

DOI: 10.11766/trxb201912230443

赵钟声, 许景辉, 王一琛, 王雷, 邵明焯. 基于双线性理论的黏质土介电谱与含水量频域测量研究[J]. 土壤学报, 2021, 58(3): 685–693.
ZHAO Zhongsheng, XU Jinghui, WANG Yichen, WANG Lei, SHAO Mingye. Measurement of Dielectric Spectra and Water Content Frequency Domain of Clay Soil Based on Bilinear Theory[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(3): 685–693.

基于双线性理论的黏质土介电谱与含水量频域测量研究*

赵钟声¹, 许景辉^{1, 2, 3†}, 王一琛⁴, 王雷¹, 邵明焯⁴

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学中国旱区节水研究院, 陕西杨凌 712100; 4. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 黏粒含量较多的黏质土(黏土类、黏壤土类)介电极化复杂,含水量测量混合介电模型研究较少。通过双线性介电测量理论对黏质土 4 种不同质地土壤分别配置 0%、5%、10%、15%、20%、25%、30% 体积含水量,在 0.001~3 GHz 频段进行介电谱测量。分析发现,介电值(复介电常数实部、视在介电常数)在 300.4~2 952 MHz 内较为稳定;不同体积含水量下对应的介电值显著不同;1 050~1 503 MHz 为黏质土含水量频域测量理想频段,1503 MHz 为最佳频率点。在最佳频率点上,构建了 2 个黏质土含水量频域测量经验模型。对黏质土土样和验证样本进行分析,复介电实部模型计算值与含水量实测值对比,其 R^2 均大于 0.9600, RMSE 均小于 0.0190, RPD 均大于 5.000。对黏质土土样分析,视在介电模型计算值与含水量实测值对比,两者 $R^2=0.9669$, RMSE=0.0176, RPD=5.515, 与 Topp 模型、Roth 模型和 Mallick 模型相比,视在介电模型计算值与含水量实测值相关性更优。验证样本视在介电模型计算值与含水量实测值对比,两者 $R^2=0.9537$, RMSE=0.0208, RPD=4.602。研究表明,双线性理论对黏质土含水量介电法测量有较好适应性,本文构建的 2 个经验模型对黏质土特性土壤含水量有较高测量精度。

关键词: 双线性;黏质土;介电谱;土壤含水量

中图分类号: S152.7; TP183 **文献标志码:** A

Measurement of Dielectric Spectra and Water Content Frequency Domain of Clay Soil Based on Bilinear Theory

ZHAO Zhongsheng¹, XU Jinghui^{1, 2, 3†}, WANG Yichen⁴, WANG Lei¹, SHAO Mingye⁴

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Areas, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. China Water Conservation Research Institute, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】 As clayey soil contains much clay and clay loam, it is rather complex in dielectric polarization. However, not much study has been done on mixed dielectric models for measurement of water content. 【Method】 In this study, based on

* 陕西水利科技计划项目(2014slkj-18)和国家重点研发计划项目(2017YFC0403203)资助 Supported by the Shaanxi Water Conservancy Science and Technology Plan Project (2014slkj-18) and National Key R & D Project of China (2017YFC0403203)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: x36936@163.com

作者简介: 赵钟声, 男, 山东日照人, 硕士研究生, 主要从事土壤介电测量、农业生态水文方面研究。E-mail: 728164785@qq.com

收稿日期: 2019-12-23; 收到修改稿日期: 2020-03-30; 网络首发日期(www.cnki.net): 2020-06-10

the theory for bilinear dielectric measurement, dielectric spectra were determined, separately of soil samples, 0, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, and 30% in volumetric water content, prepared out of each of the 4 clay soils different in texture were determined, separately, within the frequency band of 0.001~3 GHz. 【Result】 Dielectric value (the real part of complex dielectric constant and apparent dielectric constant) is relatively stable within 300.4~2 952 MHz, but varies sharply with volumetric water content. The band of 1 050~1 503 MHz is the ideal frequency band in the frequency domain for predicting clay water content, and 1503 MHz is the optimal frequency point. At this point, two empirical models for predicting water contents in clayey soils in the frequency domain were constructed. In analyzing clay samples and validation samples, comparisons of the values predicted with the real part of the complex dielectric model with the measured values of water content show that the predictions are all higher than 0.9600 in R^2 , lower than 0.0190 in RMSE, and higher than 5.000 in RPD. In analyzing clay soil samples, comparisons between the values predicted with the apparent dielectric model formula and the measured values show that $R^2 = 0.9669$, RMSE = 0.0176, and RPD = 5.515. Compared with the Topp model, Roth model and Malicki model, the apparent dielectric model yields values much closer to the measured value. In analyzing verification samples, comparison between the values predicted with the apparent dielectric model and the measured values show that $R^2 = 0.9537$, RMSE = 0.0208, and RPD = 4.602. 【Conclusion】 The bilinear theory is quite high in applicability to the measurement of clay soil moisture content with the dielectric method. The two empirical models constructed in this paper are fairly high in accuracy in predicting water content in soils clayey in texture.

Key words: Bilinear; Clayey soil; Dielectric spectrum; Soil water content

土壤水分准确测量一直是农田灌溉等领域的研究重点,当前土壤含水量测量方法主要有:烘干法、射线法、张力计法、电学法、介电法、遥感法、中子法、核磁共振法等^[1-4],其中烘干法最为经典,准确性最高,但也存在破坏土壤结构、不能原位测量、自动化程度低等缺点^[5-6]。介电法与其他方法相比,其测量精度高,自动化程度较好,对提高农田信息感知技术具有重要意义。当前介电法测量土壤含水量介电测量模型主要有,Topp通过分析大量实验数据提出的经典 Topp 模型^[7];基于原始 Topp 模型对土壤物理机制缺陷研究,Roth 提出修正后的 Roth 模型^[8];Herkelrath 等^[9]基于土壤体积含水量在 12%~21%范围内含水量与介电常数平方根呈线性相关性关系,提出土壤介电常数的平方根与含水量通用公式;Malicki 等^[10]考虑土壤种类对介电常数影响,对 Herkelrath 提出的通用公式进行修正并添加了土壤容重影响因子。在国内,朱安宁等^[11]在 Herkelrath 提出的通用公式基础上,针对四种典型土壤确定了模型参数;巨兆强^[12]改进了土壤含水量与介电常数平方根的关系式。研究发现,土壤中黏粒含量较多时,黏粒吸附性加强,会引起不同程度的吸附水变化,对土壤含水量介电常数测量有显著影响^[13-15]。Gong 等^[16]探究了黏土中介电常数的平方根与堆积密度以及体积含水量之间存在的线性关系;Cosenza 和 Tabbagh^[17]、宋雷等^[18]对黏土和

黏壤土中含水量与介电常数的影响关系进行了相应研究。对特性土壤种类含水量介电测量模型的研究,Robinson 和 Friedman^[19]提出一种较大颗粒土壤含水量介电测量模型;Alharthi 和 Lange^[20]、Ferre 等^[21]对砂质土介电常数与含水量关系进行探究并给出相应含水量介电测量模型。

Cole 等^[22]、Berberian^[23]、Folgerø 和 Tjomsland^[24]提出基于双线性理论可将散射参数 (S_{11}) 转换为复介电常数,Estevez 和 Jones^[25]建立了双线性介电测量模型,并对饱和含水量下粉土介电谱进行测量,验证了双线性介电测量理论对土壤介电测量的适用性。

基于以上研究,本文针对黏粒含量较多的黏质土(黏土类、黏壤土类),选择 4 种不同质地土壤(黏土类:棕壤土、红壤土;黏壤土类:黄棕壤土、黄壤土),通过矢量网络分析仪 (Anritsu-MS2028B) 在 0.001~3GHz 频段,采用双线性介电测量模型测得土壤不同含水量下介电谱(复介电常数、视在介电常数)。分析介电谱与含水量规律,建立黏质土含水量介电测量经验模型式,为黏质土介电法测量含水量提供一种新颖研究理论与方法。

1 材料与方法

1.1 土样采集

4 种不同质地黏质土物理特性如表 1 所示。棕

表 1 4 种不同质地黏质土物理特性

Table 1 Physical properties of the test soil relative to texture

土壤名称 Soil name	质地 Texture	黏粒 Clay /%	粉粒 Silt /%	砂粒 Sand /%	容重 Bulk density / (g.cm ⁻³)	填装密度 Packing density / (g.cm ⁻³)
棕壤土 Brown loam soil	粉砂质黏土	38.35	40.36	21.29	1.28	1.296
红壤土 Red soil	壤质黏土	28.53	42.56	28.91	1.51	1.567
黄棕壤土 Yellow brown soil	黏壤土	24.40	39.69	35.91	1.47	1.381
黄壤土 Yellow loam soil	粉砂质黏壤土	20.56	46.25	33.19	1.39	1.393

壤土采集于山东半岛莱西市，土层较厚，质地表较黏重，取土深度 30~40 cm。红壤土采集于云南省东北部曲靖市，土质小颗粒状、易吸水，取土深度 30~40 cm。黄棕壤土采集于淮河流域江苏省宿迁市，土壤铝化作用不强，砂粒含量占 1/3 左右，土性黏度适中，取土深度 30~40 cm。黄壤土采集于陕西关中地区渭南市，土壤类型以壤土为主，取土深度 40~50 cm。

1.2 实验设计

黏质土土样去除杂后研磨，过 18 目筛（孔径 2 mm），105℃烘箱干燥 24 h。根据土样各填装密度，采用去离子水配比 0、5%、10%、15%、20%、25%、30% 体积含水量土样各 3 份，装入 PVC 管（高 55 mm，直径 66 mm）中，室内常温下静置 12 h 以

上。考虑环境温度对土壤介电值测量影响，实验在室内常温（23±2℃）下进行，所用矢量网络分析仪为 Anritsu-MS2028B，夹具采用 3.5 mm 末端开路特定探头，采样点数为 632，测量频域 0.001~3 GHz。每份土样测 3 次，9 次测量结果取平均值。测量后土样，在探头接触部位用铝盒取每个 PVC 管中土样各 3 份，用烘干法计算所测土样实际体积含水量，取 3 份土样平均值作为该土样体积含水量实测值。

1.3 模型验证样本设计

土壤含水量介电测量模型验证，本研究在黏质土土样基础上同时配置 4 种不同黏粒含量验证样本进行模型评价分析。验证样本土样物理特性如表 2 所示，土样处理与介电值测量同 1.2 实验设计和方法过程相同。

表 2 验证样本土壤物理特性

Table 2 Physical properties of validation samples

序号 Number	质地 Texture	黏粒 Clay content /%	粉粒 Silt/%	砂粒 Sand /%	填装密度 Packing density / (g.cm ⁻³)
	1	黏土	52.63	20.00	27.37
2	砂质黏土	42.65	18.40	38.95	1.16
3	粉砂黏壤土	24.32	60.86	14.82	1.27
4	黏壤土	16.56	40.12	43.32	1.61

1.4 双线性理论介电测量原理

时域中对基于同轴线几何形状介电测量单元，未知导纳 y_x 和样本导纳 y_s 关系如式 (1) [26]：

$$y_x - y_s = \frac{A^* \rho_x^* + c^*}{1 - B^* \rho_x^*} \quad (1)$$

式中， y_x 为未知导纳，下同； y_s 为样本导纳，下同；

A^* 、 B^* 为探头参数，下同； ρ_x^* 为反射系数，下同； C^* 为平滑系数。

Cole 使用式 (2) 的幂级数展开描述了导纳与相对样本 ε_x^* 之间的关系：

$$y_x = i \left(\frac{\omega r d}{c} \right) \cdot \frac{\varepsilon_x^*}{1 - a \times \left(\frac{\omega r d}{c} \right)^2 \times \varepsilon_x^*} \quad (2)$$

式中, a 、 b 为系数, 下同; i 为电流密度, 下同; ε_x^* 为复介电常数, 下同; ω 为频率, 下同; r 为实际空气线导纳与特征导纳比值, 下同; c 为光速 $3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 下同; d 为电介质厚度, 下同。

将式 (2) 代入式 (1) 中得到双线性系数表达式^[22]:

$$\varepsilon_x^* = \frac{(1+A^*)\rho_x^* + C}{1-B^*\rho_x^*} \quad (3)$$

利用数值傅里叶变换将时域变换为频域, 式 (3) 简化为^[23]:

$$\varepsilon_x^* = \frac{A^*(\omega)\rho_x^*(\omega) + C(\omega)}{1-B^*(\omega)\rho_x^*(\omega)} \quad (4)$$

式 (4) 中, $C(\omega)$ 范围为 $0.9 \sim 1$, 本研究忽略; A^* 、 B^* 采用线性方程组求解; ρ_x^* 值由式 (5) 得出。

$$\rho_x^* = \frac{V_0(\omega) - R_x(\omega)}{V_0(\omega) + R_x(\omega)} \quad (5)$$

本文采用修改后的反射系数表达式, 即两个双线性分析参考液体 (BARL) 测量散射参数相对于在空气中测量的参考散射参数 (Γ_{ref}) 进行标准化^[24]。两个参考材料分别为: 去离子水 (介电常数 81, $T=20^\circ\text{C}$), 异丙氧基乙醇 (Isopropoxyethanol) 100% 溶液 (介电常数 12, $T=20^\circ\text{C}$)。

$$\rho_{SF}^* = \frac{\Gamma_{\text{ref}} - \Gamma_m}{\Gamma_{\text{ref}} + \Gamma_m} \quad (6)$$

复介电常数转换视在介电常数采用 Lgoston 理论公式^[27]:

$$k_a = \frac{\left(1 + \sqrt{1 + \tan^2(\varepsilon''/\varepsilon')}\right)\varepsilon'}{2} \quad (7)$$

式中, κ_a 为视在介电常数; ε'' 为复介电常数虚部; ε' 为复介电常数实部。

1.5 数据处理

数据分析与绘图采用 Matlab2016b、SimaPlot10.0 进行。介电值 (复介电常数实部值、

视在介电常数值) 与土样烘干法所测体积含水量实测值线性相关性分析采用决定系数 (R^2)、均方根误差 (RMSE)。

土壤含水量介电测量模型评价分析采用决定系数 (R^2)、均方根误差 (RMSE)、相对分析误差 (RPD)。 R^2 数值越接近 1, 表明模型计算值与含水量实测值越接近; RMSE 值越小, 表明模型计算精度越高。RPD 可以极好度量评估模型准确性^[28], 其中, RPD < 1.0 时, 模型已不具备预测能力; RPD 在 1.0 ~ 1.4 之间时, 表明模型具有区别高低值的能力; RPD 在 1.4 ~ 1.8 之间时, 表明模型有一定的定量预测能力; RPD 在 1.8 ~ 2.0 之间时, 表明模型有较好的定量分析计算能力; RPD 在 2.0 ~ 2.5 之间时, 表明模型具有很好定量分析预测能力; RPD ≥ 2.5 时, 模型具有极好的定量分析计算能力。

2 结果与讨论

通过矢量网络分析仪 (Anritsu-MS2028B) 对黏质土土样进行介电谱测量, 得到复介电常数 (实部、虚部)、视在介电常数谱如图 1 所示。图中, 体积含水量为对应土样烘干法土壤体积含水量实测值。

2.1 介电值 (复介电常数实部值、视在介电常数值) 与含水量关系

从图 1 介电谱发现, 复介电常数实部、视在介电常数介电谱数值变化趋势基本相同, 均随频率增大而下降, 并在频率达到 300 MHz 左右时趋于平缓, 且土壤不同体积含水量对应的复介电常数实部值、视在介电常数值明显不同, 均随含水量变化而显著变化。对复介电常数实部、视在介电常数在 100 MHz 频率以下时, 随频率增大而数值下降情况较为明显; 对复介电常数虚部, 频率小于 1 GHz 时数值随频率增大下降更为显著, 但当频率大于 1 GHz 时在降为最低值后均又有不同程度缓慢上升。

为分析黏质土复介电常数实部值、视在介电常数值与体积含水量实测值相关性, 在 0.001 ~ 3 GHz 频段内选取 15 个频率点, 分别为: 300.4、400.2、604.6、904.0、1 051、1 151、1 303、1 502、1 750、1 902、2 054、2 306、2 558、2 700、2 952 MHz。

如表 3 所示, 对上述 15 个频率点上黏质土体积含水量实测值与复介电常数实部值、视在介电常数

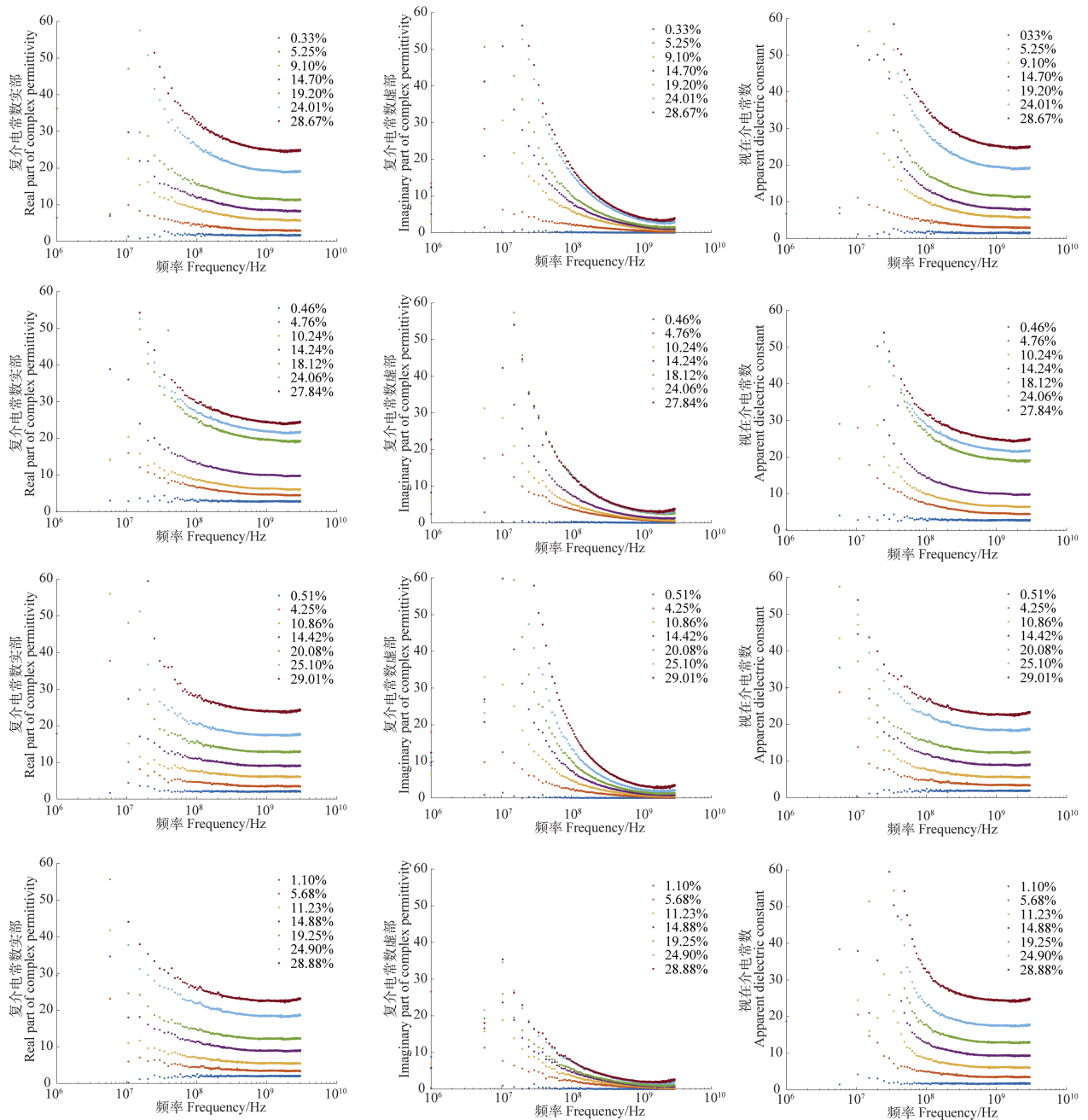


图 1 黏质土土样复介电常数（实部、虚部）、视在介电常数频谱

Fig. 1 Complex dielectric constant (real and imaginary parts) and apparent dielectric constant spectrum of clayey soil samples

值通过 3 阶多项式曲线拟合分析发现：300.4~2 952 MHz 内，决定系数 R^2 均在 0.9600 以上，均方根误差 (RMSE) 分别在 0.0175~0.0202、0.0180~0.0205 之间。表明土壤介电值（复介电常数实部值、视在介电常数）与体积含水量实测值有较好相关性。进一步对 15 个选取测量频率点分析发现，1 050~1 503 MHz 内无论是复介电常数实部值还是视在介电常数，介电值与体积含水量实测值的相

关性均明显好于其他频段，表明此频段是黏质土土壤含水量频域测量理想频段。

2.2 复介电常数实部与含水量经验模型

基于上述分析得到的黏质土土壤含水量介电测量理想频段 1 050~1 503 MHz，通过进一步对比发现，在 1 503 MHz 频率点上：黏质土体积含水量实测值与复介电常数实部值的决定系数最大， $R^2=0.9704$ ，均方根误差最小，RMSE=0.0175。表明

频率 1 503 MHz 是复介电常数实部测定黏质土含水量的最优频率点。

表 3 不同频率下黏质土复介电常数实部值、视在介电常数与体积含水量实测值相关性

Table 3 Correlation analysis of real part of the complex dielectric constant and apparent dielectric constant with measured volumetric water content of the clayey soil in value relative to frequency

频率 Frequency /MHz	复介电常数实部值 Real part value of the complex dielectric constant		视在介电常数 Value of the apparent dielectric constant		频率 Frequency /MHz	复介电常数实部值 Real part value of the complex dielectric constant		视在介电常数 Value of the apparent dielectric constant	
	R^2	RMSE	R^2			RMSE	R^2	RMSE	
	300.4	0.9605	0.0202	0.9600		0.0205	1 750	0.9681	0.0181
400.2	0.9639	0.0193	0.9630	0.0195	1 902	0.9677	0.0183	0.9675	0.0183
604.6	0.9640	0.0193	0.9631	0.0195	2 054	0.9674	0.0183	0.9673	0.0183
904.0	0.9650	0.0190	0.9641	0.0192	2 306	0.9674	0.0183	0.9673	0.0183
1 051	0.9678	0.0182	0.9667	0.0185	2 558	0.9678	0.0182	0.9678	0.0182
1 151	0.9680	0.0182	0.9680	0.0181	2 700	0.9669	0.0185	0.9672	0.0184
1 303	0.9690	0.0179	0.9682	0.0181	2 952	0.9687	0.0180	0.9675	0.0183
1 503	0.9704	0.0175	0.9683	0.0180					

在 1503 MHz 频率点上,对复介电常数实部值与体积含水量实测值,通过 3 阶多项式拟合建立黏质土体积含水量复介电实部模型:

$$\theta = 2.6925 \times 10^{-5} (\varepsilon')^3 - 1.4 \times 10^{-3} (\varepsilon')^2 + 3.25 \times 10^{-2} \varepsilon' - 4.96 \times 10^{-2} \quad (8)$$

式中, ε' 为土壤复介电常数实部值; θ 为土壤体积含水量。

2.3 视在介电常数与含水量经验模型

与 2.2 分析相同,在理想频段 1 050~1 503 MHz 内,与其他频率对比,1 503 MHz 频率点上土壤体积含水量实测值与视在介电常数值的决定系数最大, $R^2=0.9683$; RMSE 最小为 0.0180。频率 1 503 MHz 亦是频域视在介电常数测定黏质土含水量的最优频率点。

在 1 503 MHz 频率上,对视在介电常数与体积含水量实测值,通过 3 阶多项式拟合建立黏质土体积含水量视在介电模型:

$$\theta = 2.6 \times 10^{-5} (\kappa_a)^3 - 1.4 \times 10^{-3} (\kappa_a)^2 + 3.28 \times 10^{-2} \kappa_a - 5.06 \times 10^{-2} \quad (9)$$

式中, κ_a 为土壤视在介电常数; θ 为土壤体积含水量。

2.4 模型评价与讨论

评价分析本文构建的黏质土含水量频域测量模型优劣,并考虑视在介电常数模型在土壤含水量介电法测量中广泛应用性。首先选取 3 个经典模型 (Topp 模型、Roth 模型、Malicki 模型),分别通过黏质土土样体积含水量实测值与模型计算值与视在介电模型 (式 (9)) 之间进行相关性对比,如图 2a;对复介电实部模型 (式 (8)) 采用模型计算值与体积含水量实测值对比,如图 2b。同时,为更准确检验式 (8)、式 (9) 对黏质土含水量测量的精准性,通过验证样本土样体积含水量实测值与模型计算值进行相关性对比评价,如图 3a、图 3b。

对黏质土土样从图 2a 看出,视在介电模型 (式 (9))、Topp 模型、Roth 模型、Malicki 模型,其模型计算值与体积含水量实测值均有一定线性相关性。进一步分析发现:Topp 模型在含水量小于 16% 左右时,有较好相关性;而当含水量大于 16% 左右时,计算值偏高。Roth 模型在含水量小于 23% 左右时,模型计算值稍微偏低;当含水量大于 23% 左右时,计算值与体积含水量实测值有良好线性相关性。由于 Malicki 模型中多添加了 ρ (土壤容重) 参数,而对土壤容重的测量本研究均取容重较大值,造成 Malicki 模型在含水量小于 27% 左右时,计算结果偏低,模型计算精度结果整体相对较差。

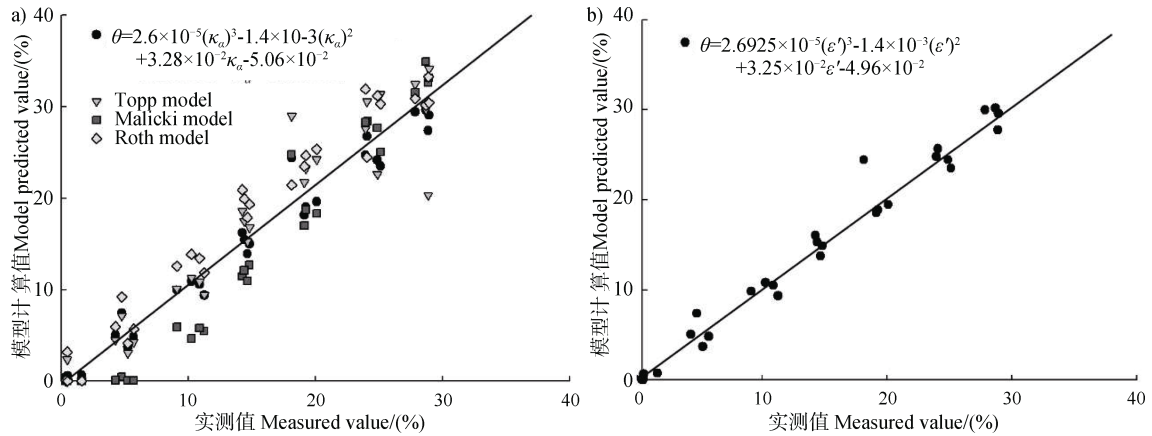


图 2 黏质土土样不同介电模型式下含水量计算值与含水量实测值对比图

Fig. 2 Comparison of predicted water content and measured water content of the clayey soil sample relative to dielectric model

从图 2a 看到，视在介电模型（式（9））体积含水量计算值集中在 1：1 直线两侧，与其他三个经典模型相比，其计算值与含水量实测值有较好线性相关性，整体效果优于 Topp 模型、Malicki 模型、Roth 模型。基于复介电常数实部建立的复介电实部模型（式（8）），从图 2b 明显看出，土壤体积含水量计算值与实测值的离散程度差，两者线性相关性较好。

图 3a 分析发现，视在介电模型（式（9））计算值在验证样本土壤体积含水量小于 15% 左右时有较好线性相关性；但当含水量在 15%~30% 左右时，计算值略微偏小。对比图 3a、图 3b，复介电实部模型（式（8））土壤体积含水量计算值与烘干法所测含水量实测值线性相关性要好于视在介电模型（式（9））计算值，式（8）计算值整体较为紧密分布在 1：1 直线两侧。

为定量分析以上模型计算值与含水量实测值差异性，同时评价模型计算精度与准确性，选取决定

系数（ R^2 ）、均方根误差（RMSE）、相对分析误差（RPD），如表 4。

对表 4 分析，视在介电模型（式（9））对黏质土体积含水量测量有很好适应性，与烘干法土壤体积含水量实测值的 $R^2=0.9669$ ，分别大于 Topp、Roth 和 Malieki 三个经典模型的 0.9558、0.9634 和 0.9470；RMSE=0.0176，分别小于 3 个经典模型的 0.0291、0.0231 和 0.0287；RPD=5.515，分别大于 3 个经典模型的 4.470、5.319 和 4.347。表明视在介电模型（式（9））与 Topp 模型、Roth 模型、Malicki 模型相比，其计算精度较高。复介电实部模型（式（8））与视在介电模型（式（9））相比， R^2 几乎一样，RMSE 略小、RPD 较大，说明式（8）对黏质土体积含水量计算精度效果略高于式（9）。

验证样本分析如表 4 所示，视在介电模型（式（9））与烘干法体积含水量实测值，两者 $R^2=0.9537$ ，

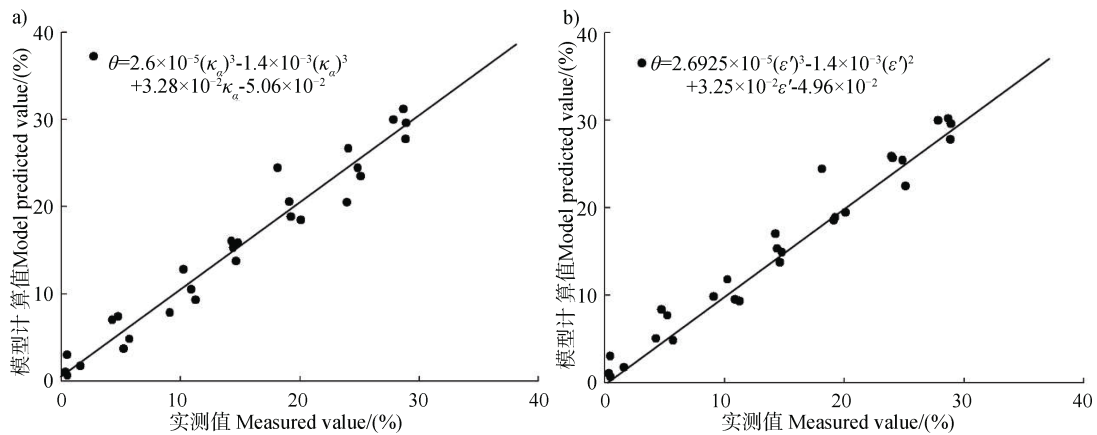


图 3 验证样本土样介电模型式下含水量计算值与含水量实测值对比图

Fig. 3 Comparison of predicted soil water content and measured water content of the validation sample relative to dielectric model

表 4 不同介电模型土壤含水量计算值与体积含水量实测值精度对比

计算模型 Prediction model	黏质土土样 Clayey soil sample			验证样本 Validation sample		
	R^2	RMSE	RPD	R^2	RMSE	RPD
复介电实部模型(式(8)) Complex dielectric real part model (8)	0.9670	0.0173	5.676	0.9615	0.0188	5.091
视在介电模型(式(9)) Apparent dielectric model (9)	0.9669	0.0176	5.515	0.9537	0.0208	4.602
Topp 模型 Topp model	0.9558	0.0291	4.760			
Roth 模型 Roth model	0.9634	0.0231	5.319			
Malicki 模型 Malicki model	0.9470	0.0287	4.347			

RMSE=0.0208, RPD=4.602, 表明模型对验证样本也具有很好的适应性。而复介电实部模型(式(8))与烘干法所测体积含水量的 $R^2=0.9615$, RMSE=0.0188, RPD=5.091, 其模型定量分析计算能力明显优于式(9), 说明式(8)对黏质土土壤含水量计算精度结果要优于式(9)。

土壤是多种矿物成分、水分、空气与有机质等的混合介质。根据混合介质极化理论可知, 影响土壤介电极化的因素有土壤质地、含水量、温度、含盐量等^[13-14, 29], 其中土壤质地与含水量对土壤介电常数起主要作用^[20-21]。本文主要集中在基于双线性介电测量理论对黏质土特性土壤与含水量, 实验温度为常温, 土壤自然含盐量状态下进行探究; 而对不同温度、非自然含盐量下黏质土含水量介电测量研究存在一定不足。但本文在常温、自然含盐量状态下基于双线性介电测量理论对黏质土 4 种不同质地土壤、7 种不同体积含水量下的介电谱测量具有良好适应性, 介电谱可明显反映出黏质土不同质地、不同含水量下的介电特性。对建立的 2 个黏质土含水量介电测量经验模型式, 通过黏质土土样和验证样本评价分析, 模型计算准确性较高, 这为后续相关研究提供相应理论基础。

3 结论

黏质土(黏土类、黏壤土类)4 种不同质地土壤, 在 0.001~3 GHz 频段进行 0%、5%、10%、15%、20%、25%、30% 体积含水量介电谱测量, 频段 300.4~2953 MHz 内复介电常数实部、视在介电常数较为稳定; 黏质土不同体积含水量下的介电值(复介电常数实部

值、视在介电常数值)有显著区分性; 1 050~1 503 MHz 是介电值进行黏质土含水量测量最优频段, 1 503 MHz 是最佳频率点。对黏质土土样, 视在介电模型式与其他三个经典模型相比, 模型计算值与含水量实测值其决定系数最大, 均方根误差最小, 相对分析误差最大; 视在介电模型计算精度高, 模型定量分析计算能力极好。对黏质土土样和验证样本, 复介电实部模型模型计算值整体较为准确。数据分析表明, 本文构建的 2 个黏质土特性土壤含水量频域测量经验模型式, 适应性较好, 测量精度较高。

参考文献 (References)

- [1] Zhou L Y, Chen Z X, Li W M. Calibration on measurement of soil water content using time domain reflectometry (TDR) [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40 (1): 59—64. [周凌云, 陈志雄, 李卫民. TDR 法测定土壤含水量的标定研究[J]. *土壤学报*, 2003, 40 (1): 59—64.]
- [2] Zhou L G, Yu D S, Wang X Y, et al. Determination of top soil water content based on high-frequency ground penetrating radar [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 (3): 621—626. [周立刚, 于东升, 王玺洋, 等. 基于高频探地雷达的土壤表层含水量测定[J]. *土壤学报*, 2016, 53 (3): 621—626.]
- [3] Zhao C, Yuan G F, Liu X, et al. Application of cosmic-ray method to soil moisture measurement of grassland in the loess plateau [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (6): 1438—1444. [赵纯, 袁国富, 刘晓, 等. 宇宙射线土壤水分观测方法在黄土高原草地植被的应用[J]. *土壤学报*, 2015, 52 (6): 1438—1444.]
- [4] Ahmed M A, Holz M, Woche S K, et al. Effect of soil drying on mucilage exudation and its water repellency: A new method to collect mucilage [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2015, 178 (6): 821—824.

- [5] Xu A Z, Hu J M, Xiong Y, et al. Comparison of soil moisture measurement using TDR method, dry burning method and oven drying method[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2018, 29 (2): 253—256. [徐爱珍, 胡建民, 熊永, 等. TDR 法、干烧法及烘干法测定土壤含水量的比较研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2018, 29 (2): 253—256.]
- [6] Singh M, Hukkeri S B, Rajput R K. Spirit-burning and Papadakis's methods for the determination of soil moisture as substitutes for oven-drying method[J]. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 1970, 1(3): 155—160.
- [7] 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.
- [8] Roth C H, Malicki M A, Plagge R. Empirical evaluation of the relationship between soil dielectric constant and volumetric water content as the basis for calibrating soil moisture measurements by TDR[J]. *Journal of Soil Science*, 1992, 43 (1): 1—13.
- [9] Herkelrath W N, Hamburg S P, Murphy F. Automatic, real-time monitoring of soil moisture in a remote field area with time domain reflectometry[J]. *Water Resources Research*, 1991, 27 (5): 857—864.
- [10] Malicki M A, Plagge R, Roth C H. Improving the calibration of dielectric TDR soil moisture determination taking into account the solid soil[J]. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47 (3): 357—366.
- [11] Zhu A N, Ji L Q, Zhang J B, et al. Empirical relationship between soil dielectric constant and volumetric water content in various soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48 (2): 263—268. [朱安宁, 吉丽青, 张佳宝, 等. 不同类型土壤介电常数与体积含水量经验关系研究[J]. *土壤学报*, 2011, 48 (2): 263—268.]
- [12] Ju Z Q. Dielectric permittivity and its relationship with water content for several soils in China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2005. [巨兆强. 中国几种典型土壤介电常数及其与含水量的关系[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.]
- [13] Dobson M, Ulaby F, Hallikainen M, et al. Microwave dielectric behavior of wet soil-part II: Dielectric mixing models[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1985, GE-23 (1): 35—46.
- [14] Dirksen C, Dasberg S. Improved calibration of time domain reflectometry soil water content measurements[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57(3): 660—667.
- [15] Xu J H. Soil permittivities in LF-UHF frequency range and soil moisture measurement in frequency domain[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2014. [许景辉. 土壤 LF-UHF 波段介电特性与含水量频域测定方法研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2014.]
- [16] Gong Y S, Cao Q H, Sun Z J. The effects of soil bulk density, clay content and temperature on soil water content measurement using time-domain reflectometry[J]. *Hydrological Processes*, 2003, 17 (18): 3601—3614.
- [17] Cosenza P, Tabbagh A. Electromagnetic determination of clay water content: Role of the microporosity[J]. *Applied Clay Science*, 2004, 26 (1/4): 21—36.
- [18] Song L, Zhang X J, Li H P. Dielectric constant measurement and analysis of Shanghai frozen silty clay (0.1-1GHz) [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2011, 44 (8): 107—110. [宋雷, 张小俊, 李海鹏. 上海冻结粉质黏土介电常数的实测及规律分析 (0.1~1GHz) [J]. *土木工程学报*, 2011, 44 (8): 107—110.]
- [19] Robinson D A, Friedman S P. A method for measuring the solid particle permittivity or electrical conductivity of rocks, sediments, and granular materials[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2003, 108 (B2): 1978—2012. <https://doi.org/10.1029/2001jb000691>.
- [20] Alharthi A, Lange J. Soil water saturation: Dielectric determination[J]. *Water Resources Research*, 1987, 23 (4): 591—595.
- [21] Ferré P A, Rudolph D L, Kachanoski R G. Spatial averaging of water content by time domain reflectometry: Implications for twin rod probes with and without dielectric coatings[J]. *Water Resources Research*, 1996, 32 (2): 271—279.
- [22] Cole R H, Berberian J G, Mashimo S, et al. Time domain reflection methods for dielectric measurements to 10 GHz[J]. *Journal of Applied Physics*, 1989, 66 (2): 793—802.
- [23] Berberian J G. Time domain reflectometry: Bilinear corrections and extending the range of analysis beyond the quarter and half wavelength conditions[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 1993, 56 (7): 1—18.
- [24] Folgerø K, Tjomsland T. Permittivity measurement of thin liquid layers using open-ended coaxial probes[J]. *Measurement Science and Technology*, 1996, 7 (8): 1164—1173.
- [25] Estevez R, Jones S B. Frequency domain soil moisture determination using bilinear analysis with an open-ended dielectric probe[C]// Reno, Nevada, June 21-June 24; 2009.
- [26] Cole R H. Bridge sampling methods for admittance measurements from 500 kHz to 5 GHz[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, 1983, 32 (1): 42—47.
- [27] Logsdon S D. Electrical spectra of undisturbed soil from a crop rotation study[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72 (1): 11—15.
- [28] Viscarra Rossel R A, Taylor H J, McBratney A B. Multivariate calibration of hyperspectral γ -ray energy spectra for proximal soil sensing[J]. *European Journal of Soil Science*, 2007, 58 (1): 343—353.
- [29] Zribi M, Le Morvan A, Baghdadi N. Dielectric constant modelling with soil-air composition and its effect on sar radar signal backscattered over soil surface[J]. *Sensors*, 2008, 8 (11): 6810—6824.

(责任编辑: 檀满枝)