

土壤水分监测技术方法应用比较研究

章树安¹, 章雨乾²

(1.水利部水文局,北京 100053;2.河海大学,江苏 南京 210098)

摘要:土壤墒情是反映旱情最直接的重要指标,土壤水分是植物水分的直接来源,决定着植物的生长状况的好坏,因此测量土壤水分有着重要的实际意义。近年来,随着抗旱工作的全面深入开展,土壤水分监测工作日益得到重视,土壤水分自动监测仪器逐步推广应用,但由于水利系统开展土壤水分自动监测较晚,对其工作原理认识不足。本文在概述土壤水分常用监测技术方法基础上,较为系统的介绍了频域反射法(FDR)和时域发射法(TDR)工作原理,以及有关数学公式,评述了主要监测技术方法的优缺点,并对今后有关工作开展提出了建议。

关键词:土壤水分;监测;技术方法;比较研究

中图分类号:S152.7

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2013)02-0025-04

1 引言

旱灾是我国主要的自然灾害之一。近年来,我国干旱灾害发生频繁,对经济社会造成的影响不断加剧。土壤墒情(水分)是反映旱情最直接的重要指标,对作物的生长起着十分重要的作用,土壤含水量的变化直接影响农作物的生长发育和产量。土壤墒情监测是水循环规律研究、农牧业灌溉、水资源开发利用以及抗旱减灾的重要基础信息和决策依据之一。

目前,国内外有很多土壤水分测定方法。如烘干法(称重法),频域反射法(FDR),时域反射法(TDR),滴定法,电阻法,微波法,中子法,Karl Fischer法, γ 射线法,核磁共振法,石膏法,红外遥感等方法。我国水利系统土壤墒情监测目前仍主要采用传统的人工土钻取土、烘干法测量土壤含水量,该方法虽然能够较准确地测量土壤水分含量,但工作量大,耗时耗力,监测不连续。为了实现对土壤水分自动连续监测,减轻劳动强度,节约监测成本,国内外有关高校科研机构和公司开展了一系列的研究,如美国、澳大利亚、德国、巴西等国家,对土壤水分监测仪器的研究投入很大,而且具备了较强的实力。国内水利系统研究与应用土壤水分自动

监测仪器主要是2000年后,但能完全掌握核心技术的产品很少,主要靠引进与组装产品。

由于土壤结构及土壤水分的空间变异性造成了同一地块中土壤含水量的不同,而现有的土壤水分自动测量方法在实际应用中都存在着一一定的缺陷,或者说各有优缺点,在实际应用中如何准确认识与了解各种监测技术方法的优缺点,在一定区域中,选择适宜的土壤水分监测仪器,是需要我们在工作中不断认识以及需要对各种监测仪器技术特点有足够了解,才能实现。为此,本文通过较为系统的收集土壤水分监测技术方法有关资料,结合工作实践,进行了较为系统的归纳总结与分析,并且重点介绍了目前最常用的频域反射法(FDR)和时域反射法(TDR)传感器测量土壤水分原理,及其优缺点。

2 常用的监测方法比较研究

2.1 烘干法

2.1.1 方法简介

烘干法也称称重法。在105℃下将土壤烘干至恒重时,所失去的水分质量和达恒重后干土质量的比值,以百分数表示。本法是直接测量土壤水分的一种方法,

也是国际上公认的测定土壤含水量的标准方法。

2.1.2 主要优缺点

(1) 优点。①是唯一可以直接测量土壤水分的方法,是国际上公认和传统的土壤含水量测定方法,为土壤水分测定标准方法;②在测量精度上具有其它方法不可比拟的优势,因此它作为一种实验室测量方法,并长期用于其它方法的标定。

(2) 缺点。①烘干法最大的缺点是测量土壤含水量操作过程繁杂,工作量大,而且测量的数据时间密度不够,时效性差;②由于田间土壤质地、结构的空间变异性较大,可能会造成取样的代表性差;③测量不具备连续性,并且采样会干扰田间土壤水分的连续性,在田间会留下的取样孔,会切断作物的某些根系并影响土壤水分运动。

2.2 中子仪法

2.2.1 方法简介

中子仪主要包括探头和计数器两部分。中子仪的探头由一个快中子放射源和一个慢中子探测器构成,放射源发射高能中子,与土壤中的原子核碰撞,由于氢核与中子质量相当,会明显减速,与氢核碰撞的中子会转化为慢热中子,从而被探测器探测出来,继而可以换算出土壤体积含水量。

2.2.2 主要优缺点

(1) 优点。①中子仪法测定的土壤体积大,比烘干法更有代表性,可以消除土壤水分田间不均匀性的影响;②相比烘干法,中子仪法可以更快速的测定田间土壤水分状况,并且可重复性好。

(2) 缺点。①受土壤类型影响,需要进行田间标定;②具有放射源,操作人员必须进行专门的培训和操作训练;③测定表层土壤含水量,误差较大。

2.3 负压法

2.3.1 方法简介

负压法也称张力计法。它测量的是土壤水吸力,测量基本原理为:当陶瓷头插入被测土壤后,管内自由水通过多孔陶瓷壁与土壤水接触,经过交换后达到水势平衡,此时,从张力计读到的数值就是土壤水(陶瓷头处)的吸力值,也即为忽略重力势后的基质势的值,然后根据土壤含水量与基质势之间的关系(土壤水份特征曲线)就可以确定出土壤的含水量。

2.3.2 主要优缺点

(1) 优点。①结构及原理比较简单;②可以在线实时测量;③可以确定水在土壤内的流动方向和渗透

深度。

(2) 缺点。①受土质影响明显;②该方法测量的只是土壤水的吸力,需要建立土壤水分特征曲线才能换算成土壤含水量;③该方法存在滞后,影响测量速度。

2.4 频域反射法(FDR)

2.4.1 方法简介

频域反射法(Frequency Domain Reflectometry, FDR)。根据传感器发出的电磁波在不同介电常数物质中的频率变化,测量土壤含水量的方法。传感器的基本工作原理就是一对圆形金属环组成一个电容,利用土壤充当电介质,电容与振荡器组成一个调谐电路,传感器电容量与两级间被测介质的介电常数成正比关系。由于水的介电常数是80,土壤的约3~7。水的介电常数比一般介质的介电常数要大得多,所以当土壤中的水分增加时,其介电常数相应增大,测量时传感器给出的电容值也随之上升,相应的传感器的测量频率也会发生变化,由此测得土壤的含水量。其基本逻辑关系见图1。

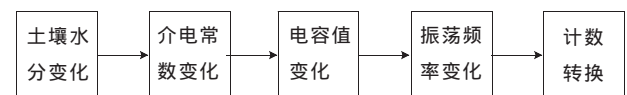


图1 FDR 测量原理基本逻辑关系图

Fig.1 The basic logic relation of FDR measurement principle

2.4.2 有关数学公式

(1) 振荡频率 F 的计算公式如下:

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

式中: F 为振荡频率; L 为电感; C 为总电容; π 为常数。

(2) 电容受到介电常数的影响,总电容计算公式如下:

$$C=k\times\varepsilon_r\times\varepsilon_0 \quad (2)$$

式中: k 为一几何常数; ε_r 为整体土壤按照体积比例混合的相对介电常数; ε_0 为空气或真空中的介电常数。

(3) 归一化频率 SF 可由下式计算:

$$SF=\frac{F_a-F_s}{F_a-F_w} \quad 0<SF<1 \quad (3)$$

式中: F_a 为空气中所测得的频率; F_w 为水中所测得的频率; F_s 为土壤中所测得的频率。

(4) 体积含水量与不同土壤含水量中的归一化频率 SF 有如下指数关系:

$$\theta_v=aSF^b \quad (4)$$

式中: θ_v 为土壤含水量; SF 为归一化频率; a 、 b 为待定系数,由土壤样本标定确定。

土壤含水量 θ_v 与归一化频率 SF 率定的关系曲线如图 2 所示。

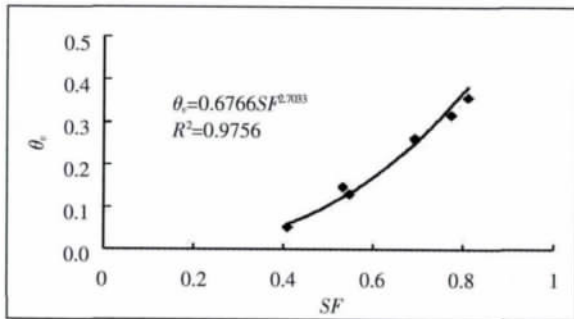


图 2 土壤含水量 θ_v 与归一化频率 SF 率定的关系曲线

Fig.2 Soil moisture θ_v and the normalized frequency SF calibration curve

2.4.3 主要优缺点

(1)优点。①无论从成本上还是从技术的实现难度上都较 TDR 低;②在电极的几何形状设计和工作频率的选取上有更大的自由度;③能够测定土壤颗粒中束缚水含量。大多数 FDR 在低频($\leq 100\text{MHz}$)工作,能够测定被土壤细颗粒束缚的水,这些水不能被工作频率超过 250MHz 的 TDR 有效测定;④FDR 无需严格的校准,操作简单,受土壤容重、温度的影响较小;⑤FDR 探头可与传统的数据采集器相连,从而实现自动连续监测;⑥测量结果较准确,与烘干法差距较小。

(2)缺点。①受土壤空隙影响明显;②部分传感器的安装条件要求较高;③对土壤电导率有一定敏感性。

2.5 时域反射法(TDR)

2.5.1 方法简介

时域反射法(Time Domain Reflectometry, TDR)。根据传感器发出的电磁波在不同介电常数物质中传播速度的差异,测量土壤含水量的方法。TDR 理论模型早在 1939 年就已建立,最初用于电信业查找电缆断点。电磁波沿电缆或线路传播时,在阻抗不连续处会发生反射,通过记录和分析反射回波的波形,可以判断故障点的位置和故障的性质。用于土壤含水量的监测,是由加拿大科学家 Topp 等人于 1980 年首次提出,并于 1985 年用于农田水分测定。但任何种类的 TDR 都不

能直接测得土壤水分含量,其原理是根据电磁波沿非磁性介质中传输导线的传输时间 T ,可以求出土壤的介电常数,进而求出土壤的含水量。测定结果会受到土壤质地、密度、温度等环境条件的影响。

2.5.2 有关数学公式

(1)在实际应用中发现,电磁波沿电缆传播的速度与其周围介质的相对介电常数的平方根成反比,即:

$$v=c/\sqrt{Ka} \quad (5)$$

式中: v 为电磁波在介质中传播速度, m/s ; c 为电磁波在真空中传播速度; Ka 介质的相对介电常数。

(2)介电常数确定。TDR 测定土壤水分是通过测定电磁波沿插入土壤的探针传播时间来确定土壤的介电常数,就是由电子函数发生器给插入土壤的探针加一个电压的阶梯状脉冲波,当到达探针金属棒末端时便返回,同时产生一反射波信号,传给接收器,由此信号便可获得脉冲波在土壤中的传播时间(Δt),这一传播时间与土壤的介电常数(Ka)有关,可表示为:

$$Ka=(c\Delta t/2L)^2 \quad (6)$$

式中: c 为光速 ($3 \times 10^8 \text{ms}^{-1}$); L 为波导长度,二者均为已知数; Δt 为脉冲波在土壤中的传播时间,只要测得 Δt 便可确定土壤的介电常数。

(3)体积含水量。1980 年 Topp 等发现,土壤含水量 θ_v 与介电常数 Ka 间的关系可用一个三次多项的经验公式表示为:

$$\theta_v = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2}Ka - 5.5 \times 10^{-4}Ka^2 + 4.3 \times 10^{-6}Ka^3 \quad (7)$$

式中: θ_v 为体积含水量; Ka 为介电常数。

2.5.3 主要优缺点

(1)优点。①精确度高;②测量快速、操作简单;③可在线连续监测;④不破坏土壤结构。

(2)缺点。①土壤质地、容重以及温度的显著影响,使用前需要进行标定;②受土壤空隙影响明显;③土壤湿度过大时,测量结果偏差较大;④稳定性稍差;⑤电路复杂,价格昂贵。

3 结语

(1)目前我国水利系统的土壤水分监测仍主要使用传统的人工土钻取土、烘干测量土壤含水量,该方法虽然能较准确地获得土壤水分含量,但工作量大,耗时耗力,不能实现土壤水分连续监测。受方法的制约,其

布设站点密度和监测频次不可能很高。作为标准方法,在实际应用中还需进一步加强技术人员培训、严格按照规范流程进行操作。

(2)中子仪、负压计等方法,由于受自身的技术缺点限制,目前基本不作为大规模推广应用方法。

(3)频域反射法和时域反射法是现在土壤水分自动监测最常用的两种技术方法,具有技术相对成熟、精度较高、便于携带等优点。但这两种方法都是通过测定土壤介电常数间接测量土壤体积含水量,需要对土壤进行标定,建立有关数学公式。这就要求相应的产品厂家能够较好地掌握其工作原理、标定方法,并根据不同土壤结构和特性建立不同的数学公式。

(4)通过对传感器本身性能、价格等方面的综合考虑,相对于TDR,FDR由于具有相对稳定、受盐分影响小、省电、电缆长度限制少,传感器产品价格较低等优点。

(5)无论利用FDR、TDR原理的传感器,在建立固定的土壤墒情自动监测系统时,在选择时,除注意传感器本身性能外,还要注意遥测终端机(RTU)性能及相应配置的电源质量,这样才能保证自动监测系统的监测数据的稳定性、准确性及灵敏性,从而保证监测数据在实际工作中能可靠应用。

(6)在适当增加布设土壤墒情固定站时,还需考虑配置足够的可移动的土壤水分自动监测仪器,以便在大旱时,能够快速地作出相应,进行监测,提高监测效率,保证一定的监测精度。

参考文献:

[1] Topp G C, Davis J L, Annan A P. Electromagnetic determination

of soil-water content: measurement in coaxial transmission lines [J]. *Water Resour Res*, 1980,16:574-582.

[2] Zegelin S J, White I. Improved field probes for soil water content and electrical conductivity measurement using time-domain reflectometry [J]. *Water Resour Res*, 1989,25: 2367-2376.

[3] 王改兰,黄学芳,王东峰,等. 时域反射仪及其在节水农业研究中的应用[J]. *山西大学学报(自然科学版)*, 1999, 22(1). (WANG Gailan, HUANG Xuefang, WANG Dongfeng, et al. Time domain reflectometry and its applications to water-saving agriculture [J]. *Journal of Shanxi University*, 1999,22(1). (in Chinese))

[4] 王克栋,王一鸣,等. 基于相位检测原理的土壤水分时域反射测量技术[J]. *农业机械学报*, 2010,41(1). (WANG Kedong, WANG Yiming, et al. Measurement of soil moisture based on phase detecting principle [J]. *Journal of Agricultural Machinery*, 2010,41 (1). (in Chinese))

[5] 张宪,姜晶,王劲松. 基于FDR技术的土壤水分传感器设计[J]. *自动化技术与应用*, 2011, 30(11). (ZAHNG Xian, JIANG Jing, WANG Jinsong. The design of the soil moisture sensor based on FDR [J]. *Journal of Techniques of Automation and Applications*, 2011,30 (11). (in Chinese))

[6] Ginger B. Paige, Timothy O. Keefer. Comparison of field performance of multiple soil moisture sensors in a semi-arid rangeland [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2008, 44 (1):121-135.

[7] G. Lukangu, M.J. Savage, M.A. Johnston. Use of sub-hourly soil water content measured with a frequency-domain reflectometer to schedule irrigation of cabbages [J]. *Irrigation Science*, 1999, 19(1): 7-13.

[8] 高国治,张斌,等. 时域反射法(TDR)测定土壤含水量的精度[J]. *土壤*, 1998,(1):48-51. (GAO Guozhi, ZHANG Bin, et al. Time domain reflectometry (TDR) to measure soil water content soil accuracy [J]. *Journal of Soil*, 1998,(1):48-51. (in Chinese))

Comparative Study on Soil Moisture Monitoring Methods

ZHANG Shu-an¹, ZHANG Yuqian²

(1. Bureau of Hydrology, MWR, Beijing 100053, China; 2. Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The soil moisture is the most direct and important index to reflect the drought, soil water is the direct source of the plant water, deciding the plant growth condition, so the measurement of soil water has important practical significance. In recent years, along with the drought relief developing, soil moisture monitoring has been paid attention on, and automatic instruments for soil moisture monitoring have been gradually used. Because of later creation of the soil moisture automatic monitoring in water resources departments, the people have not enough understanding of the working principle. Based on introduction to soil moisture monitoring technology, this paper described in detail the working principle of the Frequency Domain Reflectometry (FDR) and Time Domain Reflectometry (TDR), and the relevant mathematical formulas. The advantages and disadvantages of the monitoring technology were reviewed, and some suggestions were made for the future.

Key words: soil moisture; monitoring; technology; comparative study