

卫星被动微波遥感土壤湿度研究进展

王磊 文军 张堂堂 刘蓉 刘远永

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所西部气候与环境灾害实验室, 兰州 730000)

摘要 土壤湿度是控制陆地和大气间水分和能量交换过程的重要变量, 而被动微波遥感是众多监测土壤湿度技术中最有效的手段之一。文中概述了被动微波反演土壤湿度的物理原理, 重点介绍了被动微波反演土壤湿度的主要模型。在对不同模型进行比较分析后, 基于不同传感器类型分别列举了当今发展较完善的 3 个典型算法: ① Njoku 和 Li 基于 AMSR 的多通道同时反演土壤湿度、土壤温度、植被含水量的方法; ② Owe 等基于 SMMR 利用极化差异指数同时反演土壤湿度和植被光学厚度 2 个参数的方法; ③ Wen 等基于 SSM/I 同时反演土壤湿度和土壤温度的方法。对被动微波遥感土壤湿度研究中目前所存在的问题和发展前景进行了一些探讨。

关键词 被动微波遥感 土壤湿度 反演算法

引言

土壤湿度又称土壤含水量, 是表示土壤含水量的一种方法, 以单位土样的含水量与绝对干土重的比值表示, 常用单位有 %、g/kg、g/cm³。农业气象工作中常用烘干称重法测定土壤重量含水率, 野外观测和自动站则用土壤水分仪等。由于土壤湿度存在较大空间异质性, 在小区域内用传统称重法测量土壤湿度是可行的, 对于较大区域则非常困难。令人欣慰的是, 近 40 年来空间微波技术的迅猛发展, 在全球范围内快速、准确地监测土壤湿度已成为可能。

微波遥感能直接捕获土壤的介电性能, 而土壤介电性能很大程度上取决于土壤含水量。土壤介电常数的实部会从干燥土壤时的 4 变化到水的 80, 因此可从微波遥感观测资料中提取土壤含水量的信息^[1]。微波遥感时间分辨率高, 不受光照和气候条件的限制, 能穿透云层, 对植被覆盖物和松散层等也具有一定的透射力, 因而适合土壤湿度大面积动态监测。目前国外已有多个星载微波辐射计用于被动微波土壤湿度研究。按运行时间顺序有: 扫描式多通道微波辐射 (Scanning Multichannel Microwave Radiometer, SMMR), 微波辐射计特别传感器 (Special Sensor Microwave/Imager, SSM/I), 热带降雨

测量卫星 (Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM) 上的微波成像仪 (TRMM Microwave Imager, TMI), 高级微波扫描辐射计 (Advanced Microwave Scanning Radiometer, AMSR/AMSR-E) 等。研究表明, L 波段 (1.1~1.7 GHz) 分辨率高, 土壤穿透性强, 最适于土壤湿度遥感^[2~4]。1999 年欧洲航天局通过的土壤湿度和海洋盐度计划 (Soil Moisture and Ocean Salinity, SMOS) 专门为监测全球土壤湿度和海洋表面盐度而设计, 传感器为 Y 形二维干涉双极化 1.4 GHz 辐射计^[5]。预计 SMOS 在 2008 年搭载升空, 这将极大地推动全球土壤湿度研究的发展。

我国被动微波遥感土壤湿度的研究开始于 20 世纪 80 年代, 无论在理论研究和实际应用方面都取得了较大的成绩^[6~10]。近年来, 也作了不少有益的研究工作, 例如金亚秋^[11]运用星载微波 SSM/I 的 7 个通道辐射亮温数据研究了我国东北、华北农田的土壤水分, 提出利用微波数据生成的散射指数与极化指数分析农田微波辐射特征, 用以监测农作物生长和平原土壤湿度状况。高峰等^[12]应用 TMI 数据和全球能量水循环之亚洲季风青藏高原试验研究加强观测期的地面观测数据, 改进和发展了一个被动微波遥感反演地表温度、土壤湿度和植被含水量的

中国科学院知识创新工程项目 (KZCX3-SW-229) 资助

作者简介: 王磊, 男, 1967 年生, 博士研究生, 研究方向为陆面过程与微波遥感, Email: lwang@lzb.ac.cn

收稿日期: 2007 年 11 月 12 日; 定稿日期: 2008 年 6 月 11 日

三维查表算法,并在青藏高原中部中尺度范围内成功地进行了反演试验。谷松岩等^[13]利用 TRMM/TMI 低频微波通道微波极化指数,对 1998 年长江流域洪涝区进行了地表洪涝特征分析。

本文首先概述地表微波辐射传输理论,之后介绍被动微波反演土壤湿度的主要模型,并基于不同传感器分别列举了 3 个典型算法,最后对该领域所存在的问题和未来的发展前景进行了一些讨论,试图深层次展示其发展动态,为了解和掌握微波遥感土壤湿度技术领域的历史、现状及未来趋势提供科学的参考依据。

1 微波辐射传输理论

许多学者阐述了微波辐射传输的相关理论^[14~19]。在微波波段,Plank 定律近似为 Rayleigh-Jeans 公式,微波辐射亮温简单表示为:

$$T_b = e_s T \quad (1)$$

其中, T_b 为亮温, e_s 为地表发射率, T 为地表温度。

研究表明,低频辐射($f < 10$ GHz)容易穿透云雨层、植被层,比较适合于土壤湿度监测,而高频辐射($f > 15$ GHz)受天气影响较大,在反演时需对大气衰减进行校正。

1.1 裸露地表的微波辐射传输理论

对于光滑地表,在不考虑辐射透射的情况下,土壤微波发射率可以表示为:

$$e_p = 1 - R_p \quad (2)$$

式中,下标 p 为极化方式,当 p 为 h 时表示水平极化, p 为 v 表示垂直极化; e 为光滑地表发射率; R 为光滑地表反射率。传感器水平极化和垂直极化的表面微波反射率由 Fresnel 反射方程表示。

地表粗糙度增加了发射率但也减少发射率对土壤湿度的敏感度。考虑粗糙度时,广泛用经验模型^[20]:

$$R_p^* = [(1 - Q)R_p + QR_p] \exp(-h/\cos^N u) \quad (3)$$

式中, R^* 是粗糙地表的反射率, R 是光滑地表的反射率, u 为传感器的观测角度, Q 、 N 、 h 分别是与地表粗糙度有关的参数,其中 h 是与均方根地表高度变化和和相关长度有关的经验参数。

1.2 植被覆盖地表的微波辐射传输理论

1.2.1 低频波段

对于植被覆盖地表,土壤微波辐射被植被层削

减,同时植被散射也增加了辐射。在低频波段,这个影响从辐射传输方程的一阶近似解可得^[21]:

$$T_{b(p)} = T_{sp} e_{sp} \Gamma_p + (1 - \omega_p)(1 - \Gamma_p) T_c + (1 - \omega_p)(1 - \Gamma_p) T_c (1 - e_{sp}) \Gamma_p \quad (4)$$

式(4)中忽略了大气衰减的影响,其中: T_b 为亮温, ω 为植被单次散射反照率, Γ 为植被透射率, T_s 地表有效温度, T_c 为植被温度, e_s 地表发射率,下标 p 表示极化状态。

由辐射传输方程可知卫星接收到的总辐射由 3 部分组成:第 1 部分是被植被削弱后的土壤辐射,第 2 部分是植被冠部直接向上辐射,第 3 部分是植被向下的辐射经地面反射再次由植被削弱后的辐射。

植被透射率 Γ 定义为关于植被光学厚度 τ 和入射角 u 的函数^[19]:

$$\Gamma = \exp(-\tau/\cos u) \quad (5)$$

由式(4)、(5)所建立的模型被称为 $\tau\omega$ 模型,是基于植被的光学厚度 τ 和单次散射反照率 ω 这两个参数,它们分别表征植被的衰减属性以及在植被冠层的散射效果。

1.2.2 高频波段

被动微波测量的是大气层顶辐射,它主要受土壤、植被、大气的影。在高频波段,土壤辐射强度相对减小,植被和大气中水汽的影响更加显著。

Kerr 和 Njoku^[22]提出了大气-植被-土壤辐射传输方程,假设在大气-植被界面上没有反射:

$$T_{b(p)} = T_{au} + \Gamma_{au}(T_{ad} + T_{sky}\Gamma_{ad})(1 - e_{sp})\Gamma_c^2 + \Gamma_{au}[e_{sp} T_c \Gamma_c + T_c(1 - \omega_p)(1 - \Gamma_c)] [1 + (1 - e_{sp})\Gamma_c] \quad (6)$$

其中, T_{au} 为向上大气温, T_{ad} 为向下大气温, T_c 为有效土壤温度 T_c 为植被温度, T_{sky} 为宇宙背景温度, Γ_{au} 为向上大气透射率, Γ_{ad} 为向下大气透射率, Γ_c 为植被透射率,其它参数同式(4)。

卫星接收到的辐射包含 5 个组成部分:① 直接向上的大气辐射;② 经植被和大气削弱的地表辐射;③ 经植被和大气减弱的向下大气辐射和宇宙背景辐射;④ 经大气减弱的植被向上辐射;⑤ 经植被和大气减弱的被地表散射的植被向下辐射。

2 土壤湿度反演估算方法

由辐射传输方程可知,地表亮温主要受土壤湿度、植被、地表温度和大气等因素影响。如何运用最少的辅助信息(地面气象要素、地表参数、遥感指数

等)是反演过程的关键。近几十年来,众多学者在这方面进行了研究实践,各种土壤反演算法也应运而生,提出了各种解决方案。

归纳各种土壤湿度反演方法,主要有 3 种算法:①数理统计;②神经网络;③正向模型^[16]。

对于低频,Wigneron 等根据植被和地表温度的影响把正向模型反演土壤湿度方法归结为 4 种^[16]:①地表覆盖分类^[23~25];②辅助遥感指数^[26~30];③2 个参数同时反演^[31,32];④3 个参数同时反演^[14,15]。

高频主要针对 SSM/I,目前只有 SSM/I 具有大面积、长序列提取土壤湿度信息的潜力^[33]。许多学者为此做了大量工作,并取得了许多有价值的研究成果^[34~36]。

土壤湿度反演方法众多,几十年来经历了由简单到复杂,从经验半经验到明确物理机制的算法过程,同时还涌现出了大量构思巧妙、算法独到、简洁实用的算法个例。以下介绍的算法着重展示正向模式反演中 2 个参数和 3 个参数同时反演的算法。它们分别代表不同传感器的土壤湿度算法,并且算法相对成熟,具有典型性。

2.1 基于 AMSR 的多通道 3 个参数同时反演算法

早在 AMSR 发射前,围绕着 AMSR 的土壤湿度算法和验证工作就已经展开,其中创建算法代表

人物有 Jackson、Paloscia、Koike 和 Njoku 等,最终 Koike 等^[37]对这些算法进行了综述和比较,选定 Njoku 和 Li^[14]的算法作为标准算法。

该算法利用 6.9、10.7 和 18.7 GHz 双重极化 6 个通道的亮温同时反演 3 个参数(土壤湿度、土壤温度、植被含水量)。基本思路为:反演参数对于亮温的敏感度存在不同差异,对于某个待反演的参数,如果其它参数不变,其敏感度只是频率和极化状态的函数。本着这一思想首先给定反演参数一个“基值”,如土壤湿度 $W_{(0)} = 0.15 \text{ g/cm}^3$,地表温度 $T_{e(0)} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$,植被含水量为 0,同其它已知参数一起代入辐射传输方程,模拟出每个通道亮温值,用最小二乘 Levenberg-Marquardt 迭代算法得出反演参数。在具体反演过程中,土壤体积密度和质地参数用试验数据提前给出,并假设地表温度、植被温度和地表有效温度相等,即 $T_e = T_c = T_{\text{eff}}$ 。图 1 给出了这种反演方法的流程图。这种模型收敛速度快,反演结果较好,但当像元含有雪盖、水体或者当某个参数敏感度较低时,其反演效果较差。例如,当植被覆盖较浓密,植被含水量接近 1.5 kg/m^2 时,其亮温敏感度几乎为 0,这种情况下所反演出的植被含水量误差较大,其结果实际上是在 6.9 GHz 上所在像元的平均值,土壤湿度和地表温度数值也是在各自垂直极化状态下所测相应数值。

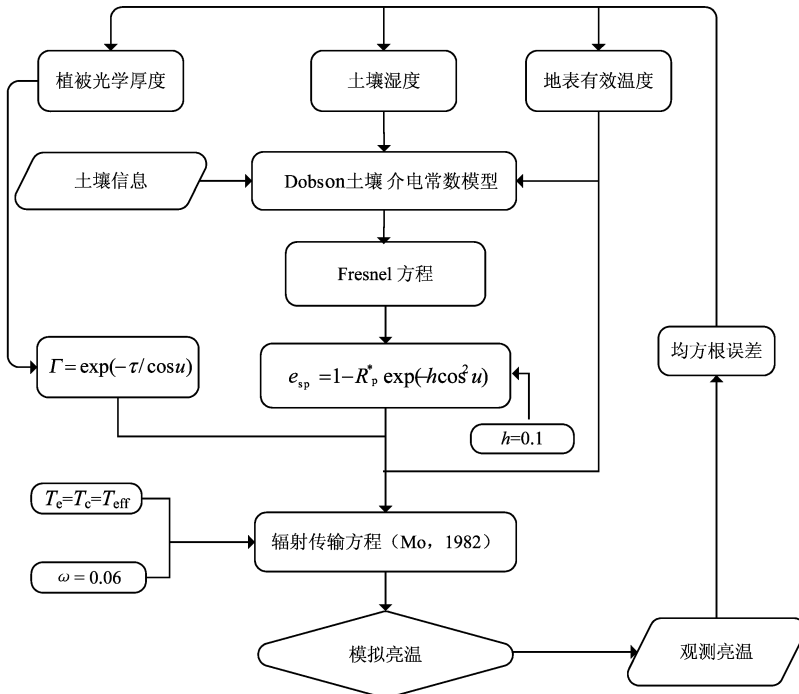


图 1 Njoku 和 Li 发展的基于 AMSR 的 3 个参数同时反演方法流程

2.2 基于 SMMR 的双极化 2 个参数同时反演算法

Owe 等^[32]利用 SMMR 多通道亮温资料使用辐射传输方程,同时反演了土壤湿度和植被光学厚度,其中植被参数通过微波极化差异指数计算获得。

早期 Choudhury 等^[38]把微波极化差异指数与植被含水量联系起来,后来一些学者又做了进一步的发展研究,利用微波极化差异指数来计算植被含水量。微波极化差异指数(MPDI)定义为:

$$I_{MPD} = 2(T_{bv} - T_{bh}) / (T_{bv} + T_{bh}) \quad (7)$$

研究表明,在 37 GHz 时,亮温主要受植被影响,受地表辐射影响较小,因此 MPDI 被认为是计算植被密度的理想指数。而在 6.6 GHz 时,MPDI 不仅包含植被信息,还含有许多土壤辐射信息。Owe 等据此,用 MPDI 计算植被光学厚度 τ 。

在反演过程中,假设土壤多孔性和萎蔫点已由试验数据给出;地表温度可以通过与 37 GHz 垂直极化亮温的高度相关性统计获得,或者直接使用地

面实测数据;在低频时粗糙度为 0,利用夜间植被、土壤和大气之间能量平衡这一特性,令 $T_c = T_e = T_{eff}$ 。经过以上处理,辐射传输方程(4)只剩植被光学厚度和土壤发射率 2 个未知参数了,联立两种极化状态下的方程,通过迭代方法计算出 2 个未知数,最终利用 1.1 节介绍的理论,计算出土壤湿度。

把式(7)代入辐射传输方程(4),植被项用 MPDI 和土壤介电常数取代后,实际上未知项变量只剩土壤发射率了。因为水平极化亮温对土壤湿度较敏感,所以使用水平亮温来求解土壤发射率,最后通过 Fresnel 方程求出土壤介电常数 k 。由于植被光学厚度和土壤发射率的函数均包含介电常数,因此土壤湿度反演问题最终变成如何优化介电常数问题,它可通过使用 Brent 方法的非线性迭代程序,用正向反演方法求解水平极化下的辐射传输方程解决,其流程见图 2。

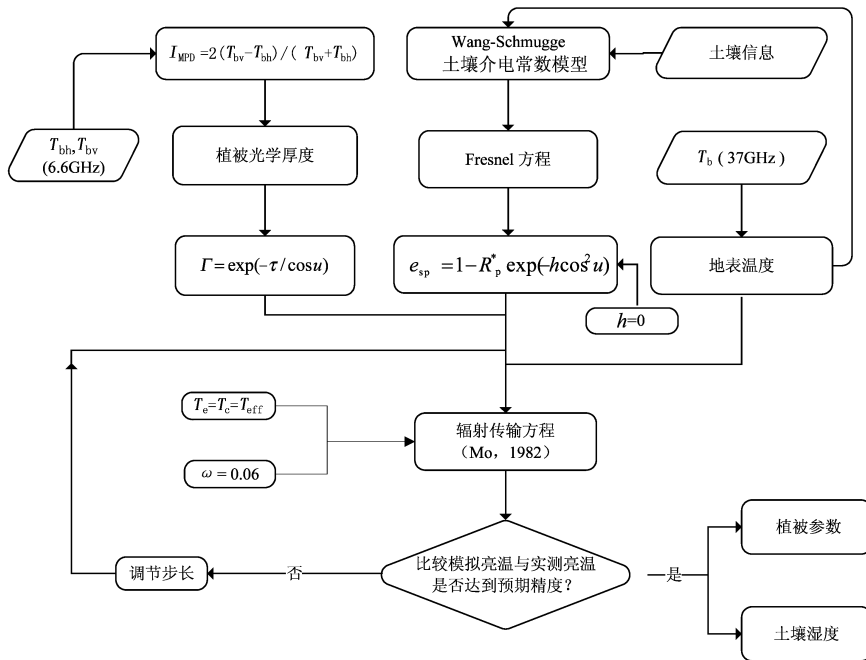


图2 Owe 等发展的基于 SMMR 的 2 个参数同时反演方法流程

Owe 等的方法无需任何有关土壤湿度和植被特征地面数据作校准,并且可以应用到其它波段。De Jeu 已成功地把这种算法应用到大陆尺度区域,并取得了令人满意的效果^[39]。

2.3 基于 SSM/I 的双极化 2 个参数同时反演算法

Wen 等^[35]利用 SSM/I 的 19.4 GHz 双重极化亮温资料基于辐射传输方程(6)同时反演土壤湿度

和土壤温度 2 个参数。其中单次散射反照率和植被含水量(VWC)为 2 个关键参数,单次散射反照率采用已经发表的相关数据。

根据 37 GHz 的亮温含有 VWC 信息这一事实,用 37 GHz 的极化差异指数计算 VWC 成为 Wen 等反演土壤湿度方法的关键。计算出 VWC 后,再通过建立水平极化和垂直极化 2 个方程组,运用迭代算法

就可以求出 2 个未知变量土壤发射率 ϵ_s 和土壤温度 T_e , 从而最终反演出土壤湿度。经过与 2002 年土壤湿度试验 (Soil Moisture Experiments in 2002, SMEX02) 的实际资料对比验证, 土壤湿度估计标准误差仅为 5.49%, 算法取得了明显的成功。以下简单介绍其算法过程, 主要流程见图 3。

在传输方程(6)中, 对于大气参数, 假设大气透射率 $\Gamma_{au} = \Gamma_{ad} = \Gamma_{atm}$, 其中 Γ_{atm} 为大气平均透射率, 使用 SMEX02 中的探空资料和相关经验模式可以预先计算出 T_{au} 、 T_{ad} 、 T_{atm} , 其中 T_{atm} 为大气平均温

度。对于植被参数, 假设所有的植被参数与极化方式无关, 利用清晨地气、植被辐射平衡等特性, 令 $T_e = T_c$, 植被单次散射反照率 ω 指定为 0.045。

VWC 通过极化差异指数求出后, 应用 Jackson 和 Schmugge^[40] 的经验公式求出植被光学厚度 τ , 最后代入式(5)求出植被透射率 Γ_v 。

通过以上假设和计算, 方程(7)中未知变量仅有土壤发射率 ϵ_s 、土壤温度 T_e 。联立 2 种极化状态下的方程, 应用迭代方法计算出 ϵ_s 和 T_e , 最终利用 1.1 节介绍的理论, 计算出土壤湿度。

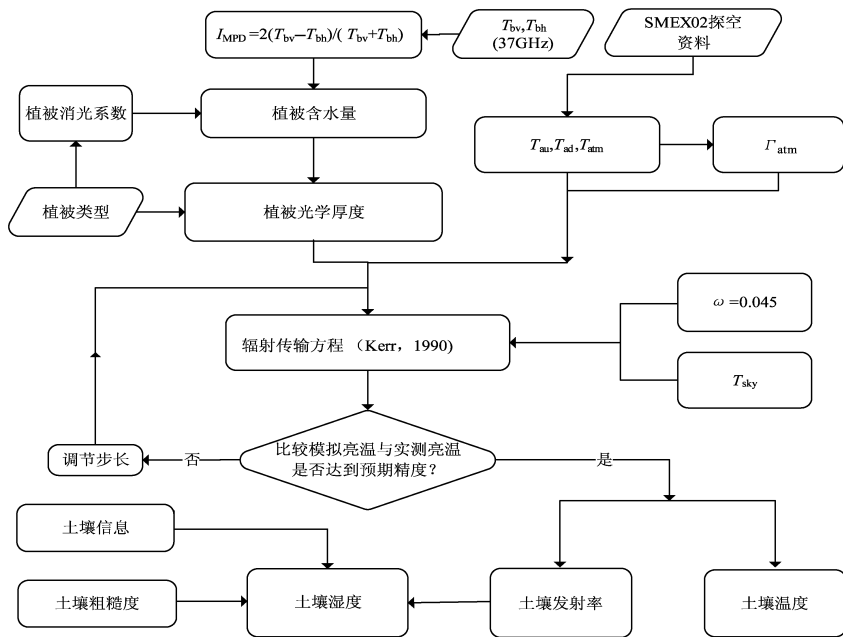


图 3 Wen 等发展的基于 SSM/I 的 2 个参数同时反演方法流程

2.4 反演算法比较

以上 3 个典型算法本质上均遵循地表辐射传输方程, 只是假设条件和输入参数不同, 并在实际应用中取得良好效果。但是, 如果应用到全球范围, 还存在许多困难。

Njoku 的算法充分利用多个通道的亮温资料同时反演土壤湿度、土壤温度、植被含水量 3 个参数, “基值”概念的引入提高了模型收敛速度。但是, 不同频率所探测参数的深度不同(土壤湿度探测深度、光学厚度), 在全球应用中, 采用多波段方法稳定性较差。另外, 当植被密集时, 模式敏感度迅速下降, 也是制约全球应用的一个问题。

Owe 的方法无需植被生物量、地理信息等先验数据作为土壤湿度估算输入参数, 可以应用于任何

包含土壤湿度信息的频率。但是, 地表粗糙度假设单一, 对于山区或地形复杂的地区很难适用; 另外, 植被光学厚度由区域试验数据所建立的经验公式给出, 对其它区域未必使用。如果进一步优化粗糙度参数, 在高频上对大气进行校正, 那么在全球应用中将有良好的前景。

Wen 方法提供了一种在高频情况下, 通过大气校正, 严格依据辐射传输方程高精度估算土壤湿度的一个范例。但大气、植被参数(叶面指数, 生物量)均由试验数据给出, 如果没有试验数据模式很难成立。另外, 大气资料探测时间约 30 min, 而卫星探测是瞬时的, 在大气变化剧烈情况下势必影响反演精度。

3 总结与讨论

随着卫星和微波传感器技术的发展,如今借助于较少的辅助数据能同时反演土壤湿度及植被含水量等多种信息。本文介绍的3个典型算法均遵循地表辐射传输方程,只是假设条件和输入参数不同,虽然这些方法都已成功地应用于某个特定区域,但局限性较大,很难应用到其它区域。土壤反演的终极目标是快速、精确地利用微波资料提取高分辨率的全球土壤信息,如何提高微波辐射计的时空分辨率,最大限度地消除植被覆盖、大气、地表粗糙度等因素对土壤湿度遥感精度的影响依然是当前研究的难点。

未来 SMOS 传感器在空间分辨率有显著提高,但仍需对云层、植被、地表粗糙度的影响进行仔细甄别。研究表明,仅通过微波技术来获得精确、实时的植被、地表、土壤等参数信息是极其困难的,必须依赖其它技术手段。主动微波与被动微波的互补应用、卫星遥感与地面试验的结合、“3S”集成技术的融合等是土壤湿度遥感技术纵深发展方向。另外,综合运用各种数据源也是非常重要的,如利用其它遥感手段制作的植被指数、土壤质地资料产品等,均有助于提高土壤湿度反演水平。

参考文献

- [1] Schmugge T. Remote sensing of soil moisture [G]// Anderson M G. Encyclopedia of Hydrological Forecasting, John Wiley & Sons, Chichester,1985:523-568.
- [2] Jackson T J, Le Vine D M, Hsu A, et al. Soil moisture mapping at regional scales using microwave radiometry: the Southern Great Plains Hydrology Experiment [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 1999, 37:2136-2150.
- [3] Njoku E G, Jackson T J, Lakshmi V, et al. Soil moisture retrieval from AMSR-E [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 2003, 41:215-229.
- [4] Schmugge T J. Applications of passive microwave observations of surface soil moisture [J]. Journal of Hydrology, 1998, 212:188-197.
- [5] Kerr Y H, Waldteufel P, Wigneron J P, et al. Soil moisture retrieval from space: the Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) mission [J]. IEEE Tran. Geosci. Remote Sens., 2001, 39(8): 1729-1735.
- [6] 田国良. 土壤水分的遥感监测方法[J]. 环境遥感, 1991, 6(2): 89-98.
- [7] 张学艺, 张晓煌, 李剑萍, 等. 我国干旱遥感监测技术方法研究进展[J]. 气象科技, 2007, 35(4): 574-578.
- [8] 刘治国, 王遂缠, 林纾, 等. 西北干旱监测预测业务服务综合系统的开发与应用[J]. 气象科技, 2006, 34(4): 485-489.
- [9] 赵柏林, 韩庆源, 李慧心. 微波遥感土壤湿度的研究[J]. 中国科学, 1985, (5B): 420-427.
- [10] Zhao Bolin, Zhao Wenzhong, Han Qing yuan. Laboratory study on microwave remote sensing of ground truth [J]. Acta Meteorologica Sinica, 1991, 5(3): 317-330.
- [11] 金亚秋. 星载微波遥感在中国东北华北农田地辐射特征分析[J]. 遥感学报, 1998, 2(1): 19-25.
- [12] 高峰, 王介民, 李新, 等. 青藏高原地表参数的被动微波遥感反演研究[J]. 兰州大学学报, 2004, 40(6): 86-91.
- [13] 谷松岩, 高慧琳, 朱元竞, 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(3): 261-268.
- [14] Njoku E G, Li L. Retrieval of land surface parameters using passive microwave measurements at 6-18 GHz [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 1999, 37(1): 79-93.
- [15] Wigneron J P, Waldteufel P, Chanzy A, et al. Two-D microwave interferometer retrieval capabilities of over land surfaces (SMOS Mission) [J]. Remote Sensing of Environment, 2000, 73: 270-282.
- [16] Wigneron J P, Calvet J C, Pellarin T, et al. Retrieving near-surface soil moisture from microwave radiometric observations: current status and future plans [J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 85(4): 489-506.
- [17] Drusch M, Wood E F, Jackson T J. Vegetative and atmospheric corrections for the soil moisture retrieval from passive microwave remote sensing data: Results from the Southern Great Plains. hydrology experiment 1997 [J]. J. Hydrometeor., 2001, 2: 181-192.
- [18] Wen J, Z B Su, Y M Ma. Determination of land surface temperature and soil moisture from Tropical Rainfall Measuring [J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108 (D2): 4038.
- [19] Ulaby F T, Moore R K, Fung A K. Microwave Remote Sensing Active and Passive [M]. Norwood (MA): Artech House, 1986.
- [20] Wang J R, Choudhury B J. Remote sensing of soil moisture content over bare field at 1.4 GHz frequency [J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 86: 5277-5282.
- [21] Mo T, Choudhury B J, Schmugge T J, et al. A model for microwave emission from vegetation-covered fields [J]. J. of Geophysical Research, 1982, 11: 229-237.
- [22] Kerr Y H, Njoku E G. A semiempirical model for interpreting microwave emission from semiarid land surfaces as seen from space [J]. IEEE Trans. Geos. Remote Sens., 1990, 28: 384-393.
- [23] Teng W L, Wang J R, Doraiswamy P C. Relationship between satellite microwave radiometric data, Antecedent Precipitation Index, and regional soil moisture [J]. International Journal of Remote Sensing, 1993, 14(13): 2483-2500.

- [24] Ahmed N U. Estimating soil moisture from 6.6 GHz dual polarization and/or satellite derived vegetation index [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1995,16(4):687-708.
- [25] Liou Y A, Liu S F, Wang W J. Retrieving soil moisture from simulated brightness temperatures by a neural network [J]. *IEEE Trans. Geos. Remote Sens.*, 2001,39(8):1662-1672.
- [26] Wang J R, Shiue J C, Schmugge T J, et al. The L band PBMR measurements of surface soil moisture in FIFE [J]. *IEEE Trans. Geos. Remote Sens.*, 1990,28:906-913.
- [27] Schmugge T J, Jackson T J. Mapping soil moisture with microwave radiometers [J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 1994,54:213-223.
- [28] Jackson T J, Schmugge T J, Wang J R. Passive microwave sensing of soil moisture under vegetation canopies [J]. *Water Resources Research*, 1982,18:1137-1142.
- [29] Van de Griend A A, Owe M. Microwave vegetation optical depth and inverse modelling of soil emissivity using Nimbus/SMMR satellite observations [J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 1994,54:225-239.
- [30] Van de Griend A A, Owe M. The influence of polarization on canopy transmission properties at 6.6 GHz and implications for large scale soil moisture monitoring in semi-arid environments [J]. *IEEE Trans. Geos. Remote Sens.*, 1994,32:409-415.
- [31] Wigneron J P, Chanzy A, Calvet J C, et al. A simple algorithm to retrieve soil moisture and vegetation biomass using passive microwave measurements over crop fields [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1995,51:331-341.
- [32] Owe M, De Jeu R, Walker J. A methodology for surface soil moisture and vegetation optical depth retrieval using the Microwave Polarization Difference Index [J]. *IEEE Trans. Geos. Remote Sens.*, 2001,39(8):1643-1654.
- [33] Hollinger J P, Peirce J L, Poe G A. SSM/I instrument evaluation [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1990,28:781-790.
- [34] Jackson T J, Hsu A Y, O'Neill P E. Surface soil moisture retrieval and mapping using high-frequency microwave satellite observations in the Southern Great Plains [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2002,(3):688-699.
- [35] Wen J, Jackson T J, Bindlish R, et al. Retrieval of soil moisture and vegetation water content using SSM/I Data over a corn and soybean region [J]. *Journal of Hydrology, Special section*, 2005,(6):854-863.
- [36] Jackson T J. Soil moisture estimation using Special Sensor Microwave/Imager satellite data over a grassland region [J]. *Water Resour. Res.*, 1997,33:1475-1484.
- [37] Koike T, Njoku E G, Jackson T J, et al. Soil moisture algorithm development and validation for the ADEOS/AMSR [C] // *Proc. of the Int. Geoscience and Remote Sensing Symp.*, 2000,3:1253-1255.
- [38] Choudhury B J, Golus R E. Estimating soil wetness using satellite data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1988,9:1251-1257.
- [39] De Jeu, R A M. Retrieval of Land Surface Parameters Using Passive Microwave Remote Sensing [D]. Faculty of Earth and Life Sciences, Vrije University Amsterdam, the Netherlands, 2003.
- [40] Jackson T J, Schmugge T J. Vegetation on the microwave emission of soil [J]. *Remote Sens. Environ.*, 1991,36:203-212.

Advances in Soil Moisture Retrieval Using Passive Microwave Remote Sensing

Wang Lei Wen Jun Zhong Tangtang Liu Rong Liu Yuanyong

(Laboratory for Climate Environment and Disasters of Western China, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

Abstract: Soil moisture is a key variable in water and energy exchanges in land-atmosphere interface. The passive microwave remote sensing is the most potent technology to retrieve soil moisture. A brief introduction is made to microwave theory, and a general review of soil moisture retrieval algorithms is given. Three typical cases are illustrated based on the different microwave sensors by comparing various algorithms, which correspond to the three-parameter AMSR-based retrieval developed by Njoku and Li, the two-parameter SMMR-based retrieval developed by Owe et al. and the two-parameter SSM/I-based retrieval developed by Wen et al. The insufficiency and potentials in the researches on soil moisture are discussed.

Key words: passive microwave remote sensing, soil moisture, retrieval algorithms