

引用: 胡建东, 李林泽, ABDULRAHEEM Mukhtar Iderawumi 等. 介电特性土壤水分测定方法研究进展 [J]. 河南农业大学学报, 2021, 55(4): 603-611. DOI: 10.16445/j.cnki.1000-2340.20210618.002

介电特性土壤水分测定方法研究进展

胡建东^{1,2,3}, 李林泽^{1,2}, ABDULRAHEEM Mukhtar Iderawumi^{1,2}, 苑锋^{1,2}, 李保磊^{1,2}, 位文涛^{1,2}

(1. 河南农业大学机电工程学院, 河南 郑州 450002; 2. 河南省农业激光技术国际联合实验室, 河南 郑州 450002; 3. 小麦玉米作物学国家重点实验室, 河南 郑州 450002)

摘要: 介电特性被证明是研究土壤水分测定最有价值的参数, 因为介电特性与土壤水分有着非凡的联系。电容传感器、时域反射仪 (TDR)、频域反射仪 (FDR)、中子法、电阻和电导率都能提供解释土壤含水量的介电特性谱。然而, 由于不同土壤类型土壤介电特性的复杂性, 在不同尺度上实现土壤水分高精度测定, 仍然面临巨大挑战。本文综述了介电特性在土壤水分快速测定中的地位 and 几种典型介电特性土壤水分测定方法的研究进展, 分析了介电特性土壤水分快速测定方法所涉及的难点, 提出了消除土壤类型等影响介电特性土壤水分测定的差分解释法新思路, 并对介电特性土壤水分测量技术发展进行了总结, 指出了未来的研究方向。

关键词: 土壤水分; 介电特性; 时域反射法; 土壤类型; 差分解释

中图分类号: S151

文献标志码: A

文章编号: 1000-2340(2021)04-0603-09

Research progress of soil water content measurements using dielectric properties

HU Jiandong^{1,2,3}, LI Linze^{1,2}, ABDULRAHEEM Mukhtar Iderawumi^{1,2},
YUAN Feng^{1,2}, LI Baolei^{1,2}, WEI Wentao^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China; 2. Henan International Joint Laboratory of Laser Technology in Agriculture Sciences, Zhengzhou 450002, China; 3. State Key Laboratory of Wheat and Maize Crop Science, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Dielectric constant has proven itself to be a valuable contributor in the study of the measurement of soil water content (SWC) in the field, primarily due to its extraordinary association with SWC. Capacitance sensors, time domain reflectometer (TDR), frequency domain reflectometer (FDR), neutron thermalization, resistance and electric conductivity all have the dielectric spectrum to explain the soil water content. However, due to the complexity of the soil dielectric properties of different soil types, it is still a great challenge to measure soil water content with high accuracy at different scale ranges. This paper reviews the status of dielectric properties in the rapid determination of soil water content and introduces the research progress and working principle of several typical soil water content measurement methods using physical dielectric properties. The challenges for the rapid determination of soil water content by the dielectric properties are analyzed. And a new idea named differential interpretation method is proposed to eliminate the influence of soil types. Finally, the progress of soil water content measurement using dielectric properties is summarized and the future research directions and trends are pointed out.

Key words: soil water content; dielectric properties; time domain reflectometry; soil type; differential interpretation method

收稿日期: 2021-03-09

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32071890)

作者简介: 胡建东 (1965—), 男, 江西新余人, 教授, 博士, 博士生导师, 从事农业测试技术与仪器研究。

通信作者: 李林泽 (1987—), 男, 河南周口人, 博士研究生。

作物生长环境是土壤养分、土壤水分和农业气象等多因素相互作用形成的有机体系,其中土壤水分起着作物生长发育等非常重要的生态环境调节功能^[1-2]。2019年,《Nature》报道土壤水分对作物长期吸收土壤养分影响极大^[3]。土壤水分通过土壤基质吸附和植物吸收等途径提供作物生长有益信息,然而外界环境条件发生变化时,则会导致水分从土壤中释放,从而破坏作物生长生态系统结构与功能,因此研究土壤水分准确快速测定新方法对于维持作物生长生态机制、作物人工调节功能和提高作物产量都具有重要意义^[4-6]。

土壤水分测定方法常见的有卡尔费休滴定法(Karl Fischer titration)、烘干法、中子仪法、 γ 射线透射法、核磁共振法和遥感法等^[7-8]。近年来,分布式光纤光谱、近红外、太赫兹及光和电磁波等新颖方法也相继出现。卡尔费休滴定法利用碘和二氧化硫的氧化还原反应,在有机碱和甲醇环境下,与水发生定量反应。依据法拉第电解定律,电解产生碘与耗用电量呈正比例关系,从而计算出土壤样品水分含量。尽管卡尔费休滴定法是最为准确和可靠的测定方法,但该方法较少用于作物生长过程中土壤水分快速定量分析^[9]。在土壤水分快速测定研究方面,较早采用的是张力计测定非饱和土壤水分方法^[10-11]。随后,埋入土壤导线电阻变化^[12-13]和中子衰减法也开始应用于快速土壤水分测量^[14-17]。时域反射法(Time domain reflectometry, TDR)将介电特性引入土壤水分快速测量方法,实现了在高频电磁脉作用下土壤水分快速测量^[18-21];X射线直接透过土壤样品时能量会衰减,衰减量是土壤水分函数,通过射线探测器计数快速获得土壤水分含量^[22-23];近红外土壤水分测量是一种非接触无损测量方法,具有检测时间短、对人体无害和灵敏度高等优点^[24-26];用探头接收 γ 射线透过土壤样品后的能量,求解该能量与土壤水分的关系并利用换算快速获得土壤水分含量^[27-29]。物理介电特性时域反射土壤水分测量法具有较高的精度,但仍受土壤类型、颗粒大小、容重、有机质、盐分及温度等严重影响,这些干扰因素给土壤水分测定带来极大挑战^[30-40]。频域反射法(Frequency domain reflectometry, FDR)测量土壤水分原理与时域反射法类似,利用电磁脉冲在不同介质中传播时振荡频率变化来测定土壤水分^[41-42]。频域反射法和时域反射法一样也受到探头附近土壤孔隙度影响。多年来,物理介电特性土壤水分测定研究一直十分活跃,早期主要是针对土壤电导干扰的消除展开,这些研究已把电导干扰控制在较小限度内。近

期研究主要围绕时域或频域方法影响因素的消减展开,以探寻其规律并建立适应更多土壤类型的土壤水分测定模型^[43-45]。这些工作取得了相当的进展,但模型适应性依然具有较大局限。土壤水分测定研究主要偏重于简化标定方法,提高校准精度和修正计算模型等。

1 4种典型物理介电特性土壤水分测定方法

1.1 物理介电特性土壤水分快速测定

物理介电特性土壤水分测定方法是基于土壤本身的固有特性而形成的。土壤水分介电系数随水分不同而发生剧烈转变,强结合水介电系数约为3.2,弱结合水介电系数约为10,毛细管水介电系数约为14,而自由水的介电系数约80^[31,46]。基于土壤物理介电特性的电磁波法(时域反射法、频域反射法、光谱反射法和漫反射法)是土壤水分快速测定的主流发展方向^[47]。时域反射法是一种典型的介电特性快速土壤水分测量方法,是以研究液体介电特性为基础发展起来的。TOPP等^[18-21]将其引入用于土壤水分测量的研究,其测试原理是根据高频电磁波在不同介质中传播速度不同的物理现象提出的。研究者依据此方法测得了土壤中气、固、液混合物的介电常数,进而用统计学中数值逼近理论分类法找出了不同种类土壤水分与介电常数间关系^[48-51]。大量理论和试验研究证明,时域反射法土壤水分测试技术的精度取决于模型对土壤适应性,测量前需进行标定,若更换测量位置或者传感器周围土壤扰动,需要重新标定。

时域反射和频域反射土壤水分测定方法在生产实际中广泛采用,但是困扰高精度快速水分测定的影响因素依然存在,使得介电特性法土壤水分测定一直不能走出经验性和半经验性模型建立的路子,不能摆脱原位标定和校准带来的繁琐步骤和误差^[52-54]。目前,介电特性法土壤水分测定还存在以下问题:(1)介电特性法土壤水分测定原理是基于水的介电系数与土壤介电系数的巨大差异,但是当土壤水分含量较低且以结合水为主时,水分表现介电系数接近土壤介电系数,导致土壤介电系数和水分介电系数难以区分;(2)计算模型大都是根据经验或半经验建立的,极大地依赖于建模条件,标定并不能解决模型条件适应性问题,从而导致测定误差;(3)常规介电特性土壤水分测定易受土壤扰动和容重变化的影响,传感器与土壤接触难以一致,加之土壤成分、质地空间变异与周边非均态性导致测定结果重现性较差。而水分形态在总水分

中比例又随土壤成分、形态、质地、孔隙率、温度的不同而不同(图1)。通常土壤水分存在于土壤颗粒内(聚集体间孔隙空间)和土壤颗粒(聚集体内孔隙空间)之间的孔隙空间内,该孔隙空间被空气

或水占据。针对这些情况,完全依靠介电特性这一个参数快速测定土壤水分似已潜力有限,开辟新途径提升土壤水分介电理论研究迫在眉睫^[55-56]。

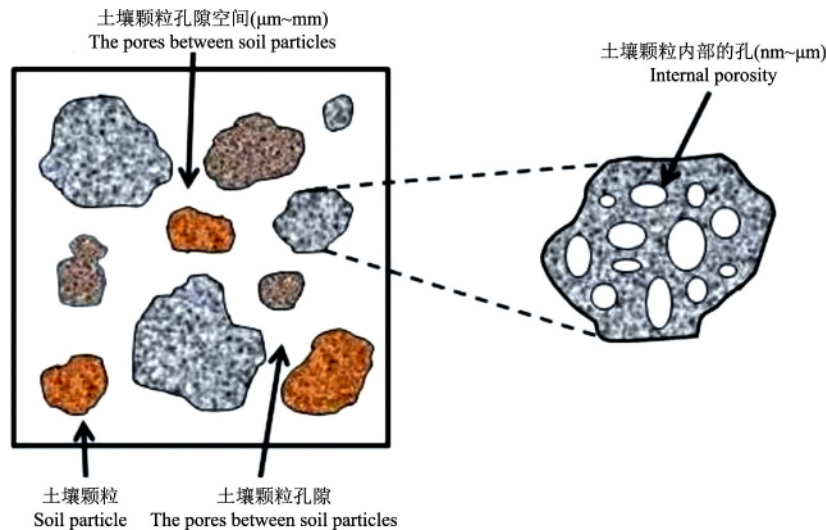


图1 土壤颗粒之间的孔隙结构

Fig. 1 The pore structures among soil particles

总之,介电特性法土壤水分测定方法是国内外研究热点,介电特性测定土壤水分具有田间原位测定、快速直读、不破坏土壤结构、价格低廉、无放射性物质、安全可靠、便于长期观测和积累田间水势资料等优点。根据测量结果可自动控制灌溉水闸,实现自动灌溉。

1.2 基于介电特性的土壤水分时域反射法

TDR法测量土壤水分的基本原理如图2。典型TDR土壤水分测量实质是测量高频电磁波通过插入土壤中导波探头的传输时间来确定土壤介电常数,从而间接测量土壤水分^[46, 57-62]。

$$v = c / \sqrt{\mu_r \cdot \varepsilon} \quad (1)$$

高频电磁波在土壤介质中传播速度 v 由该土壤相对介电常数 ε 和相对磁化率 μ_r 决定,也即 c 为光速。高频电磁波在土壤介质中的传播速度 v 随介质变化而变化,表示为

$$v = 2L/t \quad (2)$$

式中: L 为导波探头长度, t 为高频电磁波沿导波探头传输和返回时间。因此^[18]:

$$\varepsilon = \left(\frac{c \cdot t}{2L} \right)^2 \quad (3)$$

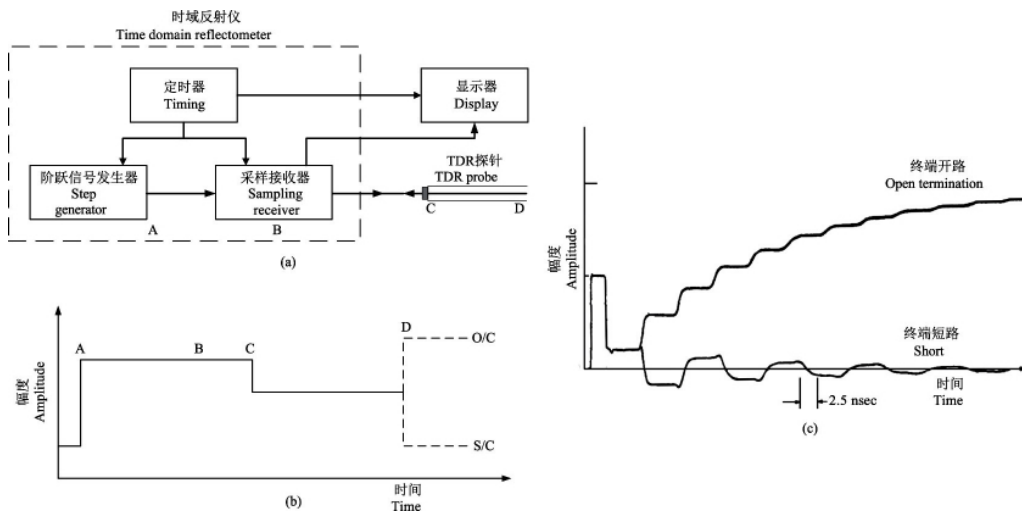
介质相对介电常数 ε 取决于土壤水分含量等土壤性质,水分含量微小变化引起相对介电常数 ε 产生显著变化。然而土壤是一种非匀质、多相、分散和颗粒化的多孔系统,由惰性固体、活性固体、溶质、气体和水组成,其独特的物理特性和耕种方式

导致土壤水分的赋存形态和释放特征极其复杂,且空间变异性大,上述因素都将影响土壤的介电常数,给土壤水分准确测定带来了极大困难,同时也对包括土壤养分、土壤水分和土壤物理特性测定研究手段提出了更高要求。TDR法土壤水分测量受土壤类型、颗粒大小、容重、有机质、盐分及温度等因素影响^[23-28, 63-64],其标定曲线越来越复杂,已经建立的标定曲线呈高达12次方的幂指函数^[11, 65-66]。研究表明,时域反射法土壤水分测试技术的精度取决于模型对土壤的适应性,使用前需进行标定,若更换测量位置,需要重新进行标定,即便是传感器周围土壤扰动也需要重新标定。当体积水分小于 $0.3 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 时,测值偏低,体积水分大于 $0.3 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 时,测值可偏高10%~20%,土壤电导率大于 $11 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 时,土壤水分测量值也明显偏高3.95%~6.7%^[67-68]。

1.3 基于介电特性的土壤水分频域反射法

FDR土壤水分测量仪器由探针和低频振荡电路组成。其传感器部分可视作由土壤做电介质的电容器。将振荡器与电容器组成调谐电路,土壤水分的变化将改变振荡电路的频率,通过测量振荡频率,可以得到土壤的介电特性。根据土壤介电特性与水分的经验或半经验公式^[18],可以得到土壤水分。图3所示的FDR介电物理传感器由2根直径为2 mm的不锈钢棒组成,棒与棒之间的距离为13 mm,长度分别为10、20、30 mm。同轴线和不锈钢

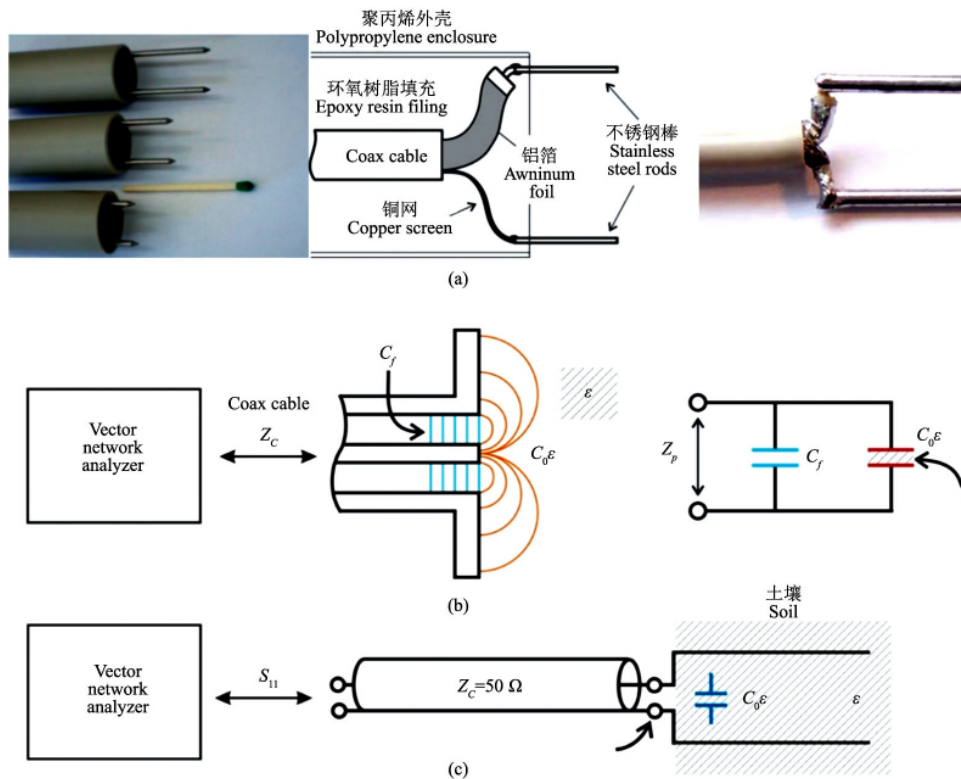
棒构成不连续最小阻抗^[45 69-70]。



(a) 时域反射法原理框图; (b) TDR 输出时序图, 时间间隔 C-D 代表高频电磁脉冲在土壤中的传输时间; O/C S/C 指示开路电路和短路电路 2 种方式; (c) 同轴线中介质样品(水)的典型反射。
 (a) Schematic Block diagram of time domain reflectometer (TDR); (b) TDR output sequence diagram, time interval C-D represents the travel time of high frequency electromagnetic pulse in the soil sample; O/C and S/C indicate open circuit and short circuit, respectively; (c) Typical reflection from a dielectric sample(water) in a coaxial line.

图 2 TDR 土壤水分测量原理图

Fig. 2 The schematic diagram of TDR soil water content sensor



(a) 左图是两线不锈钢棒 FDR 探头, 中间图是内部连接示意图, 右图是同轴电缆与平等波导的接口; (b) 开路同轴电缆传感器 C_f-C_0 电容模型; (c) 两线传感器在一个损耗介质中的电容 C_0 模型。
 (a) On the left are two wire stainless steel rod FDR probes, in the middle is the schematic diagram of internal connections, and on the right is the interface between coaxial and parallel waveguides; (b) Capacitance model C_f-C_0 of an open-ended coax sensor; (c) Capacitance model C_0 of a two-wire sensor in lossy dielectric medium.

图 3 FDR 传感器土壤水分测量的原理

Fig. 3 The schematic diagram of FDR soil water content sensor

依据开路同轴传感器模型^[69-73] Z_c 为同轴电缆的阻抗,同轴开路传感器网络由电容 C_f 和 $C_0\varepsilon$ 构成, C_f 是在同轴波导中的边缘电容, $C_0\varepsilon$ 是测试样品中的边缘电容, C_0 是介质为空气时的电容。电容值和损耗与测试样品的复介电系数的实部和虚部相关,随着实部和虚部的变化而变化。 C_f 和 $C_0\varepsilon$ 的值取决于角频率 $\omega = 2\pi f$,传感器的阻抗 Z_p 表示为:

$$Z_p = \frac{1}{j\omega(C_f + C_0\varepsilon)} \quad (4)$$

$$S_{11} = |S_{11}| e^{j\varphi} = \frac{Z_p - Z_c}{Z_p + Z_c} \quad (5)$$

式中: $|S_{11}|$ 和 ε 为矢量网络分析仪(Vector network analyzer) 测量的复反射系数 S_{11} 的模和相位。介电系统的实部和虚部可以表示为^[40]:

$$Re(\varepsilon) = \frac{-2|S_{11}|\sin\varphi}{\omega C_0 Z_c (1 + 2|S_{11}|\cos\varphi + |S_{11}|^2)} \frac{C_f}{C_0} \quad (6)$$

$$Im(\varepsilon) = \frac{1 - |S_{11}|^2}{\omega C_0 Z_c (1 + 2|S_{11}|\cos\varphi + |S_{11}|^2)} \quad (7)$$

与 TDR 相比, FDR 在电极几何形状设计和工作频率选取上有更大的自由度,校准和自动连续监测更容易,但对土壤类型及酸碱度更为敏感,需要针对特定土壤进行频繁地校准,限制了其应用范围。

1.4 基于介电特性的土壤水分测定电容传感器法

由于水的介电常数比干土的介电常数高出一个数量级(水的介电常数约为 80,不同类型干土的介电常数为 2~9)^[31-32, 46, 67]。土壤水分变化时,其等效介电常数将发生较大的变化。当以土壤作为电容器的电介质时,不同水分的土壤,其电容值也必然存在差异,利用此种差异可间接得到土壤的水分。电容传感器法土壤水分测量必须消除电容传感器中电导的影响,必须找到土壤复介电系数的实部和虚部所产生的无功分量和有功分量,其中参数调制式电容传感器法应用最为广泛^[72-74]。参数调制式电容传感器法土壤水分测量电路函数 $\omega(C, R)$ 中引入了一个参数 λ ,其值是可以任意变化的,与所求取的变量数值无关。这时得到被切割分离了一系列信号 $\omega(C, R, \lambda)$ 。给分离参数以不同的值,可以表达式为:

$$\omega = \varphi(C, R, \lambda) \quad (8)$$

对其求解后就可以得到所要求的量。

电容传感器用 C_x, R_x 组成的并连替代电路来表示,它被接在含有电感 L 、电容 C_0 和附加电容 C_π 的二端网络。电容 C_π 由开关 K 周期的接入,

这样,在二端网络中便实现了参数调制。来自振荡器的频率为 ω 的高频电压,经电源内阻 R_s 为二端网络送电。开关 K 周期地等时地接通和断开,其频率为 Ω 。这时,二端网络的阻抗交替的为 2 个断续值,即二端网络传递系数呈跳跃状变化,其值可表示成:

$$X(t) = \sum_k \frac{2}{\pi} \cdot \frac{1}{k} (-1)^{\frac{3k+1}{2}} \cdot \cos k\Omega t \quad (9)$$

式中: $k=1, 3, 5, \dots$ 为谐波的次数。

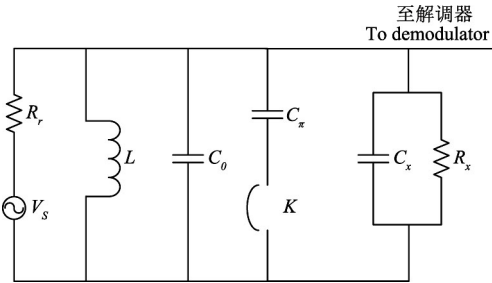


图 4 电容法土壤水分测定网络

Fig. 4 The schematic diagram of soil water content measurement by capacitance method

在对来自振荡器的高频正弦电压进行参数调制时,二端网络上电压瞬时值有如下形式:

$$U(t) = u(m) \left[1 + m \sum_k \frac{2}{\pi} \cdot \frac{1}{k} (-1)^{\frac{3k+1}{2}} \cdot \cos k\Omega t \right] \cos \omega t \quad (10)$$

式中: m 为调制系数。

将其变形即可得:

$$U(t) = U_m \left\{ \cos \omega t + m \sum_k \frac{2}{\pi} \cdot \frac{1}{k} (-1)^{\frac{3k+1}{2}} \cdot [\cos(\omega - k\Omega)t + \cos(\omega + k\Omega)t] \right\} \quad (11)$$

即,频谱中含有频率为 ω 的载频和频率分别为 $\omega - k\Omega, \omega + k\Omega$ 的 2 个边频,同时边频的幅度与谐波次数 k 成反比。

解调器输出信号为跟随频率为 Ω 的一系列周期的方波脉冲,其脉冲幅度与调制系数 m 成正比。在所研究的二端网络中进行参数调制时,系数 m 表示为:

$$m = \frac{|\Delta Y|}{|Y|} = \left| \frac{|Y_2| - |Y_1|}{|Y_2|} \right| = \left| 1 - \frac{|Y_1|}{|Y_2|} \right| \quad (12)$$

式中: $|Y_1|$ 和 $|Y_2|$ 分别对应开关闭合时和断开时二端网络导纳的模。

开关闭合时二端网络的导纳:

$$Y_1 = \frac{1}{R_x} + j[\omega(C_0 + C_x + C_\pi)] - \frac{1}{\omega L} \quad (13)$$

对应开关断开时的导纳:

$$Y_2 = \frac{1}{R_x} + j[\omega(C_0 + C_x) - \frac{1}{\omega L}] \quad (14)$$

二端网络复数导纳的模可表示为:

$$|Y_2| = \sqrt{\frac{1}{R_x^2} + [\omega(C_0 + C_x) - \frac{1}{\omega L}]^2} \quad (15)$$

$$|Y_1| = \sqrt{\frac{1}{R_x^2} + [\omega(C_0 + C_x + C_\pi) - \frac{1}{\omega L}]^2} \quad (16)$$

若令开关闭合和断开时,二端网络复数导纳的模相等,即:

$$|Y_1| = |Y_2| \quad (17)$$

将式(15)、(16)代入式(17),经整理后可得:

$$\omega^2 L \left(C_0 + C_x + \frac{1}{2} C_\pi \right) = 1 \quad (18)$$

由此得:

$$C_x = \frac{1}{\omega^2 L} \left(C_0 + \frac{1}{2} C_\pi \right) \quad (19)$$

若想使线路进入满足式(19)条件的平衡状态,可以通过改变 L 、 C_0 、 C_π 中任何一个参数来实现,也可在二端网络参数不变时,通过改变振荡器的频率来实现。

2 土壤水分差分解释法

如何理解土壤类型、土壤水分形态、土壤颗粒大小、容重、有机质、盐含量及温度等对土壤水分测量的影响,是土壤科学工作者重点研究的内容。土壤水分差分解释法首先要理解土壤成土母质、土壤质地、土壤孔隙率、土壤盐分、有机质含量、传感器工作频率、形状、绝缘层、边缘效应和环境温湿度等与土壤物理介电特性的关系,在此基础上建立基于土壤物理介电特性的测量体系。

土壤水分表达式可以有体积水分和重量水分 2 种方式,体积水分表达式 $\theta_v = A_w / A_b$ 中, A_w 是指单位体积土壤 A_b 水分体积。质量水分表达式 $\theta_g = m_w / m_s$ 中,水的质量 m_w 与干土质量之比。参数差分解析过程是建立在改变土壤孔隙度基础上的,而孔隙度改变同时又引入了一个新误差,这是由土样水分存在形态改变产生的,它必然使土壤介电系数发生变化,参数差分解析就是为了消除这个次生误差而进行一次压缩和测量,与压缩前输出电压进行解析。这次压缩把土壤孔隙中部分空气挤出来,但并不改变传感器中土、气、水总量,原来与空气接触的部分土壤颗粒表面与水分子接触,引起水分存在状态改变,它表现在输出电压变化,测量这个电压

变化,用于修正物理介电特性多参数解析法中土壤水分传感器输出电压值,就消减了第一次差分解析引起的次生误差。

输出电压的差值 ΔV 与容重差值 ΔK 具有线性关系,在含水率一定条件下,传感器结构确定下, B 为容重变化产生的线性系数, $\Delta V_{21a} = V_{2a} - V_{1a}$ 为压缩后补土至密实态时由空气所产生电压值(下标“a”表示空气“air”)

$$\Delta V_{21} = \Delta V_{21a} + B \cdot \Delta K_{21} \quad (20)$$

将压缩前后电压值 V_2 和 V_1 进行差减,输出电压变化量为: $\Delta V_{21} = V_2 - V_1$,土样中空气变化量为: $V_{2a} - V_{1a} = \Delta V_{21a} = -\Delta V_{12a}$;土样中水、土、气总容重变化量为: $\Delta K_{21} = K_2 - K_1$ 。压缩前后电压变化是水土总量增加导致的,因而电压增加了,而空气产生的电压减少了。水和土产生的电压增加量与湿土容重增加量成正比,定义: $\Delta V_{sw21} = B \cdot \Delta K_{21}$

$$\Delta V_{21} = \Delta V_{sw21} - \Delta V_{12a} = B \cdot \Delta K_{21} + \Delta V_{21a} \quad (21)$$

式中:下标 sw 表示土壤和水分,而下标 1、2 分别代表土壤松散和密实 2 个状态,下标 a 为空气,因此 $\Delta V_{21} = V_2 - V_1$ 为压缩前后传感器中同体积土壤输出电压差, $\Delta V_{21} = -\Delta V_{12a}$ 为传感器在补土并压缩前后的空气输出电压变化值。

其物理模型:

$$\frac{\partial w}{\partial f} = \left(\frac{\partial V_a}{\partial \varepsilon_a} + \frac{\partial V_s}{\partial \varepsilon_s} + \frac{\partial V_w}{\partial \varepsilon_w} \right) + \Phi(\varepsilon_a, \varepsilon_s, \varepsilon_w, T, f) \quad (22)$$

$$V = V_a + V_s + V_w = V_a + V_{sw} = V_a + B \cdot K \quad (23)$$

$$V_1 = V_{1a} + B_1 \cdot K_1, V_2 = V_{2a} + B_2 \cdot K_2 \quad (24)$$

式中: w 是土壤水分, f 是土壤水分传感器工作频率, ε_a 、 ε_s 、 ε_w 分别是空气、土壤和水介电系数, $\Phi(\varepsilon_a, \varepsilon_s, \varepsilon_w, T, f)$ 是余项, T 是土壤温度, V 为传感器输出电压, V_a 、 V_s 、 V_w 分别反映土样中空气、土壤和水分含量电压分量, V_{sw} 为湿土(土和水)电压输出分量。

当工作频率 f 一定时,式(22)可以简化用式(23)表示,系数 B (B_1 和 B_2) 反映湿土分量产生的电压分量 V_{sw} 同容重 K 的关系。在传感器结构确定后, V_{sw} 同湿土容重之比不变,所以 B 对于同一土壤类型是常数。影响系数 B 的因素有:水密度 ρ_w 和土密度 ρ_s 、水介电常数 ε_w 和土介电常数 ε_s 、传感器工作电压 V_{work} 、工作频率 f 、土水容积比率 $\chi_{s/w}$ 、质量含水率 ξ_w 、温度 T 等近 10 个因子。这些参数对于同一土壤类型,同一传感器结构和同一环境都是确定的, V_{sw} 只随容重 K 而改变。因此,关系式 $V = V_a + B \cdot K$ 在同一土壤类型和同一测定条件下,仅改变孔隙度成立(土壤水分活度随温度变化通过

差分消减)。不同土样含水率可以有不同 B 和 V_a 。如果知道 B 与水分含量关系,则可以由 B 求出含水率,排除 ΔV_{12a} 影响,这是物理介电特性多参数差分解析法求解水分关键。

3 展望

土壤物理介电特性的研究推动了土壤水分快速精确测量技术发展。TDR、FDR 和电容法的介电特性求解理论推动了土壤水分的测量应用。同时,多传感器网络和分布式土壤水分测定方法的发展为获取更为广阔空间土壤水分数据带来机会。本文试图为土壤介电特性与土壤复杂空间水分相互作用研究提供有益参考。特别是提出的土壤水分差分解释法思想克服了介电特性土壤水分测量依赖于土壤类型的缺点,也弥补了时域反射、频域反射和电容探头测量方法频繁标定的劣势,在土壤水分快速测定实际应用中具有重要价值。

物理介电特性土壤水分快速测定研究将向着以下几个方向发展。(1) 土壤水分传感器网络化,可以在线实时传输土壤水分信息。(2) 土壤水分空间和时间分布式测量,在一定的空间和时间范围内,获取相应的土壤水分位置或者时间的变化信息。(3) 无需根据土壤类型进行标定的介电特性土壤水分测定方法的实现,将极大地提高土壤水分测定方法对土壤类型的适应性。(4) 物理介电特性土壤水分传感器微处理器化和多信息融合发展,在获取土壤水分的同时获取土壤水势、温度、电导和其他化学成分信息。因此,在土壤水分测定方面,除了理解介电特性参数与土壤类型、空间结构、孔隙度和水分等因素影响之外,还要研究和发其空间和时间的分布特征以及工程实现技术。随着大数据和通信技术的发展,下一代物理介电特性土壤水分传感器将构建一种崭新的数据传输网络结构,企图跨尺度进行土壤水分信息的获取和传输。

参考文献:

[1] CAMPBELL G S. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data [J]. *Soil Science*, 1974, 117(6): 311-314.

[2] ROBINSON D A, CAMPBELL C S, HOPMANS J W, et al. Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories: a review [J]. *Vadose Zone Journal*, 2008, 7(1): 358-389.

[3] GREEN J K, SENEVIRATNE S I, BERG A M, et al. Large influence of soil moisture on long-term terrestrial carbon uptake [J]. *Nature*, 2019, 565: 476-479.

[4] JONES H G. Plant water relations and implications for irrigation scheduling [J]. *Acta Horticulturae*, 1990, 278: 67-76.

[5] HOWELL T A. Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture [J]. *Agronomy Journal*, 2001, 93(2): 281-289.

[6] PAN F. Estimating daily surface soil moisture using a daily diagnostic soil moisture equation [J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2012, 138(7): 625-631.

[7] WATANABE K, OSADA Y. Simultaneous measurement of unfrozen water content and hydraulic conductivity of partially frozen soil near 0 °C [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2017, 142: 79-84.

[8] QIN M, GIMÉNEZ D, MISKEWITZ R. Temporal dynamics of subsurface soil water content estimated from surface measurement using wavelet transform [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 563: 834-850.

[9] 张杰, 刘刚, 李保国, 等. ^3He 管中子土壤水分测量装置提高测量精度 [J]. *农业工程学报*, 2018, 34(2): 90-97.

[10] PENG W, LU Y, XIE X, et al. An improved thermo-TDR technique for monitoring soil thermal properties, water content, bulk density, and porosity [J]. *Vadose Zone Journal*, 2019, 18(1): 1-9.

[11] NADERI-BOLDAJI M, SHARIFI A, JAMSHIDI B, et al. A dielectric-based combined horizontal sensor for on-the-go measurement of soil water content and mechanical resistance [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2011, 171(2): 131-137.

[12] NOBORIO K. Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2001, 31(3): 213-237.

[13] REN T, Ochsner T E, Horton R, et al. Heat-Pulse method for soil water content measurement: influence of the specific heat of the soil solids [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67(6): 1631-1634.

[14] LI J, SMITH D W, FITYUS S G. The effect of a gap between the access tube and the soil during neutron probe measurements [J]. *Soil Research*, 2003, 41(1): 151-160.

[15] ELDER A N, RASMUSSEN T C. Neutron probe calibration in unsaturated tuff [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58(5): 1301-1307.

[16] AMOOZEGAR A, MARTIN K C, HOOVER M T. Effect of access hole properties on soil water content determination by neutron thermalization [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1989, 53(2): 330-335.

- [17] SUITS L D ,SHEAHAN T C ,FITYUS S ,et al. Water content measurement in expansive soils using the neutron probe [J]. *Geotechnical Testing Journal* ,2011 ,34 (3) : 255-264.
- [18] 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.
- [19] TOPP G C ,DAVIS J L ,BAILEY W G ,et al. The measurement of soil water content using a portable TDR hand probe [J]. *Canadian Journal of Soil Science* ,1984 ,64 (3) : 313-321.
- [20] TOPP G C ,DAVIS J L. Measurement of soil water content using time-domain reflectometry (TDR) : A field evaluation [J]. *Soil Science Society of America Journal* , 1985 ,49(1) ,19-24.
- [21] TOPP G C ,WATT M ,HAYHOE H N. Point specific measurement and monitoring of soil water content with an emphasis on TDR [J]. *Canadian Journal of Soil Science* ,1996 ,76(3) : 307-316.
- [22] GARNIER P ,ANGULO-JARAMILLO R ,DICARLO D A ,et al. Dual-energy synchrotron X ray measurements of rapid soil density and water content changes in swelling soils during infiltration [J]. *Water Resources Research* , 1998 ,34(11) : 2837-2842.
- [23] WELLER U ,LEUTHER F ,SCHLUTER S ,et al. Quantitative analysis of water infiltration in soil cores using X-ray [J]. *Vadose Zone Journal* ,2018 ,17(1) : 160-172.
- [24] KNADEL M ,MASIS-MELENDZ F ,JONGE L W ,et al. Assessing soil water repellency of a sandy field with visible near infrared spectroscopy [J]. *Journal of near Infrared Spectroscopy* ,2016 ,24(3) : 215-224.
- [25] KATUWAL S ,KNADEL M ,MOLDRUP P ,et al. Visible-Near-Infrared spectroscopy can predict mass transport of dissolved chemicals through intact soil [J]. *Scientific Reports* ,2018 ,8(1) : 1188-1196.
- [26] TERHOEVEN-URSELMANS T ,SCHMIDT H ,GEORG J R ,et al. Usefulness of near-infrared spectroscopy to determine biological and chemical soil properties: Importance of sample pre-treatment [J]. *Soil Biology and Biochemistry* ,2007 ,40(5) : 1178-1188.
- [27] HAINSWORTH J M ,AYLMORE L A G. Application of computer-assisted tomography (Cat) to gamma attenuation measurement of soil water content [J]. *Australian Journal of Soil Research* ,1988 ,26(1) : 105-110.
- [28] NOFZIGER D L. Errors in gamma-ray measurements of water-content and bulk-density in nonuniform soils [J]. *Soil Science Society of America Journal* ,1978 ,42(6) : 845-850.
- [29] REGINATO R J ,JACKSON R D. Field measurement of soil-water content by gamma-ray transmission compensated for temperature fluctuations [J]. *Soil Science Society of America Journal* ,1971 ,35(4) : 529-533.
- [30] 程强 ,孙宇瑞 ,林剑辉 ,等. 牧场土壤含水率与坚实度空间变异与相关性分析 [J]. *农业机械学报* ,2019 ,40 (3) : 103-107.
- [31] SELIG E T. Relationship of soil moisture to the dielectric property [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* ,1975 , 12(11) : 156-166.
- [32] ARULANANDAN K. Dielectric method for prediction of porosity of saturated soil [J]. *Journal of Geotechnical Engineering* ,1991 ,117(2) : 319-330.
- [33] WHALLEY W R ,DEAN T J ,IZZARD P. Evaluation of the capacitance technique as a method for dynamically measuring soil water content [J]. *Journal of Agricultural Engineering Research* ,1992 ,52: 147-155.
- [34] JACOBSEN O H ,SCHJØNNING P. A laboratory calibration of time domain reflectometry for soil water measurement including effects of bulk density and texture [J]. *Journal of Hydrology* ,1993 ,151(2-4) : 147-157.
- [35] SCHWARTZ B F ,SCHREIBER M E ,YAN T. Quantifying field-scale soil moisture using electrical resistivity imaging [J]. *Journal of Hydrology* ,2008 ,362(3-4) : 234-246.
- [36] MITTELBACH H ,LEHNER I ,SENEVIRATNE S I. Comparison of four soil moisture sensor types under field conditions in Switzerland [J]. *Journal of Hydrology* , 2012 ,430: 39-49.
- [37] MUKHLISIN M ,SAPUTRA A. A new proposed model of dielectric analysis for measurement of soil moisture water content [J]. *Journal of Engineering Science and Technology* ,2018 ,13(6) : 1514-1522.
- [38] 石庆兰. 土壤水分测量传感器的发展与未来 [J]. *高科技与产业化* ,2018(5) : 64-67.
- [39] ARSOY S ,KESKIN E ,OZGUR M. Reliability of soil water content measurements by the calcium carbide gas pressure method for small specimens [J]. *Scientia Iranica* ,2014 ,21(6) : 1762-1772.
- [40] HU W ,SHAO M A ,HOU M T ,et al. Mean soil water content estimation using measurements from time stable locations of adjacent or distant areas [J]. *Journal of Hydrology* ,2013 ,497: 234-243.
- [41] THOMAS R G. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines [J]. *Water Resources Research* ,1981 ,17(3) : 768-768.
- [42] SKIERUCHA W ,WILCZEK A. A FDR sensor for measuring complex soil dielectric permittivity in the 10-500 MHz

- frequency range [J]. *Sensors* 2010 ,10(4) : 3314–3329.
- [43] PHAM H Q ,FREDLUND D G ,BARBOUR S L. A study of hysteresis models for soil–water characteristic curves [J]. *Canadian Geotechnical Journal* ,2005 ,42 (6) : 1548–1568.
- [44] LETEY J. Relationship between soil physical properties and crop production [M/OL]. *Advances in Soil Science*. New York: Springer New York ,1958: 277–294
- [45] WAGNER N ,SCHEUERMANN A. On the relationship between matric potential and dielectric properties of organic free soils: a sensitivity study [J]. *Canadian Geotechnical Journal* ,2009 ,46(10) : 1202–1215.
- [46] KUPFER K ,TRINKS E ,WAGNER N ,et al. TDR measurements and simulations in high lossy bentonite materials [J]. *Measurement Science and Technology* ,2007 ,18 (4) : 1118–1136.
- [47] NAKAYAMA C. Non-contact water content measurement of soil based on thermal imaging [C]. 2008 International Conference on Control ,Automation and Systems , 2008 ,14: 2397–2400.
- [48] NADLER A ,GREEN S R ,VOGELER I ,et al. Horizontal and vertical TDR measurements of soil water content and electrical conductivity [J]. *Soil Science Society of America Journal* 2002 ,66(3) : 735–743.
- [49] SKIERUCHA W ,WILCZEK A ,ALOKHINA O. Calibration of a TDR probe for low soil water content measurements [J]. *Sensors and Actuators A: Physical* ,2008 ,147 (2) : 544–552.
- [50] VILLORO A ,LATORRE B ,TORMOJ , et al. A TDR wireless device for volumetric water content sensing [J]. *Computers and Electronics in Agriculture* , 2021 , 181: 132–147.
- [51] THOMSEN A ,SCHELDE K ,DROSCHER P ,et al. Mobile TDR for geo-referenced measurement of soil water content and electrical conductivity [J]. *Precision Agriculture* 2007 ,8(4–5) : 213–223.
- [52] 邵玲 林剑辉 孙宇瑞. 农田土壤含水率与坚实度快速信息采集系统 [J]. *农机化研究* 2007(2) : 83–86.
- [53] 孙宇瑞 马道坤 何权 等. 土壤水分剖面实时测量传感器试验研究 [J]. *北京林业大学学报* ,2006 ,28 (1) : 55–59.
- [54] 任淑娟 孙宇瑞 任图. 测量土壤水分特征曲线的复合传感器设计 [J]. *农业机械学报* 2009 ,40(5) : 56–58.
- [55] HU J D ,JIANG M ,ZHAO X Y ,et al. Fringing field sensor using a circuit-modulated parameter for measuring water content in a soil sample [J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 2008 ,134(3) : 356–360.
- [56] HUA W ,WANG C ,CHEN G ,et al. Measurement and simulation of soil water contents in an experimental field in delta plain [J]. *Water* 2017 ,9(12) : 947–951.
- [57] FELLNER-FELDEGG H. Measurement of dielectrics in the time domain [J]. *The Journal of Physical Chemistry* , 1969 ,73(3) : 616–623.
- [58] NOBORIO K. Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review [J]. *Computers and Electronics in Agriculture* , 2001 ,31(3) : 213–237.
- [59] HEDAYATI-DEZFOOLI M ,LEONG W H. Experimental evaluation of the measurement errors of soil water content due to interference of two adjacent TDR probes [J]. *Experimental Heat Transfer* 2017 ,30(5) : 475–488.
- [60] PERSSON M ,DAHLIN T. A profiling TDR probe for water content and electrical conductivity measurements of soils [J]. *European Journal of Soil Science* ,2010 ,61 (6) : 1106–1112.
- [61] 王聪颖 孙宇瑞 张慧娟. 一种基于三角波窄脉冲序列的时域反射土壤水分测量方法 [J]. *应用基础与工程科学学报* 2010 ,18(5) : 869–876.
- [62] ANBAZHAGAN P ,BITTELLI M ,PALLEPATI R R ,et al. Comparison of soil water content estimation equations using ground penetrating radar [J]. *Journal of Hydrology* 2020 ,588: 125–136.
- [63] IWATA Y ,MIYAMOTO T ,KAMEYAMA K ,et al. Effect of sensor installation on the accurate measurement of soil water content: Effects of sensor installation on soil water measurement [J]. *European Journal of Soil Science* , 2017 ,68(6) : 817–828.
- [64] 郭文川 宋克鑫 张鹏 等. 土壤温度和容重对频率反射土壤水分传感器测量精度的影响 [J]. *农业工程学报* 2013 ,29(10) : 136–143.
- [65] STANGL R ,BUCHAN G D ,LOISKANDL W. Field use and calibration of a TDR-based probe for monitoring water content in a high-clay landslide soil in Austria [J]. *Geoderma* 2009 ,150(1–2) : 23–31.
- [66] TIAN Z ,LU Y ,REN T ,et al. Improved thermo-time domain reflectometry method for continuous in-situ determination of soil bulk density [J]. *Soil and Tillage Research* 2018 ,178: 118–129.
- [67] TOPP G C ,ZEGELIN S ,WHITE I. Impacts of the real and imaginary components of relative permittivity on time domain reflectometry measurements in soils [J]. *Soil Science Society of America Journal* ,2000 ,64(4) : 1244–1252.

(下转第 638 页)

- chromosome rearrangements and polymorphisms identified in Chinese wheat cultivars by high-resolution multiplex oligonucleotide FISH [J]. *Theoretical and Applied Genetics* 2018, 131(9): 1967–1986.
- [19] LIU W X, KOO D, XIA Q, et al. Homoeologous recombination-based transfer and molecular cytogenetic mapping of powdery mildew-resistant gene *Pm57* from *Aegilops searsii* into wheat [J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2017, 130(4): 841–848.
- [20] GILL K S, LUBBERS E L, GILL B S, et al. A genetic linkage map of *Triticum tauschii* (DD) and its relationship to the D genome of bread wheat (AABBDD) [J]. *Genome*, 1991, 34(3): 362–374.
- [21] LI J J, ENDO T R, SAITO M, et al. Homoeologous relationship of rye chromosome arms as detected with wheat PLUG markers [J]. *Chromosoma* 2013, 122(6): 555–564.
- [22] DAI Y, DUAN Y M, CHI D, et al. Chromosome identification by new molecular markers and genomic in situ hybridization in the *Triticum-Secale-Thinopyrum* trigenic hybrids [J]. *Genome* 2017, 60(8): 687–694.
- [23] LI H H, LV M J, SONG L Q, et al. Production and identification of wheat-*Agropyron cristatum* 2P translocation lines [J]. *PLoS ONE* 2017, 11(1): e0145928.
- [24] MA P T, HAN G H, ZHENG Q, et al. Development of novel wheat-rye chromosome 4R translocations and assignment of their powdery mildew resistance [J]. *Plant Disease* 2020, 104(1): 260–268.
- [25] LI H H, DONG Z J, MA C, et al. Physical mapping of stem rust resistance gene *Sr52* from *Dasypyrum villosum* based on *ph1b*-induced homoeologous recombination [J]. *International Journal of Molecular Science*, 2019, 20(19): 4887.
- [26] 杨森. 利用小麦-黑麦双单倍体群体定位黑麦矮秆基因 [D]. 成都: 四川农业大学, 2018.
- [27] 马东钦, 王晓伟, 许兰杰, 等. 黄淮麦区部分小麦种质资源中矮秆基因的分布 [J]. *河南农业大学学报*, 2009, 43(2): 118–125.
- [28] SKOVMAND B, FOX P N, VILLAREAL R L. Triticale in commercial agriculture: progress and promise [J]. *Advances in Agronomy*, 1984, 37: 1–45.

(责任编辑: 常思敏)

(上接第 611 页)

- [68] 龚元石, 曹巧红, 黄满湘. 土壤容重和温度对时域反射仪测定含水率的影响 [J]. *土壤学报*, 1999, 36(2): 141–153.
- [69] STUCHLY M A, STUCHLY S S. Coaxial line reflection methods for measuring dielectric properties of biological substances at radio and microwave frequencies—a review [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1980, 29(3): 176–183.
- [70] XU J, LOGSDON S D, MA X, et al. Measurement of soil water content with dielectric dispersion frequency [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2014, 78(5): 1500–1506.
- [71] ATHEY T W, STUCHLY M A, STUCHLY S S. Measurement of radio frequency permittivity of biological tissues with an open-ended coaxial line: Part I [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1982, 30(1): 82–86.
- [72] 胡建东, 赵向阳, 李振峰, 等. 参数调制探针式电容土壤水分传感技术研究 [J]. *传感技术学报*, 2007, 20(5): 1057–1060.
- [73] 蒋国良, 邹彩虹, 胡建东, 等. 边缘电场土壤水分传感技术研究 [J]. *河南农业大学学报*, 2006, 40(1): 87–90.
- [74] MODALAVALASA S, SAHOO U K, SAHOO A K, et al. A review of robust distributed estimation strategies over wireless sensor networks [J]. *Signal Processing*, 2021, 81: 131–139.

(责任编辑: 蒋国良)