

引用格式: Dong Leilei, Wang Weizhen, Wu Yueru. Dielectric Properties of Saline Soil and an Improved Dielectric Model[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2020, 35(4): 786-796. [董磊磊, 王维真, 吴月茹. 盐渍土介电特性及模型改进研究[J]. 遥感技术与应用, 2020, 35(4): 786-796.]
doi: 10.11873/j.issn.1004-0323.2020.4.0786

盐渍土介电特性及模型改进研究

董磊磊^{1,2}, 王维真^{1,3}, 吴月茹⁴

- (1. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 中国科学院黑河遥感试验研究站, 甘肃省遥感重点实验室, 甘肃 兰州 730000;
2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院寒旱区陆面过程与气候变化重点实验室, 甘肃 兰州 730000;
4. 内蒙古农业大学沙漠治理学院, 内蒙古 呼和浩特 010018)

摘要: 基于控制试验对配制的具有不同含水量和含盐量的土壤样本进行介电特征量测和分析, 同时结合 Stogryn 盐水介电模型和土壤溶液离子浓度、电导率、含水量和含盐量等参数对介电常数虚部的影响, 将饱和度这个关键参量引入盐渍土介电模型中, 提高盐渍土介电模型模拟精度。结果表明: ①当土壤体积含水量较低时, 土壤含盐量对介电常数的实部和虚部均未产生明显的作用。当土壤体积含水量较高时, 介电常数实部则随着土壤含盐量的增加呈逐渐下降趋势, 介电常数虚部以增加态势为主; ②修正后的盐渍土介电模型可以较好地刻画介电常数变化特征。此外, 将修正后的模型在白银采样点进行验证, 同样取得较好的模拟结果, 表明修正后的盐渍土介电模型对不同土壤类型具有一定的适用性。

关键词: 改进的介电模型; 介电常数; 饱和度; 土壤水分; 土壤盐分

中图分类号: S153; TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2020)04-0786-11

1 引言

土壤盐渍化作为土地退化的主要表现形式之一, 已成为制约区域经济增长、生态环境保护和农业可持续发展的主导因素^[1]。联合国粮食和农业组织(FAO)不完全统计, 全球盐碱化土地面积已高达 9.54 亿 hm^2 , 其中干旱半干旱地区的土壤盐渍化现象尤为严峻^[2]。全国第二次土壤普查数据显示, 中国盐渍土总面积约 3 600 万 hm^2 , 占全国可利用土地面积的 4.88%, 其中耕地中盐渍化土地面积高达 920.9 万 hm^2 , 占全国耕地面积的 6.62%^[3]。土壤盐渍化对农作物的生长和生产极具破坏性, 当土壤中的盐分含量达到一定极值时, 将会阻碍作物根系对水分和养分的吸收能力, 导致农作物产量下降及农

业生产能力衰减^[4]。如何有效地监测土壤盐渍化, 实时获取土壤中的盐分含量、时空分布及动态变化, 尽可能及早采取有效措施防止土壤盐渍化程度加剧, 对于提高农作物产量和改善生态环境具有重要的经济效益和社会意义。

传统的土壤盐渍化监测方法主要以定点观测为主, 通过在典型区域设置固定观测点或试验场以监测其时空变化及预测未来演化趋势。相较遥感方法, 传统的盐渍化观测方法不仅耗时耗力, 而且难以在较短的时间内获取区域或更大尺度上盐渍化空间变化特征。国内外基于可见光、热红外及高光谱遥感在盐渍化土壤空间制图及动态变化监测方面已开展大量的工作^[5-7], 对于盐渍土的识别取得

收稿日期: 2019-09-23; 修订日期: 2020-07-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671373、41701418), 中国科学院寒旱区陆面过程与气候变化重点实验室自主研究课题(LPCC2019)。

作者简介: 董磊磊(1990—), 男, 甘肃秦安人, 博士研究生, 主要从事定量遥感研究。E-mail: dongll@lzb.ac.cn

通讯作者: 王维真(1967—), 男, 山西万荣人, 研究员, 主要从事气象水文学研究。E-mail: weizhen@lzb.ac.cn

了较好的结果^[8]。但光学遥感主要根据光谱特征和其他土壤参数关系特征间接分析土壤盐渍化程度,对于土壤盐渍化的定量反演仍存在一定的局限性。

相较光学遥感技术,微波遥感被认为是真正意义上能够进行土壤水分量化监测最具潜力的方法^[9-10],目前已被广泛用于土壤水分研究^[11],并形成一系列通用的正演模型和反演算法^[12-14],但有关土壤盐分的微波遥感监测技术仍处于探索阶段。土壤介电模型是微波遥感反演土壤水分和盐分的基础,土壤介电常数与地表微波辐射亮温或地表微波后向散射系数密切相关,而介电常数主要由土壤中的水盐含量决定的^[15-17],这一结论为微波遥感进行土壤水分和盐分反演奠定了坚实的理论基础。Debye等基于极性气体和液态水试验于1929年就已经提出了著名的计算单一介质介电常数的Debye方程,但该理论模型只适用于单一介质介电常数计算。Stogryn^[18]和Klein等^[19]分别提出了海水和盐水的介电常数与频率和温度的半经验模型,并考虑了盐度对介电常数的作用。De Loor^[20]根据分子极化和扩散理论提出了土壤理论扩散模型,该模型简洁扼要且各参数物理意义明确,但未考虑土壤各组成介质间的电学效应,模拟结果与实际误差较大。随后通过对混合介质中各组分介电特性体积平均,一些介电体积混合模型应运而生^[21-23],但每个模型均有各自的适用条件,且模型中的相关参量在实际量测中难以实现。因此,结合介电体积混合模型和土壤物理参量,通过大量试验观测数据,Wang^[24]模型、Dobson^[25]模型、Hallikainen^[26]模型、Topp^[27]模型和GRMDM模型^[28]等一系列经验半经验的土壤介电模型被相继推出,其中Dobson模型是目前应用最为广泛的介电模型。

目前较为常用的土壤介电模型大多是针对非盐渍土而言的,仅考虑了土壤含水量与介电常数之间的关系,而忽略了土壤盐分的影响,因此需进一步对盐渍土介电模型进行探究。Sreenivas等^[29]利用采集的土壤样本数据,分析了L波段复介电常数与土壤含盐量之间的关系,试验发现介电常数的实部受盐分影响甚微,虚部则随着盐分含量的增加而增加。邵云等^[30]基于网络分析仪,分别对不同含水量和含盐量的土壤介电常数进行试验,结果发现介电常数实部随着含水量的增加明显增大,虚部也随之增大,但是变化幅度较小,当土壤中含有盐分时,随着含水量和含盐量的增加,介电常数虚部则产生

明显的变化。McColl等^[31]在澳大利亚南部Nilpinna观测站周围开展基于双极化多角度微波辐射计(PLMR)试验。试验结果指出,在盐渍化地区,忽略盐分对土壤介电特性的影响将导致土壤水分反演结果误差更加明显。以上研究均定性指出盐分对介电模型的影响,未给出盐渍土介电模型的具体表达式。胡庆荣^[32]和吴月茹^[33]分别在Dobson模型的基础上,利用实验室配置的NaCl盐溶液对含水含盐土壤介电常数的虚部进行修正,基于Stogryn盐水模型进行土壤溶液电导率和含盐量之间关系的拟合,从而将土壤含盐量这一关键参量通过电导率引入Dobson模型的虚部表达中。尽管试验取得了一定的效果,但胡庆荣模型仅适合于土壤水分含量较高的区域,当含水量较低时,介电常数虚部模拟误差明显偏高,其原因为试验过程中,胡庆荣模型仅利用体积含水量大于20%的土样测量数据对该模型进行验证,而忽略了低含水量的情况。吴月茹模型模拟结果虽然较前者有明显的改善,但该模型未考虑土壤水分饱和的情况,且在高含水量的介电常数虚部模拟精度有待进一步提高。

通过对野外采集的不同类型的土壤样本进行水盐含量配比,利用微波网络分析仪对不同含水量和含盐量土壤样本的复介电常数进行观测,定量分析频率、土壤体积含水量和含盐量与复介电常数之间的关系。同时结合Stogryn盐水介电模型和土壤溶液离子浓度、电导率、含水量和含盐量等参数对介电常数虚部的影响,将土壤水分饱和度这个关键参量引入盐渍土介电模型中,提高盐渍土介电模型模拟精度,为土壤盐分的定量反演提供理论支持和科学参考。

2 试验概况

试验分别于2011年6月在黑河中游不同下垫面上采集了6种具有代表性的土壤样本,土壤样本采集位置如图1所示。此外在白银蒋滩站的盐渍土农田中采集土样进行对比试验。根据微波C波段的穿透特性,只选取了土壤表层0~7 cm深度的土壤样本,且采用环刀法进行扰动型采样,没有保持土壤的原状结构,将采集后的土壤样本装入密封的塑料袋中。本次试验所采集的土壤样本分别以Soil-5、Soil-14、Soil-20、Soil-30、Soil-36、Soil-37和Baiyin命名,其中Soil-5、Soil-14、Soil-20位于2008年黑河遥感试验中游干旱区水文试验区在临泽草

地布设的加密观测区,Soil-5为农田灌溉区域,Soil-14为轻度盐渍土区域,周围伴随生长大片芦苇,Soil-20为盐渍土区域,下垫面以稀疏植被为主。Soil-36和Soil-37同样位于黑河遥感试验中游干旱

区水文试验的观测区,下垫面分别为盈科农田灌溉区域和花寨子荒漠区域。各样本点所对应的比重分别为2.65、2.70、2.65、2.64、2.60、2.65、2.64,容重分别为1.35、1.36、1.33、1.35、1.32、1.36、1.35。

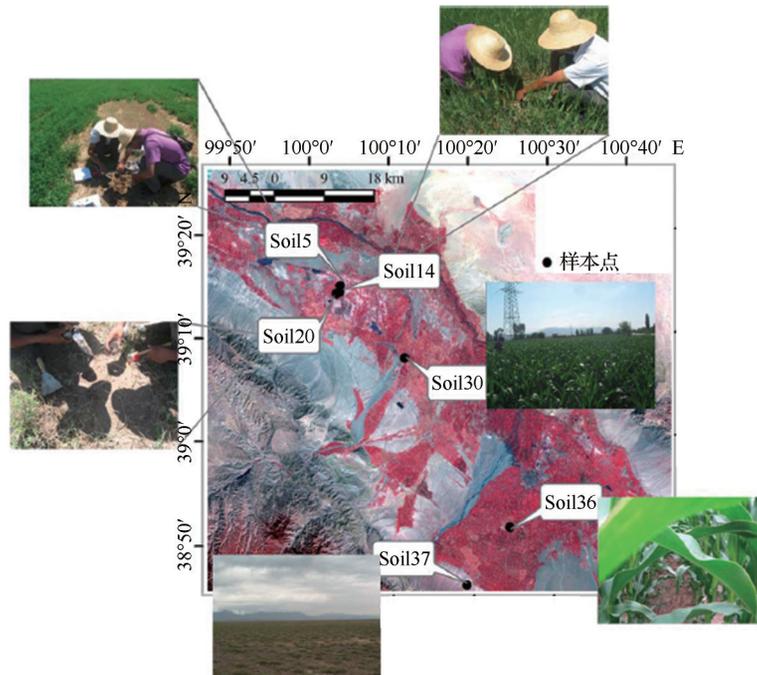


图1 土壤样本采集位置示意图

Fig.1 Locations of soil sampling points

首先将野外采集的不同下垫面的土壤样本在实验室中利用烘箱进行干燥处理,烘箱温度设置为 105°C ,干燥时长为24小时以保证土壤样品中的水分得以充分干燥。烘干后的土壤样本经过捣碎、均匀搅拌、过筛(2 mm)和去除较大颗粒等一系列试验操作过程,尽可能使土壤样本均匀,均一以满足土壤样本测量标准。根据土壤介电常数测量标准:被测物质均一,且土壤粒径小于0.3 mm。盐渍土中NaCl最为普遍,且对植物生长的危害最大,同时为了便于试验控制分析,因此将事先准备好的不同浓度的氯化钠(NaCl)溶液添加到相应的土壤样品中,从而配制成含水量依次为5%、10%、20%、30%、40%,盐分含量(S)依次为0‰、3‰、6‰、9‰、12‰、15‰、18‰、20‰、40‰、100‰的土壤溶液样品。最后,利用Agilent公司生产的8362B型矢量网络分析仪,以及配套的85070E介电常数测量套件进行本次试验土壤样本介电常数测量。

3 结果与分析

3.1 土壤水分及盐分响应

图2和图3分别表示在C波段(5.3 GHz),土壤

体积含水量分别为5%、10%、20%、30%和40%,土壤盐分含量依次为0%、0.3%、0.6%、0.9%、1.2%、1.5‰、1.8%、2%、4%和10%时,7个土壤试验样本的介电常数实部和虚部对不同的含水量和含盐量的响应。土壤体积含水量较低时,不同土壤样本介电常数实部和虚部随盐分的变化趋势较为一致,各样本曲线之间较为紧凑。当土壤体积含水量较高时,不同土壤样本的介电常数实部和虚部值均在一个较小的幅值范围波动,且变化幅值小于5(不包括Soil-20)。在介电常数实部,Soil-20土壤样本曲线总体上低于其他土壤样本曲线,但Soil-20土壤样本曲线在介电常数虚部明显高于其他土壤样本曲线,其原因为Soil-20土壤样本为盐渍土,其含盐量要高于其他土壤样本。这也表明土壤含盐量增加会导致介电常数实部的减小和虚部的增大。

总体来看,随着土壤体积分水量的增加,介电常数的实部和虚部均呈增加特征。与土壤水分相比,土壤盐分对介电常数的影响主要表现为:当土壤体积分水率较低时(低于10%),土壤含盐量对介电常数的实部和虚部均未产生明显的作用,随着含

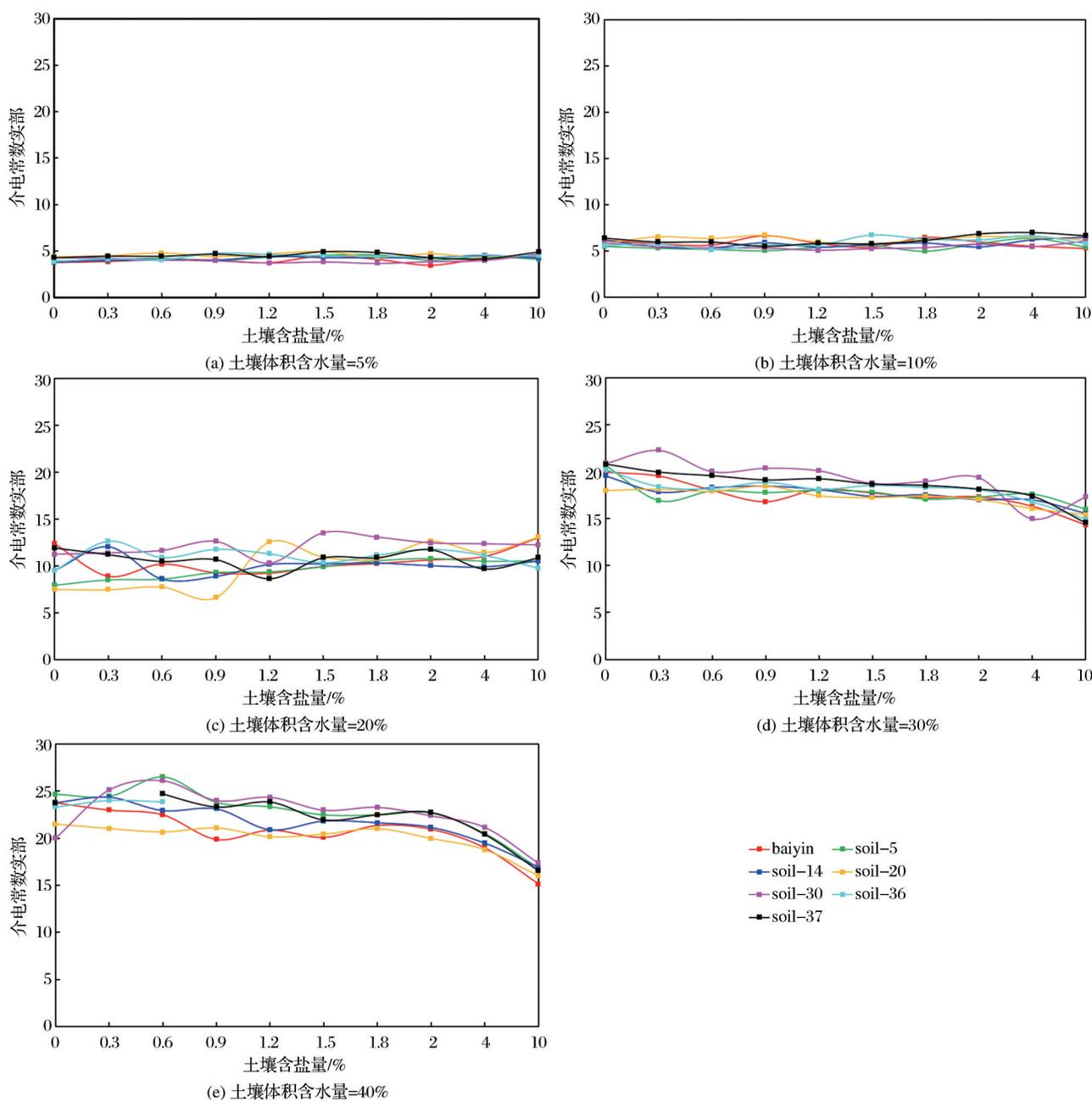


图 2 不同含水量时土壤介电常数实部随含盐量增加的变化

Fig.2 The changes of the real part of the dielectric constant with the increase of the salinity in different soil moisture

盐量的增加,介电常数实部和虚部的曲线基本与横轴保持平行;当土壤体积含水量为 20% 时,随着土壤含盐量的增加,介电常数实部未产生明显变化,介电常数虚部则显著地呈线性增加的态势;当土壤体积含水量较高时(高于 30%),介电常数实部则随着土壤含盐量的增加呈逐渐下降趋势,介电常数虚部仍以增加态势为主。此外,当土壤体积含水量一定时,介电常数虚部的变化幅度明显大于实部。当土壤体积含水量为 40%,盐分含量 0% 增加到 10%,介电常数虚部由 5.83 增加到 25.05,变化幅值

为 19.22,实部则由 20.01 下降到 17.33,变化幅值为 2.68。可以看出随着土壤中盐分含量的增加,介电常数虚部明显增大,当土壤体积含水量较高时尤为明显。综上可知,介电常数虚部同时随着土壤体积含水量和含盐量的增大而增大,介电常数实部则受盐分的影响相对较小,很大程度上取决于土壤中的含水量。其原因是当土壤体积含水量较低时,结合水是土壤中水分的主要存在形式,随着盐分的变化,介电常数并未有显著变化。当土壤体积含水量较高时,自由水是土壤中水分的主要存在形式,自

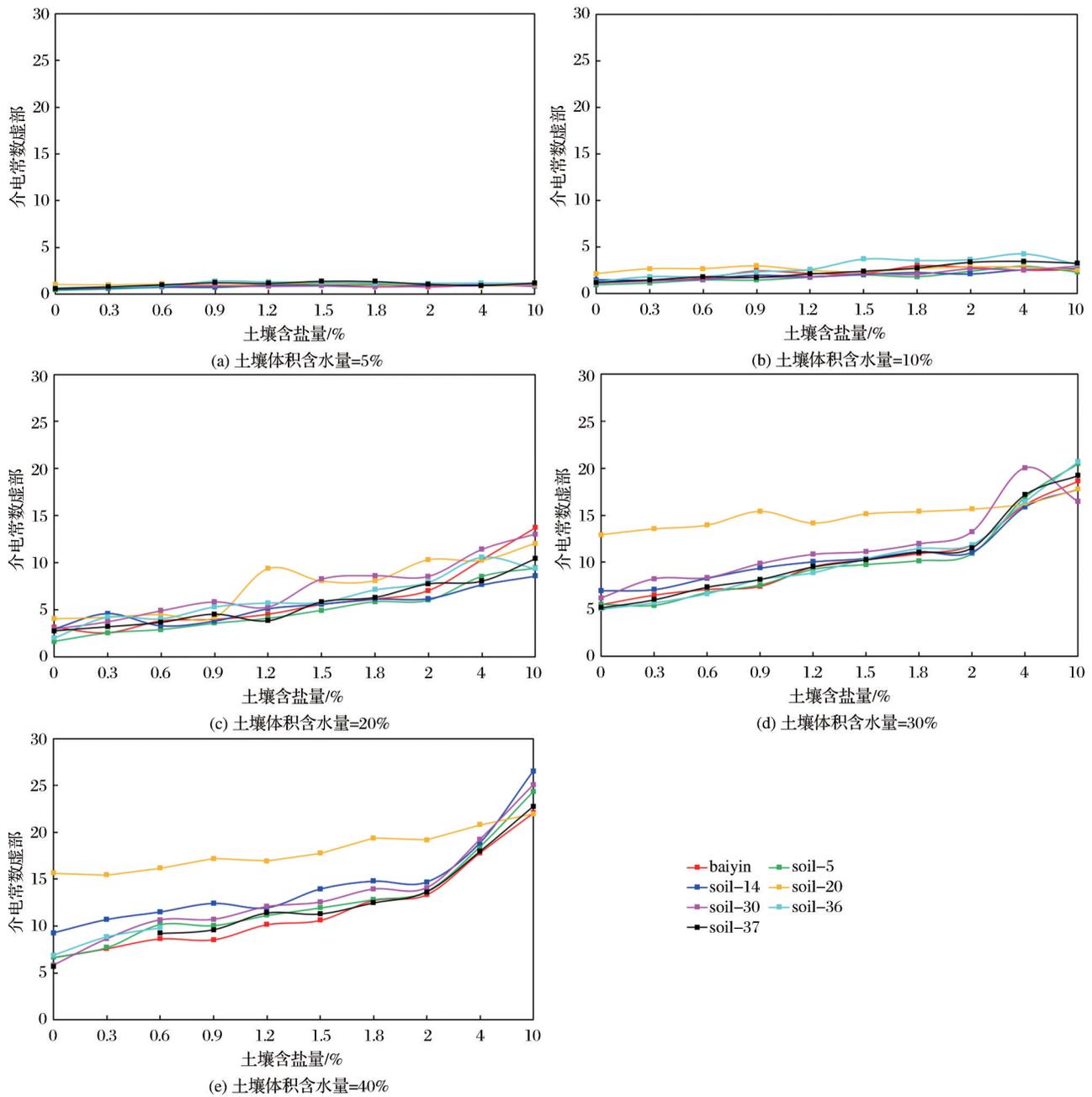


图3 不同含水量时土壤介电常数虚部随含盐量增加的变化

Fig.3 The changes of the imaginary part of the dielectric constant with the increase of the salinity in different soil moisture

由水可溶解土壤中的大量盐离子,从而使土壤溶液的电导率增加,进而使介电常数虚部增大。

3.2 盐渍土介电模型构建

盐渍土介电模型是在盐水模型的基础上演化而来,盐水是由水和溶解于水中的盐离子组成。根据Stogryn盐水模型^[18],盐水介电常数的实部 ϵ'_{sw} 和虚部 ϵ''_{sw} 分别表示为:

$$\epsilon'_{sw} = \epsilon_{sw\infty} + \frac{\epsilon_{sw0} - \epsilon_{sw\infty}}{1 + (2\pi f\tau_{sw})^2} \quad (1)$$

$$\epsilon''_{sw} = \frac{2\pi f\tau_{sw}(\epsilon_{sw0} - \epsilon_{sw\infty})}{1 + (2\pi f\tau_{sw})^2} + \frac{\sigma_i}{2\pi f\epsilon_0} \quad (2)$$

其中: ϵ_0 表示自由空间电导率,其值为 8.854×10^{-12} F/m; $\epsilon_{sw\infty}$ 表示高频介电常数,其值为4.9; ϵ_{sw0} 表示盐水的静电场介电常数; τ_{sw} 表示盐水的弛豫时间; σ_i 为有效电导率。模型的适用范围是:当量浓度 $0 < N < 3$ (对于NaCl溶液为 $0 < S < 157\%$),温度 $0 < T < 40^\circ\text{C}$,其中N为当量浓度即溶液中所含溶质的克当量数,S为溶液中含盐量定义为:在1 kg溶液中溶解固体盐的总质量(g)。模型中的其他相关参数

如下:

$$\epsilon_{sw0}(T, S_{sw}) = \epsilon_{sw0}(T, 0) a(T, S_{sw}) \quad (3)$$

其中: $\epsilon_{sw0}(T, 0) = 87.134 - 1.949 \times 10^{-1} T - 1.276 \times 10^{-2} T^2 + 2.491 \times 10^{-4} T^3$, $a(T, S_{sw}) = 1 + 1.613 \times 10^{-5} T S_{sw} - 3.656 \times 10^{-3} S_{sw} + 3.21 \times 10^{-5} S_{sw}^2 - 4.23210^{-7} S_{sw}^3$ 。

$$2\pi\tau_{sw}(T, S_{sw}) = 2\pi\tau_{sw}(T, 0) b(T, S_{sw}) \quad (4)$$

其中: $2\pi\tau_{sw}(T, 0) = 1.1109 \times 10^{-10} - 3.824 \times 10^{-12} T + 6.938 \times 10^{-14} T^2 - 5.096 \times 10^{-16} T^3$, $b(T, S_{sw}) = 1.0 + 2.282 \times 10^{-5} T S_{sw} - 7.638 \times 10^{-5} S_{sw} - 7.76 \times 10^{-6} S_{sw}^2 + 1.105 \times 10^{-8} S_{sw}^3$ 。

$$\sigma_i(T, N) = \sigma_i(25, N) C(\Delta, N) \quad (5)$$

其中: $\sigma_i(25, N) = N10.394 - 2.3776N + 0.68258N^2 - 0.13538N^3 + 1.0086 \times 10^{-2} N^4$, $C(\Delta, N) = [1.0 - 1.962 \times 10^{-2} \Delta + 8.08 \times 10^{-5} \Delta^2] - \Delta N \{ 3.02 \times 10^{-5} + 3.922 \times 10^{-5} \Delta + N(1.721 \times 10^{-5} - 6.584 \times 10^{-6} \Delta) \}$

$N = AS [1.707 \times 10^{-2} + 1.205 \times 10^{-5} S + 4.058 \times 10^{-9} S^2]$ 。
其中:系数 A 与溶液中离子的种类和密度相关,在

NaCl 溶液中 $A = 1.0$, 在海水中 $A = 0.941$ 。

由图 2 和图 3 可知,土壤盐分对介电常数实部的影响远小于虚部,可忽略不计;土壤介电常数虚部同时受水分和盐分的影响,尤其是土壤体积含水量较高时;但土壤体积含水量较低时,盐分对介电常数虚部的影响甚微。根据盐水的介电特性,土壤溶液中离子由于带电特性和水化作用,土壤溶液的介电常数可通过电导率、粘滞度、静态介电常数和弛豫频率等影响因子进行调整,因此土壤水溶液是决定介电常数的关键因素。弛豫损耗和电导损耗是水溶液介电损耗的两个最主要方面,对于盐渍土来说,特别是在低频区影响盐渍土介电常数虚部的主要是土壤溶液的电导率。为了进一步确定土壤溶液离子浓度与电导率之间的关系,本研究在室内对采集的土壤样本进行试验分析,分别以 1:1, 1:3 和 1:5 的土水比进行配比,试验中的盐分含量分别为 0‰、0.3‰、0.6‰、0.9‰、1.2‰、1.5‰ 和 1.8‰,结果如图 4 所示。总体来看,盐渍化土壤溶液离子浓度与电导率之间呈显著的线性关系,其 R^2 为 0.996,

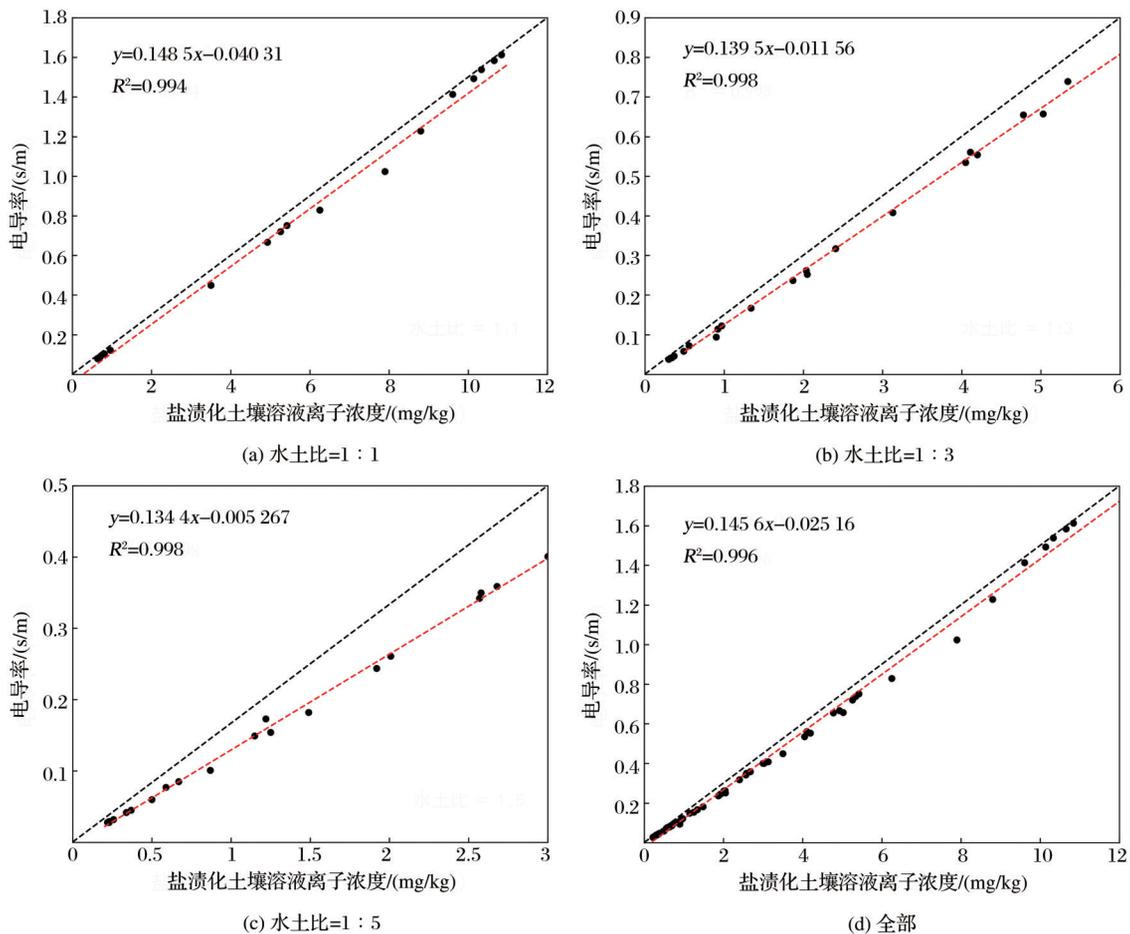


图 4 盐渍化土壤溶液离子浓度与电导率关系

Fig.4 The relationship between ion concentration of salinization soil solution and conductivity

斜率为0.145 6,且截距相对较小,这也与先前有关土壤溶液离子浓度与电导率的相关研究结果^[34-35]一致。在水土比不同的情况下,盐渍土土壤溶液离子浓度与电导率之间均存在较高的相关性, R^2 均高于0.99,且随着水土比的降低, R^2 逐渐增大,而斜率和截距逐渐减小。因此后续盐渍土介电模型构建过程中将土壤溶液离子浓度与电导率之间的关系采用本次试验的拟合结果。

土壤含盐量与土壤溶液离子浓度关系密切,但二者之间具体的关系表达式仍未明确。在自然条件下,土壤溶液离子浓度在短时间内变化较大,其中土壤表层的变化速率最快,准确量测土壤溶液离子浓度是比较困难的,因此一般情况测量的是土壤含盐量。通常来讲,土壤含盐量越大,土壤溶液离子浓度也随之变大,但并非简单的线性关系,因为离子类别、土壤体积含水量、土壤质地和土壤结构等均会对此产生影响。虽然土壤溶液离子浓度与土壤含盐量呈正相关关系,但随着含盐量的增加,土壤溶液离子浓度的增加速率应该小于1次方,因为土壤体积含水量一定时,随着含盐量的增大,土壤离子浓度的增加速率将会降低,即土壤离子浓度的增大将会导致沉淀速率增大,而溶解速率保持不变,所以当含盐量增加到一定程度时,土壤离子浓度将会出现饱和状态。此外,土壤体积含水量越高,土壤盐分越容易溶解,即溶解速率越快。相反土壤体积含水量越低,土壤溶液离子浓度越高,即二者之间呈反比关系。但目前关于盐渍土的介电模型中均未考虑土壤水分含量饱和的情况。土壤饱和含水量是了解土壤持水特性和释水性质的一个重要指标,对估算土壤剖面水分含量、推算土壤给水度、预告地下水位因降水、灌溉和抽水、排水的升高或降低值具有十分重要的意义。所以在吴月茹模型的基础上将饱和度这一重要参数引入盐渍土介电模型中,同时根据本研究3.1节中土壤水分和盐分对介电常数的响应可知,当土壤体积含水量较低时(低于10%),土壤含盐量对介电常数的实部和虚部均未产生明显的作用;当土壤体积含水量较高时(高于10%),随着土壤含盐量的增加,介电常数实部未产生明显变化,介电常数虚部则显著地呈线性增加的态势。因此根据土壤水分含量的高低以 $0.1 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 为分界点,将盐渍土介电模型的虚部通过分段函数表达,具体结果如下:

根据以上分析,将土壤溶液的离子浓度与含盐

量的关系表示为:

$$S_{m_v} \approx b \cdot \rho_b \cdot \frac{(S)^{S_r^\alpha}}{m_v} \quad (6)$$

其中: S_{m_v} 为土壤溶液离子浓度, m_v 为土壤体积含水量(cm^3/cm^3); S_r 为土壤饱和度; S 为土壤含盐量(g/kg^{-1}); ρ_b 为土壤容重(g/cm^3); α 为拟合系数。

土壤溶液电导率与土壤含盐量之间的关系为:

$$\sigma_w \approx a \cdot b \cdot \rho_b \frac{(S)^{S_r^\alpha}}{m_v} \approx c \cdot \rho_b \frac{(S)^{S_r^\alpha}}{m_v} \quad (7)$$

其中: a 为土壤溶液电导率及其离子浓度拟合系数,采用本次试验拟合结果0.145 6, b 为土壤溶液离子浓度与含盐量拟合系数, c 和 α 是基于试验测试数据的拟合系数,采用数值逼近法经过反复计算、调试和拟合确定其值。

改进后的盐渍土的介电常数的实部和虚部分别为:

$$\epsilon'_{sw} = \epsilon_{sw\infty} + \frac{\epsilon_{sw0} - \epsilon_{sw\infty}}{1 + (2\pi f \tau_{sw})^2} \quad (8)$$

当土壤体积含水量(m_v) $\leq 0.1(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$ 时,

$$\epsilon''_{sw} = \frac{2\pi f \tau_{sw} (\epsilon_{sw0} - \epsilon_{sw\infty})}{1 + (2\pi f \tau_{sw})^2} - 0.50 \cdot \frac{\rho_b}{2\pi f \epsilon_0} \cdot \frac{(S)^{S_r^{0.748}}}{m_v} \quad (9)$$

当土壤体积含水量(m_v) $> 0.1(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$ 时,

$$\epsilon''_{sw} = \frac{2\pi f \tau_{sw} (\epsilon_{sw0} - \epsilon_{sw\infty})}{1 + (2\pi f \tau_{sw})^2} - 1.01 \cdot \frac{\rho_b}{2\pi f \epsilon_0} \cdot \frac{(S)^{S_r^{0.86}}}{m_v} \quad (10)$$

3.3 盐渍土介电模型结果验证

基于改进的盐渍土介电模型对实验室配置的不同土壤样本的介电常数计算,并与微波网络分析仪的观测结果进行对比验证,结果如图5和图6所示。在模拟过程中盐渍土介电模型需要输入的相关参数分别是温度 T 为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$,土粒密度 ρ_s 为 $2.65 \text{ g}/\text{cm}^3$,土壤容重 ρ_b 为 $1.35 \text{ g}/\text{cm}^3$,砂土含量为40%,黏土含量为20%,频率为5.3 GHz。图5为介电常数实部模拟值和观测值对比结果,包括7个样本点各自的模拟对比结果和所有试验样本的模拟对比结果。图5表明,各样本点介电常数实部模拟结果与实测结果较为一致,模拟值与实测值之间的斜率约为1, R^2 除了Soil-20土壤样本均高于0.96,Soil-20土壤样本 R^2 为0.943,除了Soil-20和Soil-30均方根误差分别为1.673和1.993,其他土壤样本均方根误差均低于1.5。总体来看,考虑了盐分对土壤中自由水介电常数实部的影响作用后的介电实部模型能够很好地描述含盐土的介电常数实部特征,其中 R^2 为0.962,均方根误差为1.407。

图6为介电常数虚部模拟值和观测值对比结

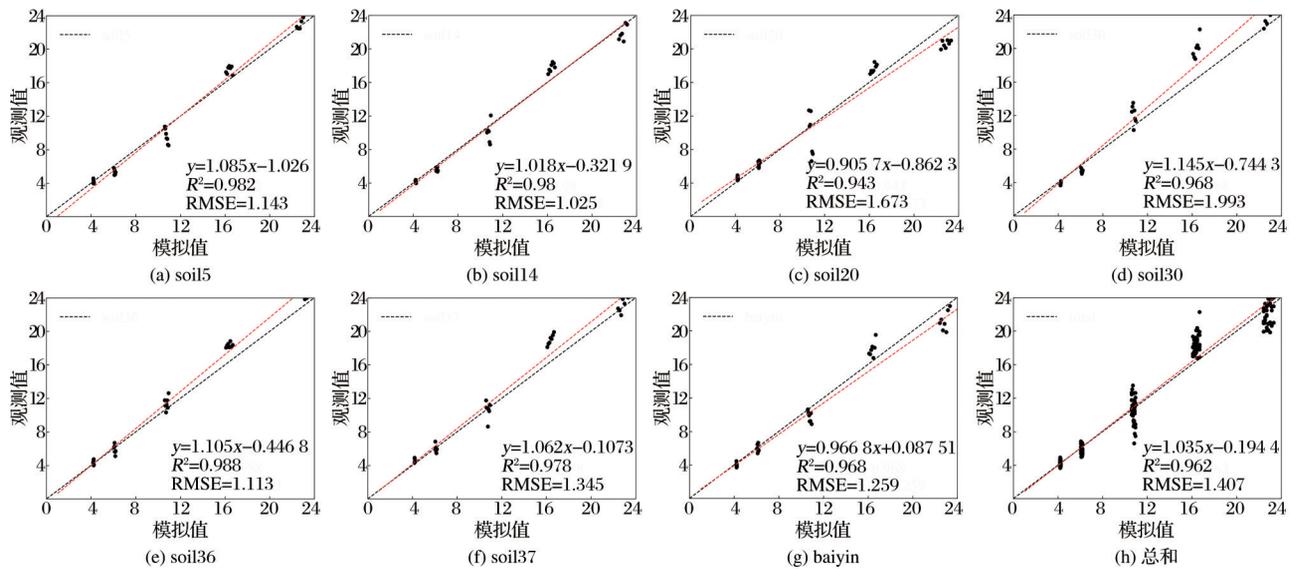


图 5 不同土壤样本介电常数实部实测值与模拟值对比

Fig.5 The comparison of the real part of the dielectric constant between simulated values and measured values with different soil samples

果,包括 7 个样本点各自的模拟对比结果和所有试验样本的模拟对比结果。总体来看,改进后的盐渍土介电模型可以较好地刻画盐分对介电常数虚部的影响,介电常数虚部模拟值和观测值之间的 R^2 约为 0.956,均方根误差为 0.966。就各样本点模拟结果来看,各样本点介电常数虚部模拟值与实测值之间均存在较高的相关性,除 Soil-20 土壤样本,其余各样本点 R^2 均高于 0.95, Soil-20 样本点 R^2 约为

0.908。除 Soil-20 土壤样本,其余各样本点的均方根误差均较小,其中 Soil-20 土壤样本均方根误差为 3.023,因为 Soil-20 为盐渍土壤,在实验室进行土壤盐分配比时未考虑土壤样本自身的盐分含量。此外 Baiyin 样本点介电常数实测值和模拟值的 R^2 分别为 0.968 和 0.951,均方根误差分别为 1.259 和 0.958,这也表明改进后的盐渍土介电模型对不同土壤类型具有一定的适用性。

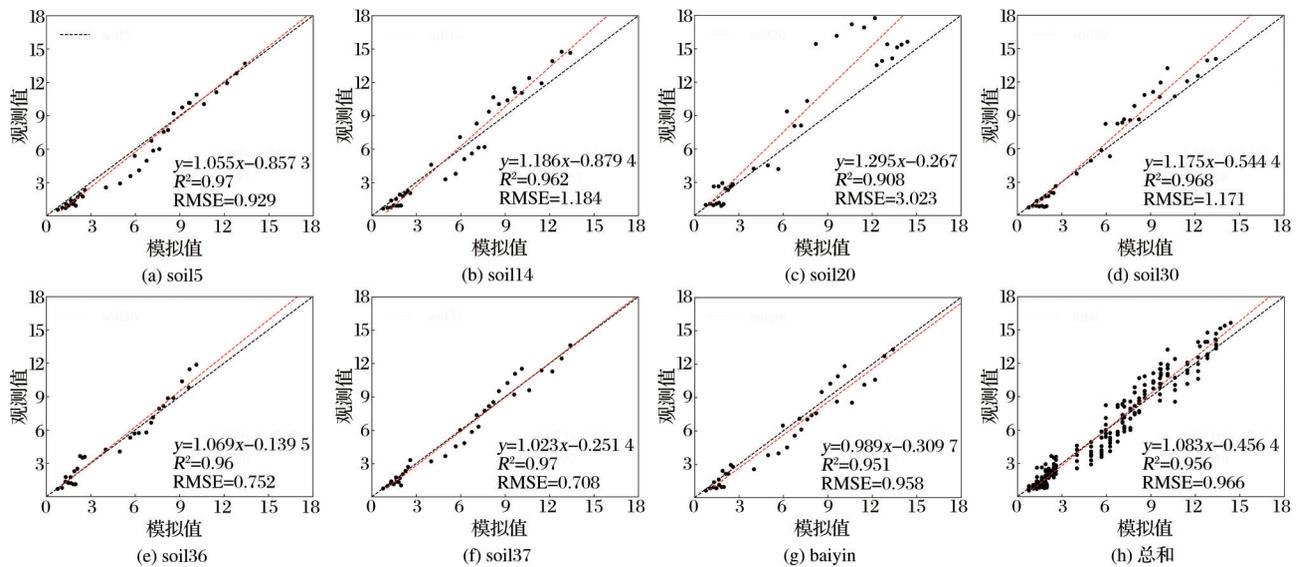


图 6 不同土壤样本介电常数虚部实测值与模拟值对比

Fig.6 The comparison of the imaginary part of the dielectric constant between simulated values and measured values with different soil samples

3.4 盐渍土介电模型对比分析

图 7 表示不同盐渍土介电模型虚部模拟结果,

为了对不同的盐渍土介电模型进行对比分析,在各模型中输入相同的参数,其中温度 T 为 $25\text{ }^\circ\text{C}$,土粒

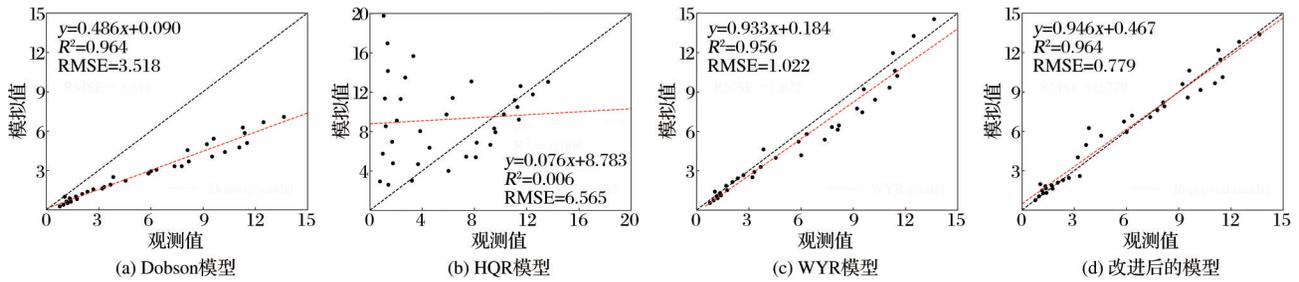


图7 不同盐渍土介电模型虚部模拟结果对比

Fig.7 The comparison of different dielectric models of the saline soil in the imaginary part

密度 ρ_s 为 2.65 g/cm^3 , 土壤容重 ρ_b 为 1.35 g/cm^3 , 砂土含量为 40%, 黏土含量为 20%, 频率为 5.3 GHz。结果表明, Dobson 模型、WYR 模型和修正后的盐渍土介电模型在土壤体积含水量较低的情况下均可以取得较好的模拟结果, 而 HQR 模型则存在明显的高估现象。相反当土壤体积含水量较高时, HQR 模型, WYR 模型和修正后的盐渍土介电模型模拟效果较优, Dobson 模型则存在明显低估现象。整体来看, 改进后的盐渍土介电模型较 Dobson 模型, HQR 模型和 WYR 模型均有显著提高。

4 结 语

土壤盐渍化作为土地退化的主要表现形式之一, 已成为制约区域经济增长、生态环境保护和农业可持续发展的主导因素。本文基于控制试验对配制的具有不同含水量和含盐量的土壤样本进行介电特征量测和分析, 同时结合 Stogryn 盐水介电模型和土壤溶液离子浓度、电导率、含水量和含盐量等参数对介电常数虚部的影响, 将饱和度这个关键参量引入盐渍土介电模型中, 提高盐渍土介电模型模拟精度。主要结论如下:

(1) 随着土壤体积含水量的增加, 介电常数的实部和虚部均呈增加特征。当土壤体积含水量较低时, 土壤含盐量对介电常数的实部和虚部均未产生明显的作用。当土壤体积含水量较高时, 介电常数实部则随着土壤含盐量的增加呈逐渐下降趋势, 介电常数虚部以增加态势为主。

(2) 通过综合分析介电常数与电导率、土壤溶液离子浓度、体积含水量和含盐量之间的关系, 在吴月茹模型的基础上, 将饱和度这一关键参量引入盐渍土的介电模型中, 对盐渍土介电模型进行修正, 结果发现修正后的盐渍土模型可以较好地刻画介电常数。此外, 将修正后的模型在白银采样点进行模拟验证, 同样取得较好的模拟结果, 表明修正后的盐渍土介电模型对不同土壤类型具有一定的

适用性。

参考文献 (References):

- [1] Allbed A, Kumar L. Soil Salinity Mapping and Monitoring in Arid and Semi-Arid Regions Using Remote Sensing Technology: A Review [J]. *Advances in Remote Sensing*, 2013, 2 (4): 373-385.
- [2] Muyen Z, Moore G A, Wrigley R J. Soil Salinity and Sodicty Effects of Wastewater Irrigation in South East Australia [J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 99(1): 33-41.
- [3] Li Jianguo, Pu Lijie, Zhu Ming, *et al.* The Present Situation and Hot Issues in the Salt-affected Soil [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(9): 1233-1245. [李建国, 濮励杰, 朱明, 等. 土壤盐渍化研究现状及未来研究热点 [J]. *地理学报*, 2012, 67(9): 1233-1245.]
- [4] Fan X, Pedroli B, Liu G, *et al.* Soil Salinity Development in the Yellow River Delta in Relation to Groundwater Dynamics [J]. *Land Degradation and Development*, 2012, 23 (2): 175-189.
- [5] Csillag F, László Pásztor, Biehl L L. Spectral Band Selection for the Characterization of Salinity Status of Soils [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1993, 43(3): 231-242.
- [6] Evans F H, Caccetta P A. Broad-scale Spatial Prediction of Areas at Risk from Dryland Salinity [J]. *Surveyor*, 2000, 29 (2): 33-40.
- [7] Wu W, Waleed M. Al-Shafie, *et al.* Soil Salinity Mapping by Multiscale Remote Sensing in Mesopotamia, Iraq [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7(11): 4442-4452.
- [8] Kalra N K, Joshi D C. Potentiality of Landsat, SPOT and IRS Satellite Imagery, for Recognition of Salt Affected Soils in Indian Arid Zone [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, 17(15): 3001-3014.
- [9] Engman, Edwin T. Progress in Microwave Remote Sensing of Soil Moisture [J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 1990, 16(3): 6-14.
- [10] Njoku E G, Jackson T J, Lakshmi V, *et al.* Soil Moisture Retrieval from AMSR-E [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(2): 215-229.
- [11] Zhao Tianjie. Recent Advances of L-band Application in the

- Passive Microwave Remote Sensing of Soil Moisture and Its Prospects[J]. *Progress in Geography*, 2018, 37(2): 198-213. [赵天杰. 被动微波反演土壤水分的L波段新发展及未来展望[J]. *地理科学进展*, 2018, 37(2): 198-213.]
- [12] Shi J C, Du Y, Du J Y, *et al.* Progresses on Microwave Remote Sensing of Land Surface Parameters[J]. *Science China Earth Sciences*, 2012, 55(7): 1052-1078.
- [13] Mao Kebiao, Tang Huajun, Zhou Qingbo, *et al.* A Survey of Soil Moisture Retrieval by Passive Microwave Remote Sensing[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2007, 22(3): 466-470. [毛克彪, 唐华俊, 周清波, 等. 被动微波遥感土壤水分反演研究综述[J]. *遥感技术与应用*, 2007, 22(3): 466-470.]
- [14] Kolassa J, Gentine P, Prigent C, *et al.* Soil Moisture Retrieval from AMSR-E and ASCAT Microwave Observation Synergy. Part 2: Product Evaluation[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 195(6): 202-217.
- [15] Draper C S, Walker J P, Steinle P J, *et al.* An Evaluation of AMSR - E Derived Soil Moisture over Australia[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(4): 703-710.
- [16] Zhao S, Wu Y, Liu S, *et al.* Dielectric Properties of Saline Soils and an Improved Dielectric Model in C-Band[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(1): 440-452.
- [17] Tashpolat N, Ding J, Yu D. Dielectric Properties of Saline Soil based on a Modified Dobson Dielectric Model[J]. *Journal of Arid Land*, 2015, 7(5): 696-705.
- [18] Stogryn A. Equations for Calculating the Dielectric Constant of Saline Water [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1971, 19(8): 733-736.
- [19] Klein L, Swift C. An Improved Model for the Dielectric Constant of Sea Water at Microwave Frequencies [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1977, 25(1): 104-111.
- [20] De Loor G P. Dielectric Properties of Heterogeneous Mixtures Containing Water. *The Journal of Microwave Power*, 1968, 3(2): 67-71.
- [21] Birchak J R, Gardner C G, Hipp J E, *et al.* High Dielectric Constant Microwave Probes for Sensing Soil Moisture [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1974, 62(1): 93-98.
- [22] Wang J R. The Dielectric Properties of Soil-Water Mixtures at Microwave Frequencies [J]. *Radio Science*, 1980, 15(5): 977-985.
- [23] Wobschall D. A Theory of the Complex Dielectric Permittivity of Soil Containing Water: The Semi-disperse Model[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, 1977, 15(1): 49-58.
- [24] Wang J R. Schmugge T J. An Empirical Model for the Complex Dielectric Permittivity of Soils as a Function of Water Content [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1980, 18(4): 288-295.
- [25] Dobson M C. Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil-Part II: Dielectric-Mixing Models[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1985, 23(1): 35-46.
- [26] Hallikainen M T, Ulaby F T, Dobson M C, *et al.* Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil-Part 1: Empirical Models and Experimental Observations[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1985, 23(1): 25-34.
- [27] Topp G C, Davis J L, Annan A P. Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurements in Coaxial Transmission Lines[J]. *Water Resources Research*, 1980, 16(3): 574-582.
- [28] Mironov V L, Dobson M C, Kaupp V H, *et al.* Generalized Refractive Mixing Dielectric Model for Moist Soils[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(4): 773-785.
- [29] Sreenivas K, Venkataratnam L, Narasimha P V. Dielectric Properties of Salt-Affected Soils [J] *International Journal of Remote Sensing*. 1995, 16(4): 641-649.
- [30] Shao Yun, Lü Yuan, Dong Qing. Study on Soil Microwave Dielectric Characteristic as Salinity and Water Content [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2002, 6(6): 416-423. [邵芸, 吕远, 董庆, 等. 含水含盐土壤的微波介电特性分析研究[J]. *遥感学报*, 2002, 6(6): 416-423.]
- [31] McColl K A, Ryu D, Matic V, *et al.* Soil Salinity Impacts on L-Band Remote Sensing of Soil Moisture [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(2): 262-266.
- [32] 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.]
- [33] Wu Yueru. Quantitative Retrieval of Dielectric Properties and Salt Content of Saline Soil by Microwave Remote Sensing [D]. Beijing: University of 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]. 北京:中国科学院大学, 2012.]
- [34] Rhoades J D, Manteghi N A, Shouse P J, *et al.* Soil Electrical Conductivity and Soil Salinity: New Formulation and Calibration [J]. *Soil Science Society of American Journal*, 1989, 53(2): 433-439.
- [35] Li Bin, Wang Zhichun, Chi Chunming. The Relationship between Salt Content and Electric Conductivity of Soda Solonetz in Daan City [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2006, 24(4): 168-171. [李彬, 王志春, 迟春明. 吉林省大安苏打碱土含盐量与电导率的关系[J]. *干旱地区农业研究*, 2006, 24(4): 168-171.]

Dielectric Properties of Saline Soil and an Improved Dielectric Model

Dong Leilei^{1,2}, Wang Weizhen^{1,3}, Wu Yueru⁴

(1. *Key Laboratory of Remote Sensing of Gansu Province, Heihe Remote Sensing Experimental Research Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences,*

Lanzhou 730000, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Key Laboratory of Land Surface Process and Climate Change in Cold and Arid Regions, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

4. College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract: The measurement and analysis of the dielectric constant of soil samples with different moisture and salinity are achieved based control experiment. The saturation is introduced to the dielectric model of salinity soil to improve simulation accuracy by taking the Stogryn model and the influence of soil solution ion concentration, conductivity, moisture content, and salt content for dielectric constant imaginary part into consideration. The results indicate that the soil salt content has little influence on both real part and imaginary part of dielectric constant when soil volumetric moisture content is low, while soil volumetric moisture content is high, the real part of the dielectric constant decreases with the increase of soil salt content, and the imaginary part of the dielectric constant increases. The improved dielectric model of salinity soil can well reveal the changes of dielectric constant, and it is also having a great effect in Baiyin soil samples. That is to say, the improved dielectric model can apply to different soil types.

Key words: Improved dielectric model; Dielectric constant; Saturation; Soil moisture; Soil salinity