

# 关于土壤墒情自动监测精度的探讨

王光生<sup>1</sup>, 杨建青<sup>1</sup>, 邓英春<sup>2</sup>

(1.水利部水文局, 北京 100053; 2.安徽省水文局, 安徽 合肥 230022)

**摘要:**简要介绍了时域反射和频域反射土壤水分监测仪器的工作原理,利用在安徽六安望城岗蒸发实验站土壤墒情仪器自动监测和人工对比观测的数据,分析了土壤墒情仪器自动监测数据的精度;探索了通过对比观测数据修正仪器的土壤水分计算公式参数,提高土壤墒情仪器自动监测精度的方法。

**关键词:**土壤墒情;自动监测;数据精度

中图分类号:S152.71

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2013)05-0007-03

## 引言

发达国家土壤墒情自动监测技术相对成熟,如美国的 Topp 博士<sup>[1]</sup>于 1980 年首次应用 TDR 原理对玉米生长季的土壤含水量进行了田间评价;南非的 Lukangu 等人<sup>[2]</sup>1999 年应用 FDR 测量土壤含水量,并根据田间不同深度层和相对饱和、相对缺水时的土壤含水量制定了农田灌溉制度。

土壤墒情监测在我国易旱地区已开展多年,但过去主要通过人工观测。人工观测采用烘干法测定土壤含水量,人工野外采集土样,在实验室对土样称重,烘干土样再称重,通过比较原始土样和烘干后土样的重量差别计算出土壤的重量含水量。

烘干法虽能得到较精确观测结果,但比较费工耗时,信息的时效性较差。近年来随着抗旱工作的深入和细化、经济的发展,在一些易旱地区逐步建设了土壤墒情自动监测站,实现了土壤墒情信息的自动采集、自动传输,提高了土壤墒情监测信息的实时性。随着自动墒情监测工作的逐步开展,关于其监测精度的讨论愈加引起业内人士的关注。如,时新玲等<sup>[3]</sup>对土壤含水量的各种测量方法、原理及其优缺点进行了分析对比,陈家宙等<sup>[4]</sup>介绍了目前国内外主要土壤水分测量技术的原理及特色,并对自动监测仪器在连续动态监测方面具有的优势进行了分析。

近几年,全国水文部门承担了越来越多的土壤墒

情监测任务,也引进了一些先进的土壤墒情自动监测仪器,但在使用过程中,很多自动监测的土壤墒情数据的精度难以保证。本文从墒情自动监测仪器的工作原理出发,将仪器和人工烘干法的监测结果进行对比,通过修正仪器计算公式的参数,实现提高仪器精度的目的。

## 1 土壤墒情自动监测仪器的原理

目前国内外常用的土壤墒情自动监测设备主要是基于介电法原理的时域反射仪和频域反射仪,这两种仪器均是通过测量土壤介电常数的变化,间接测定土壤含水量。介质在外加电场时会产生感应电荷而削弱电场,最终介质中电场与原外加电场(真空中)比值即为相对介电常数,又称相对电容率。室温下的相对介电常数,水约为 80、干土为 3~5、空气为 1,因此土壤含水量越大其相对介电常数也越大。有人建立土壤相对介电常数与土壤体积含水量(%)的非线性三次多项式关系如下:

$$\theta_v = a_0 + a_1 \varepsilon_r + a_2 \varepsilon_r^2 + a_3 \varepsilon_r^3 \quad (1)$$

式中: $\theta_v$  为土壤体积含水量; $\varepsilon_r$  为土壤相对介电常数; $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  为由土壤类型确定的常数。

时域反射法(TDR, Time Domain Reflectometry)<sup>[5]</sup>是近年来出现的土壤含水量测量仪器,通过测定电磁波在土壤中固定传输线路上的传输时间确定介电常数。电磁波沿电缆传播的速度与周围介质相对介电常数的平方根成反比,即:

收稿日期:2012-07-02

作者简介:王光生(1962-),男,河北肃宁人,教授级高工,主要从事水文情报预报、地下水监测预测以及旱情监测分析业务工作。

E-mail:gshwang@mwr.gov.cn

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (2)$$

式中:  $v$  为电磁波在介质中传播的速度;  $c$  为电磁波在真空中传播的速度。

信号发生器产生一个具有陡峭上升沿的阶跃电压信号, 以电磁波的形式沿同轴电缆和埋入土壤中的探针传播。在一条不匹配的传输线上的波形会发生反射, 由于同轴电缆和探针的阻抗不同, 部分电磁波在同轴电缆与探针的连接处(探针首端)发生反射并沿同轴电缆传回; 剩下的电磁波沿探针继续传播, 在探针末端被全部反射并传回。这两部分反射信号均被高速采样示波器记录下来, 根据示波器捕捉到它们的时间差计算土壤的相对介电常数:

$$\varepsilon_r = \left[ \frac{c(t_2 - t_1)}{2L} \right]^2 \quad (3)$$

式中:  $t_2$  为探针末端反射的信号被示波器捕捉的时间;  $t_1$  为探针首端反射的信号被示波器捕捉的时间;  $L$  为探针的长度。

可用类似于式(1)的公式将相对介电常数转换为土壤体积含水量。

频域反射法(简称 FDR, Frequency Domain Reflectometry) 通过测量土壤介电常数变化引起的仪器振荡频率的变化测量土壤含水量。传感器主要由一对电极(平行排列的金属棒或圆形金属环)组成一个电容, 其间的土壤充当电介质, 电容与振荡器组成一个调谐电路。振荡频率计算公式如下:

$$F = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4)$$

式中:  $F$  为振荡频率;  $L$  为电感;  $C$  为电容。

电容与介电常数成正比关系:

$$C = k\varepsilon_r \varepsilon_0 \quad (5)$$

式中:  $\varepsilon_0$  为真空绝对介电常数,  $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{F/m}$ 。

由土壤含水量和介电常数的关系及式(4)、式(5)可知, 振荡器频率与土壤含水量成非线性反比关系。

利用土壤水分传感器在不同土壤含水量中的归一化频率  $SF$  变化来测量土壤体积含水量:

$$SF = \frac{F_a - F_s}{F_a - F_w} \quad (6)$$

式中:  $F_s$  为土壤中所测得的频率;  $F_a$  为放置于空气中所测得的频率;  $F_w$  为放置于水中所测得的频率。

输出频率与体积含水量的关系如下

$$\theta_v = aSF^b \quad (7)$$

式中:  $\theta_v$  为土壤的体积含水量;  $a$  为由所在地土壤特性确定的常数, 也可采用类似式(1)的多项式逼近式(7)。

式(1)和式(7)中的参数与土壤特性有关, 均需要针对不同质地的土壤分别率定, 目前仪器生产厂家一般在实验室中, 利用野外采集的各类土壤样本率定参数。

## 2 土壤墒情自动监测仪器的精度

各种监测方法测得的土壤含水量与真实值均存在误差。烘干法是唯一直接测量土壤含水量的方法, 如果采集足够多的土壤样本, 这种方法也是目前认为最为精确的监测方法, 常用于标定其它原理的土壤水分监测仪器。因此, 一般通过对比仪器与人工烘干法的监测结果衡量仪器的精度, 将烘干法测得的重量含水量换算成体积含水量, 用仪器与烘干法监测结果的平均误差衡量仪器精度。

$$\bar{\sigma} = \frac{\sum_{i=1}^N |x_i - a_i|}{N} \quad (8)$$

式中:  $x_i$  为仪器观测值;  $a_i$  为人工烘干观测值;  $N$  为对比观测次数;  $\bar{\sigma}$  为对比观测土壤体积含水量的平均误差。水利部行业标准《土壤墒情监测规范》(SL364—2006)中规定  $\bar{\sigma} < 2\%$ , 国家气象局的相关标准规定  $\bar{\sigma} < 5\%$  (中国气象局综合观测司,《自动土壤水分观测规范》(试行))。

土壤墒情自动监测仪器在国内的应用, 近年来刚刚起步, 对于土壤墒情自动监测的精度还没有公认的评价。为了客观、公正地评价土壤墒情自动监测仪器的精度, 2011年7~12月在安徽六安望城岗蒸发实验站对目前在国内应用的比较普遍的15种国内外主要土壤墒情自动监测仪器进行了比测, 在仪器自动监测土壤墒情的同时, 进行人工对比观测, 将仪器和人工烘干法的监测结果进行对比。表1是仪器监测结果相对人工监测结果的误差。

从表1可以看出: 大部分土壤墒情自动监测仪器的精度, 距离气象部门规范的要求有一定的差距, 距离水利部门规范的要求差距更大。仪器的误差主要来源于两部分, 信号量测的误差, 即由仪器的电磁波在介质中传播得到的介电常数转化为电压/电流产生的误差, 该过程主要受产品质量影响, 任何量测设备均存在误差; 由电信号转换为土壤含水量的误差, 即由人工根据测得电压/电流来率定土壤含水量转化公式产生的误差, 目前一般由仪器生产厂家野外采集土样、在实验

表1 仪器监测结果相对人工烘干法监测结果的误差

Table1 Measurement error of automatic monitoring in comparison with gravimetric method

仪器序号	平均误差/ $\%$	误差 $<2\%$ 的百分比	误差 $<5\%$ 的百分比
	$\bar{\sigma} / \%$	$l / \%$	$l / \%$
1	7.3	3.1	18.8
2	5.7	9.1	39.4
3	7	12.5	25
4	2.8	35.5	87.1
5	2.9	40.9	81.8
6	2.3	53.3	86.7
7	2.2	51.6	93.5
8	2.5	44.8	93.1
9	1.5	72.4	93.1
10	3.1	43.8	93.8
11	7.9	23.3	53.3
12	2.9	34.5	93.1
13	4.3	3.2	74.2
14	3.4	12.9	87.1
15	17	0	3.2

室率定电信号与土壤含水量的转换公式,该过程受人为因素影响较大,土样采集及样本制作对监测地点的代表性,实验室率定公式与野外环境的差别等,均会产生误差。

### 3 土壤墒情自动监测仪器精度改进的探讨

电信号量测的误差,主要受产品质量的影响,监测部门作为仪器的使用者不易对其进行改进。电信号转换为土壤含水量的误差,即转换式(1)、式(7)带来的误差,监测部门是可以改进的,如果在仪器自动监测的同时进行一定的人工对比观测,则可利用人工和仪器对比监测的数据修正转换公式的参数。

将仪器的电信号、人工观测的土壤含水量带入转换公式,以转换公式误差最小为原则优化其参数。如表1中的1、2、3号仪器厂家提供的转换公式为

$$\theta_i = a_0 + a_1 SF + a_2 SF^2 + a_3 SF^3 \quad (9)$$

若有  $n$  次对比观测资料则有下方程

$$\begin{bmatrix} 1 & SF_1 & SF_1^2 & SF_1^3 \\ 1 & SF_2 & SF_2^2 & SF_2^3 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & SF_n & SF_n^2 & SF_n^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_{i1} \\ \theta_{i2} \\ \cdot \\ \theta_{in} \end{bmatrix}$$

当  $n > 4$  时,这个方程可通过最小二乘法<sup>[6]</sup>求解出优化的参数。

我们利用在安徽六安望城岗蒸发实验站进行的对

比观测数据,对表1中的1、2和3号仪器的转换公式的参数进行了重新率定。安徽六安望城岗蒸发实验站的对比观测,从2011年7~12月,约5d进行一次人工土壤含水量观测,共有33测次的人工和仪器对比观测数据。取对比观测数据的三分之二22测次的的数据率定公式(9)的参数。表2是厂家提供和重新率定的转换公式参数对比,表3是重新率定参数后仪器监测结果相对人工监测结果的误差。对比表3和表1表明,重新率定转换公式参数后仪器的监测结果精度有很大提高,基本能够满足水利和气象部门规范的要求。

表2 厂家提供和重新率定的转换公式参数对比

Table2 Comparison in parameters of new calibrated soil water calculation equation and provided original equation

仪器序号		$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$
1	厂家提供	0.0036	0.3217	-0.2226	0.0851
	重新率定	0.25887	0.16130	-0.05017	0.00340
2	厂家提供	0.002	0.2831	-0.1377	0.0518
	重新率定	12.78387	-20.93328	11.73762	2.18223
3	厂家提供	0.0156	0.2989	-0.192	0.0666
	重新率定	-1.19510	2.39471	-1.19060	0.19683

表3 重新率定参数后仪器监测结果相对人工监测结果的误差

Table3 Measurement errors with new calibrated soil water calculation equation in comparison with gravimetric method

仪器序号	平均误差/ $\%$	误差 $<2\%$ 的百分比	误差 $<5\%$ 的百分比
	$\bar{\sigma} / \%$	$l / \%$	$l / \%$
1	1.2	90.6	96.9
2	1.4	81.8	100.0
3	1.1	90.9	97.0

### 4 结语

本文介绍的土壤墒情自动监测精度的改进方法,只是初步探讨。对于转换公式参数的修正方法,本文只是从数学优化算法上进行了论证,尚没有探讨土壤含水量与仪器电信号之间的物理关系,因此对于参数取值的合理范围研究的还不够。

本文提出的方法在土壤墒情监测生产中的应用,还有赖于监测部门定期对墒情自动监测仪器进行人工对比观测。影响土壤墒情监测的因素众多、成因复杂,这其中既有产品本身的质量问题,也有计算公式的人为率定问题,还包括仪器安装和监测过程的操作影响等,总体而言,目前国内的自动土壤水分监测仪器(下转第38页)

- & Control, 1996,18(5):30-33. (in Chinese))
- [3] 裴洪平 郑晓君. 引水后杭州西湖主要水质参数的因子分析[J]. 生物数学学报, 2005, 20 (1):86-90. (PEI Hongping, ZHENG Xiaojun. Factor analysis of water quality in West Lake, Hangzhou[J]. Journal of Biomathematics, 2005, 20(1):86-90. (in Chinese))
- [4] Mueller A. J., Thomann V. R. Principles of Surface Water Quality Modeling and Control [M]. NEW YORK: Harper & Row Publisher, 1987. (in Chinese))
- [5] Chapra C. S., Surface water-quality modeling [M]. McGraw-Hill, 1997.
- [6] 吴根福, 吴雪昌, 等. 杭州西湖底泥释磷的初步研究[J]. 中国环境科学, 1998, 18(2):107-110. (WU Genfu, WU Xuechang, et al. Preliminary studies on release of phosphorus from the sediment of West Lake, Hangzhou[J]. China Environmental Science, 1998, 18(2):107-110. (in Chinese))

## Response of Total Phosphorus Concentration to Water Diversion Allocation in West Lake

ZHU Junzheng, HAN Zengcui

(Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, Hangzhou 310020, China)

**Abstract:** According to the observed data, this paper analyzed the water diversion allocation in the West Lake. The result shows that the total phosphorus concentration tends to homogenization effect after the allocation changing. A two-dimensional hydrodynamic numerical model for water quality was set up to test the planar distribution of the total phosphorus concentration in the West Lake. This paper also analyzed the rational allocation of the inlets and outlet water diversion scheme how to improve the flow field of the West Lake and how to decrease the total phosphorus concentration.

**Key words:** total phosphorus concentration; water diversion allocation layout; West Lake

(上接第9页)

产品研发与应用还不十分成熟,土壤墒情监测的技术和管理各个方面均亟待加强。作为近年来兴起的新生事物,土壤墒情自动监测工作的开展可能会遇到各种问题,相信随着这项工作的深入开展和经验的积累,土壤墒情自动监测的精度会得到不断提高。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Lukangu, G., Savage, M.J., Johnston, M.A. 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.
- [3] 时新玲, 王国栋. 土壤含水量测定方法研究进展[J]. 中国农村水利水电, 2003, (10):84-96. (SHI Xinling, WANG Guodong. Research advances in measuring method of soil water content[J]. China Rural Water and Hydropower, 2003, 10: 84-96. (in Chinese))
- [4] 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, 22 (3):25-28. (CHEN Jiazhou, CHEN Mingliang, HE Yuanqiu. Variety in contemporary soil moisture monitoring technology[J]. Hubei Agricultural Science, 2001, 22(3):25-28. (in Chinese))
- [5] Jones, S. B., Wraith, J. M., Or, D. Time domain reflectometry measurement principle and application [J]. Hydrological Processes, 2002, 16(1):141-153.
- [6] 林成森. 数值计算方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2000:60-64. (LIN Chengsen. Numerical Method [M]. Beijing: Science Press, 2000:60-64. (in Chinese))

## A Tentative Discussion on Precision of Automatic Soil Moisture Monitoring

WANG Guangsheng<sup>1</sup>, YANG Jianqing<sup>1</sup>, DENG Yingchun<sup>2</sup>

(1. Bureau of Hydrology, MWR, Beijing 100053, China; 2. Hydrology Bureau of Anhui Province, Hefei 230022, China)

**Abstract:** This paper discussed the principle of soil moisture monitoring by Frequency Domain Reflectometry (TDR) and Frequency Domain Reflectometry (FDR). Based on the experimental data from automatic monitoring sensors at the Wangchengang Evaporation Experimental Station in Liuan City of Anhui Province, this paper analyzed the precision of automatic monitoring sensors in comparison with the manual sampling data by gravimetric method. A mean of calibrating soil water content calculation equation was further developed using the manual sampling data of gravimetric method. The improved precision of automatic monitoring data was thus obtained.

**Key words:** soil moisture; automatic monitoring; data precision