

文章编号: 1007-4619(2006)02-0263-09

利用 ASAR 图像监测土壤含水量和小麦覆盖度

鲍艳松^{1, 2, 3}, 刘良云², 王纪华², 李小文^{1, 3, 4},
李翔², 宋小宇², 竞霞²

(1. 北京师范大学 地理学与遥感科学学院 遥感与地理信息系统研究中心, 北京 100875;

2. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100089; 3. 遥感科学国家重点实验室, 北京 100875;

4. Center for Remote Sensing, Boston University, MA 02215, USA)

摘要: 以高级合成孔径雷达 (ASAR) 影像数据和地面实测数据为基础, 分析了裸土、低覆盖 (覆盖度为 0.2 左右) 冬小麦麦地的后向散射与土壤含水量、地表粗糙度及小麦覆盖度之间的关系, 探讨了裸土和冬小麦麦地土壤含水量及小麦覆盖度的反演方法。分析结果表明: ① 裸土后向散射系数受地表粗糙度和土壤质地的综合影响较大, 裸土的后向散射和土壤含水量正相关关系未达显著, 反演裸土土壤含水量必须考虑这两个因素的影响。② 冬小麦麦地两种极化后向散射对土壤含水量和小麦覆盖度的敏感性差异明显。由于小麦植株与土壤的水平同极化后向散射差异较大, 水平极化后向散射系数和小麦覆盖度及土壤含水量相关性达到显著; 冬小麦麦地的垂直同极化后向散射对土壤含水量较敏感, 垂直极化后向散射系数和土壤含水量的相关性达到显著, 但与小麦覆盖度的相关性相对较低。据此, 利用冬小麦麦地的两个同极化后向散射系数, 建立了后向散射系数与土壤含水量和小麦覆盖度之间的关系模型, 实现了小麦覆盖度和冬小麦覆盖下的土壤含水量反演。验证结果表明: 土壤含水量和小麦覆盖度反演结果与地面调查和测量结果一致。

关键词: 合成孔径雷达; 后向散射系数; 土壤含水量; 小麦覆盖度; 反演

中图分类号: TP722.6 **文献标识码:** A

Estimation of Soil Water Content and Wheat Coverage with ASAR Image

BAO Yan-song^{1, 2, 3}, LIU Liang-yun², WANG Ji-hua², LI Xiao-wen^{1, 3, 4},
LI Xiang², SONG Xiao-yu², JING Xia²

(1. Research Center for Remote Sensing and GIS, School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100089, China;

3. State key Laboratory of Remote Sensing Science, Beijing 100875, China;

4. Center for Remote Sensing, Boston University, MA 02215, USA)

Abstract This paper focused on retrieving soil water content of bare and winter wheat planted field from ENVISAT ASAR image. The relationship between bare soil's back scattering coefficient and soil water content or land surface roughness was analyzed, and the relationship between winter wheat field's backscattering coefficient and soil water content or wheat coverage was also analyzed. The result have shown: (1) because bare soil's backscattering was greatly affected by land surface roughness and soil texture, the positive correlation existed between bare soil's backscattering and soil water content was not significant, therefore their effects must be considered in the retrieval of soil water content. (2) The difference of sensitivity of two polarization's

收稿日期: 2004-11-05; 修订日期: 2005-01-20

基金项目: 国家科技攻关项目 (2004BA617B-5) 和国家自然科学基金项目 (40471093) 资助。

作者简介: 鲍艳松 (1976—), 男, 北京师范大学博士生。现从事定量遥感模型、光学微波遥感数据融合及其应用研究。已发表论文 4

篇。E-mail: baoy@sohu.com。

backscattering to soil water content and wheat coverage was obvious. The difference of the horizontal polarization backscattering coefficients of winter wheat and bare soil was great. Therefore, the horizontal polarization backscattering coefficient was significantly correlated to wheat coverage and soil water content. The vertical polarization backscattering coefficient of winter wheat planted field was sensitive to soil water content. Therefore, the vertical polarization backscattering coefficients was significantly correlated to soil water content but not significantly to wheat coverage. Combining two polarization backscattering coefficients of winter wheat field, the models between backscattering coefficients and soil water content or wheat coverage were built, and winter wheat coverage and soil water content under wheat canopy were obtained from ASAR image. As expected, the retrieved soil water content and wheat coverage are consistent with those of field measurements.

Key words: SAR; backscattering coefficient; soil water content; wheat coverage; retrieve

1 引 言

土壤湿度是水文学、气象学及农业科学研究领域的一个重要参数。大面积土壤湿度的监测是农业水管理及农作物旱情监测的一个重要内容,而区域尺度乃至全球尺度的土壤信息是陆面过程模式研究必不可少的一个参量,对改善区域及全球气候模型预报结果起着重要的作用。遥感技术的发展为区域尺度土壤湿度的监测提供了有效手段^[1]。

水的介电常数和干土的介电常数有很大的差别,水的介电常数大约为 80,而干土的介电常数仅为 3 左右。一般土壤可以看成是水和干土的混合,因而土壤的介电常数会随着土壤含水量的增大而增大。并且,电磁波散射模型已表明,雷达回波的后向散射系数直接受土壤介电常数的影响。这就构成了微波遥感探测土壤湿度的物理基础^[1,2]。

在探测土壤含水量方面,微波遥感比光学遥感具有更大的优势:微波遥感不受光照、云雾等天气条件的影响,具有全天时、全天候工作的特点。特别是长波段微波能够穿透植被,并对土壤具有一定的穿透能力。田国良在对比分析了几种遥感土壤水探测的方法后,认为微波遥感可能最终解决遥感土壤湿度探测问题^[3]。

微波遥感土壤湿度探测研究经历了 30 年的历史。其中,主动微波遥感土壤湿度探测的研究集中在两个方面:①基于土壤散射的物理模型研究,如小扰动模型、Kirchhoff 模型、双尺度模型和积分方程模型。为使物理模型更好地应用于土壤水分反演,李宗谦等人通过分析物理模型对参数的敏感性,研究了土壤水分探测的最优雷达工作参数^[2,4]。②使用航空、航天雷达和车载雷达辐射计获取地表后向散射信息,研究土壤含水量反演方法,解决区域干旱监测问题^[5-9]。

新一代高级合成孔径雷达(ASAR)卫星传感器,由于其多极化、可变观测角和多种分辨率的特征,比 ERS SAR、RADARSAT SAR 在土壤水分监测方面具有更大的优势。本文正是基于前人研究的基础,结合物理模型分析 ASAR 极化数据(σ_{HH} , σ_{VV})之间的关系,探讨 σ_{HH} 与 σ_{VV} 对土壤含水量、地表粗糙度和小麦覆盖度的敏感程度。最后建立后向散射系数与土壤含水量及小麦覆盖度的关系模型,用于北方冬小麦春旱及覆盖度的监测。

2 研究区概况及数据获取

2.1 研究区概况

试验区位于北京市昌平、顺义和通州 3 个区。地处东经 115°58′—116°50′,北纬 39°30′—40°33′,海拔高度在 30—60m。区内主要土地类型有农田、林地、果园及水体等,农田的主要类型有小麦地、苜蓿地和裸地。研究区农田地势平坦,起伏较小。

2.2 卫星数据概况

EnviSat-1 卫星是欧空局对地观测卫星系列之一,于 2002-03-01 发射升空。卫星轨道高度为 800km,过境周期为 35d。ASAR 是 EnviSat-1 上最重要的一个传感器,其目的是用 SAR 进行对地观测,提供有关海浪、海冰范围及运动情况、陆地冰雪的分布范围、地表地形及陆地表面特征、土壤湿度及湿地范围等观测信息。ASAR 工作在 C 波段,可为每个轨道连续获取 30m 分辨率图像。它继承了 ERS-1/2 AMI 中的成像模式和波模式,增强了在覆盖度、入射角范围、极化和工作模式上的功能^[10]。试验中,考虑到自然田块的大小及土壤含水量反演的目的,选择了分辨率为 30m、极化方式为 HH/VV、观测角为 15°(42.5°—45.2°)的 Alternating Polarisation 工作模

式^[2]。以预设的雷达工作参数,ASAR 传感器于 2004-03-23 当地时间 22 点 16 分对试验区进行扫描成像,获取的图像幅宽为 56 km,长度为 112 km,覆盖了研究区的 3 个区(图 1)。

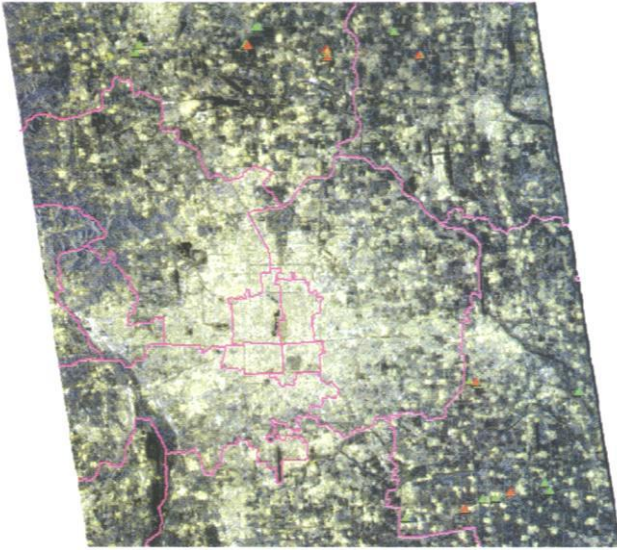


图 1 试验区 ASAR 遥感图像及样点分布图

Fig 1 The ASAR image in the experimental area and the distribution map of sample points

2.3 地面试验

地面试验安排在 3 月 24 日上午,冬小麦正处于返青初期,覆盖度较低,大约为 0.2 左右。试验内容包括土壤含水量测量、小麦覆盖度测量和测点 GPS 定位。研究区内选取了 8 个裸土地和 16 个冬小麦地(见图 1)。试验中,选择田块中央较均匀的一块区域,使用 GPS 接收机进行定位测量。在离定位点 5m 的范围内布置 3 个采样点,样点成等边三角形分布。用土钻在每个样点处取土,把 0—5 cm, 5—10 cm, 10—20 cm 深度的土样分别放在铝盒中,结合室内烘干称重法测量土壤含水量。对每块地 3 个样点含水量求平均,用以表示 GPS 定位点处的土壤含水量。取土样的同时,垂直向下拍摄了数字照片,用于计算小麦的覆盖度。试验时天气晴朗,获取的数据精度较高。

3 ASAR 数据预处理

获取的 ASAR 影像数据为 1B 级数据,对该图像数据进行噪声去除、绝对定标和几何纠正是必不可少的。

3.1 滤波

雷达遥感数据有别于光学遥感数据的一个重要特征是影像上存在着更明显的斑点噪声,其主要表现为图像灰度的剧烈变化,即在同一片均匀区域,有的分辨单元呈亮点,而有的单元呈暗点。斑点噪声降低了图像的空间分辨率和信噪比,严重影响图像的可解译性,甚至可能导致地物特征的消失^[11]。因此,斑点噪声的消除对 ASAR 图像的应用是十分重要的。由于 Gamma 自适应滤波同时考虑了斑点的特点和地物目标散射特征的统计规律,在平滑斑点的同时能很好保持图像纹理^[12]。因而,本文选用了 Gamma 自适应滤波对图像的噪声进行去除。

3.2 后向散射系数的计算

ASAR 1B 级数据记录的是 digital number(DN) 值。实际应用中,需要将 DN 值转化成后向散射系数。ASAR 数据绝对定标公式(后向散射系数与 DN 值的关系)为:

$$\sigma_{i,j}^0[\text{dB}] = 10 \cdot \log_{10} \left[\frac{\text{DN}_{i,j}^2}{K} \sin(\alpha_{i,j}) \right] \quad (1)$$

式中, $\sigma_{i,j}^0$ 为第 i 列第 j 行像元对应地块的后向散射系数。 $\alpha_{i,j}$ 为第 i 列第 j 行像元的入射角。 K 为绝对定标常数,值为 1130383.9。 $\text{DN}_{i,j}$ 为第 i 列第 j 行像元的图像灰度值^[13]。影像中有 143 个像元点已知了入射角,并以 13 行 11 列均匀的排列。以行列号为自变量,以入射角为函数,拟合了二次曲线,计算出每个像元点的入射角。进一步根据(1)式计算出整幅影像对应的后向散射系数。

3.3 几何校正

ASAR 1B 级数据根据扫描顺序,把先扫描的数据放在影像上方,后扫描的数据放在影像的下方,影像数据没有坐标。而实测的地面数据都使用 GPS 进行了定位测量。为实现地面实测数据和影像数据的地理匹配,选取了 150 个地面控制点,进行了几何纠正。

4 ASAR 数据分析及土壤含水量反演

经过数据预处理,得到了地物后向散射系数影像图。后向散射系数是土壤含水量、土壤质地和地表粗糙度的函数^[14],并受植被覆盖的影响。下面分别从裸土和冬小麦地两种地表覆盖,分析

ASAR 后向散射系数和地表实测参数之间的关系。

4 1 裸土数据分析

为分析裸露土壤后向散射系数的影响因素, 实测了 0—5 cm, 0—10 cm, 0—20 cm 土层的土壤重量含

水量, 并实地拍摄了对应的数字照片。采样点的后向散射系数和实测土壤重量含水量见表 1。基于表 1 数据, 分析裸土水平、垂直同极化后向散射系数之间的关系, 裸土后向散射系数与土壤含水量之间的关系, 探讨地表粗糙度对后向散射系数的影响。

表 1 裸土采样点后向散射系数和土壤重量含水量

Table 1 Backscattering coefficient and gravimetric water content of bare soil

样点代号	HH 极化 /dB	VV 极化 /dB	5cm 深含水量 /%	10cm 深含水量 /%	20cm 深含水量 /%
tx1	-21.9284	-21.94	10.1924	12.0756	13.1668
tx2	-21.2168	-21.1	11.8937	15.9252	17.1691
tx3	-20.446	-20.12	9.4772	13.5397	15.1335
L1	-23.6133	-23.54	10.0345	12.4705	13.3395
L2	-21.4385	-20.12	12.7126	13.8616	14.2954
L3	-20.3653	-19.59	16.3889	19.1768	20.5431
L4	-23.6534	-22.14	13.2915	15.1027	15.8492
L5	-20.8172	-19.84	12.2347	13.5348	14.5669

4 1 1 裸土 σ_{HH} 、 σ_{VV} 相关性分析

为明确水平、垂直同极化数据之间的关系, 做了两个同极化数据的相关性及散点图分析, 结果如图 2 所示。

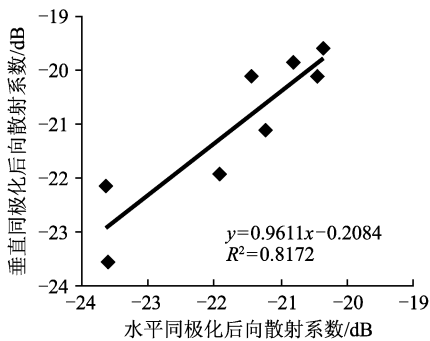


图 2 水平、垂直同极化后向散射系数散点图
Fig 2 Scatterplot of horizontal and perpendicular homology polarization backscattering coefficient

由图 2 可知, 水平、垂直同极化后向散射系数有很高的相关性, 相关系数达到 0.904; 同时, 从两个极化数据的回归线来看, 整体上裸土的水平同极化后向散射系数略小于垂直同极化后向散射系数。

4 1 2 裸土后向散射系数和土壤含水量关系的分析

为分析裸土后向散射系数和土壤含水量之间的

关系, 计算了裸土后向散射系数与 3 个深度土壤含水量之间的相关性。结果表明, 裸土后向散射系数与土壤含水量的相关性随着深度的增加呈现出越来越好的趋势。可见, 20 cm 内的土壤微波散射对 ASAR 数据的回波都起到显著的作用。这是因为 ASAR 工作在 C 波段, 该波长的电磁波能够穿透 20 cm 的土层。

图 3 为 20 cm 深土壤含水量和后向散射系数的散点图, 裸土后向散射系数与土壤含水量正相关, 后向散射系数对土壤含水量较敏感。和水平同极化相比, 垂直同极化后向散射系数对土壤含水量更为敏感。由于两种同极化后向散射系数和土壤含水量的相关性都没有达到显著性, 因而, 其他因素(如土壤粗糙度、土壤质地等)对后向散射系数的影响不可忽略。

4 1 3 裸土后向散射系数和地表粗糙度关系的分析

图 3 中的散点较离散, 存在土壤含水量接近但后向散射系数偏差较大的点。这说明除了土壤含水量, 还存在其他关键因素制约着裸土的后向散射。选择土壤含水量相近而后向散射系数偏差较大的样点对 1 和 4, 3 和 7, 找出点 1, 3, 4, 7 对应的数字照片。对照实验图片来看, 点 1, 3 对应的地表粗糙度较大, 点 4, 7 对应的地表粗糙度较小。因而, 可以断定: 在土壤含水量一致的情况下, 粗糙度越大, σ_{HH} ,

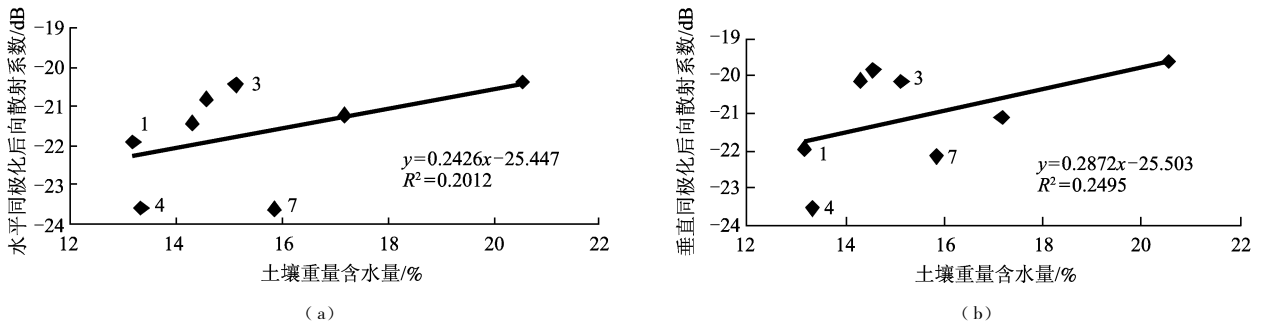


图 3 裸土 σ_{HH} (a), σ_{VV} (b)与土壤含水量之间的关系

Fig 3 Relation of bare soil backscattering coefficient and soil water content

σ_{VV} 越大。比较地表粗糙度对 σ_{HH} 、 σ_{VV} 的影响,粗糙度对 σ_{VV} 影响较小,对 σ_{HH} 影响较大。

结合小扰动模型来分析后向散射系数对粗糙度的敏感性。土壤的小扰动模型可以表示为:

$$\sigma_{VV} = 8k^4 \sigma^2 \left| R_{//} \cos^2 \theta_1 + \frac{\sin^2 \theta_1}{2} (1 + R_{//}) \right|^2 \times W(2k \sin \theta_1) \quad (2)$$

$$\sigma_{HH} = 8k^4 \sigma^2 |R_{\perp} \cos^2 \theta_1|^2 W(2k \sin \theta_1) \quad (3)$$

式中, k 为自由空间波数, θ_1 为入射角, σ^2 为表面高度起伏方差, ϵ_r 为表层土壤的复介电常数, $W(2k \sin \theta_1)$ 是土壤表面自相关函数的 Fourier变换, $R_{//}$ 是平土壤表面的水平极化反射系数, R_{\perp} 是平土壤表面的垂直极化反射系数^[2]。其中, σ^2 是表征地表粗糙度的参数。粗糙度变化引起后向散射系数变化可以表示成:

$$d\sigma_{VV} = \sigma'_{VV}(\sigma^2) d\sigma^2 \quad (4)$$

$$d\sigma_{HH} = \sigma'_{HH}(\sigma^2) d\sigma^2 \quad (5)$$

极化数据对地表粗糙度的敏感性,可以用 σ^2 的变化引起的后向散射系数变化的大小来表征。比较 $d\sigma_{VV}$ 和 $d\sigma_{HH}$ 大小,实际上就是比较 σ_{VV} 、 σ_{HH} 对 σ^2 的微分的大小。又因为 σ_{VV} 和 σ_{HH} 都是 σ^2 的线性函数,因而归结为比较 σ_{VV} 和 σ_{HH} 的大小。Y isok Oh通过模型模拟及观测试验证明了观测角在 40° ,工作波段为 C 波段,裸土的水平同极化后向散射小于垂直同极化后向散射^[17]。因而,相同的 σ^2 变化,水平同极化后向散射系数的变化大于垂直极化。这就从理论上说明了水平同极化后向散射比垂直同极化后向散射对地表粗糙度更敏感。

因此,和 σ_{HH} 相比, σ_{VV} 对土壤含水量更敏感,对土壤的粗糙度更不敏感,使用 σ_{VV} 反演土壤含水量是较理想的选择。此外,地表粗糙度对裸土同向散射有较大影响,所以反演裸土土壤含水量应考虑地

表粗糙度的影响。

4 2 冬小麦麦地数据分析

为了分析小麦地后向散射系数的影响因素,同样测量了三个深度的土壤含水量,并由拍摄的数字照片计算出了小麦的覆盖度。样点的后向散射系数、土壤含水量及小麦覆盖度数据见表 2。基于表 2 中的数据,分析了小麦地两个同极化后向散射系数的相关性,探讨了土壤含水量和小麦覆盖度对后向散射系数的影响,并最终得到小麦覆盖下的土壤含水量及小麦覆盖度预测模型。

4 2 1 σ_{HH} 、 σ_{VV} 数据分析

为分析水平、垂直同极化数据之间的关系,对两个同极化数据进行了相关性及散点图分析,如图 4所示。

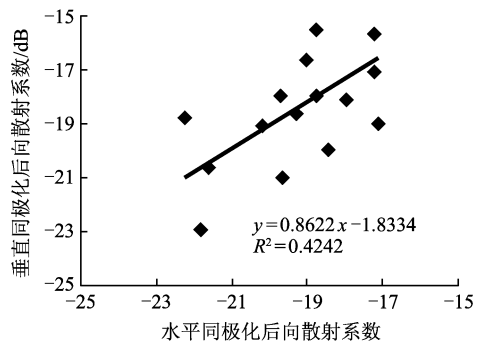


图 4 水平和垂直同极化后向散射系数散点图

Fig 4 Scatterplot of horizontal and perpendicular homology polarization backscattering coefficient

分析结果表明,和裸土的水平、垂直同极化后向散射系数之间的相关性相比,小麦地的水平、垂直同极化的相关性明显降低。

裸土后向散射模型——Kirchhoff模型表明,土壤同极化后向散射系数 σ_{HH} 和 σ_{VV} 相同^[2],而农作物冠层散射模型——MMICS模型表明,小麦冠层

表 2 小麦地采样点后向散射系数和实测数据

Table 2 Backscattering coefficient and measured data of wheat sample points

样点代号	HH极化 /dB	VV极化 /dB	5 cm 深含水量 /%	10 cm 深含水量 /%	20 cm 深含水量 /%	覆盖度
C1	-18.7829	-17.9802	20.5077	20.5341	20.8783	0.238
C2	-17.2482	-17.049	21.1721	20.9426	21.3273	0.277
C2-2	-17.0986	-14.2271	21.9446	21.666	21.8853	0.163
C3	-17.2027	-15.6379	19.3571	19.8652	20.001	0.188
C4	-21.8066	-22.9293	12.256	13.2073	14.1521	0.053
C5	-19.2674	-18.6449	14.4691	15.5773	15.8536	0.094
C6	-19.714	-17.9793	14.1472	16.4007	17.9023	0.166
C7	-18.7492	-15.5336	16.165	17.7234	18.744	0.102
C8	-20.2052	-19.0784	15.4772	15.7936	16.4914	0.184
C9	-21.5971	-20.6402	16.1218	17.3783	18.0978	0.05
C10	-17.9807	-18.1034	8.899	13.3717	15.0574	0.321
TX1	-17.1088	-19.0194	12.4888	14.6611	15.7144	0.311
TX2	-19.0026	-16.6606	12.6745	15.4938	16.2988	0.178
TX3	-22.2667	-18.8094	11.6095	14.1831	15.3309	0.091
TX4	-19.6359	-20.989	12.5299	14.9881	16.7023	0.191
TX5	-18.4436	-19.9918	9.0576	13.6836	15.5423	0.331

后向散射系数 σ_{HH} 和 σ_{VV} 因极化方式不同有着明显的差异^[18]。这正是小麦地两个同极化后向散射系数相关性低于裸土的原因。

4.2.2 小麦地后向散射和土壤含水量及覆盖度关系的分析

为了解小麦地后向散射受主导因子的影响,计算了小麦地后向散射系数与土壤含水量、小麦覆盖

度之间的相关性,相关性矩阵见表 3。

从表 3 中的相关矩阵来看,随土壤深度的增加,水平同极化后向散射系数与土壤含水量的相关性越来越好,并且与小麦覆盖度也有很好的相关性,该相关性达到显著。垂直同极化后向散射系数与 10、20 cm 深土壤含水量的相关性都达到显著,但与小麦覆盖度的相关性不显著。

表 3 小麦地后向散射系数与实测参数的相关性矩阵

Table 3 Correlation matrix of backscattering coefficient and measured data of wheat field

相关性	σ_{VV}	5 cm 深 土壤含水量	10 cm 深 土壤含水量	20 cm 深 土壤含水量	覆盖度	VV 极化预测的 10 cm 深土壤含水量	VV 极化预测的 20 cm 深土壤含水量
σ_{HH}	0.651**	0.356	0.473	0.497*	0.703**	0.615**	0.621**
σ_{VV}		0.569*	0.676**	0.676**	0.157	0.966**	0.973**
5 cm 深 土壤含水量			0.970**	0.931**	-0.141	0.615**	0.612**
10 cm 深 土壤含水量				0.987**	-0.008	0.700**	0.700**
20 cm 深 土壤含水量					0.062	0.695**	0.695**
覆盖度						0.042	0.055

注: * 0.05 显著性水平, ** 0.01 显著性水平

对比冬小麦麦地两个极化数据和小麦覆盖度的相关性可知,冬小麦水平极化对覆盖度的差异更敏感性。冬小麦返青初期,覆盖度较小,多次散射占的比例较小,麦地的后向散射可以看成是冬小麦和土壤后向散射的加权和,权为两个组分的面积比例。因而,后向散射对覆盖度的敏感性决定于两个组分后向散射系数的差值,差值越大则越敏感。由于 C 波段小麦径叶与土壤的水平同极化后向散射系数的差异大于垂直同极化的差异^[19],所以冬小麦麦地水平同极化后向散射比垂直极化对覆盖度更敏感。

对比冬小麦麦地两个极化数据和土壤含水量的相关性可知,冬小麦垂直同极化对土壤含水量的差异更敏感。这是因为:两个组分中只有土壤的后向散射是含水量的函数,麦地的后向散射对土壤含水

量的敏感性主要体现在土壤后向散射对土壤含水量的敏感性上。土壤垂直同极化后向散射系数对土壤含水量的敏感性要大于水平同极化^[17],因而冬小麦垂直同极化对土壤含水量更敏感。

基于以上结论,建立 10、20 cm 深土壤含水量 ($water_{10}$ 、 $water_{20}$)和垂直同极化后向散射系数的关系模型。其回归方程为:

$$water_{10} = 0.0806\sigma_{VV}^2 + 3.8237\sigma_{VV} + 59.242 \quad (R=0.700, n=16) \quad (6)$$

$$water_{20} = 0.0617\sigma_{VV}^2 + 3.0118\sigma_{VV} + 51.701 \quad (R=0.695, n=16) \quad (7)$$

拟合直线如图 5 所示。使用式 (6)和 (7)对样点 10 cm、20 cm 土壤的重量含水量进行反演,其标准差分别为 1.9%和 1.7%。

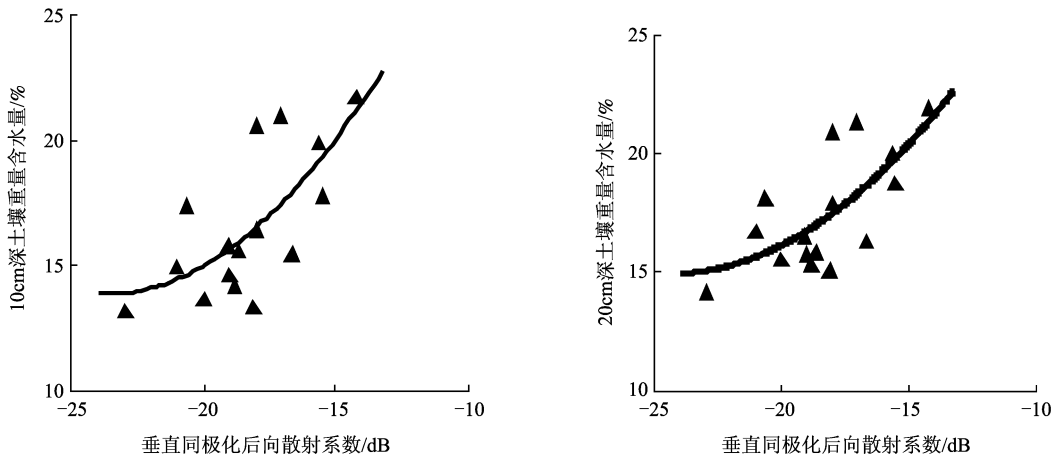


图 5 垂直同极化后向散射系数与土壤含水量散点图

Fig 5 Scatterplot of perpendicular homology polarization backscattering coefficient and soil water content

因水平同极化后向散射系数与小麦覆盖度、20 cm 深土壤含水量的相关性达到显著。故知小麦覆盖度和 20 cm 深土壤含水量是水平同极化后向散射系数的重要影响因素。利用小麦覆盖度数据及垂直同极化后向散射系数预测的 20 cm 深土壤含水量,拟合水平同极化后向散射系数回归方程,如下式:

$$\sigma_{HH} = -31.590 + 0.583water_{predict} + 12.229 \times coverage \quad R=0.913, n=16 \quad (8)$$

由式 (7),可以用垂直同极化后向散射系数反演土壤含水量。把反演的土壤含水量代入式 (8),结合水平同极化后向散射系数,可以反演小麦覆盖度。试验中,结合式 (7), (8)对样点小麦覆盖度进行反演,其标准差为 0.054。

基于所建模型,使用 ASAR 后向散射系数影像数据反演试验区的土壤含水量和小麦覆盖度,并进

行填图。图 6、图 7 是通州区部分乡镇的土壤含水量和小麦覆盖度监测的结果图,右上角区域大部分地块的土壤含水量在 18%—20%,覆盖度在 0.25—0.5;左下角区域大部分地块的土壤含水量在 15%—17%左右,覆盖度在 0.25 以下。实地调查得知:右上角地处通州区马驹桥镇,小麦播种较早,并于开春后进行了灌溉;图中左下角地处通州区礼贤公社,小麦播种较晚,开春后未灌溉。这一调查结果和土壤含水量及小麦覆盖度监测结果是一致的。

5 结 论

(1)裸土水平、垂直同极化后向散射有很高的线性相关性。比较 ASAR 后向散射系数和不同深度土壤含水量之间的相关性可以得出:两种同极化后

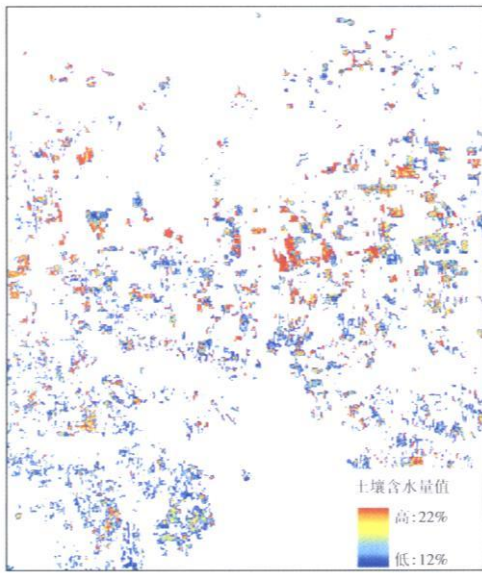


图 6 土壤含水量图(通州区)

Fig 6 Soil water content map of Tongzhou District

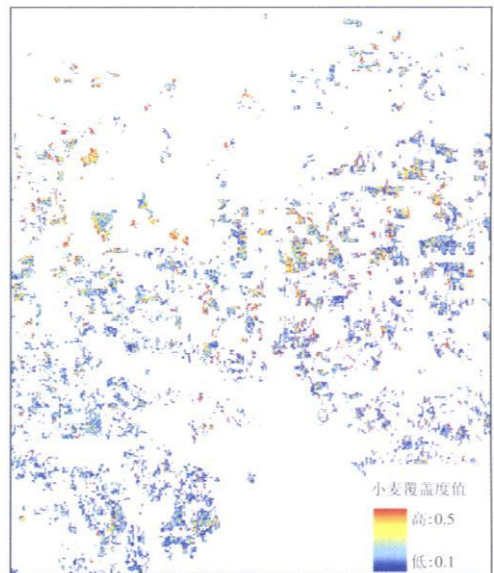


图 7 小麦覆盖度图(通州区)

Fig 7 Wheat coverage map of Tongzhou District

向散射系数都和 20 cm 深的土壤含水量有最好的相关性;与水平同极化相比,垂直同极化后向散射系数和 20 cm 深土壤含水量有更好的相关性。

(2)土壤含水量和地表粗糙度是裸土后向散射系数的重要影响因素。地表粗糙度对后向散射的影响较大,并且粗糙度对水平极化的影响比垂直极化更大。为反演裸土土壤含水量,有必要通过其他遥感手段反演地表粗糙度,并用于裸土土壤含水量的雷达遥感反演。

(3)冬小麦地水平、垂直同极化后向散射系数有较好的线性相关性。但由于植被径叶的后向散射,其线性相关性有所降低。比较不同深度土壤含水量和后向散射系数的相关性得出,水平同极化后向散射与 20 cm 深土壤含水量有较好的相关性;垂直同极化后向散射和 10 cm, 20 cm 深土壤含水量都有很好的相关性,并且其相关性都达到显著。和裸地相比,小麦地的后向散射系数和土壤含水量的相关性有所提高,这是因为小麦地相对裸地较平坦,粗糙度的影响被削弱。

(4)冬小麦地后向散射系数受小麦覆盖度和土壤含水量的影响,水平同极化后向散射系数和覆盖度、土壤含水量都有较好的相关性,并且和小麦覆盖度的相关性已达到显著。垂直同极化后向散射系数和小麦覆盖度相关性较差,但和土壤含水量相关性达到显著。因而,可以用垂直同极化后向散射系数监测土壤含水量,用水平同极化后向散射监测小

麦覆盖度。

参 考 文 献 (References)

- [1] Gao F, Wang J M, Sun C Q, 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]
- [2] Li Z Q, Feng K Y. Inversion of Soil Moisture and Dielectric Constant from Radar Backscattering Coefficient[J]. Science in China(Series E), 1997, 27(3): 243-248 [李宗谦,冯孔豫. 从雷达后向散射系数反演土壤湿度与复介电常数[J]. 中国科学 E 辑, 1997, 27(3): 243-248]
- [3] Tian G L. The Methodology of Soil Moisture Monitoring using Remote Sensing[J]. Remote Sensing of Environment, 1991, 6(2): 89-98 [田国良. 土壤水分的遥感监测方法[J]. 环境遥感, 1991, 6(2): 89-98]
- [4] Yang H, Guo H D, Li X W, et al Optimum Radar Parameters for Mapping Soil Moisture[J]. High Technology Letters, 2003, 9: 21-24 [杨虎,郭华东,李新武等. 主动微波遥感土壤水分观测中的最优雷达参数选择[J]. 高技术通讯, 2003, 9: 21-24]
- [5] Chanzy A. Basic Soil Surface Characteristics Derived from Active Microwave Remote Sensing[J]. Remote Sensing Reviews, 1993, 7: 303-319.
- [6] Ulaby F T, Aslam A, Dobson M C. Effect of Vegetation Cover on the Radar Sensitivity to Soil Moisture[J]. IEEE Trans Geoscience Remote Sensing, 1982, GE22(4): 476-481.
- [7] Li X C. A Study on Soil Moisture Monitoring by Using Microwave Remote Sensing[J]. Remote Sensing Technology and Application, 1995, 10(4): 1-8 [李杏朝. 微波遥感监测土

- 壤水分的研究初探 [J]. 遥感技术与应用, 1995, **10**(4): 1-8]
- [8] Sano E E, Moran M S, Huete A R, et al. C² and Multiangle Ku-band SAR Data for Soil Moisture Estimation Agricultural Areas [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, **64**: 77-90.
- [9] Rao K S, Raju S, Wang J R. Estimation of Soil Moisture and Surface Roughness Parameters from Back Scatter Coefficients [J]. *IEEE Trans Geo Science Remote Sensing*, 1993, **31**(5): 1094-1099.
- [10] Introduction of ENVISAT-1 Satellite and ASAR Sensor [R]. [http://www.rsgs.ae.cn/envisatzhuanqi/ENVISATweixingjichuanganjijieshao\(2\).htm](http://www.rsgs.ae.cn/envisatzhuanqi/ENVISATweixingjichuanganjijieshao(2).htm)
- [11] Du P J. Research on Filtering of RADARSAT Image [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2002, **31**(2): 132-137. [杜培军. RADARSAT 图像滤波的研究 [J]. *中国矿业大学学报*, 2002, **31**(2): 132-137.]
- [12] Yan Y, Zhou Y Q. Speckle Filtering Based on Segmentation for Monolook SAR Images [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2003, **29**(2): 132-135. [燕英, 周荫清. 基于分割途径的 SAR 单视图像斑点噪声抑制方法 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2003, **29**(2): 132-135.]
- [13] Rosich B, Meadows P. Absolute Calibration of ASAR level 1 Products Generated with PF-ASAR [R]. ftp://ftp.esrin.esa.it/pub/ESA_DOC/ENVISAT/ASAR/ASAR_products_absolute_calibration_v1.4.pdf
- [14] Ulaby F T, Moore R K, Fung A K. *Microwave Remote Sensing* [M]. Vol 1&2. Massachusetts Addison Wesley, 1981&1982.
- [15] Kallikainen M T, Ulaby F T, Dobson M C, et al. Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil Part I: Empirical Model and Experimental Observations [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1985, **23**(2): 25-34.
- [16] Shao Y, Liao J J, Fan X T, et al. Analysis on Rice Backscatter Signatures in Time Domain: Comparison Between Radarsat SAR Observation and Simulated Model Results [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2002, **6**(6): 440-450. [邵芸, 廖静娟, 范湘涛等. 水稻时域后向散射特征分析: 雷达卫星观测与模型模拟结果对比 [J]. *遥感学报*, 2002, **6**(6): 440-450.]
- [17] Yisok O, Kammal S, Fawwaz T, Ulaby. An Empirical Model and an Inversion Technique for Radar Scattering from Bare Soil Surface [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, **30**(2): 370-381.
- [18] Chen J S. Information Analysis of Remote Sensing Data and Its Application in Crop Growth Monitoring in Rainy and Cloudy Area [D]. *Institute of Remote Sensing Applications Chinese Academy of Sciences*, 2004. [陈劲松. 多云多雨地区遥感数据信息分析及其在农作物生长状态监测中的应用 [D]. *中国科学院遥感应用研究所*, 2004.]
- [19] Geoff C, Paul S. Using Backscatter Models to Define the Limits of Crop Information Recovery from SAR Data [R]. www.estec.esa.nl/conferences/98c07/papers/P030.PDF