

基于全极化雷达数据反演夏玉米覆盖农田 表层土壤含水量

王春梅^{1,2}, 余涛^{1,2}, 孟庆岩^{1,2}, 占玉林^{1,2}, 杨健^{1,2}, 李娟^{1,2}, 魏香琴^{1,2}

(1. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101;

2. 国家航天局航天遥感论证中心, 北京 100101)

摘要: 基于 RADARSAT-2 全极化 C 波段雷达数据和野外实测数据, 建立了不同极化方式的后向散射系数与夏玉米植被含水量的响应关系, 获得了山东禹城夏玉米覆盖区域农作物含水量。在此基础上, 对“水-云模型”的参数进行了修改, 从总的极化雷达后向散射中去除了植被影响, 获取了土壤组分的后向散射系数, 从而能够通过雷达多极化数据得到表层土壤含水量。结果表明: 夏玉米植被含水量观测值与 VH、VV 后向散射系数的相关性均达到显著水平, 相关系数分别为 0.86 和 0.79, VH 极化优于 VV 极化; 在 RADARSAT-2 四种极化方式下, VV 极化下的“水-云模型”理论计算的误差平方和最小, 是研究区表层土壤含水量反演的最优极化方式。

关键词: 雷达; 水-云模型; 夏玉米; 土壤含水量; 植被含水量

中图分类号: P208

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)02-0029-06

Surface soil moisture of farmland covered by summer corn stalk retrieved by full polarimetric radar data

WANG Chunmei^{1,2}, YU Tao^{1,2}, MENG Qingyan^{1,2}, ZHAN Yulin^{1,2},

YANG Jian^{1,2}, LI Juan^{1,2}, WEI Xiangqin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Jointly Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. Demonstration Center for Space Remote Sensing of NASA, Beijing 100101, China)

Abstract: Based on the RADARSAT-2 full polarization C-band radar data and field survey data, the paper set up the response relationship between backscatter coefficient of different polarization modes and vegetation water content of summer corn, and got the water content of summer corn crop in covered area of Shandong Yucheng. On this basis, it modified the parameters of water-cloud model and obtained the backscatter coefficient of soil components from removing the backward scattering field of the total polarization radar vegetation influence so as to get surface soil water content by radar data of multipolarization. The results show that the correlation between vegetation water content of summer corn and VH, VV scattering coefficient reached significant level, correlation coefficient is 0.86 and 0.79 respectively, the value of VH polarization is better than that of VV polarization; Under the four polarization modes of RADARSAT-2 and the water and cloud model of VV polarization, error sum of squares of theory calculation is the least, which is the optimal polarization inversion type of surface soil water content in the study area.

Key words: radar; water-cloud model; summer corn; soil moisture; vegetation water content

土壤含水量是生态环境中水分存在形式和转换的主要环节之一, 是水文模型、气候预测模型以及干旱监测模型等研究的基础^[1-2]。土壤含水量信息具

有区域尺度的概念, 土壤含水量一般需要大尺度的信息内涵, 才有实质性的意义^[3-4]。了解区域土壤含水量, 尤其是表层土壤含水量的分布状况, 对于了

收稿日期: 2013-11-19; 修回日期: 2014-01-03

基金项目: 十二五民用航天项目(D040201); 高分辨率对地观测系统国家重大专项(YZD00100GF); 遥感科学国家重点实验室资助项目(Y1Y00244KZ); 国家自然科学基金资助项目(11101421); 中国科学院遥感应用研究所知识创新工程青年人才领域前沿项目(Y1S01500CX)

作者简介: 王春梅(1979-), 女, 山东日照人, 博士, 助理研究员, 主要从事水资源遥感监测研究。

通讯作者: 余涛(1967-), 男, 北京人, 研究员, 博士生导师, 主要从事定量化遥感、对地观测系统论证、遥感应用系统开发等研究。

解表层径流状况、地下水补给以及陆地表面和大气之间互反馈的关系具有极为重要的意义^[4]。

随着遥感技术的发展和應用,该技术已逐步成为表达土壤含水量区域分布信息强有力的手段^[5-8]。相对于光学遥感而言,微波遥感因其具有一定的穿透性,并且不受天气条件的限制,而能大大提高反演的准确性和可靠性^[9-10]。被动微波遥感对土壤含水量较敏感,但对水文学和农学方面的研究,空间尺度过大^[11]。主动微波遥感的发展已经有几十年的历史,国内外很多学者根据影响土壤表面后向散射强度的主要因素(土壤介电常数、粗糙度参数、植被覆盖,雷达参数等),建立反演模型,对农用的土壤含水量进行反演^[12-16]。然而,在利用主动微波反演土壤含水量的过程中,较高的植被覆盖率会引起对土壤含水量的过低估计和对表面粗糙度的过高估计^[17]。因此如何在有植被覆盖地区较精确地估算地表土壤含水量是当前国际、国内研究的一个重要课题^[18-19]。

后向散射系数对地面粗糙度的敏感程度大于土壤含水量,单极化雷达数据不能满足土壤含水量反演精度的要求,需要利用多时相、多频率、多角度、多极化数据去除粗糙度对后向散射系数的影响,提高土壤含水量的反演精度。本文利用 RADARSAT-2 全极化雷达数据,分析不同极化方式下后向散射系数对植被含水量的响应,并建立定量关系,进一步通过对“水—云模型”参数的修正,准确得到土壤组分的后向散射系数,并建立土壤组分后向散射系数与土壤含水量之间的定量关系,从而计算区域土壤含水量。

1 数据获取与处理

1.1 研究区概况

研究区位于山东省禹城市,116°18'~116°48'E,36°37'~37°18'N。地貌类型为黄河冲积平原,所在地区属暖温带半湿润季风气候区,多年平均气温13℃,降雨量近600mm,多集中在6~8月;研究区内土壤以潮土和盐化潮土为主,作物主要为冬小麦和夏玉米。

1.2 雷达数据获取与处理

本文使用 RADARSAT-2 的 C 波段全极化精细模式雷达数据,C 波段可提取地表 0~5 cm 内的土壤信息。影像覆盖面积为 25 km×25 km。平均入射角为 47.4°,入射角在方位向的变化不超过 1.2°。该影像分辨率为 12 m×8 m,包含 HH、VV、HV 和 VH 4 种极化方式数据。

根据张晓倩等^[20]提到的数据处理方法,本文也采用 PolSARpro 软件对雷达数据进行定标,将单视复数数据转换成后向散射系数,为抑制原始图像上存在的固有噪声斑点需对影像进行多视操作,再采用 Lee 滤波对雷达的 4 种极化影像去噪处理,处理后的下垫面地物内部平滑、边缘锐化。本文依据地面实测数据经纬度在影像上选取控制点得到不同极化后向散射系数。

1.3 野外采样

研究区位于山东省禹城市,以一帧 RADARSAT-2 影像区域为研究范围,野外采样与卫星过境时间同步进行。研究区共布设 5 个试验样区(Plot. 1, Plot. 2, Plot. 3, Plot. 4, Plot. 5),每个试验区面积为 300 m×300 m。Plot. 1~Plot. 3 试验区中共均匀选取 13 个地块,Plot. 4 和 Plot. 5 试验区中共均匀选取 7 个地块。其中 Plot. 1~Plot. 3 这 3 个试验区数据用于模型构建,Plot. 4 和 Plot. 5 用于精度检验。

表层土壤含水量观测:在地块中间选取一个定位采样点,使用环刀法提取地表 0~5 cm 的土样,测得定位采样点辐射 10 m 内,10 个样本的平均体积含水量。野外采样时将所取土壤样品放入已知质量铝盒中,封盖后带回室内。利用精度为 0.1g 天平对装有土壤样品的铝盒称重,并将装载土壤样品的铝盒放入烤箱 6~8 h 直至恒重,再测量其重量。根据土壤的已知容重,即可计算得土壤体积含水量。

土壤粗糙度观测:土壤剖面的粗糙度参数(均方根高度 s)通过针式粗糙度剖面板测得,剖面板长度为 1.2 m,相邻探针的间距为 1 cm。以定位采样点为中心,辐射 10 m 以内,沿着垂直于垄行方向和平行于垄行方向各测 5 次,取平均值。

植被含水量观测:本研究采用等效水深方法表示。以每个定位采样点为中心,向外辐射 10 m,统计辐射区内的种植玉米总数,并选取有代表性的 5 株进行样本采集,将样本带回试验室进行称重,并通过烘干法测量其干重,即可计算植被含水量。

通过 GPS 测量垄行的端点坐标来提取方位角参数,与 Quickbird 影像上采集的端点坐标计算的方位角相比,差值在 $\pm 2^\circ$ 以内。

2 水—云模型原理与土壤含水量反演方法

为了综合利用经验模型和物理模型的优点,Attma 等人^[21]以农作物为研究对象,在 1978 年就提出了估算农作物覆盖地表土壤含水量的“水—云模

型”。该模型是建立在辐射传输模型基础之上,通常使用很少的但具有一定机理性的意义的参数,模型的参数用实测数据来确定。“水—云模型”建立的基本假设:①假设植被为水平均匀的云层,土壤表层与植被顶端之间分布着均匀的水粒子,②模型中的变量仅为植被含水量和土壤含水量,③不考虑植被和土壤表层之间的多次散射效应。

“水—云模型”是国内外反演土壤含水量较为成熟的模型之一,模型中将后向散射系数看作是植被和土壤散射系数的信号之和^[19-24]:

$$\sigma^0 = \sigma_{\text{veg}}^0 + T^2 \sigma_{\text{soil}}^0 \quad (1)$$

其中植被的后向散射系数计算公式如下:

$$\sigma_{\text{veg}}^0 = AM_V \cos(\theta) (1 - T^2) \quad (2)$$

$$T^2 = \exp(-2BM_V \sec(\theta)) \quad (3)$$

$$\sigma_{\text{soil}}^0 = dM_s + c \quad (4)$$

式中:土壤表面散射系数值 σ_{soil}^0 是通过总的雷达后向散射系数 σ^0 减去植被衰减的影响而获得, σ_{veg}^0 是直接植被后向散射系数,而 σ^0 是雷达波经植被层散射的后向散射系数, T^2 为雷达波穿透夏玉米层的双层衰减因子。 A 、 B 、 c 和 d 是不确定参数,如果土壤水分含量 M_s 和植被 M_V 含水量明确,这些常数很容易通过多次迭代衰减或最小二乘法获得。其中 θ 为雷达波入射角^[22-24]。

总散射信号表达为:

$$\sigma^0 = AM_V \cos\theta (1 - \exp(-2BM_V \sec\theta)) + \exp(-2bM_s \sec\theta) \cdot (c + dM_s) \quad (5)$$

水—云模型在描述农作物覆盖地区的雷达散射机制时较为简单实用,因此常被用作农作物覆盖区相关信息估算的工具^[24-25]。本研究土壤含水量反演步骤如下(图 1):

(1)分析不同极化方式下植被含水量的反演方法,确定试验区的植被含水量;

(2)在植被含水量、雷达入射角的分析基础上,得到不同像元的初始植被衰减因子和植被组分的初始后向散射系数;

(3)基于地面实测数据和初始土壤水分拟合参数,进行土壤组分的初始后向散射系数提取;

(4)将初始估算的植被、土壤后向散射系数与影像实际的总后向散射系数进行对比分析,在误差平方和最小的目标函数基础上,通过反复循环递归和优化求解,得到不同极化方式下的优化参数;

(5)依据误差最小化分析,确定最优方式下的参数。根据得到的优化参数,可以准确得到土壤组分的后向散射系数和拟合参数,从而计算区域土壤含水量。

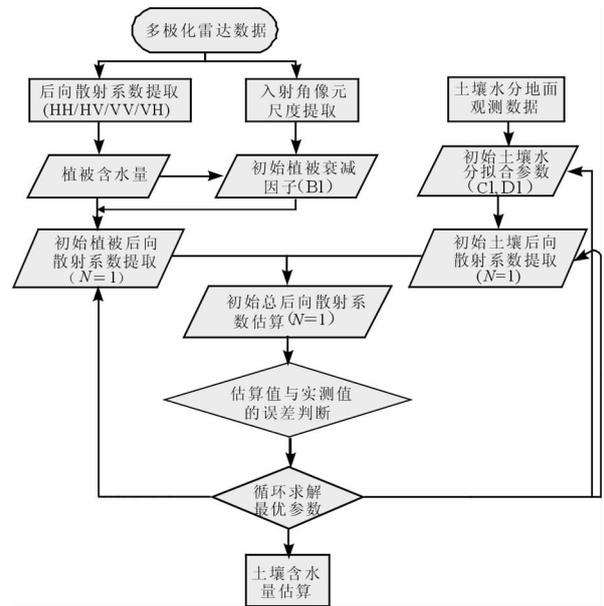


图 1 土壤含水量“水—云模型”反演流程图

3 结果与分析

3.1 植被含水量与不同极化方式(VH, HH, HV, VV)后向散射系数的关系

将植被含水量代入“水—云模型”就可以消除植被散射获得裸土的后向散射,进而反演土壤含水量。因此,准确地获取植被含水量十分关键。通过地面实际测量可获得夏玉米覆盖农作物含水量,但是对应大范围的植被含水量的反演是不现实的。利用光学遥感获取植被含水量是现今主要的方式^[26],但光学遥感受天气因素的影响较大,不利于卫星同步数据的获取。

在 4 极化影像覆盖区,根据定位样点坐标以及第 2 节所述方法获取了采样地块的后向散射系数,分析了不同极化方式的后向散射系数与植被含水量的关系,然后建立它们之间的线性回归方程:

$$M_V = a\sigma^0 + b \quad (6)$$

式中: σ^0 为不同极化方式的后向散射系数; a 、 b 为经验系数,可由最小二乘法拟合得到。不同极化方式后向散射系数与植被含水量的拟合曲线见图 2。

结果表明,夏玉米植被含水量与 HH、VV 同极化的总后向散射系数均呈正相关,而在交叉极化方式上二者是负相关关系,不管是同极化还是交叉极化,后向散射系数数值范围非常相近。经分析,不同实测样点的植被含水量与 VH、VV 后向散射系数的相关性均达到显著水平,相关系数分别为 0.86 和 0.79。从总体拟合效果上,VH 极化优于 VV 极化。

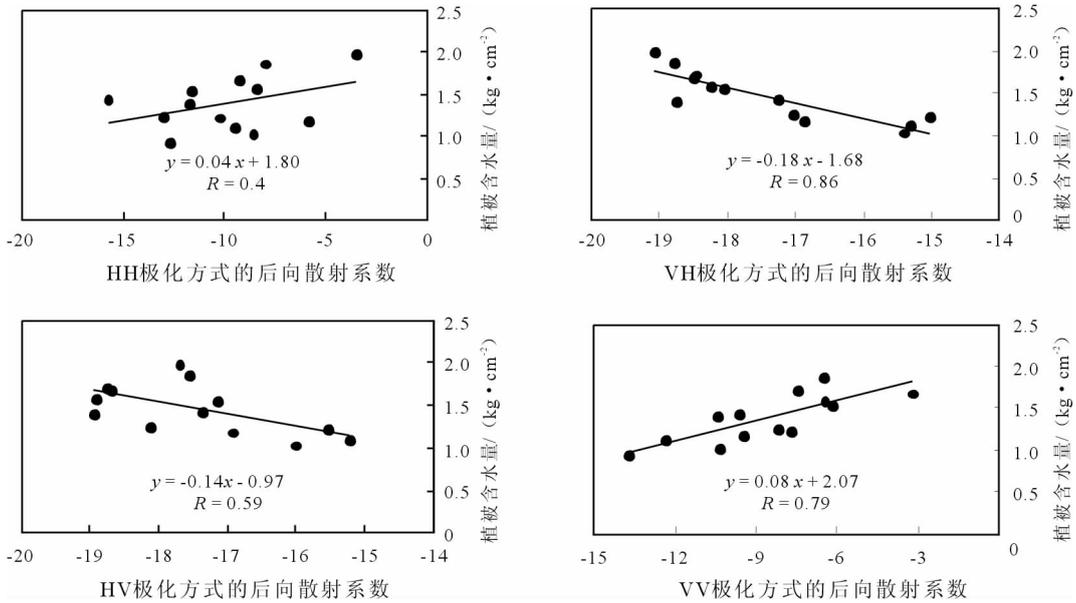


图2 植被含水量与不同极化方式后向散射系数的关系

本研究选用 VH 极化数据,结合试验区地面填图试验进行了非耕地去除,利用回归模型计算了山东禹城研究区夏玉米作物含水量。从计算结果来看,禹城市研究区夏玉米作物含水量空间分布差异不大,大概有 90% 的夏玉米农田作物含水量范围在 $1 \sim 2 \text{ kg/cm}^2$ 。图 3 是研究区中 5 个试验样区的夏玉米作物含水量反演结果直方分布图,从图 3 上看出,反演结果的空间平均值是 1.45 kg/cm^2 ,说明该区作物含水量较为适中。表 1 是 5 个试验样区反演结果的空间统计特征,Plot. 1 ~ Plot. 5 反演空间均值分别为 1.40 、 1.46 、 1.35 、 1.45 、 1.65 kg/cm^2 ,标准差分别为 0.32 、 0.38 、 0.28 、 0.36 、 0.42 kg/cm^2 ,变异系数分别为 0.23 、 0.26 、 0.21 、 0.25 、 0.25 。

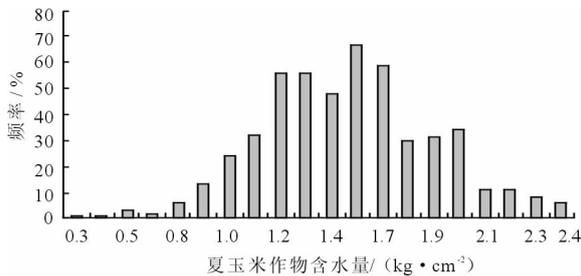


图3 试验样区反演夏玉米作物含水量直方分布图

表1 不同样区夏玉米作物含水量空间变异特征 kg/cm²

试验样区	遥感估算均值	标准差	变异系数
Plot. 1	1.40	0.32	0.23
Plot. 2	1.46	0.38	0.26
Plot. 3	1.35	0.28	0.21
Plot. 4	1.45	0.36	0.25
Plot. 5	1.65	0.42	0.25

为了验证反演结果的精度,本研究利用独立的 Plot. 4 和 Plot. 5 观测数据进行检验。将检验数据代入相应的 VH 极化拟合方程进行植被含水量的估算,并将估算结果与地面实测结果进行比较(表 2)。结果表明,实测值和反演值之间的平均相对误差是 10.6%,最大的相对误差为 14.96%,最小的为 5.73%,说明建立的模型可定量描述研究区夏玉米作物含水量和 VH 极化后向散射系数之间的关系。不难发现,在数据检验中,除了数据组 4 中的估计值偏低,其他 6 组数据均是偏高估计植被含水量,可能在研究区域由于受到地表粗糙度及植被覆盖的影响,建立的植被含水量反演模型应用有所限制,使得植被含水量信息的反演变得较为复杂,还需要进一步优化模型。

表2 夏玉米作物含水量反演估算精度分析 kg/cm², %

检验数据组	地面实测夏玉米含水量	遥感反演夏玉米作物含水量	相对误差
1	1.22	1.40	14.75
2	1.27	1.46	14.96
3	1.40	1.58	12.86
4	1.52	1.38	9.21
5	1.57	1.66	5.73
6	1.60	1.70	6.25
7	1.65	1.83	10.91

3.2 研究区表层土壤含水量遥感估算

本研究利用第 2 节中提到的土壤含水量反演方法,同时满足公式(5)估算 σ^0 和影像实际 σ^0 二者的误差平方和最小,求出不同极化方式下的最优拟合

参数,结果见表 3。在 4 种极化方式下,RADARSAT-2 VV 极化方式下的误差平方和最小,仅为 4.6,本文选择 VV 极化作为研究区表层土壤含水量反演的最优方式。

表 3 不同极化方式下的最优拟合参数和误差结果

极化方式	A 参数	B 参数	c 参数	d 参数	误差平方和
VV	124.96	0.02	-20.81	41.97	4.6
HV	125.80	0.01	-17.29	30.38	19.8
VH	125.79	0.01	-15.06	34.88	26.9
HH	130.29	0.03	-18.21	30.19	10.6

将 RADARSAT-2 VV 极化方式下的最优拟合参数代入公式(5),结合研究区夏玉米作物含水量反演结果,获取山东省禹城试验区的表层土壤含水量。结果表明,禹城市研究区内夏玉米农田表层土壤含水量的空间变异较大,整个试验研究区内约有 13% 面积的农田土壤含水量低于 10%,属于土壤水分较低的旱田,需要采取灌溉措施;约有 25% 面积的农田土壤含水量高于 20%,这部分农田土壤水分较高,应该是刚灌溉后。

图 4 是研究区中 5 个试验样区的表层土壤含水量反演结果直方分布图,从图 4 看出,反演结果的空间平均值是 $0.18 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$,说明该区总体上土壤含水量适中。表 4 是 5 个试验样区反演结果的空间统计特征,Plot. 1 ~ Plot. 5 反演空间均值分别为 0.169、0.196、0.149、0.172、0.221 cm^3/cm^3 ,标准差分别为 0.027、0.036、0.027、0.044、0.063 cm^3/cm^3 ,变异系数分别为 0.16、0.18、0.18、0.26、0.28。

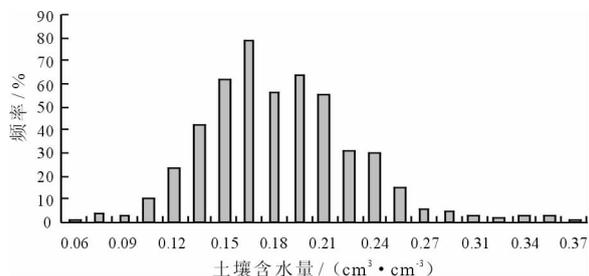


图 4 试验样区反演表层土壤含水量直方分布图

表 4 不同试验样区土壤含水量空间变异特征 cm^3/cm^3

试验样区	反演均值	标准差	变异系数
Plot. 1	0.169	0.027	0.16
Plot. 2	0.196	0.036	0.18
Plot. 3	0.149	0.027	0.18
Plot. 4	0.172	0.044	0.26
Plot. 5	0.221	0.063	0.28

3.3 表层土壤含水量结果检验

建立土壤含水量估算模型时往往会出现较大的误差,很多文献表明^[27],雷达反演的土壤含水量误差在 25% ~ 50% 之间,这是一个很大的误差区间,所以有必要通过野外实测数据对建立的模型进行检验,以增加数据的可靠性和有效性。

本研究利用独立的 Plot. 4 和 Plot. 5 的土壤含水量地面实测数据进行土壤含水量反演模型检验,在像元尺度上对模型计算结果和实测土壤含水量数据进行对比,结果见表 5。通过比较 7 组检验数据,最大的相对误差为 15.97%,最小的为 5.47%,但平均相对误差为 10%,可见利用 RADARSAT-2 影像的 VH 极化数据能够估算夏玉米覆盖区表层土壤含水量,但精度不是很高,表明该方法还要做进一步的改进。同样,在数据检验中,我们发现除了数据组 6 中的估计值偏高,其他 6 组数据均是偏低估计植被含水量,可能在研究区域由于受到地表粗糙度及植被覆盖的影响,较高(或者较低)的植被覆盖率会引起对土壤含水量的过低(或者过高)估计^[23],土壤含水量反演模型应用有所限制。

表 5 土壤含水量遥感估算结果检验 cm^3/cm^3 , %

检验数据组	地面实测土壤含水量	遥感估算土壤含水量	相对误差
1	0.210	0.197	6.19
2	0.230	0.196	14.78
3	0.201	0.190	5.47
4	0.238	0.200	15.97
5	0.214	0.195	8.88
6	0.190	0.210	10.53
7	0.214	0.190	11.21

4 结 语

本文基于 RADARSAT-2 全极化 C 波段雷达数据和野外实测数据,建立了后向散射系数与植被含水量的响应关系,并对“水—云模型”进行修正,从总的极化雷达后向散射中去除了植被影响,获取了土壤组分的后向散射系数,从而对山东禹城夏玉米农用地土壤含水量进行反演,主要结论如下:

(1) 在“水—云模型”中,需要准确的获取植被含水量,消除植被散射影响,从而获得土壤组分的后向散射,进而反演表层土壤含水量。研究表明,夏玉米作物含水量观测值与 VH、VV 后向散射系数的相关性均达到显著水平,相关系数分别为 0.86 和 0.79,而且 VH 极化优于 VV 极化。

(2) 在 RADARSAT-2 四种极化方式下, VV 极化下的“水—云模型”理论计算的误差平方和最小, 是研究区表层土壤含水量反演的最优极化方式。从检验精度来看, 此反演方法能够估算出夏玉米农作物覆盖区表层土壤含水量, 但精度不是很高, 表明对该方法还要做进一步改进。

(3) 通过分析可以得到, 本文估算植被含水量和表层土壤含水量时误差的来源主要有:

水云模型本身较为简单, 它来自植被覆盖地表的雷达后向散射描述为两类, 植被层的体散射以及经植被层二次衰减后的地表散射。但在实际雷达后向散射机制中却远非如此简单。

在植被含水量和土壤含水量的反演过程中, 植被覆盖度和地表粗糙度等均会对反演结果产生影响, 本文没有分析这些误差的影响, 至于这些参数的影响有多大, 还有待今后进一步研究。

本文野外试验数据组有限, 下一步需要更多的实测数据建立模型并检验。

参考文献:

- [1] Narayan U, Lakshmi V, Njoku E G. Retrieval of soil moisture from passive and active L/S band sensor (PALS) observations during the soil moisture experiment in 2002 (SMEX02) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 92(4): 483-496.
- [2] 赵磊, 张丹蓉, 黄金廷, 等. 半干旱半荒漠地区沙柳周边土壤水分分布规律研究 [J]. *水资源与水工程学报*, 2012, 23(5): 63-66.
- [3] 张仁华, 孙晓敏, 苏红波, 等. 遥感及其地球表面时空多变要素的区域尺度转换 [J]. *国土资源遥感*, 1999, 41(3): 51-60.
- [4] Lievens H, Verhoest N E C. Spatial and temporal soil moisture estimation from RADARSAT-2 imagery over Flevoland, The Netherlands [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 456: 44-56.
- [5] 张宗海, 张建平. 科尔沁沙地土壤表层水分遥感反演模型研究 [J]. *水资源与水工程学报*, 2011, 22(6): 127-132+136.
- [6] Jacobs J M, Mohanty B P, Hsu E, Miller D, et al. SMEX02: Field scale variability, time stability and similarity of soil moisture [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 92(4): 436-446.
- [7] Glenn N F, Carr J R. The use of geostatistics in relating soil moisture to RADARSAT-1 SAR data obtained over the Great Basin, Nevada, USA [J]. *Computers & Geosciences*, 2003, 29(5): 577-586.
- [8] 陈鹤群, 雷少刚. TerraSAR-X 土壤水分反演研究进展 [J]. *江苏农业科学*, 2013, 41(4): 327-330.
- [9] 戈建军, 王超, 张卫国. 土壤湿度微波遥感中的植被散射模型进展 [J]. *遥感技术与应用*, 2002, 17(4): 209-214.
- [10] Fatras C, Frappart F, Mougin E, et al. Estimating surface soil moisture over Sahel using ENVISAT radar altimetry [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 123: 496-507.
- [11] 郭英, 沈彦俊, 赵超. 主被动微波遥感在农区土壤水分监测中的应用初探 [J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19(5): 1162-1167.
- [12] Merzouki A, McNairn H, Pacheco A. Mapping soil moisture using RADARSAT-2 data and local autocorrelation statistics [J]. *Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, IEEE, 2011, 4(1): 128-137.
- [13] Baghdadi N, Saba E, Aubert M, et al. Evaluation of radar backscattering models IEM, Oh, and Dubois for SAR data in X-Band over bare soils [J]. *Geoscience and Remote Sensing Letters*, IEEE, 2011, 8(6): 1160-1164.
- [14] Baghdadi N, Aubert M, Zribi M, et al. Use of TerraSAR-X data to retrieve soil moisture over bare soil agricultural fields [J]. *Geoscience and Remote Sensing Letters*, IEEE, 2012, 9(3): 512-516.
- [15] Moran M S, Alonso L, Moreno J F, et al. A RADARSAT-2 quadpolarized time series for monitoring crop and soil conditions in Barrax, Spain [J]. *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, IEEE, 2012, 50(4): 1057-1070.
- [16] Balenzano A, Mattia F, Satalino G, et al. Dense temporal series of C-and L-band SAR data for soil moisture retrieval over agricultural crops [J]. *Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, IEEE, 2011, 4(2): 439-450.
- [17] Kornelsen K C, Coulibaly P. Advances in soil moisture retrieval from synthetic aperture radar and hydrological applications [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 476: 460-489.
- [18] 张友静, 王军战, 鲍艳松. 多源遥感数据反演土壤水分方法 [J]. *水科学进展*, 2010, 21(2): 222-228.
- [19] 周鹏, 丁建丽, 王飞, 等. 植被覆盖地表土壤水分遥感反演 [J]. *遥感学报*, 2010, 14(5): 966-981.
- [20] 张晓倩, 刘湘南, 谭正, 等. 基于全极化 Radarsat-2 数据的水稻生物量估算模型 [J]. *农业现代化研究*, 2012, 33(2): 249-252.
- [21] Attema, Ulaby F T. Vegetation modeled as a water cloud [J]. *Radio Science*, 1978, 13(2): 357-364.

理机制。

(4)建立合理的生态补偿机制,使水电站受益者向受影响的河段及当地的居民进行生态补偿;或是向水电站受益者征收一定的税款,用以维护流域生态与水环境健康。

参考文献:

- [1] Humborg C, Ittekkot V, Cociasu A, et al. Effect of Danube River dam on Black Sea biogeochemistry and ecosystem structure[J]. *Nature*, 1997,386:385-388.
- [2] 魏国良,崔保山,董世魁,等. 水电开发对河流生态系统服务功能的影响——以澜沧江漫湾水电工程为例[J]. *环境科学学报*, 2008,28(2):235-242.
- [3] 刘守杰,孙红光,刘星. 试论水利工程梯级开发对生态环境的负面影响[J]. *森林工程*, 2003,19(2):15-16.
- [4] 麻泽龙,谭小琴,周伟,等. 河流水电开发对生态环境的影响及其对策研究[J]. *广西水利水电*, 2006(1):24-28.
- [5] 董哲仁. 怒江水电开发的生态影响[J]. *生态学报*, 2006,26(5):1591-1596.
- [6] 何大明,冯彦,甘淑,等. 澜沧江干流水电开发的跨境水文效应[J]. *科学通报*, 2006,51(增):14-20.
- [7] 范继辉,刘巧,麻泽龙,等. 岷江上游水电开发对环境的影响[J]. *四川环境*, 2006,25(1):23-27.
- [8] 杨丽虎,陈进,黄薇,等. 长江上游梯级水电开发情况及对生态环境的影响初探[J]. *中国农村水利水电*, 2007(3):79-81.
- [9] 刘海龙,李迪华,黄刚. 峡谷区域水电开发景观影响评价——以怒江为例[J]. *地理科学进展*, 2006,25(5):21-30.
- [10] 莫创荣. 水电开发对河流生态系统服务功能影响的价值评估初探[J]. *生态环境*, 2006,15(1):89-93.
- [11] Rashad S M, Ismail M A. Environmental-impact assessment of hydro-power in Egypt [J]. *Applied Energy*, 2000,65(1):285-302.
- [12] 赵同谦,欧阳志云,郑华,等. 水电开发的生态环境影响经济损益分析——以怒江中下游为例[J]. *生态学报*, 2006,26(9):2979-2988.
- [13] 长江流域水环境监测中心. 中华人民共和国行业标准——水环境监测规范(SL219-98)[S]. 北京:中国水利水电出版社,1998.
- [14] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 北京:中国环境科学出版社,2002.
- [15] 陈平雁. SPSS 13.0 统计软件应用教程[M]. 北京:人民卫生出版社,2005.
- [16] 中华人民共和国卫生部. 生活饮用水卫生标准(GB5749-2006)[S]. 北京:中国标准出版社,2006.
- [17] 中华人民共和国标准局. 地表水环境质量标准(GB3838-2002)[S]. 北京:中国标准出版社,2002.
- [18] 刘兰芬. 河流水电开发的环境效益及主要环境问题研究[J]. *水利学报*, 2002,33(8):121-128.
- [19] Vannote R L, Minshall G W, Cummins K W, et al. The river continuum concept [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1980,37(1):130-137.
- [20] 李玉梅,史复有. 黄河上游水利工程对水质的影响浅析[J]. *人民黄河*, 1998,20(11):8-10.
- [21] 李江华,王欢,韩霜,等. 水电开发下的河流生态系统管理[J]. *中国农村水利水电*, 2006(11):51-54.
- [22] Brainwood M A, Burgin S, Maheshwari B. Temporal variations in water quality of farm dams: impacts of land use and water sources [J]. *Agricultural Water Management*, 2004,70(2):151-175.
- [23] Saradjian M R, Hosseini M. Soil moisture estimation by using multipolarization SAR image [J]. *Advances in Space Research*, 2011,48(2):278-286.
- [24] 李玉霞,杨武年,童玲,等. 基于光谱指数法的植被含水量遥感定量监测及分析[J]. *光学学报*, 2009,29(5):1403-1406.
- [25] Gherboudj I, Magagi R, Berg A A, et al. Soil moisture retrieval over agricultural fields from multi-polarized and multi-angular RADARSAT-2 SAR data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011,115(1):33-43.

(上接第34页)

- [22] Mozos JA, Casali J, Audicana M G, et al. Correlation between ground measured soil moisture and RADARSAT-1 derived back-scattering coefficient over an agricultural catchment of Navarre (North of Spain) [J]. *Biosystems Engineering*, 2005,92(1):119-1331.
- [23] 刘伟,施建成,余琴. 基于机载极化雷达技术的农作物覆盖区土壤水分估算[J]. *干旱区地理*, 2005,28(6):856-861.
- [24] 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+450.