M and Chai L N. 2015. A truck-mounted multi-frequency microwave radiometer and application of experimental data. Remote Sensing Technology and Application, 30(5): 1012-1020 (张涛, 赵少杰, 张立新, 张钟军, 蒋玲梅, 柴琳娜. 2015. 车载多频率微波辐射计与观测数据应用. 遥感技术与应用, 30(5): 1012-1020) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2015.5.1012]

A statistical model for estimating microwave thermal sampling depth of bare soil

ZHAO Shaojie[1], ZHANG Tao[2], JIANG Lingmei[3], CHAI Linna[1]

1.State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2.Land Satellite Remote Sensing Application Center, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, Beijing 100048, China;

3.State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Research Center for Remote Sensing and GIS, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University,Beijing 100875, China

Abstract: One of the greatest advantages of microwave remote sensing over other remote sensing techniques is penetrability. Quantitatively estimating the sensing depth of passive microwave remote sensing is meaningful for simulation of satellite signals and validation of land surface parameters to estimate the sensing depth of passive microwave remote sensing. In this paper, a simple statistical model for estimating the thermal sampling depth in microwave frequencies of soil was developed and validated.

Thermal Sampling Depth (TSD) was introduced to describe the source of the main signals of passive microwave remote sensing. To develop a simple statistical model for estimating the TSD of soil, a theoretical model was introduced to describe the emission characteristics of a three-layer case, which incorporates all multiple reflections at the two boundaries. Based on radiative transfer theory, the total emission of the three layers was calculated. Sensitivity analysis was then performed to demonstrate the effects of the soil properties and frequency on the TSD based on a simulation database covering a wide range of soil characteristics and frequencies. Based on the sensitivity analysis results, a statistical model for estimating TSD was developed. This model can estimate the TSD using four common and easily acquired parameters: soil moisture, temperature, frequency, and soil specific surface area. For validation, a controlled field experiment using a Truck-mounted Multi-frequency Microwave Radiometer (TMMR) was designed and performed.

The total Root Mean Square Error (RMSE) between the TSD measured in field experiment and estimated using the statistical model was approximately 0.5 cm for the TRMM's four frequencies.

The results indicated that the developed statistical model offers a relatively accurate and simple way to estimate the TSD.

Key words: passive microwave remote sensing, thermal sampling depth, statistical model, soil moisture, validation

Supported by National Natural Science Foundation of China(No.41871228,41801287)