

文章编号: 1007-4619 (2002) 06-0416-08

# 含水含盐土壤的微波介电特性分析研究

邵芸, 吕远, 董庆, 韩春明

(中国科学院遥感应用研究所遥感信息科学重点实验室, 北京 100101)

**摘要:** 用微波网络分析仪测量了实验室制备的各种不同含水量, 含盐量的土壤样品的复介电常数, 研究了介电常数的实部和虚部与频率、盐度、含水量的关系。研究表明: 频率、盐度对土壤介电常数实部的影响很小; 对于某一特定土壤, 其介电常数的实部由土壤的含水量决定; 在较低频率范围内 ( $f < 2\text{GHz}$ ), 虚部随着频率的增大而迅速下降, 高频部分则趋向于一定值, 波长较长的波段, 如 P 波段或 L 波段对土壤含盐程度具有更高的敏感性, 含盐量对虚部在较低频范围 ( $f < 5\text{GHz}$ ) 影响很大。同时, 采集了内蒙古吉兰泰盐湖区的土壤样品, 并测量了其复介电常数, 与同步过顶的 RADARSAT 图像进行了相关分析。分析结果表明雷达图像记录的后向散射强度与含盐土壤复介电常数实部的相关系数为 0.23, 与虚部的相关系数为 0.66, 即雷达图像观测的含盐含水土壤的后向散射强度与土壤的含盐量相关性较高。这为利用微波遥感进行土壤盐碱化程度监测, 提供了可能和实验依据。

**关键词:** 土壤盐度; 介电常数; 微波遥感

**中图分类号:** TP722.6      **文献标识码:** A

## 1 引言

物质的电学性质影响其与电磁波能量的相互作用, 这种特性一般以复介电常数表示。地球表面上大部分无水分物质(如干燥的土壤和岩石等)的介电常数, 一般介于 1.7—6 之间; 水的介电常数一般认为是 81。岩石和土壤的介电常数与其含水量几乎成线性关系增长, 并且与水的介电常数特性相同。所以天然材料的电学特性的变化, 一般是由于含水量的变化所致。对于土壤含水量和介电常数之间的关系, 国内外进行了详细研究, 如 Martti T. Hallikainen 等人用波导管技术和天线技术测量了不同含水量下的土壤微波介电常数, 得到了介电常数随土壤的体含水量的增加而增大的关系, 并和土壤的温度、粒度有关系<sup>[1]</sup>。James R. Wang 等人给出了土壤复介电常数和含水量的经验模型<sup>[2]</sup>。Neil R. 等人对模型进行了修正<sup>[3]</sup>。土壤湿度的研究和探测一直是微波遥感的研究重点之一。但是, 对含水含盐

土壤的介电特性实验观测和研究很少, 对利用微波遥感进行含水含盐土壤探测, 进而监测土壤盐碱化程度的可能性探索的有关报道更少。土壤盐碱化是目前世界上面临的一个严重问题, 是造成土地退化, 土壤沙化的重要原因之一, 特别是干旱地区的泛灌, 造成了大量可耕地的盐碱化。监测土壤盐碱化的范围和程度对于农业生产和生态环境保护具有重要价值。全世界现有盐碱地面积近 10 亿  $\text{hm}^2$ 。中国的盐渍土主要分布在东北松辽平原, 江苏与山东的沿海地区, 以及新疆、甘肃、青海、内蒙古和宁夏等地。利用遥感方法查明盐渍土的分布和特性, 有利于加速盐渍土壤的改良和利用。在旱季泛盐季节, 盐渍土表层结盐壳或盐皮, 地表光滑, 坚实而发白, 其光谱反射率要比其他土壤强, 不论是可见光还是近红外波段, 盐渍土在遥感影像上色调都比其他土壤淡。20 世纪 80 年代, 有报道使用可见光, 近红外波段监测土壤盐碱化。但是, 此方法有一定的局限性: (1) 在海岸、沙地等区域, 由于沙子和土壤表面析出的盐粒极为接近, 很难从图像上加以区分。(2) 在较为湿

收稿日期: 2002-04-01; 修订日期: 2002-06-08

基金项目: 中国科学院知识创新工程“数字地球基础理论研究”(KZCX2-312)、国家自然科学基金重点项目(49989001)及国家 863 计划(2001AA132040)资助项目。

作者简介: 邵芸(1961—), 女, 博士, 中国科学院遥感应用研究所遥感信息科学重点实验室常务副主任, 研究员, 博士生导师。1986 年毕业于北京大学。主要从事雷达遥感应用基础研究及数字地球基础理论研究。已在国内外公开发表论文 70 余篇, 出版专著 5 部。

润地区,土壤中的盐溶液还没有达到饱和析出,可见光、近红外波段便很难识别。(3)在一些排水不畅通或土壤质地比较粘重的地段,会发生苏打或镁盐的积累。如含有氯化镁的盐土易潮解,某些碱化土壤能发生有机质胶洗作用,常把土体表面染成黑褐色,光谱的反射能力低,和正常情况正好相反,对从光学影像区分盐渍化土壤造成了障碍。

由于以上问题的存在,需要发展一种更为有效的土壤盐碱化监测手段。土壤中含水量的变化影响介电常数的实部,水溶液中含盐量的变化影响土壤的导电性,即介电常数的虚部,而介电常数的变化直接影响雷达图像记录的目标物的后向散射系数。这为微波遥感探测土壤表层的含水量和土壤溶液中的含盐量提供了可能,而其关键则是如何从遥感数据中分离出所需要的信息。Thomas J. Jackson 等人通过野外实验(L、C波段),发现在一特定的体含水量下,增加盐度会降低土壤的发射率<sup>[4]</sup>。K. Sreenivas 等人研究了盐度对土壤介电特性的影响<sup>[5-8]</sup>。本研究的目的如下:(1)在实验室(0.2—18GHz)测量了各种不同含水含盐量的土壤样品,以了解土壤介电常数随微波电磁波频率变化的关系;(2)研究土壤介电常数的虚部随着土壤盐分变化的规律;(3)利用同时过境的雷达卫星图像,分析了图像记录的后向散射强度与土壤盐分、介电常数的相关关系。

## 2 吉兰泰地区盐碱化土壤样品的测量

在内蒙古荒漠平原地区、盐碱化土壤分布广泛,多位于洪积扇扇缘、干涸三角洲中下部、大型三角洲边缘、现代冲积平原的河滩地、湖滨平原上,地下水埋深1—3m,矿化度5—30g/L或更高,蒸发形成白色盐结皮或盐结壳,典型草甸盐土通常有3—5cm的盐结壳,含盐量50%以上;0—30cm土层含盐5%—15%。矿质盐土分布于湖泊平原上,表层为厚达15cm的盐壳,起伏不平,0—30cm土层含盐量20%以上。

## 3 微波介电常数测量

### 3.1 仪器的校准

本实验使用同轴开路探头技术:用一个同轴探

头插入被测物质并和被测物质(本实验为土壤)紧密接触,微波矢量网络分析仪(HP8510C)记录下反射系数 $S_{11}$ (幅度和相位),用于计算被测物质的复介电常数。探头与样品之间的作用可以简化为等效电路模型。测量前,用一些已知介电常数的物质校准,本实验采用(1)良导体(短路);(2)空气(开路);(3)去离子水,并用无水乙醇验证,得出系统误差在5%以内。

### 3.2 样品的制备

自然界中土壤的成分极为复杂,其中盐分主要为钠盐和钾盐,因为对土壤导电性起决定性影响的是离子的浓度,本实验中为简化起见,只加入NaCl,忽略不同离子的影响。将采集的土壤充分粉碎,分装入样品盒内放置在105℃的干燥箱中36h除去水分。配置各种浓度的NaCl溶液,0.5%,1%,2%,5%,10%,20%,和NaCl饱和溶液,然后把某一浓度(例如:0.5%)的盐溶液加入事先制备好的干燥土壤样品中配制成6个不同体含水量的含水含盐土壤样品,其体含水量分别为5%,10%,20%,30%,40%,50%(体含水量 $m_v$ 的定义为: $m_v = V_{水}/V_{土}$ ),然后同样方法制备含1%,2%,5%,10%,和饱和NaCl的不同体含水量(5%,10%,20%,30%,40%,50%)的含盐土壤样品。将制备好的样品密封后放置48h,以便让溶液和土壤充分混合,每个土壤样品测量3次复介电常数。关于实验中所用的土壤样品的物理性质见表1。

## 4 实验结果和讨论

### 4.1 介电常数的实部与土壤的体含水量、频率的关系

土壤介电常数的实部 $\epsilon'$ 在0.2—18GHz的范围内,随频率的增加缓慢减少;土壤溶液中的水分对 $\epsilon'$ 影响很大,随着体含水量 $m_v$ 的增加快速增大;如L波段

( $f = 1.25\text{GHz}$ )  $m_v = 5\%$ 时,

$\epsilon' = 2.5—4.5$ ;  $m_v = 10\%$ ,  $\epsilon' = 5.0—7.0$ ;

$m_v = 40\%$ ,  $\epsilon' = 20—28$ ;  $m_v = 50\%$ ,  $\epsilon' = 23—34$ 。

土壤溶液中的盐分对介电常数的实部的影响很小,特别是在含水量较少的土壤中,如 $m_v = 5\%$ 时,几条曲线几乎重合在一起, $m_v = 10\%$ 时曲线也很接近, $\epsilon'$ 相差小于2。

表 1 实验中所用土壤样品的物理性质

Table 1 Physical properties of the soil sample

PH	沙/%	沙土/%	粘土/%	密度	Ecp(ds/m)	温度/℃
7.64	32.4	52.9	14.7	1.16	0.3	25

土壤粒度的标准采用美国农业部标准,即:沙:0.05—2.0mm,沙土:0.002—0.05mm;粘土 0.002mm 以下,以上结果是委托中国科学院地理科学与资源研究所测量所得。

#### 4.2 介电常数的虚部与土壤的体含水量、频率的关系

土壤介电常数的虚部  $\epsilon''$  在频率较低的区域 ( $f < 2\text{GHz}$ ) 变化特别大;当频率升高时迅速减少,在较高频率范围内,曲线趋于平缓;例如:当  $m_v = 20\%$ , NaCl 浓度为 10% 时,  $f = 1.0\text{GHz}$ ,  $\epsilon'' = 33.6$ ;当  $f$  升高到 3.0GHz,  $\epsilon''$  迅速下降到 13.4,  $f$  从 3.0GHz 到 18GHz 的频率范围内,  $\epsilon''$  仅缓慢下降了 7.8。同样,在较低频率时,土壤溶液中的盐度对介电常数的虚部影响很大,在相同频率、体含水量条件下,盐度越大,介电常数的虚部越大,例如  $f = 1.25\text{GHz}$ ,  $m_v = 30\%$ ,  $\epsilon_a'' = 3.9$ ,  $\epsilon_b'' = 5.3$ ,  $\epsilon_c'' = 7.1$ ,  $\epsilon_d'' = 10.6$ ,  $\epsilon_e'' = 21.5$ ,  $\epsilon_f'' = 36.2$ ,  $\epsilon_g'' = 49.9$ ,  $\epsilon_h'' = 55$  (含盐量分别为 0.5%, 1%, 2%, 5%, 10%, 20%)。在较高频率时,土壤溶液中的盐度对介电常数的虚部影响很小。

#### 4.3 L 波段 ( $f = 1.25\text{GHz}$ ) 土壤的介电常数和体含水量的关系

在 L 波段,介电常数的实部很大程度上决定于土壤的含水量,当含水量增加时,实部随之逐渐增大,几乎不受土壤溶液中的盐度影响;虚部同时随含

水量和盐度的增大而增大,在给定的土壤含水量的情况下,介电常数的虚部随盐度的增加而增大。

## 5 吉兰泰盐湖雷达图像研究

选用吉兰泰盐湖作为实验区。选取此实验区的理由是:(1)盐湖的化学成分比较单一,主要为 NaCl 和  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,易于分析和比较。(2)盐湖的盐土含盐量分布较其他类型盐土简单,从盐湖湖心至古湖岸线逐渐降低,可在一个有限小的区域内,观察各种含盐量的盐土性质。(3)盐湖地区植被稀少,可以减小植被对雷达图像的影响(4)盐湖地区地势极其平坦,可以忽略地表粗糙度对雷达图像的影响。

### 5.1 吉兰泰盐湖土壤样品分析

吉兰泰盐湖位于内蒙古自治区阿拉善左旗吉兰泰镇。地理坐标:东经  $105^\circ 42'$ ,北纬  $39^\circ 20'$ 。盐湖面积约为  $120\text{km}^2$ ,湖盐沉积面积约为  $60\text{km}^2$ 。无湖表卤水,晶间卤水属于硫酸盐型硫酸镁亚型盐湖。其成分见表 2。

表 2 吉兰泰盐湖晶间卤水成分

Table 2 Components of intercrystalline bittern in Jilantai Salt Lake

Ca	K	Mg	Na	Cl	SO <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub>	C <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ti
532.4	1276	4716	80380	191100	8430	65.57	-	10.95	$7.2 \times 10^{-3}$
Br	I	Fe	Th	F	As	Hg	Sr	Si	Sn
10	2.43	0.408	$4 \times 10^{-3}$	0.99	-	< 0.25	10	0.63	$4.6 \times 10^{-3}$
Se	Mn	Al	U	Pb	PO <sub>4</sub>	Cr	Ni	Mo	V
-	4.0	0.234	$8 \times 10^{-3}$	$4 \times 10^{-3}$	0.07	0.017	0.01	-	$2.4 \times 10^{-3}$
Li	Cu	Ag	Zn	Ga	Rb	Cs	比重	pH	矿化度
2	0.031	0.044	$8.5 \times 10^{-3}$	-	0.1	0.2	1.202	6.71	286519

吉兰泰盐湖的古盐沉积呈层状,一般厚度 3—4m,最大厚度为 5.9m;芒硝呈层状或透明状,厚度 1m。储量为:石盐 8248.687 万 t;芒硝 942.268 万 t;卤水 1467.384 万 t。

2001 年 4 月,从盐湖的湖心沿湖的剖面(到湖岸)采集了盐土的样品,密封后在实验室测得土壤的各参数,如介电常数、含盐量、含水量等,结果见表 3、表 4。

表 3 样品化学成分

Table 3 The chemical composition of the soil samples

编号	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> /%	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /%	Cl <sup>-</sup> /%	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /%	Ca <sup>2+</sup> /%	Mg <sup>2+</sup> /%	K <sup>+</sup> + Na <sup>+</sup> /%	总盐 /%
01	-	0.0184	4.468	1.732	0.929	0.153	2.370	9.670
02	-	0.0198	5.141	1.959	0.9504	0.2203	2.762	11.053
03	-	0.0162	5.653	0.5184	0.3456	0.1944	6.568	13.296
04	-	0.0184	3.749	2.4365	1.2398	0.2618	1.676	9.328
05	-	0.0242	4.866	2.2913	1.1232	0.2385	2.211	11.054
06	-	0.0162	3.998	1.9803	0.9115	0.3344	1.856	9.096
07	-	0.0206	4.128	2.3846	1.0411	0.2255	2.196	9.996
08	-	0.0191	4.840	1.7833	0.7805	0.2955	2.616	10.262
09	-	0.0213	4.628	2.4987	1.1059	0.2514	2.450	10.955
10	-	0.0198	4.020	2.0218	1.0541	0.2592	1.872	9.247
11	-	0.0206	4.945	2.6024	1.0238	0.3707	2.571	11.534
12	-	0.0162	3.821	1.7522	0.8899	0.2955	1.732	8.507
13	-	0.0162	3.616	2.3224	0.9418	0.2540	1.891	9.041
14	-	0.0191	3.674	1.5759	1.2960	0.0156	1.623	8.204
15	-	0.0261	4.419	2.3121	0.9374	0.6221	2.185	10.496
16	-	0.0206	4.448	1.8144	0.6178	0.3940	2.294	9.589
17	-	0.0162	2.227	2.0321	0.8208	0.0933	1.300	6.489
18	-	0.0220	3.070	2.6749	0.8208	0.0933	1.300	6.489
19	-	0.0198	3.988	2.0736	0.7560	0.3888	1.970	9.196
20	-	0.0169	4.367	2.7579	0.8078	0.3940	2.473	10.817
21	-	0.0220	3.926	0.9331	0.2549	0.1737	2.373	7.683
22	-	0.0198	2.544	1.0144	0.5486	0.1374	1.631	5.895
23	-	0.0176	2.135	0.1814	0.0918	0.0032	1.365	3.794
24	-	0.2937	1.371	9.616	3.726	0.1166	1.0988	16.223
25	-	0.0146	2.466	0.9072	0.0918	0.0065	1.901	5.387
26	-	0.0220	1.653	0.0130	0.0648	0.0454	0.9243	2.723
27	-	0.0176	2.359	0.5962	0.1620	0.0259	0.936	3.094
28	-	0.0147	1.359	0.5962	0.1620	0.0259	0.936	3.094
29	-	0.0411	1.584	0.1426	0.0756	0.0292	0.9672	2.839
30	0.018	0.0448	0.927	0.0130	0.0540	0.0648	0.4511	1.573
31	-	0.1762	0.057	0.1089	0.0281	0.0110	0.1022	0.4836
32	0.029	0.2386	0.115	0.0648	0.0184	0.0091	0.1798	0.6555
33	-	0.0147	1.694	1.4256	0.2538	0.0259	1.445	4.859
34	0.018	0.2569	0.563	0.0207	0.0464	0.0084	0.4161	1.330
35	-	0.0147	2.429	6.156	2.5002	0.4244	0.840	12.364
36	-	0.8106	0.489	1.2830	0.2538	0.1102	0.4325	3.380
37	0.025	0.3561	0.113	0.2125	0.0216	0.0091	0.2868	1.025
38	0.004	0.0685	0.030	0.0035	0.0108	0.0035	0.0317	0.153
39	0.012	0.1780	0.111	0.0173	0.0072	0.0069	0.1353	0.4678
40	0.043	0.4845	0.145	0.0492	0.108	0.0752	0.0654	0.9706
41	0.003	0.0741	0.024	0.0510	0.0072	0.0123	0.0389	0.2116

表 4 样品的物理性质

Table 4 The physical properties analysis of the samples

编号	含水量 /%	体密度/(g/cm <sup>3</sup> )	粘土 /%	沙土 /%	沙子 /%	洗失量 /%	ε'	ε''	导电率 1:25
01	21.32	0.339	22.2	65.9	11.9	24.0	17.656	24.853	6.78
02	27.08	0.393	26.1	50.6	23.3	25.8	18.108	26.902	7.97
03	28.56	0.410	13.9	66.7	20.2	27.1	18.913	28.408	7.61
04	22.82	0.312	26.3	48.0	25.7	27.1	18.664	22.550	6.24
05	26.06	0.360	36.2	56.4	7.4	28.2	18.761	22.371	7.58
06	25.62	0.358	28.6	57.7	13.7	28.1	19.069	25.050	6.70
07	20.59	0.316	24.7	68.8	6.5	28.3	19.152	23.994	6.71
08	21.12	0.316	38.8	56.0	5.2	28.6	19.655	26.264	7.14
09	24.58	0.351	17.3	68.8	3.9	27.3	20.135	27.258	7.26
10	22.12	0.344	9.3	74.1	16.6	27.4	18.330	24.804	6.61
11	23.67	0.348	19.0	69.8	11.2	29.9	18.375	25.763	7.68
12	15.87	0.269	7.6	70.9	21.5	26.7	17.055	18.555	6.09
13	20.30	0.314	7.2	60.3	32.5	22.9	18.178	23.365	5.92
14	22.06	0.325	10.0	65.7	24.3	25.0	17.481	23.490	6.31
15	27.08	0.378	7.7	75.8	16.5	24.2	18.655	25.004	7.08
16	26.46	0.387	6.3	60.0	33.7	21.2	18.598	23.814	6.76
17	12.82	0.186	11.2	51.8	37.0	17.0	11.683	10.778	4.30
18	20.90	0.296	4.7	74.2	21.1	22.8	16.971	18.801	4.30
19	29.29	0.415	7.4	71.5	21.1	27.7	19.089	23.668	6.68
20	30.20	0.421	6.4	72.3	21.3	24.0	21.041	27.864	6.94
21	29.41	0.415	11.5	70.9	17.6	19.5	20.657	26.062	5.76
22	17.26	0.292	10.9	68.7	20.4	21.4	18.728	20.370	4.41
23	22.26	0.338	8.5	71.5	20.0	17.4	19.120	18.713	3.03
24	19.01	0.284	7.0	64.2	28.8	22.8	16.292	13.582	5.23
25	25.28	0.381	9.2	69.2	21.6	16.9	19.540	20.775	4.00
26	28.07	0.356	19.6	71.1	9.3	16.2	19.540	20.775	4.00
27	20.60	0.317	14.6	70.5	15.1	27.7	18.116	20.258	2.27
28	23.23	0.340	10.3	63.6	26.1	14.7	21.982	17.366	2.27
29	30.08	0.367	11.6	68.6	19.8	24.5	23.508	18.168	2.55
30	32.47	0.413	14.1	69.5	16.4	17.9	26.243	15.154	2.08
31	30.47	0.430	9.9	70.7	19.4	18.0	25.414	8.272	357
32	24.48	0.325	4.8	52.5	42.7	16.2	24.159	8.675	354
33	19.36	0.324	6.9	66.4	26.7	16.5	18.958	18.928	3.29
34	11.15	0.185	3.6	15.5	80.9	8.3	8.625	4.611	12.12
35	32.04	0.419	4.7	66.6	28.7	27.9	25.005	25.093	6.25
36	34.17	0.474	8.9	59.3	31.8	18.6	23.091	13.101	2.00
37	15.95	0.257	8.2	36.5	55.3	14.0	17.258	5.559	370
38	14.00	0.227	1.6	13.6	84.8	3.2	8.810	2.014	83.4
39	11.99	0.182	2.0	11.9	86.1	6.9	10.475	3.294	316
40	17.72	0.298	8.4	47.2	44.4	12.9	19.646	6.695	432
41	13.02	0.199	0.8	8.6	90.6	10.6	6.834	1.722	74.6

从表 3 盐土的化学成分分析,我们可以看出:从湖心到湖岸,土壤中的  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  含量逐渐减少;  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  (相关系数为 0.9) 含量逐渐增多。可以看出盐湖盐分沉积的规律:溶解度最小的  $\text{CaCO}_3$  最先沉淀,然后依次是石膏、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 、 $\text{NaCl}$ 、 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 。总的含盐量由湖心到湖岸逐渐减少,从 11% 减少到 0.1%。

从表 4 盐土的物理性质分析,我们可以大致看出:样品的含水量没有明显的规律,大致集中在 12% 到 30% 的范围内;介电常数的实部也没有明显的规律,分布于 8—25 的区域范围内;介电常数的虚部从湖心到湖岸呈逐渐减小的趋势,和总含盐量的变化规律一致。

介电常数的实部和土壤的含水量有着很强的线性关系,其回归方程为:

$$\epsilon' = 5.04 + 5.88 \times M_v$$

相关系数为:0.83。

同样,我们可以看出土壤介电常数的虚部和其含盐量也有很强的线性关系,其回归方程为:

$$\epsilon'' = 8.16 + 1.60 \times S$$

相关系数为:0.87。

这和我们在测量实验室制备的土壤样品介电常数的实部  $\epsilon'$ 、虚部  $\epsilon''$  和含水量  $M_v$ ,  $S$  的关系符合很好。所以土壤的含水量是决定其介电常数实部的关键参数;虚部则由土壤的含盐量及含水量共同决定。

### 5.2 吉兰泰盐湖雷达卫星图像分析

图 1 为 RADARSAT 卫星影像,HH 极化方式,分辨率 25—30m,入射角  $36^\circ$ — $42^\circ$ 。图中线条为采样路线。图中大片白色的区域就是吉兰泰盐湖,右上角明亮的区域是吉兰泰盐场和吉兰泰镇。

图 2 是采样点土壤的介电常数的虚部  $\epsilon''$  和图像后向散射强度值  $G$  的一元线性回归曲线,从图中我们可以看到,图像的后向散射强度值和介电常数的虚部有明显的正相关关系,其回归方程为:

$$G = 32.2\epsilon'' + 230.2$$

相关系数为 0.66。因此土壤的介电常数的虚部  $\epsilon''$  是影响图像后向散射强度值的重要因素。

图 3 是盐土介电常数的实部和图像后向散射强度值的线性一元回归曲线关系。可以得出相关系数仅为 0.23。但是,这并不是说明介电常数的实部对图像灰度值没有影响。土壤的含水量决定介电常数的实部。由于采样点集中在盐湖区,土壤的含水量相差不大,见表 4,多集中在 14—22,但在此范围内,

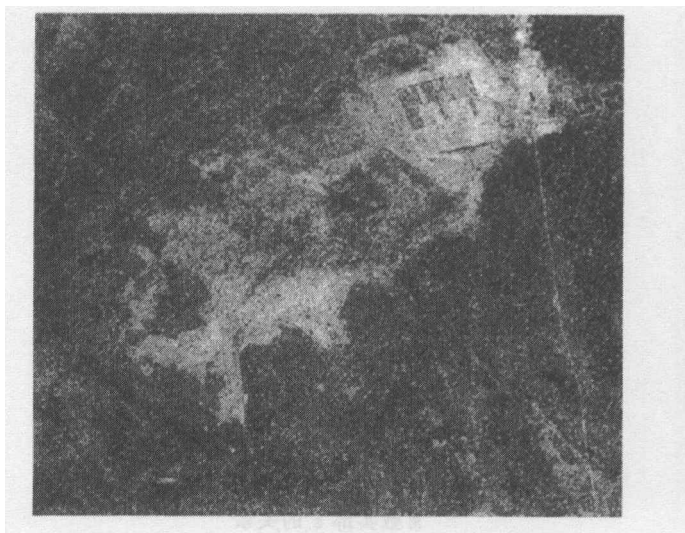


图 1 吉兰泰盐湖 C 波段雷达卫星图像  
Fig.1 The RADARSAT image of the Jilantai Salt Lake area at C-band

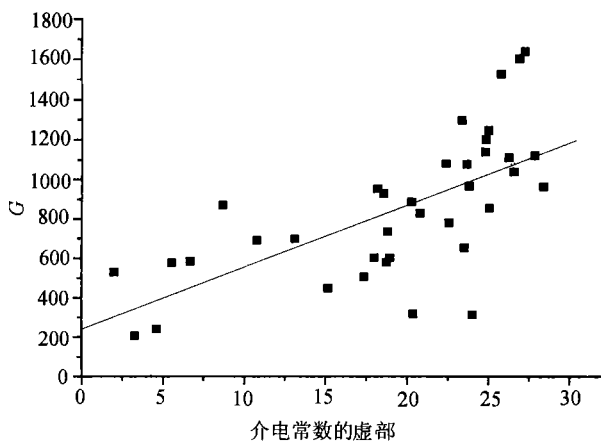


图 2 图像后向散射强度值和介电常数虚部  $\epsilon''$  的关系

Fig.2 The relationship between imaginary part of dielectric constant of salt soil and backscattering intensity of image

图像的后向散射强度值分布差异巨大,从 400—1500。由此可见,土壤介电常数的虚部对盐湖区雷达图像的后向散射强度的影响更大。同时,由于盐湖区地形极其平坦,基本没有植被分布,粗糙度和植被对雷达图像后向散射强度的影响可以忽略。

## 6 结论与讨论

本研究利用矢量微波网络分析仪测量了实验室制备的各种含水量、含盐量的土壤样品的复介电常数,为雷达遥感技术监测土壤盐碱化提供了基础实验依据。同时实地采集了吉兰泰盐湖实验区剖面的盐土样品,分析了样品的化学和物理性质,结合实时过

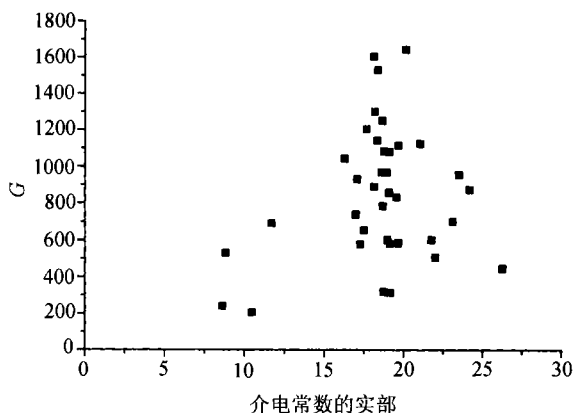


图 3 图像后向散射强度值和介电常数实部  $\epsilon'$  的关系

Fig. 3 The relationship between real part of dielectric constant of salt soil and backscattering intensity of image

顶的 C 波段雷达卫星图像,分析了土壤含盐含水量对图像后向散射强度值的影响,进行了利用雷达遥感监测土壤含盐量的初步尝试。主要研究成果为:

(1) 使用微波网络仪,在一个较广的频率波段(0.2—18GHz),仔细测量了实验室制备的各种不同含水量、含盐量土壤的微波复介电常数,获得了可靠的实验室数据。

(2) 揭示了介电常数的实部和虚部随着频率变化的规律:频率对土壤介电常数的实部影响很小,特别是含水量较小的土壤;当含水量较大时,实部随频率升高缓慢下降。虚部对频率的响应很显著:随着频率的增大而迅速下降;高频部分则趋向于一定值;土壤溶液的含盐量对虚部在较低频率范围( $f < 5\text{GHz}$ )有着决定性的作用,有时会差两个数量级;在较高频率范围则不十分明显。

(3) 揭示了土壤介电常数的虚部随着土壤盐分变化的规律:在给定的土壤含水量的情况下,介电常数的虚部随盐度的增加而增大。

(4) 提出了利用雷达遥感技术监测干旱地区土壤盐碱化,建议选用波长较长的波段,如 P 波段, L 波段,会取得较好的效果。

(5) 测量了吉兰泰实验区野外采集的盐土样品的复介电常数,并且全面测量了这些样品的物理性质和化学性质。

(6) 研究了同时过境的雷达卫星图像,分析了图像的后向散射强度值和土壤盐分、介电常数的关

系。为将来微波遥感监测土壤盐碱化提供了第一手资料。

尽管已经有很多研究讨论了土壤介电常数-含水量的经验模型,但是有关土壤介电常数-盐分的实用经验模型还没有人提出。这需要进行大量广泛的土壤介电常数测量。这样一个模型对于我们更加深刻地认识盐分对介电常数的影响,以便将来较为精确地提取土壤盐分参数,有着重要意义。

雷达遥感监测土壤的盐碱化研究才刚刚起步,还需要进一步大量的实验研究,因为相同的盐分下,不同的土质、植被量、粗糙度都可能会有不同的图像后向散射强度值,因此需要更多的实验研究其中的规律,以便从雷达图像直接提取盐分信息。未来多极化、全极化星载雷达系统的升空运行,将为土壤盐碱化监测提供更为丰富的信息,同时,也需要进一步加强土壤含盐含水量模型研究,含盐含水量土壤极化特征研究。

#### 参 考 文 献 (References)

- [1] Martti T Hallikainen, Fawwaz T Ulaby. Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil—part I: Empirical Models and Experimental Observations [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1985, **GRS-23**, 25—34.
- [2] James R Wang, Thomas J Schmugge. An Empirical Model for the Complex Dielectric Permittivity of Soils as a Function of Water Content [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1985, **GE-18**(4): 288—295.
- [3] Neil R. Peplinski, Fawwaz T Ulaby. Dielectric Properties of Soils in the 0.3-1.3GHz Range [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1995, **33**(3): 803—807.
- [4] Thomaw J Jackson, Peggy E O'Neil. Salinity Effects on the Microwave Emission of Soils [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1987, **GE-25**(2): 214—220.
- [5] K Sreenivas, L Venkataratnam, P V Narasimaha Rao. Dielectric Properties of Salt-affected Soils [J]. *INT. J. Remote Sensing*, 1995, **16**(4): 641—649.
- [6] Venkataratnam L. Monitoring of Soil Salinity in Indo-Gangetic Plains of North India Using Multidate Landsat Data [A]. In proceedings of the Seventeenth International Symposium on Remote Sensing of Environment (Ann Arbor, Michian: ERIM)[C]. 1983.
- [7] Wiersma J L, Horton M. Remote Sensing Applications for Detection of Saline Seep [R]. Report No. OWRD-044, RSI, South Dakota State University, Brookings, S. Dakota, 1976.
- [8] Singh A N, Baumgardner M F, Kristof S J. Delineating Salt-affected Soils in Part of Ganges Plain by Digital Analysis of Landsat Data [R]. Technical Report 111477, Laboratory for Applications of Remote Sensing, Purdue University, Indiana, 1977.

## Study on Soil Microwave Dielectric Characteristic as Salinity and Water Content

SHAO Yun, LU Yuan, DONG Qing, HAN Chun-ming

(*Laboratory of Remote Sensing Information Sciences, Institute of Remote Sensing Applications, CAS, Beijing 100101, China*)

**Abstract:** This paper presents the experimental measurements of the complex dielectric constants in two groups of soil samples using the microwave network analyzer. One group is the laboratory prepared soil samples with different moisture and salinity contents. We evaluated real parts and imaginary parts of dielectric constants as a function of microwave frequency, salinity, and water content. The real part is strongly affected by the soil moisture, whereas the frequency and the salinity of soils have little influence on it. The imaginary part is strongly affected by salinity at low frequencies ( $f < 5\text{GHz}$ ). When  $f < 2\text{GHz}$  the imaginary part decreases with the increment of frequency; whereas, at higher frequencies it tends toward a constant. The longer wavelength band, such as L-band, has better sensitivity to soil salinity than shorter wavelength. Another group of soil samples were collected in the Jilantai Salt Lake area. The measurements are well agreed with the group one. Then we analyze the simultaneous pass RADARSAT image at the Jilantai Salt Lake area. The correlation coefficient between the backscattering intensity values of the RADARSAT image and the real parts of the salt soil is 0.23, whereas the correlation coefficient for the imaginary part is 0.66. That indicates the backscattering coefficient of the radar image well correlated with the salinity of salt-affected soil. This study provides an experimental basis for future soil salinity monitoring using microwave remote sensing.

**Key words:** soil salinity; dielectric constant; microwave remote sensing