doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.12.037

基于双线性理论的土壤介电测量研究

许景辉[1,2]　赵钟声[2]　王一琛[3]　王　雷[2]　邵明烨[3]

(1.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;
2.西北农林科技大学水利与建筑工程学院,陕西杨凌 712100;
3.西北农林科技大学机械与电子工程学院,陕西杨凌 712100)

摘要:针对目前土壤介电计算模型适应性差等问题,基于双线性理论构建了双线性介电计算模型。为探究双线性介电计算模型对土壤介电测量的适应性,选用 7 种不同质地土壤分别配置 0、5、10、15、20、25、30 cm^3/cm^3 体积含水率,在 0.001 ~ 3 GHz 频域内进行不同含水率下介电谱测量。分析发现,该模型介电谱可很好地反映土壤不同含水率下混合介质的介电特性;土壤含水率介电法测量理想频率点为 1.502 88 GHz。在理想频率点上,基于复介电常数实部和视在介电常数构建了 2 个土壤含水率频域测量经验公式,通过试验数据分析,土壤含水率复介电实部测量式的计算值与干燥法含水率测量值对比,两者 R^2 为 0.912 6,RMSE 为 0.029 4 cm^3/cm^3、RPD 为 3.343;土壤含水率视在介电测量式计算值与干燥法含水率测量值对比,两者 R^2 为 0.890 7,均优于其他 3 种经典公式(Topp 公式、Roth 公式、Malicki 公式)。双线性介电计算模型对土壤介电常数计算有良好的适应性,基于该模型建立的土壤含水率频域测量式对土壤含水率有较高的测量精度。

关键词:介电测量;土壤含水率;频域测量;双线性理论

中图分类号:S152.7　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2019)12-0322-10

Soil Dielectric Measurement Based on Bilinear Theory

XU Jinghui[1,2]　ZHAO Zhongsheng[2]　WANG Yichen[3]　WANG Lei[2]　SHAO Mingye[3]

(1. *Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas*, *Ministry of Education*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*
2. *College of Water Resources and Architectural Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*
3. *College of Mechanical and Electronic Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: In view of the current poor adaptability of soil dielectric calculation model, a bilinear dielectric calculation model was constructed based on bilinear theory. In order to explore the adaptability of the bilinear dielectric calculation model to soil dielectric measurement, seven different texture soils were selected for 0 cm^3/cm^3, 5 cm^3/cm^3, 10 cm^3/cm^3, 15 cm^3/cm^3, 20 cm^3/cm^3, 25 cm^3/cm^3 and 30 cm^3/cm^3 volumetric moisture content, dielectric spectrum measurement at different water contents in the frequency range from 1 MHz to 3 GHz. Through dielectric spectroscopy, the dielectric spectrum of the model can well reflect the dielectric properties of mixed media under different soil water contents; the ideal frequency point of soil moisture content dielectric measurement was 1.502 88 GHz. At the ideal frequency point, two empirical formulas for frequency domain measurement of soil moisture content were constructed based on the real part of complex permittivity and apparent dielectric constant. Through the analysis of experimental data, the calculated value of real moisture measurement formula of soil moisture content was compared with the measured value of the moisture content of the drying method. The R^2 was 0.912 6, RMSE was 0.029 4 cm^3/cm^3, and RPD was 3.343. The soil water content was compared with the measured value of the dielectric measurement formula and the dry water content measurement. The R^2 was 0.890 7, which was better than that of the other three classic formulas (Topp formula, Roth formula and Malicki formula). The bilinear dielectric calculation model had a good adaptability to the calculation of soil dielectric constant. The frequency domain measurement formula of soil moisture content based on the model had high measurement accuracy for soil water content.

Key words: dielectric measurement; soil water content; frequency domain measurement; bilinear theory

收稿日期:2019-09-23　修回日期:2019-10-24

基金项目:陕西水利科技计划项目(2014slkj-18)和国家重点研发计划项目(2017YFC0403203)

作者简介:许景辉(1978—),男,副教授,博士,主要从事农业智能感知与控制研究,E-mail:x36936@163.com

0　引言

土壤水分是陆地水资源的重要组成部分之一，土壤含水率严重影响着植物、土壤微生物等生命的健康状态[1-3]，也是水文模拟、农业用水管理和大多数相关土壤学研究的关键变量之一[4-5]。土壤介电特性可以间接反映其含水率[6-10]。与其他测量方法相比，介电法自动化程度好、测量精度高，具有明显技术优势与良好发展潜力。

土壤介电常数精确计算测量是介电法测量土壤含水率的技术关键。当前土壤介电常数测量方法主要有传输线法、谐振法、自由空间法以及神经网络法等[11]。与其他方法相比，传输线法基于经典 NRW 传输/反射法原理进行测量[12-14]，其算法相对计算简单，不涉及超越方程[15-16]，应用较广。HASTED[17]提出一种基于频域的介电常数计算模型，其模型公式参数较多，对频域稳定性要求较高；CLARKSON 等[18]描述了一种插入式探针的散射参数 S_{11} 转换为复介电常数的介电测量模型，但探针制作繁琐，且对材料有严格要求；LOGSDON[19]提出了一种测试夹具简便、模型计算精度较高的 Logsdon and Laird 模型，但高频损耗较大，不适于 2 GHz 以上测量；SKIERUCHA 等[20]研发了一种末端开路介电常数测算模型，但主要适合平板式探头。以上模型测算土壤介电常数系统要求较高，用于介电法小范围、单点数土壤含水率测量适用性较好，而对宽频段、特异性土壤含水率介电法监测，使用成本较高。

为降低测量条件，本文采用双线性理论构建双线性介电计算模型。通过 7 种典型土样，探究双线性介电计算模型对土壤介电测量的适应性。在分析介电谱基础上，研究土壤介电特性与含水率规律，建立基于双线性介电计算模型的土壤含水率测量经验公式，以期为土壤介电特性研究以及土壤含水率介电法监测提供研究理论与方法。

1　材料与方法

1.1　双线性介电计算模型原理

文献[21]中最早使用双线性理论将散射参数 S_{11} 转换为复介电常数。在时域中，复介电常数计算公式为

$$\varepsilon_x = \frac{(1+A)\rho_x + C}{1 - B\rho_x} \tag{1}$$

式中　ε_x——复介电常数

A、B——探头参数　　ρ_x——反射系数

C——平滑系数，取 0 ~ 1

利用数值傅里叶变换将时域变换为频域，可将式(1)简化为[22]

$$\varepsilon_x = \frac{A(\omega)\rho_x(\omega) + C(\omega)}{1 - B(\omega)\rho_x(\omega)} \tag{2}$$

式中　ω——角频率

$C(\omega)$ 在 0 ~ 1 之间，在本模型构建中忽略；$A(\omega)$、$B(\omega)$ 可用线性方程组求解。$\rho_x(\omega)$ 为傅里叶变换中将时域变换为频域后反射系数，在频域电磁测量中标准式为

$$\rho_x(\omega) = \frac{r_s(\omega) - r_x(\omega)}{r_s(\omega) + r_x(\omega)} \tag{3}$$

式中　$r_s(\omega)$——输入脉冲

$r_x(\omega)$——反射脉冲

本研究使用改进的反射系数表达式，即 2 个双线性分析参考材料测量散射参数相对于在空气中测量的参考散射参数进行标准化[23]

$$\rho_{SF}(\omega) = \frac{S_{11ref} - S_{11m}}{S_{11ref} + S_{11m}} \tag{4}$$

式中　$\rho_{SF}(\omega)$——材料计算反射系数

S_{11ref}——常温下空气散射参数

S_{11m}——被测材料散射参数

本模型构建中，2 个参考材料分别为去离子水（介电常数 81，T = 20℃）、Isopropoxyethanol（异丙氧基乙醇）100% 溶液（介电常数 12，T = 20℃）。利用已知 2 种材料的复介电常数值以及反射系数 $\rho_{SF}(\omega)$，通过式(2)构建 2 个方程来求解探头参数 $A(\omega)$、$B(\omega)$。然后，利用所得参数 $A(\omega)$、$B(\omega)$ 求解待测材料介电谱。使用线性方程组求解参数时，其中 2 个参考材料测量散射参数相对于使用改进的反射系数表达式（式(4)）在空气中测量的散射参数进行标准化。

采用 Logsdon 理论[24]将复介电常数转换为视在介电常数的计算公式为

$$\kappa_a = \frac{(1 + \sqrt{1 + \tan^2(\varepsilon''/\varepsilon')})\varepsilon'}{2} \tag{5}$$

式中　κ_a——视在介电常数

ε''——复介电常数虚部

ε'——复介电常数实部

1.2　模型标定与参数验算

1.2.1　标定溶液配置与测量

采用 6 种不同 Isopropoxyethanol 和水体积比混合溶液（I∶W）。表 1 为 6 种不同体积比混合溶液及其视在介电常数，其中 Isopropoxyethanol 溶液密度为 0.903 g/cm^3，水为 1 g/cm^3。

本研究在室内常温（(23 ± 2)℃）下进行，采用 Anritsu - MS2028B 型矢量网络分析仪，设定测量频率为 0.001 ~ 3 GHz，采样点数 632 点，矢量网络分

表 1 6 种不同 I∶W 体积比混合溶液及其视在介电常数

Tab. 1 Six different(I∶W) volume ratio mixed solutions and their dielectric values

I∶W	视在介电常数	配置 Isopropoxyethanol 质量/g	配置水质量/g
1.00	12.000	30	0
0.92	17.459	30	2.90
0.85	22.181	30	5.85
0.80	25.619	30	8.32
0.76	28.330	30	10.50
0.68	33.728	30	15.60

析仪采用端口 1 进行测量,使用 BNC 连接头将矢量网络分析仪延长线和探头相连,矢量网络分析仪开机 2 h 后用开路、短路和 50 Ω 负载校准件(Maury microwave 85050B)校准。测量夹具采用 3.5 mm 末端开路自制探头。

为确定系统稳定性与测量数据准确性,使用末端开路探头测量每种混合溶液 3 次,对得到的网络散射参数 S_{11} 通过双线性介电计算模型转换成复介电常数,且 3 次测量结果取平均值。

1.2.2 标定与验算结果分析

对模型标定检验与参数计算验证主要体现在标定混合溶液介电普特性规律上,从图 1、2 可以看出,本文构建的双线性介电计算模型对 6 种不同 I∶W 体积比标定溶液所测介电谱(复介电谱、视在介电谱)变化符合介电弛豫规律。当频率小于 1 GHz 时,随着频率的增加复介电常数实部缓慢变化,在 0.001 ~ 1 GHz 之间,介电实部为常值,复介电常数虚部缓缓上升;当频率大于 1 GHz 时,复介电常数实部随频率增大急剧下降,虚部上升斜率增大;视在介电常数介电特性表现与复介电常数实部趋势几乎相同,且视在介电常数与实际介电值在低频段几乎一样,所测介电谱与张灿灿[25]、徐肖伟等[26]对无机材料所测介电谱趋势相同,符合材料德拜介电理论模型规律[27]。说明本文构建的双线性介电计算模型对混合材料介电谱测量有良好适用性,同时对模型参数得到良好计算与验证。

2 土壤介电测量

2.1 介电谱测量

为探究双线性介电计算模型在土壤介电测量中的适应性,试验选用 6 种不同质地自然土壤以及化学性能稳定的石英砂,7 种土样物理特性如表 2 所示。对 7 种土样经自然风干后研磨,过 18 目筛(孔径 2 mm),然后放入 105℃ 干燥箱干燥 24 h,干燥后土样装入密封塑料袋中保存备用。根据土样各自填装密度,计算并用去离子水配比 0、5、10、15、20、25、

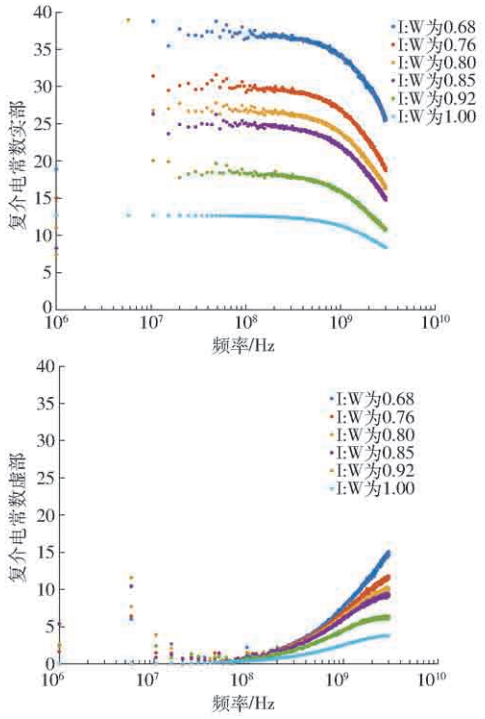

图 1 6 种不同 I∶W 体积比混合溶液复介电常数频谱

Fig. 1 Complex permittivity constant spectrum of six different I∶W volume ratio complex solution

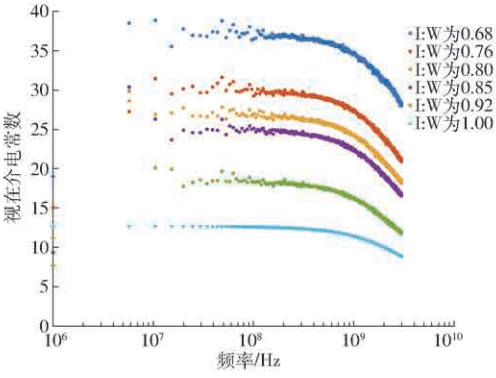

图 2 6 种不同 I∶W 体积比混合溶液视在介电常数频谱

Fig. 2 Apparent dielectric constant spectrum of six different I∶W volume ratio complex solution

30 cm^3/cm^3 体积含水率土样各 3 份。试样装入 PVC 管(管高 7.0 mm,直径 66 mm)中并在室内常温下静置 8 h 以上。考虑到环境温度对介电特性影响,实验在室内常温((23 ± 2)℃)下进行土样介电测量,采样点数 632、设定频率范围 0.001 ~ 3 GHz。

在探头接触部位用铝盒取每个 PVC 管中土样各 3 份,用万分之一天平(Mettler Toledo AL104 型)称量并记录,将铝盒放入干燥箱中干燥 12 h,用干燥法计算所测土样实际体积含水率,取 3 份土样平均值作为该 PVC 管中土样实际体积含水率。

2.2 结果与分析

通过 Anritsu - MS2028B 型矢量网络分析仪对 7 种土样测量,将测得网络散射参数 S_{11} 用双线性介电

表 2　7 种土样物理特性

Tab. 2　Seven soil samples physical properties

土壤名称	粘粒（0 ~ 0.002 mm）质量分数/%	粉粒（0.002 ~ 0.02 mm）质量分数/%	砂粒（0.02 ~ 2 mm）质量分数/%	容重/（g·cm^{-3}）	填装密度/（g·cm^{-3}）	质地
黄粘土	35.23	46.12	18.65	1.32	1.316 8	粉砂质粘土
红土	28.53	42.56	28.91	1.51	1.567 1	壤质粘土
粘壤土	23.02	27.38	50.60	1.39	1.392 6	粘壤土
黄绵土	19.44	22.32	58.24	1.34	1.341 8	砂质粘壤土
黑土	14.45	31.12	54.43	1.50	1.515 5	壤土
砂土	12.54	20.42	67.04	1.65	1.656 3	砂质壤土
石英砂	0	0	100	0.76	0.761	砂土

计算模型转换成复介电常数，且 3 次测量结果取平均值，其复介电常数谱如图 3 所示。图中，土壤实际体积含水率（cm^3/cm^3）为相应土壤干燥法所测体积含水率。

2.2.1　复介电常数与含水率关系

从图 3 可以发现，复介电常数均有随频率增大而下降的趋势，并在频率 300 MHz 左右时趋于平缓，且不同体积含水率对应的复介电常数实部有明显区分性。对复介电常数实部，在 100 MHz 频率以下时下降趋势较为显著，而对粘粒含量较高的黄粘土、红土、粘壤土、黄绵土下降变化更迅速。对复介电常数虚部，在频率小于 1 GHz 内下降趋势比较明显，而后随着频率增大，在降为最低值后均有不同程度缓慢上升。

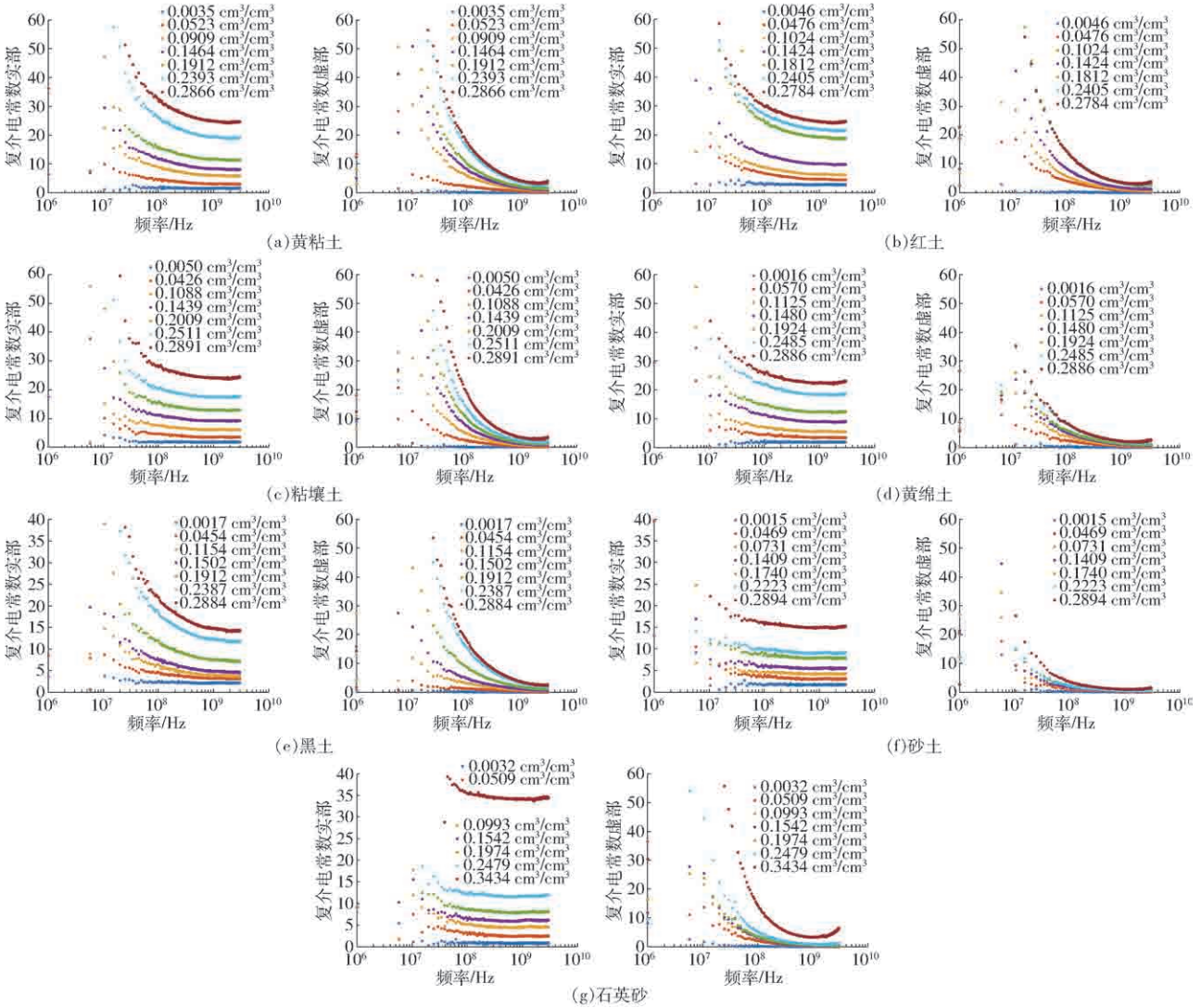

图 3　7 种土样复介电常数频谱

Fig. 3　Seven kinds of soil samples complex permittivity spectrum

研究表明,介质复介电常数是综合反映介质极化的宏观物理量,土壤复介电常数实部主要反映土壤介电特性[28-29]。根据介质极化过程对土壤介电特性影响不同,造成土壤复介电常数变化的极化主要有界面极化、转向极化、Maxwell-Wagner 极化、离子极化、电子极化等。其中,界面极化会同时影响土壤复介电常数实部与虚部,但对复介电常数实部影响较大。低频下界面极化使土壤内部正负离子在外电场作用下在某一界面上聚集,导致土壤中电荷分布不均匀,产生宏观电矩,最终导致土壤在低频率下复介电常数较大;而随着频率增大界面极化影响变小,复介电常数实部也逐渐减小并趋于平稳,从图 3 可明显看到此趋势。从理论上说,随频率增大土壤极化主要为离子极化与电子极化,且这两种极化可以削弱土壤质地等因素对其混合极化的影响,增强土壤介电测量抗干扰性,提高土壤高频介电测量适应性。

复介电常数虚部可综合反映土壤介电损耗与电导损耗,是土壤介电测量电磁损耗的重要表现。造成土壤介电损耗主要为土壤体电流热损耗与电容电流热损耗[30]。研究表明,在低频介电测量时,随频率增大,土壤溶质引起的传导电流变小,复介电常数虚部逐渐下降并趋于平稳;但当频率超出特定值后,随着测量频率增大,土壤极化弛豫现象增强,土壤松弛极化与转向极化同外电场变化同一性变差,两种极化速度延迟于外加电场变化,造成介电测量电磁损耗逐渐增大。因此图 3 中,复介电常数虚部在降为最小值且稳定一段后,随频率增大而后又有不同增大,且随着含水率增大其上升斜率越大。

通过以上复介电常数(实部、虚部)介电谱与土壤含水率关系分析可知,基于双线性介电计算模型所得土壤复介电常数变化趋势可以明显反映出土壤混合介质介电特性,可作为土壤介电测量重要参数。对图 3 分析发现,土壤复介电常数实部在 0.3 ~ 3 GHz 频段较为稳定,且对不同含水率下的复介电常数实部有显著区分性。

为较好分析土壤复介电常数实部与实际土壤含水率相关性,在 0.3 ~3 GHz 频段内,选取 15 个频率点,分别为 300.42、400.23、604.60、904.03、1 051.36、1 151.17、1 303.26、1 502.88、1 750.02、1 902.11、2 054.20、2 306.10、2 557.99、2 700.58、2 952.47 MHz。如图 4 所示,在对 15 个频率点上 7 种土样含水率与其复介电常数实部,通过 3 阶曲线拟合分析发现,0.300 42 ~2.952 47 GHz 频域内其决定系数 R^2 均在 0.89 以上,均方根误差 RMSE 在 0.029 8 ~0.031 cm^3/cm^3 之间。

2.2.2 视在介电常数与含水率关系

基于双线性介电计算模型算出土壤复介电常数后,通过式(5)便可得出土壤视在介电常数。由于视在介电常数同时受复介电常数实部与虚部的共同影响,在测量时其稳定性会稍有变化。但视在介电常数可以整体反映土壤混合介质介电特性,是土壤介电特性宏观表现重要参数之一[31],且在一定稳定频域范围内测量误差可控。图 5 为 7 种土样的视在介电谱。

从图 5 可以看出,与复介电常数实部介电谱表现特性规律相同,7 种土样视在介电常数也有随频率增大而下降的趋势,频率达到 300 MHz 左右时趋于平缓。配置不同体积含水率其对应视在介电常数明显不同。

同对土壤复介电常数实部与体积含水率相关性研究相似,在 0.3 ~3 GHz 频段内,进行土壤视在介电常数与实际体积含水率相关性分析。如图 6 所示,在对 15 个频率点上 7 种土样体积含水率与相应视在介电常数,通过 3 阶曲线拟合分析,在 300.42 ~ 2 952.47 MHz 其决定系数 R^2 均在 0.900 以上,RMSE 在 0.029 9 ~0.031 2 cm^3/cm^3 之间。

通过以上对土壤复介电常数实部和视在介电常数分别与土壤实际体积含水率的相关性分析,发现在 0.3 ~3 GHz 频域内本文构建的双线性介电计算模型得出的土壤介电值(复介电常数实部、视在介电常数)与实际体积含水率有较好相关性,这为土壤含水率的频域测量提供良好理论基础。进一步对 15 个测量频率点分析发现,1.050 ~1.503 GHz 内,实际体积含水率与复介电常数实部的决定系数 R^2 在 0.914 ~ 0.912 3 之间,RMSE 在 0.029 8 ~ 0.03 cm^3/cm^3 之间;实际体积含水率与视在介电常数的决定系数 R^2 在 0.910 9 ~0.911 8 之间,RMSE 在 0.029 9 ~0.030 2 cm^3/cm^3 之间。其相关性均相对优于其他频段,表明此频段是土壤含水率介电法测量的理想频段。

3 土壤含水率频域测量式构建

3.1 复介电常数实部与含水率

基于 2.2 节分析得到的土壤含水率介电测量理想频段 1.050 ~1.503 GHz,通过进一步对比发现在 1.502 88 GHz 频率点上实际体积含水率与复介电常数实部的决定系数最大,R^2 = 0.912 3,均方根误差最小,RMSE 为 0.029 8 cm^3/cm^3。表明此频率是土壤频域复介电常数实部测定土壤含水率的最优频率。

在 1.502 88 GHz 频率上,对土壤复介电常数实

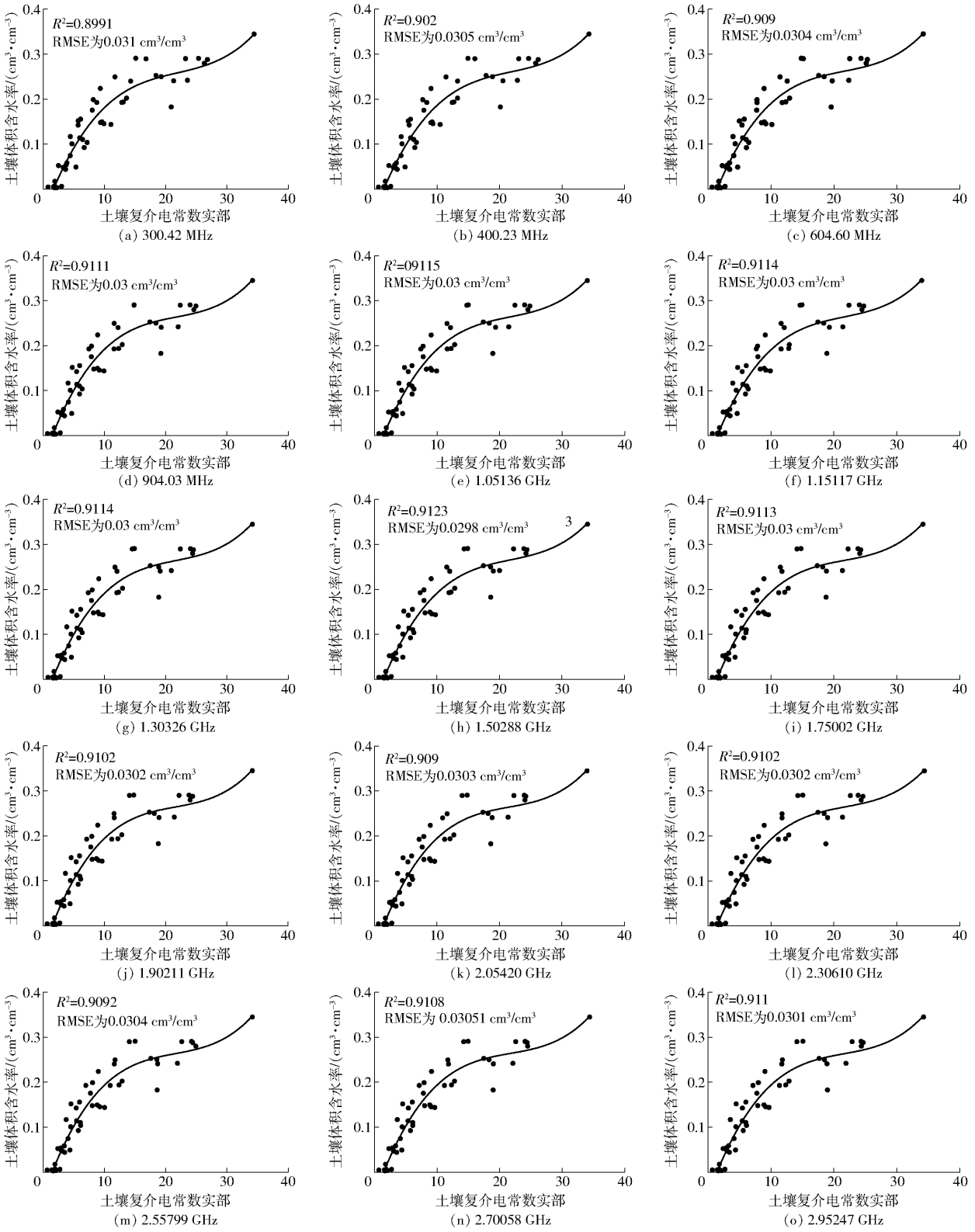

图 4　不同频率下土壤复介电常数实部与干燥法所测体积含水率标准值相关性分析

Fig. 4　Correlation analysis between real part value of soil complex permittivity constant value and standard value of volumetric water content measured by drying method at different frequencies

部与实际体积含水率，通过 3 阶曲线拟合建立土壤含水率复介电实部测量式

$$\theta = 2.35\times10^{-5}(\varepsilon')^3 - 1.55\times10^{-3}(\varepsilon')^2 + 3.8\times10^{-2}\varepsilon' - 5.42\times10^{-2} \quad (6)$$

式中　θ——土壤体积含水率，cm^3/cm^3

3.2　视在介电常数与含水率

与 3.1 节分析过程相同，土壤含水率介电测量理想频段内，在 1.502 88 GHz 频率点上实际体积含水率与视在介电常数的决定系数最大，$R^2 = 0.9118$，均方根误差最小，RMSE 为 0.029 9 cm^3/cm^3。表明

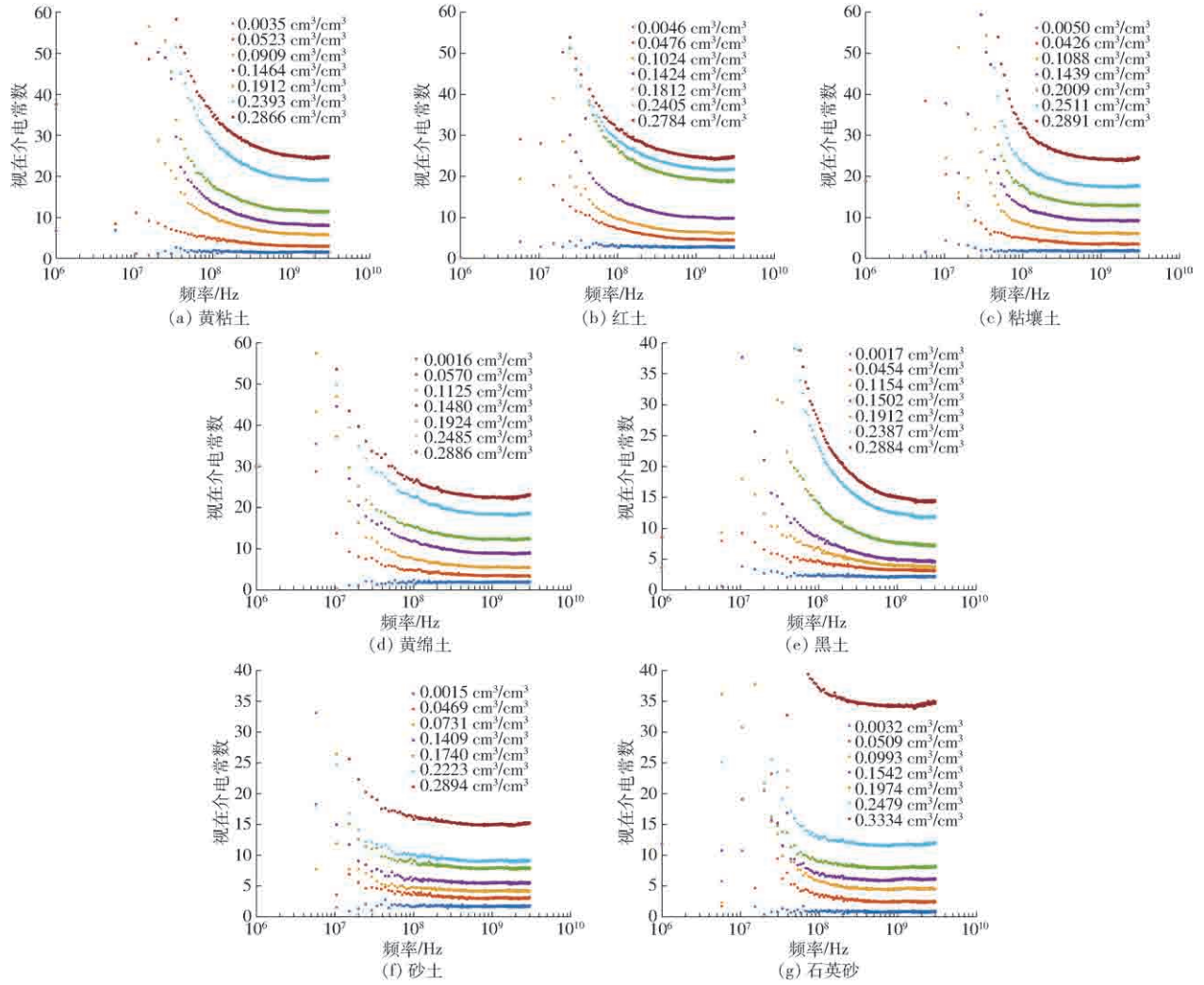

图 5 7 种土样视在介电常数频谱

Fig. 5 Seven kinds of soil samples apparent dielectric spectrum

1.052 88 GHz 频域也是视在介电常数测定土壤含水率的最优频率。

在 1.502 88 GHz 频率上,对视在介电常数与土壤实际体积含水率,通过 3 阶曲线拟合建立土壤含水率视在介电测量式

$$\theta = 2.695\,26\times10^{-5}\kappa_a^3 - 1.69\times10^{-3}\kappa_a^2 + 3.82\times10^{-2}\kappa_a - 5.29\times10^{-2} \quad (7)$$

3.3 公式对比

当前土壤含水率介电测量公式有许多形式,但比较经典的有:文献[6]提出的 Topp 公式,其奠定了土壤含水率介电法测量的理论基础;文献[7]提出修正后的 Roth 公式;文献[10]推导的新方程 Malicki 公式。

为检验本文建立的土壤含水率频域测量式,并考虑视在介电常数公式广泛应用性,选取经典 Topp 公式、Roth 公式、Malicki 公式分别同本文土壤含水率视在介电测量式(式(7))计算值与干燥法所测土样含水率标准值结果对比,如图 7a 所示;对基于复介电常数实部建立的土壤含水率复介电实部测量式(式(6))采用计算值与含水率标准值对比,结果如图 7b 所示。

从图 7a 可以看出,式(7)与 Topp 公式、Roth 公式、Malicki 公式相比,均具有较好的线性关系。与含水率标准值相比,Topp 公式在含水率小于 10 cm^3/cm^3 时,有较好相关性。含水率在 10 ~ 22 cm^3/cm^3 之间时,Topp 公式计算结果偏低;在含水率大于 22 cm^3/cm^3 时,计算结果偏高。Malicki 公式在含水率小于 22 cm^3/cm^3 时,计算结果偏低;当含水率大于 22 cm^3/cm^3 时,计算结果偏高,总体计算结果较差。Roth 公式整体效果优于 Topp 公式与 Malicki 公式,在含水率小于 25 cm^3/cm^3 时,有较好的线性相关性;当含水率大于 25 cm^3/cm^3 时,计算结果偏高。与其他 3 个经典公式相比,式(7)含水率计算值与标准值的整体离散度较低,在含水率小于 30 cm^3/cm^3 左右时具有较好线性相关性。从图 7b 明显看出,式(6)土壤含水率计算值与标准值的离散程度较差,线性关系表现更优。

为定量分析不同土壤含水率测量公式计算值与

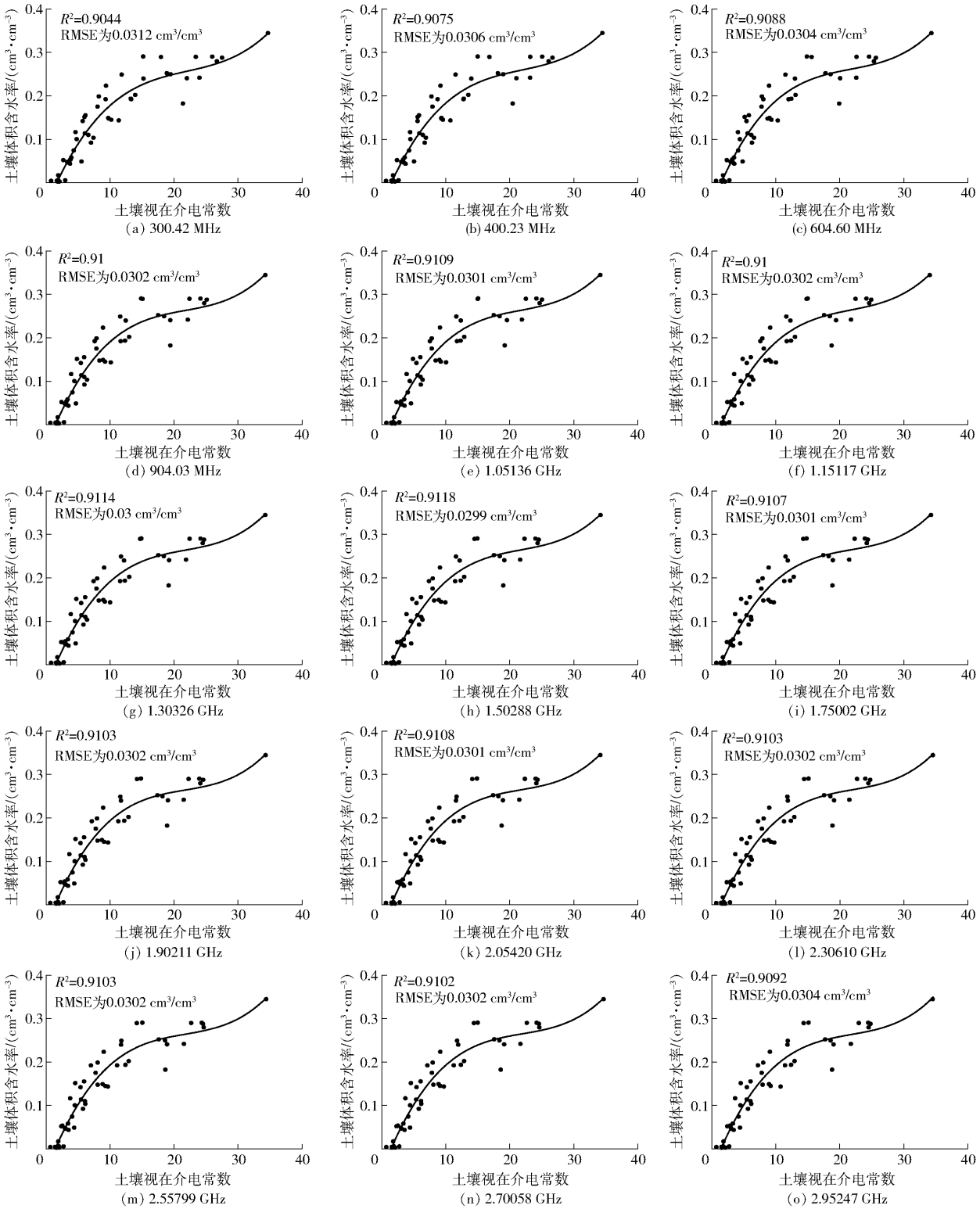

图 6　不同频率下土壤视在介电常数与干燥法所测体积含水率标准值相关性分析

Fig. 6　Correlation analysis between real part value of soil apparent dielectric constant value and standard value of volumetric water content measured by drying method at different frequencies

含水率标准值差异性，以及公式计算精度与准确性，选取决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)、相对分析误差(RPD)对上述经验公式进行评价，结果如表 3 所示。

从表 3 可以看出，式(7)与其他 3 个经典公式相比，其 R^2 与 RPD 最大，RMSE 最小；且 R^2 大于 0.89，RPD 大于 3.0，RMSE 小于 0.035 cm^3/cm^3。表明式(7)与 Topp 公式、Roth 公式、Malicki 公式相比，其计算精度较高，并具有极好定量分析计算能力。式(6)与干燥法含水率标准值对比，其 R^2 大于 0.912，RMSE 小于 0.03 cm^3/cm^3，RPD 大于 3.30，且与式(7)相比式(6)计算效果略好一些。

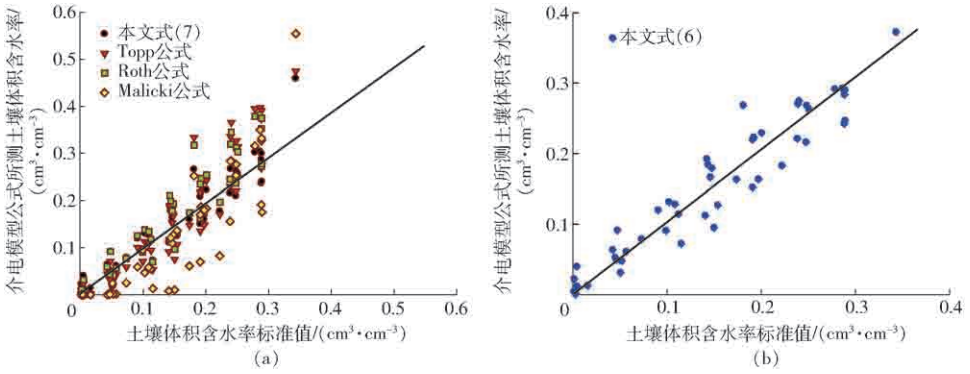

图 7 不同公式与干燥法所测含水率标准值对比图

Fig. 7 Comparison of standard values of water content measured by different formulas and drying method

表 3 不同公式与干燥法含水率标准值对比精度

Tab. 3 Comparison of different formulas and standard values of water content in drying method

土壤含水率计算公式	R^2	RMSE/($cm^3 \cdot cm^{-3}$)	RPD
本文式(7)	0.890 7	0.034 0	3.026
Topp 公式	0.835 1	0.058 2	2.279
Roth 公式	0.863 1	0.049 2	2.750
Malicki 公式	0.722 2	0.061 0	2.096
本文式(6)	0.912 6	0.029 4	3.343

由于土样质地不同,在配比相同体积含水率时,其实际体积含水率有一定差异。从 7 种土样介电谱可看出:粘粒含量较高的黄粘土、红土、粘壤土、黄绵土的介电谱表现趋势基本相同,当体积含水率在 28 cm^3/cm^3 左右时,其介电值(复介电常数、视在介电常数)相差不大;粘粒含量较少的黑土、砂壤土以及含量为 0 的石英砂的介电谱除去石英砂在体积含水率为 34.34 cm^3/cm^3 外,其整体变化趋势大体一致。表明,土壤粘粒含量对土壤介电极化有显著影响,进而影响土壤介电常数,这与文献[32 - 35]对粘粒含量影响土壤介电特性研究规律一致。

对 0.300 42 ~ 2.952 47 GHz 频段内选取的 15 个频率点上土样含水率分别与复介电常数实部、视在介电常数 3 阶曲线拟合分析发现,在频率 1.502 88 GHz 点上,复介电常数实部与实际含水率相关性、视在介电常数与实际含水率相关性的 R^2 均大于其他频率,RMSE 均小于其他频率,这表明土壤含水率对复介电常数实部与视在介电常数的影响一致。

研究发现,基于复介电常数实部构建的土壤含水率复介电实部测量式(式(6))比其他基于视在介电常数建立的 3 种经典公式和本文土壤含水率视在介电测量式(式(7))相比测量准确度更高,表明复介电常数实部可以更好地反映土壤不同含水率下介电极化特性。由于 Malicki 公式中多添加土壤容重 ρ 参数,而对土壤容重本研究均取较大值,这导致计算结果在含水率小于 22 cm^3/cm^3 时计算值偏小,大于 22 cm^3/cm^3 时计算值偏大,整体公式计算精度相对较差。

4 结论

(1)双线性介电计算模型在土壤介电测量中有很好的适应性,所得介电谱可较好地反映 7 种土壤不同含水率下的混合介质介电特性,模型针对特定探头在土壤介电计算方面具有很好的应用效果。在 3.5 mm 自制探头物理特性基础上,频率 1.050 ~ 1.503 GHz 是复介电常数实部和视在介电常数进行土壤含水率测量最优频段,1.502 88 GHz 是最佳频率点。

(2)与 Topp、Roth 和 Malicki 经典介电法测量土壤含水率公式相比,本文土壤含水率视在介电测量式的计算值与干燥法含水率测量值在相关性上表现更优,其 R^2 为 0.890 7,RMSE 为 0.034 cm^3/cm^3,RPD 为 3.026。土壤含水率复介电实部测量式的计算值与干燥法含率测量值对比,R^2 为 0.912 6,RMSE 为 0.029 4 cm^3/cm^3,RPD 为 3.343。数据分析表明,基于双线性介电计算模型建立的土壤含水率频域测量式对土壤水分测量结果较为精确。

参 考 文 献

[1] 黄高宝,郭清毅,张仁陟,等. 保护性耕作条件下旱地农田麦豆双序列轮作体系的水分动态及产量效应[J]. 生态学报, 2006, 26(4): 1176 - 1185.
HUANG Gaobao, GUO Qingyi, ZHANG Renzhi, et al. Effects of conservation tillage on soil moisture and crop yield in a phased rotation system with spring wheat and field pea in dryland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(4): 1176 - 1185. (in Chinese)

[2] 吴训. 土壤水分亏缺对作物蒸腾耗水的胁迫影响及其定量表征[D]. 北京:中国农业大学, 2019.
WU Xun. Effects of soil water deficit on crop water consumption by transpiration and their quantitative delineations[D]. Beijing: China Agricultural University, 2019. (in Chinese)

[3] 陈昊. 水分状况对内蒙古典型草原土壤微生物量及群落结构的影响[D]. 北京:中国农业大学, 2018.

CHEN Wei. Impact of water status on soil microbial biomass and community structure in typical grasslands of Inner Mongolia [D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)
[4] 曹鼎峰,施斌,顾凯,等.土的含水率 AHFO 法测量中分段函数模型建立[J].水文地质工程地质, 2016, 43(6): 41 - 47.
CAO Dingfeng, SHI Bin, GU Kai, et al. Establishment of the piecewise function model in the process of soil moisture monitoring with the AHFO method[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(6): 41 - 47. (in Chinese)
[5] 张虎元,王少一,赵天宇,等.利用高密度电阻率法进行盐渍土含水率的测定[J].水文地质工程地质, 2012, 39(1): 95 - 101.
ZHANG Huyuan, WANG Shaoyi, ZHAO Tianyu, et al. Determination of water content of saline soil with multi-electrode resistivity method[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(1): 95 - 101. (in Chinese)
[6] TOPP G D J A A. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines[J]. Water Resources Research, 1980, 16(3): 574 - 582.
[7] 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 measurement by TDR[J]. European Journal of Soil Science, 2010, 43(1): 1 - 13.
[8] JACKSON T J S E. Romote sensing applications to hydrology:soil moisture[J]. Hydrological Sciences Journal,1996, 41(4): 517 - 530.
[9] HERKLRATH W N H S P M. Automatic realtime 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 soli[J]. European Journal of Soil Science, 2010, 47(3): 357 - 366.
[11] 刘侃,李碧雄.介电常数常用测量方法综述[J].科技经济导刊, 2019, 27(14): 56 - 57.
[12] VANZURA E J, BAKER-JARVIS J R, GROSVENOR J H, et al. Intercomparison of permittivity measurements using the transmission/reflection method in 7mm coaxial transmission lines[J]. Microwave Theory & Techniques IEEE Transactions on, 1994, 42(11): 2063 - 2070.
[13] NI E. An qlnncertainty analysis for the measurement of intrinsic properties of materials by the combined transmission-reflection method[J]. Journal of Zhejiang University, 1991, 41(4): 495 - 499.
[14] BOUGHRIET A H, LEGRAND C, CHAPOTON A. Noniterative stable transmission/reflection method for low-loss material complex permittivity determination[J]. Microwave Theory & Techniques IEEE Transactions on, 1997, 45(1): 52 - 57.
[15] 滕晓菲,周俊孟,闾坚强.生物介质复介电常数测量技术的研究——传输法[C]//1995 年全国微波会议论文集(下册), 1995:5.
[16] 赵飞,裴静,徐沛,等.波导传输线法标准样片相对介电常数指标的标定与验证[J].计量技术,2018,532(12): 9 - 11.
[17] HASTED J B. Aqucos dielectrica [J]. Journal of molecular structure, 1975, 28(1): 227.
[18] CLARKSON T S, GLASSER L, TUXWORTH R W, et al. An appreciation of experimental factors in time-domain spectroscopy [J]. Advances in Molecular Relaxation & Interaction Processes, 1977, 10(3): 173 - 202.
[19] LOGSDON S D. Soil dielectric spectra from vector network analyzer data[J]. Soil Science Society of America Journal, 2005, 69(4): 983 - 989.
[20] SKIERUCHA W, WILCZEKA. A FDR sensor for measuring complex soil dielectric permittivity in the 10 ~ 500 MHz frequency range[J]. Sensors, 2010, 10(4): 3314 - 3329.
[21] ESTEVEZ R A S B. Frequency domain soil moisture determination using bilinear analysis with an open-ended dielectric erobe [Z]. Reno, Nevada, 2009.
[22] 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.
[23] FOLGERO K, TJOSLAND T. Permittivity measurement of thin liquid layers using open-ended coaxial probes [J]. Measurement Science & Technology, 1996, 7(8): 1164.
[24] LOGSDON S D. Electrical spectra of undisturbed soil from a crop rotation rtudy[J]. Soil Science Society of America Journal, 2008, 72(1): 11 - 15.
[25] 张灿灿.尿素-PNIPAM 的相互作用的介电谱研究[C]//中国化学会 2017 全国高分子学术论文报告会摘要集——主题 C:高分子物理与软物质,2017:1.
[26] 徐肖伟,刘伟迪,王科,等.水分对电容式油纸绝缘套管频域介电谱的影响[J].绝缘材料, 2018,51(2): 62 - 67.
XU Xiaowei, LIU Weidi, WANG Ke, et al. Influence of water content on frequency domain spectroscopy of capacitive oil-paper insulation bushing[J]. Insulation Materials, 2018, 51(2): 62 - 67. (in Chinese)
[27] 关振铎.无机材料物理性能[M].2 版.北京:清华大学出版社,2011.
[28] 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.
ZHU Anning, JI Liqing, ZHANG Jiabao, et al. Empirical relationship between soil dielectric constant and volumetric water content in various soils[J]. Acta Pedologica Sinca, 2011, 48(2): 263 - 268. (in Chinese)
[29] 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].杨凌:西北农林科技大学,2014.
XU Jinghui. Soil permittivities in LF - UHF frequency range and soil moisture measurement in frequency domain [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014. (in Chinese)
[30] 孙宇瑞.非饱和土壤介电特性测量理论与方法的研究[D].北京:中国农业大学,2000.
SUN Yurui. Study on the measuring theory & method of dielectric characteristics for unsaturated soil[D]. Beijing: China Agricultural University, 2000. (in Chinese)
[31] 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.
[32] DOBSON M C. Microwave dielectric behavior of wet soil-part II: dielectric mixing models[J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 1985(1): 35 - 46.
[33] DIRKSEN C D S. Mproved calibration of time domain reflectometry soil water content measurements[J]. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57(3): 660 - 667.
[34] ALHARTHI A L J. Soil water saturation:dielectric determination[J]. Water Resources Research,1987,23(4): 591 - 595.
[35] FERRE P A R D L K. Spatial averaging of water content by time domain reflectomertry: impiications for twin rod probes with and without dielectric coatings[J]. Water Resources Research, 1996, 32(2): 271 - 279.