

引用格式: He Yuan, Wen Jun, Zhang Tangtang, *et al.* A Study on Estimating Soil Moisture Using Microwave Remote Sensing Combined with Optical over the Source Region of the Yellow River[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2013, 28(2): 300-308. [何媛, 文军, 张堂堂, 等. 卫星微波遥感结合可见光遥感估算黄河源区土壤湿度研究[J]. 遥感技术与应用, 2013, 28(2): 300-308.]

卫星微波遥感结合可见光遥感估算 黄河源区土壤湿度研究

何 媛, 文 军, 张堂堂, 田 辉, 刘 蓉, 吕少宁, 赖 欣

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所陆面过程与气候变化重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 利用欧洲环境卫星(ENVISAT)搭载的高级合成孔径雷达 ASAR(Advanced Synthesis Aperture Radar)交叉极化模式(APP)2009 年 8 月 9 日和 10 月 6 日的数据对青藏高原东北部玛曲地区土壤湿度进行了估算。对于裸土区域采用表层微波后向散射几何光学模型 GOM(Geometry Optics Model), 对于植被覆盖度大的区域利用“水—云”模型处理植被层对后向散射系数的影响, 取得了较好的结果; 遥感估算的土壤湿度值和地面实测值之间的均方根误差 $RMSE < 0.05$, 决定系数 $R^2 > 0.82$, 表明该方法适合反演玛曲地区的土壤水分。从遥感估算的总体结果可以看出: 山谷和陡峭山坡的反演结果相对较差, 而在相对平坦的地区反演结果较好, 估算的土壤湿度值在 $0.20 \sim 0.50 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 之间。

关 键 词: 土壤湿度; ENVISAT/ASAR; GOM 模型; “水—云”模型

中图分类号: S 152.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2013)02-0300-09

1 引 言

土壤湿度作为地表水文过程的重要组成部分, 在陆面过程中起着极为重要的作用: 直接控制着地气间能量和水分的交换过程, 控制着地表与大气间水热的输送和平衡^[1]; 是影响全球环境和气候变化的重要因素, 大面积土壤湿度的监测是农业生产、作物估产、气象预报、土壤墒情和干旱监测等的重要内容。因此, 利用观测资料进行陆面土壤湿度及其气候变化响应也成为气候变化研究的一个热点方向。飞速发展的卫星遥感技术可以快速、实时、长期动态监测土壤水分, 并且有很好的时间和空间分辨率, 成为估算土壤湿度最主要的方法之一^[2-4]。

近几十年来, 国内外研究人员发展了不同的卫星遥感土壤湿度估算模型和方法, 并利用不同下垫

面条件下的野外观测试验进行了验证, 取得了一定的进展^[4-10]。在众多的遥感土壤湿度监测方法中, 由于微波对云层有较强的穿透能力, 不受光照条件限制, 能够全天候工作, 且对土壤具有一定的穿透能力, 使得微波遥感在土壤湿度监测中具有独特的优越性而在该领域占有重要地位^[11]。微波遥感监测土壤湿度具有坚实的物理基础, 即土壤的介电特性和土壤水分含量有密切的关系, 水的介电常数大约为 80.0, 而干土的仅为 3.0, 它们存在较大的反差, 并且随着含水量的增加, 其介电常数呈线性增加^[8]。由于卫星反演土壤湿度算法实用化难度较大, 仍是当前的一个研究热点和难点。

微波遥感监测土壤湿度有两种方式: 主动微波遥感和被动微波遥感^[11]。主动微波遥感和被动微波遥感都各有其优越性和不足, 其中被动微波遥感

收稿日期: 2012-03-05; 修订日期: 2012-12-22

基金项目: 科技部公益性行业(气象)科研专项(GYHY201106028), 国家自然科学基金项目(41175027)和“CEOP-AEGIS”联合资助。

作者简介: 何 媛(1988—), 女, 云南昭通人, 硕士研究生, 主要从事陆面过程与卫星遥感研究。E-mail: yhe@lzb.ac.cn。

通讯作者: 文 军(1964—), 男, 甘肃临洮人, 研究员, 主要从事陆面过程与卫星遥感研究。E-mail: jwen@lzb.ac.cn。

不能很好地反映土壤水分的精细空间变化状况,在实用性和结果验证方面受到很大的限制,而主动微波遥感可以获取高空间分辨率的区域土壤水分信息,有很强的实用性,因此在遥感估算土壤湿度研究中有很好的应用前景,但是主动微波对土壤湿度的敏感性受地表粗糙度、地形和植被的影响比较大^[12]。目前广泛应用的主动微波估算土壤水分模型主要有:半经验的 Oh 模型^[13]、Dubios 模型^[14]、Shi 模型^[15];基于裸露地表的高级积分方程模型 AIEM(Advanced Integral Equation Model);物理光学模型 POM(Physical Optics Model),小扰动模型 SPM(Small Perturbation Model),几何光学模型 GOM(Geometry Optics Model),地表辐射参数模型(Q/P 模型)等^[12]。通常认为理论模型 AIEM 能够准确地描述裸露地表情况下的微波辐射和散射信号,但是,该模型物理过程非常复杂,一般不用于实际反演,可以用来建立模拟数据库和标定经验/半经验模型^[16]。

研究表明,C波段的微波遥感可以估算出地表层约 0~5 cm 深度的土壤水分含量^[17-18],但在实际应用中,由于受到地表粗糙度和植被覆盖层的影响,对土壤水分的估算研究还有待于进一步的发展。现阶段微波遥感估算土壤水分都是用不同极化的组合来减少或消除地表粗糙度的影响,由于极化雷达对植被层的信息十分敏感,将裸露土壤表面水分反演的算法应用到有植被覆盖的区域时,植被覆盖层将引起对土壤水分的过低估计和对表面粗糙度的过高估计。目前现有的植被模型有:“水—云”模型(Water-Cloud)和微波植被散射模型 MIMICS(Michigan Microwave Canopy Scattering),都是在获取实验区植被层的信息后,对模型参数进行校正,从而去除植被对地表的影响^[18-19]。目前由于缺乏描述地表粗糙度参数的明确理论推算公式,实测又比较困难,没有较成熟的算法能够完全利用雷达数据去除植被影响。因此利用植被指数建立植被覆盖地表的微波散射模型,并结合微波遥感进行土壤湿度估算是一个应用前景非常好的研究思路,目前已经取得了一些研究进展^[21-25]。

微波遥感估算土壤湿度的关键问题就是如何减小地表粗糙度和植被散射的影响,虽然已经有很多关于遥感估算土壤湿度的模型和算法研究,但由于下垫面结构的复杂性,其适用性不广。对于我国黄河源地区,下垫面结构复杂,利用植被指数建立地表微波散射模型结合主动微波遥感估算土壤湿度的研

究比较少。因此,本文主要利用卫星主动微波遥感资料和可见光遥感资料,基于裸土表层微波后向散射的 GOM 模型,利用“水—云”模型并结合植被指数处理植被层对微波后向散射的影响,估算青藏高原东北部黄河上游玛曲地区的土壤湿度,并结合同步野外观测网络的土壤水分资料进行验证。

2 研究区域和观测资料

2.1 研究区概况

研究区域位于青藏高原东北部(地理位置为 101°40′~102°40′E,33°30′~34°45′N),黄河第一弯曲部,是黄河上游至源头的重要水源涵养和补给区。研究区平均海拔为 3 600 m,多年平均降雨量为 505 mm,年平均气温为 2℃,气候受青藏高原和东亚季风性大陆气候的双重影响而高寒阴湿,由于季风的缘故冬季干燥而夏季多雨。研究区土壤类型有高山草甸土、亚高山草甸土、草甸土、沼泽土、泥炭土和暗棕壤 6 类,其中以亚高山草甸为主,主要分布于 3 500~4 000 m 中低山地。研究区东部的黄河沿岸地带地势平坦,其余地带则分布着高低不平的山地,山地下垫面为高寒草甸草地,平坦地区下垫面主要为高原短草草地、退化的草地和高寒沼泽草甸湿地等^[26-27]。图 1(a)是利用 NASA Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM)提供的 90 m 的玛曲地区高程数据图 DEM 做出的土壤湿度监测网的站点图,它很好地反映了研究区的地形特征。图 1(b)为黄河源地区的土地利用分布图。

黄河源地区的土壤湿度分布状况及变化对当地及黄河下游地区径流和气候等都有重要的影响。为了有针对性地长期监测土壤湿度变化过程,中国科学院寒区旱区环境与工程研究所在黄河源地区建立了玛曲土壤湿度观测网,由 20 个单独的地面观测站点组成(图 1(a))。目前,已有研究人员在黄河源区开展了遥感估算土壤水分的工作,发展了一些卫星遥感数据反演区域土壤湿度的算法,并取得了较大的进展^[27-29]。

2.2 地面观测数据

在玛曲地区黄河沿岸附近 100 km×50 km 中尺度范围内,布设了由 20 个观测站点组成的区域性土壤温度和湿度观测网络(图 1(a))。观测设备是美国 Decagon 设备有限公司制造的 ECH₂O EC-TM 土壤温湿度感应探头及 ECH₂O-EM50 自动数据记录盒,观测深度分别为 5、10、20、40 和 80 cm^[30]。数据

记录间隔是 10 min,温湿传感器探头对土壤体积水分含量的感应灵敏度为 $0.001\text{ m}^3/\text{m}^3$ 。所用 EC-TM 探头的土壤水分观测曲线,已利用玛曲实地采

集土壤样品进行了校正。本研究中,地面网络观测的 5 cm 深度土壤湿度值将用于验证遥感估算的土壤水分。

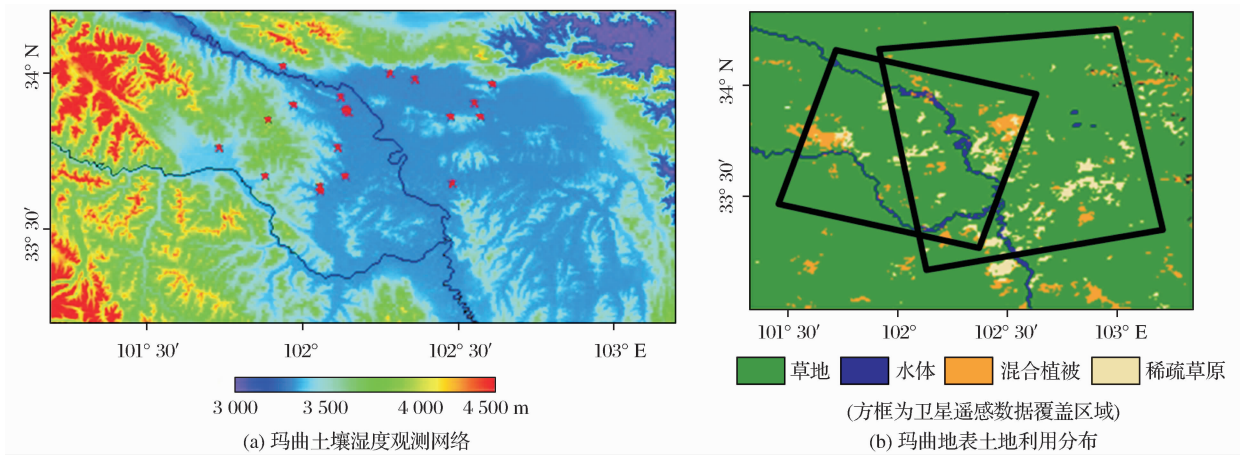


图 1 黄河源区地表状况
Fig.1 The surface condition of the source region of the Yellow River

2.3 卫星遥感数据

本文采用欧洲环境卫星(ENVISAT)上搭载的 ASAR(Advanced Synthetic Aperture Radar)传感器波长为 5.6 cm,频率为 5.3 GHz,并且可以提供 7 种入射角 2 个极化的卫星数据。环境卫星(ENVISAT)是欧空局 2002 年 3 月 1 日发射的一颗与太阳同步的极轨卫星,可以提供对大气、海洋、陆地和冰的测量信息及对环境、气候变化进行监测,它的重访周期为 35 d。ASAR 保证了欧洲遥感卫星(ERS-1/2)的 SAR 图像模式(Image Mode)和波模式(Wave Mode)数据的连续性,其先进性表现在数据获取范围、入射角范围、极化方式和操作模式的灵活性。研究表明,ENVISAT/ASAR 运行的 C 波段的卫星信号对土壤湿度非常敏感,但是受植被覆盖和土壤粗糙度的影响也很显著。在微波低频波段测得的后向散射系数对土壤水分非常敏感,土壤湿度具有暂时的稳定性,可以假设雷达后向散射系数也具有暂时的稳定性。ASAR 可以提供 5 种工作模式:成像模式(Image Mode)、交叉极化模式(Alternating Polarization Mode)、波模式(Wave Mode)、宽幅模式(Wide Swath Mode)和全球观测模式(Global Monitoring Mode)。在这些模式中,交叉极化模式是双极化模式即同时获得两个极化(HH/VV)的图像,而其他模式是分别获得 HH 或者 VV 极化的图像。本文采用的是玛曲地区 2009 年 8 月 9 日、10 月 6 日 APP 模式水平极化(HH)和垂直极化(VV)的观测资料,其空间分辨为 30 m。8 月 9 日获取的

数据为第一种入射角模式(IS1),平均入射角为 18° ,10 月 6 日获取的数据为第二种入射角模式(IS2),平均入射角为 23° 。由于这两个数据的入射角不同,所以对数据的入射角进行归一化处理,统一入射角为 23° 。利用小入射角的 ASAR 数据估算土壤湿度可以最大化土壤对后向散射的贡献。通过这两个数据对玛曲地区的土壤水分进行估算,获得玛曲地区土壤水分的分布特征。

2.4 ENVI/ASAR 和 NDVI 数据处理

卫星遥感数据存在着明显的斑点噪声,表现为图像灰度的剧烈变化。斑点噪声极大地降低了图像的空间分辨率和信噪比,影响图像的判读性,还可能导致地物特征的消失,因此斑点噪声的消除对 ASAR 图像的应用十分重要。本文对 ASAR 图像采用 Gamma 滤波处理,最大限度地消除了图像中相干斑点噪声的影响^[4]。研究区域的雷达后向散射系数 σ^0 是从 ASAR 的数据中提取得到的,观测数据中的强度值与后向散射系数 σ^0 的关系如式(1)所示^[31]:

$$\sigma^0 = \frac{\langle A^2 \rangle}{K} \sin(\alpha_d)$$

(1)

其中: σ^0 为目标的雷达后向散射系数(单位为 m^2/m^2),A 为数据中的数位式数字 DN(Digital Number)值, α_d 为目标所在位置的卫星入射角,K 是该产品的绝对定标因子,K 和 α_d 的值均可在数据头文件中找到。根据头文件中提取数据的 K、 α_d 值,以及远近入射角计算每个点的入射角 θ ,将图像中

的 DN 值转化成后向散射系数。

NDVI 为归一化植被指数, Jackson 等^[33]根据放牧草原实测资料给出了植被指数和植被含水量 V_{wc} 之间的关系。根据甘南草地特征^[32]和过境研究区的陆地资源卫星 Landsat5 影像, 获取了本研究区 NDVI。根据 Jackson 等^[33]放牧草原的 NDVI 平均值与植被含水量 V_{wc} 之间的关系为:

$$V_{wc} = \begin{cases} 4.2857NDVI - 1.5429, & NDVI \geq 0.5 \\ -0.3215NDVI + 1.913NDVI^2, & 0.17 \leq NDVI < 0.5 \\ 0, & NDVI < 0.17 \end{cases} \quad (2)$$

3 土壤湿度的算法模型

对于裸土, 在卫星参数(入射角、频率、极化方式)给定的情况下, 卫星信号主要受地表粗糙度和土壤含水量的影响。由卫星后向散射得到土壤水分必须去除粗糙度的影响, 对于有植被覆盖的地表, 卫星信号不仅受地表粗糙度和土壤含水量的影响, 还受植被含水量和植被冠层的形状、大小和分布等的影响^[34]。当 $NDVI < 0.40$ 时, 植被较稀疏, 植被层对雷达的后向散射系数贡献可以忽略, 用裸土土壤水分模型估算土壤湿度, 当 $NDVI \geq 0.40$ 时, 即植被较为茂密, 植被对雷达后向散射系数的影响不能忽略, 利用“水—云”模型进行土壤湿度估算。

3.1 裸土土壤水分估算模型

假设裸土和植被覆盖的土壤具有相同的粗糙度和含水量特性, 辐射传输过程可以表示为式(3)^[5]:

$$\sigma^0(\theta) = [1 - FC(1 - T^2(\theta))] \sigma_{soil}^0 + FC(\sigma_{interaction}^0 + \sigma_{vegetation}^0) \quad (3)$$

其中: $\sigma^0(\theta)$ 为观测到的后向散射系数, FC 为植被覆盖度, $T^2(\theta)$ 为辐射传输在冠层的能量损耗, σ_{soil}^0 为土壤对后向散射系数的贡献, $\sigma_{interaction}^0$ 为地表和植被之间对后向散射系数的贡献, $\sigma_{vegetation}^0$ 为植被层散射对后向散射系数的贡献。

在植被层对雷达的后向散射系数贡献可以忽略时或者在裸土的情况下, 辐射传输过程可以表示为式(4)^[35]:

$$\sigma_{soil}^0 = \frac{|\Gamma(0)|^2 \exp\left(-\frac{\tan^2 \theta}{2s^2}\right)}{2s^2 \cos^4 \theta} \quad (4)$$

其中: $\sigma_{soil}^0(\theta)$ 为雷达目标后向散射系数, $|\Gamma(0)|^2 = \left| \frac{1 - \sqrt{\epsilon}}{1 + \sqrt{\epsilon}} \right|^2$ 为法线方向的 Fresnel 反射率, θ 为局地入射角, $s(s = \sqrt{2}\delta/l)$ 为地表粗糙度, δ 为地表均方

根高度, l 为表面相关长度。 ϵ 为土壤的介电常数, 可根据土壤质地参数和水分含量表示为^[6]:

$$\epsilon = (a_0 + a_1S + a_c) + (b_0 + b_1S + b_2C)m_v + (c_0 + c_1S + c_2C)m_v^2 \quad (5)$$

其中: S 和 C 为沙土和粘土成分, 玛曲地区测得的 S 和 C 分别为 29.9% 和 8.1%, m_v 为土壤含水量(单位为: cm^3/cm^3), $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2, c_0, c_1, c_2$ 分别为与微波观测频率有关的经验系数。联合式(4)和式(5) 给定一个初始的土壤水分值 m_v 和迭代精度, 便可迭代计算出土壤含水量的值。

3.2 植被覆盖土壤水分估算模型

传统的几何光学物理模型(GOM)只适用于无植被覆盖或者植被覆盖很少的情况。但是本文研究区地表大部分为放牧草场, 地表覆盖的植被会衰弱或者阻挡土壤后向散射信号, 所以植被层对微波后向散射贡献的大小会影响地表水分的敏感性。因此需要建立合理的植被散射模型反演土壤水分, 去除植被层对后向散射的影响, 使得估算的土壤湿度具有较好的精度。在处理植被层的贡献时, Attema 和 Ulaby^[36]于 1978 年综合利用经验模型和物理模型的优点, 提出了以估算农作物覆盖地表土壤水分的“水—云”模型, 该模型建立在辐射传输模型基础上, 通常使用很少的参数, 但是这些参数都具有一定机理性的意义, 在将模型应用到具体的研究时, 模型参数用实测数据来确定。“水—云”模型建立的基本假设为: ①植被层假设为水平均匀分布的云层, 土壤表层与植被顶端之间分布着均匀的水粒子; ②不考虑植被和土壤表层之间的多次散射; ③模型中的变量仅为植被高度、植被含水量和土壤湿度。由于玛曲地区草高大都低于 10 cm, 因此可以忽略主动微波信号在土壤和植被层间的相互作用, “水—云”模型比较适合估算玛曲植被覆盖时的土壤湿度。“水—云”模型表示如下^[27]:

$$\sigma^0 \approx \sigma_{veg}^0 + T\sigma_{soil}^0 \quad (6)$$

其中: σ_{veg}^0 为植被层直接微波后向散射系数, σ_{soil}^0 为植被层下面土壤表层的真实微波后向散射系数, T 为植被层的双层衰减因子。土壤表层散射系数值 σ_{soil} 为总的后向散射系数 σ^0 减去植被层衰减的影响部分而获得。其中:

$$\sigma_{veg}^0(\theta) = 0.16V_{wc}^2 \cos(\theta) \cdot (1 - T) \quad (7)$$

$$T = \exp(-2bV_{wc} \sec \theta) \quad (8)$$

其中: V_{wc} 为植被层含水量(单位为: kg/m^2)^[26], 结合 Landsat5 影像得到的玛曲地区 8 月和 10 月的

NDVI,根据式(2)可以计算出玛曲地区8月和10月的植被含水量 V_{wc} 值。将 V_{wc} 代入“水—云”模型中迭代即可估算出植被覆盖条件下的土壤湿度值。

本文主要研究玛曲地区2009年8月和10月土壤湿度的空间分布规律,由于8月和10月玛曲地区的地表植被状况存在较大的差别,因此在植被层后向散射贡献时,植被层的处理对估算的结果有很大的影响。

3.3 地表粗糙度选取

主动微波信号受土壤粗糙度影响非常显著,在地面与卫星入射波相互作用的过程中,地面散射特性除了与土壤的复介电常数、土壤湿度有关外,地表粗糙度也是一个主要的决定因素。研究表明,微波后向散射系数对土壤粗糙度比对土壤湿度更敏感^[13-14]。因此,建立一个好的土壤湿度估算模式,地表粗糙度参数的选择很重要。地表粗糙度通常用两个参数来表示,即地表偏差或均方根高度 δ 和表面相关长度 l 。这两个参数分别从垂直和水平两个不同的方向对地表粗糙度进行描述,其中表面相关长度 l 不仅在不同类型的地表,在同一类型地表之间也会有很大的变化,相反均方根高度则相对稳定,地表粗糙度参数选择很困难。因此,本研究中对于土壤粗糙度的参数化非常重要,并且认为其他影响土壤湿度估算的因素可以忽略。由于玛曲属于青藏高原的一部分,并且地表状况、植被状况等与那曲地区都比较接近,依据国际合作项目“全球能量水循环之亚洲季风青藏高原试验研究”(GAME/Tibet)在藏北那曲地区的地表粗糙度实测资料:绝大多数的分实测地表的均方根高度小于1 cm,地表相关长度小于10 cm。本研究取玛曲地区的均方根高度 $\delta=0.87$ cm,表面相关长度 $l=9$ cm,可以反映出玛曲地区的地表基本状况,并且可以使土壤粗糙度对卫星信号的影响降至最低^[27]。在已知后向散射系数、粗糙度参数的情况下,利用“水—云”模型,结合可见光遥感的归一化植被指数NDVI,根据式(2)、(6)、(7)、(8)进行迭代,去除植被层对后向散射系数的影响,估算出植被覆盖条件下的土壤湿度并利用地面观测站点的实测值对遥感估算结果进行验证。

4 黄河源区土壤湿度时空分布特征

4.1 微波遥感结果验证

利用2009年8月9日14:57分和10月6日3:21分过境玛曲地区的ASAR遥感资料,估算玛曲

地区8月和10月的土壤水分分布状况和时间变化特征。为了验证估算结果的精度,利用2009年8月9日和10月6日玛曲地面实测站点(图1(a))0~5 cm的土壤湿度值和遥感反演(包括水平和垂直极化)的土壤湿度值进行比较验证。根据地面观测点的位置提取相应点的卫星遥感估算值。图2为8月9日遥感估算的土壤湿度和地面观测的土壤湿度验证的散点图,图3为10月6日遥感估算的土壤湿度和地面观测的土壤湿度的散点图。结果表明:遥感估算的土壤湿度与地面实测的土壤湿度基本一致,基本接近1:1线,均方根误差 $RMSE<0.05$,两者的决定系数 $R^2>0.82$,说明该方法适合估算玛曲地区的土壤湿度。由图2和图3均可以看出,ASAR数据的VV极化估算的土壤湿度值相对于HH极化估算的土壤湿度值更接近实际观测的土壤湿度值,可能是因为VV极化的后向散射系数比HH极化的后向散射系数对土壤湿度更敏感,VV极化相对于HH极化更适合植被参数的估算。在验证结果的时候发现,NST_04、NST_11、NST_15这3个站点由于土壤中有有机质含量高、蓄水能力强,整体的土壤水分值比其他站点高。

4.2 不同季节的土壤湿度空间分布特征

不同地区不同时间土壤的介电常数不同,土壤含水量不同,雷达的后向散射系数也不同,因此利用微波后向散射系数可以对土壤湿度进行估算。图4(a)为2009年8月9日过境玛曲的VV极化的ASAR数据估算的土壤湿度分布图,图4(b)为2009年10月6日过境玛曲的VV极化的ASAR数据估算的土壤湿度分布图。图中可以看出整个空间分布上玛曲地区的土壤水分值比较大,体积含水量一般在 $0.2\sim0.50\text{ m}^3/\text{m}^3$ 之间,与地面观测结果比较一致。可以看出土壤湿度的分布具有明显的空间异质性,在黄河大转弯地区土壤水分比较大,在地形陡峭的山坡地区,遥感估算的土壤湿度也很大。从两幅图中可以看出,不同时间不同地区的土壤湿度分布有很大的差别。图4(a)可以看出,在黄河沿岸以东的地区土壤湿度分布很均匀。图4(b)中可以看出估算的土壤湿度西部分布相对于东部较均匀。总体来说,地形对遥感估算的土壤湿度有很大的影响。本文方法比较适合估算平坦下垫面的土壤湿度。图4中可以看出曼日玛湿地土壤湿度较高,与实际相符,但与其相邻的四川若尔盖湿地却为低值区,与实际情况相差较大。

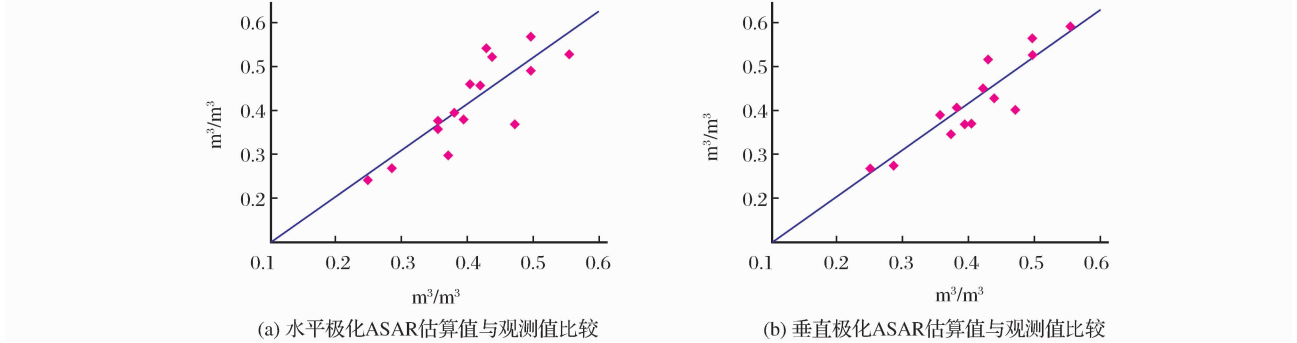


图 2 2009 年 8 月 9 日 ASAR 估算的土壤湿度值与地面观测的土壤湿度值的比较

Fig. 2 Estimated soil moisture using ASAR versus ground-measured soil moisture in 9 Aug. 2009

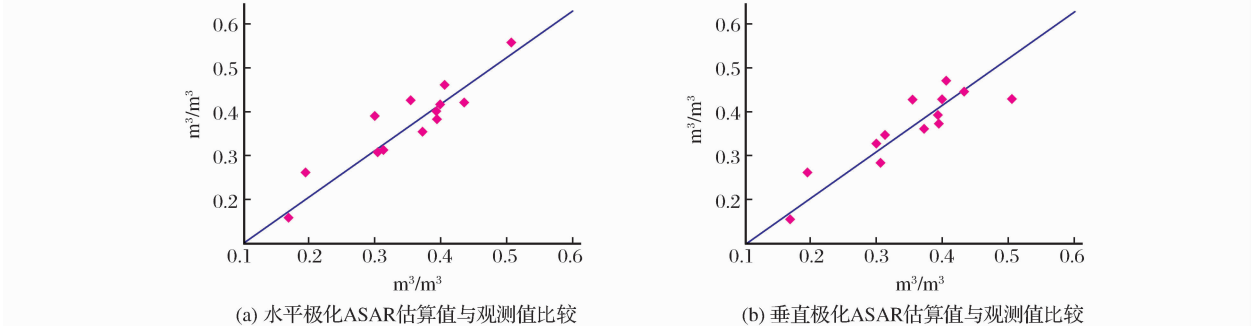


图 3 2009 年 10 月 6 日 ASAR 估算的土壤湿度值与地面观测的土壤湿度值的比较

Fig. 3 Estimated soil moisture using ASAR versus ground-measured soil moisture in 6 Oct. 2009

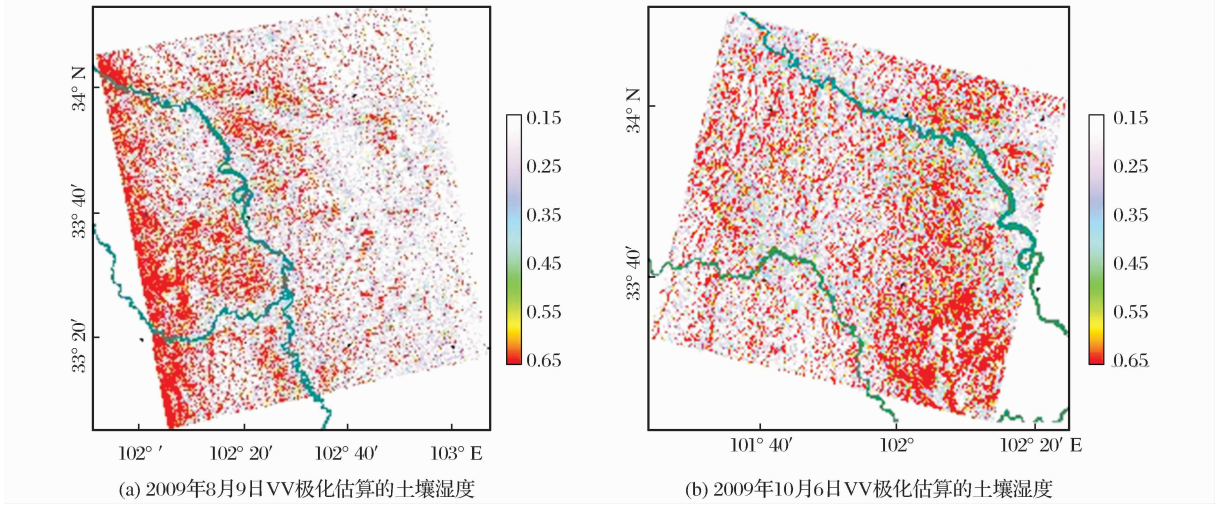


图 4 ASAR 估算的土壤湿度的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of estimated soil moisture using ASAR

5 结 语

5.1 反演方法

本文利用 2009 年 8 月 9 日和 10 月 6 日过境玛曲地区的 ENVISAT/ASAR 交叉极化模式 APP 水平极化(HH)和垂直极化(VV)的数据估算了玛曲地区的土壤湿度。对于裸土采用基于几何光学的物

理模型模型,由于 8 月的 NDVI 平均值为 0.624,10 月的 NDVI 平均值取 0.42,均大于 0.40,植被对后向散射的贡献不能忽略,所以利用“水—云”模型处理植被对后向散射的贡献,估算玛曲地区 8 月和 10 月的土壤湿度,并利用玛曲地区地面观测的土壤湿度值对遥感估算结果进行验证。验证表明,遥感估算的土壤水分和地面观测值之间的均方根误差

RMSE<0.05, 决定系数 $R^2>0.82$, 取得较好的结果, 说明该方法适用于玛曲地区的土壤湿度估算。

5.2 反演结果及讨论

从遥感估算结果来看, 玛曲地区土壤水分值都较大, 土壤湿度具有明显的空间异质性, 其空间分布特征为:

(1) 整体分布上玛曲的土壤水分值都较大, 体积含水量在 $0.20\sim0.50\text{ m}^3/\text{m}^3$ 之间, 与地面观测的土壤湿度值一致, 说明玛曲地区是黄河上游重要的水源涵养区。在黄河大转弯地区土壤水分值偏大, 都在 $0.55\text{ m}^3/\text{m}^3$ 以上, 是因为该地区下垫面为湿地。其他区域的土壤水分分布都比较均匀。

(2) 遥感估算结果受地形影响比较大。玛曲地区地形复杂, 地表覆盖差异大。从遥感估算的土壤水分分布图中可以看出, 在陡峭的山坡土壤湿度值都比较大, 在阴影地区的土壤湿度值比较小。是由于地形对后向散射的影响, 使得估算出的陡峭山坡的土壤湿度普遍较大, 而阴影山谷地区的则较小。而平坦地区反演的土壤湿度值与地面观测值比较一致, 说明该方法比较适合反演相对平坦地区的土壤湿度, 地形对遥感反演土壤湿度的影响仍然是以后土壤湿度遥感研究的难点和热点。

(3) 图 4 中可以看出曼日玛湿地土壤湿度较高, 与实际相符, 但与其相邻的四川若尔盖湿地却为低值区。所以该模型还有很多需要改进的问题。

由于本研究没有考虑到粗糙度和 NDVI 随区域变化, 这也是导致遥感估算的土壤湿度准确度有待提高的一个原因。由于受微波穿透土壤层的深度限制, 目前遥感获取的仅是土壤层的表层水分信息。所以在利用遥感估算土壤湿度方面还有很多工作要做, 今后将更多地考虑复杂地形对遥感估算土壤湿度的影响, 以及粗糙度和 NDVI 随区域变化, 加强对植被覆盖区土壤湿度的研究, 发展能够准确估算复杂地形土壤湿度的算法。尽管如此, 本文所用的反演算法在区域农牧业生产、干旱环境监测方面有很好的应用前景, 具有重要的实用价值。

参考文献(References):

- [1] Wang Lei, Wen Jun, Wei Zhigang, *et al.* Soil Moisture over the West of Northwest China and Its Response to Climate[J]. Plateau Meteorology, 2008, 27(6): 1257-1266. [王磊, 文军, 韦志刚, 等. 中国西北区西部土壤湿度及其气候响应[J]. 高原气象, 2008, 27(6): 1257-1266.]
- [2] Zhong Ruofei, Guo Huadong, Wang Weimin. Overview of Soil Moisture Retrieval from Passive Microwave Remote Sensing[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2005, 20(1): 49-57. [钟若飞, 郭华东, 王为民. 被动遥感反演土壤水分进展研究[J]. 遥感技术与应用, 2005, 20(1): 49-57.]
- [3] Gao Feng, Wang Jiemin, Sun Chengquan, *et al.* Advances in Study on Microwave Remote Sensing of Soil Moisture[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2001, 16(2): 97-102. [高峰, 王介民, 孙成权, 等. 微波遥感土壤湿度研究进展[J]. 遥感技术与应用, 2001, 16(2): 97-102.]
- [4] Zhao Shaohua, Yang Yonghui, Qiu Guoyu, *et al.* Inversion of Soil Moisture Using Bi-temporal ASAR Images[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(6): 184-188. [赵少华, 杨永辉, 邱国玉, 等. 基于双时相 ASAR 影像的土壤湿度反演研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 184-188.]
- [5] Frison P L, Mougin E, Hiemaux P. Observation and Interpretation of Seasonal ERS-1 Wind Scatterometer Data over Northern Sahel(Mali)[J]. Remote Sensing of Environment, 1998, 63(3): 233-342.
- [6] Hallikainen M T, Ulaby F T, Dobson M C, *et al.* Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil Part I: Empirical Models and Experimental Observations[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1985, 23(1): 25-34.
- [7] Van der Velde R. Soil Moisture Remote Sensing Using Active Microwaves and Land Surface Modeling[M]. Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation, ITC, 176.
- [8] Shi Xiaokang, Wen Jun, Wang Lei, *et al.* Application of AMSR-E Brightness Temperature Data in Observation and Simulation of Soil Moisture Variation over Northeast Plateau[J]. Plateau Meteorology, 2010, 29(3): 545-553. [史小康, 文军, 王磊, 等. AMSR-E 卫星亮度温度数据在高原东北部土壤湿度观测和模拟中的应用[J]. 高原气象, 2010, 29(3): 545-553.]
- [9] Chen Liang, Shi Jiancheng, Jiang Lingmei, *et al.* Physically based Retrieval of Soil Moisture Using Passive Microwave Remote Sensing[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(5): 663-677. [陈亮, 施建成, 蒋玲梅, 等. 基于物理模型的被动微波遥感反演土壤水分[J]. 水科学进展, 2009, 20(5): 663-667.]
- [10] Zhao Yinghui, Jiang Congfeng. Soil Moisture Estimation based on Multi-source Information Fusion[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2010, 25(4): 486-492. [赵颖辉, 蒋从锋. 基于多源信息融合的土壤含水量估算[J]. 遥感技术与应用, 2010, 25(4): 486-492.]
- [11] Sun Anli, Jia Jianhua, Xu Xingang, *et al.* Research Progress of Soil Moisture Monitoring based on Microwave Remote Sensing[J]. Science of Surveying and Mapping, 2009, 34(6): 105-107. [孙安利, 贾建华, 徐新刚, 等. 土壤湿度微波遥感监测研究进展[J]. 测绘科学, 2009, 34(6): 105-107.]
- [12] Zhao Shaohua, Qin Qiming, Shen Xinyi, *et al.* Review of Microwave Remote Sensing on Soil Moisture Monitoring[J]. Journal of Microwaves, 2010, 26(2): 90-96. [赵少华, 秦其明,

- 沈心一,等.微波遥感技术监测土壤湿度的研究[J].微波学报,2010,26(2):90-96.]
- [13] Oh Y, Sarabandik, Ulabyft. An Empirical Model and Inversion Techniques for Radar Scattering from Soil Surfaces[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1992, 30 (2): 370-381.
- [14] Duboispc V J J, Engmanet. Measuring Soil Moisture with Image Radars[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1995, 33 (4): 915-926.
- [15] Shi J, Wang J, Hsuay, *et al.* Estimation of Bare Surface Soil Moisture and Surface Roughness Parameter Using L Band SAR Image Data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35(5): 1254-1266.
- [16] Li Qin. A Study on Inversing Soil Moisture Using Passive and Active Microwave Data[D]. Beijing: Capital Normal University, 2011. [李芹. 青藏高原地区被动微波遥感联合反演土壤水分的研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2011.]
- [17] Zhou Peng, Ding Jianli, Gao Tingting. A Study on Soil Moisture Retrieval by C-band[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2010, 47(7): 1416-1420. [周鹏, 丁建丽, 高婷婷. C波段多极化 SAR 反演土壤水分研究[J]. 新疆农业科学, 2010, 47(7): 1416-1420.]
- [18] Taconet O, Benallegue M, Vidal-Madjar D, *et al.* Estimation of Soil and Crop Parameters for Wheat from Airborne Radar Backscattering Data in C and X bands[J]. Remote Sensing of Environment, 1994, 50(3): 287-294.
- [19] Prevot L, Champion I, Guyot G. Estimation Surface Soil Moisture and Leaf Area Index of a Wheat Canopy Using a Dual-frequency (C and X Bands) Scatterometer[J]. Remote Sensing of Environment, 1993, 46(3): 331-339.
- [20] Bindlish R, Barros A P. Multifrequency Soil Moisture Inversion from SAR Measurements with the Use of IEM[J]. Remote Sensing Environment, 2000, 71(1): 67-88.
- [21] Bao Yansong, Liu Liangyun, Wang Jihua. Soil Moisture Estimation based on Optical and Microwave Remote Sensing Data[J]. Journal of Beijing Normal University, 2007, 43(3): 228-233. [鲍艳松, 刘良云, 王纪华. 综合利用光学、微波遥感数据反演土壤湿度研究[J]. 北京师范大学学报, 2007, 43(3): 228-233.]
- [22] Zhang Tangtang, Wen Jun, Rogier van der Velde, *et al.* Soil Moisture Retrieval based on ENVISAT/ASAR Data[J]. Plateau Meteorology, 2008, 27(2): 279-285. [张堂堂, 文军, Rogier van der Velde, 等. 基于 ENVISAT/ASAR 资料的土壤湿度反演方法[J]. 高原气象, 2008, 27(2): 279-285.]
- [23] Hutchinson J M S. Estimating Near-Surface Soil Moisture Using Active Microwave Satellite Imagery and Optical Sensor Inputs[J]. American Society of Agricultural Engineers, 2003, 46(2): 225-236.
- [24] Liu Wanxia, Wang Juan, Liu Kai, *et al.* Soil Moisture Data Retrieval by Active Microwave Remote Sensing on Vegetative Land[J]. Tropical Geography, 2007, 27(5): 411-415. [刘万侠, 王娟, 刘凯, 等. 植被覆盖地表主动微波遥感反演土壤水分算法研究[J]. 热带地理, 2007, 27(5): 411-415.]
- [25] Liu Wei. Study on Soil Moisture Inversion and Application with the Polarization Radar in Vegetation Area[D]. Beijing: Institute of Remote Sensing Application, Chinese Academy of Sciences, 2006. [刘伟. 植被覆盖地表极化雷达土壤水分反演与应用研究[D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2005.]
- [26] Guo Maoshu. Research of Vegetation Coverage Distribution Changes of Alpine Grassland based on 3S Technology[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2009. [郭述茂. 基于 3S 技术的高寒草地植被覆盖度分布特征及动态变化研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2009.]
- [27] Tian Hui, Wen Jun, Shi Xiaokang, *et al.* Estimation of Soil Moisture in Summer by Active Microwave Remote Sensing for the Maqu Area at the Upper Reacher of the Yellow River[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(1): 59-66. [田辉, 文军, 史小康, 等. 主动微波遥感黄河上游玛曲地区夏季土壤水分[J]. 水科学进展, 2011, 22(1): 59-66.]
- [28] Wen J, Su B Z. The Estimation of Soil Moisture from ERS wind Scatterometer Data Over the Tibetan Plateau[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2003, 28(2003): 53-61.
- [29] Wen J, Su Z B. A Time Series based Method for Estimating Relative Soil Moisture with ERS Wind Scatterometer Data[J]. Geophysical Research Letters, 2003, 30(7): 1397.
- [30] Decagon. Decagon Devices ECH20 Introduction[EB/OL], [http://www. decagon. com/products/sensors/soil-moisture-sensors/](http://www.decagon.com/products/sensors/soil-moisture-sensors/), 2009-12-15.
- [31] European Space Agency[EB/OL], <https://earth.esa.int/handbooks/asar/CNTR.htm>, 2000-2013.
- [32] Liu Xinyuan, Feng Qisheng, Liang Tiangang, *et al.* Spatial-temporal Dynamic Balance between Livestock Carrying Capacity and Productivity of Rangeland in Gannan of Gansu Province, China[J]. Chinese Journal of Grassland, 2010, 32(1): 99-106. [刘兴元, 冯琦胜, 梁天刚, 等. 甘南牧区草地生产力与载畜量时空动态平衡研究[J]. 中国草地学报, 2010, 32(1): 99-106.]
- [33] Jackson T J, LeVine D M, Hsu A Y, *et al.* Soil Moisture Mapping at Regional Scales Using Microwaves Radiometry: The Southern Great Plains Hydrology Experiment[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(5): 2136-2151.
- [34] Bindlish R, Barros A P. Parameterization of Vegetation Backscatter in Radar based Soil Moisture Estimation[J]. Remote Sensing of Environment, 2000, 76 (2001): 130-137.
- [35] Ulaby F T, Moorerk, Fung A K. Microwave Remote Sensing[M]. Beijing: Beijing Science Press, 1987: 297-304. [乌拉比, 穆尔, 冯健超. 微波遥感[M]. 北京: 北京科学出版社, 1987: 297-304.]
- [36] Attema E P, Ulaby F T. Vegetation Mode as a Water Cloud[J]. Radio Science, 1978, 13: 357-364.

A Study on Estimating Soil Moisture Using Microwave Remote Sensing Combined with Optical over the Source Region of the Yellow River

He Yuan, Wen Jun, Zhang Tangtang, Tian Hui,
Liu Rong, Lv Shaoning, Lai Xin

*(Key Laboratory of Land Surface Process and Climate Change in Cold and Arid Region ,
Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute ,
Chinese Academy of Sciences ,Lanzhou 730000,China)*

Abstract: The estimation of soil moisture in Maqu in northeast Tibet Plateau on August 9 and October 6 2009 is carried out using the European environment satellite (ENVISAT) Advanced Synthesis Aperture Radar(ASAR) APP mode of HH and VV polarization active microwave data. Surface microwave backscatter geometrical optics model (GOM) is used in the bare soil, the effect of the vegetation layer can be eliminated from the backscatter coefficients by a semi-empirical “water-cloud” model, which have achieved good results. The RMS error R between estimated soil moisture using remote sensing and ground measurements is less than 0.05, while the coefficient of determination R^2 is greater than 0.82, which indicates that this method is suitable for the inversion of the soil moisture in Maqu area. The inversion results of remote sensing show that shadow valley and the steep sides of mountains are relatively poor, and the inversion results in relatively flat area are good, and the value of the estimated soil moisture are mostly between 0.20 and 0.50 m^3/m^3 .

Key words: Soil moisture; ENVISAT/ASAR; GOM; “Water-Cloud” model