

时域法 SCFW-TDR 土壤墒情自动化监测技术研究¹

陈智^{1,2}, 何生荣³, 陆明⁴

(1. 水利部南京水利水文自动化研究所 江苏 南京 210012; 2. 水利部水文水资源监控工程技术研究中心, 江苏 南京 210012; 3. 水利部水文仪器及岩土工程仪器质量监督检验测试中心, 江苏 南京 210012); 4. 天津特利普尔科技有限公司, 天津, 300384

摘要: 土壤墒情是气候学、水文学和农业科学等研究中的一个重要参数。基于时域无载频脉冲原理的时域反射法 (TDR) 能够快速准确测试土体含水率, 广泛应用于水利气象行业。但是目前 TDR 测定仪器均为进口, 国外对中国实行技术封锁。本文介绍了一套基于频率步进原理的新型 SCFW-TDR, 利用该原理信号源输出的频率分量能够精确获知, 接收信号中的噪声有效被抑制。与传统 TDR 仪器相比较, SCFW-TDR 技术具有显著的优势。

关键词: 土壤墒情; 频率步进; TDR

中图分类号: TU415

文献标识码: A

0. 引言

田间土壤墒情对农作物发育生长相当重要, 因此及时掌握土壤墒情的信息, 开展土壤墒情监测、预报, 科学指导农业生产活动, 保障国家粮食高量稳产具有重要意义, 是指导防旱减灾进行科学灌溉的前提^[1-2]。目前应用较广的土壤含水量测定方法有中子仪测量法、TDR 测量法、FDR 测量法、称重烘干发法、电容法等^[3-4]。称重烘干法测定土壤含水量准确可靠, 是其他方法的参考基准^[5], 但测定过程比较繁琐耗时费力, 并且破坏性取样。中子法容易扩散于大气中导致表层土壤 (0~15cm) 测量结果不准确, 而且仪器操作步骤不当会对人体形成伤害^[6]。

而时域反射法 (TDR) 墒情监测技术由于其不需对测量土壤提前率定、快速准确、易于实现自动化在线监测, 而普遍被认为是最有效可行的土壤含水量率测量方式。但是, 由于采用的高速延迟线技术被西方国家严格垄断, 近年来国内水利、气象及农业领域墒情监测系统的建设大多采用一些简单、替代技术的低价产品, 包括一些发达国家的进口低端产品; 但这类仪器所共有的缺陷在于均需对所测量土壤提前进行率定, 因此都难以达到实际监测的需求, 这是由于其本身原理上的缺陷所决定的。本文将从电磁学的角度进行分析, 详细介绍 SCFW-TDR 技术——一种国产化、具有完全独立知识产权的时域反射技术, 并通过该技术在国内外土壤墒情监测的实际应用实验予以佐证。

1. 时域反射法 (TDR)

时域反射原理 (Time Domain Reflectometry, TDR) 产生于上世纪三十年代, 最初被用来检测和定位通讯电缆的受损位置。当一个电磁脉冲激励信号沿传输线传输, 传输线的中断、受损或周边物质的不连续性均会引起其阻抗的变化, 这种阻抗的变化将会导致传输的信号在此不连续点处产生一个反射, 通过精密的测量电磁波入射波和反射波的行程时间差, 则可以准确的判定此不连续点的位置。

1980 年, 加拿大学者 G. C. Topp^[7] 研究了电磁波在介质中传输的下列公式:

¹ 国家重点研发计划 (2018YFC1508300)

$$v = c / \left\{ k' \cdot \frac{1 + (1 + \tan^2 \delta)^{1/2}}{2} \right\}^{1/2} \quad (1-1)$$

式中 v 为电磁波在该介质中的传播速度， c 为光速， k' 是介质相对介电常数 $k = k' + jk''$ 的实部，反映了该介质在外加电磁场下的极化程度和能量存储程度，而 k'' 则描述了所有的电磁损耗，损耗因子 $\tan \delta = \{k'' + (\sigma_{DC} / \omega \epsilon_0)\} / k'$ 。G. C. TOPP 指出，土壤基本属于同向线性均匀媒质，其满足： $k'' \ll k'$ ，且当电磁波的频率足够高时，有 $\sigma_{DC} / \omega \epsilon_0 k' \ll 1$

Topp^[8]等进一步引入了表观介电常数(K_a)的概念：

$$K_a = (c/v)^2 \approx k' \quad (1-2)$$

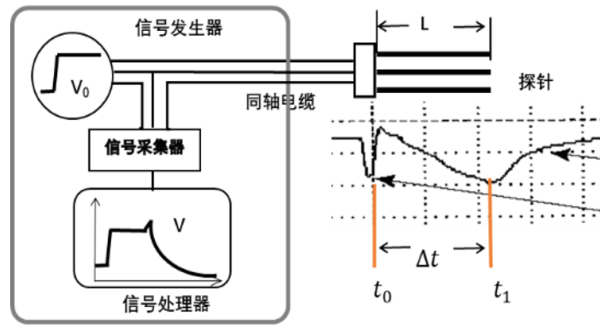


图1 TDR 测量土壤水分原理图

一个测量土壤水分的 TDR 系统如图 1 所示，当一个高带宽的阶跃信号沿同轴电缆在时刻 t_0 达到探针的起始部时，由于阻抗的改变产生反射，而其余信号沿探针继续前进，在时刻 t_1 到达探针底部时，又产生了第二次反射，考虑电磁波沿长度为 L 的探针的行程，易见：

$$v = \frac{2L}{\Delta t} \quad (1-3)$$

代入 (1-2) 得到：

$$K_a = \left(\frac{c \Delta t}{2L} \right)^2 \quad (1-4)$$

由此可见，对于电磁波沿探针传输时间 Δt 的测量，可以直接得到介质的表征介电常数，当所施加的电磁信号频率足够高时，其近似等于所测介质介电常数的实部。

图 2 是电磁场作用于水的介电频谱图，可见当施加的电磁波频率在 1MHz~2GHz 的范围内，水处于分子的空间极化和转向极化之间，其介电常数实部相对稳定。

这也是 TDR 技术测量土壤水分的最基本原理，以及其测量结果不受所测量土壤的介电常数虚部 k'' 及电导率的影响的根本原因。

进而，G. C. TOPP 通过大量的 TDR 系统测试与烘干法的实验结果，采用多项式回归方法拟合得到了描述土壤体积含水率与表征介电常数关系的著名的 TOPP 公式：

$$\theta_v = 4.3 \times 10^{-6} K_a^3 - 5.5 \times 10^{-4} K_a^2 + 2.92 \times 10^{-2} K_a - 5.3 \times 10^{-2} \quad (1-5)$$

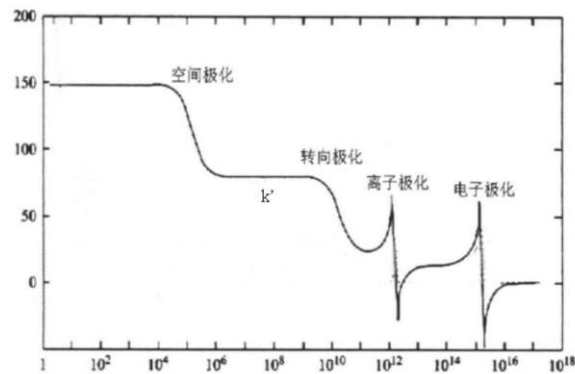


图 2 水的极化频谱效应

由此，G. C. TOPP 奠定了 TDR 技术测量土壤体积含水率的理论基础。多年来国内外大量实际应用的实验数据表明，该公式对于可耕作田间土壤，也即干容重为 1.2~1.6，体积含水率为 0%~40%范围内的各种耕地土壤具有很好的测量精度。

2. SFCW-TDR 技术介绍

如前所述，TDR 技术的关键在于传输线中电磁波传输时间的精确测量，其测试的时间级别在纳秒级（ 10^{-9} 秒），而精度则更是要求达到皮秒级（ 10^{-12} 秒）。目前，传输线中电磁波传输时间的精确测量探测主要基于三种体制：时域无载频脉冲体制、调频连续波体制和频域频率步进体制。传统的 TDR 仪器一直采用的是时域无载频脉冲体制，对于硬件有着较高的要求。调频连续波体制是雷达中广泛应用的技术，但其适用的频率波段较低，不适合应用于土壤水分测量。

1970 年后，随着快速傅里叶变换（FFT）算法的提出和计算机技术的快速发展，频域频率步进体制和向量接收技术在探地雷达和电子测量领域被广泛的应用。

天津特利普尔科技有限公司创新推出的步进频率连续波时域反射技术（Stepped Frequency Continuous Waveform Time Domain Reflectometry, SFCW-TDR），在国际上将频域频率步进体系和向量接收技术首次应用于土壤水分测量领域，开发出国内首台基于时域反射原理（TDR）的便携式土壤水分测量仪器——SOILTDP-200 土壤水分测定仪。

SFCW-TDR 技术是通过信号发生器依次产生系列步进、最高可达到微波频段的点频连续波信号，每个单频信号沿着同轴电缆线传输到末端的探针，当遇着介质（土壤）时产生反射信号，通过定向耦合，分离入射测试信号和反射响应信号；再经过 AD 采样，得到一系列数字化的入射波和反射波的复基带频域信号，进而通过离散逆傅里叶变换（IDFT）运算转换到时域，实现仪器的 TDR 测量。

与以往的 TDR 仪器相比较，SCFW-TDR 技术具有以下显著的优点：

（1）采用了窄带带通接收方式

时域无载频体制采用的是宽带低通接收方式，其实质上是一台时域模拟信号的宽带示波器，而 SFCW-TDR 采用的是完全数字化的窄带带通接收和数字处理技术，可以达到较高分辨率和精度，目前我们达到的分辨率为 12ps（ 10^{-12} 秒）。

（2）更合适的频率扫频范围

SFCW-TDR 可以根据需要选取不同的扫频范围，目前设计选定的扫频范围为 1MHz~1.8GHz，此范围内，水的相对介电常数的实部相对稳定（见图 2）。而时域无载频体制的阶跃信号是由一系列谐波（正弦波）合成的，其分辨率取决于合成基波的最高谐波分量，而要

达到同样 12ps 的分辨率，其最高谐波分量要达到 3.5GHz，同样由图 2 可以看到，这一频段由于水的转向极化而导致其相对介电常数的实部有很大衰减，因此不可避免的带来一定的测量误差。

(3) 扫频模式降低了测量的噪音

SFCW-TDR 技术，是在对采集到的 1024 或 2048 组步进频率的激励信号产生的反射接收信号，经过离散逆傅里叶变换 (IDFT) 而得到的综合时域信号。土是由水、土颗粒空气等组成的混合介质，在外加电场中，其介电特性极为复杂，由于影响因素众多，到目前为止仍然没有一个土体介电常数的理论计算模型能够同时考虑各方面因素的影响。而整个 IDFT 过程实际上也是对 1024 或 2048 组信号的一个加权平均过程，因此它也大大弱化了特定频率对于特定土壤介电特性的干扰。

SOILTOP-200 土壤水分测定仪在 0~40% 的体积含水率范围内采用了 TOPP 公式，而在 40~60% 的范围内采用了更高拟合度的四次五项多项式，因此能够基本满足田间土壤测量的需求。

(4) 测量结果直观明了，更适合于实现在线自动化监测

传统 TDR 的测量方法是先把阶跃激励信号通过探针发射至所测量土壤，再由宽带示波器来观察信号在时域上的响应 (图 3-1)，其精确的反射时间点需要通过对其测量迹线图像采用双切线的方法来确定 (图 3-2)。

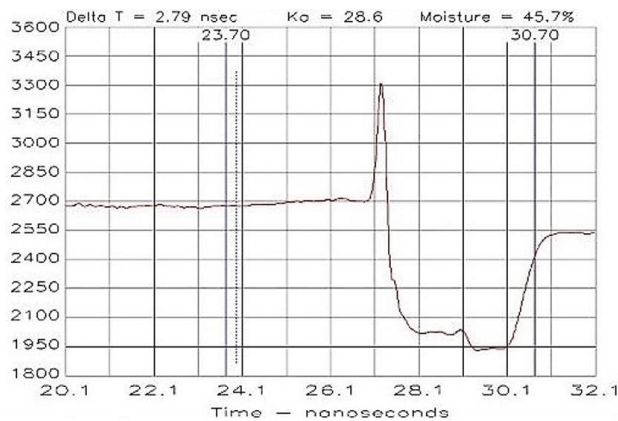


图 3-1 传统 TDR 的实际测量截图

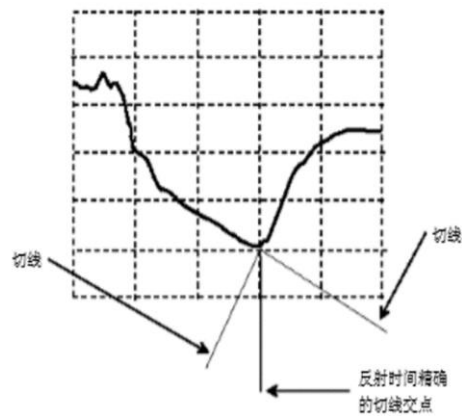


图 3-2 传统 TDR 的时间反射点

而 SFCW-TDR 是先在频域内对被测土壤进行扫频测量，测量信号经数字化处理后再通过离散逆傅里叶变换，其运算结果是一个时域上多个强冲击脉冲函数——辛格函数：

$$\text{sinc}(t - \tau) = \begin{cases} \frac{\sin(t - \tau)}{t - \tau} & t \neq \tau \\ 1 & t = \tau \end{cases} \quad \text{的组合, 其中 } \tau \text{ 是产生反射的时间点, 其图像在这}$$

一点显示为一个强冲击的脉冲。

图 4 是 SFCW-TDR 的实际测量迹线，与传统 TDR 的模拟显示图像不同，它是一个数学计算结果的数字化图像表示，其对于反射点的时域显示更加直观明了。因此 SFCW-TDR 技术更适合于实现自动化的在线监测。

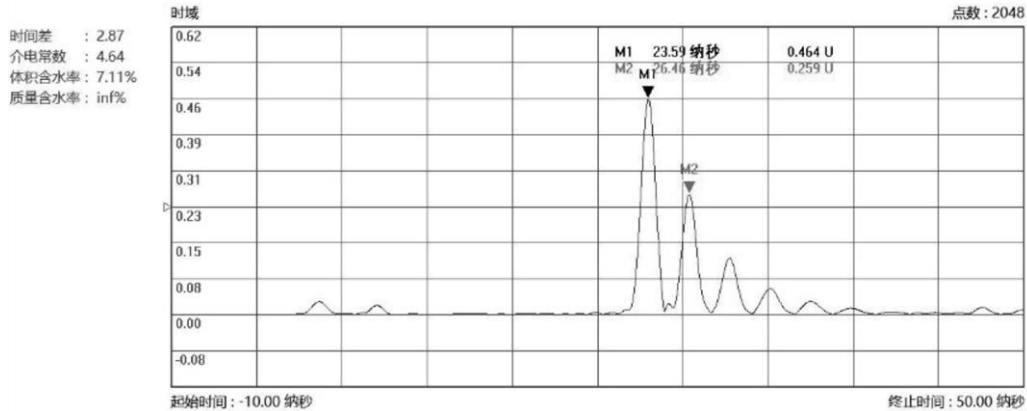


图 4 SFCW-TDR 的实际测量迹线

(5) 可提供大量数字化的土壤电磁特征信息

与时域无载频脉冲体制的传统 TDR 不同，SFCW-TDR 是一个使用数字数据和数学算法来进行数据分析的数字系统，其采用的向量接收技术，可进一步采集包括频域反射、相位、驻波比、阻抗以及相对介电常数的实部、虚部等大量的频域、时域信息，为高端有需求客户及本仪器功能的进一步开发提供了有效的工具。

(6) 应用成本大幅降低

小型化的设计也带来应用成本的大幅度下降。TDR 技术应用于土壤水分测量领域至今近 40 年，一直未得到大范围的推广应用，主要是由于其产品昂贵的价格。SOILTOP-300 系列 SFCW-TDR 数字信号采集器的研发成功，将其应用成本降低了 70% 以上，已经接近于目前市场上 FDR 等产品的价格，考虑到定期率定的费用，实际上 SFCW-TDR 的综合应用成本更加经济。

3. 实验室比测与野外比对

3.1 实验室比测

SFCW-TDR 技术经过了第三方权威机构的多次比测检验。2015 年 11 月，天津特利普尔科技有限公司委托水利部水文及岩土工程仪器质量监督检验测试中心，依照 GB/T 28418-2012 《土壤水分（墒情）监测仪器基本技术条件》，对 SOILTOP-200 土壤水分测定仪进行了产品检测，对我国具有代表性的潮土、红壤和黑土三种不同土壤，随机配制共计 33 组土样，与人工烘干法的对比结果，绝对误差均低于 2%^[10]。

2016 年 1 月，SOILTOP-200 土壤水分测定仪通过了水利部的新产品鉴定，专家委员会认为该产品设计原理和主要技术性能均达到了国际先进水平。

2018 年 11 月，基于“SFCW-TDR 数字信号采集器”和“YDH-1W 遥测终端”集成的“XHG1800 型墒情自动监测装置”和“SOILTOP-300 土壤墒情智能监测仪”两款产品完成，在水利部水文及岩土工程仪器质量监督检验测试中心进行的“墒情自动监测仪器实验室检验测试”中，该两款产品作为所有送检的 46 款产品中仅有的不需率定的仪器，检测一次合格通过。

3.2 野外比对

2019 年 5 月 29 日，山东省水文局发出了《山东省水文局关于开展墒情自动监测设备对比观测的函》，“XHG1800 型墒情自动监测装置”和“SOILTOP-300 土壤墒情智能监测仪”两款产品参加了这次比测。

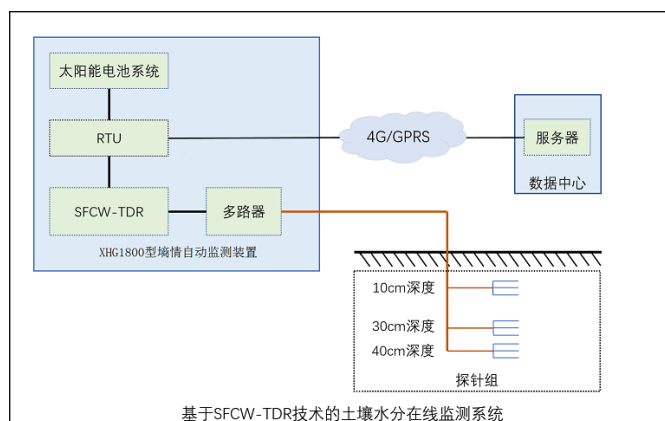


图5 基于“XHG1800型墒情自动监测装置”的土壤含水在线自动监测站

比测在专门搭建的大棚内举行，各参加比测厂商在提前抽签确定的3米×2米地块安装仪器，并在10厘米、20厘米及40厘米三层埋设探针，然后自行采用环刀法取制土样，确定各层土体干容重。我们参加比测的两台设备分别安装于5号及6号地块，从环刀取样烘干结果对比分析（表1），尽管两地块相邻，但各层的含水率及干容重相差较大，结合其它厂商比测地块的环刀取样，可以判定整体比测地块土质分布极不均匀。

XHG1800 环刀测量结果（5号地块）									
土层	10cm			20cm			40cm		
盒号	M-2	Y-3	Y-4	Y-5	Y-1	H-1	Y-6	M-7	Y-2
盒重+湿土重	219.87	214.74	230.89	240.37	242.77	247.37	211.08	208.89	209.54
盒重+干土重	198.05	193.85	206	215.41	218.22	222.13	190.43	187.9	188.56
盒重	49.5	49.55	47.06	48.85	49.55	52.89	48.94	49.09	45.94
干土重	148.55	144.3	158.94	166.56	168.67	169.24	141.49	138.81	142.62
土壤水质量	21.82	20.89	24.89	24.96	24.55	25.24	20.65	20.99	20.98
土壤质量含水率	14.69	14.48	15.66	14.99	14.56	14.91	14.59	15.12	14.71
每层土壤重量含	14.94			14.82			14.81		
土壤干容重	1.50			1.68			1.41		
SOILTOP-300 环刀测量结果（6号地块）									
土层	10cm			20cm			40cm		
盒号	M-2	M-7	Y-2	Y-6	H-1	Y-3	Y-1	Y-4	Y-5
盒重+湿土重	205.76	209.54	206.63	236.67	229.26	234.26	239.32	236	236.47
盒重+干土重	185.08	187.95	185.2	214.4	207.48	210.33	209.07	207.42	207.2
盒重	49.5	49.09	45.94	48.94	52.89	49.55	49.55	47.06	48.85
干土重	135.58	138.86	139.26	165.46	154.59	160.78	159.52	160.36	158.35
土壤水质量	20.68	21.59	21.43	22.27	21.78	23.93	30.25	28.58	29.27
土壤质量含水率	15.25	15.55	15.39	13.46	14.09	14.88	18.96	17.82	18.48
每层土壤重量含	15.40			14.14			18.42		
土壤干容重	1.38			1.6			1.59		

表1 环刀取样测量结果

比测于 2019 年 6 月 22 日开始，仪器按照 1 小时的间隔整点向数据中心传输监测数据，而后每天先采用取土器围绕探针埋设点在三个不同位置纵向取土，得出每个位置相应三层的质量含水率，取平均值与相应时间点的自动监测数据进行比对，相对误差低于 10%为合格，而后在探针埋设点浇水（图 6）。



图 6 现场浇水实拍图

由表 2 可以看到，由于土质不均匀，6 月 22 日至 24 日，各层三个纵向取土点的人工烘干法数据本身差异较大，不符合作为比测样本的抽样要求。在第三次浇水后，各层土壤充分浸润，三个不同位置的人工烘干法数据趋于一致。

江苏南水科技 XHG1800 型墒情自动监测装置野外对比观测表									
项目	人工法（质量含水率）6.22								
	10cm			20cm			40cm		
盒号	37	40	52	38	41	53	39	51	54
盒重+湿土重	62.6	66.0	64.56	65.36	66.71	67.13	66.79	72.71	65.28
盒重+干土重	56.46	58.8	57.41	58.48	58.41	58.75	60.33	63	56.99
盒重	12.96	12.9	13.02	13.13	13.16	13	13.25	12.76	12.92
干土重	43.5	45.8	44.39	45.35	45.25	45.75	47.08	50.24	44.07
土壤水质量	6.14	7.2	7.15	6.88	8.3	8.38	6.46	9.71	8.29
土壤质量含水率	14.11	15.6	16.11	15.17	18.34	18.32	13.72	19.33	18.81
每层土壤质量含水率	15.3			17.3			17.3		
仪器法（体积含水率）	20.8			27			20		
土壤干容重	1.5			1.68			1.41		
仪器法（质量含水率）	13.9			16.1			14.2		
绝对误差	-1.4			-1.2			-3.1		
相对误差	-9.40%			-6.98%			-17.95%		
项目	人工法（质量含水率）6.23 第一次浇水后取样								
	10cm			20cm			40cm		
盒号	99	83	105	66	85	61	90	82	94
盒重+湿土重	65.39	70.9	52.22	65.9	66.31	53.33	58.96	48.48	52.82
盒重+干土重	57.28	61.7	45.77	57.04	57.07	46.26	53.39	42.56	46.07
盒重	12.95	13.0	12.86	13	12.9	12.68	12.75	12.97	13.12
干土重	44.33	48.6	32.91	44.04	44.17	33.58	40.64	29.59	32.95
土壤水质量	8.11	9.27	6.45	8.86	9.24	7.07	5.57	5.92	6.75
土壤质量含水率	18.29	19.0	19.60	20.12	20.92	21.05	13.71	20.01	20.49
每层土壤质量含水率	19.0			20.7			18.1		
仪器法（体积含水率）	28.3			29.6			20		
土壤干容重	1.5			1.68			1.41		
仪器法（质量含水率）	18.9			17.6			14.2		
绝对误差	-0.1			-3.1			-3.9		
相对误差	-0.61%			-14.87%			-21.49%		

项目	人工法（质量含水率）6.24 第二次浇水后取样								
	10cm			20cm			40cm		
盒号	102	84	113	90	63	108	99	103	85
盒重+湿土重	58.46	65.8	46.13	39.99	50.64	49.28	61	53.94	47.7
盒重+干土重	51.31	57.5	40.61	35.3	44.39	43.23	53.5	47.17	41.58
盒重	12.78	12.8	13.12	12.75	12.94	13.15	12.95	12.98	12.9
干土重	38.53	44.6	27.49	22.55	31.45	30.08	40.55	34.19	28.68
土壤水质量	7.15	8.32	5.52	4.69	6.25	6.05	7.5	6.77	6.12
土壤质量含水率	18.56	18.6	20.08	20.80	19.87	20.11	18.50	19.80	21.34
每层土壤质量含水率	19.1			20.3			19.9		
仪器法（体积含水率）	28.6			31.1			21.4		
土壤干容重	1.5			1.68			1.41		
仪器法（质量含水率）	19.1			18.5			15.2		
绝对误差	0.0			-1.7			-4.7		
相对误差	-0.15%			-8.63%			-23.65%		
项目	人工法（质量含水率）6.25 第三次浇水后取样								
	10cm			20cm			40cm		
盒号	109	83	93	111	65	120	98	90	62
盒重+湿土重	52.59	50.2	54.87	52.89	52.35	60.5	41.16	45.37	49.95
盒重+干土重	46.23	44.2	48.3	46.19	45.6	52.53	36.34	39.7	43.6
盒重	12.9	13.0	12.93	12.81	12.91	12.9	12.91	12.75	13.25
干土重	33.33	31.1	35.37	33.38	32.69	39.63	23.43	26.95	30.35
土壤水质量	6.36	6.04	6.57	6.7	6.75	7.97	4.82	5.67	6.35
土壤质量含水率	19.08	19.3	18.58	20.07	20.65	20.11	20.57	21.04	20.92
每层土壤质量含水率	19.0			20.3			20.8		
仪器法（体积含水率）	29.1			32.1			27		
土壤干容重	1.5			1.68			1.41		
仪器法（质量含水率）	19.4			19.1			19.1		
绝对误差	0.4			-1.2			-1.7		
相对误差	2.02%			-5.77%			-8.13%		
项目	人工法（质量含水率）6.26 第四次浇水后取样								
	10cm			20cm			40cm		
盒号	117	99	103	67	71	100	84	94	74
盒重+湿土重	42.93	38.6	40.45	45.91	44.96	37.11	40.91	31.82	44.84
盒重+干土重	37.99	34.0	35.84	40.49	39.41	33.03	35.86	28.35	39.18
盒重	12.99	12.9	12.98	13.05	12.95	13.15	12.89	13.12	13.13
干土重	25	21.0	22.86	27.44	26.46	19.88	22.97	15.23	26.05
土壤水质量	4.94	4.56	4.61	5.42	5.55	4.08	5.05	3.47	5.66
土壤质量含水率	19.76	21.6	20.17	19.75	20.98	20.52	21.99	22.78	21.73
每层土壤质量含水率	20.52			20.42			22.17		
仪器法（体积含水率）	30.4			32.6			30.4		
土壤干容重	1.5			1.68			1.41		
仪器法（质量含水率）	20.3			19.4			21.6		
绝对误差	-0.25			-1.01			-0.61		
相对误差	-1.22%			-4.96%			-2.73%		

表 2 XHG1800 诸城比测数据

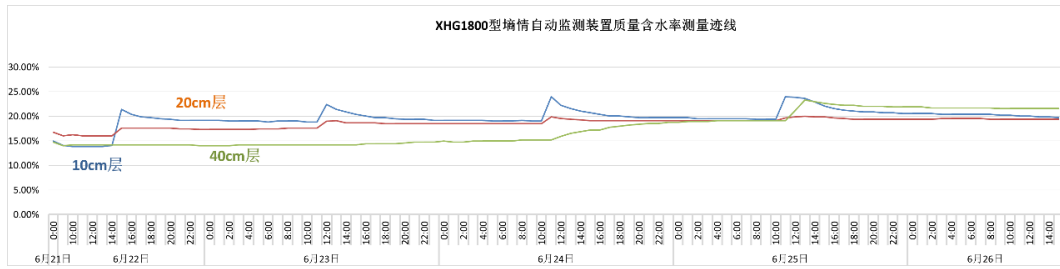


图 7 XHG1800 质量含水率分层走势图

结合图 7，自 6 月 20 日 10:00 仪器安装完成后至 6 月 26 日下午 15:00 的每小时一次的数据汇总及整体监测趋势线，明显看出 22 日、23 日两次浇水对 40cm 层影响不大，在 24 日第三次浇水后，40cm 层含水量逐渐加大，直至 25 日第四次浇水后才与其它土层的反应变化一致。因此，可以判断造成南水科技 XHG1800 型墒情自动监测装置比测前期数据误差较大的原因，应该是在其埋设的 5 号地块地表下 20cm 附近，有一个板结土形成的不均匀隔水层，由此造成人工法采集数据的误差，从而导致仪器的对比数据误差较大。在多次注水浇灌的作用下，该土层软化达到饱和含水率，与周围的土壤融合。这应该是对这次比测过程的一个科学、客观、合理的解释。

在四次浇水完成后，监测地块各土层水分已基本处于饱和，第一阶段比测结束。自 6 月 26 日开始，主要为观测地块在封闭环境下各土层的退水过程。图 8 是 SOILTOP-300 土壤墒情智能监测仪由比测开始直至 7 月 31 日，每小时一次上报的质量含水率分层走势图。

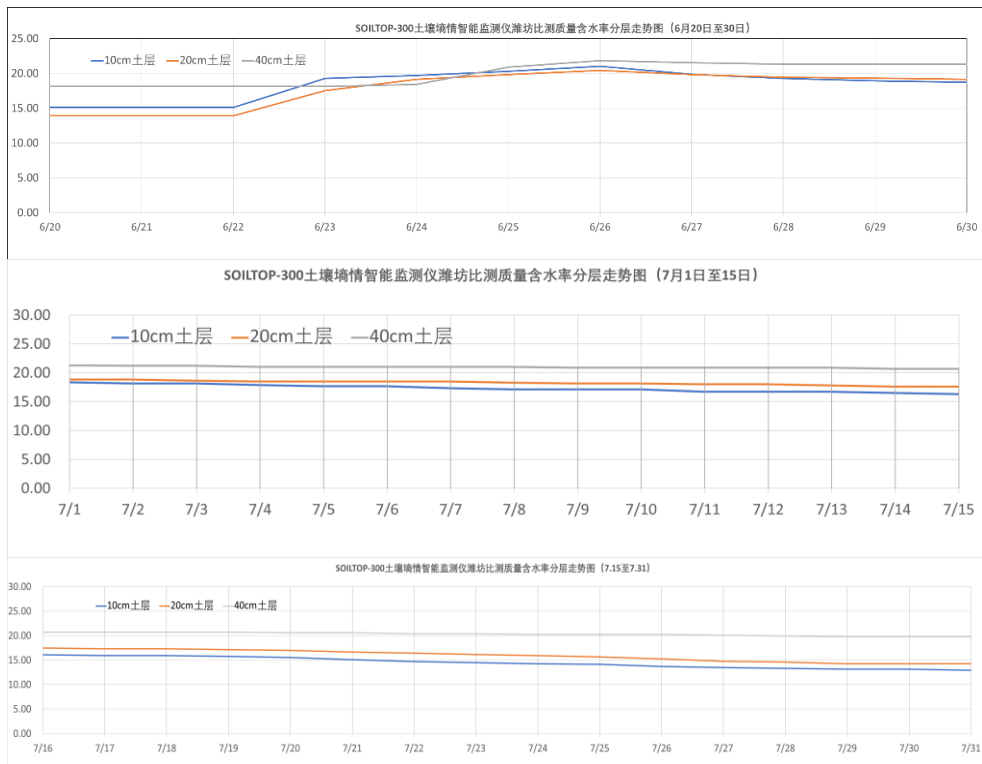


图 8 SOILTOP-300 质量含水率分层走势图

由图 8 可以看出，采用了 SFCW-TDR 技术的土壤墒情自动监测系统，在完全没有经过任何率定、调参过程的前提下，很好的反映了这次比测四次浇水和逐渐缓慢退水的过程，监测

数据稳定、可靠。与人工烘干法结果比对, 相对误差低于 10%的比例达到了 95%以上。因此可以说, SFCW-TDR 技术完全可以满足土壤墒情自动化在线监测的要求。

参考文献

- [1] 李道西, 彭世彰, 丁加丽, 等. TDR在测量农田土壤水分中的室内标定[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(1): 249-252.
- [2] JACKSON T, MANSFIELD K, SAAFIM, et al. Measuring soil temperature and moisture using wireless MEMS sensors[J]. Measurement, 2008, 41(4): 381-390.
- [3] 杨鹏举, 伍靖伟, 黄介生. 时域反射仪测定高含盐土壤盐分研究[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(6): 71-74.
- [4] 尹志芳, 刘恩民, 陈炳新, 等. 时域反射仪与中子仪测定土壤含水量标定试验研究[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(6): 161-165.
- [5] 张学礼, 胡振琪, 初士立. 土壤含水量测定方法研究进展[J]. 土壤通报, 2005, 36(1): 118-123.
- [6] 杨静, 陈洪松, 王升, 等. TDR测定喀斯特地区石灰土含水量的标定研究[J]. 中国岩溶, 2017, 36(1): 75-80.
- [7] TOPP G C, YANUKA M, ZEBCHUK W D. Determination of electrical conductivity using time domain reflectometry: soil and water experiments in coaxial lines[J]. Water Resources Research, 1988, 24(7): 945-952.
- [8] 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.
- [9] Santamarina J C, Klein A, Fam M A. Soils and waves: Particulate materials behavior, characterization and process monitoring[J]. Journal of Soils & Sediments, 2001, 1(2): 130-130.
- [10] 陆明, 刘惠斌, 王晨光, 卢玉, 等. 新型TDR土壤水分测定仪SOILTOP-200 的开发及应用[J]. 水利信息化, 2017(02): 31-37. (Lu Ming, Liu Hui-bin, Wang Chen-guang, Lu Yu. Development and application of the new TDR soil moisture meter soiltop-200. WaterResources Informatization, 2017(02): 31-37. (in Chinese))