

文章编号: 1007-4619(2006)02-0279-08

氯化钠盐土壤介电虚部特性的初步研究

熊文成^{1,2}, 邵 芸¹

(1. 中国科学院 遥感应用研究所, 北京 100101; 2. 中国环境监测总站, 北京 100029)

摘 要: 含水含盐土壤的介电虚部模型是土壤含水量含盐量的函数。通过一系列关系研究:介电常数虚部 ϵ'' 、土壤导电率 σ_a 、土壤溶液导电率 σ_w 、土壤溶液离子浓度 S_{M_v} 、含盐量 S 最终得到介电常数虚部 ϵ'' 和土壤含水量 M_v 、含盐量 S 的关系, 即土壤介电模型。通过微波网络仪, 对 150 组具有不同含水含盐量的土壤, 在频率范围 0.2—20GHz (频率取样间隔为 0.05GHz) 进行介电常数测量。在不同频率下, 利用这些实测数据通过最佳拟合的方法确定土壤介电模型中的待定参数, 从而得到不同频率时土壤介电虚部经验模型。另外, 利用吉林泰地区 41 个含盐土壤样品进行模型验证, 结果表明, 模型计算值与测量值高度相关。最后得出: (1) 含盐量对介电常数虚部的影响随频率增大而降低; (2) 土壤类型和介电常数虚部几乎没有相关性。

关键词: 介电常数虚部; 含水含盐土壤**中图分类号:** TP79 **文献标识码:** A

Model for Imaginary Part of Dielectric Constant of NaCl Soil

XIONG Wen-cheng^{1,2}, SHAO Yun¹

(1. Institute of Remote Sensing Applications Chinese Academy of Sciences Beijing 100101, China;

2. Chinese Environment Monitor Center China's State Environment Protection Agency Beijing 100029, China)

Abstract This paper presents the expressions for imaginary part of dielectric constant of moisture salt soil at low and high frequencies respectively, which is functions of (1) soil water content and (2) soil salt content. This paper carried out a series of relevant studies including the relation of imaginary part of dielectric constant ϵ'' and soil bulk conductivity σ_a ; relation of soil bulk conductivity σ_a and conductivity of soil solution σ_w ; relation of conductivity of soil solution σ_w and soil solution concentration S_{M_v} ; and relation of soil solution concentration S_{M_v} and soil salt content S have been established gradually ($\epsilon'' \sim \sigma_a \sim \sigma_w \sim S_{M_v} \sim S$). Based on these relations the relation of ϵ'' and S_{M_v} had been established, which is the dielectric imaginary part model for wet and salty soil. Dielectric constants of 150 samples from five soil types had been measured with microwave net analyzer at the 396 frequencies ranging from 0.2GHz to 20GHz with the interval of 0.05GHz. These measured data were applied to calibrate the dielectric imaginary part model and then achieved the calibrated model at different frequencies. In addition, other 41 soil samples from Jilantai had been measured to test the dielectric model; as a result, the calculated value from model and the measured value had a strong correlation. Finally, the paper made the conclusions: (1) effect of salt content will decrease with the increasing frequency; (2) soil type has little influence on imaginary part of dielectric constant.

Key words: imaginary part of dielectric constant; wet and salty soil

收稿日期: 2004-08-20; 修订日期: 2005-04-03

基金项目: 中国科学院创新工程资助项目 (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: wenchengll@hotmail.com.

1 引 言

土壤介电常数特性是微波遥感进行对地观测的基础。它是建立后向散射系数与地表土壤参数(含水量、含盐量)之间关系的关键量。但地表土壤参数(含水量、含盐量)与介电常数的关系至今并不十分明确,尤其是介电常数虚部与含水量、含盐量之间的关系。

很多学者^[1-5]对土壤含水量与介电常数的关系进行了很多研究, U laby(1982), Hallikainen(1985), Dobson(1985)和 J R W ang(1980)等,利用各自不同的方法确立了介电常数与土壤含水量的关系,并且与实际测量很一致。但仔细研究其介电常数虚部模型,有以下一些问题:

(1)较少考虑盐分的影响。他们的研究对象是非盐渍化土壤,盐分含量较少,因此模型中较少考虑盐分的影响。比如 Hallikainen^[4]的经验回归模型就是直接将含水量和介电常数建立多次回归。在含盐量低的情况下,土壤介电损耗,也就是介电常数虚部很小,所以这种方法所导致的误差并不明显。但当含盐量增多时(比如盐渍化土壤),介电常数虚部相对就比较大,由于没有考虑含盐量的影响,与实际测量值有较大的差异。

(2)相同的方式对待实部和虚部。比如 Dobson^[5]提出四分量模型,它是以 Looer介电混合模型为基础,假定土壤是由空气、土质、自由水、束缚水这四个要素组成的一个土壤物理介电模型。对于给定含水量和体密度的土壤,根据各个成分的体积比,通过土壤物理介电模型可以得到整个土壤的介电常数。在这个模型中,介电常数(包括实部和虚部)是以一个复数的形式整体出现,这意味着混合物的实部和虚部与各个组分的体积、形状、极化、空间分布的关系是一样的。但实际上,由于介电常数的实部和虚部是反映物质性质的不同方面,所以实部和虚部与各个组分的体积、形状、极化、分布都有各自的特点,所以两者应该分开表达,尤其是当虚部较大(含盐量高)时,虚部更不同于实部。不管土壤是高含盐量或低含盐量, Dobson的四分量模型计算的实部值与测量值都能很好地吻合。但对于高含盐量土壤其虚部的计算值与实测值有很大的出入^[6]。可见,在土壤含盐量高的情况下,其模型不能真正反映介电常数虚部与含水量含盐量的关系。

因此,对于盐渍化土壤,由于含盐量较高,要正

确地描述含水量、含盐量对介电常数的影响并建立虚部模型,那么含盐量对介电常数虚部的影响,以及对虚部进行区分于实部的考虑都是有必要的。本文的目的就在于:在微波频率段,建立带有经验系数的土壤可测参数(土壤含水量、土壤含盐量)与土壤介电常数虚部关系式。这个关系式应该使得在进行雷达散射和发射计算时,可以直接而方便地得到介电常数的虚部。工作主要是通过推导,得到低频和高频的介电常数虚部公式;然后利用所测的数据来进行定标待定系数,得到带经验系数的模型公式。

2 土壤虚部模型

为建立土壤虚部模型,这里采用关系推导的办法,一步一步建立土壤虚部与含水量、含盐量的关系。需建立的关系链为:介电常数虚部 ϵ'' 土壤导电率 σ_a 土壤溶液导电率 σ_w 离子浓度 S_M 含盐量 S 。

以下就是土壤虚部模型的推导过程。

2.1 介电损耗 ϵ'' 与土壤导电率 σ_a

对于用 μ 、 ϵ 和导电率 σ 所表征的有损介质,从有损介质的麦克斯韦方程组可以推导出其复介电常数表达式,其为:

$$\epsilon_c = \epsilon - j\sigma / \omega = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (1)$$

从上式可知,有损介质的介电常数虚部是由介质的导电率引起的:

$$\epsilon'' = \sigma / \omega \quad (2)$$

土壤是一种有损介质,它的介电损耗来自于两个因素,第一是土壤本身(包括水和基质)极化造成的,第二是土壤的导电率造成的。对于第一个因素,在低频时,其值通常很小(<4),高含盐量时计算虚部可以忽略;在高频的时候,极化造成的介电损耗就很大了,是必须考虑的;对于第二个因素,即土壤的导电率造成的介电损耗,在含盐量较高的情况下,它是土壤介电损耗的主要部分。

式(2)中介电损耗 σ 来自土壤中极性分子(水分子)的介电损耗和土壤溶液中的自由离子形成的导电率 σ_a 损耗。对于含水含盐土壤,水的极性虽强,但在频率较低时,由水分子引起的介电损耗还是很小的,而导电率 σ_a 则很大,所以在低频时可以得到 $\epsilon'' \approx \sigma_a / \omega$ 。

考虑到实际测量时可能存在的系统性误差,介电常数虚部和土壤的导电率(溶液离子的导电能力),在低频率的关系可以表述为:

$$\epsilon_{\text{meas}}'' = A_1 \sigma_a / \omega + A_2 \quad (3)$$

式中, ϵ_{meas}'' 为测得的介电常数虚部, σ_a 为土壤导电率, A_1, A_2 为标定系数。

同样在频率较高时, 水分子引起的介电损耗是不能被忽略的, 它一般与水的体积成正比。故在式 (3) 的基础上, 增加水的极化造成的介电损耗项, 有:

$$\epsilon_{\text{meas}}'' = A_1 M_v \epsilon_w'' + A_2 \sigma_a / \omega + A_3 \quad (4)$$

式中, ϵ_{meas}'' 为测得的介电常数虚部, σ_a 为土壤导电率, A_1, A_2, A_3 为标定系数, ϵ_w'' 为纯水的介电常数虚部, 一定频率、温度下为常数, M_v 为土壤体积含水量。

2.2 土壤导电率 σ_a 与土壤溶液导电率 σ_w

σ_a 作为土壤整体的导电率与土壤溶液导电率 σ_w 的关系, 有不少土壤科学类的学者进行了研究, 比如 Mualem 和 Friedman^[7] 建立了两者的关系表达式:

$$\sigma_a = \sigma_w M_v^{\beta_1} / \theta_s + \sigma_s \quad (5)$$

式中, σ_a, σ_w 分别为土壤导电率和土壤溶液导电率; β_1 为拟合定标系数; M_v 为土壤体积含水量 (单位体积中所含水的体积分数, %); θ_s 为饱和含水量, 也就是等于土壤的空隙度; σ_s 为土壤基质的表面导电率, 其单位与 σ_a, σ_w 两者相同, 均为 ($\Omega \cdot \text{m}$), 但难以测定, 作为拟合系数来得到, 一般 σ_s 随土壤粘粒含量的增多而增大。

Mualem 和 Friedman^[7] 研究表明: β_1 等于 2.5 时, 适合大部分土壤, 对于不同土壤, β_1 有不同的最佳拟合系数, 但范围一般在 1.6—2.7。此模型结果表明, σ_a 是以增大 θ 的 1.6—2.7 次方的速度增大, 而非线性的增大。这可以由以下土壤物理模型^[8] 来解释: 包含电解质的土壤的体电导可用以下三种通道的并联来表示, 土壤粒子和空隙水交替通道 (固液串联通道), 土壤粒子固体表面直接相联的通道 (固体连续通道), 土壤溶液通道 (液体连续通道), 土壤电导率可以根据电阻串并联定理求得。孙玉龙^[9] 的实验表明: 在含水量低于田间持水量某一值 (针对他的实验土壤为 15%) 时, 由于连续水分占的分数很小, 所以测出的土壤体电导率很小, 相当没有流动的水导通; 含水量越过该点后, 土壤电导率值的生长速率是含水量增长速率的 2 倍。这是由于此时加入的水分不是都进入固体间隙成不连续水, 而是与原来土壤中的水分连通起来对电导起作用。

2.3 土壤溶液导电率 σ_w 与溶液的离子浓度 S_{M_v}

土壤溶液导电率 σ_w 与溶液的离子浓度成线性正相关, 大多土壤实验表明两者的相关系数在 0.99 以上。Griffm 和 Jurinak^[10] 测定了美国 Utah 州的各种土壤, 发现土壤溶液导电率 σ_w 与溶液的离子浓度 S_{M_v} 具有非常好的线性关系, 而且截距很小 ($b < 0.004$)。

$$\sigma_w = a_1 S_{M_v} + b \quad (6)$$

式中, S_{M_v} 为离子总浓度, σ_w 为溶液的到导电率。

2.4 土壤含盐量 S 与溶液的离子浓度 S_{M_v}

土壤含盐量与土壤溶液离子浓度有一定的正相关关系, 但具体的关系并不明晰。尤其在自然界, 土壤溶液的离子浓度在短时间内会发生较大的变化, 越是表层变化速度越快。由于土壤溶液离子浓度是一个比较难以测定的量, 这一方面是由于抽取土壤原溶液很难, 另一方面是由于不同深度的溶液离子浓度相差很大, 因此, 实际上测量得到的值是土壤含盐量。

但是, 电磁波更多地受土壤溶液离子浓度的影响, 所以有必要建立土壤含盐量与土壤溶液离子浓度的关系。一般来说, 前者增大, 后者也会随之增大, 反之亦然。但两者并非简单的线性关系, 其关系应该是盐的种类、含水量、土壤因素等的函数, 为简化这种复杂的关系, 此处采用拟合的方式来定标两者关系:

$$S_{M_v} = \rho \frac{S^\alpha}{M_v^\beta} \quad (7)$$

式中, S_{M_v} 为土壤溶液离子浓度 (g/m^3), M_v 为土壤体积含水量 (m^3/m^3), S 为土壤含盐量 (g/g), α, β 分别为拟合系数, ρ 为土壤容重 (g/m^3)。因为 S_{M_v} 与 S 是正相关, 但速率应该小于 1 次方 ($\alpha < 1$, 因为水分一定时, S_{M_v} 的增大会限制 S_{M_v} 进一步随 S 增大的速率, 也就是 S_{M_v} 的增大导致沉淀速率增大, 而溶解速率是不变的, 所以 S 增大到一定值以后, S_{M_v} 将保持不变, 也即饱和); 同样, S_{M_v} 与 M_v 成反比 ($\beta < 1$)。

2.5 土壤介电虚部模型

综上所述各量之间的关系, 建立介电常数虚部与土壤参数关系的步骤如下:

根据 σ_w 与 S_{M_v} 的线性关系式 (6) 以及土壤含盐量 S 与溶液离子浓度 S_{M_v} 的关系式 (7), 可得到:

$$\sigma_w = a S_{M_v} + b = a \frac{S^\alpha}{M_v^\beta} + b \quad (8)$$

式中, a, b 是拟合系数 (此处 $a = a_1 \times \beta$, 所以 a 与土壤容重有关)。

据 σ_a 与 σ_w 的关系式 (5), 并代入式 (8), 有:

$$\sigma_a = (aS_{M_v} + b)M_v^{\beta_1} + \sigma_s = \left[a \frac{S^\alpha}{M_v^\beta} + b \right] M_v^{\beta_1} + \sigma_s \quad (9)$$

根据式 (3)、(4) 描述的高频、低频表达式, 式 (9) 可以演变成:

在低频 ($< 3\text{GHz}$), 由于 $\sigma \approx \sigma_a$, 可有:

$$\epsilon'' = \left[\left[a \frac{S^\alpha}{M_v^\beta} + b \right] M_v^{\beta_1} + \sigma_s \right] / \omega \quad (10)$$

简化为:

$$\epsilon'' = [aM_v^{\beta_1-\beta} S^\alpha + bM_v^{\beta_1} + \sigma_s] / \omega \quad (11)$$

频率较高时 (大于 3GHz), 设 $\sigma = C_1 M_v + C_2 \sigma_a$, 则:

$$\epsilon'' = C_1 M_v / \omega + C_2 [aM_v^{\beta_1-\beta} S^\alpha + bM_v^{\beta_1} + \sigma_s] / \omega \quad (12)$$

式 (11)、(12) 就是介电常数虚部模型。a, b 为 $\sigma_w - S_{M_v}$ 的线性拟合系数, 它们由土壤溶液的离子性质 (价态、摩尔质量) 决定; $\alpha, \beta_1 - \beta$ 分别为土壤含盐量、土壤含水量对介电虚部影响的速率, 据前推导, 有 $\alpha < 1, \beta < 1, 1.6 < \beta_1 < 2.7$, 它们由土壤性质 (土壤颗粒大小、尤其是土壤结构) 决定, 这些值一般不方便直接测得, 所以用最佳拟合的方式来确定。

在拟合的过程中, 为使计算更方便, 可将式 (11)、(12) 简化成更简单的形式。一方面通过简化

重复性的拟合参数, 另外一方面, 据土壤溶液导电率 σ_w 与溶液的离子浓度 S_{M_v} 的表达式 (6) 可知参数 b 比较小, 因此忽略设为 0。所以 (11)、(12) 两式的简化模型分别为:

对于低频 ($< 3\text{GHz}$):

$$\epsilon'' = A_1 M_v^{\beta_1-\beta} S^\alpha + A_2 \quad (13)$$

对于高频 (大于 3GHz):

$$\epsilon'' = A_1 M_v + A_2 M_v^{\beta_1-\beta} S^\alpha + A_3 \quad (14)$$

以上两式就是介电常数虚部的经验模型, 低频时介电虚部模型是带 4 个待定参数的经验模型 ($A_1, A_2, \beta_1 - \beta, \alpha$); 高频时是带 5 个待定参数的经验模型 ($A_1, A_2, A_3, \beta_1 - \beta, \alpha$)。各个待定系数都通过最佳拟合得到。

以下是不同土壤在不同频率下的拟合结果及其所有样品的总的拟合效果。据此分析土壤介电虚部的频率规律, 土壤规律。

3 结 果

此处使用 Shao Yun^[11] 测定的 150 个样品值, 来验证拟合模型公式。150 个样品, 分别来自 5 个不同的土壤剖面, 每组土壤 30 个样品。表 1 是这 5 类土壤的质地参数。

表 1 五类土壤的质地及其比表面积

Table 1 Soil texture samples

土壤样品	砂粒含量 %	粉粒含量 %	粘粒含量 %	土壤质地	$A_s / (\text{m}^2 / \text{g})$ (土粒为球状结构)	$A_s / (\text{m}^2 / \text{g})$ (粘粒为 片状一级结构)	$A_s / (\text{m}^2 / \text{g})$ (粘粒为 片状二级结构)
1	44.84	53.85	1.31	砂粉土	0.325278	1.677591	10.40219
2	20.84	78.14	1.02	砂粉土	0.424723	1.869411	11.45981
3	4.79	75.82	19.39	粉土	8.98273	18.64382	119.6094
4	11.98	52	36.02	粉粘土	14.4123	30.77066	197.0709
5	4.83	54.5	40.67	壤粘土	17.6948	37.71218	242.707

每个土壤样品被配置成具有不同含水量或者不同含盐量 (通过加入 NaCl) 的样品, 在频率范围 0.2—20GHz (频率取样间隔为 0.05GHz) 进行介电常数测量。这样对于 396 个测量频率, 每个频率都能获得具有不同的含水量或不同含盐量的土壤样品的虚部值 150 个; 每个土壤类型 30 个。

在高频和低频段, 选出几种常见的频率进行拟合分析, 一方面是这几种波段被经常使用于微波遥

感领域, 另外, 如果拟合后的拟合误差比较小, 那么也能说明模型形式的合理性。本文对 0.2GHz、0.5GHz、0.8GHz、1.2GHz、3GHz、5.25GHz 和 10GHz 的测量数据进行了拟合分析, 取得以下几个结果。

3.1 低频时数据拟合结果

由于有待定参数, 所以需要拟合。以公式 (13) 为基础, 对 5 个低频 (等于和小于 3GHz 也即

0.2GHz 0.5GHz 0.8GHz 1.2GHz 3GHz)进行最佳拟合以确定参数。最佳拟合就是使得相对误差最小时的参数。相对误差计算方法为:

$$err = \sqrt{\sum_1^n (1 - \epsilon''_{calc} / \epsilon''_{meas})^2 / n} \quad (15)$$

表 2 给出了各个波段的拟合结果。图 1 是拟合

的详细情况(以 1.2GHz 的图形为代表,其他波段拟合情况都差不多),它显示出理论实际测量的虚部值 ϵ'' 与理论计算的值 $M_v^{\beta_1 - \beta} S^\alpha$ 之间的关系,也就是 $\epsilon'' M_v^{\beta_1 - \beta} S^\alpha$,横轴为 $M_v^{\beta_1 - \beta} S^\alpha$,纵轴为 ϵ'' 测量值。结果表明:两者确实存在如模型公式(13)所表明的线性关系。

表 2 具体拟合值及其误差

Table 2 Best coefficients and relative errors

f	样点	$\beta_1 - \beta$	α	A_1	A_2	相对误差
0.2GHz	1	1.4287	0.8358	0.47294	1.6577	0.1656
	2	1.5061	0.866	0.38608	0.68294	0.082
	3	1.3696	1.0737	0.32183	12.106	0.2321
	4	1.4267	0.8583	0.51725	-5.3185	0.0936
	5	1.2456	0.6194	0.86673	-7.8262	0.1504
	总样点	1.1683	0.7445	1.3	-6.1	0.2472
0.5GHz	1	1.4060	0.8178	0.21643	1.2665	0.1643
	2	1.4688	0.8431	0.18785	0.8267	0.0854
	3	1.3357	1.0305	0.15958	6.0234	0.2294
	4	1.4092	0.8519	0.22656	-1.0539	0.091
	5	1.2216	0.6066	0.39604	-2.7093	0.1472
	总样点	1.1495	0.7277	0.57	-1.8	0.2404
0.8GHz	1	1.3338	0.7115	0.20841	-0.23887	0.1802
	2	1.4451	0.8219	0.13448	0.73156	0.0883
	3	1.3046	0.9957	0.12076	4.2068	0.2283
	4	1.3953	0.8383	0.15401	-0.36758	0.0889
	5	1.2047	0.5967	0.27385	-1.4361	0.1446
	总样点	1.1343	0.7000	0.4	-1.1	0.2380
1.2GHz	1	1.3599	0.7732	0.11819	0.83797	0.1598
	2	1.4191	0.7963	0.10416	0.62705	0.0916
	3	1.2835	0.9575	0.094767	3.1113	0.2264
	4	1.3851	0.8211	0.11077	-0.032884	0.0864
	5	1.2083	0.5821	0.18881	-0.75451	0.1426
	总样点	1.1329	0.6942	0.28	-0.43	0.2273
3GHz	1	1.2731	0.5891	0.090189	0.24797	0.1511
	2	1.3928	0.6191	0.061601	0.30381	0.1122
	3	1.2636	0.6934	0.063861	1.4407	0.2235
	4	1.3452	0.6761	0.067092	0.11877	0.0794
	5	1.3662	0.4678	0.052475	0.24943	0.1533
	总样点	1.1464	0.5539	0.14	-0.027	0.2073

如果不考虑土壤类型,将 150 组数据全部统一用于拟合(以得到不考虑土壤类型的模型参数(如表 2 所示的总样点项)。分土壤类型拟合而得的

误差与不考虑土壤类型拟合而得的误差相比较,能发现后者的误差比前者稍稍大一些,这可能是参与拟合的值(150 个)多的缘故,毕竟考虑土壤

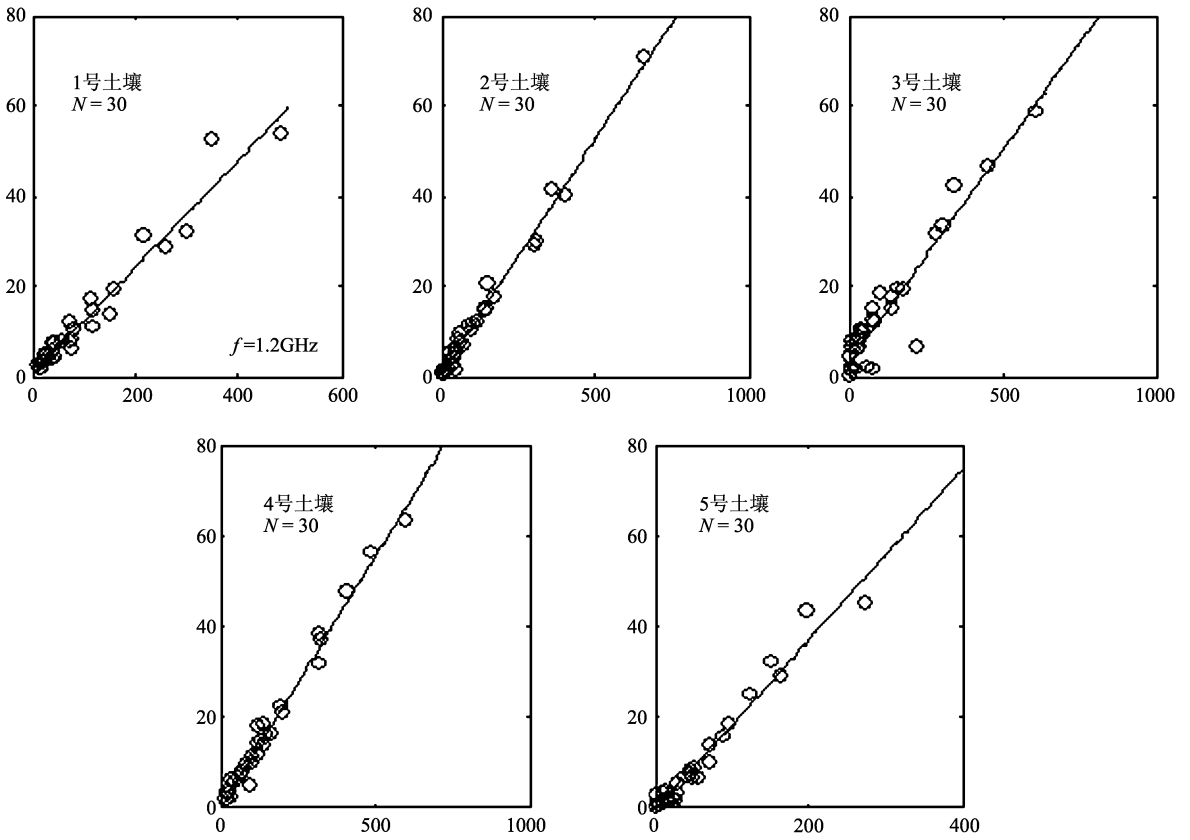


图 1 基于 (13) 的最佳拟合结果
 Fig 1 Result of best fit based on (13)

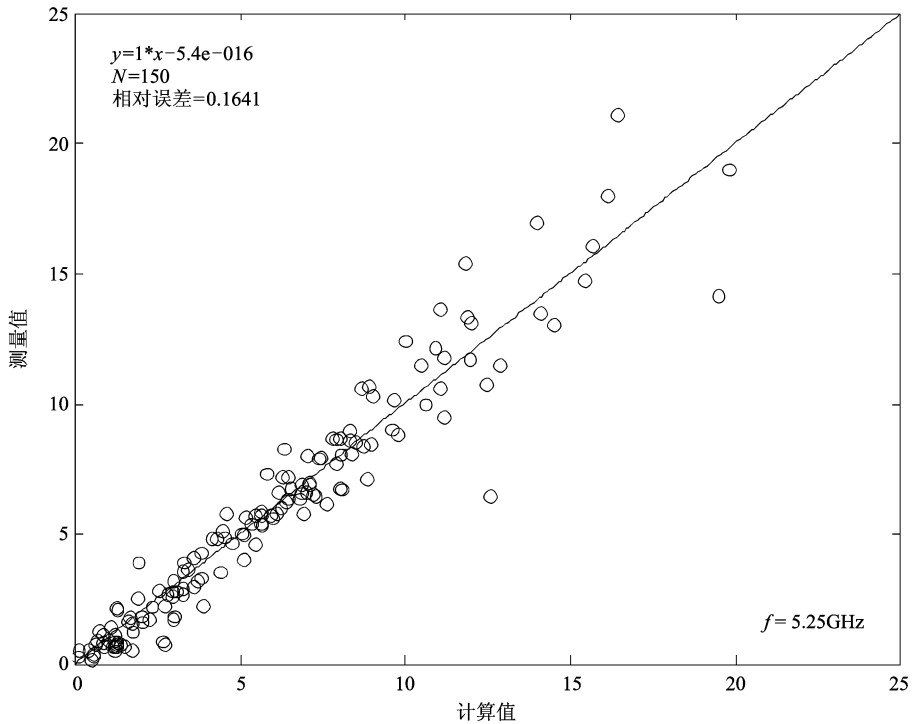


图 2 基于 (14) 的最佳拟合结果
 Fig 2 Result of best fit based on (14)

类型时,参与拟合的只有 30 个数据。同时,这意味着考虑土壤类型与不考虑土壤类型对拟合的精度并没有多大影响,说明土壤类型对土壤介电常数的虚部影响不大。

3.2 高频时数据拟合结果

同样,以经验模型公式(14)为基础,还取得了波段 5.25GHz、10GHz 拟合结果。表 3 反映的是高

表 3 各频率拟合值及其误差

Table 3 Best coefficients and relative errors for all samples

频率	$\beta_1 - \beta$	α	A_1	A_2	A_3	相对误差
5.25 GHz	1.0897	0.8032	0.1335	0.0587	-1.2083	0.1641
10 GHz	1.2568	0.8408	0.1558	0.0117	-1.4646	0.1637

3.3 模型在吉兰泰地区的验证

吉兰泰盐湖位于内蒙古自治区阿拉善盟阿拉善左旗吉兰泰镇。地理坐标:东经 $105^{\circ}42'$, 北纬 $39^{\circ}20'$ 。其土壤为高含盐土壤,其化学成分主要是 NaCl Na_2SO_4 。这次采集了 41 个样本,并在在频率范围 0.2—20GHz(频率取样间隔为 0.05GHz)进行介电常数测量;而且对各个样品的含水量、含盐量做了精准的测定。将这些含水量、含盐量通过表 3 的定标参数进行公式(14)理论计算,得到这些样品的理论计算虚部值。将这些理论计算值与实际测量的虚部值做对比,在 5.25GHz 时两者的对照如图 3 所示,其中横轴是通过定标后公式(14)得到的计算值 $\epsilon''_{\text{cacl}} = A_1 M_v + A_2 M_v^{\beta_1 - \beta} S^{\alpha} + A_3$, 纵轴是 ϵ'' 的测量值。

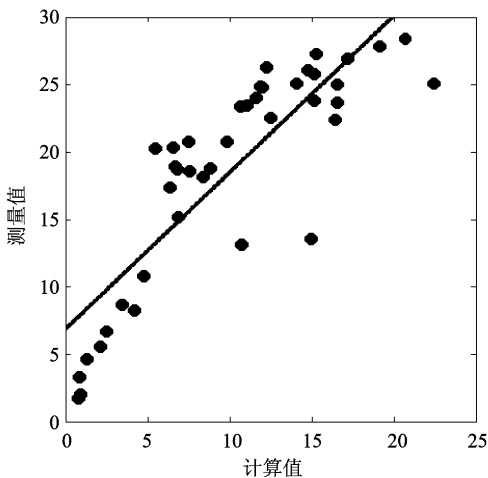


图 3 计算值与测量值的对比

Fig 3 Comparison between calculated and measured value

频时,利用公式(14)不考虑土壤类型拟合而得的参数和误差。图 2 反映的在 5.25GHz 时,理论计算的介电常数和实际测量的介电常数的关系。其中横轴是通过拟合后的公式的计算值 $\epsilon''_{\text{cacl}} = A_1 M_v + A_2 M_v^{\beta_1 - \beta} S^{\alpha} + A_3$, 纵轴是 ϵ'' 的测量值。从中可以看出,计算值和测量值吻合的比较好,不过其中也存在几个奇异点(离对角线较远),这可能是测量时对某几个点没有控制好。

两者的相关系数为 0.85,拟合直线的斜率也基本等于 1,只是截距较大,等于 6.7,这可能是由于不同土壤含盐化学成分不同造成的:因为最佳拟合参数使用的 150 个样本含盐均是 NaCl 而吉兰泰地区土壤含有 NaCl Na_2SO_4 等其他盐。相同质量的 NaCl Na_2SO_4 会具有不同的导电性能,也就是不同的介电损耗,从而使得拟合的截距不等于 0。总之,较好的线性结果存在于理论计算值和测量值之间。

4 结 论

(1)含盐量对介电虚部的影响随频率增大而减小。如图 4 所示,频率增大,含水量的指数 $\beta_1 - \beta$ (五角星)变化不大,但含盐量指数 α (三角形)在减小,指数变小,其对虚部值的影响自然也变小。高频时 10GHz 时的 A_1 比 5.25GHz 时的 A_1 大,这同样也说明频率增大含盐量对介电虚部影响在减小。Stogryn^[12] 的研究表明:水在 25℃ 时的弛豫频率大概是 18GHz 这个时候盐水、纯净水的介电参数虚部基本相同,含盐量对虚部没有影响。而本文的分析也显然能够印证这种趋势,这与 Stogryn^[12] 的结论是一致的。

(2)土壤类型(据于土壤质地的分类)对介电常数虚部影响不大。这是因为土壤导电率与土壤溶液的导电率更多地是与土壤结构有关联,而与土壤类型关系不大。

(3)介电常数虚部和实部,在高含盐量的情况下,由于各自产生的机制不同,所以不应和实部一样

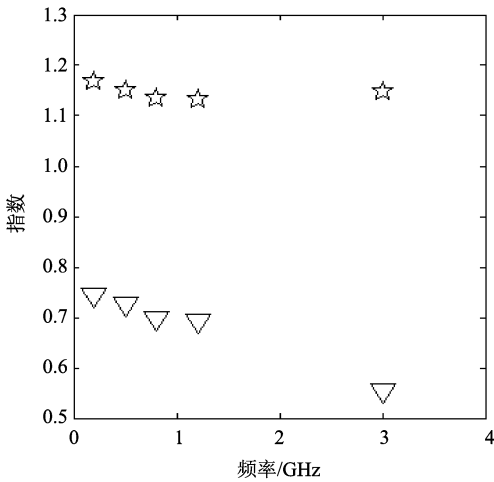


图 4 含盐量指数 (三角形)和含水量指数 (五角星)与频率的关系

Fig 4 Effect of frequency on indexes of salt (triangle) and water (pentagram) content

处理。而应该分别建立模型,才能更准确地反映介电常数虚部特性。

(4)在频率较低的情况下,含盐量对虚部影响很大,是不可忽略的,甚至是占主导的量。

同时,本文还存在着以下几个需要进一步研究的问题:

(1)土壤含盐量与离子浓度(土壤溶液含盐量)的关系不够明确,有必要深刻理解盐的溶解,沉积,离子活度,气压,化学平衡等各方面的因素。

(2)土壤经验模型是利用含 NaCl 的盐类土壤数据而建立的。虽然自然界中大部分盐渍化土壤所含盐类为 NaCl 但还有其他一些分布较广泛的盐类存在。因此对其他盐类,可能会有不同的定标参数,这需要进一步的研究。

参 考 文 献 (References)

[1] Hoekstra P, Delany A. Dielectric Properties of Soil at UHF and Microwave Frequencies[J]. *Geophys Res*, 1974, **79**: 1699-

1708

- [2] Hipp J E. Soil Electromagnetic Parameters as a Function of Frequency, Soil Density, and Soil Moisture[J]. *Proc IEEE*, 1974, **62**: 98- 103.
- [3] Wang J R, Schmugge T J. An Empirical Model for the Complex Dielectric Permittivity of Soil as a Function of Water Content[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 1980, **GE-18**: 288- 295.
- [4] Hallikainen M T, Ulaby F T. Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil-Part I: Empirical Models and Experimental Observations [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, Jan. 1985, **GE-23**: 25- 34.
- [5] Dobson M C, Ulaby F T. Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil-Part II: Dielectric Mixing Models[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 1985, **GE-23**: 35- 45.
- [6] Hu Q R. Studies on Microwave Dielectric Behavior of Moist Salt Soil and Its Effect on Backscattering Coefficients Extracted from Radar Image[D]. 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]. 中国科学院遥感应用研究所, 2003.]
- [7] Mualem Y, Friedman S P. Theoretical Prediction of Electrical Conductivity in Saturated and Unsaturated Soil[J]. *Water Resources*, 1991, **27**: 2771- 2777.
- [8] Rhoades J D, Manteghi N A, Shouse P J, et al. Soil Electrical Conductivity and Soil Salinity: New Formulations and Calibration [J]. *Soil Sci Soc Am. J.*, 1989, **52**: 433- 439.
- [9] Sun Y L, Hao Z C. Relationship among Ionic Strength and Electrical Conductivity of Soil Solution and Soil Bulk Conductivity [J]. *HOHAI Univ.*, 1997, **25**(6): 69- 73. [孙玉龙, 郝振纯. 土壤电导率及土壤溶液电导率与土壤水分之间的关系[J]. 河海大学学报, 1997, **25**(6): 69- 73.]
- [10] Griffin G P, Jurinak J. Estimation of Activity Coefficients from the Electrical Conductivity of Natural Aquatic Systems and Soil Extracts[J]. *Soil Sci.*, 1973, **116**: 26- 30.
- [11] Shao Y, Hu Q R, Guo H D, et al. Effect of Dielectric Properties of Moist Salinized Soil on Backscattering Coefficients Extracted from RADARSAT Image [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 2003, **41**(8): 1879- 1888.
- [12] Stogryn A. Equations for Calculating the Dielectric Constant of Saline Water[J]. *IEEE Trans Microwave Theory Tech*, 1971, **MTT-19**: 733- 736.