

基于 Sentinel-1 的绿洲区域尺度土壤水分微波建模

王 娇, 丁建丽*, 陈文倩, 杨爱霞

(新疆大学资源与环境科学学院 绿洲生态教育部重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830046)

摘要:根据最新 Sentinel-1 雷达系统参数及研究区地表参数特点,采用 AIEM 模型进行数值模拟分析,建立稀疏植被覆盖下地表微波散射特征数据库,并在此基础上构建干旱区土壤水分模型.结果表明,1)不同入射角和极化方式下,后向散射系数对土壤含水量(M_v)、组合地表粗糙度(Z_s)的响应分别呈明显对数相关,VV极化对土壤水分响应更敏感,最优响应区间范围为 M_v 0~30%、 Z_s 0~0.06 cm. 2)初探 Sentinel-1 雷达数据预处理方法,GammaMAP 滤波去噪最优,模型用于土壤水分空间分布信息提取与研究区同期野外实况具有良好的一致性,符合四月渭-库地区春早期土壤水分时空分布特征. 3)对于 0-10 cm 表层土壤水分,模拟值同实测值相关系数达到 0.76,即该模型对于干旱区绿洲区域尺度表层土壤水分监测具有适用性.

关键词:微波遥感; Sentinel-1; AIEM 模型; 土壤水分

中图分类号: TP722.6; S152.7 **文献标识码:** A

Microwave modeling of soil moisture in Oasis regional scale based on Sentinel-1 radar images

WANG Jiao, DING Jian-li*, CHEN Wen-Qian, YANG Ai-Xia

(School of Resources and Environment, Xinjiang University / Key Laboratory of Oasis Ecology, Ministry of Education, Urumqi 830046, China)

Abstract: According to the latest Sentinel-1 radar system parameters and the surface characteristic parameters of the study area, this paper established a database of surface microwave scattering characteristics under the sparse vegetation cover condition by AIEM model. On the basis of AIEM model numerical simulation analysis, soil moisture inversion model was constructed. The results showed that: 1) Under the different incident angles and polarization mode, the backscatter coefficient response of soil moisture (M_v) and the composite surface roughness (Z_s) have obvious logarithmic correlation, respectively. Soil moisture response of VV polarization is sensitive, the optimal response range is for M_v 0~30%, Z_s 0~0.06 cm. 2) GammaMAP filtering has good denoising effect in the sentinel-1 radar data preprocessing. The spatial distribution of soil moisture extracted from sentinel-1 images has good consistency with the actual situation in the same period field in the study area. In April, the soil moisture spatio-temporal distribution of Weigan-Kuqa river basin shows spring drought characteristics. 3) For 0~10 cm surface soil moisture, the correlation coefficient between the measured value and simulated value reaches 0.76, showing that this model is suitable for the extraction of soil moisture in the arid area of a certain regional scale.

Key words: microwave remote sensing, sentinel-1, AIEM model, Soil moisture

PACS: 95.75.Rs; 92.40.Lg

收稿日期:2016-05-30,修回日期:2016-09-08

Received date: 2016-05-30, revised date: 2016-09-08

基金项目:新疆维吾尔自治区科技支疆项目(201591101);新疆维吾尔自治区重点实验室课题(2016D03001);国家自然科学基金项目(U1303381, 41261090, 41161063);教育部长江学者和创新团队发展计划(IRT1180);新疆研究生科研创新项目(XJGR12014022)

Foundation items: Support Programs for Science and Technology of Xinjiang Province, China (201591101); Program for Key Laboratory of Xinjiang Province, China (2016D03001); NSFC (U1303381, 41261090, 41161063); Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University of Ministry of Education of China (IRT1180); Research and Innovation Program for Postgraduate of Xinjiang Province, China (XJGR12014022)

作者简介(Biography):王 娇(1990-),女,湖北孝感人,硕士研究生,主要从事干旱区资源环境及遥感应用研究. E-mail: wangjiao_ygddd@qq.com

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: ding_jl@163.com

引言

土壤水分是陆地—大气系统间水热传输和能量交换的重要基础,也是联系地表与地下水循环、陆地间碳循环的关键纽带^[1]. 同时,土壤水分作为最常用的地表模型参数之一,对于作物估产、土地退化、旱情监测,特别是干旱、半干旱区气象水文、绿洲农业、生态环境及其可持续发展等领域研究具有重大意义^[2]. 相较光学遥感而言,微波遥感具有全天时、全天候成像,穿透力强,受光照、云雾影响弱等特点^[3],尤其是微波辐射和散射对地物介电常数独特的敏感性,使其被认为是遥感监测土壤水分最具发展潜力的手段^[4]. 近年来,随着多频率、多极化、多角度的星载 SAR 不断发射升空,尤其是 2014 年 10 月欧空局针对“哥白尼全球对地观测项目”研制的首颗卫星——Sentinel-1 开始面向全球用户提供免费雷达数据下载,为今后区域微波土壤水分监测提供了新的方法和途径^[5].

微波后向散射系数与土壤介电常数直接相关,而土壤含水量高低则对介电常数变化有显著影响,因此,SAR 监测土壤水分具有坚实的物理基础^[6]. 为了建立微波后向散射系数与土壤水分等地表参数间的关系,国内外学者针对裸露或植被稀疏地表建立了一系列理论模型(如几何光学模型、物理光学模型、小扰动模型等),经验模型(如线性模型、Oh 经验模型和 Dubois 模型等)和半经验模型(如 Chen 模型、Oh 模型和 Shi 模型等). 理论模型是一种正向模型,能刻画地表微波散射完整机理,但在实际应用中模型复杂且所需输入地表参数较多,无法直接用于土壤水分监测;经验模型多为统计模型,能快速反演土壤水分,但受建模样区限制并且缺乏必要的理论根据.

因此,本研究旨在以 Sentinel-1 为重要的微波数据源,以新疆渭干河—库车河三角洲绿洲(以下简称“渭—库绿洲”)为干旱区典型研究靶区,结合两种传统建模思想的优势,首先采用“正演”模型 AI-EM 模型针对雷达传感器系统参数及研究区地表参数特点进行数值模拟,建立地表微波散射特征数据库,避免了建模数据缺乏物理机理和受采样限制;然后进一步通过“反演”的方式,利用模拟数据库分析后向散射系数与地表粗糙度、土壤水分等参数之间的响应关系和建模参数,在此基础上构建新的适用于绿洲区域尺度土壤水分模型,并采用同期野外实测数据进行精度验证,以期今后 Sentinel-1 雷达数

据在干旱区大尺度、短周期内的区域土壤水分定量监测应用奠定基础.

1 研究区与数据源

1.1 研究区概况

渭—库绿洲位于新疆南部的塔里木盆地中北部,辖阿克苏地区的库车、新和、沙雅 3 县,地理坐标介于 $41^{\circ}06' \sim 41^{\circ}38'N$, $81^{\circ}26' \sim 83^{\circ}17'E$,是一个典型而完整的山前冲积扇形平原. 地势北高南低,平均海拔 920 ~ 1 100 m,大陆性暖温带干旱气候,年平均降水量 51.6 mm,年平均蒸发量 2 123.7 mm,属于干旱与极端干旱地区. 该地区是新疆典型绿洲灌溉农业区,作物主要以小麦、棉花为主,自然植被主要以盐穗木、梭梭、骆驼刺、黑刺、怪柳等耐盐植被,在此开展高效高精度的土壤水分监测,有利于为其绿洲农业生产安全、地下水位保护及土壤盐渍化防治提供科学依据^[7]. 本文中绿洲区域尺度界定为四月渭—库典型绿洲、交错带及其周边荒漠区,如图 1 所示. 季相界定的主要原因是该时期绿洲农作物及天然植被等处于生长季初期,区域整体上以裸露地表或稀疏植被覆盖为主,NDVI 普遍较小低于 0.4,对土壤水分建模影响程度低. 因此,本文雷达数据选择及野外实际考察都以这一时期为主.

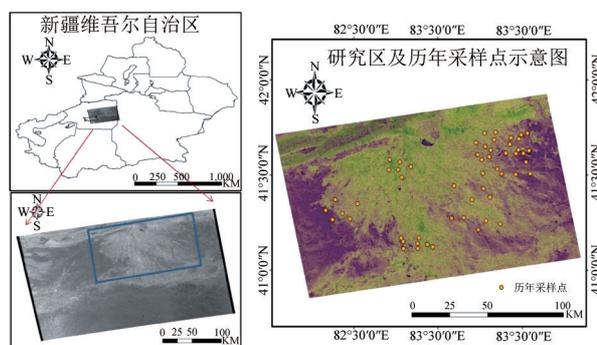


图 1 研究区及采样点示意图

Fig. 1 Schematic description of the study area and sampling point

1.2 卫星数据

1) Sentinel-1 数据. Sentinel-1 具有全天候成像能力,能提供中、高分辨率陆地、沿海及海冰测量数据,具有单双极化、短重访周期、强干涉能力等特点,可实现全球范围高分辨率监测,也为实现同一地区长时间序列土壤水分监测提供了技术支撑^[5],其主要系统参数如表 1 所示. 本文获取的研究区 Sentinel-1 影像数据,成像时间 2015 年 4 月 21 日,Level1 级地距产品,工作模式干涉幅宽,分辨率 $5 \text{ m} \times 20$

m,极化方式为 VV.

表 1 Sentinel-1 成像模式及主要参数

Table 1 The imaging mode and main parameters of Sentinel-1

轨道类型	近极地太阳同步轨道			
轨道高度	693km			
轨道倾角	98.18°			
运行周期	99min			
重访周期	12d			
工作波段	C			
工作频率	5.405GHz			
工作模式	条带成像	干涉宽幅	超幅宽	波浪
入射角	20°~45°	29°~46°	19°~47°	22°~38°
分辨率	5m×5m	5m×20m	20m×40m	5m×5m
幅宽	80km	250km	400km	400km
极化方式	HH+HV,	HH+HV,	HH+HV,	HH, VV
	VH+VV,	VH+VV,	VH+VV,	
	HH, VV	HH, VV	HH, VV	

2) 雷达影像预处理. 雷达影像在成像机理、图像特性等方面与光学有很大不同,因而在图像预处理方法上也存在差异,主要包括多视处理、斑点噪声抑制、地理编码及辐射定标等^[8]. 本研究所使用的雷达数据已进行过聚焦处理及斜距-地距转换,通过对比不同窗口下 Lee 滤波、Kuan 滤波、Frost 滤波、GammaMAP 滤波及其增强型滤波器的基础上,选择效果最好的 7×7 窗口 Gamma MAP 滤波器对影像进行去噪处理. 由于 SAR 通过距离多普勒效应成像,并且以图像灰度值形式记录了目标地物后向散射回波强度和相位等信息,因此,在进行土壤水分提取前需要进行辐射定标,将图像数据转换为后向散射系数,定标公式如下:

$$\sigma_{ij}^0 = 10 \log[(D_{DNj}^2 + A_0)/A_i + 10 \log(\sin(I_i))] \quad (1)$$

式中, i 表示第 i 行, j 表示第 j 列; D_{DN} 为雷达图像的灰度值. A_0 和 A_i 为雷达系统自动增益控制系数. I_i 为每个像元沿距离方向上的入射角.定标完成后,还需进一步对图像进行几何精校正、图像增强及感兴趣区裁剪等处理.

1.3 地面数据

为率定模型模拟参数阈值及后期土壤水分精度验证,于 2015 年 3 月 21 日~4 月 30 日期间进行了野外实际勘察工作,获取了土壤水分、温度、质地、容重、介电常数及地表粗糙度等相关研究数据.野外作业主要根据研究区不同下垫面地表参数特征,选取以自然因素为主导较均匀地分布在绿洲、绿洲-荒漠交错带、荒漠带共 41 个代表性样点,本次样区分布

与历次考察范围重合使研究更具延续性.每个采样点以样区中心为圆心,半径为 5 m 呈梅花状采样五次取平均值作为样点实测值,利用 W. E. T sensor、Hydra 测量土壤含水量、温度、介电常数等相关数据,并用铝盒采集土壤表层 0~10 cm 的土壤样品带回实验室采用烘干法得到土壤重量含水量,实测数据转换为土壤体积含水率约在 2%~35% 之间.研究区土壤质地以砂壤土为主,其中沙粒含量约为 60%,粘粒含量约为 13%,土壤容重采用环刀法进行测定取均值 $1.4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$.对部分典型样点采用剖面板法从南北 2 个方向测量土壤剖面获取地表粗糙度参数并将数据带回实验室矢量化计算均方根高度 s 和相关长度 l .

2 实验与方法

2.1 AIEM 模型模拟地表微波散射特征

由于研究区盐渍化区域较广,植被覆盖稀疏,土壤水分含量相对较低,因此,在比较了一系列理论和经验散射模型原理及其适用条件的基础上,结合研究区特征,本文采用 AIEM 模型进行数值模拟以建立该区地表微波散射特征数据库.AIEM 模型是目前最为广泛的真实地表电磁散射模拟模型,其表达式及单次散射项由下式给出^[9]:

$$\sigma_{pq}^0 = \frac{k_1^2}{2} \exp(-s^2(k_z^2 + k_{sz}^2)) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{s^{2n}}{n!} |I_{pq}^n|^2 \quad (2)$$

$$I_{pq}^n = \frac{W^n(k_{sx} - k_x, k_{sy} - k_y)}{(k_{sz} + k_z)^n f_{pq} \exp(-s^2 k_z k_{sz}) + (k_{sz})^n F_{pq}(-k_x, -k_y) + (k_z)^n F_{pq}(-k_{sz}, -k_{sy})} \quad (3)$$

式中: pq 代表极化方式; k_1 是介质 1 中的自由空间波数; s 是土壤表面均方根高度; $W^n(k_{sx} - k_x, k_{sy} - k_y)$ 是地表相关函数的 n 阶傅里叶变换; $k_z = k \cos \theta$; $k_{sz} = k \cos \theta_s$; $k_x = k \sin \theta \cos \varphi$; $k_{sx} = k \sin \theta_s \cos \varphi_s$; $k_y = k \sin \theta \sin \varphi$; $k_{sy} = k \sin \theta_s \sin \varphi_s$; φ 是入射方位角; θ, φ_s 分别是散射角和散射方位角. F_{pq} 和 f_{pq} 分别是与菲涅尔反射率 $\Gamma_{h/v}$ 相关的函数.

$\Gamma_{h/v}$ 与土壤介电常数 ϵ 可建立如下关系式:

$$\Gamma_h(\theta) = \frac{\cos \theta - \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta}} \quad (4)$$

$$\Gamma_v(\theta) = \frac{\epsilon \cos \theta - \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta}}{\epsilon \cos \theta + \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta}} \quad (5)$$

在雷达入射电磁波频率为 1~18GHz 范围内,

本文采用 Dobson 半经验模型建立土壤介电常数 ε 与土壤体积含水量 M_v 之间转换公式如下^[6]:

$$\varepsilon^\alpha \cong 1 + \frac{\rho_b}{\rho_s} (\varepsilon_s^\alpha - 1) - M_v^\beta \varepsilon_{fw}^\alpha - M_v, \quad (6)$$

式中: ρ_b 为土壤容重, g/cm^3 ; ρ_s 为土壤固态物质密度, g/cm^3 ; ε_s 为土壤中固态物质的介电常数 ($\varepsilon_s \cong 4.7 \text{ F/m}$); ε_{fw} 为纯水的介电常数; α 和 β 由土壤质地决定的常数。

根据 Sentinel-1 系统参数及研究区地表参数特点, 利用 AIEM 模型进行数值模拟以建立 C 波段雷达系统 (频率为 5.405 GHz) 在不同极化方式下地表微波散射特征数据库. 模拟时设定土壤温度为 15°C, 沙粒含量 (S) 为 60%, 粘粒含量 (C) 为 13%, 土壤容重 ρ_b 为 1.4 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 在土壤体积含水量 M_v 从 2% ~ 40% 之间按 2% 步长通过公式 6 计算得到不同 M_v 下对应的土壤介电常数 ε , 将 ε 代入 AIEM 模型得到与土壤含水量对应的后向散射系数, 模型输入参数如表 2 所示.

表 2 AIEM 模型输入参数

Table 2 Input parameters in AIEM model

参数	取值范围	取值间隔
入射角 θ ($^\circ$)	10 ~ 45	1
体积含水量 M_v (%)	2 ~ 40	2
均方根高度 s (cm)	0.2 ~ 4	0.2
相关长度 l (cm)	2.5 ~ 35	2.5
表面自相关函数	指数自相关函数	

2.2 后向散射系数对土壤含水量的响应

通过 AIEM 模型模拟结果分析及前人研究经验表明, 土壤含水量与后向散射系数之间明显呈对数相关, 且这种对数趋势关系在不同地表粗糙度条件下保持不变, 只随入射角变化. 因此, 不同极化方式下土壤含水量与后向散射系数之间的关系可以通过以下公式表示:

$$\sigma_{pq}^0 = A_{pq} \ln(M_v) + f(s, l), \quad (7)$$

式中: pq 代表极化方式; 系数 A_{pq} 为给定入射角条件下与粗糙度无关的量; $f(s, l)$ 为给定地表粗糙度.

2.3 后向散射系数对地表粗糙度的响应

地表粗糙度是影响地面散射特性的决定性因素之一, 其包含两个未知参数 (均方根高度 s 、相关长度 l) 都对后向散射产生一定影响, 因此, 地表粗糙度的反演是雷达建模研究中的重难点问题^[10]. Zribi M 在其研究中采用组合地表粗糙度 $Z_s = s^2/l$ 且在地表参数反演中取得了良好效果^[11]. 模型模拟结果表明, 在 HH 和 VV 极化方式下组合地表粗糙度与后

向散射系数之间存在良好对数关系, 可以通过以下公式表示:

$$\sigma_{pq}^0 = B_{pq} \ln(Z_s) + f(M_v), \quad (8)$$

式中: pq 代表极化方式; 系数 B_{pq} 为给定入射角条件下与含水量无关的量; $f(M_v)$ 为给定土壤含水量.

本文采用组合地表粗糙度 Z_s , 参照前人研究中曾运用大、小入射角条件下后向散射系数之差 $\Delta\sigma^0$ 反演组合地表粗糙度 Z_s 的基本原理, 根据已获取的雷达影像特征, 利用垂直极化条件下 23° 和 39° 入射角的后向散射系数差反演得到相关关系式如图 2 所示:

$$y = -0.796 \ln x + 0.1485 \quad (9)$$

由式 (9) 得到计算组合地表粗糙度参数 Z_s 公式如下:

$$Z_s = e^{-1.26\Delta\sigma_u^0 + 0.19} \quad (10)$$

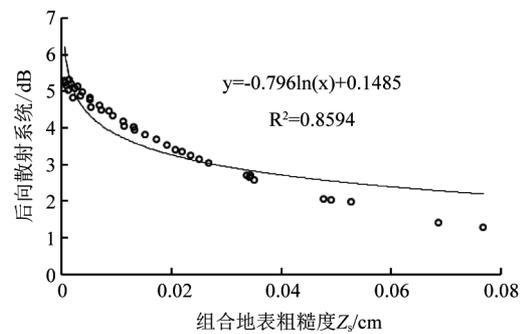


图 2 后向散射系数差 $\Delta\sigma^0$ 与 Z_s 相关分析

Fig. 2 Relevance between $\Delta\sigma^0$ and Z_s

2.4 绿洲区域尺度土壤水分建模

根据后向散射系数对土壤含水量和组合地表粗糙度之间的响应关系, 由式 (7-8) 可将后向散射系数表示为只与雷达入射角 θ 、土壤含水量 M_v 和组合地表粗糙度 Z_s 相关的函数关系式如下:

$$\sigma_{pq}^0 = A_{pq}(\theta) \ln(M_v) + B_{pq}(\theta) \ln(Z_s) + C_{pq}(\theta), \quad (11)$$

由式 (11) 可以得到计算土壤含水量 M_v 公式如下:

$$M_v = \exp\left(\frac{\sigma_{pq}^0 - B_{pq}(\theta) \ln(Z_s) - C_{pq}(\theta)}{A_{pq}(\theta)}\right), \quad (12)$$

式中: pq 代表极化方式; 系数 $A_{pq}(\theta)$ 、 $B_{pq}(\theta)$ 、 $C_{pq}(\theta)$ 为只与入射角参数 θ 相关的量. 为确定三个系数的具体表达式, 首先利用 AIEM 模型模拟表 2 中所示参数构建研究区数据库, 其次所有模拟值采用最小二乘法进行非线性拟合, 计算不同入射角条件下 $A_{pq}(\theta)$ 、 $B_{pq}(\theta)$ 、 $C_{pq}(\theta)$ 的具体数值, 最后通过非线性回归得到这三个系数的具体表达式.

3 结果与分析

3.1 AIEM 模型模拟结果分析

根据获取的 Sentinel-1 影像参数和表 2 中参数设定,利用 AIEM 模型进行数值模拟,建立了研究区地表微波散射特征数据库,同时进行了不同入射角条件下,后向散射系数对土壤含水量、组合地表粗糙度之间的响应关系分析.为更加形象表明三者之间的非线性关系,以垂直极化条件下入射角给定 10° 为例,绘制 σ^0 、 Z_s 、 M_v 的三维关系图如图 3 所示:

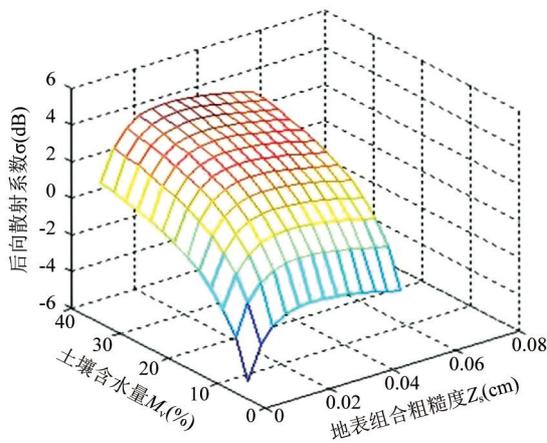


图 3 M_v 、 Z_s 与后向散射系数相关关系图
Fig. 3 The Relationship between M_v 、 Z_s and backscattering coefficient

从图 3 可以看出,土壤含水量、组合地表粗糙度分别与后向散射系数间呈明显对数相关.一方面给定组合地表粗糙度条件下,后向散射系数对土壤含水量的响应均呈相同变化趋势,即后向散射系数随着 M_v 的增加呈增大趋势,并且随着土壤含水量的不断增加,在 M_v 接近 30% 附近开始出现饱和现象,后向散射系数对土壤含水量的响应敏感程度降低.另一方面给定土壤含水量条件下,后向散射系数对

组合地表粗糙度的响应均呈相同变化趋势,即后向散射系数随着 Z_s 的增加呈现先增大,在组合地表粗糙度接近 0.06 cm 附近时后开始趋于饱和或者呈现减小趋势,这种变化趋势与土壤含水量无关,是利用后向散射系数反演组合地表粗糙度的基础.此外,对于不同入射角条件下、不同极化方式如 HH 等也有类似规律.总的模拟结果表明:后向散射系数随土壤含水量的增加而增大,并随入射角的增大而减少,所以必须考虑入射角的影响;后向散射系数随着组合地表粗糙度的增加,对土壤含水量响应的敏感程度逐渐降低,所以必须考虑组合地表粗糙度的影响;交叉极化由于易受目标多次散射其后向散射系数比同极化弱,而 VV 极化与 HH 极化相比,后向散射系数对土壤含水量的响应更为敏感,因此更有利于土壤水分反演.

根据后向散射系数对 Z_s 、 M_v 的响应关系,将后向散射系数表示为只与雷达入射角 θ 、土壤含水量 M_v 和组合地表粗糙度 Z_s 相关的函数关系式如式 (12) 所示.系数 $A_{pq}(\theta)$ 、 $B_{pq}(\theta)$ 、 $C_{pq}(\theta)$ 为只与入射角参数 θ 相关的量,在 VV 极化条件下采用最小二乘拟合各入射角下对应系数值如表 3 所示.

将各入射角下拟合值进行非线性回归得到系数 $A_{pq}(\theta)$ 、 $B_{pq}(\theta)$ 、 $C_{pq}(\theta)$ 的具体表达式如下:

$$\begin{aligned} A_{VV}(\theta) &= 7.521 - 18.246 \times \cos(\theta) + 21.131 \times \cos(\theta)^2 - 8.193 \times \cos(\theta)^3 \\ B_{VV}(\theta) &= 4.677 - 32.125 \times \sin(\theta) + 46.985 \times \sin(\theta)^2 - 25.334 \times \sin(\theta)^3 \\ C_{VV}(\theta) &= 28.389 - 156.408 \times \sin(\theta) + 197.884 \times \sin(\theta)^2 - 100.012 \times \sin(\theta)^3 \end{aligned} \quad (13)$$

3.2 绿洲区域尺度土壤水分经验模型模拟结果分析

根据式(12-13)通过 ENVI 软件中的波段运算,得到基于 Sentinel-1 雷达影像提取的研究区土壤水分空间分布图,由于本文构建的干旱区土壤水分经验模型对于水库、河流等纯净水体的识别有待进一步改进,因此对位于库车县的克孜尔水库进行了掩膜

表 3 不同入射角对应的各系数拟合值及其相关系数
Table 3 The fitted values and coefficients of different incidence angle

θ	$A_{vv}(\theta)$	$B_{vv}(\theta)$	$C_{vv}(\theta)$	R^2	θ	$A_{vv}(\theta)$	$B_{vv}(\theta)$	$C_{vv}(\theta)$	R^2
10	2.182	0.407	6.822	0.822	28	2.159	-2.709	-11.849	0.946
12	2.178	-0.237	3.447	0.885	30	2.158	-2.852	-12.978	0.936
14	2.174	-0.763	0.567	0.935	32	2.157	-2.977	-14.009	0.927
16	2.170	-1.199	-1.921	0.965	34	2.156	-3.085	-14.954	0.918
18	2.167	-1.562	-4.094	0.978	36	2.154	-3.179	-15.824	0.910
20	2.164	-1.869	-6.010	0.979	38	2.152	-3.262	-16.627	0.903
22	2.163	-2.129	-7.712	0.974	40	2.148	-3.333	-17.373	0.896
24	2.161	-2.352	-9.236	0.966	42	2.144	-3.396	-18.067	0.891
26	2.160	-2.544	-10.608	0.956	44	2.138	-3.450	-18.718	0.885

处理如图 4 所示.从图中可以看出,四月研究区整体土壤水分含量在 1% ~ 30% 左右,呈现绿洲内部农田及稀疏植被覆盖区较为湿润、绿洲-荒漠交错带土壤水分含量较低,外围荒漠区极度干旱缺水的状态,这些特征跟该时期研究区实际野外考察情况基本相符.

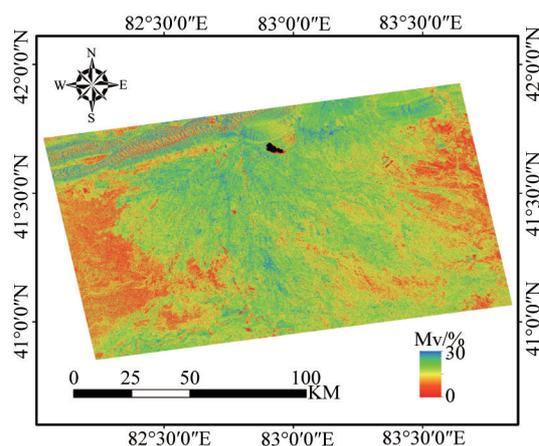


图 4 Sentinel-1 影像提取土壤水分空间分布图
Fig. 4 The Spatial distribution of soil moisture extracted from Sentinel-1 radar image

由空间分布图可知,土壤水分高值主要位于研究区西北部山区、绿洲内部灌渠沿线及南部部分河流沿岸地区.这是由于植被和水体主要集中在西北部山区和南部平原下游地区,植被对降水有一定截留作用和蓄水能力,尤其山区降水频率相对较高,因此,水分含量部分高值达到了 20% ~ 30%.同时,绿洲内部居民点密集区由于农作物漫灌、河流细小支流、修建的灌渠以及作物本身的田间持水能力等因素影响,土壤水分含量在 15% ~ 25% 左右.绿洲—荒漠交错带及荒漠区土壤水分含量绝大多数低于 15%,尤其在研究区东北部和西部地区,随着距绿洲的距离越远,土壤水分含量越低,部分地区水分含量极低小于 3%.这是由于这些地区植被覆盖被极地或者为荒漠,土壤持水能力较低且蒸降比极高导致极端干旱状况的发生.此外,这些地方地表粗糙度一般情况较大,区域土壤盐渍化现象严重.

3.3 模型精度验证及评价

为了验证本文构建的土壤水分模型精度,将 Sentinel-1 雷达图像模拟值与同期研究区野外采样实验得到的 0-10 cm 表层土壤实测值进行了相关分析如图 5 所示.从图中可以看出,表层土壤水分模拟值与地面实测值之间相关性较好,相关系数达到了 0.76,基本上达到了区域尺度土壤水分反演的精度

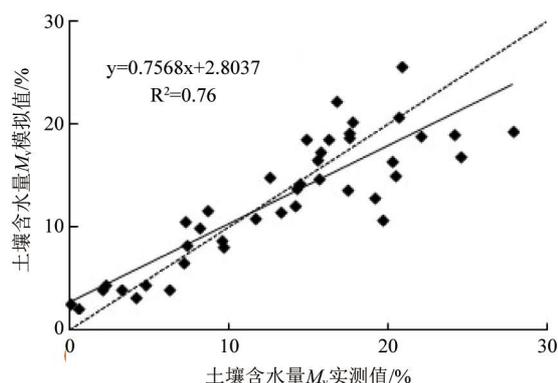


图 5 土壤含水量模拟值与实测值相关分析
Fig. 5 The Relevance of soil moisture between simulation and measured values

要求,能够相对准确的反映出研究区土壤水分空间分布状况.但是,也有部分模拟值和实测值之间土壤水分含量误差超过了 4%,反演精度较低,造成的原因可能包含系统误差和偶然误差两方面.系统误差方面,由于建模公式及参数确定主要依据 AIEM 模型模拟值,尽管 AIEM 模型相较其他理论模型能较好反映干旱区地表微波辐射散射特征,但 AIEM 模型输入参数中对土壤质地、容重、温度等采用了经验常数,这种近似值与不同情况下垫面的实际值存在区域性差别,因此可能对部分点的模拟精度带来误差.偶然误差方面,土壤水分实测值与雷达模拟值在时间、空间尺度上不一定完全一致,尺度转换等问题也会引起误差.因此,在土壤水分模型构建过程中,应当尽可能的减少人为误差和累计误差以达到更好的土壤水分模拟效果.

4 结论

土壤水分是制约干旱区绿洲生态环境和可持续发展的主要问题.本文以土壤水分监测的前沿技术手段——微波遥感及 AIEM 模型数值模拟为理论基础,以最新首次面向全球用户开放的 Sentinel-1 雷达影像为重要微波数据源,以新疆渭干河-库车河三角洲绿洲为典型干旱区研究靶区,构建了绿洲区域尺度土壤水分提取经验模型,得到主要结论如下:

(1) AIEM 模型相较其它理论模型,经验、半经验模型而言,适用的地表粗糙度尺度范围更广,其简化和改进能更准确的描述随机地表微波散射特征,对于干旱区地表微波散射场的模拟具有较好的适宜性.通过对 AIEM 模型模拟数据进行分析,得到后向散射系数对土壤含水量、组合地表粗糙度的响应分别呈明显对数相关.相较交叉和 HH 极化方式而言,

VV 极化更适于干旱区土壤水分监测,并且在土壤水分含量 0~30%、组合地表粗糙度 0~0.06 cm 的区间范围内响应程度最为敏感,超过阈值可能逐渐出现“饱和现象”,敏感程度开始降低。

(2) 对 Sentinel-1 雷达影像预处理方法进行了初探,去噪过程中 7×7 窗口 GammaMAP 滤波效果较好,去除了大部分明显的斑点噪声,其后,利用构建的干旱区土壤水分经验模型获取了研究区土壤水分空间分布图。Sentinel-1 雷达影像反演情况同该时期研究区野外实际情况具有良好的一致性。四月是渭—库绿洲的春早期,这一时期降水稀少,蒸发强烈,植被处于生长发育初期且覆盖度普遍较低,研究区绿洲—荒漠交错带及外围荒漠区整体旱情较严重,较湿润区主要呈沿山区及绿洲内部稀疏植被覆盖脉络和近河流、灌渠沿线等分布特征。

(3) 野外土壤水分实测数据同模型模拟值之间进行了相关分析,0~10 cm 表层土壤水分实测值同模拟值之间相关系数达到了 0.76,符合区域尺度土壤水分建模的精度要求,表明构建的经验模型对于干旱区土壤水分提取具有一定的区域尺度适用性。此外,今后通过进一步工作改进或减少模型构建及地表参数定量化过程中出现的误差问题,模型精度仍有进一步提升的空间。

References

- [1] YU Fan, LI Hai-Tao, ZHANG Cheng-Ming, *et al.* Data assimilation on soil moisture content based on multi-source remote sensing and hydrologic model [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (余凡,李海涛,张承明,等.多源遥感数据与水文过程模型的土壤水分同化方法研究. *红外与毫米波学报*), 2014, **33**(6):603-607.
- [2] LI Xiang, DING Jian-li. Soil moisture monitoring based on measured hyper spectral index and HSI image index [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineer-*

ing (李相,丁建丽.基于实测高光谱指数与 HSI 影像指数的土壤含水量监测. *农业工程学报*), 2015, **31**(19):68-75.

- [3] LI Li, WANG Di, WANG Peng-Xin, *et al.* Progress on monitoring soil moisture using SAR data [J]. *Resources Science* (李俐,王荻,王鹏新,等.合成孔径雷达土壤水分反演研究进展. *资源科学*), 2015, **37**(10):1929-1940.
- [4] YANG Tao, GONG Hui-Li, LI Xiao-Juan, *et al.* Progress of soil moisture monitoring by remote sensing [J]. *Acta Ecologica Sinica* (杨涛,宫辉力,李小娟,等.土壤水分遥感监测进展. *生态学报*), 2010, **30**(22):6264-6277.
- [5] PALOSCIA S, PETTINATO S, SANTI E, *et al.* Soil moisture mapping using Sentinel-1 images: Algorithm and preliminary validation [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, **134**(4):234-248.
- [6] DOBSON M C, ULABY F T, HALLIKAINEN M T, *et al.* A microwave dielectric behavior of wet soil part II: Dielectric mixing models [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1985, **GE-23**(1):35-46.
- [7] DING Jian-li, YAO Yuan. Evaluation of soil moisture contents under sparse vegetation coverage conditions using microwave remote sensing technology in arid region [J]. *Scientia Geographica Sinica* (丁建丽,姚远.干旱区稀疏植被覆盖条件下地表土壤水分微波遥感估算. *地理科学*), 2013, **33**(3):837-843.
- [8] ZHANG Yan-Ning, LI Ying. The key technology of SAR image processing [M]. Beijing: Electronic Industry Press (张艳宁,李映. SAR 图像处理的关键技术 [M]. 北京:电子工业出版社), 2014:36-41.
- [9] WU T D, CHEN K S, SHI J C. A study of an AIEM model for bistatic scattering from randomly rough surfaces [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, **46**(9):2584-2598.
- [10] CHEN Jing, JIA Yi, YU Fan. Soil moisture inversion by radar with dual-polarization [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (陈晶,贾毅,余凡.双极化雷达反演裸露地表土壤水分. *农业工程学报*), 2013, **29**(10):109-115.
- [11] ZRIBI M, DECHAMBRE M. A New Empirical Model to Retrieve Soil Moisture and Roughness from Radar Data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, **84**(1):42-52.

(上接第 48 页)

References

- [6] KANG Daehyun, IM Jungho, LEE Myong-In, *et al.* The MODIS ice surface temperature product as an indicator of sea ice minimum over the Arctic Ocean [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, **152**:99-108.
- [7] KWOK R, GUNNINGHAM G F, PANG S S. Fram Strait sea ice outflow [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, **109**(C1):1-14.
- [8] ZHOU Ying, GONG Cai-Lan, HU Yong, *et al.* Extraction of Sea Ice Information in the Arctic Ocean by Using FY-3/MERSI Data [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental*

Optics (周颖,巩彩兰,胡勇,等.风云三号 MERSI 数据提取北冰洋海冰信息方法研究. *大气与环境光学学报*), 2013, **8**(1):53-59.

- [9] RIGGS G A, HALL D K, ACKERMAN S A. Sea ice extent and classification mapping with the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer Airborne Simulator [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1999, **68**(2):152-163.
- [10] KE Chang-Qing, XIE Hong-Jie, LEI Rui-Bo, *et al.* Spectral Features Analysis of Sea Ice in the Arctic Ocean [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis* (柯长青,谢红接,雷瑞

- 波,等. 北极海冰的光谱特征分析. 光谱学与光谱分析), 2012, 32(4): 1081 - 1084.
- [11] LU Peng. Study on Sea Ice Geometric Parameters and Parameterization of Drag Coefficient Based on Image Analysis [D]. Dalian University of Technology(卢鹏. 基于图像分析的海冰几何参数和拖曳系数参数化研究. 大连理工大学), 2007.
- [12] WIDELL K, ØSTERHUS S, GAMMELSRØD T. Sea ice velocity in the Fram Strait monitored by moored instruments [J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(19): 379 - 394.