

L波段对不同盐类土壤的微波介电特性分析

丁艳玲^{1,2}, 刘宝江¹, 李洋洋^{1,2}

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 土壤盐碱化是世界面临的一大难题。微波遥感探测土壤具有优势, L波段对土壤含水量和含盐量较为敏感。为了分析不同盐类对土壤介电特性的影响, 本文利用 L波段(1.43 GHz)微波谐振腔测量了我国盐碱土中普遍存在的3种盐类(NaCl , Na_2SO_4 , NaHCO_3)土壤样品的介电常数, 研究了土壤介电常数与含水量、含盐量和盐种类的关系。得出结论: 实部主要由土壤的含水量决定, 含盐量对实部的影响无明显规律; 虚部值随含水量和含盐量的增加而增大; 3种盐类土壤介电常数虚部随含盐量变化呈现不同的递增趋势, 在含盐浓度一定的条件下, 虚部值是 $\epsilon''_{\text{NaCl}} > \epsilon''_{\text{NaHCO}_3} > \epsilon''_{\text{Na}_2\text{SO}_4}$; 在某一含盐量点3种盐类土壤虚部随含水量变化的斜率不同, 以此能将3种盐类区分。该研究为建立含不同盐类土壤介电常数模型和微波遥感监测土壤盐碱化提供了实验的依据。

关键词: 土壤盐度; 介电常数; 盐种类; 微波谐振腔

DOI: 10.3724/SP.J.1047.2012.00376

1 引言

土壤盐碱化是土地荒漠化和土地退化的主要类型之一, 影响农作物生长、发育和产量。据估计, 全球已有近 $10 \times 10^8 \text{ hm}^2$ 的土壤受到不同程度的盐碱化, 占陆地面积的7%, 约有 $7700 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 的盐碱化土壤是由于人类的不合理活动造成的, 其中58%集中在灌溉区^[1]。我国的盐碱土总面积约为 $3600 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 耕地中盐碱化面积达到 $920.9 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 主要集中我国的西北、华北、东北及沿海地区, 其中, 西部盐碱土面积就占全国的69.03%^[2-4]。对此, 国内外利用可见光、近红外遥感技术监测盐碱土已做了大量的研究工作^[5-8]。光学遥感提取盐碱土信息主要是基于其光谱响应特征, 但存在光谱缺少一些盐碱种类的特定吸收光谱段; 卫星遥感的光谱分辨率较低, 盐分在土壤中随时间、空间、垂直方向变化的复杂性等因素的制约^[9], 受土壤含水量、太阳高度角、混合像元对影像光谱特征的影响, 提取盐碱土信息时, 易产生盐碱土和其他地物的混淆现象^[10]。与光学遥感相比, 微波遥感对探测特殊土壤具有优势, 如盐碱地、沙质海岸、沙漠、旱涝地

区和不合理灌溉地区等^[11]。P、C和L波段对土壤含水量和含盐量较为敏感, L波段能很好地区分开非盐碱土、盐土和碱土^[12]。

在微波遥感中, 用复介电常数表示物质的电学性质与电磁波能量的相互作用。土壤介电常数的变化直接影响雷达的后向散射系数和微波辐射计的亮度温度。水的介电常数认为是81, 干土的介电常数变化范围是2~4, 虚部的典型值小于0.05, 空气的介电常数是1。湿土一般认为是由土壤固体、空气穴、结合水和自由水组成的混合物。因此, 土壤含水量是土壤介电常数的主要影响因子。国内外对土壤介电常数和含水量的关系进行了大量的研究, Newton等^[13]在0.1GHz和16GHz频率范围内测量了土壤介电常数与不同含水量的关系, 得出土壤介电常数随土壤含水量的增加而增大。James R. Wang等^[14]给出了土壤介电常数与含水量的经验模型。Dobson等^[15]在1.4GHz和18GHz频率范围内, 将理论模型和半经验模型与实验测量结果相结合, 研究土壤微波介电常数。邵芸等^[16]利用微波矢量网络分析仪研究了介电常数的实部和虚部与频率、盐度、含水量的关系, 得出的结论是土壤介

收稿日期: 2011-12-27; **修回日期:** 2012-05-22.

基金项目: 国家自然科学基金项目(40576077); 国家科技支撑项目(2006BAC01A08)。

作者简介: 丁艳玲(1986-), 女, 硕士研究生, 主要从事微波遥感方面的研究。E-mail: sara-0725@163.com

*** 通讯作者:** 刘宝江(1963-), 男, 博士, 研究员, 主要从事微波遥感仪器研制及特定目标的微波遥感机理研究。

E-mail: liubj@neigae.ac.cn

电常数的实部由土壤的含水量决定;土壤介电常数的虚部不仅随含水量的增加而增大,还与土壤溶液的含盐量有着密切的关系。熊文成等^[17]利用最佳拟合方法建立了含 NaCl 的土壤介电常数经验模型。Aly 等^[18]通过对 RADASAT-1 雷达影像土壤样品盐度、介电常数的提取分析,建立了雷达后向散射系数与介电常数的关系。但目前,对含不同盐类的土壤介电特性的实验观测和研究很少。本实验根据我国盐碱土中普遍存在的盐种类,设计了含 NaCl、Na₂SO₄ 和 NaHCO₃ 3 种盐类土壤介电常数的实验。该研究旨在实验室利用 L 波段微波谐振腔技术测量以上 3 种盐类土壤在不同含水量、含盐量条件下的介电常数,研究土壤介电常数虚部与土壤含盐种类的关系,探讨 NaCl、Na₂SO₄ 和 NaHCO₃ 3 种盐类土壤的介电特性,从而为建立不同盐类土壤介电常数模型提供实验基础。

2 土壤微波介电常数的测量实验

2.1 微波复介电常数

根据有损介质的麦克斯韦方程推出物质的复介电常数的表达式为:

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

其中,实部 ϵ' 表示电磁波在介质中传播的相位变化,描述电磁波的传输与反射特性,以及电磁波在介质中的传播速率,即介质中的电磁波长;虚部 ϵ'' 表示介质对电磁波的损耗,是由介质的电导率引起的。

2.2 微波谐振腔技术的测量

介电常数的测量方法很多,可分为时域测量法和频域测量法两类。频域测量法又可分为传输线法、谐振腔法、空间波法等方法^[19]。其中,谐振腔法的准确程度很高,Ho 等^[20-21]利用谐振腔技术在 1.413GHz 和 2.65GHz 频率上精确地测量了海水的介电常数。本实验选用 TE₀₁₁ 模圆柱谐振腔,由于其圆柱谐振腔中心轴线处的电场最弱,可允许插入较大直径和较大损耗的圆柱样品。其原理:当被测介质放入谐振腔时,使腔体的谐振频率和品质因数发生变化,建立介质介电特性与谐振频率和品质因数的关系,主要测量空腔的谐振频率 f_0 、品质因数 Q_0 和被测样品的谐振频率 f_1 、品质因数 Q_1 。当土壤样品放入腔体内,样品对腔体的电场产生干

扰,如果样品造成的干扰很小,被测样品介电常数的实部和虚部与腔体谐振频率和品质因数存在如下关系:

$$\epsilon'_r = 1 + \frac{0.325}{B} \left(\frac{a}{b} \right)^2 \frac{f_0 - f_1}{f_0} \quad (2)$$

$$\epsilon''_r = \frac{0.325}{B} \left(\frac{a}{b} \right)^2 \frac{1}{2} \left(\frac{1}{Q_1} - \frac{1}{Q_0} \right) \quad (3)$$

其中: $B = J_1^2(3.832b/a) - J_0(3.832b/a) \cdot J_2(3.832b/a)$, J_0 、 J_1 、 J_2 分别为第一类零阶、一阶和二阶 Bessel 函数;这里 $a=150\text{mm}$ 为圆柱腔体的内半径, $b=5\text{mm}$ 为样品管的内半径; f_0 和 Q_0 分别是空腔的谐振频率和品质因数, f_1 、 Q_1 分别是样品的谐振频率和品质因数。

在测量土壤样品前,先矫正谐振腔系统,分析其测量精度。本实验采用蒸馏水配制了 5 种浓度分别为 0.5%、1%、2%、5%、10% 的 NaCl 溶液,将其装入样品管。在室温条件下,分别测量得到谐振频率 f_1 和品质因数 Q_1 ,代入公式(2)和(3)得到溶液 ϵ'_r 和 ϵ''_r 的测量值。利用 Strogyn 等^[22]经验公式计算 NaCl 溶液的介电常数 ϵ'_{BNaCl} 和 ϵ''_{NaCl} ,作为标准溶液值。将测量值与计算值进行对比分析,得到谐振腔系统测量介电常数:实部相对误差为 0.41%,虚部相对误差为 2.9%。

2.3 样品的制备实验

盐碱土中积聚的盐类主要是由 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 3 种阳离子和 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 等阴离子组成。本实验为简化起见,只考虑了 Na^+ 和以上前 3 种不同阴离子组合成 NaCl、Na₂SO₄、NaHCO₃ 3 种不同盐类对土壤介电特性的影响。首先,将野外采集的土壤去除根系和石粒,用研钵研磨,过 0.5mm 的分样筛,然后,对土壤进行淋溶去除土壤中含有的盐分,最后,放入 105℃ 的干燥箱内 24h 去除水分。表 1 为实验所用的土壤样品的物理性质。称取 20g 土壤,土壤含盐量分别为 0%、0.25%、0.5%、0.75%、1%、1.5% 和 2%,将某一浓度(例如:0.5%)配制成不同体积含水量的含水、含盐土壤样品,体积含水量分别为 20%、25%、30% 和 35%,由于 NaHCO₃ 的溶解度较低,没有配制含盐量为 2% 的样品,共产生 80 个土壤样品。将配制好的样品密封放置 48 h,使溶液和土壤充分混合,而后将土壤样品装入二氧化硅试管中准备测量。利用微波谐振腔测量系统对配制好的土壤样品进行

测量,每个土壤样品测量 4 次,取平均值作为最终的测量结果。

表 1 实验中所用的土壤样品的物理性质
Tab. 1 Physical properties of the soil samples

砂粒(%)	粉粒(%)	粘粒(%)	电导率(us/cm)	PH
33.49	54.32	12.19	63	6.22

3 实验结果与分析

3.1 3 种盐类土壤介电常数实部与体积含水量、含盐量的关系

从图 1 中可以看出:土壤介电常数的实部 ϵ' 在 L 波段受土壤体积含水量 m_v 的影响很大,其值随 m_v 的增加而几乎成线性增大。例如:土壤含盐种类为 Na_2SO_4 , $m_v=20\%$ 时, $\epsilon'=6.37-9.54$; $m_v=25\%$, $\epsilon'=9.02-10.84$; $m_v=30\%$, $\epsilon'=10.69-11.60$; $m_v=35\%$, $\epsilon'=14.68-16.76$ 。在体积含水量达到 35% 时,实部值迅速增大,该体积含水量使

土壤达到淤泥状态,水的介电特性起到很大作用。其次,在不同含盐量之间,实部没有明显的变化规律,表明含盐量对实部的影响较小。

3.2 3 种盐类土壤介电常数虚部与体积含水量、含盐量和盐种类的关系

根据公式(1)有介电常数虚部是由电导率引起的,含盐土壤电导率主要受土壤含水量和含盐量的影响。在含水率为 15%~30% 之间变化时电导率的改变最为显著,且两者近似为线性关系;在一定浓度下,电导率随浓度的增大而增大,浓度继续增大时,其电导率呈下降趋势^[23]。图 2 显示土壤介电常数虚部随体积含水量和含盐量的增大而增大,虚部除了受水的介电常数影响外,当土壤体积含水量不断增加时,大量的盐溶于土壤,土壤溶液中自由离子数增多,土壤电导率增大,导致虚部增大;在含水量一定且在盐的溶解度范围之内,自由离子数随盐分的增大而增多,虚部随含盐量的增加而增大。此外,从图 3 可见,3 种不同盐类土壤的虚部随含盐

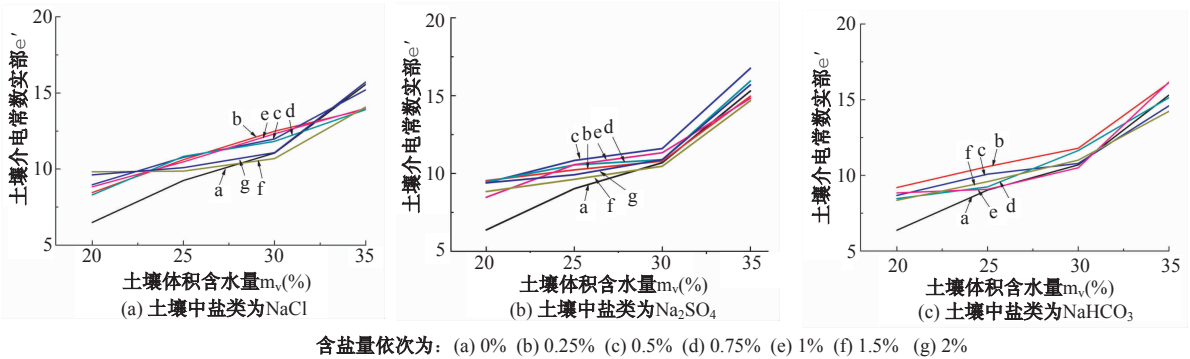


图 1 土壤介电常数实部与体积含水量的关系
Fig. 1 Effects of volumetric moisture on real components of the dielectric constant of the three salt soils

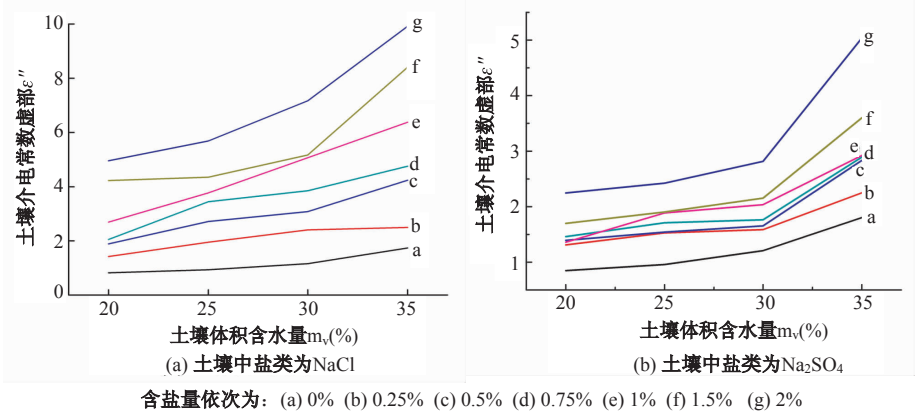


图 2 土壤介电常数虚部值与体积含水量的关系
Fig. 2 Effects of volumetric moisture on imaginary components of the dielectric constant of the three salt soils

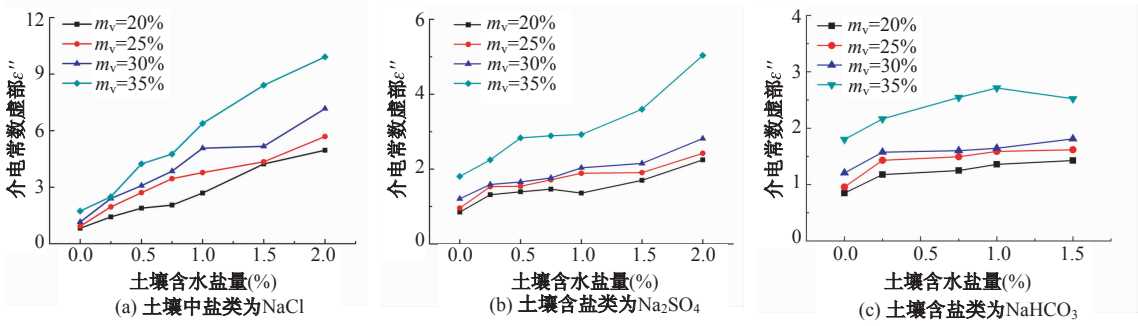


图3 土壤介电常数虚部与土壤盐量的关系

Fig. 3 Effects of salinity on imaginary components of the dielectric constant of the three salt soils

量变化呈现不同的递增趋势。含 NaCl 土壤虚部随含盐量几乎呈线性增大。对于含 Na_2SO_4 土壤和含 NaHCO_3 土壤来说,虚部的增长速度较为缓慢,当体积含水量达到 35% 接近饱和时,虚部有明显的增大。当 $m_v = 20\%$, $S = 0.25\%$ 时, $\epsilon''_{\text{NaCl}} = 1.42$, $\epsilon''_{\text{NaHCO}_3} = 1.18$, $\epsilon''_{\text{Na}_2\text{SO}_4} = 1.31$; 当 $m_v = 35\%$, $S = 1.5\%$ 时, $\epsilon''_{\text{NaCl}} = 8.41$, $\epsilon''_{\text{NaHCO}_3} = 2.52$, $\epsilon''_{\text{Na}_2\text{SO}_4} = 3.60$ 。图 4 考虑了盐离子浓度对土壤介电常数虚部的影响。为了使盐离子浓度一致,配制 NaCl、 NaHCO_3 的摩尔浓度为 0、0.3、0.75 和 1.25 mol/L, Na_2SO_4 溶液的摩尔浓度分别为 0、0.1、0.25 和 0.42 mol/L。在含盐浓度相同的条件下,3 种盐类土壤介电常数虚部都随溶液浓度的增大而增大,含 NaCl 土壤虚部明显大于含 Na_2SO_4 和含 NaHCO_3 土壤虚部,含 Na_2SO_4 和含 NaHCO_3 的虚部值较为接近,总体特征是 $\epsilon''_{\text{NaCl}} > \epsilon''_{\text{NaHCO}_3} > \epsilon''_{\text{Na}_2\text{SO}_4}$ 。这是因土壤电导率除了受土壤含盐量影响外,不同盐离子自身特性的差异及其与土壤的作用机理

的不同也会影响电导率。这 3 种盐类的土壤介电常数虚部呈现不同的变化规律表明:土壤介电常数虚部除了受含盐量的影响外还受到盐离子种类的影响,这为微波遥感探测不同盐碱土类型提供了实验基础。

3.3 3 种盐类土壤介电常数虚部与含水量的斜率分析

分别对 3 种盐类土壤的介电常数虚部与含水量进行线性拟合,得到 3 种盐类土壤介电常数虚部在不同含盐量条件下随含水量变化的斜率。在图 5 中,含 NaCl 土壤介电常数虚部随含水量变化的速率 K_{NaCl} 最大并随含盐量增大而增大,与其余两种盐差异明显;在含盐量小于 0.75% 时, $K_{\text{Na}_2\text{SO}_4}$ 和 K_{NaHCO_3} 相近,随含盐量的增大而无明显变化,当含盐量达到 1.5% 时, $K_{\text{Na}_2\text{SO}_4}$ 大于 K_{NaHCO_3} , 两者差异明显。根据这三者的特性,能够明显地将 NaCl 区分,只有含盐量达到 1% 时,才能区分 Na_2SO_4 和 NaHCO_3 。

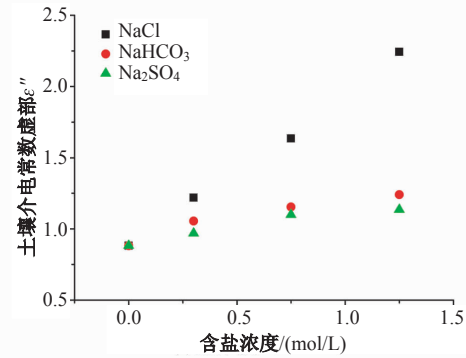


图4 3 种盐类的土壤介电常数虚部值与含盐浓度的关系

Fig. 4 Effects of saline concentration on imaginary components of the dielectric constants of the three salt soils

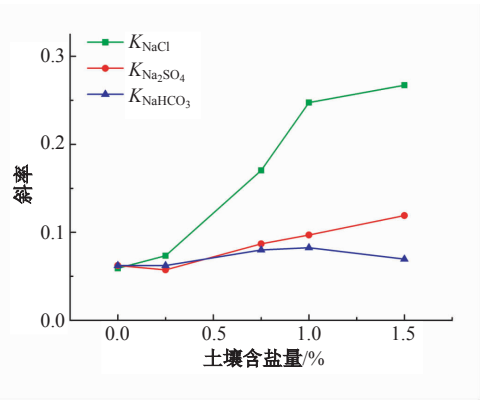


图5 土壤介电常数虚部的斜率

Fig. 5 Slopes of imaginary components of the dielectric constants of the three salt soils

4 结论与讨论

本研究利用微波谐振腔在 L 波段测量了不同盐种类的土壤样品,在不同含水量、含盐量条件下的复介电常数,探讨了土壤介电常数的特性,为微波遥感技术监测土壤盐碱化提供了实验理论基础。得出的结论:

(1) 将微波谐振腔微扰技术应用到土壤介电常数的测量中,在 L 波段测量土壤介电常数并获得了可靠的实验资料。

(2) 土壤介电常数实部随土壤体积分含水量的增加而增大。在不同含盐量条件下,实部无明显变化,表明含盐量对实部的影响较小。

(3) 土壤介电常数虚部受含水量、含盐量及盐种类的影响。虚部随含水量和含盐量的增加而增大;3 种盐类土壤的虚部随含盐量的变化呈现不同的递增趋势,并随含盐浓度的增大而增大。在同一含盐浓度下,实验数据显示: $\epsilon''_{\text{NaCl}} > \epsilon''_{\text{NaHCO}_3} > \epsilon''_{\text{Na}_2\text{SO}_4}$ 。

(4) 利用 3 种土壤介电常数虚部在某一含盐量下,其值随含水量变化的斜率不同,能达到区分这 3 种盐类的目的。

(5) 3 种盐类土壤具有不同的介电特性,在建立含盐土壤介电常数模型时,应该考虑不同盐类对土壤介电常数虚部的影响。

上述研究中,今后对土壤含盐种类与土壤作用的机理,如土壤—水—盐离子的相互作用机理,在理论上将不同盐类土壤介电特性进行深入研究。另外,对于能正确反映土壤介电常数与盐分关系的实用经验模型还没有提出,这一模型的建立将有助于微波遥感更准确地获取土壤盐分信息。

参考文献:

- [1] Metternicht G I, Zinck J A. Remote sensing of soil salinity: potentials and constraints[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003 (1): 1 - 20.
- [2] 杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望[J]. *土壤学报*, 2008 (5): 837 - 845.
- [3] 翁永玲,宫鹏. 土壤盐渍化遥感应用研究进展[J]. *地理科学*, 2006, 26(3): 369 - 376.
- [4] 刘欢,刘荣高,刘世阳. 干旱遥感监测方法及其应用发展[J]. *地球信息科学学报*, 2012, 14(2): 232 - 239.
- [5] Yu R H, Liu T X, XU Y P, *et al.* Analysis of salinization dynamics by remote sensing in Hetao Irrigation Dis-

trict of North China[J]. *Agricultural Water Management*, 2010(97): 1952 - 1960.

- [6] Rodríguez P G, González M E P, Zaballos A G. Mapping of salt-affected soils using TM images[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2007, 28(12): 2713 - 2722.
- [7] 张飞,塔西甫拉提·特依拜,丁建丽. 渭干河—库车河三角洲绿洲盐渍化土壤特征研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2007, 25(2): 146 - 161.
- [8] 张丽娜,程晓,伍吉仓,等. 基于决策树分类的张北土壤盐碱化研究[J]. *安徽农业科学*, 2009, 37(25): 12103 - 12104.
- [9] 亢庆,于嵘,张增祥,等. 土壤盐碱化遥感应用研究进展[J]. *遥感技术与应用*, 2005, 20(4): 447 - 454.
- [10] 塔西甫拉提·特依拜,吐尔逊·艾山,海米提·司马义,等. 土壤盐渍化遥感监测研究进展综述[J]. *新疆大学学报*, 2008, 25(1): 1 - 7.
- [11] Metternicht G I. Analyzing the relationship between ground based reflectance and environmental indicators of salinity processes in the Cochabamba Valley (Bolivia)[J]. *International Journal of Ecology and Environmental Sciences*, 1998(24): 359 - 370.
- [12] Metternicht G I, Zinck J A. Remote sensing of soil salinity: potentials and constraints[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003(85): 1 - 20.
- [13] Newton R W. Microwave remote sensing and its application to soil moisture detection[R]. *Remote Sensing Center, Texas A&M University, College Station, TX, Tech. Rep. RSC - 81*, 1977.
- [14] James R W, Schmugge T J. 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.
- [15] Dobson M C, Ulaby F T, Hallikainen M T, *et al.* Microwave dielectric behavior of wet soil-Part 11: Dielectric mixing models[J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1985, GE-23: 35 - 46.
- [16] 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.
- [17] 熊文成,邵芸. 氯化钠盐土壤介电虚部特性的初步研究[J]. *遥感学报*, 2006, 10(2): 279 - 286.
- [18] Aly Z, Bonn F J, Magagi R. Analysis of the backscattering coefficient of salt-affected soils using modeling and RADARSAT-1 SAR data[J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 2007, 45(2): 332 - 341.
- [19] 陶勇剑. 微波介质材料介电常数测试方法研究[D]. 南昌大学论文, 2005, 4 - 17.

- [20] Ho W W, Hall W F. Measurements of the dielectric properties of seawater and NaCl solutions at 2.65 GHz [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1973(78): 6301 - 6315.
- [21] Ho W W, Love A W, Melle M J V. Measurements of the dielectric properties of sea water at 1.43 GHz [R]. NASA Contractor Report CR-2458, Dec, 1974.
- [22] Stogryn A. Equations for calculating the dielectric constant of saline water [J]. *IEEE Trans, MTT-19*, 1971, 733 - 736.
- [23] 孙宇瑞. 土壤含水率和盐分对土壤电导率的影响 [J]. *中国农业大学学报*, 2000, 5(4): 39 - 41.

Study on Microwave Dielectric Properties of Different Salt Soils at L-Band

DING Yanling^{1,2}, LIU Baojiang¹ and LI Yangyang^{1,2}

(1. *Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, CAS, Changchun 130012, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: Soil salinity caused by natural or human-induced processes is a severe environmental hazard all over the world. Approximately 955 M ha of soil have been affected by primary salinization worldwide, whereas secondary salinization affects approximately 77 M ha, with 58% of these in irrigated areas. This requires careful monitoring of soil salinity and mapping of the extent of salinized soils. Microwave remote sensing can significantly contribute to the detection of changes in salt-affected surface features. This paper describes a L-band resonant cavity technique at 1.43 GHz used to measure the complex dielectric constants of salt soils which contain NaCl, Na₂SO₄ and NaHCO₃ respectively. The purpose of the new measurements is to evaluate the real components and imaginary components of dielectric constants as a function of water content, salinity and types of salts. The measurements on the dielectric properties of different salt soils show that the real components are strongly affected by soil moisture, for they increase with the increment of water content, whereas salinity has little influence on them, they tend toward constants. The imaginary components are not only dependent on water content and salinity but also on types of salts. Besides increasing with water content, the imaginary components of the three salt soils show different increasing trends with the increment of salt content. The value of imaginary component is $\epsilon''_{\text{NaCl}} > \epsilon''_{\text{NaHCO}_3} > \epsilon''_{\text{Na}_2\text{SO}_4}$ under the condition of same saline concentration. Moreover, the slopes of the three salt soils vary with the change of water content that can distinguish the three salt soils. This study proves that L-band has a good sensitivity to soil salinity, and provides an experimental basis for the salt soil dielectric constant model building and future soil salinity monitoring using microwave remote sensing.

Key words: soil salinity; dielectric constant; types of salts; microwave resonant cavity