

文章编号: 1007-4619 (2005)02-0166-10

利用 TRMM/TMI 资料提取 地表层湿度信息试验

谷松岩^{1,2}, 李万彪¹, 张文建²

(1. 北京大学 物理学院大气科学系, 北京 100871; 2. 国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘要: 模拟分析了地表层湿度反演过程中地表及大气各种因素(卫星扫描角、地表粗糙度、地表植被覆盖和大气)对反演结果的影响情况;应用正演模拟技术得到了利用 TMI 低频 10GHz 通道微波极化比反演地表层湿度信息时,斜率和截距随像元植被覆盖度可调的反演方程;确定了反演方程中斜率、截距系数随像元植被覆盖度变化的对数关系和线性关系;反演技术中综合应用了多种途径获取到的被动微波像元中动态的植被覆盖信息;尝试了将这些因子用于地表层湿度反演的可行性;对于反演结果,研究工作中利用地表 HUBEX 外场观测资料进行了对比分析,得到了空间分布特征和时间演变趋势比较一致的对比分析结果。

关键词: 被动微波;正演模拟;地表层湿度;遥感反演

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A

1 引言

微波波段的对地遥感观测具有全天候、多极化等诸多优势,同时又对地表下垫面有一定程度的穿透性,因而被认为是目前陆表表层土壤湿度信息遥感探测最具发展潜力的探测手段。目前微波遥感监测地表层土壤含水量的研究试验结果已经引起国内外学者的普遍关注。美国农业部 USDA 制定的农业资源调查联合计划(AgRISTARS)中将微波遥感定为土壤水分监测的主要手段。此外,许多大型水文、气候以及陆面过程研究计划中也都将微波遥感列为区域性大尺度陆地表层土壤湿度信息获取的主要手段。被动微波遥感地表层土壤含水量的机理在于土壤的介电性质直接取决于土壤含水量这一事实。受土壤含水量的制约,土壤介电常数的实部会从松散性干物质时的 5 变化到水物质时的 80,相应地微波辐射率的大小可从 0.98 变化到 0.70,因此可从被动微波遥感信号的强弱变化中分析出地表层土壤的含水量信息^[1]。

星载微波辐射计观测到的微波辐射主要取决于地表及大气发射和散射的微波辐射。其中地表的微

波辐射量又主要取决于地表的介电常数进而与陆地表面的水分信息土壤含水量密切相关。对低频被动微波而言,土壤湿度是影响微波辐射量的关键因子。过去 30 多年时间里,国内外研究人员围绕土壤湿度与微波亮温间的关系进行了大量研究试验,取得了具有局地应用价值的各种算法^[2-5]。特别是 1978 年以后,美国雨云卫星及国防卫星升空,围绕扫描多通道微波辐射计(SMMR)和特种微波成像仪(SSM/I)等被动微波遥感仪器所获数据的应用,发展了被动微波遥感土壤湿度的算法。20 世纪 70—80 年代,许多科学家根据大量地面实测资料,建立微波亮温与土壤湿度、田间持水量和前期降水指数间的线性关系。同时,还对影响微波地表层湿度反演精度的地表植被覆盖、地表粗糙度、地表纹理和大气等因素进行了讨论,得到了实用的订正方案^[6-8]。20 世纪 90 年代后 TRMM/TMI 升空, Koike 根据青藏高原试验中的观测结果^[9],提出了对地表层湿度特征较敏感的 TMI 微波湿度指数 $I_{sw} = (T_{37H} - T_{19H})/T_{19H}$,用以监测陆面水文状况。并根据这一指数的变化特征分析了青藏高原土壤含水量的季节和年际变化特征,及空间分布特征,取得了较好的应用效果。这些

收稿日期: 2003-08-11;修订日期: 2004-02-11

基金项目: 国家自然科学基金(2001CB309402)、(90102010)和(40305003)共同资助。

作者简介: 谷松岩(1963—),女,正研级高工。2003 年 7 月毕业于北京大学物理学院大气科学系,获理学博士学位。现在国家卫星中心工作,主要从事地表参数的被动微波遥感反演方法研究。已发表论文 20 余篇。

反演应用的基本思路是首先从被动微波遥感资料中提取与地表层湿度信息敏感的特征量,地表微波辐射率或各种地表微波湿度指数,然后建立遥感湿度特征量与地表层湿度信息间的统计关系,获取土壤湿度信息。反演分析过程中需要对土壤的介电特性、微波辐射特性、地表物理特性和大气特性有比较清晰的认识,以保证反演结果的可靠性。

描述地表微波辐射特性的模型包括理想条件下的 Fresnel 公式;以 Dobson、Wang 和 Schmuggy 等人为代表的 Q/H 模型;小波扰模型;物理光学模型;几何光学模型;积分方程模型和 Monte Carlo 随机模型等。在模型发展的不同时期,各种模型分别显示了各自在不同方面的优势,为被动微波遥感的正演模拟计算和反演分析奠定了基础。

国内早在 20 世纪 80 年代初,就开始了微波遥感土壤湿度的可行性研究。1985 年赵柏林利用微波辐射计研究了湿润土壤的微波辐射特性及微波遥感土壤湿度的方法^[10,11],首先用终端短路法实现了土壤介电常数的地面测量,并通过现场观测实验得到了土壤介电常数的实部和虚部都随土壤湿度增加而加大的基本关系,同时探讨了土壤微波辐射率与土壤含水量间的关系以及地表粗糙度和土壤中热力结构的差异对土壤微波辐射特性的影响。1993 年金亚秋^[12,13],发表了专著“电磁散射和热辐射的遥感理论”,从电磁波散射、辐射和传输的基本原理出发,讨论了随机离散介质和连续随机介质的矢量辐射传输理论、随机介质中波的解析理论、随机粗糙面的散射理论等。1990 年金亚秋利用多频段(1.4GHz, 5.4GHz, 9.2GHz, 36GHz)微波辐射计测量了不同湿度土壤的微波辐射亮温,应用非均匀温、湿度廓线耗散介质的起伏逸散理论和 WKB 方法,进行了理论模式的数值计算,并和实际观测结果取得了很好的一致,从而加深了人们对土壤微波辐射特性的认识。

虽然被动微波遥感技术已成为目前遥感土壤含水信息最具业务应用前景的技术手段,但利用星载被动微波遥感资料反演地表层湿度信息的应用技术,受陆地表面自身物理特性变化的复杂性和星载被动微波遥感仪器探测能力的限制,还没能摆脱算法的地域性限制,也尚未得到令人满意的定量反演精度。前人的工作也多集中在理论分析、特定实验区的反演试验,而没有得到大范围全球或全国的区域地表层湿度信息提取的实用技术。本文尝试利用目前在轨的星载被动微波遥感资料(TRMM/TMI)

结合其它波段遥感信息和地理信息反演中国区域陆地地表层的湿度信息。反演试验过程中,利用 1998 年 HUBEX 试验观测数据对比分析了反演结果与地面观测结果间的一致性。为星载被动微波遥感资料陆地地表层湿度特征信息提取的定量应用积累了经验。

2 正演模拟计算

2.1 正演模型

正演模拟计算直接引用的陆表微波辐射模型可以计算包括裸露土壤地表、植被覆盖地表、积雪、沙漠和海洋水体等各类地表条件下的微波辐射^[14]。地表物质的体散射利用二流近似原理来计算得到,地表介质表面的发射和散射利用经交叉极化订正并考虑了粗糙度因子影响的 Fresnel 方程来计算;植被冠层的光学参数利用几何光学原理来计算;而在解决积雪和沙漠等密实介质下垫面散射问题时,利用小扰动原理来处理。

地表微波辐射传输方程:

$$\mu \frac{dI(\tau, \mu)}{d\tau} = I(\tau, \mu) - \frac{\omega(\tau)}{2} \int_{-1}^1 P_s(\tau, \mu, \mu') I(\tau, \mu') - [1 - \omega(\tau)] B(T) d\tau, \quad (1)$$

其中 I 是微波辐射量; $\omega(\tau)$ 为单次散射反照率; $P_s(\tau, \mu, \mu')$ 为散射相函数; μ 为入射天顶角余弦; μ' 为散射天顶角余弦; $B(T)$ 为普朗克辐射项; τ 为光学厚度。利用二流近似求解上述方程可以得到给定频率任意指向条件下的微波辐射量。

$$\begin{aligned} \mu \frac{dI(\tau, \mu)}{d\tau} &= [1 - \omega(1 - b)] I(\tau, \mu) - \omega b I(\tau, -\mu) \\ &\quad - (I - \omega) B \\ -\mu \frac{dI(\tau, -\mu)}{d\tau} &= [1 - \omega(1 - b)] I(\tau, -\mu) \\ &\quad - \omega b I(\tau, \mu) - (I - \omega) B \end{aligned} \quad (2)$$

其中 b 和 $1 - b$ 分别为后向和前向的积分散射能量比。各向同性散射时, $b = 1/2$, 前后两个方向散射能相等。一般 b 小于 $1/2$, 所以前向散射往往大于后向散射。介质的散射导致上行微波辐射量的减少。如果假定 $\omega(\tau)$ 、 b 和 B 不随 τ 而变化, 从上面两式可得两个去耦合的差分方程。利用这一方程可以分析介质的散射特性。

上行和下行微波辐射的解可表示为:

$$I(\tau, \mu) =$$

$$\frac{I'_0[\gamma_1 e^{\kappa(\tau-\tau_1)} - \gamma_2 e^{-\kappa(\tau-\tau_1)}] - I'_1[\beta_3 e^{\kappa(\tau-\tau_0)} - \beta_4 e^{-\kappa(\tau-\tau_0)}]}{\beta_1 \gamma_4 e^{-\kappa(\tau_1-\tau_0)} - \beta_2 \gamma_3 e^{\kappa(\tau_1-\tau_0)}} + B \quad (3)$$

$$I(\tau, -\mu) = \frac{I'_0[\gamma_4 e^{\kappa(\tau-\tau_1)} - \gamma_3 e^{-\kappa(\tau-\tau_1)}] - I'_1[\beta_2 e^{\kappa(\tau-\tau_0)} - \beta_1 e^{-\kappa(\tau-\tau_0)}]}{\beta_1 \gamma_4 e^{-\kappa(\tau_1-\tau_0)} - \beta_2 \gamma_3 e^{\kappa(\tau_1-\tau_0)}} + B \quad (4)$$

其中 κ 为二流近似解的本征值与粒子的光学参数有关, $\kappa = \frac{(1-\omega)(1-\omega g)}{\mu^2}$, g 为散射粒子的不对称因子, ω 为散射粒子单次散射反照率。 $I'_1 = I_1 - B(1 - R_{23})$; $I'_0 = I_0(1 - R_{12}) - B(1 - R_{21})$, I_1 是在 $\tau = \tau_1$ 处来自底层的上行微波辐射量, I_0 是在 $\tau = \tau_0$ 处来自顶层的下行微波辐射量, R_{ij} 是两层介质间的反射系数。 $b = (1-g)/2$; $\alpha = I_0/B$; $\beta = (1-\alpha)/(1+\alpha)$; $\beta_1 = 1 - R_{21}/\beta$; $\beta_2 = 1 - R_{21}\beta$; $\beta_3 = 1/\beta - R_{21}$; $\beta_4 = \beta - R_{21}$ 。

$\gamma = (\beta - R_{23})/(1 - \beta R_{23})$, $\gamma_1 = 1 - R_{23}/\beta$, $\gamma_2 = 1 - R_{23}\beta$, $\gamma_3 = 1/\beta - R_{23}$, $\gamma_4 = \beta - R_{23}$ 。当地表热力均一时, 中间层和底层(2, 3 两层)的温度相同, 来自第二层的微波辐射为

$$I(\tau_0, \mu) = \frac{I'_0[\gamma_1 e^{\kappa(\tau_0-\tau_1)} - \gamma_2 e^{-\kappa(\tau_0-\tau_1)}]}{\beta_1 \gamma_4 e^{-\kappa(\tau_1-\tau_0)} - \beta_2 \gamma_3 e^{\kappa(\tau_1-\tau_0)}} + B \quad (5)$$

总的辐射可表示为

$$I_t(\tau_0, \mu) = I_0 R_{12}(\mu) + I(\tau_0, \mu)[1 - R_{21}(\mu_t)] \quad (6)$$

其中 μ_t 为上行微波辐射方向角的余弦。三层介质的微波辐射率定义为总的微波辐射量与相同条件下黑体的微波辐射量之比。

$$\varepsilon_{\text{emi}} = I_t/B = \alpha R_{12} + (1 - R_{21}) \times \left\{ \frac{(1-\beta) \left[1 + \gamma e^{-2\kappa(\tau_1-\tau_0)} \right]}{(1-\beta R_{21}) - (\beta - R_{21}) \gamma e^{-2\kappa(\tau_1-\tau_0)}} + \frac{\alpha(1 - R_{12}) \left[\beta - \gamma e^{-2(\tau_1-\tau_0)} \right]}{(1-\beta R_{21}) - (\beta - R_{21}) \gamma e^{-2\kappa(\tau_1-\tau_0)}} \right\} \quad (7)$$

其中 α, β 和 γ 的含义同前。

决定地表微波辐射率的主要因子是介质的光学厚度(τ_1, τ_0)和界面反射系数(R_{ij})。当介质层为不同类型的植被时, 散射过程变得复杂, 植被层光学厚度的计算应用几何光学原理。粗糙表面的层间反射, 在小角度入射时可以用几何光学原理来近似; 但在大角度入射时需要用小扰动原理来求解。由此产生了双尺度模型, 并在洋面微波辐射率的模拟计算

中取得了较好的应用效果。陆地区域由于地表粗糙度参数与其它地球物理参数间的关系未知, 双参数模型仍然有效, 并可在有限频点处得到地表粗糙度与地表反射率间的经验关系。平表面用 Fresnel 公式来计算, 此时界面间的反射率与入射角和介质的介电常数有关。交叉极化贡献项可以表示如下:

$$\begin{aligned} R'_H &= [(1-Q)R_H + QR_V]P \\ R'_V &= [(1-Q)R_V + QR_H]P \end{aligned} \quad (8)$$

其中 P 为代表地表反射率影响的粗糙度因子项; Q 为有地表粗糙度引起的交叉极化因子; R_p , 极化反射系数, P 为 H 或 V。对频率低于 37GHz 的低频微波通道而言, $P = e^{-4\kappa_0^2 \sigma^2 \cos^2(\vartheta)}$, $Q = 0.35(1 - e^{-0.16/\sigma^2})$, κ_0 为波数, ϑ 为波束天顶角, σ 为地表粗糙度因子。

一般认为植被层的光学厚度主要取决于植被层的含水量, 有研究表明, 从 NOAA 系列气象卫星 AVHRR 资料中提取的全球植被覆盖度(Globe Vegetation Fraction)与植被层含水量有很好的相关性^[15]。实际应用中可以综合应用多种遥感资料实现地表层湿度信息的遥感反演。

利用陆表微波辐射模型可以在已知陆表类型、陆表温度、陆表湿度、植被覆盖状况、植被光学特性等前提下模拟计算陆表的微波辐射特性, 分析星载被动微波遥感仪器对陆表物理参数的响应关系, 正演不同类型地表的微波辐射特性。为了了解地表主要特征量对地表微波辐射特性的影响, 分别对植被、地表粗糙度和地表温度等对地表微波辐射特性的影响情况进行了模拟分析。

2.2 植被对地表微波辐射特性影响分析

为了模拟计算植被对地表微波辐射特性的影响, 假定地表温度为 290K, 地表粗糙度为 0.1。利用可以通过遥感手段获取到的、常用来描述植被特性的归一化植被指数($NDVI$)来刻画植被状况, 利用 Jackson 提出的经验关系推算植被层的含水量^[2], 对 X 波段(10.7GHz)的模拟计算结果表明, 当 $NDVI$ 值小于 0.1 时, 此时地表微波辐射率的极化差为 0.04。当 $NDVI$ 值增加, 两种极化状态的地表微波辐射率的值都有增加的趋势, 但极化差减少, 当 $NDVI$ 值变化到 0.90 时, 极化差减少到 0.018。有植被存在时, 植被遥感特征量 $NDVI$ 值的增加使地表微波极化亮温差减小^[16]。

图 1 是在有、无植被覆盖两种情况下模拟计算得到的地表微波辐射率随土壤体积含水量的变化情

况。无植被覆盖时,地表的微波辐射率就是土壤的微波辐射率;有植被覆盖时,地表的微波辐射率代表的是土壤-植被两层介质顶层的微波辐射率。图1的模拟计算结果表明植被的存在,使得两种极化状态的地表微波辐射率都不同程度的增加了,但减小了地表微波辐射率的极化差,同时也降低了地表微

波辐射率对土壤体积分含水量的响应。图1中也显示了10.7、19.4和37.0GHz三个频点地表微波辐射率随土壤体积分含水量变化的模拟计算结果。结果表明,K波段植被对地表微波辐射特性的影响有共性,植被覆盖条件下,相对来说低频通道地表微波辐射率对土壤体积分含水量更敏感。

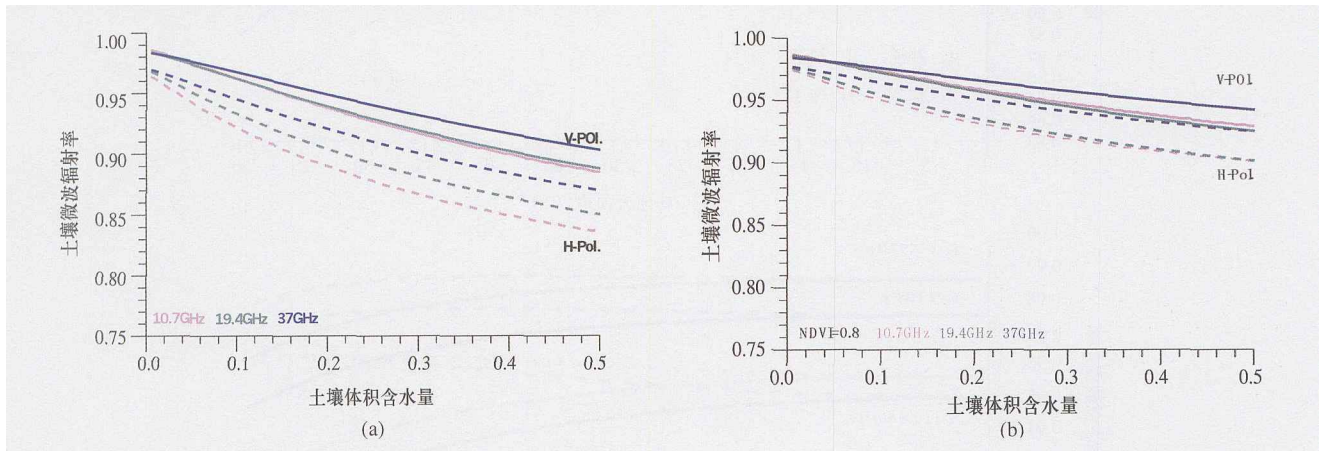


图1 植被对地表不同微波频点微波辐射特性影响的模拟计算

(a) 无植被覆盖;(b) 有植被覆盖。

Fig. 1 The simulation of surface microwave radiance under the effect of canopy

(a) no canopy, (b) with canopy

2.3 地表粗糙度对地表微波辐射特性影响分析

粗糙度一般指地表的几何粗糙度,常用3个量来描述,其中包括地表高程标准差、地表高程相关长度和地表高程相关函数。在我们的模拟计算中使用地表高程标准差(h)来描述地表的粗糙特性, $h = (z^2 - \bar{z}^2)^{1/2}$ ^[6]。在设定地表温度为290K,NDVI为0.2的条件下,模拟计算了从2.0GHz到85.0GHz不同微波频点地表微波辐射率随地表粗糙度的变化情况,模拟计算结果表明地表粗糙特性对地表微波辐射特性的影响具有频散性,不同频率处,地表粗糙度对地表微波辐射特性的影响程度不同^[16]。低频2.0GHz时,一直到地表高度标准差达到2.0,地表微波辐射率对它的响应才趋于缓和;而对89GHz频点而言,当地表高程标准差大于0.5,地表粗糙特性对地表微波辐射率的影响就不明显了,地表微波辐射率随地表高程标准差的变化不大。10GHz附近,粗糙度使地表微波辐射率的极化差增大。

2.4 地表微波辐射随观测角度的变化

不同观测角度情况下,地表的微波辐射特性不

同^[1]。当观测角度连续从0°变化到60°时,完成模拟计算,计算结果见图2。模拟计算时,地表温度设定为290K;地表粗糙度为0.2;植被覆盖条件下模拟计算时NDVI为0.6,其它情况下NDVI为0。模拟计算结果表明,典型地表(冻土、积雪、植被和沙漠)微波辐射率随观测角度的变化特征具有共性,水平偏振量随角度的增大而降低,垂直偏振量随角度的增加增大。观测角在55°附近时,地表微波辐射率的极化差达到最大。所以圆锥扫描的星载被动微波遥感仪器,扫描角大都选择在55°左右。

3 TRMM 微波成像仪 (TRMM/TMI) 简介

1997年日美联合发射的热带降水测量卫星(Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM),是国际科学计划——行星地球使命(Mission to Planet Earth)的重要组成部分。发射TRMM卫星旨在通过对热带降水和地球辐射的空基观测来增进人们对全球气候变化的了解和认识。

TRMM卫星运行在近赤道非太阳同步轨道,卫星高度350km,轨道面倾角35°,轨道周期91.3min。

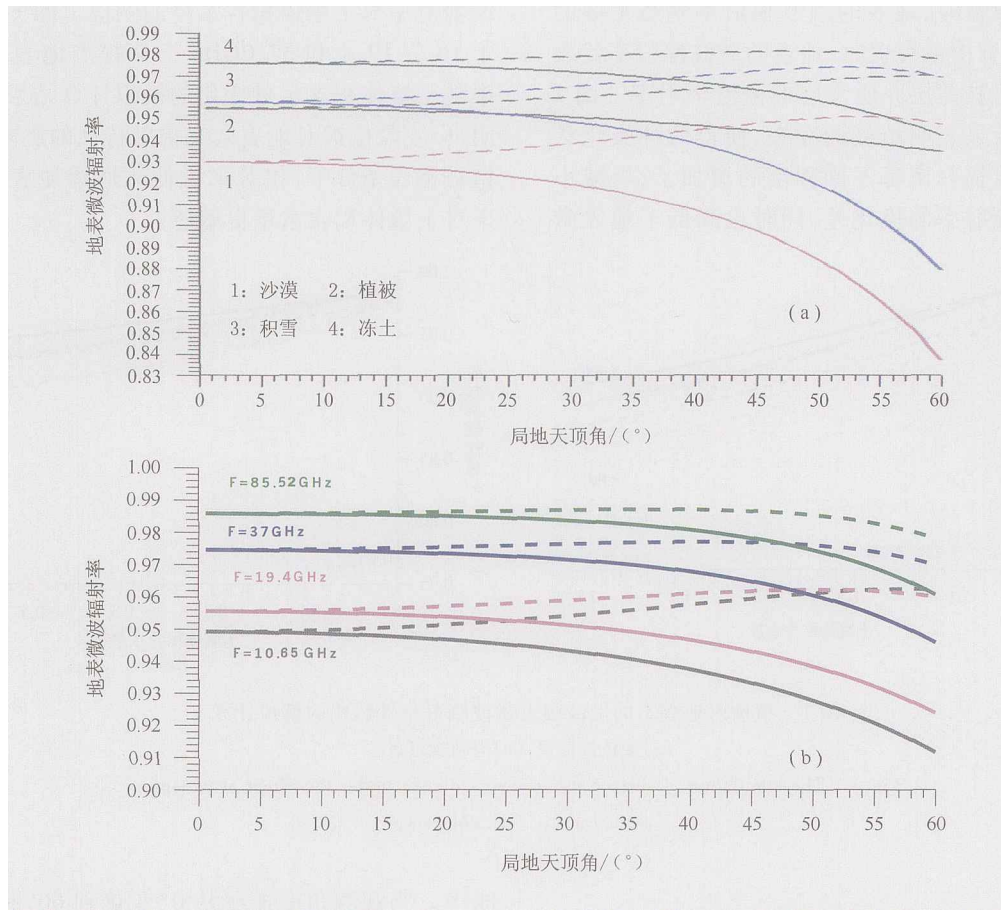


图 2 地表微波辐射特性随观测角度变化的模拟计算

((a)不同类型地表随观测角度的变化;(b)裸土地表在不同频点微波辐射特性随观测角度的变化。
虚线为垂直极化,实线为水平极化。)

Fig. 2 The simulation of surface microwave radiance with the local zenith

(a) different surface types; (b) different microwave frequency. dash line: vertical polarization; slid line: horizontal polarization

TRMM 卫星对地观测的轨道覆盖范围集中在以赤道为中心南北纬 40° 区间。卫星上装载有 5 种遥感探测仪器。其中包括降雨雷达 (Precipitation Radar, PR)、微波成像仪 (Microwave Imager, TMI)、可见/红外扫描辐射计 (Visible Infrared Scanner, VIRS)、云和地球辐射能量系统 (Clouds and Earths Radiance Energy System, CERES) 和雷电成像探测仪 (Ling Imaging Sensor, LIS)。

TRMM/TMI 是由 5 个频点、9 个线性极化通道组成的被动微波辐射测量系统。5 个观测频点中心频率分别为 10.65, 19.35, 21.3, 37.0 和 85.52GHz。其中除 21.3GHz 频点处只有垂直极化通道外,其余 4 个频段均为水平和垂直双极化通道。

TMI 天线轴与仪器的旋转轴成 49° 角,地面入射角为 52.76° ,扫描波束在空间形成锥面,观测的角度为 130° ,每条扫描线地表扫描带宽 758.5km。

表 1 TMI 微波通道主要技术性能指标

Table 1 Technical performance of TMI channels

| 通道号 | 中心频率 /GHz | 极化特性 (V—垂直、H—水平) | 星下点水平分辨率/km |
|-----|-----------|---------------------|-------------|
| 1 | 10.65 | V | 38.3 |
| 2 | 10.65 | H | 38.3 |
| 3 | 19.35 | V | 18.4 |
| 4 | 19.35 | H | 18.4 |
| 5 | 21.3 | V | 16.5 |
| 6 | 37.0 | V | 9.7 |
| 7 | 37.0 | H | 9.7 |
| 8 | 85.52 | V | 4.4 |
| 9 | 85.52 | H | 4.4 |

4 TMI 地表层湿度信息提取试验

前面的模拟计算结果表明被动微波遥感反演地表层湿度信息的最佳频段为 L 波段或频率更低的低频微波通道, TMI 虽然没有 L 波段的频点, 但它具有 X 波段(10GHz)的双极化通道。20 世纪 70 年代升空的 SMMR 微波遥感仪器上, 也曾有过 X 波段的微波通道, 但空间分辨率极差, 超过 100km, TMI 的 X 波段通道空间分辨率可以达到 38km。因此, TMI 升空后, 利用 TMI 的 X 波段微波通道反演地表层湿度信息, 成为研究热点。反演方法大致可分为物理反演和统计反演两类^[17-19]。

在针对 AQUA 上搭载的被动微波遥感仪器 ASMR-E 的地表层湿度信息提取方法研究文献中, Koike 利用 NASA 提供的前苏联 1979 年形成的 SMMR 与地面土壤湿度实际观测资料(每月 8, 18, 28 日)的匹配数据集, 根据 NDVI 将植被覆盖状况分为浓密、稀疏和裸土 3 种情况, 分别在 3 种植被覆盖条件下对比分析了 Jackson 提出的 AMSR-E 土壤湿度反演的回归算法、Palocia 提出的利用 X 和 K 波段被动微波遥感信息估计植被生物特征参数, 利用 X 波段更低频点信息通过统计回归手段建立反演方程的算法、Njoke 提出的经验反演算法和物理反演算法以及 Koike 自己尝试的微波指数统计分析算法。结果表明, 由于 Palocia 算法中考虑了地表的植被覆盖情况, 反演方程中的系数随植被覆盖情况可调, 因此总体来看, 在 3 种植被覆盖条件下 Palocia 算法的反演结果最佳。由此我们认为, 在目前对天气系统微波辐射传输机制的物理理解和数学描述都不成熟的条件下, 利用低频微波通道反演地表层湿度信息时, 合理考虑地表植被状况, 建立随植被状况可调的反演思路最为可取^[20]。

TMI 的 10GHz 微波通道与中国下一代极轨气象卫星 FY-3 上即将搭载的微波辐射计的通道类似, 借鉴 AMSR-E 土壤湿度反演思路, 在 TMI 资料反演地表层湿度算法中, 利用 TMI 对地表层湿度特征比较敏感的 X 波段 10.7GHz 通道资料, 结合光学遥感的归一化植被指数信息, 估计 TMI 低频 X 波段通道像元内的地表层湿度特征。分析过程中借助基础数据集和正演模型, 利用统计手段直接建立地表层湿度信息与 TMI10GHz 微波通道微波亮温间的统计关系, 进而获得地表层湿度的反演结果。

4.1 TMI 地表层湿度信息提取基本原理

TMI 各通道的微波亮温可以概念性地表示为 3 部分: 地表的微波辐射经植被层和大气的衰减到达星载微波辐射计、植被层的微波辐射经大气衰减到达星载微波辐射计以及到达星载微波辐射计的大气介质层中气体及液态水成物的微波辐射。辐射传输方程可表示如下:

$$T_b = T_{bs} * e^{-\tau_c} * e^{-\tau_i} + (1 - \omega_c) * (1 - e^{-\tau_c}) * T_c * e^{-\tau_i} + \sum_i (1 - \omega_{ni}) (1 - e^{-\tau_{ni}}) * T_{ni} \quad (9)$$

其中 T_{bs} 为地表的微波亮温; τ , T 和 ω 为光学厚度、物理温度和单次散射反照率, c 代表植被, r 代表大气中以降水为主的水成物; i 代表大气中降水场的不同层次。陆表微波辐射模型很好地刻画了地表的微波辐射特性, VDISORT 模型与大气模型相结合可以很好地描述大气的微波辐射过程。综合地表和大气微波辐射传输模型, 可以模拟分析 TMI 低频通道的微波辐射特性。

模拟分析结果表明, 对 TMI10.76GHz 的微波通道而言, 一般情况下晴空大气的影晌不大, 最多会产生 4K 左右的亮温偏差, 如果忽略 10GHz 通道大气的影晌, 对 10GHz 通道来说, 地表微波亮温与卫星观测到的亮温相当, 上述方程可以简化为: $T_{b10} = T_{bs10}$, 可以直接利用地表微波辐射模型来从 10GHz 通道微波亮温出发分析地表层湿度间信息。此时, 10GHz 地表的微波亮温 $T_{b10} = T_{bs} * \epsilon_s$, 地表温度的变化会影响地表的微波亮温, 而这一变化并不直接反映地表层湿度信息。模拟计算结果表明, 10GHz 星载微波亮温与地表温度有很高的相关性, 对水平极化通道而言, 相关性达到 58.0%, 垂直极化通道相关性为 73.1%; 但 10GHz 通道的微波极化比 (PI: Polarization Ratio; $PI = (T_{bv} - T_{bh}) / (T_{bv} + T_{bh})$) 与地表温度的相关性很低仅为 -8.0%。因此, 为了克服地表温度的影晌, 利用与地表温度相关性低的 10GHz 通道的微波极化比来作为地表层湿度分析的因变量, 以便有效克服地表温度对地表层湿度信息提取带来的影晌。

针对裸土和不同植被覆盖条件模拟计算土壤湿度及微波极化比, 建立 10GHz 通道微波极化比与地表层湿度间的关系, 模拟计算结果表明, 这种关系满足对数线性关系。关系式:

$$\log(SMC) = \alpha \times PI_{10} + b$$

$$PI_{10} = (T_{b10V} - T_{b10H}) / (T_{b10V} + T_{b10H}) * 100 \quad (10)$$

表 2 地表层湿度与 10GHz 通道亮温指数对数线性关系系数表

Table 2 Coefficients in the equation between surface moisture and brightness temperature index at TMI 10GHz

| 植被覆盖度 | a | b | 相关系数/% |
|-------|------------|----------|--------|
| 0.9 | 0.0281735 | -7.6728 | 90.8 |
| 0.8 | 0.080643 | -6.31936 | 90.3 |
| 0.7 | 0.015078 | -6.26871 | 88.7 |
| 0.6 | 0.01219286 | -6.20155 | 88.35 |
| 0.5 | 0.0114136 | -6.133 | 89.1 |
| 0.4 | 0.0103787 | -6.07004 | 89.89 |
| 0.3 | 0.0096 | -5.9788 | 91.1 |
| 0.2 | 0.00917989 | -5.92269 | 91.8 |
| 0.1 | 0.00906908 | -5.90968 | 91.93 |
| 0.005 | 0.00907036 | -5.91015 | 91.88 |

SMC 为土壤含水量 (SMC: Soil Moisture Content), 表 2 是与不同植被覆盖度相对应的 10GHz 通道微波极化比与地表层湿度间线性关系的系数 a 和 b。

当植被覆盖度在 0.8 到 0.1 间变化时, 植被覆盖度与系数 a 满足对数关系, 相关系数为 82%; 与系数 b 间满足线性关系, 相关系数为 98.1%。关系式分别为:

$$\log(a) = 1.11423 * f_g - 4.89878$$

$$b = -0.638933 * f_g - 5.81346 \quad (11)$$

当植被覆盖度高于 0.8 时, 可以认为 TMI 像元为完全植被覆盖; 低于 0.1 时, 可以近似认为 TMI 像元为裸土像元。对于裸土像元可以借助红外遥感信息反演像元的物理温度, 进而反演地表微波辐射率, 估计地表层湿度信息; 对于完全植被覆盖像元只能借助植被覆盖条件下的地表微波辐射模型, 估计地表的湿度特征。

4.2 反演试验及结果分析

根据上述反演原理, 形成 TMI 地表层湿度信息反演流程图(图 3)。

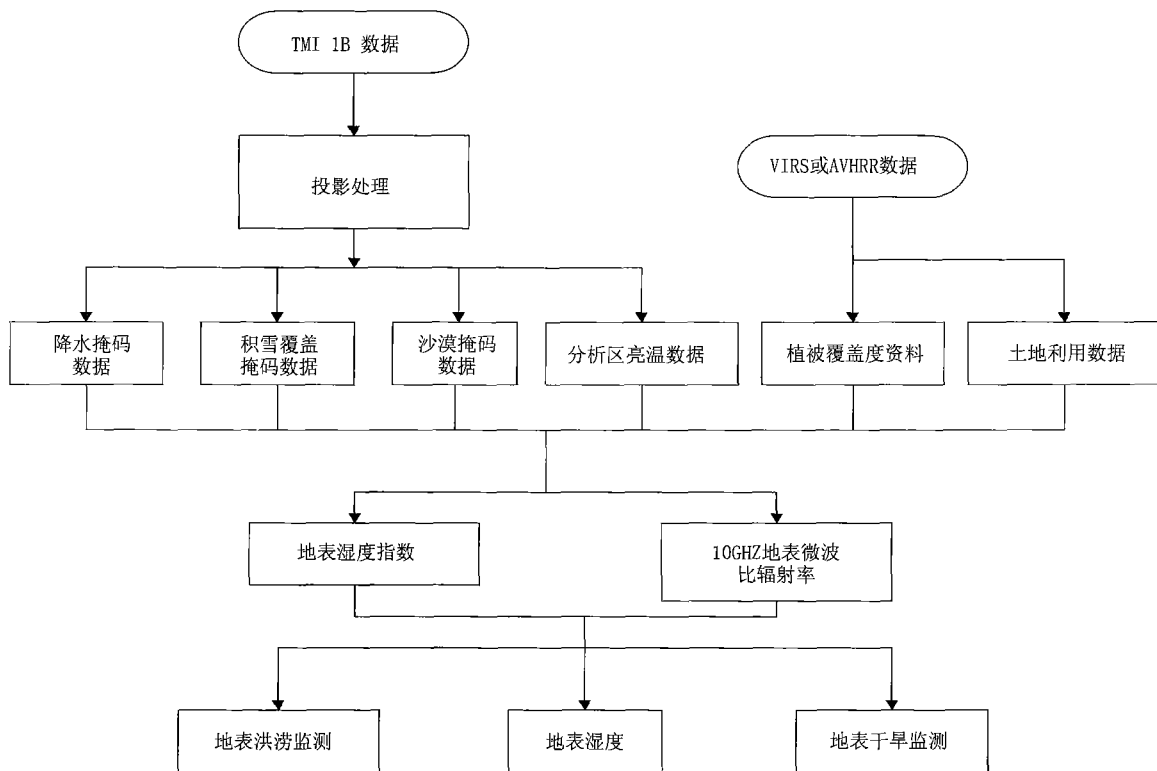


图 3 TMI 资料处理信息流程图

Fig. 3 TMI data procession flow chart

利用 TMI 提取地表层湿度信息时,首先对图像进行分类处理,形成强降水、积雪、沙漠区掩码文件,对上述特殊区域不做反演计算。同时借助光学遥感信息生成分析区动态的植被覆盖和土地利用数据。反演试验中用到了 1998 年 HUBEX 实验区 7 月上旬的植被指数分布图,从这一基础数据出发,得到植被覆盖度分布数据;同时利用红外通道遥感数据通过植被指数阈值技术反演估算地表温度。对于植被覆盖度介于 0.1 到 0.8 之间的像元,直接利用前面 PI 的线性关系来估算地表的湿度;裸土和植被覆盖像元,将其它途径得到的 TMI 像元的地表温度、地表粗糙度等信息作为地表微波辐射模型的输入量,代入地表微波辐射模型,叠代计算得到地表层湿度的估计值,结果见图 4。图中等经纬度投影,左上角位置为 $110^{\circ}\text{E}, 40^{\circ}\text{N}$; 网格距为 0.01° 。

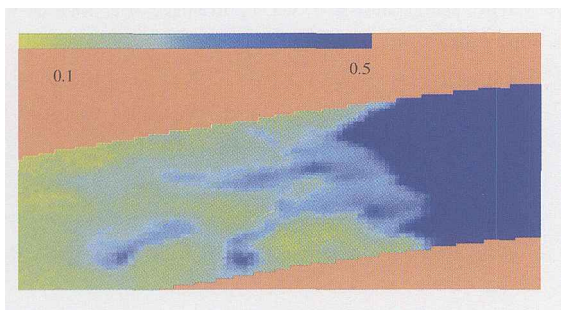


图 4 1998-07-04 HUBEX 试验区 TMI 土壤体积含水量反演结果图

(图中深蓝色区域为水体;红色区域为卫星轨道未覆盖区域;其它色调参见图中色标)

Fig. 4 Soil moisture retrieval from TMI over the HUBEX IOP area July 4, 1998
(blue-black; water; red; data gap.)

HUBEX 试验中在淮河史灌河流域设置了水文外场加强观测,在蒋家集、梅山和鲇鱼山设置了地面土壤湿度观测点,使用澳大利亚 ICT 公司生产的 MP-308&406 土壤水分探测仪,获取土壤 0, 15, 30, 45, 60 和 90cm 不同深度处土壤的体积含水量。蒋集测站的位置为 $(115^{\circ}44', 31^{\circ}18')$, 鲇鱼山的位置为 $(115^{\circ}22', 31^{\circ}44')$ 。图 7 为梅山站 0cm 土壤的体积含水量测值从 5 月 21 日到 8 月 31 日变化情况。6 月 28、29 日试验区有一次降水过程,7 月 2 日又有一次降水过程。图中的箭头位置为 6 月 28 日,降水使土壤湿度发生大幅度增加,在此基础上,7 月 2 日的降水又使土壤湿度有一个小的跳涨,之后在没有进一步降水过程的条件下,土壤湿度随时间缓慢下

降。从梅山站 0cm 土壤体积含水量的测值结果来看,土壤湿度与降水有很好的响应,测值合理可用。

将地面测站鲇鱼山所在像元的反演结果与测站观测结果进行对比分析结果见图 5。图中深蓝色粗线为 6 月 1 日到 7 月 4 日的反演结果,绿线为梅山地面 0cm 的观测结果,粉线为蒋集地面 0cm 的观测结果,灰线为鲇鱼山地面 0cm 的观测结果。图中横坐标上标出的第 45 天对应着 7 月 2 日。分析结果表明反演结果对 6 月 28 和 29 两日的降水过程也有很明显的反应,土壤湿度产生大幅增加,之后 7 月 2 日的降水过程又使土壤湿度有一定的增加。6 月里反演结果与地面观测结果间有较大偏差。

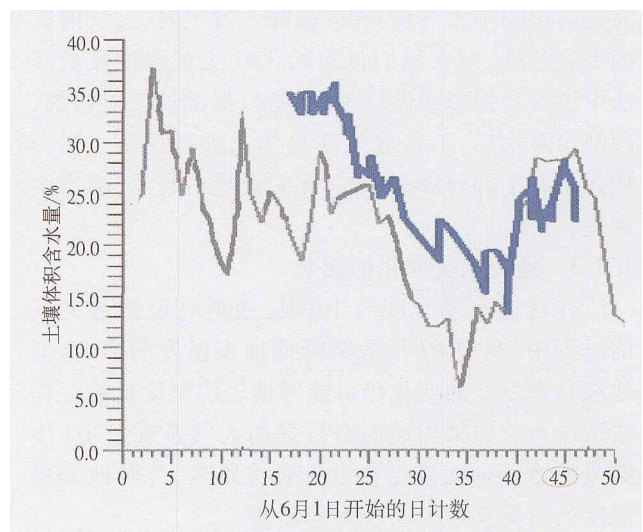


图 5 TMI 反演结果与地面 MP-308&406 土壤水分探测仪实际观测结果的分析

(图中深蓝色粗线为 6 月 1 日到 7 月 4 日的反演结果;灰线为鲇鱼山地面 0cm 的观测结果。图中横坐标上标出的第 45 天对应着 7 月 2 日。)

Fig. 5 Controlled analysis between surface moisture retrieval from TMI and observation by MP-308&406
(blue-black line; retrieval result from June 1 to July 4; gray line: 0cm observation at Nianyushan 45th day is July 2.)

4.3 TMI 地表层湿度信息提取误差讨论

在上面的反演结果与地面观测结果间的对比分析中可以看到,反演结果和地面观测结果都对强降水引起的地表土壤湿度的大幅度增加敏感,但遥感反演结果对土壤湿度的自然衰减与地面观测结果相比,有明显的不一致性,分析误差产生的原因,可能有如下几个方面:

4.3.1 空间分辨率的影响

TMI 低频 10GHz 微波通道观测到的是约 38km

空间分辨率条件下,像元的综合情况,而地面测站,只代表一个点的情况。二者观测对象上的差异,产生之间的偏差。一般自然条件下土壤湿度的增加和降水有关,当试验观测区内发生大范围降水时,大范围土壤湿度明显增加,这时 TMI 反演到的像元一定面积内的土壤湿度与测站点的观测结果就比较一致。一般 TMI 像元内地表的地势、物理特性等都很难以达到均一的情况,因此强降水过后,退水情况差别很大,这样就产生了像元内综合情况与像元内孤立点间土壤湿度结果间的偏差。

4.3.2 云雨大气的影响

一般情况下晴空大气对 10GHz 微波通道的微波辐射影响不大,但当有较强降水发生时,大气的影 响不容忽视,但在我们目前的 TMI 土壤湿度反演算法中没有对强降水做订正,只是根据微波散射指数,判断出降水后,不再对强降水像元进行反演。但当像元中有小部分降水区时,不对此进行订正,会产生误差。

4.3.3 地表温度变化的影响

在建立土壤湿度与 10GHz 通道亮温指数关系的过程中,利用 PI 指数来降低地表温度的影响,但地表物理温度的变化仍可能对地表层湿度反演存在残留误差。如果当地面有较强的天气系统过境(冷锋或暖锋),地面温度会发生较大跳变,此时地表层湿度的反演会产生比较大的偏差。

上面分析的误差产生原因也是今后开展 TMI 及相近遥感仪器 AMSR-E 地表层湿度遥感反演研究中要着力探讨解决的问题。

5 结 论

围绕地表层湿度的定量遥感反演,上述研究工作中尝试使用了 TMI 低频 10GHz 资料的亮温统计反演技术,提取地表层湿度信息,选取地面观测的土壤湿度资料进行了反演结果的对比分析,得到如下几点结论:

(1) 与 10GHz 通道微波亮温相比,极化比(PI)能更有效地克服地表温度的影响,以 PI 为因变量,利用正演模拟分析技术,可以建立 PI 与地表层湿度间的相关关系,建立反演方程。

(2) TMI 微波像元覆被特性的差异对地表层湿度信息提取有影响,建立系数随像元植被覆盖度可调的反演方程,有助于提高地表层湿度信息提取的精度。

(3) 正演模拟计算统计分析结果表明,TMI 低频 10GHz 微波极化比与土壤湿度间依 TMI 像元植被覆盖度而变的线性统计反演关系中,增益系数是像元植被覆盖度的对数函数,截距系数是植被覆盖度的线性函数。

(4) HUBEX 试验区中 TMI 资料地表层土壤湿度反演结果与地面观测结果间在土壤湿度急剧增加阶段一致性很好,在土壤湿度自然缓慢衰减过程中,二者间偏差较大,但变化的趋势上仍然具有一致性。

致 谢 日本 NASDA 提供了 HUBEX 试验区的 TRMM/TMI 资料,在此致谢!

参 考 文 献 (References)

- [1] Ulaby F T, Moore R K, Fung A K. Microwave Remote Sensing: Active and Passive[M]. Vol. I, Reading, MA: Addison-Wesley, 1981.
- [2] Jackson T J, Schmugge T J, Wang J R. Passive Microwave Remote Sensing of Soil Moisture under Vegetation Canopies[J]. *Water Resources Research*, 1982, **18**:1137—1142.
- [3] Jackson T J, Vine D M Le, et al. Soil Moisture Mapping at Regional Scale Using Microwave Radiometry: the Southern Great Plains Hydrology Experiment[J]. *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.*, 1999, **37**:2136—2151.
- [4] Njoku E, Li L. Retrieval of Land Surface Parameters Using Passive Microwave Measurements at 6—18GHz[J]. *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.*, 1999, **37**:79—93.
- [5] Paloscia S, Pampaloni P. Microwave Polarization Index for Monitoring Vegetation Growth[J]. *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.*, 1988, **GE-26**(5): 617—621.
- [6] Choudhury B J, Schmugge T J, Chang A T C, et al. Effect of Surface Roughness on the Microwave Emission of soils[J]. *J. G. R.*, 1979, **84**:5699—5705.
- [7] Dobson M, Ulaby F T, et al. Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil, II, Dielectric Mixing Models[J]. *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.*, 1985, **GE23**: 35—46.
- [8] Jackson T J, Schmugge T J. Vegetation Effects on the Microwave Emission from Soil[J]. *Remote Sensing of Environ.*, 1991, **36**: 203—212.
- [9] Koike T, Fujii H, Ohta T et al. Development and Validation of TMI Algorithms for Soil Moisture and Snow[A]. Proceedings of a symposium on Remote Sensing and Hydrology[C]. 2001.
- [10] Zhao B L, Ding Y H. Study of Energy and Water Cycle over Huaihe River Basin (1) [C]. Beijing: Meteorology Press, 1999. [赵柏林,丁一汇. 淮河流域能量与水分循环研究(一)[C]. 北京:气象出版社,1999.]
- [11] Gu S, Gao H, Zhu Y, et al. Remote Sensing Land Surface Wetness by Use of TRMM. TMI Microwave Data[J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2002, **80**(1—4): 59—64.
- [12] Jin Y Q, Remote Sensing Theory of Electromagnetic Scattering

- and Thermal Emission[M]. Beijing: Science Press, 1993. [金亚秋. 电磁散射和热辐射的遥感理论[M]. 北京:科学出版社,1993.]
- [13] Jin Y Q. Information of Electromagnetic Scattering and Quantitative Remote Sensing[M]. Shanghai: Fudan University Press, 2000. [金亚秋. 电磁散射信息与定量遥感[M]. 上海:复旦大学出版社,2000.]
- [14] Weng F. Microwave Land Emissivity Model Developed for Satellite Data Assimilation and Remote Sensing Applications[A], Technical Proceedings of the Eleventh International ATOVS Study Conference, 2000.
- [15] Gutman G, Ignatov A. The Derivation of the Green Vegetation Fraction from NOAA/AVHRR data for Use in Numerical Weather Prediction Models[J]. *INT. J. Remote Sensing*, 1998, **19**(8): 1533—1543.
- [16] Gu S Y, Gao H L, Zhu Y J, *et al.* The Application of TMI Polarization Ratio PR in Flooded Area Detecting and Classification [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2004, **8**(2): 110—117. [谷松岩, 高慧琳, 朱元竟等. TMI 被动微波遥感资料用于地表洪涝特征分析试验[J]. 遥感学报, 2004, **8**(2): 110—117.]
- [17] Njoku E G. AMSR Land Surface Parameters Algorithm Theoretical Basis Document [R] V3.0, 1999.
- [18] PALOSCIA S, Macelloni G, Santi E, *et al.* A Multi-frequency Algorithm for the Retrieval of Soil Moisture on a Large Scale Using Microwave Data from SMMR and SSM/I Satellite[J]. *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens., Special Issue on Soil Moisture*, 2001, **39**(8): 1655—1661.
- [19] Liu S F, Liu Y A, Wang W J, *et al.* Retrieval of Crop Biomass and Soil Moisture from Measured 1.4 and 10.65GHz Brightness Temperatures [J]. *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.*, 2002, **40**(6): 1260—1268.
- [20] Koike T. AMSR Soil Moisture Algorithm Development and Validation, http://sharaku.eorc.nasda.go.jp/AMSR/products/pdf/alg_des.pdf, 2002.

Retrieving Soil Moisture from TRMM/TMI

GU Song-yan^{1,2}, LI Wan-biao¹, ZHANG Wen-jian²

(1. Atmospheric Department, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China;

2. National Satellite Meteorology Center, Beijing 100081, China)

Abstract: Remote sensing of soil moisture by microwave radiometry has been a subject of intensive studies in the past two decades. Following the studies done before, a new approach to retrieve surface layer soil moisture is accomplished in this paper, in which the passive microwave data of TRMM/TMI and ground observation data have been used to retrieve surface soil moisture. Surface and atmosphere microwave radiance transfer models have been applied to analyze the effects of surface and atmosphere, e. g. scan angle, surface roughness, and canopy layer. In the retrieval technique for TMI low frequency, variable gain and intercept appeared. Multi-spectrum remote sensing information, surface digital elevation measurement data, and mixed-pixel information were involved. The consistency was obtained between the retrieval results and ground observation or HUBEX IOP data.

Key words: passive microwave; forward simulation; surface soil moisture remote sensing retrieval