

# 基于 SFCW-TDR 技术的 SOILTOP 系列墒情测量仪器 在辽宁省朝阳水文局的实践与应用

吴喜军<sup>1\*</sup>，王文<sup>1</sup>，王晨光<sup>2</sup>，刘惠斌<sup>2</sup>

(1 辽宁省朝阳水文局，朝阳，122000)

(2 天津特利普尔科技有限公司，天津，300384)

**摘要**：本文作者通过对 SOILTOP-200 土壤水分测定仪的野外实地比测，验证了 SFCW-TDR 技术的适用广泛性、重复一致性及测量准确性；通过对自动化在线的 SOILTOP-300 土壤墒情智能监测系统的连续监测及比测，确定了该项技术的稳定性、可靠性及客观性；通过对入冬季节的连续观测，考察了系统在严寒气候中运行的稳定可靠性，同时发现监测数据能够很好的反映各层土壤的冻结过程，将进一步观测其在开春冻土融化过程中的监测数据变化，为北方地区农业生产提供科学的依据。本文给出了一种 SFCW-TDR 技术无需烘干快速测量土壤干容重和重量含水率的方法，具有十分重要的实际应用价值。

**关键词**：辽宁省朝阳水文局；SOILTOP-200；SOILTOP-300；SFCW-TDR；墒情测定；

**中图分类号**：S143.2 **文献标识码**：A

## 1. 引言<sup>1</sup>

辽宁省朝阳水文局多年来一直肩负着朝阳地区的墒情监测工作，一直以人工烘干法测量为主，上报各站墒情数据，工作量大且时效性不高。2009 年开始应用仪器进行墒情监测，目的是在保证精度的前提下，逐渐实现墒情的自动化监测，但效果均不理想。多年来，通过对应用的多种便携式、在线式等墒情仪器与人工烘干法的对比监测，发现三个最为普遍存在的主要问题：

1) **重复性差**：现场测量时，同一仪器在同一测量点连续测量的数据相互间偏差较大，甚

---

<sup>1</sup> 作者简介：吴喜军（1966—），男，辽宁省朝阳市人，高级工程师，现任辽宁省朝阳水文局评价科科长，多年来一直从事水文勘测、水资源论证评价、站网建设等工作。联系方式：13591875687。

至超出有关标准允许的误差范围。

- 2) **稳定性差**：尽管在仪器安装时都进行了率定，但运行一段时间，尤其是每年冬季经历了土壤冻结与融化过程后，监测数据误差增大，无法满足实际生产需求，部分仪器过冬后无法开机正常运行。
- 3) **客观性差**：部分仪器监测数据与人工烘干法数据比测误差较大，无法如实反映降雨及干旱等气候自然变化的过程。

2017 年 10 月开始，我局开展了采用 SFCW-TDR 技术的国产 SOILTOP 系列土壤墒情监测仪器的应用实践。该仪器基于时域反射原理，通过频域频率步进体系与向量接收技术测量电磁波在所测土壤中的传播速度，得到其表征介电常数，从而实现土壤墒情的监测。该技术的最主要特点在于对于多种土壤类型耕地，不经率定即可达到体积含水率测量绝对误差低于 2% 的精度要求<sup>[1][2]</sup>。

## 2. 实践与应用过程

SOILTOP 系列土壤墒情监测仪器在朝阳地区的应用实践分为三个阶段：

### 1) 2017 年 10 月至 2019 年 4 月

第一阶段是应用便携式的 SOILTOP-200 土壤水分监测仪，对朝阳市所辖区域的多个水文站及多种不同类型土壤的农田进行移动监测，通过与人工烘干法结果的比测实验，确定 SFCW-TDR 技术的适用广泛性（不需率定）、准确性。

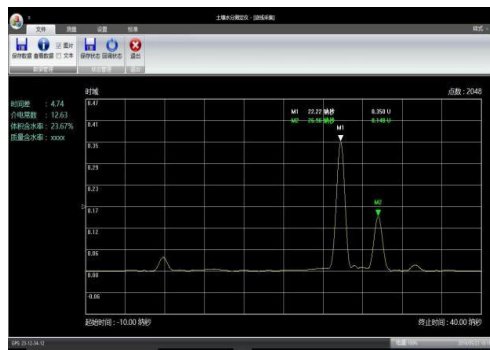


图 1：SOILTOP-200 土壤水分测定仪实测结果的线性幅度曲线

### 2) 2019 年 4 月至 2019 年 10 月

在第一阶段实验成功的基础上，我们在叶柏寿水文站和建平县旱情监测中心（太平庄水文站）分别安装了自动化在线的 SOILTOP-300 土壤墒情智能监测系统。通过半年时间的连续监测和期间一个月与人工烘干法的比测，确定了在线监测系统的稳定性、可靠性以及客观性，并进一步验证了 SFCW-TDR 技术的测量准确性。

### 3) 2019 年 11 月至今

2019 年 10 月，我局进一步在所辖范围内安装了 5 套 SOILTOP-300 土壤墒情智能监测系统，安装地点选取了实际耕作农田，着重考察严寒条件下设备的运行状况以及入冬及开春阶段土壤冻结和融化过程墒情监测的变化，为辽宁省墒情监测系统的建设提供可靠依据，至 2019 年 12 月底，共计 7 套设备运行正常。

### 3. 监测结果及数据分析

#### 3.1 适应性、重复性及准确性的野外检测

我们使用便携式的 SOILTOP-200 土壤水分测定仪，分别在 2017 年 10 月与 2018 年 4 月进行了两次野外与人工环刀取土烘干法的实际比测，参照《土壤墒情监测规范》（SL 364-2015）进行，实验过程如表 1：

实验仪器	SOILTOP-200 土壤水分测定仪
使用探针	厂商提供仪器配套的 CZY 型探针式传感器，针体长度 20cm
比测地块土壤种类	沙土、壤土、沙壤土、潮土
测量土层	地表下 10cm、20cm 及 40cm 三层
人工环刀取土烘干法测量体积含水率及干容重的方法	<p>选取相应比测监测点及层面的邻近的三个未受扰动点，采用容积为 <math>v=100\text{ml}</math> 或 <math>200\text{ml}</math> 的环刀分别采集三组样品，加盖后用天平（精度为 <math>0.01\text{g}</math>）分别称取质量 <math>M_{\text{湿}}</math>，记录并放入密实袋。在实验室用烘箱在 <math>105^{\circ}\text{C}</math> 温度下烘干不低于 15 小时，取出后称取质量 <math>M_{\text{干}}</math>，清空环刀后称取环刀质量 <math>M_{\text{环刀}}</math>，由公式：<math>M_{\text{水}} = M_{\text{湿}} - M_{\text{干}}</math> 及水的密度 <math>d_{\text{水}} = 1\text{g/ml}</math> 计算即得所测土样的体积含水率：</p> $\theta_{\text{人工}} = \frac{M_{\text{水}}/d_{\text{水}}}{v} \times 100\%$ <p>再由公式：<math>\rho_{\text{人工}} = \frac{M_{\text{干}} - M_{\text{环刀}}}{v}</math> 及 <math>w_{\text{人工}} = \frac{\theta_{\text{人工}} \cdot d_{\text{水}}}{\rho_{\text{人工}}}</math> 可计算得到所测土壤的干容重 <math>\rho_{\text{人工}}</math> 及重量含水率 <math>w_{\text{人工}}</math>。</p> <p>同一监测点同一土层的三组土壤样品测得的体积含水率相互间差的绝对值最大不应超过 1%，否则该位置数据不计入实验结果。</p>
仪器测量体积含水率及重量含水率的方法	<p>在所测量点挖取垂直剖面，在相应测量深度水平插入探针，避免扰动周边土壤。每个测量点的每一测量深度重复测量 6 次，第 <math>i</math> 次的测量值记为 <math>\theta_i (i=1, \dots, 6)</math>，测量间隙不超过 2 分钟。以 6 次测量结果的实验标准值（百分比）考察仪器重复性，其平均值 <math>\bar{\theta}</math> 作为为仪器体积含水率的测量值。由公式：<math>\bar{w} = \bar{\theta} \cdot d_{\text{水}} / \rho_{\text{人工}}</math> 得到重量含水率的仪器测量值 <math>\bar{w}</math>。</p>
结合人工环刀取土无需烘干快速测量干容重及质量含水率的方法	<p>由 <math>M_{\text{water}} = v \times \bar{\theta} \times d_{\text{水}}</math> 得到环刀中所含水分质量，再由 <math>M_{\text{soil}} = M_{\text{湿}} - M_{\text{环刀}} - M_{\text{water}}</math> 计算环刀中干土质量，从而计算得到所测土壤的干容重：<math>\rho^* = \frac{M_{\text{soil}}}{v}</math> 以及重量含水率：<math>\bar{w}^* = \bar{\theta} \cdot d_{\text{水}} / \rho^*</math></p>
仪器测量绝对误差	<p>仪器测量值与烘干法结果的平均值之差绝对值的平均值称为仪器的测量绝对误差。例如：同一监测点的同一土层的三组烘干法重量含水率结果的平均值记为 <math>\bar{w}_{\text{人工}}</math>，仪器第 <math>i</math> 次测量值记为 <math>w_i</math>，则所有 <math>w_i</math> 与 <math>\bar{w}_{\text{人工}}</math> 差的绝对值的平均值：</p> $\delta = \sum_{i=1}^6  w_i - \bar{w}_{\text{人工}}  / 6$ <p>为仪器重量含水率的测量绝对误差。</p>

表 1：SOILTOP-200 土壤水分测定仪野外比测实验方法

表 2 为两次比测的部分实验结果, 实验过程分别计算了体积含水率和质量含水率的测量精度。

测量时间	监测地点	土壤类型	测量深度 (cm)	环刀人工烘干法测量值			SOILT0P-200 测量值			结合人工环刀取土无需烘干快速测量		测量绝对误差		
				体积含水率 $\theta_{人工}$	重量含水率 $\bar{w}_{人工}$	干容重 $\rho_{人工}$	体积含水率 $\theta$	重复性误差 (%)	重量含水率 $\bar{w}$	干容重 $\rho^*$	重量含水率 $w^*$	$\delta_{\theta}$	$\delta_{\bar{w}}$	$\delta_{w^*}$
2017 年 10 月	气象场	沙壤土	10	17.98%	13.12%	1.37	17.79%	0	12.99%	1.33	13.34%	0.19%	0.13%	0.22%
			20	16.32%	13.03%	1.25	14.94%	0	11.92%	1.30	11.53%	1.38%	1.10%	1.50%
			40	16.73%	12.72%	1.32	17.07%	0	12.97%	1.34	12.71%	0.34%	0.25%	0.01%
	腰尔营子	沙土	10	13.51%	9.66%	1.40	12.17%	0	10.17%	1.43	9.96%	1.34%	0.51%	0.30%
			20	6.52%	4.65%	1.40	7.27%	0	5.18%	1.40	5.19%	0.75%	0.53%	0.55%
			40	数据异常			9.34%	0	—	—	—	—	—	—
	水文局院内	沙土	10	22.60%	16.79%	1.35	20.80%	0	15.41%	1.37	15.18%	1.80%	1.39%	1.62%
			20	12.14%	8.34%	1.46	13.72%	0	9.42%	1.44	9.50%	1.58%	1.08%	1.16%
			40	13.59%	8.94%	1.45	15.29%	0	10.53%	1.46	10.49%	1.70%	1.59%	1.55%
	小伍家	潮土	10	12.37%	10.65%	1.16	11.23%	0	9.66%	1.20	10.21%	1.14%	0.99%	0.44%
			20	22.17%	15.58%	1.42	23.52%	0	16.52%	1.44	16.34%	1.35%	0.98%	0.76%
			40	25.12%	17.83%	1.41	24.47%	0	17.37%	1.42	17.24%	0.65%	0.46%	0.59%
十二台农田	壤土	10	21.37%	18.51%	1.15	数据异常			—	—	—	—	—	
		20	25.83%	18.07%	1.43	26.11%	0	18.27%	1.49	17.50%	0.28%	0.20%	0.57%	
		40	23.97%	16.95%	1.41	25.39%	0	17.95%	1.46	17.42%	1.42%	0.10%	0.46%	
2018 年 4 月	气象场	沙壤土	10	17.64%	14.15%	1.25	17.43%	0	13.99%	1.23	14.16%	0.21%	0.16%	0.01%
			20	15.42%	13.71%	1.13	14.94%	0	13.27%	1.20	12.46%	0.48%	0.43%	1.25%
			40	15.39%	12.47%	1.23	15.29%	0	12.38%	1.22	12.56%	0.10%	0.08%	0.10%
	六合城	沙壤土	10	20.14%	14.57%	1.38	19.39%	0	14.03%	1.36	14.26%	0.75%	0.52%	0.31%
			20	19.44%	13.48%	1.33	18.65%	0	13.98%	1.33	13.98%	0.79%	0.59%	0.50%
			40	18.04%	13.73%	1.31	17.11%	0	13.02%	1.35	13.83%	0.93%	0.71%	0.10%
	小伍家	潮土	10	9.45%	8.35%	1.13	10.52%	0	9.27%	1.21	8.73%	1.04%	0.92%	0.38%
			20	24.61%	17.15%	1.44	22.54%	0	15.71%	1.42	15.92%	2.07%	1.44%	1.23%
			40	23.75%	16.68%	1.42	25.34%	0	17.79%	1.39	18.17%	1.59%	1.11%	1.49%
	腰尔营子	沙土	10	13.16%	9.37%	1.41	12.33%	0	8.78%	1.44	8.59%	0.83%	0.59%	0.78%
			20	6.07%	4.33%	1.40	6.47%	0	4.61%	1.39	4.64%	0.40%	0.28%	0.31%
			40	8.90%	6.34%	1.42	9.76%	0	6.88%	1.40	6.98%	0.76%	0.54%	0.64%
十二台农田	壤土	10	18.73%	15.98%	1.17	19.18%	0	16.37%	1.19	16.09%	0.45%	0.39%	0.11%	
		20	23.13%	16.29%	1.42	24.37%	0	17.16%	1.39	17.48%	1.24%	0.87%	1.17%	
		40	24.88%	17.47%	1.42	23.91%	0	16.79%	1.46	16.42%	0.97%	0.68%	1.05%	

注：由于在 2017 年 10 月比测中，腰尔营子 40cm 层采集的环刀内均含有较大石子，十二台农田 10cm 层数据严重不符，在现场复核发现是探针插在了残留的玉米根茎上，故此两点数据舍去。

表 2：SOILT0P-200 土壤水分测定仪野外比测实验结果

由比测结果可以得到以下结论：

### 1) 测量精准

每个测量点 6 次重复测量的结果均完全一致，重复性误差为 0，说明该仪器精确度高。28 组仪器有效测量值与烘干法相比，除去 1 组体积含水率误差略超出 2%外，其余绝对误差均在 2%之内，说明该仪器准确度高于《土壤墒情监测规范》(SL364 2015)中规定的精度要求。

### 2) 无需率定，适应性强

上述野外比测在 6 个不同地块，涵盖了朝阳地区分布的主要 4 种不同土壤类型，比测过程完全没有率定，说明了 SOILTOP-200 土壤水分测定仪所使用的 SFCW-TDR 技术具有较强的适应性。

### 3) 结合环刀取土，可无需烘干快速测定土壤干容重及重量含水率

目前采用介电原理的的墒情测量仪器大都只能直接测量土壤的体积含水率，而实际旱情监测中，更多的需要质量含水率的数据，由体积含水率转换为重量含水率需要测定土壤的干容重，而干容重的精确测定以往只能通过环刀人工烘干法，因此在实际应用中往往是将测定的干容重结果多次反复使用，由于日常影响干容重的因素众多，因此影响了结果的准确。由于 SFCW-TDR 技术具有很好的测量准确度和适应性，因此可以采用 SOILTOP-200 土壤水分测定仪测定土壤体积含水率结合环刀取土，不需烘干直接快速测定土壤干容重及重量含水率的方法（计算方法见表 1）。比测结果表明该方法具有较好的精确度。

2018 年 6 月，我局在在叶柏寿水文站安装了仪器生产厂家提供的分层固定探针装置，该装置由三根分层探针及导管组成，按 10cm、20cm 及 40cm 分层埋设探针，其连接线日常可收纳于导管内，测量时取出与便携设备连接测量，取得了较好的效果。特别是该装置安装一年，经历了冬季严寒和化冻的土壤变化过程后，埋设的探针仍能稳定正常工作，说明其可适应严冬极寒的工作环境。

### 3.2 在线自动化监测的稳定性、可靠性及客观性检验

2019 年 4 月开始，我局在所辖建平县旱情监测中心（太平庄站）和叶柏寿水文站分别安装了自动化在线的 SOILTOP-300 土壤墒情智能监测系统，该系统采用天津特利普尔科技有限公司生产的“SFCW-TDR 数字信号采集器”和江苏南水科技有限公司生产的“YDH-1W 遥测终端”集成，安装过程未经任何率定，每台设备分别在地表下 10cm、20cm 及 40cm 分层埋设探针，设定为间隔 4 小时一次测量并上传数据。该两个监测点自 2019 年 4 月 13 日开始投入使用至今，除人为因素外，一直连续正常工作运行，无故障运行时间已超过 7000 小时，有效数据畅通率 99%以上。

2019 年 6 月期间，我局对太平庄站所安装的 SOILTOP-300 土壤墒情智能监测系统，组织了为期一个月的较为密集的对比如观测实验。考虑到连续长期采用环刀取土人工烘干法对固定监测点的土壤扰动太大，故仅首次比测采用环刀取土人工烘干法取样，以便得到各层土壤的干容重（表 3），而后采用系统上报的体积含水率数据由此干容重换算得到的重量含水率，与直接采

用烘干法得到的重量含水率进行比测。

仪器型号：SOILTOP-300 土壤墒情智能监测系统									
项目	(体积含水率)								
	10cm			20cm			40cm		
铝盒号	Y-1	Y-3	Y-4	Y-2	Y-6	Y-8	Y-5	Y-7	Y-9
盒重+湿土重	337.71	340.01	338.20	334.24	333.87	331.96	335.80	336.79	329.61
盒重+干土重	313.03	315.55	312.60	304.75	306.56	304.44	307.62	310.25	302.50
盒重	44.69	43.79	43.16	43.79	46.50	44.86	46.71	50.03	41.78
干土重	268.34	271.76	269.44	260.96	260.06	259.58	260.91	260.22	260.72
土壤水质量	24.68	24.46	25.60	29.49	27.31	27.52	28.18	26.54	27.11
土壤干容重	1.3417	1.3588	1.3472	1.3048	1.3003	1.2979	1.3045	1.3011	1.3036
	1.35			1.30			1.30		
人工法质量含水率	9.2%	9.0%	9.5%	11.3%	10.5%	10.6%	10.8%	10.2%	10.4%
上报体积含水率	13.4%	13.23%	12.77%	15.69%	15.36%	14.99%	15.06%	14.98%	15.35%
换算质量含水率	9.93%	9.8%	9.45%	12.07%	11.82%	11.53%	11.58%	11.52%	11.81%
绝对误差	0.73%	0.80%	0.05%	0.77%	1.32%	0.93%	0.78%	1.32%	1.41%

表 3：太平庄站各层土壤干容重数据表

日期	SOILTOP-300 (体积含水率%)			SOILTOP-300 (质量含水率%)			烘干法 (质量含水率%)			绝对误差%		
	10cm	20cm	40cm	10cm	20cm	40cm	10cm	20cm	40cm	10cm	20cm	40cm
5.30	19.9	21.3	19.1	14.7	16.4	14.7	14.7	15.2	16.8	0.04	1.18	-2.11
5.31	19.4	20.5	18.6	14.4	15.8	14.3	15.1	18.0	17.2	-0.73	-2.23	-2.89
6.1	18.9	19.9	18.3	14.0	15.3	14.1	13.3	15.8	17.0	0.70	-0.49	-2.92
6.2	18.6	19.4	18.0	13.8	14.9	13.8	12.3	13.5	16.1	1.48	1.42	-2.25
6.4	18.0	18.6	17.8	13.3	14.3	13.7	115.1	13.7	14.6	-1.77	0.61	-0.91
6.6	17.2	17.8	17.2	12.7	13.7	13.2	13.1	15.2	14.9	-0.36	-1.51	-1.67
6.8	17.0	17.2	16.7	12.6	13.2	12.8	12.5	14.2	14.0	0.09	-0.97	-1.15
6.10	16.4	16.7	16.4	12.1	12.8	12.6	13.8	14.6	13.2	-1.65	-1.75	-0.58
6.11	16.2	16.4	16.2	12.0	12.6	12.5	11.5	14.1	12.8	0.50	-1.48	-0.34
6.12	15.9	16.2	15.9	11.8	12.5	12.2	11.3	12.5	13.0	0.48	-0.04	-0.77
6.14	15.6	15.9	15.6	11.6	12.2	12.0	12.8	14.1	13.2	-1.24	-1.87	-1.20
6.16	15.1	15.4	15.1	11.2	11.8	11.6	12.2	12.8	12.9	-1.01	-0.95	-1.28
6.18	14.8	15.1	14.8	11.0	11.6	11.4	11.7	12.5	12.2	-0.74	-0.88	-0.82
6.20	14.3	14.6	14.6	10.6	11.2	11.2	11.0	12.3	12.0	-0.41	-1.07	-0.77
6.21	14.0	14.3	14.3	10.4	11.0	11.0	11.1	12.2	11.7	-0.63	-1.20	-0.70
6.22	13.8	14.3	14.3	10.2	11.0	13.1	10.0	12.2	14.5	0.22	-1.20	-1.40
6.24	13.3	13.8	14.0	9.90	10.6	10.8	10.2	11.0	11.6	-0.35	-0.38	-0.83
6.26	13.0	13.5	13.3	9.60	10.4	10.2	9.40	11.0	13.3	0.23	-0.62	-3.07
6.28	12.7	13.3	13.3	9.40	10.2	10.2	9.20	11.4	12.0	0.20	-1.20	-1.80
7.01	13.0	13.3	13.0	9.60	10.2	10.0	10.7	11.8	11.7	-1.10	-1.60	-1.70

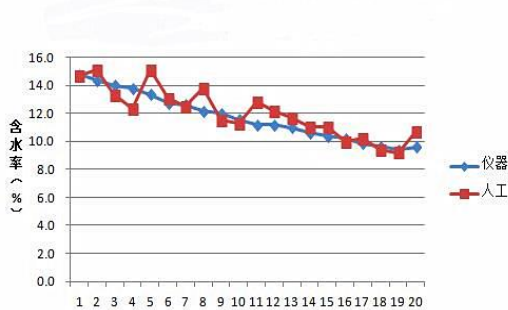


图 2：太平庄站 10cm 深度土壤含水率比测曲线

墒情监

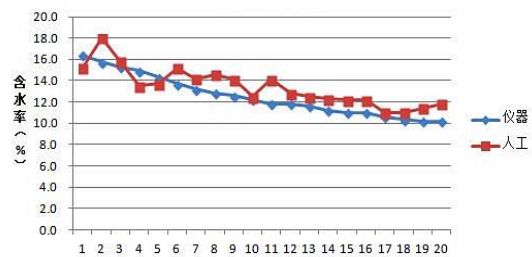


图 3：太平庄站 20cm 深度土壤含水率比测曲线

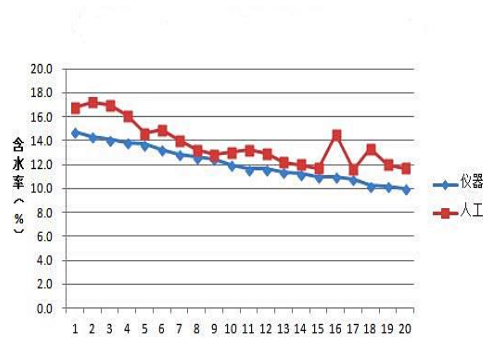


图 4：太平庄站 40cm 深度土壤含水率比测曲线

表 4 是为期一个月的比测结果，一致性基本较好，个别点偏差大些，但结合图 2 至图 4 同期仪器的连续监测迹线及当地的降雨状况，同时考虑到人工法本身的误差，应该说仪器测量值的连续性、平稳性更好，更能客观的反映监测点的实际墒情变化。

### 3.3 冬季设备的运行稳定性考察及土壤冻结过程墒情监测的变化

介电原理测定土壤水分的原理主要是利用了水分与土壤中其它成分介电常数的巨大差异，土壤是由土壤颗粒（固相）、空气（气相）以及水分（液相）组成的三相混合物，其中土壤颗粒的介电常数通常在 2~4 之间，空气为 1，而水的介电常数随温度不同在 75~85 之间，因此土壤的介电常数主要由其所含的水分决定<sup>[3]</sup>。但是当温度降至零下凝结为冰后，冰的介电常数急剧下降为 3 左右<sup>[4]</sup>，因此介电法仪器无法准确测量冻土中的水分含量。

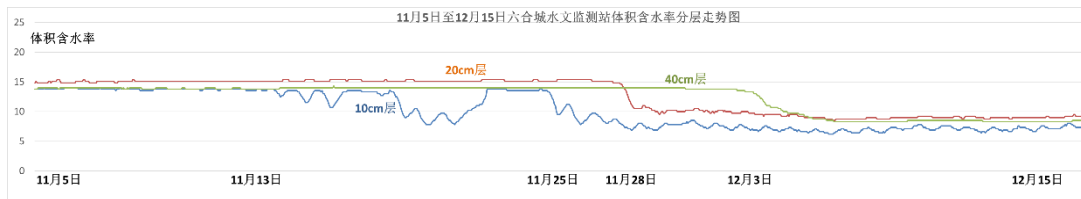


图 5：11 月 5 日至 12 月 15 日六合水文监测站体积含水率分层走势图

考虑到朝阳地区及辽宁省都属于严寒地区，墒情监测设备需长期野外安装，为考察仪器在严寒条件下的生存能力，我们在入冬前又在包括耕作农田在内的不同的 5 个地点安装了 SOILTOP-300 土壤墒情智能监测系统，并采用间隔 1 小时测量上报的密集监测方式。截止 2020 年 2 月底，我局所安装的全部 7 套系统均运行正常。

图 5 是六合城水文监测站 11 月 5 日至 12 月 15 日测量迹线图，可以看到：

- a) 尽管在入冬后无法准确测量土壤含水率，但连续的监测迹线，结合当地的气候变化，可以客观的反映各土层上冻的实际过程：
- b) 地下 10cm 层对于温度较为敏感，经过几次降温、升温反复过程后，于 11 月 25 日进入冻土期；
- c) 11 月 28 日，20cm 层进入冻土期，12 月 3 日，40cm 层进入冻土期；普遍进入冰冻期后，40cm 迹线最为平稳，而 10cm 土层迹线抖动较强，这应该是由白天阳光直射引起的浅层冻土部分融化造成，说明了 SFCW-TDR 技术的测量灵敏性好。

目前，上述监测仍在持续当中，我们将密切注意各监测点在开春升温后的变化过程，相信能够准确的反映各土层解冻的趋势变化，为农业生产的备耕、春耕提供有效的科学依据。

## 4. 结论

通过二年的应用实践和一系列的比测实验结果，可以看到，采用 SFCW-TDR 技术的移动、固定墒情监测仪器准确、可靠、客观的反映了墒情的实际情况，同时也能够满足墒情自动化在线监测的各项要求。

本文的实验过程中得到了天津特利普尔科技有限公司和水利部南京水利水电自动化研究所的大力支持，在此一并表示感谢。

## 参考文献：

- 【1】 陆明,刘惠斌,王晨光,卢玉.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.Water Resources Informatization,2017(02):31-37. (in Chinese))
- 【2】 陈仁朋,陈卓,陆明,刘惠斌,王晨光,卢玉等,基于频率步进原理的 TDR 研制及在土体含水量测试中的应用[J].岩土工程,2019(07): 1191-1199. (CHEN Ren-peng, CHEN Zhuo, LU Ming, LIU Hui-bin, WANG Chen-guang, LU Yu. Development of TDR based on stepped-frequency principle and its application for measurement of soil volumetric water content. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019(07): 1191-1199. (in Chinese))
- 【3】 TOPP G C,DAVIS J L.Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines[J].Water Resources Research, 1980, 16(3): 574—582.
- 【4】 Debye,P.(1929).Polar Molecules. Chemical Catalog Company,New York.