

文章编号: 1007-4619(2006)01-0111-07

基于 IEM 模拟的干旱区多时相数据 含水含盐量反演模型及分析

熊文成, 邵 芸

(中国科学院 遥感应用研究所, 北京 100101)

摘 要: 根据干旱区的一些自然地理特征, 利用 IEM 模型生成干旱区的多时相(少雨期、多雨期)后向散射数据, 然后对数据进行统计分析。一方面印证了多雨期与少雨期后向散射差($\sigma_{wet}^0 - \sigma_{dry}^0$)与土壤介电常数高度相关的实验观察; 另外一方面根据大量的模拟数据找到确切的($\sigma_{wet}^0 - \sigma_{dry}^0$)与土壤介电常数的关系。最后对盐渍化干旱区的情况(有的干旱区有严重的盐渍化)进行了探讨, 发现后向散射系数差($\sigma_{wet}^0 - \sigma_{dry}^0$)与大介电常数虚部差成较好的线性关系, 这为反演土壤含盐量提供了一定依据, 但由于介电常数虚部是由含水含盐量两个量决定的, 所以要直接反演出含水含盐量还需要进一步研究。

关键词: IEM; 干旱区; 土壤含水量; 土壤含盐量

中图分类号: TP701 **文献标识码:** A

Applying Multi-temporal Synthetic Aperture Radar (SAR) to Evaluating Soil Water and Salt Content Based on IEM in Arid Areas

XIONG Wen-cheng SHAO Yun

(Laboratory of Remote Sensing Information Sciences, Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract Coupled with physical geographical features in arid areas, multi-temporal backscattering coefficients data (wet and dry seasons) were generated by IEM model. Analyzing these simulated data, we found there is a strong correlation between difference of wet and dry seasons backscattering coefficients ($\sigma_{wet}^0 - \sigma_{dry}^0$) and soil dielectric constant, which is in agreement with the experimental observation in the literature; and then established the relation model between $\sigma_{wet}^0 - \sigma_{dry}^0$ and dielectric constant. This paper also carried out the research about salinization that is common in arid areas and found there is a good correlation between $\sigma_{wet}^0 - \sigma_{dry}^0$ and the large difference of imaginary part of dielectric constant. This result is helpful to retrieve soil salt content if there is a clear understanding about the relation of imaginary part and soil moisture and salt content.

Key words IEM; arid areas; soil water; soil salt

1 引 言

地表参数的反演一直是微波遥感研究的热点, 尤其是土壤水分的反演。在现有文献中, 学者对土壤含

水量的反演进行了多方面的研究, 也创立了很多经验反演模型, 比如 Shi 模型、Dubois 模型、Oh 模型等等。这些模型是根据实测数据, 建立 HH、VV 或者 HV 等多极化数据与地面参数关系。但现在大量的数据是单波段、单极化, 比如 Radarsat-1, ERS, JERS 而这些

收稿日期: 2004-07-20; 修订日期: 2004-12-16

基金项目: 中国科学院创新工程课题名称: 含水含盐土壤介电特性及其应用研究 (CX020020)。

作者简介: 熊文成 (1981—), 男, 江西丰城人, 2002 年毕业于北京大学城市与环境学系, 获理学学士学位, 2005 年于中国科学院遥感应用研究所获地图学与地理信息系统硕士学位。现从事环境生态遥感研究。E-mail: wencheng11@hotmail.com。

数据就很难利用这些方法进行水分反演。

为了克服以上模型的问题,即要利用单极化数据进行水分反演。不少学者结合研究区地理特征进行研究。其中文献 [1-3] 进行过半干旱地区研究,提出多时相单极化雷达数据在半干旱地区反演水分的算法。算法基于 $(\sigma_{wet}^0 - \sigma_{dry}^0)$ 与土壤水分含量高度相关 ($r^2 = 0.93$) 的实验观察事实^[1]。但它们存在以下几个问题:(1)实验地样本有限,不一定具有代表性;(2)而且对于哪种极化方式、哪种角度、干旱少雨期的介电常数的不同对模型结果的影响没有进行进一步的分析;(3)它们都没有考虑大含盐量(介电常数虚部较大)情况,而这种情况在干旱半干旱区域很常见。由于这几点,本文的目的就是:

(1)在不同角度、不同极化、不同粗糙度、不同干旱期土壤含水量条件下,确定多雨期与少雨期后向散射系数之差 $(\sigma_{wet}^0 - \sigma_{dry}^0)$ 与土壤介电常数的关系及其具体表达式。

(2)当干旱区盐渍化程度较严重,分析多雨期与少雨期后向散射系数之差 $(\sigma_{wet}^0 - \sigma_{dry}^0)$ 与土壤介电常数虚部的关系及其反演含盐量的可行性。

为实现以上两个目的,本文结合干旱区的地理特征,利用理论模型 IEM 生成干旱区两个不同时期(多雨期、干旱期)的后向散射系数。通过分析模拟数据的特点,建立起后向散射系数与介电常数的具体表达式。

依据介电常数与土壤水分、盐分的关系模型,就可以将后向散射系数与土壤含水量含盐量结合起来。介电常数与含水量、含盐量关系已经有一定的模型来描述:对于非盐渍化土壤,有 Dobson-Hallikainen-Topp 等模型;对盐渍化土壤,文献 [4] 对此做了一定的探讨,但还不够完善。

正因为不同土壤类型,不同考虑条件具有不同的土壤介电模型,因此本文重点只考虑:建立后向散射系数与土壤介电常数的关系,而并非直接建立与含水量含盐量的关系。

2 IEM 模型及其模拟数据的生成

IEM 模型^[5]是使用较广的一个面散射模型,一方面是由于它有较广的适用范围;另外一方面是它的理论计算值与大量实验数据有较好的一致性。因此借助 IEM 单次散射模型来生成理论模拟数据具有实际意义,这在文献中也很常见。

基于干旱区的这些特性,本文利用 IEM 单次散

射模型模拟多时相(多雨期、少雨期)雷达数据,对干旱区多雨期的含水含盐量反演进行分析探讨。利用 IEM 生成模拟数据是在以下几个前提假设下进行的:

(1)干旱区多雨期和少雨期的土壤介电常数相差较大,雨季介电常数 - 旱季介电常数大于 2, $\epsilon_{wet} - \epsilon_{dry} > 2$ 。这是因为干旱区降水量少而不均,降水量主要集中在一定时期。这样就导致地表含水量有明显的季节性,多雨期的湿润地表和少雨期的干旱地表。

(2)同理,盐渍化区则因为介电常数需要考虑虚部,则有干湿两季的介电常数实部之差和虚部之差都大于 2, $R(\epsilon_{wet}) - R(\epsilon_{dry}) > 2$, $I(\epsilon_{wet}) - I(\epsilon_{dry}) > 2$ 。

(3)干旱区少雨期的土壤介电常数小且相对一致,介电常数标准差为 0。这是因为干旱区的年总降雨量一般小于 300mm,所以在少雨期时的地表往往很干燥,土壤含水量几乎等于 0,这样一定程度上使得干旱期地表含水量小而且均一。

(4)不考虑植被的影响。这是因为干旱区一般都是裸露地表或者具有稀疏植被的地表。

(5)地表粗糙度的相关函数为指数相关函数。这是根据一些实际测量数据文献 [5, 6] 表明指数相关函数较能反映裸露地表的情况。

本文采用的具体输入参数为:

2.1 地表介电常数

非盐渍化区域地表土壤基本不含盐,因此土壤介电常数虚部也很小,所以在这种区域不考虑土壤介电常数虚部;另外多雨期的地表含水量应该是不均一的,故假设其为标准差为 5 的正态分布(表 1)。盐渍化区域地表土壤含盐量高,土壤虚部较大,因此其介电常数假设如表 2。

表 1 非盐渍化干旱区地表介电常数值

Table 1 Dielectric constants in non-salinized areas

地区	季节	介电常数均值	介电常数标准差
干旱地区	少雨期	3.1	0
	多雨期	10	5

表 2 盐渍化干旱区地表介电常数值

Table 2 Dielectric constants in salinized areas

季节	实部		虚部	
	均值	标准差	均值	标准差
旱季	3.1	0	1.0	0
雨季	10	5	15	7

2.2 地表粗糙度参数

粗糙度的两个重要的参数(均方根高度、相关长度)均认为是正态分布;并且由于微波入射角存在一定的不确定性,所以假设入射角也有 1° 的标准差。粗糙度及其入射角输入参数见表 3。

表 3 模拟参数的均值和标准差的设置

Table 3 Mean and standard deviation of selected parameters in the simulation

参数	平均值	标准差
L/cm	6	3
σ /cm	0.6	0.3
θ /($^\circ$)	20	1
θ /($^\circ$)	30	1
θ /($^\circ$)	40	1
θ /($^\circ$)	50	1

2.3 输入频率

由于本文使用的 IEM 模型只是单次散射 IEM 模型,所以这就需要地面较为光滑,或者是波长较短。本文参考文献 [7] 中利用 IEM 模型生成模拟数据时的频率假设,假设入射波频率为 4.77。

3 非盐渍化区域模拟数据结果及其分析

要建立一个合理的水分反演模型,那么模型应

表 4 非盐渍化区模拟数据不同组合的标准偏差

Table 4 Standard deviations of backscattering values for different combinations in non-salinized areas

入射角/($^\circ$)	$\sigma_{vv-wet}^0 - \sigma_{vv-dry}^0$	$\sigma_{hh-wet}^0 - \sigma_{hh-dry}^0$	σ_{vv-wet}^0	σ_{hh-wet}^0	$\sigma_{vv-wet}^0 - \sigma_{hh-wet}^0$
20	0.0276	0.0377	4.8260	4.9038	0.2755
30	0.0400	0.0998	4.8157	5.0004	0.4983
40	0.0541	0.2099	4.5569	4.9379	0.7559
50	0.0817	0.3674	5.0962	5.7604	1.0589

注: $\epsilon_{wet} = 15$, $\epsilon_{dry} = 3.1$, 上表单位为 dB 值。

从表 4 中可以看出, $\sigma_{vv-wet}^0 - \sigma_{vv-dry}^0$, $\sigma_{hh-wet}^0 - \sigma_{hh-dry}^0$ 两者的标准差都是很小的,但都随入射角增大而有所增大。 $\sigma_{vv-wet}^0 - \sigma_{hh-wet}^0$ (就是同极化比,因采用的是 dB 值故为相减)也较小,同样是随角度增大而增大。总的来说,前两者对受粗糙度影响是最小的,因此减少地面粗糙度影响也是最有

效的。该尽力做到两个方面,一方面是减少地面粗糙度的影响,另一方面是增强对水分的敏感性。因此,程序设计也基本围绕这两点来分析。对程序产生的数据进行统计分析主要有:标准差分析、相关性分析。

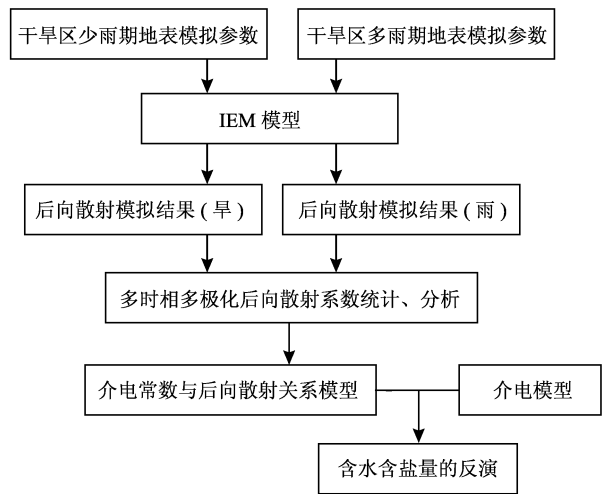


图 1 含水含盐量反演流程图

Fig 1 Procedure of soil water and salt inversion

3.1 标准偏差分析

假设多雨期的介电常数为 15,少雨期土壤介电常数为 3.1 (基本上对应于土壤含水量为零)。粗糙度采用表 3 的值。通过 IEM 分别生成 4000 个点的后向散射系数(HH, VV)数据。对生成的后向散射数据的不同极化、不同时相组合的标准差进行分析。从而确立那种组合能够较好的消除粗糙度的影响。结果见表 4。

效的。

不同时相后向散射系数之差与粗糙度两个重要的参数(均方根高度,相关长度)的关系见图 2。从图中可以看出,在固定其中之一的基础上,不管是均方根高度还是相关长度对不同时相的后向散射系数之差影响都很小。

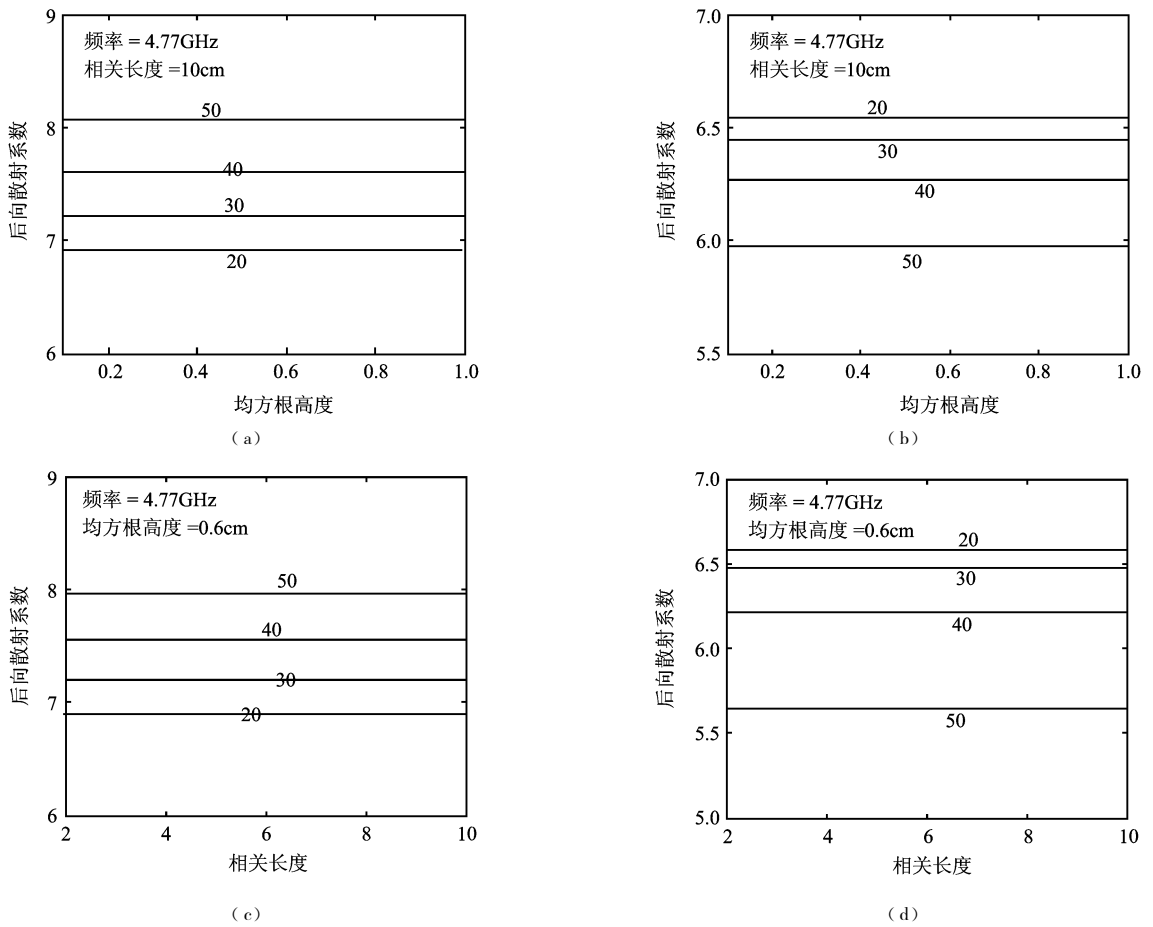


图 2 后向散射系数差与粗糙度的关系

(a) $(\sigma_{vv-wet}^0 - \sigma_{vv-dry}^0)$ 与相关长度的关系; (b) $(\sigma_{hh-wet}^0 - \sigma_{hh-dry}^0)$ 与相关长度的关系; (c) $(\sigma_{vv-wet}^0 - \sigma_{vv-dry}^0)$ 与均方根高度的关系; (d) $(\sigma_{hh-wet}^0 - \sigma_{hh-dry}^0)$ 与均方根高度的关系。各图的介电常数值为: $\epsilon_{wet} = 15, \epsilon_{dry} = 3.1$

Fig 2 Relation of backscattering coefficients to ground surface roughness dependence of backscattering coefficient

(a) $(\sigma_{vv-wet}^0 - \sigma_{vv-dry}^0)$ on rms surface height (b) $(\sigma_{hh-wet}^0 - \sigma_{hh-dry}^0)$ on rms surface height (c) $(\sigma_{vv-wet}^0 - \sigma_{vv-dry}^0)$ on correlation length; (d) $(\sigma_{hh-wet}^0 - \sigma_{hh-dry}^0)$ on correlation length All plots are at $\epsilon_{wet} = 15, \epsilon_{dry} = 3.1$

3.2 相关性分析

以表 1,表 3 为地表输入参数,通过 IEM 分别生成 4000 个点的后向散射系数的数据。对生成的后

向散射数据进行不同极化、不同时相(旱季、雨季)的组合,分析其与地表介电常数的相关关系。从而确立哪种组合能够和介电常数有最大的相关性。

从表 5 可以看出 $\sigma_{vv-wet}^0 - \sigma_{vv-dry}^0$ 与 $\epsilon_{wet} - \epsilon_{dry}$ 的

表 5 非盐渍化区模拟数据不同组合的相关性

Table 5 Correlation coefficients between dielectric constants and backscattering coefficients of different combinations in non-salinized areas

入射角 / (°)	$\sigma_{vv-wet}^0 - \sigma_{vv-dry}^0$	$\sigma_{hh-wet}^0 - \sigma_{hh-dry}^0$	σ_{vv-wet}^0	σ_{hh-wet}^0	$\sigma_{vv-wet}^0 - \sigma_{hh-wet}^0$
20	0.9374	0.9353	0.2729	0.2490	0.3038
30	0.9339	0.9267	0.2688	0.2219	0.3260
40	0.9408	0.9200	0.3001	0.2192	0.3881
50	0.9419	0.8782	0.3185	0.2080	0.4646

注:前两个是与 $\epsilon_{wet} - \epsilon_{dry}$ 的相关性计算;后四个是与 ϵ_{wet} 的相关性计算。上表所有值为 dB。

相关性基本不受角度影响,都大于 0.93; $\sigma_{hh-wet}^0 - \sigma_{hh-dry}^0$ 随角度的增大而与 $\epsilon_{wet} - \epsilon_{dry}$ 的相关性在下降,但都大于 0.85。

从标准差和相关性分析的结果而言,不同时相的同极化后向散射系数之差能有效地减小粗糙度的影响并且与水分含量高度相关。

4 非盐渍化区多时相数据水分反演模型

通过上面的数据分析,具有明显早湿两季的干旱区, $\epsilon_{wet} - \epsilon_{dry}$ 与 $\sigma_{pp-wet}^0 - \sigma_{pp-dry}^0$ 有较高的相关性。找出两者的关系,并充分考虑角度、 ϵ_{dry} 的不同对关系表达式的影响;得到统一的水分反演的模型公式。

其表达式为:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{vv-wet}^0 - \sigma_{vv-dry}^0 &= \gamma_{vv} \lambda_1 C_{vv-1} \ln(\epsilon - \epsilon_{dry}) + \lambda_2 C_{vv-2} \\ \sigma_{hh-wet}^0 - \sigma_{hh-dry}^0 &= \gamma_{hh} \lambda_1 C_{hh-1} \ln(\epsilon - \epsilon_{dry}) + \lambda_2 C_{hh-2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\gamma_{vv} = \left[\frac{\sin(\theta)}{\sin(i)} \right]^n; \gamma_{hh} = 1/\gamma_{vv}; n = \frac{1}{10 - \theta/10}; C_{vv-1} = 2.1561; C_{vv-2} = 1.5584; C_{hh-1} = 2.0089; C_{hh-2} = 1.5561; \lambda_1 = 1.165^{\epsilon_{dry}-3}; \lambda_2 = 2.6^{\epsilon_{dry}-3}; \theta \text{ 为入射角; } i=20^\circ; \lambda_1, \lambda_2 \text{ 就是介电补偿系数。}$$

公式 (1) 是最终的多时相单极化方法水分反演的理论公式。模型结果效果如图 3 所示,总的效果 VV 极化要好于 HH 极化。这主要是由于 VV 极化比 HH 极化收敛度高,与介电常数之差的相关性也更高的缘故。

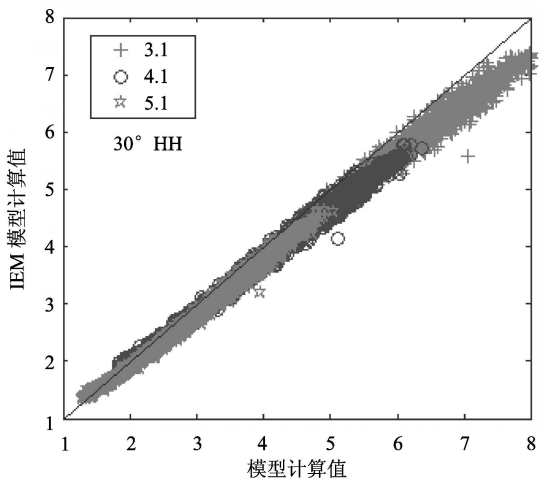
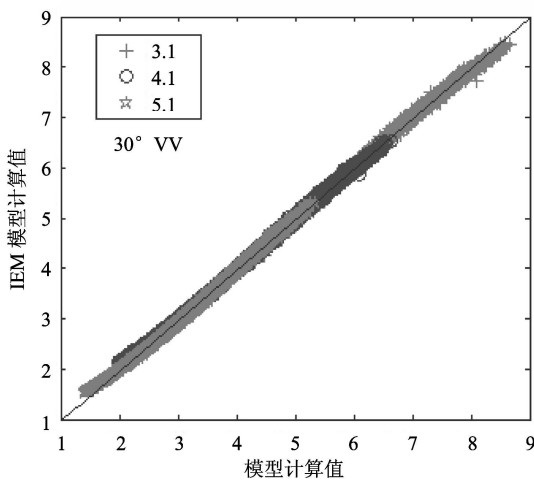


图 3 IEM 与模型计算值的对照

Fig 3 Comparison between IEM and the inversion model (1)

根据公式 (1), 少雨期介电常数对反演模型有一定影响 (图 4)。同时,从图 4 中也可看出:当土壤含水量足够大的时候,早期的介电常数对反演模型影响较小。这就使得即使对干旱期土壤状况了解不多的情况下,也可以进行雨期土壤含水量的反演。这个结论与 Moran 等^[2]的结论一致。

为进一步对建立起的模型进行验证,我们利用 Le Toan 1982 年测定的实验数据与模型反演值作对比。实验数据测定的条件是:频率为 4.5GHz 极化为 VV;入射角为 20°;土壤粗糙度均方根高度为 1.2cm。结果 (表 6) 表明反演值与实测值较为一致。

表 6 模型反演值与实测值的对比

Table 6 Comparison between measured values and the inversion results

测得的后向散射系数	$\sigma_{wet}^0 - \sigma_{dry}^0$	测得的土壤含水量	反演的土壤含水量
-9.5		0.01	
-3.9	5.6	0.2	0.1824
-3.4	6.1	0.22	0.2129
-3.2	6.3	0.28	0.23

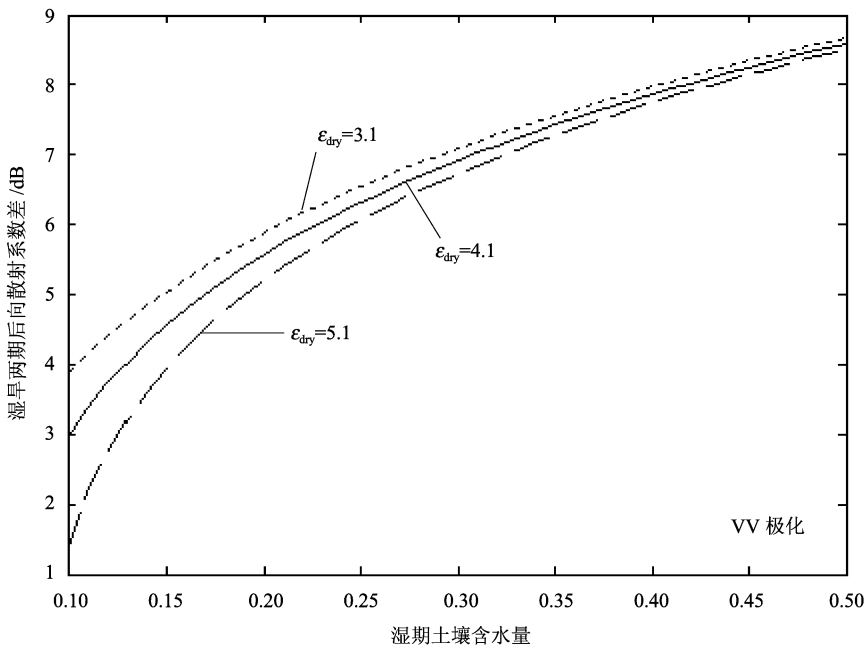


图 4 不同干早期土壤介电常数对模型的影响

Fig 4 Effects of different on the model

5 盐渍化干旱区盐分反演可行性分析

干旱区的盐渍化是一种常见的情况,在这种情况下,土壤介电常数虚部可能很大,对后向散射系数的影响也很大^[8]。以下主要分析利用多时相数据反演介电常数虚部(盐分)的可能性。

利用表 2 和表 3 的数据作为 IEM 模型地表输入参数,生成不同时相和不同极化(HH, VV)4000 组数据。分别对后向散射系数之差与介电常数实部和虚部做相关性分析。具体见表 7。表 7 显示 $I(\epsilon_{wet}) - I(\epsilon_{dry})$ 与 $\sigma_{pp-wet}^0 - \sigma_{pp-dry}^0$ 的相关性还是比较高的,这与以前的研究^[2]是一致的。

表 7 盐渍化区模拟数据不同组合的相关性

Table 7 Correlation coefficients between dielectric constants and backscattering coefficients of different combinations in salinized areas

入射角 / (°)	$\sigma_{vv-wet}^0 - \sigma_{vv-dry}^0$	$\sigma_{hh-wet}^0 - \sigma_{hh-dry}^0$	$\sigma_{vv-wet}^0 - \sigma_{vv-dry}^0$	$\sigma_{hh-wet}^0 - \sigma_{hh-dry}^0$
20	0.1739	0.1679	0.9005	0.8974
30	0.2329	0.2139	0.8953	0.8832
40	0.1994	0.1564	0.9013	0.8503
50	0.2145	0.1349	0.8974	0.7404

注:前两者是与 $R(\epsilon_{wet}) - R(\epsilon_{dry})$ 的相关性,后两者是与 $I(\epsilon_{wet}) - I(\epsilon_{dry})$ 的相关性。

图 5 描述了后向散射系数之差与介电常数虚部之间的关系。从图 5 可以看出当 $I(\epsilon_{wet}) - I(\epsilon_{dry})$ 较小时,后向散射系数差 ($\sigma_{pp-wet}^0 - \sigma_{pp-dry}^0$) 很发散,随着 $I(\epsilon_{wet}) - I(\epsilon_{dry})$ 的增大 $\ln[I(\epsilon_{wet}) - I(\epsilon_{dry})] > 2$,也就是 $I(\epsilon_{wet}) - I(\epsilon_{dry}) > 7.4$,数据点比较收敛。这是因为 $I(\epsilon_{wet}) - I(\epsilon_{dry})$ 小的时候, $R(\epsilon_{wet}) -$

$R(\epsilon_{dry})$ 较大程度地影响 $\sigma_{wet} - \sigma_{dry}$, 而 $I(\epsilon_{wet}) - I(\epsilon_{dry})$ 增大, $R(\epsilon_{wet}) - R(\epsilon_{dry})$ 的影响相对而言就很小了。由表 6 也能看出, $\sigma_{pp-wet}^0 - \sigma_{pp-dry}^0$ 与 $\ln[I(\epsilon_{wet}) - I(\epsilon_{dry})]$ 关系的相关性还是很高,一般 > 0.8 ,这主要是因为表 3 的介电常数假设前提下,模拟点的 $I(\epsilon_{wet}) - I(\epsilon_{dry})$ 值都比较大,这使得

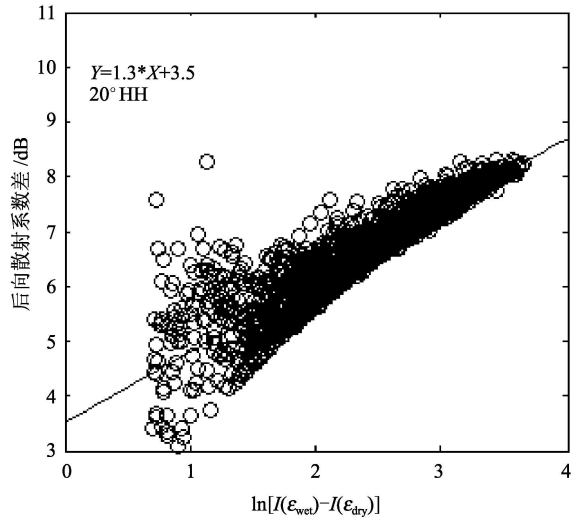
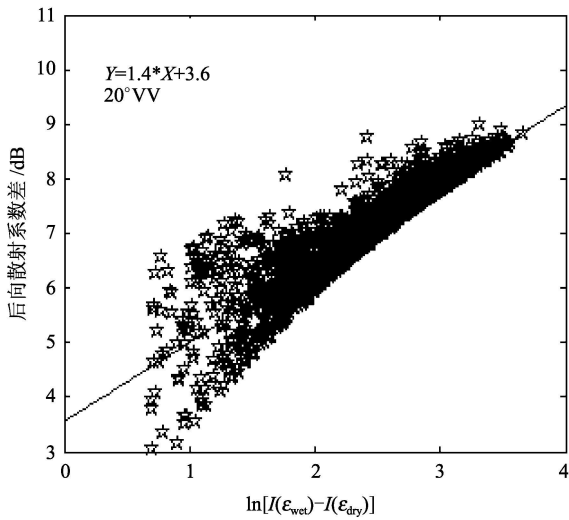


图 5 $\sigma_{pp-wet}^0 - \sigma_{pp-dry}^0$ 与 $\ln[I(\epsilon_{wet}) - I(\epsilon_{dry})]$ 的关系

Fig 5 Relation of $\sigma_{pp-wet}^0 - \sigma_{pp-dry}^0$ and $\ln[I(\epsilon_{wet}) - I(\epsilon_{dry})]$

大多数点都具有好的收敛性。由于盐渍化土壤的介电常数虚部一般比较大(典型的盐湖区 7—20, C 波段),所以,在一定精度范围内,通过多时相数据反演土壤的含盐量(虚部)是有可能的。

6 结论与讨论

通过对干旱区自然地理特征的理解和 IEM 模拟数据的分析,本文得到的主要结论有:

(1)在非盐渍化旱湿两季明显的干旱区,多时相单极化数据介电常数是可行的。结合土壤介电模型就可以反演水分。

(2)在盐渍化旱湿两季明显的干旱区,利用多时相数据,在一定精度要求下,反演土壤介电常数虚部是有可能的。但由于虚部一般受土壤含水量、含盐量两者的影响^[4],要反演出含盐量还需要进一步的工作。

(3)雷达入射角越小,后向散射之差越不受粗糙度参数(均方根高度、相关长度)的影响,数据的线性关系越强,离散度也越小。

(4)从数据的收敛度和相关性方面来说, VV 极化相对于 HH 极化,在反演水分时效果要好。

(5)介电常数之差与后向散射系数之差具有较好的对数关系。

参考文献 (References)

- [1] Sano E E, Moran M S, Huete A R, et al. C-band and Multiangle Ku-band Synthetic Aperture Radar Data for Bare Soil Moisture Estimation in Agricultural Areas [J]. Remote Sensing of Environment 1998, 64: 77—90.
- [2] Moran M S, Hymer D C, Qi J, et al. Soil Moisture Evaluation Using Multi-temporal Synthetic Aperture Radar (SAR) in Semi-arid Rangeland [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, (105): 69—80.
- [3] Wang C Z, Qi J G, Susan Moran, Robin Marslett. Soil Moisture Estimation in a Semi-arid Rangeland Using ERS-2 and TM Imagery [J]. Remote Sensing of Environment 2004, (90): 178—189.
- [4] Xiong W C, Shao Y. Models for Imaginary Part of Dielectric Constant of Moisture and Salt Soil [A]. IGRASS [C]. 2004.
- [5] Fung A K, Lee Z, Chen K S. Backscatter from a Randomly Rough Dielectric Surface [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1992, 30(2): 356—369.
- [6] Oh Y, Sarabandi K, Ulaby F T. An Empirical Model and an Inversion Technique for Radar Scattering from Bare Soil Surfaces [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1992, 30(2): 370—381.
- [7] Chen K S, Yen S K, Huang W P. A Simple Model for Retrieving Bare Soil Moisture from Radar Scattering Coefficients [J]. Remote Sensing of Environment 1995, 54: 121—126.
- [8] Shao Y, Hu Q R, Guo H D, et al. Effect of Dielectric Properties of Moist Salinized Soils on Backscattering Coefficients Extracted from RADARSAT Image [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 2003, 41(8): 1879—1888.