

# 基于 Radarsat-2 卫星微波遥感的后向散射系数研究

黄 帅<sup>1,2</sup>, 丁建丽<sup>1,2</sup>, 张钧泳<sup>1,2</sup>, 陈文倩<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>新疆大学资源与环境科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830046;

<sup>2</sup>新疆大学绿洲生态教育部重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830046

**摘要** 以修正的 Dobson 介电常数模型作为基础模型, 分析并验证了土壤体积含水量和含盐量与介电常数的关系。在此基础上, 提取不同极化方式下的雷达影像后向散射系数, 分析后向散射系数与介电常数之间的关系。结果表明: 体积含水量和含盐量是土壤介电常数的主要影响因素; 体积含水量是介电常数实部的决定性因素, 直接决定土壤介电常数实部的大小; 介电常数虚部受多种因素的影响, 含盐量为主要因素; 体积含水量和含盐量相互作用, 共同影响后向散射系数; 在交叉极化模式下, 介电常数是影响雷达影像后向散射系数的主要因素。基于土壤的介电常数来监测土壤中的含盐量和体积含水量具有一定的潜力, 通过雷达影像反演土壤中的含盐量是完全可能的。

**关键词** 散射; 微波遥感; 后向散射系数; 介电常数; 改进的积分方程模型

中图分类号 TP753 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201737.0929001

## Backscattering Coefficient Research Based on Microwave Remote Sensing of Radarsat-2 Satellite

Huang Shuai<sup>1,2</sup>, Ding Jianli<sup>1,2</sup>, Zhang Junyong<sup>1,2</sup>, Chen Wenqian<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>College of Resources and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Oasis Ecology of Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046, China

**Abstract** Using modified Dobson dielectric constant model as the basic model, we analyze and validate the relationships between soil volumetric water content or soil salinity and dielectric constant. On this basis, we analyze the relationship between backscattering coefficient and dielectric constant by extracting the backscattering coefficient of the radar image at different polarization modes. The results show that the volumetric water content and soil salinity are the main influencing factors of dielectric constant of the soil. The volumetric water content is the decisive factor of the real part of the dielectric constant, and it determines the value of the real part of the dielectric constant. The imaginary part of the dielectric constant is affected by various factors, and the soil salinity is the main factor. The interaction between volumetric water content and soil salinity affects the backscattering coefficient. At the cross polarization mode, the dielectric constant is the main factor affecting the backscattering coefficient of the radar image. The dielectric constant of the soil has a certain potential in monitoring the soil salinity and volumetric water content. It is entirely possible to retrieve soil salinity by radar images.

**Key words** scattering; microwave remote sensing; backscattering coefficient; dielectric constant; advanced integral equation model

**OCIS codes** 290.1350; 100.2000

## 1 引 言

土壤盐渍化是土地退化的主要类型之一, 通常出现在土壤蒸散发强、气候干旱、含有较多可溶性盐类以

收稿日期: 2017-03-31; 收到修改稿日期: 2017-05-10

基金项目: 国家自然科学基金(U1303381, 41261090)、自治区重点实验室专项基金(2016D03001)、自治区科技支疆项目(201591101)、教育部促进与美大地区科研合作与高层次人才培养项目、新疆大学优秀博士研究生创新项目(XJUBSCX-2016013)

作者简介: 黄 帅(1990—), 男, 博士研究生, 主要从事干旱区资源环境及遥感应用方面的研究。

E-mail: huangshuai\_gis@163.com

导师简介: 丁建丽(1974—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事干旱区资源环境及遥感应用方面的研究。

E-mail: Ding\_jl@163.com(通信联系人)

及地下水位高的地区<sup>[1]</sup>,是大自然和人类活动对水盐运动产生影响的结果<sup>[2-4]</sup>。土壤盐渍化不但破坏水盐平衡,使农业生产遭受损失,而且对生物圈和生态环境构成了威胁<sup>[5-6]</sup>。我国盐渍土壤的分布面积和分布广度居世界首位<sup>[7]</sup>。我国新疆由于独特的干旱气候、地质地貌和土壤质地等条件,盐渍化土壤分布广泛,盐渍土壤种类多,盐渍化土壤的总面积为  $8.48 \times 10^7 \text{ km}^2$ ,30%的耕地出现了盐渍化<sup>[8]</sup>。因此,及时掌握干旱区土壤盐渍化的动态信息,对科学治理盐渍化土地,增加土地利用率和改善生态环境具有重要意义。

获取土壤盐渍化数据的传统方法是野外实地调查,该方法具有一定的局限性,不仅测点少、代表性差、费时费力,而且不能达到大范围实时动态监测的目的<sup>[9]</sup>。随着光学遥感技术的发展,其以观测范围广、信息量大、更新周期短、速度快等优点<sup>[10-11]</sup>被广泛应用于土壤盐渍化的研究中<sup>[12-16]</sup>,但该技术主要是依据影像光谱区分地物信息,容易出现“同谱异物”“异物同谱”的现象,而且光学遥感技术的局限性导致其不能精确地提取土壤盐渍化信息。利用微波遥感技术监测土壤盐渍化是依据土壤中的体积含水量和含盐量对其介电常数的影响来实现的,而雷达影像后向散射系数会随着介电常数的变化而发生变化,这使得采用微波遥感技术监测土壤中的含盐量成为了可能<sup>[17-18]</sup>。

土壤介电常数是土壤本身的介电特性。利用介电常数可以分析电磁波与土壤相互作用的机理,从而分析土壤后向散射系数对土壤介电常数的响应。研究表明,含水量和含盐量高的土壤具有更高的导电特性,介电常数的实部和虚部也会相应升高,形成强反射<sup>[19]</sup>。目前,土壤混合物的介电模型有 De Looer 物理模型、Hallikainen 经验模型<sup>[20]</sup>、Topp 经验模型<sup>[21]</sup>和 Dobson 半经验模型<sup>[22]</sup>。这些土壤介电模型都是基于非盐渍土壤构建的,没有考虑含盐量对介电常数的影响。为此,研究人员对介电常数模型进行了修正和扩展<sup>[11,23]</sup>,使之适用于盐渍化土壤。

本文以渭干河-库车河三角洲绿洲(以下简称“渭库绿洲”)为目标靶区 A,利用盐渍土壤介电模型(修正后的 Dobson 介电常数模型),分析了介电常数对模型参数的敏感性,并根据野外实测数据来验证该模型的适用性。在此基础上,以渭库绿洲外围交错带为目标靶区 B,提取微波遥感影像后向散射系数,并与高级积分方程模型(AIEM)的模拟值进行拟合分析,分析盐渍化土壤介电常数与雷达影像后向散射系数之间的响应关系,为开展盐渍化微波遥感反演提供理论基础。

## 2 材料与方法

### 2.1 研究区概况

渭库绿洲(地理坐标为北纬  $41^{\circ}8' \sim 41^{\circ}46'$ ,东经  $82^{\circ}10' \sim 83^{\circ}40'$ )位于新疆塔里木盆地北缘,东临尉犁县和轮台县,西接温宿县,南部为塔里木河北岸,北部为天山南麓的秋里塔格山,是我国典型的扇形平原绿洲。该绿洲属于温带大陆性干旱气候,光热资源充裕,年总辐射量达  $6.11 \times 10^5 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$ ,年日照时数约为  $2.85 \times 10^3 \text{ h}$ ,日照率为 65%,干旱少雨,年平均气温为  $11.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,潜在蒸发量为 2356 mm,年均降水量为 55.45 mm,干燥指数为 42。绿洲农业以种植业为主,人工植被主要有棉花、玉米和冬小麦;天然植被以怪柳、盐穗木、花花柴和盐节木为主<sup>[24]</sup>。目标靶区的采样点分布如图 1 所示,目标靶区 A 的土壤水盐含量不同;目标靶区 B 的植被覆盖稀疏,地表起伏变化不大。

### 2.2 数据采集与处理

土壤测量单元要求具有一定的代表性,能够代表其周围较大区域的土壤。土壤测量单元采集于表层土壤(0~10 cm),采集时间为 2013 年 4 月(降水少,且植被刚开始进入生长季),每个测量单元内按五点梅花状布置土壤样品采样点,采样点样品混合均匀后作为该测量单位的土壤样品,共采集 39 个测量单元。土壤数据采集分为三个步骤:1)将每个测量单元的土壤样品装入铝盒,带回实验室进行烘干处理,直至土壤处于完全脱水状态,放在阴凉处冷却至常温并称重,计算土壤的体积含水量;2)利用微波矢量网络分析仪在野外实地测量土壤样品的介电常数,测量过程中要保持土壤样品与探针紧密接触;3)将采集的土壤样品分装带回实验室,自然风干后剔除植物及碎石杂质,磨碎后用 0.5 mm 孔径的筛子进行筛选,而后进行理化分析,测量土壤的含盐量<sup>[25]</sup>、土壤质地和土壤容重。

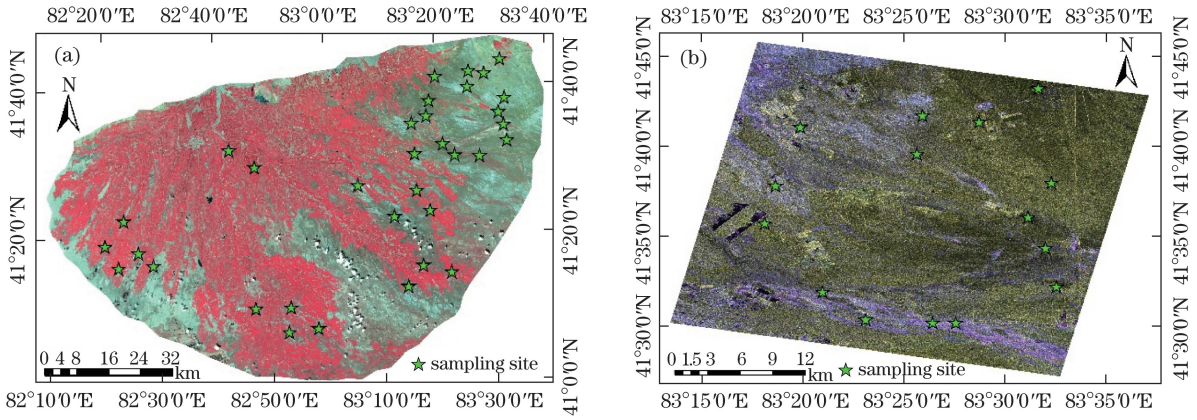


图 1 目标靶区的采样点分布。(a)目标靶区 A;(b)目标靶区 B

Fig. 1 Sampling site distributions of target regions. (a) Target region A; (b) target region B

### 2.3 微波遥感影像预处理

Radarsat-2 雷达卫星由加拿大太空署于 2007 年 12 月 14 日发射升空,该卫星配备 C 波段传感器,具有 3 m 高空间分辨率的成像能力,可提供多极化、多种分辨率的数据<sup>[26]</sup>。

本研究使用的微波数据源为 Radarsat-2 雷达卫星的全极化(包括 HH、HV、VH、VV 4 种极化方式)数据,选取 2013 年 4 月 13 日的影像,空间分辨率为 5.2 m×7.6 m(距离向×方位向),幅宽为 25 km×25 km。研究区 Radarsat-2 卫星影像为 1 级单视复数影像,采用 ENVI 5.3<sup>®</sup>软件中的 SARscape5.2.1<sup>®</sup>模块进行预处理,处理过程如下:1)进行多视处理(方位和距离视数分别为 8 和 3,生成功率 pwr 图像),这不仅可以使影像纹理结构更接近真实情况,而且可以降低纹斑噪声;2)进行滤波去噪处理(Refined-Lee 滤波,3 像元×3 像元窗口),消除斑点噪声;3)进行地理编码,利用数字高程地图进行几何精校正;4)辐射定标,获取目标靶区多极化方式下的后向散射系数。

### 2.4 模型的确定

#### 2.4.1 修正的 Dobson 介电模型

胡庆荣<sup>[11]</sup>提出的修正盐渍化土壤的介电模型是基于高含水量土壤通过实验得到的,具有一定的局限性,吴月茹<sup>[23]</sup>针对这一缺陷进行了修正,修正后的模型表达式为

$$\epsilon'_{\text{soil}} = \left[ 1 + \frac{\rho_b}{\rho_s} (\epsilon_s^a - 1) + m_V^{\beta'} \epsilon_{\text{sw}}^{\prime a} - m_V \right]^{\frac{1}{\alpha}}, \quad (1)$$

$$\epsilon''_{\text{soil}} = (m_V^{\beta'} \epsilon_{\text{sw}}^{\prime a})^{\frac{1}{\alpha}}, \quad (2)$$

式中 $\epsilon'_{\text{soil}}$ 和 $\epsilon''_{\text{soil}}$ 分别为模型的实部和虚部; $\rho_b$ 为土壤容重; $\rho_s$ 为土壤密度,取 $2.65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ; $\epsilon_s$ 为土壤基质介电常数,取 4.7; $\alpha=0.65$ ; $\beta'$ 为介电常数实部的束缚水修正系数,由土壤质地决定; $\beta''$ 为介电常数虚部的束缚水修正系数,由土壤质地决定; $m_V$ 为土壤的体积含水量。 $\epsilon'_{\text{sw}}$ 和 $\epsilon''_{\text{sw}}$ 分别为

$$\epsilon'_{\text{sw}} = \epsilon_{\text{sw}\infty} + \frac{\epsilon_{\text{sw}0} - \epsilon_{\text{sw}\infty}}{1 + (2\pi f \tau_{\text{sw}})^2}, \quad (3)$$

$$\epsilon''_{\text{sw}} = \frac{2\pi f \tau_{\text{sw}} (\epsilon_{\text{sw}0} - \epsilon_{\text{sw}\infty})}{1 + (2\pi f \tau_{\text{sw}})^2} - c \cdot \frac{\rho_b}{2\pi f \epsilon_0} \cdot \frac{S_a m_V^c}{m_V}, \quad (4)$$

其中

$$2\pi \tau_{\text{sw}}(T) = 1.1109 \times 10^{-10} - 3.824 \times 10^{-12} T + 6.938 \times 10^{-14} T^2 - 5.096 \times 10^{-16} T^3, \quad (5)$$

式中 $\epsilon_{\text{sw}\infty}$ 为纯水静态介电常数,其值为 4.9; $\epsilon_{\text{sw}0}$ 为纯水高频介电常数; $f$ 为频率,Hz; $\tau_{\text{sw}}$ 为弛豫时间,s; $T$ 为温度; $S_a$ 为土壤盐分; $\epsilon_0$ 为真空介电常数,通常取 $\epsilon_0=1$ ; $c$ 和 $\mu$ 可通过拟合土壤样本得到, $c=0.371$ , $\mu=0.18$ 。

#### 2.4.2 AIEM

积分方程模型(IEM)是基于电磁波辐射传输方程的地表散射模型,由 Fung 等<sup>[27]</sup>于 1992 年提出。该模型能够较好地模拟裸露地表的真实的后向散射系数,广泛应用于后向散射特征的提取与分析中,但该模型也

有一些缺陷。经过不断的修正和改善,该模型已发展为改进型 IEM(AIEM)。AIEM 可以提高模拟的精度,对裸露地表的微波散射有更高的解释能力。

AIEM 的表达式及单次散射项分别为<sup>[28]</sup>

$$\sigma_{pq}^0 = \frac{k^2}{2} \exp[-s^2(k_z^2 + k_{sz}^2)] \sum_{n=1}^{\infty} s^{2n} |I_{pq}^n|^2 \frac{W^{(n)}(k_{sx} - k_x, k_{sy} - k_y)}{n!}, \quad (6)$$

$$I_{pq}^n = (k_{sz} + k_z)^n f_{pq} \exp(-s^2 k_z k_{sz}) + \frac{k_{sz}^n [F_{pq}(-k_x, -k_y) + k_z^n F_{pq}(-k_{sx}, -k_{sy})]}{2}, \quad (7)$$

式中 pq 为极化方式,  $k$  为空间自由波数,  $s$  为土壤均方根高度,  $W^{(n)}(k_{sx} - k_x, k_{sy} - k_y)$  为地表相关函数的  $n$  阶傅里叶变换,  $k_z = k \cos \theta_i$ ,  $k_{sz} = k \sin \theta_s$ ,  $k_x = k \sin \theta_i \cos \varphi$ ,  $k_{sx} = k \sin \theta_s \cos \varphi_s$ ,  $k_y = k \sin \theta_i \sin \varphi$ ,  $k_{sy} = k \sin \theta_s \cos \varphi_s$ ,  $\theta$  为散射角,  $\varphi$  为方位角,  $I_{pq}^n$  为单次散射项,  $F_{pq}$  和  $f_{pq}$  为非涅耳反射系数  $\Gamma_{pp}$  的函数。

AIEM 重新定义了菲涅耳反射系数  $\Gamma_{pp}$ , 使之适用于任意粗糙度条件, 定义式为

$$\Gamma_{pp} = \Gamma_{pp}(\theta) + [\Gamma(0) - \Gamma_{pp}(\theta)] \left(1 - \frac{s_p}{s_0}\right), \quad (8)$$

其中

$$s_0 = 1 / \left| 1 + \frac{8F_p(0)}{F_p \cos \theta} \right|^2, \quad (9)$$

$$s_p = \frac{|F_p|^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(ks \cdot \cos \theta)^{2n}}{n!} \cdot W^{(n)}(2k \sin \theta)}{\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(ks \cdot \cos \theta)^{2n}}{n!} \left| F_p + \frac{2^{n+2} \cdot R_p(0)}{\exp(ks \cdot \cos \theta)^2 \cdot \cos \theta} \right| \cdot W^{(n)}(2k \sin \theta)}, \quad (10)$$

$$F_p = 8\Gamma_{pp}^2(0) \cdot \sin^2 \theta \cdot \left( \frac{\cos \theta + \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta}}{\cos \theta - \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta}} \right), \quad (11)$$

式中  $\epsilon$  为土壤介电常数,  $\epsilon$  与土壤体积含水量  $m_v$  的关系为<sup>[21]</sup>

$$\epsilon^a \approx 1 + \frac{\rho_b}{\rho_s} (\epsilon_s^a - 1) - m_v^b \epsilon_{fw}^a - m_v, \quad (12)$$

式中  $\epsilon_{fw}$  为纯水的介电常数。

### 3 结果与分析

#### 3.1 盐渍土水盐量与模型参数的关系

对目标靶区采集的土壤样品进行理化分析后发现, 该区域土壤的质地类型主要为壤土, 其余极少量的质地类型为黏土和砂土。根据测得土壤质地的平均值并参照土壤类型分类图, 在实验室内配制了代表整个研究区的土壤类型——砂质黏壤土, 其中砂粒、粉粒和黏粒的质量分数分别为 60%、20% 和 20%。目标靶区土壤容重的平均值为  $1.4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。因为土壤容重、土壤质地、离子浓度等对介电常数模型的响应不敏感<sup>[29]</sup>, 因此主要讨论土壤含盐量和体积含水量与模型参数的关系。

##### 3.1.1 含盐量与介电常数虚部的关系

含盐量是介电常数模型最重要的参数之一, 土壤介电常数的虚部与土壤含盐量紧密相关, 因此, 本节主要研究介电常数虚部与含盐量之间的关系。考虑到雷达频率的覆盖范围, 将 6 种不同的频率[0.5 GHz(P 波段)、1.5 GHz(L 波段)、3.0 GHz(S 波段)、5.0 GHz(C 波段)、10.0 GHz(X 波段)、20.0 GHz(K 波段)]引入到介电常数虚部模型中, 模拟得到了这 6 种频率下介电常数虚部与土壤含盐量的关系, 如图 2 所示。

由图 2 可以很直观地看到: 含盐量和介电常数虚部之间存在显著的线性关系, 随着土壤含盐量增大, 介电常数虚部逐渐增大; 当频率为 0.5 GHz 时, 介电常数虚部最大, 频率为 20 GHz 时, 介电常数虚部最小; 频率为 0.5 GHz 和 1.5 GHz 时, 介电常数虚部与实际介电常数虚部不符; 频率为 3 GHz 和 5 GHz 时, 介电常数虚部与实际介电常数虚部比较符合, 与含盐量之间的相关性较好。通过分析可知, 土壤含盐量与介电常数虚部之间存在良好的正相关线性关系。



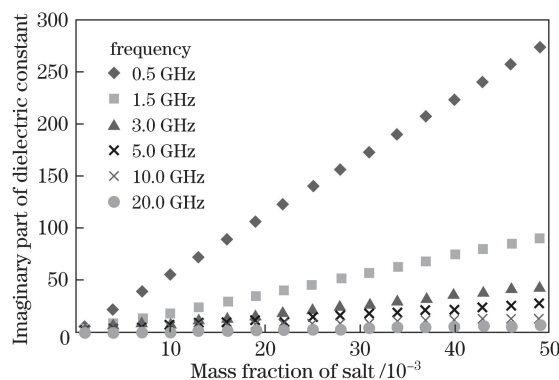


图 2 土壤介电常数虚部与土壤含盐量之间的关系

Fig. 2 Relationship between imaginary part of soil dielectric constant and soil salinity

### 3.1.2 体积含水量与介电常数的关系

为分析体积含水量和频率对介电常数实部的影响,模拟得到了上述 6 种不同频率下土壤介电常数实部与体积含水量之间的关系,如图 3(a)所示。

为分析体积含水量、含盐量对介电常数虚部的影响,模拟得到了 6 种不同含盐量(质量分数分别为  $10 \times 10^{-3}$ 、 $20 \times 10^{-3}$ 、 $30 \times 10^{-3}$ 、 $40 \times 10^{-3}$ 、 $50 \times 10^{-3}$ 、 $60 \times 10^{-3}$ )下,介电常数虚部与体积含水量之间的关系,如图 3(b)所示。

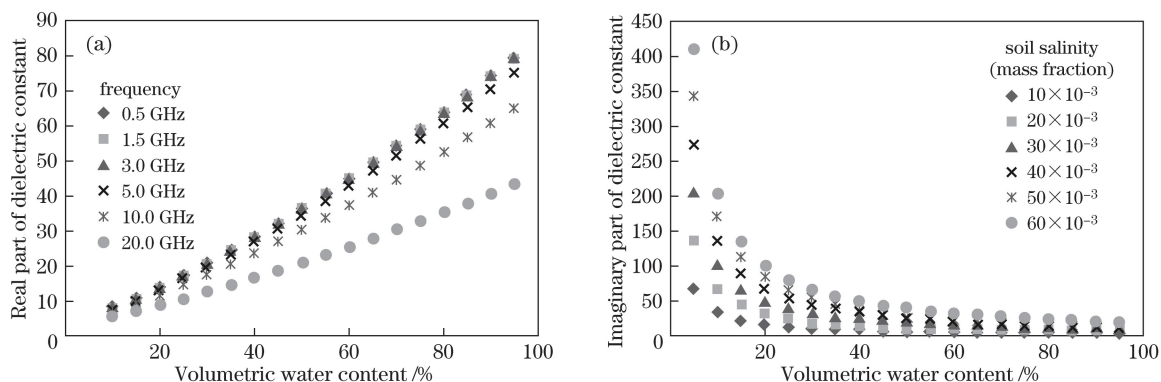


图 3 土壤介电常数与土壤体积含水量之间的关系。(a)介电常数实部;(b)介电常数虚部

Fig. 3 Relationship between soil dielectric constant and soil volumetric water content. (a) Real part of dielectric constant; (b) imaginary part of dielectric constant

从图 3(a)可以看出:在一定体积含水量条件下,随着频率升高,土壤介电常数实部不断降低,当频率为 0.5 GHz(P 波段)时,介电常数的实部最大,当频率为 20 GHz(K 波段)时,介电常数的实部最小,这说明频率为 0.5 GHz(P 波段)时土壤体积含水量对介电常数实部的响应最敏感;在整个低频区域(0.5~5.0 GHz),曲线的曲率几乎一样,说明在此频率范围内土壤体积含水量与介电常数实部之间呈显著性响应关系;当体积含水量在 1%~30%之间时,频率对介电常数实部的影响较小,介电常数基本保持一致;当体积含水量大于 30%后,频率对介电常数实部的影响较大。土壤体积含水量与介电常数实部之间的关系表明,当频率为 0.5~5.0 GHz 范围、土壤体积含水量为 1%~30%之间时,土壤介电常数实部与体积含水量之间存在良好的正相关关系。

由图 3(b)可以看出:在一定体积含水量下,介电常数虚部随含盐量的增加而增大,说明介电常数虚部与土壤含盐量之间存在正相关关系;对于不同含盐量的土壤,其介电常数虚部随体积含水量变化呈现出相同的趋势;当体积含水量在 5%~30% 范围内时,介电常数虚部的变化十分明显,当体积含水量大于 30%后,由于土壤的体积含水量接近或已经达到饱和状态,土壤介电常数虚部的变化不明显。以上表明,介电常数虚部与体积含水量之间为负相关性关系,土壤含盐量对介电常数虚部的影响超过了体积含水量的影响。

### 3.1.3 模型适用性分析

将实验室测得的土壤采样样品的含盐量、体积含水量、土壤容重、土壤质地等参数代入到修正的介电常数模型中,模拟出介电常数的实部和虚部,并计算得出介电常数的幅值。结合同时期野外实测的土壤介电常数进行相关性分析,并选择最优函数进行建模,结果如图 4 所示。

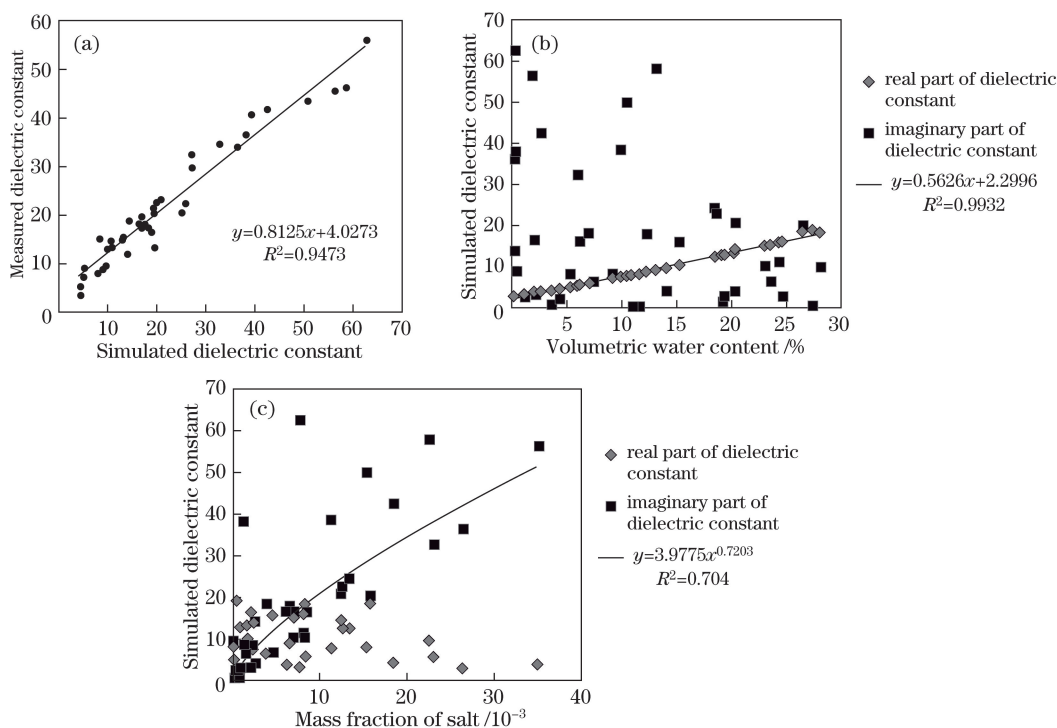


图 4 实测数据与模型介电常数的关系。(a)模型介电常数-实测介电常数;(b)体积含水量-模型介电常数;  
(c)含盐量-模型介电常数

Fig. 4 Relationship between measured data and simulated dielectric constant. (a) Simulated dielectric constant-measured dielectric constant; (b) volumetric water content-simulated dielectric constant; (c) soil salinity-simulated dielectric constant

由图 4(a)可以看出,模型模拟得到的介电常数与野外实测得到介电常数的拟合度较好,线性拟合效果较优,说明修正的介电常数模型模拟的介电常数与实测值相差不大,在一定情况下,可以用模型模拟的介电常数代替实测值。

由图 4(b)可以看出:土壤实测体积含水量与介电常数实部之间的线性拟合度非常高,但体积含水量与介电常数虚部之间的拟合度较差,拟合方程的显著性较差,说明体积含水量直接影响介电常数实部的大小;与介电常数实部相比,介电常数虚部受体积含水量的影响程度较小。

由图 4(c)可以看出,土壤含盐量与介电常数虚部的幂函数拟合度较优。虽然土壤含盐量与介电常数虚部的拟合度不高,但是也能在一定程度上反映介电常数虚部与土壤含盐量的关系。含盐量对介电常数实部的影响微乎其微,对虚部的影响程度更大。

### 3.2 介电常数对后向散射系数的响应

在特定 C 波段(5.0 GHz)以及地表相关长度为 10 cm、均方根高度  $s$  为 0.5 cm 的条件下,利用 AIEM 模拟 4 种极化方式(VV 极化、VH 极化、HV 极化、HH 极化)下的后向散射系数与介电常数实部(介电常数虚部  $\epsilon''=2$ )和虚部(介电常数实部  $\epsilon'=10$ )的关系,结果如图 5 所示。

根据图 5(a)所示的实部响应曲线可知:在给定地表粗糙度和介电常数虚部的条件下,4 种极化方式下的后向散射系数均随介电常数实部的增加而增大;当介电常数实部  $\epsilon'$  从 5 增加到 35 时,VV 极化、VH 极化、HV 极化和 HH 极化方式下的后向散射系数分别增大了 7.0,6.8,6.3,5.4 dB。4 种极化对介电常数实部响应的敏感性从高到低的顺序依次为 VV 极化、VH 极化、HV 极化、HH 极化。

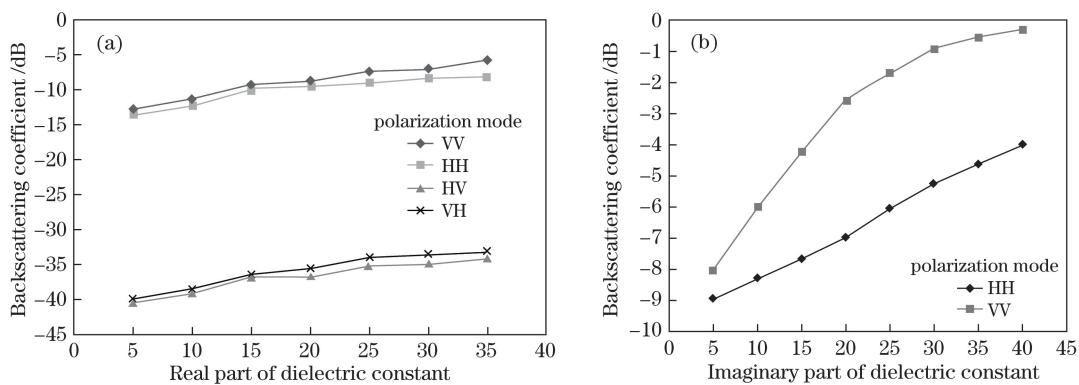


图 5 土壤介电常数与后向散射系数的关系。(a)介电常数实部;(b)介电常数虚部

Fig. 5 Relationship between soil dielectric constant and backscattering coefficient. (a) Real part of dielectric constant; (b) imaginary part of dielectric constant

在给定地表粗糙度和介电常数实部的条件下,4种极化方式的后向散射系数随着介电常数虚部的增加而增大,4种极化方式按敏感性从高到低的排序为VV极化、VH极化、HV极化、HH极化。为了凸显曲线的细节信息,取敏感性最强(VV极化)和最弱(HH极化)的两根曲线进行研究。根据图5(b)所示的VV极化和HH极化响应曲线可知:当介电常数虚部 $\epsilon''$ 从5增加到40时,VV极化、HH极化方式下的后向散射系数分别增大了7.7,4.9 dB;当 $\epsilon'' \leq 30$ 时,VV极化方式下的后向散射系数随虚部增大而显著增大;当 $\epsilon'' > 30$ 后,后向散射系数的变化趋缓;在HH极化方式下,后向散射系数随着虚部增大基本呈线性增大的趋势。

### 3.3 后向散射系数的拟合响应

#### 3.3.1 微波遥感拟合研究

利用目标靶区B的微波遥感影像,在ENVI 5.3软件的支持下,经过辐射定标,影像的像元亮度(DN)值转变为后向散射系数影像。图6为4种极化方式下的后向散射系数影像。

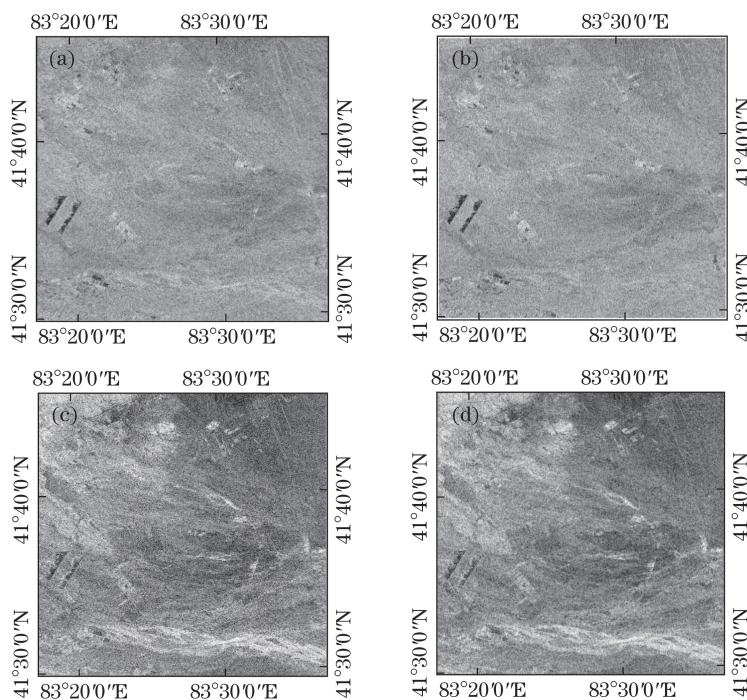


图 6 4种极化方式下的后向散射系数影像。(a) HH极化;(b) VV极化;(c) HV极化;(d) VH极化

Fig. 6 Backscattering coefficient images at four kinds of polarization modes. (a) HH polarization; (b) VV polarization; (c) HV polarization; (d) VH polarization

目标靶区 B 的 14 个土壤采集点位于绿洲外围,因采样时间早于植被生长季,植被覆盖度较低,属于植被稀疏区,而且整个研究区地表粗糙度变化不大<sup>[30]</sup>,按照经验公式取经验值,均方根高度  $s=0.5\text{ cm}$ ,相关长度为  $10\text{ cm}$ ,入射角与雷达影像入射角吻合,利用 AIEM,根据土壤实测的含盐量和体积含水量数据模拟采样点的后向散射系数。

对 4 种极化方式下 AIEM 模拟的后向散射系数与雷达影像提取的后向散射系数分别建模分析,研究两者的相关性,结果如图 7 所示。

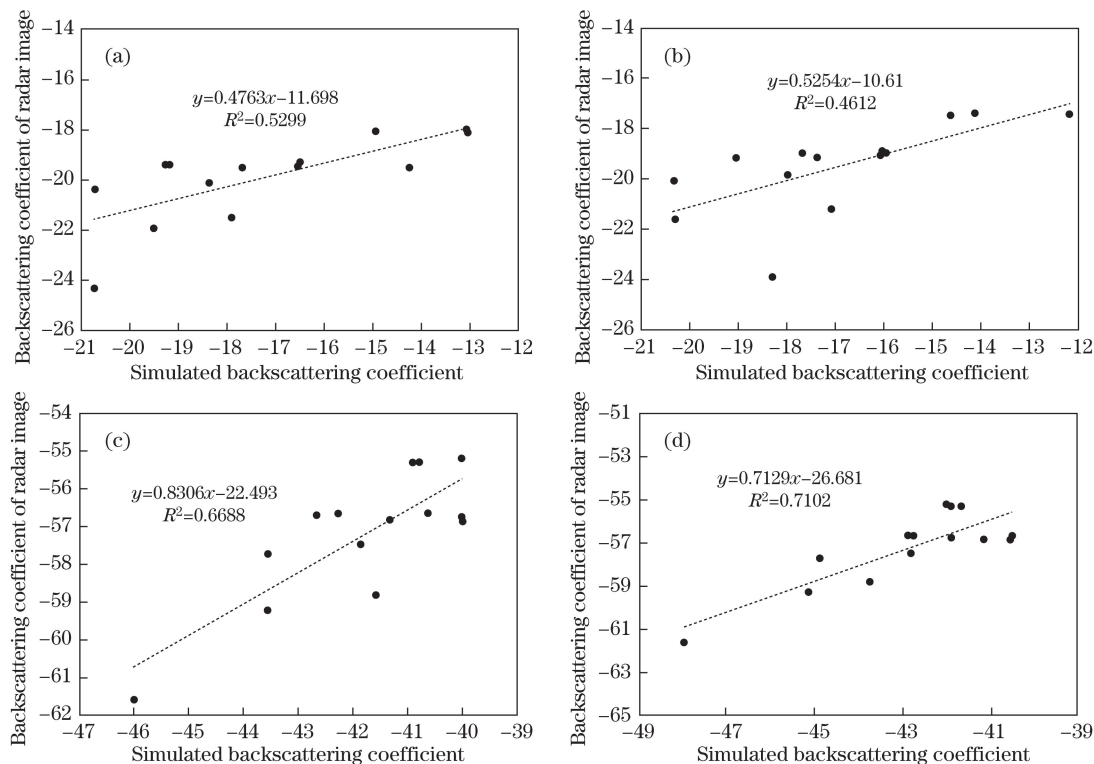


图 7 4 种极化方式下雷达影像的后向散射系数与 AIEM 模拟的后向散射系数之间的关系。

(a) HH 极化;(b) VV 极化;(c) VH 极化;(d) HV 极化

Fig. 7 Relationship between radar image backscattering coefficient and AIEM simulated backscattering coefficient at four kinds of polarization modes. (a) HH polarization; (b) VV polarization; (c) VH polarization; (d) HV polarization

由图 7 可以看出,HH 极化和 VV 极化模式下雷达影像的后向散射系数与模型模拟的后向散射系数之间的拟合精度较差,HV 极化方式下的拟合度最优,相关性系数  $R^2=0.7102$ ,VH 极化方式下的拟合度较好, $R^2=0.6688$ 。

在特定参数给定的前提下,AIEM 是关于土壤介电常数的函数,HV 极化方式下雷达影像的后向散射系数与模拟的后向散射系数的拟合精度最高,说明在 HV 极化模式下,介电常数与雷达影像后向散射系数之间的相关性最好。

### 3.3.2 光学遥感拟合研究

为了分析微波遥感在监测土壤盐渍化中的优势与不足,基于国产 GF-1 卫星的遥感数据,定量反演典型目标靶区 A 土壤中的含盐量,并利用实测数据验证提取精度。GF-1 影像的成像时间为 2013 年 4 月 17 日,与微波数据采样时间接近,此研究时间段内无降水,土壤与植被信息几乎保持不变。

选择 Abbas 和 Khan 的土壤盐分指数  $S_3=(G \times R)/B$ ( $R$  为红波段 DN 值, $G$  为绿波段 DN 值, $B$  为蓝波段 DN 值)定量反演研究区土壤的盐渍化程度,得到的土壤盐分指数灰度图如图 8 所示。从土壤盐分指数灰度图上提取实测点的土壤盐分值,并与实测土壤盐分进行相关性分析,结果如图 9 所示。



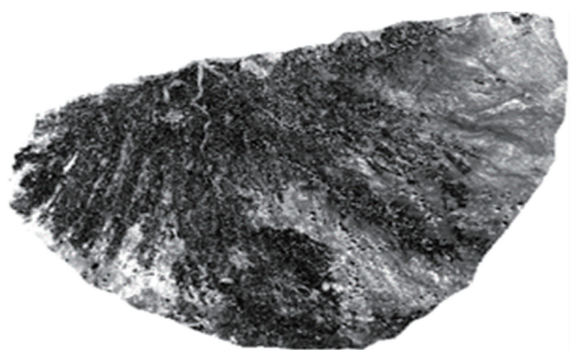


图 8 土壤盐分指数灰度图

Fig. 8 Grayscale map of soil salinity index

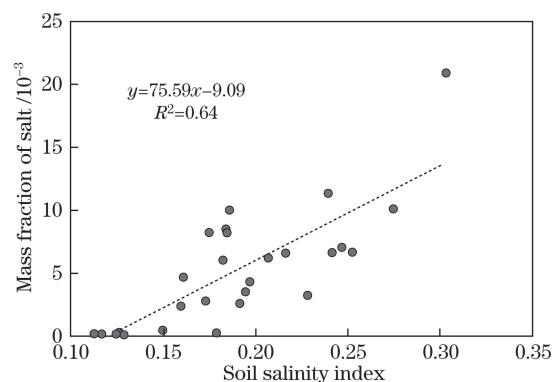


图 9 实测土壤含盐量与土壤盐分指数的相关性分析

Fig. 9 Correlation analysis between measured soil salinity and soil salinity index

从图 8 可以看出,根据盐分指数  $S_s$  可以很好地区分植被与土壤信息,还可以较好地表达土壤的盐渍化程度。从图 9 所示的相关性分析可知,土壤盐分指数与实测土壤盐分的相关性系数  $R^2$  为 0.64,且在 0.01 水平时,显著性极强,说明 GF-1 影像适合对目标靶区 A 土壤的盐渍化进行评估。

对比分析微波遥感与光学遥感监测土壤的盐渍化可知,微波遥感交叉极化模式(VH 极化模式和 HV 极化模式)下的相关性比光学遥感的相关性高,且微波遥感可以全天时、全天候地监测,弥补了光学遥感的不足;但同极化模式(HH 极化模式和 VV 极化模式)下微波遥感的相关性比光学遥感的相关性弱,在未来的研究中需研究地表粗糙度对后向散射系数的影响,以提高同极化模式下监测土壤含盐量的精度。

综上所述,盐渍土 AIEM 后向散射系数与雷达影像后向散射系数之间的关系能够反映雷达影像后向散射系数对土壤介电常数的响应,交叉极化模式下的相关性较好,同极化模式下的相关性较差。

## 4 结 论

利用修正的 Dobson 介电常数模型分析了模型参数中的体积含水量和含盐量对介电常数的响应,并利用野外实测数据验证了盐渍土介电模型在目标靶区 A 的适用性;提取雷达影像的后向散射系数,并与 AIEM 模拟的后向散射系数进行了相关性分析。土壤体积含水量与土壤介电常数实部呈正相关关系,当体积含水量介于 1%~30% 时拟合效果较好;土壤体积含水量与土壤介电常数虚部呈负相关关系;土壤含盐量与土壤介电常数虚部之间呈正相关关系,具有良好的线性关系,且在低频情况下(3.0 GHz 和 5.0 GHz)的拟合效果最好。

土壤体积含水量与土壤介电常数实部的相关性系数达到 99.32%,说明土壤体积含水量是影响介电常数实部的决定性因素。土壤含盐量和含水量共同影响土壤介电常数的虚部,土壤盐分含量对介电常数虚部的影响较强。介电常数实部主要受体积含水量影响,虚部主要受含盐量的影响。综合分析介电常数与后向散射系数关系发现,土壤水盐含量对后向散射系数的影响是相互的。

在交叉极化模式下,后向散射系数对介电常数的响应比较显著,说明介电常数可以通过雷达影像后向散射系数直观地反映,而土壤水盐含量的变化会引起介电常数变化,因此,使用介电常数来监测土壤含盐量、体积含水量具有一定的潜力。除此之外,通过雷达影像来反演土壤含盐量是完全可能的。

## 参 考 文 献

- [1] Tashpolat·Tiyip, Zhang Fei, Ding Jianli, *et al.* Spatial information on salinization of typical oases in arid areas[J]. *Arid Land Geography*, 2007, 30(4): 544-551.  
塔西甫拉提·特依拜, 张 飞, 丁建丽, 等. 干旱区典型绿洲盐渍化土壤空间信息研究[J]. *干旱区地理*, 2007, 30(4): 544-551.
- [2] Farifteh J, van der Meer F, Atzberger C, *et al.* Quantitative analysis of salt-affected soil reflectance spectra: a

- comparison of two adaptive methods (PLSR and ANN)[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 110(1): 59-78.
- [3] 董新光, 周金龙, 陈跃滨. 干旱内陆区水盐监测与模型研究及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 1-27.
- [4] Sreenivas K, Venkataratnam L, Rao P V N. Dielectric properties of salt-affected soils[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1995, 16(4): 641-649.
- [5] Darwish T, Atallah T, El Moujabber M, *et al.* Salinity evolution and crop response to secondary soil salinity in two agro-climatic zones in Lebanon[J]. *Agricultural Water Management*, 2005, 78(12): 152-164.
- [6] Gao Tingting, Ding Jianli, Ha Xueping, *et al.* The spatial variability of salt content based on river basin scale: a case study of the delta oasis in Weigan-Kuqa watershed[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(10): 2695-2705.  
高婷婷, 丁建丽, 哈学萍, 等. 基于流域尺度的土壤盐分空间变异特征——以渭干河-库车河流域三角洲绿洲为例[J]. *生态学报*, 2010, 30(10): 2695-2705.
- [7] Yang Jinsong. Development and prospect of the research on salt-affected soils in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 837-846.  
杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望[J]. *土壤学报*, 2008, 45(5): 837-845.
- [8] Trusun•Hasan, Tashpolat•Tiyip, Ding Jianli. On saline soil's brightness changes of TM images in northern part of Tarim Basin—a case study of Ugan and Kucha rivers delta[J]. *Soils*, 2008, 40(4): 667-671.  
吐尔逊•艾山, 塔西甫拉提•特依拜, 丁建丽. 基于 TM 图像的塔里木盆地北缘盐渍地亮度值分析——以渭干河-库车河三角洲绿洲为例[J]. *土壤*, 2008, 40(4): 667-671.
- [9] Metternicht G, Zinck J A. Remote sensing of soil salinization: impact on land management[M]. Boca Raton: CRC Press, 2008.
- [10] 郭华东. 雷达对地观测理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [11] Hu Qingrong. Studies on microwave dielectric behavior of moist salt soil and its effect on backscattering coefficients extracted from radar image[D]. Beijing: Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, 2003.  
胡庆荣. 含水含盐土壤介电特性实验研究及对雷达图像的响应分析[D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2003.
- [12] Zhang Dong, Tashpolat•Tiyip, Zhang Fei, *et al.* Effect of fractional differential algorithm on hyperspectral data of saline soil[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(3): 0330002.  
张 东, 塔西甫拉提•特依拜, 张 飞, 等. 分数阶微分算法对盐渍土高光谱数据的影响研究[J]. *光学学报*, 2016, 36(3): 0330002.
- [13] Wu Yiquan, Zhou Yang, Long Yunlin. Small target detection in hyperspectral remote sensing image based on adaptive parameter SVM[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(9): 0928001.  
吴一全, 周 杨, 龙云淋. 基于自适应参数支持向量机的高光谱遥感图像小目标检测[J]. *光学学报*, 2015, 35(9): 0928001.
- [14] Nawar S, Buddenbaum H, Hill J, *et al.* Modeling and mapping of soil salinity with reflectance spectroscopy and landsat data using two quantitative methods (PLSR and MARS)[J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(11): 10813-10834.
- [15] Guan Xiaoyan, Wang Shaoli, Gao Zhanyi, *et al.* Spatio-temporal variability of soil salinity and its relationship with the depth to groundwater in salinization irrigation district[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(4): 1202-1210.  
管孝艳, 王少丽, 高占义, 等. 盐渍化灌区土壤盐分的时空变异特征及其与地下水埋深的关系[J]. *生态学报*, 2012, 32(4): 1202-1210.
- [16] Liu Guangming, Lü Zhenzhen, Yang Jinsong, *et al.* Spatial variation characteristics of soil salinity in typical oasis region[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(6): 100-107.  
刘广明, 吕真真, 杨劲松, 等. 典型绿洲区土壤盐分的空间变异特征[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(6): 100-107.
- [17] Nurmemet I, Ghulam A, Tiyip T, *et al.* Monitoring soil salinization in Keriya river basin, northwestern China using passive reflective and active microwave remote sensing data[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(7): 8803-8829.
- [18] Ilyas•Nurmemet, Tashpolat•Tiyip, Ding Jianli, *et al.* Monitoring soil salinization in arid area using PolSAR data and polarimetric decomposition method[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(23): 145-153.  
依力亚斯江•努尔麦麦提, 塔西甫拉提•特依拜, 丁建丽, 等. 基于多种极化分解方法和全极化合成孔径雷达数据的干旱区盐渍化监测[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(23): 145-153.
- [19] Zeng Jiangyuan, Li Zhen, Chen Quan, *et al.* A simplified model of the real part of the soil complex permittivity for soil moisture estimation from SAR image[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2012, 31(6): 556-562.  
曾江源, 李 震, 陈 权, 等. SAR 土壤水分反演中的介电常数实部简化模型[J]. *红外与毫米波学报*, 2012, 31(6): 556-562.

- [20] 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.
- [21] Topp G C, Davis J L, Annan A P. Electromagnetic determination of soil water content: measure in coaxial transmission lines[J]. Water Resource Research, 1980, 16(3): 574-582.
- [22] Dobson M C, Ulaby F T, Hallikainen M T. Microwave dielectric behavior of wet soil - part II: dielectric mixing models[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1985, 23(1): 35-46.
- [23] Wu Yueru. The study for dielectric properties of saline soil and quantitatively inversion of salinity content using microwave remote sensing[D]. Lanzhou: Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 2012.  
吴月茹. 盐渍土介电特性及其含盐量的微波遥感定量反演研究[D]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2012.
- [24] Zhang Fei, Tashpolat•Tiyip, Ding Jianli, *et al.* Relationships between soil salinization and spectra in the delta oasis of Weigan and Kuqa rivers[J]. Research of Environmental Sciences, 2009, 22(2): 227-235.  
张 飞, 塔西甫拉提•特依拜, 丁建丽, 等. 渭干河-库车河三角洲绿洲土壤盐渍化现状特征及其与光谱的关系[J]. 环境科学研究, 2009, 22(2): 227-235.
- [25] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 59-65.
- [26] Chen Siwei, Dai Dahai, Li Dun, *et al.* Constitution and technical advancements of Radarsat-2[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2008, 24(1): 33-36.  
陈思伟, 代大海, 李 盾, 等. Radarsat-2 的系统组成及技术革新分析[J]. 航天电子对抗, 2008, 24(1): 33-36.
- [27] Fung A K, Li Z, Chen K S. Backscattering from a randomly rough dielectric surface[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1992, 30(2): 356-369.
- [28] Wu T D, Chen K S, Shi J C, *et al.* 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.
- [29] Lei Lei, Tashpolat•Tiyip, Ding Jianli, *et al.* Constant characteristic and model verification of saline soil dielectric in arid area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(16): 125-133.  
雷 磊, 塔西甫拉提•特依拜, 丁建丽, 等. 干旱区盐渍土介电常数特性研究与模型验证[J]. 农业工程学报, 2013, 29(16): 125-133.
- [30] Zribi M, Dechambre M. A new empirical model to inverse soil moisture and roughness using two radar configurations[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002: 2223-2225.