

频率域反射仪测定土壤含水量的校正与田间验证

吕国华¹, 李子忠¹, 赵炳祥¹, 赵晓燕², 肖志广²

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100094; 2. 北京市颐和园管理处, 北京 100091)

摘要: 为了获得精确的土壤含水量测定数据, 在室内和田间分别进行了频率域反射仪(FDR)测定土壤含水量的校正, 并在田间运用土钻取样和烘干法对模型参数进行了验证。结果表明, 室内试验获得了较好的模型参数, 均方根误差平均达到了 $0.023 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 但是应用到田间条件下误差很大, 均方根误差平均为 $0.066 \text{ m}^3/\text{m}^3$; 田间条件下也间接获得了较好的模型参数, 均方根误差的平均值为 $0.026 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 应用于田间时测定含水量的精确度较高, 均方根误差的平均值为 $0.026 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。因此, 对于构成复杂的城市或园林土壤, 在不挖剖面或土钻取样破坏土壤的前提下, 建议采用田间间接法进行校正。

关键词: 频率域反射仪; 土壤含水量; 校正

中图分类号: S 151.9⁺⁵ **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2008)04-0033-05

频率域反射仪(Frequency domain reflectometry, 简称FDR)是连续动态监测土壤体积含水量的一种有效工具^[1], 其根据电磁脉冲原理, 测定土壤的感应频率, 从而求出体积含水量。

FDR测定含水量的方法严格说是电容法, 它作为电磁学的一种测定土壤含水量的方法是在20世纪30年代首先提出的。20世纪90年代, 随着电子技术的发展, 电容法得以迅速发展^[2]。电容传感器无论从工作频率如38~150 MHz, 还是探头出现了很多类型, 如手持平行棒式、套管式以及与适合耕作机械相连的传感器等^[3]。从1991年开始出现了用于灌溉管理、能够实时监测的电容传感器。电容传感器在土壤水分的定点实时监测和区域速测方面得到了较好的应用^[4,5]。

从理论上讲, 所有影响土壤介电常数的因素对FDR的测定都有影响。FDR的工作频率越低, 越容易受到土壤酸度和盐度的影响^[6]。当FDR的工作频率在100~150 MHz时, 能够减小土壤pH和盐度的影响^[7]。当频率小于或等于100 MHz, 能够测量被土壤颗粒束缚的水, 而这些水不能被超过250 MHz的FDR有效测定^[8]。土壤容重^[9]、土壤有机质含量^[10]对FDR也有较大的影响。温度对FDR的测定影响较小, 在-40℃FDR仍然能够比较准确地测定冻土的含水量^[9]。

由于FDR对土壤类型具有较大的敏感度, 虽然FDR仪器自身带有默认模型和校正参数, 但是在具

体使用时, 由于田间土壤构成的复杂性和空间变异性, 一般都需要对参数进行校正^[11], 其准确度取决于其使用的新的校正参数。目前FDR的应用领域主要集中在相对均一的农田或园艺土壤中, 对于构成复杂的土壤如园林回填土则应用较少。本研究通过对FDR的实验室填装土柱校正法和田间张力计间接获取含水量的校正法以及在城市园林绿地中的验证情况分别进行了探讨, 提出了FDR的间接校正法, 期望对FDR的应用具有较好的参考作用。

1 材料与方法

1.1 FDR的基本原理

本实验所用FDR为Diviner 2000(Sentek, Australia), 它是一种套管式土壤水分测定仪。它作为一种经济、有效的测定体积含水量的一种仪器, 被许多学者所认可^[12~13]。Diviner 2000采用的是平行的环式电极组成电容, 其周围的土壤充当电介质, 影响土体范围为: 以探头为中心, 半径不大于10 cm, 高度不大于10 cm的圆柱形土体; 工作频率远大于100 MHz^[14]。

在土壤的三相体系中, 空气的介电常数为1, 纯水的介电常数为80.4, 土壤固相的介电常数为3~7(20℃, 105 Pa), 因此, 土壤含水量的变化, 对土壤的介电常数起决定性的作用。FDR就是根据土壤表观介电常数或电容的改变, 来测定土壤体积含水量。

总电容与表观介电常数的关系如下:

收稿日期: 2007-06-26

基金项目: 北京市科委资助项目(D0605001040291)

作者简介: 吕国华(1979-), 男, 山东青州人, 硕士研究生, 主要从事农田水土资源利用的研究工作。E-mail: gh7756@163.com。

通讯作者: 李子忠, 男, 山东平原人, 副教授, 主要从事农田水土资源利用和土壤物理学方向的研究工作。E-mail: zizhong@cau.edu.cn。

$$C = g \epsilon_a \quad (1)$$

式中, g 为与电极的几何形状和电极之间的距离有关的常数; ϵ_a 为土壤的表观介电常数, 单位为 F/m 。

FDR 在机器的固定工作频率作用下, 可测定其感应频率即:

$$F = (2\pi \sqrt{LC})^{-1} \quad (2)$$

式中, L 为自感系数, 取决于线圈本身的几何形状、尺寸、匝数以及介质的性质, 单位为 H ; C 代表总电容, 包括土壤电容和仪器电容, 单位为 F 。

Diviner 2000 采用频率值的归一化值 (SF) 与土壤体积含水量建立关系, 从而减小实验误差。

$$SF = (F_a - F_s) / (F_a - F_w) \quad (3)$$

式中, F_a 为探头在空气中测定的频率值, F_w 为在水

中测定的频率值, F_s 为在土壤中测定的频率值, 单位均为 Hz 。

求解土壤体积含水量的模型为:

$$SF = a \theta_b^b \quad (4)$$

式中, a, b 为参数, 与土壤属性有关; θ_b 为体积含水量 (m^3/m^3)。

1.2 试验地概况

实验地位于北京市颐和园西堤玉带桥处, 该处大部分绿地都是在人工回填土的基础上重新栽植的, 由于人为因素较大, 土壤构成比较复杂。土壤物理化学特性见表 1。土壤质地 (ST) 采用美国农业部标准; 土壤水分特征曲线采用压力板仪测定, 利用 van Genuchten (1980) 模型拟合获得。

表 1 土壤物理化学特性

Table 1 Soil physical and chemical properties

土壤层次 Soil layers (cm)	土壤水分特征曲线拟合参数 ^[1] Parameters of soil water retention curve						K_s	ST	θ_b	OM	EC	pH
	θ_b	θ_{FC}	θ_{WT}	α	n	m						
0~20	0.5731	0.3239	0.1426	0.0232	1.3071	0.235	71.84	砂壤 Sandy loam	1.40	23.36	25.13	6.74
20~60	0.6084	0.3472	0.1346	0.0525	1.2057	0.1706	212.46	粉壤 Silt loam	1.24	22.09	23.13	7.57
60~100	0.6061	0.3674	0.0917	0.0182	1.2963	0.2286	109.34	粉壤 Silt loam	1.12	11.96	23.00	7.95

注 (Note): θ_b 为饱和含水量 (Saturated water content), m^3/m^3 ; θ_{FC} 为田间持水量 (Field capacity), m^3/m^3 ; θ_{WT} 为萎蔫点含水量 (Wilting point), m^3/m^3 ; α, n, m 均为拟合参数; K_s 为饱和导水率 (Saturated hydraulic conductivity), mm/d ; ST 为土壤质地 (Soil texture); θ_b 为土壤容重 (Bulk Density), g/cm^3 ; OM 为土壤有机质 (Organic matter), g/kg ; EC 为电导率 (Electrical conductivity), ms/m 。

为了监测试验地内的土壤水分变化特征, 在试验地安装了 FDR 套管总计 29 根, 并且在每根 FDR 套管附近安装了不同深度的张力计 (20、45、90 cm 等)。

1.3 校正方法概述

FDR 校正方法目前主要有两种, 即田间校正方法和实验室校正方法。

1.3.1 实验室校正方法

(1) 将 FDR 探头 (直径 5 cm, 长度 9.5 cm) 放到 FDR 套管 (内径 5 cm) 中, 分别放置于空气和盛满纯水的 PVC 桶 (内径 29 cm, 高度为 20 cm) 中央, 获取 F_a 和 F_w 。

(2) 根据实验地土壤剖面分层特征 (表 1), 将 1 m 土体分为 3 层, 分别从各层取土壤样品, 风干, 过 2 mm 筛。在 105℃, 将土壤烘干 24 h, 密封冷却, 备用。将土壤样品与一定量的水均匀混合于容器内, 不断搅动, 确保水分均匀。本实验设置的水分梯度分别为 0, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.35

(3) 将 FDR 套管放置在 PVC 桶的中央, 将处理后的土壤样品, 按田间实际容重每 4 cm 一层, 分 4 层填装于 PVC 桶中, 土柱填装高度 16 cm。然后, 用薄膜密封土柱并放置于恒温室 (20±1℃), 平衡 24 h 后, 设置好 FDR 工作模式, 将探头伸入套管中, 测定频率值 F_s , 然后旋转探头一定角度^[19], 再次测量, 如此重复 10 次, 取平均值。

(4) 在探头测定的中间位置, 用容重环刀取样, 烘干称重法测定体积含水量和容重, 并设置三个重复, 取平均值。

(5) 饱和土壤的校正是利用马氏瓶由底部进水口供水, 直至土柱完全饱和, 并测定饱和情况下的频率值和利用烘干法测定土壤饱和和体积含水量。

(6) 利用 F_a 和 F_w 以及不同水分梯度下的频率值 F_s , 求解各水分梯度下的 SF 值。

(7) 利用不同水分梯度的 SF 值和体积含水量, 在 Excel 中进行非线性乘幂拟合, 获得公式 (4) 的参数 a, b , 得到校正后的模型 (4)。

1.3.2 田间间接校正方法

由于田间校正方法和

实验室校正方法都需要挖取土壤剖面^[19],不但工作量大,而且很难在空间变异性大或组成复杂的区域上进行推广。

田间间接法校正就是利用FDR 套管附近安装的张力计(SoilSpec, Australia)(安装深度为20、45和90cm)测定土壤基质势,然后结合水分特征曲线反求土壤体积含水量^[17],最后与FDR 所测定的SF 值进行曲线回归,获得模型参数。SF 值和土壤基质势的测定频率均为每天上午同时测定一次,测定日期为2006年6月1日至2006年12月20日。

间接校正法适用于土壤质地复杂的土壤,或者在对土壤质地熟悉的情况下,不采取专门的室内或室外校正,通过最后的试验数据进行间接的校正。

1.4 田间验证与准确性分析

在田间土钻取土后利用烘干法测定得土壤含水量为实际土壤含水量。同时,利用FDR 测定的SF 值分别采用实验室校正法和田间间接法所获得的模型参数计算土壤含水量,通过计算的土壤含水量和实际土壤含水量的比较,验证和评估校正模型的优劣。

FDR 所选模型参数测定的准确性用均方根误差(RMSE)来反映。RMSE 表示为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(\theta_i - \theta_g)^2}{n}} \quad (5)$$

式中, θ_i 为用不同参数所求的体积含水量(m^3/m^3); θ_g 为烘干法实际测定的体积含水量(m^3/m^3); n 为试验观察的数目。

2 结果与分析

2.1 实验室校正结果

实验室校正结果较好,每个土层所获得校正参数的决定系数(R^2)都达到了0.99以上,实验室测定结果的RMSE 为0.009~0.036 m^3/m^3 ,平均为0.023 m^3/m^3 (表2)。

2.2 田间间接法校正结果

田间间接法所获得的校正参数的模型曲线比实验室拟合程度差,而且RMSE 略微偏大,平均为0.026 m^3/m^3 (表3)。

表2 实验室校正基本参数

Table 2 Calibration parameters by laboratory method

土壤层次 Soil layers (cm)	校正公式(4)的基本参数 Equation (4)'s parameters in laboratory		R^2	RMSE Root mean squared error (m^3/m^3)	平均容重 Bulk density (g/m^3)
	a	b			
0~20	0.3082	0.2933	0.9956	0.009	1.40±0.07
20~60	0.3516	0.2607	0.9915	0.036	1.24±0.06
60~100	0.3102	0.2822	0.9979	0.025	1.12±0.04

表3 田间间接法校正基本参数

Table 3 Calibration parameters by indirect method in the field

土壤层次 Soil layers (cm)	校正公式(4)的基本参数 Equation (4)'s parameters in laboratory		R^2	RMSE Root mean squared error (m^3/m^3)
	a	b		
0~20	0.3070±0.0867	0.2624±0.0607	0.8812±0.0249	0.025±0.015
20~60	0.3598±0.0905	0.2305±0.0588	0.9188±0.0193	0.023±0.005
60~100	0.4169±0.1139	0.1979±0.0679	0.9221±0.0527	0.029±0.007

2.3 各种校正参数的田间验证

默认模型的测定值普遍小于烘干法测定的土壤含水量,因此,默认模型参数不能使用,仪器必须进行校正(图1a);当实验室校正的模型参数应用到田间时,其准确率较低。可能原因是,田间土壤构成复杂,含有较多的杂质,如砖块、塑料等;填装土柱的土壤样品经过过筛和填装土柱过程中的压实作用以

后,土壤构成发生了很大变化,如土壤中的杂质被去除,大的土壤结构体都细化成团粒体等,不能准确反映田间土壤的实际情况,从而导致实验室校正参数计算土壤含水量的误差较大(图1b);田间间接法获取的校正参数的测定值与默认模型参数及实验室校正参数的测定值相比,准确率有较大提高(图1c)。

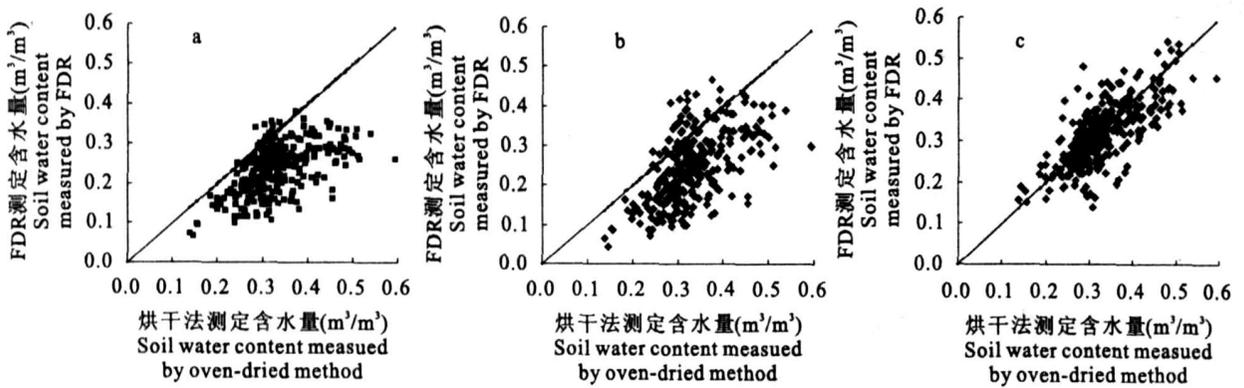


图 1 默认模型参数(a)、实验室校正模型参数(b)、田间间接法校正模型参数(c)所求土壤含水量值与烘干法测定值的比较

Fig. 1 The comparison of soil volumetric water contents calculated by default model parameters (a), lab calibration parameters (b), indirect field calibration parameters (c) and oven dried method

2.4 准确性分析

默认校正曲线的准确率最低, RMSE 的变化范围从 $0.068 \sim 0.133 \text{ m}^3/\text{m}^3$; 实验室校正曲线次之, RMSE 的变化范围为 $0.054 \sim 0.083 \text{ m}^3/\text{m}^3$; 田间间接法校正曲线的准确率最高, RMSE 的变化范围为 $0.022 \sim 0.029 \text{ m}^3/\text{m}^3$ (表 4)。间接法获得的校正曲线的 RMSE 最小, 各层 RMSE 的平均值为 $0.026 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 可以应用于田间实际含水量的测定。

表 4 各种参数的田间验证比较

Table 4 The accuracy comparison of default, laboratory method and indirect method

土壤层次 Soil layer (cm)	RMSE (m^3/m^3)		
	默认参数 Default parameters	实验室校正参数 Parameters by lab calibration	间接法校正参数 Parameters by indirect field calibration
0~20	0.090	0.063	0.025 ± 0.015
20~60	0.068	0.054	0.023 ± 0.005
60~100	0.133	0.083	0.029 ± 0.007
平均值 Average	0.097	0.066	0.026

3 结论与讨论

3.1 结论

(1) FDR 的模型参数, 因土壤类型的改变而发生变化, 对于土壤类型比较相似的土壤可以采用相同的模型参数。如果土壤的质地和结构空间变异性较大, 为了获得准确的土壤含水量, 建议不使用 FDR 仪器的默认模型参数, 需要根据具体地点的土壤类型进行重新校正。

(2) 在实验室校正方法中, 对于构成复杂的土壤类型, 由于在填装土柱过程中对土壤的压实作用, 很难完全模拟田间实际状况, 这对实验室校正方法

的应用带来一定的限制。但是, 实验室校正方法可以得到一条土壤含水量范围更完整的模型参数, 对于空间变异性小且质地均一的土壤可以采用这种方法。

(3) 田间间接法获取的模型参数, 具有较高的准确率, 可以应用到田间实际土壤含水量的测定。但是, 由于试验地土壤含水量的范围限制, 这种间接校正方法所拟合的模型参数, 对试验期间的土壤含水量测定准确, 对于试验期间土壤水分梯度变化较小, 则所拟合参数具有一定的局限性。

3.2 讨论

田间间接校正法即在套管附近安装张力计的方法不但适用于土壤组成相对复杂的土壤, 而且对于构成均一的土壤, 可以免除相对麻烦的专门校正; 在长期监测张力计数据和土壤频率数据的基础上, 采用田间间接校正方法可以获得比较准确的数据。同时, 为了获得更为准确的土壤体积含水量, 应该结合多次土钻取样和烘干法测定的体积含水量, 来弥补间接校正法的不足。

参考文献:

- [1] Miller J D, Gaskin G J, Anderson H A. From drought to flood: Catchments processes revealed using novel soil water probes[J]. Hydrological Proc., 1997, 11: 533-541.
- [2] Paltieanu I C, Starr J L. Real time soil water dynamics using multi sensor capacitance probes: Laboratory calibration[J]. Soil Sci Soc Am J., 1997, 61: 1576-1585.
- [3] 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.
- [4] Paltieanu I C, Starr J L. Preferential water flow through corn canopy and soil water dynamics across rows[J]. Soil Sci Soc Am J., 2000, 64: 44-54.

- [5] Fares A, Alva A K. Evaluation of capacitance probes for optimal irrigation of citrus through soil moisture monitoring in an entisol profile[J]. *Irrig Sci*, 2000, 19: 57-64.
- [6] Yoshikawa K, Overduin P P. Comparing unfrozen water content measurements of frozen soil using recently developed commercial sensors[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2005, 42: 250-256.
- [7] Gardner C M K, Bell J P, Cooper J D. Soil water content [A]. Smith R A, Mulling C E. *Soil analysis physical methods* [C]. New York: Marcel Dekker, NY, 1991. 1-73.
- [8] 陈家宙, 陈明亮, 何圆球. 各具特色的当代土壤水分测量技术[J]. *湖北农业科学*, 2001, (3): 25-28.
- [9] Mead R M, Ayars J E, Lui J. Evaluating the influence of soil texture, bulk density and soil salinity on capacitance probe calibration[Z]. Chicago: Illinois, USA: ASAE, 1995.
- [10] Sentek Pty Ltd. Calibration of Sentek Pty Ltd soil moisture sensor[Z]. South Australia: Stepney, 2001.
- [11] Irksen C, Hillhorst M A. Calibration of a new frequency domain sensor for soil water content and bulk electrical conductivity [R]. Illinois: Northwestern University, 1994.
- [12] Starr J L, Paltieanu I C. Soil water dynamics using multi sensor capacitance probes in non traffic interrows of corn[J]. *Soil Science Society of American Journal*, 1998, 62: 114-122.
- [13] Chanzy A, Chadoeuf J, Gaudu J C, et al. Soil moisture monitoring at the field scale using automatic capacitance probes[J]. *European Journal of Soil Science*, 1998, 49: 637-648.
- [14] Shaffer B. Flooding response and water use efficiency of subtropical and tropical fruit trees in an environmentally sensitive wetland[J]. *Analysis of Applied Biology*, 1998, 81: 475-481.
- [15] Fares A, Alva A K. Evaluation of capacitance probes for optimal irrigation of citrus through soil moisture monitoring in an entisol profile[J]. *Irrigation Science*, 2000, 19: 57-64.
- [16] 郭卫华, 李波, 张新时, 等. FDR系统在土壤水分连续动态监测中的应用[J]. *干旱区研究*, 2003, 20(4): 247-251.
- [17] Wraith J M, Dani O. Nonlinear parameter estimation using spreadsheet software[J]. *J Nat Resour Life Sci Educ.*, 1998, 27: 13-19.

Calibration and verification of Frequency Domain Reflectometry to measure soil water content

LU Guo hua¹, LI Zi zhong¹, ZHAO Bing xing¹, ZHAO Xiao yan², XIAO Zhi guang²

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 10094, China;

2. Management office of the Summer Palace, Beijing 10091, China)

Abstract: Frequency Domain Reflectometry (FDR) is an effective instrument of measuring soil volumetric water content, but it need a good calibration. The experiments were carried out to calibrate FDR in the lab and field, and calibration equations were verified by oven dried method for soil samples obtained by augers. The result showed that good calibrating equations with average RMSE $0.023 \text{ m}^3/\text{m}^3$ were fitted in the lab, but they had poor RMSE $0.066 \text{ m}^3/\text{m}^3$ when used in the field. Other calibrating equations with average RMSE $0.026 \text{ m}^3/\text{m}^3$ were also fitted by indirect field calibration method, and they had good RMSE $0.026 \text{ m}^3/\text{m}^3$ when used in the field. Therefore, the indirect filed calibration method can be used in complex soils in a garden or a city, to avoid destroying soil.

Key words: FDR; soil water content; calibration