

# 四种新型土壤墒情传感器的对比分析

苏志诚<sup>1</sup>, 张立祯<sup>2</sup>, 丁留谦<sup>1</sup>, 张文婷<sup>3</sup>, 韩 硕<sup>2</sup>, 王 旗<sup>2</sup>

(1.中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2.中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193;  
3.北京市交通委员会路政局通州公路分局, 北京 101100)

**摘要:**土壤墒情监测工作日益得到重视。在北京上庄试验站选择四种不同工作原理和型号的土壤墒情传感器进行了为期半年的对比分析测试,利用监测数据对土壤墒情传感器的稳定性、灵敏性、准确率三个指标进行了分析,结果表明各类传感器在监测效果方面表现各有优缺点,均表现出了较好的稳定性,对降水反应也良好,准确率略有差别,监测数据基本在烘干法值附近上下波动。通过对比分析研究,了解土壤墒情传感器性能和大范围推广应用具有一定的参考意义。

**关键词:**土壤墒情;传感器;对比分析

中图分类号:S271

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2014)04-0055-06

## 1 引言

土壤墒情即土壤湿度的情况,是指土壤的含水状况,是最重要和最常用的土壤信息。它是科学地控制调节土壤水分状况,进行节水灌溉,实现科学用水和灌溉自动化的基础,也是抗旱减灾工作中最重要的信息之一。由于土壤结构及土壤水分的空间变异性,造成了在同一地块中土壤含水量的不同<sup>[1]</sup>,这就需要土壤含水量进行测定。因此,为了及时、准确地了解土壤水分动态变化规律和空间立体分布,选定适合的土壤含水量测定方法就显得尤为重要。

土壤水分测量方法种类较多,在生产和科研中应用较多的主要有烘干法、中子仪法、张力计法、介电法等<sup>[1-2]</sup>。其中烘干法被认为是国际标准方法,中子测量法是仅次于烘干法的另一标准方法。介电法<sup>[3-8]</sup>是应用最为普遍的一种,它对水分敏感性受土壤的容重、质地影响小,操作便利,测量效率高,被认为是最理想的测量方法。该方法运用被测介质中介电常数随含水量变化而变化这一原理来测定土壤含水量,主要包括频域反射法(FDR)、时域法(TDR)、驻波比法(SWR)等。根据传感器发出的电磁波在不同介电常数物质中反馈电磁波的不同,计算出被测物的含水量<sup>[9-10]</sup>。

相对而言,发达国家的土壤墒情监测技术较为成

熟,且比较重视对墒情监测仪器的研发,墒情监测自动化程度也较高。我国的土壤墒情监测工作相对薄弱,以前主要靠人工取土,采用烘干法进行监测,工作强度大、监测频次低<sup>[11-13]</sup>。为提高土壤墒情监测的时效性和稳定性,亟需寻求一种精度高、可靠性强、适合实时监测的土壤水分测量技术来提高旱情监测水平。因此,本研究对目前在我国应用的国外几种主要土壤水分传感器进行了对比测试,对不同传感器的性能和质量进行了初步评价,以期为我国墒情监测站网建设提供参考。

## 2 试验方法

### 2.1 试验地点和试验设计

本次试验在中国农业大学上庄试验站进行。试验区位于北京市海淀区上庄镇辛力屯(北纬40°1',东经116°16')。气候类型为典型的暖温带半湿润大陆性季风气候,夏季高温多雨,冬季寒冷干旱,全年无霜期为180d左右。土壤类型为壤土。试验在2012年进行,小区面积100m<sup>2</sup>。种植作物为春玉米,4月25日播种,9月25日收获。

### 2.2 土壤水分传感器安装与布置

本试验采用的土壤测试方法为:烘干法、SWR(驻波)法、TDR(时域反射)法及FDR(频域反射)法。本研究选择了2种FDR传感器,分别为Z100单片式传感

收稿日期:2013-12-02

基金项目:水利部“948”项目;奥地利 iMETOS®墒情监测及决策支持系统(201201)

作者简介:苏志诚(1975-),男,河北景县人,高级工程师,主要从事抗旱减灾基础研究。E-mail:suzhc@iwhr.com

器(奥地利,Caipos)和 EnviroSCAN 套管式传感器(澳大利亚,Sentek);驻波法 SWR 传感器 1 种,为 C-Kit(奥地利,Caipos);TDR 法传感器 1 种,为 TDR300(美国,Spectrum)。

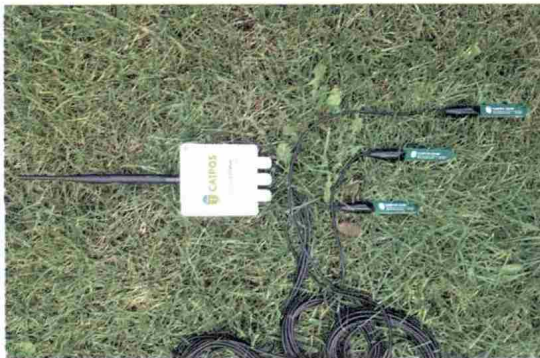
本次试验选用地块为土地平整、不易积水、距离沟渠 20m 以上的具有代表性的小区,排除了低洼积水及沟渠水侧渗对监测结果的影响。垂向测点的数目均采用 3 点法布置,3 点深度分别为 10cm、20cm 及 40cm。

埋设单片式传感器 Z100 时(图 1(a)),首先需要埋设位置一侧开挖深 50cm 左右的剖面,剖面尽量齐整。根据埋设深度,确认各水分传感器的埋设位置,各传感器错落分布,以避免传感器彼此靠近而影响监测准确性。插入传感器时,将传感器平面与地平面垂直,以减少对水分入渗的干扰,保证传感器两侧水分含量均衡。在此过程中,要注意避免损伤传感器,同时需要保证传感器与周围土壤紧密接触,无空隙产生。传感器统一朝向正北,尾部线缆与地面垂直,这样统一传感

器的安装位置,可以避免在人工取土时,对传感器有所损伤。

埋设 EnviroSCAN 套管式传感器(图 1(b)),安装要求较高。主要是 PVC 套管的埋设,主要做到两点:垂直埋设和避免外管壁与土壤产生空隙。具体操作是,将 PVC 套管一端切割为换刀刃口状,通过减震锤及尼龙击打头将套管逐层打入土壤中,同时,将管内土壤取出,将内管壁擦净,并用防水膨胀塞头将套管下方塞紧。最后,将传感器埋设其中。

驻波法 SWR 传感器 C-Kit(图 1(c))和 TDR 传感器 TDR300(图 1(d))为便携式土壤水分传感器,直接读数,并记录后,在实验室分析数据,每 15d 测定一次。每个测点每次重复测定三次,取平均值,在 10cm、20cm 和 40cm 土壤层次上分别测定。同时,取土壤样品,用烘干法测定土壤水分。根据容重和烘干法所测重量含水量,最终换算成体积含水量。采用烘干法为对照,用来对比分析 4 种传感器的测定准确性。



(a)Z100 传感器



(b)EnviroSCAN 传感器



(c)C-Kit 传感器



(d)TDR300 传感器



(e)迈特斯自动监测站

图 1 4 种土壤墒情传感器的安装和应用

Fig.1 Installation and application of the 4 types of the soil moisture sensors

### 2.3 数据采集和处理

C-Kit 和 TDR300 便携式土壤水分传感器,在每次测定时采取直接读数的方式进行数据采集。Z100 和 EnviroSCAN 传感器的数据采集通过迈特斯自动监测站主机(图 1(e))自动完成,Z100 传感器的测定数据通过无线方式发送到迈特斯自动监测站主机,EnviroSCAN 传感器是以有线的方式与迈特斯自动监测站连接,进行数据采集。迈特斯自动监测站安

装于试验区中心区域,采用 2m 镀锌钢管作为安装支架,太阳能供电,每 10min 自动采集一次数据,数据发送频率统一按照 1h/次,监测数据由迈特斯主机采集后,经过 GPRS 发送至本试验专门布设的迈特斯网络数据平台(图2)。迈特斯网络数据平台对自动采集数据自动进行分析、整理和统计,将监测数据以图表等多种方式显示给用户,为科研或实际生产工作提供服务。

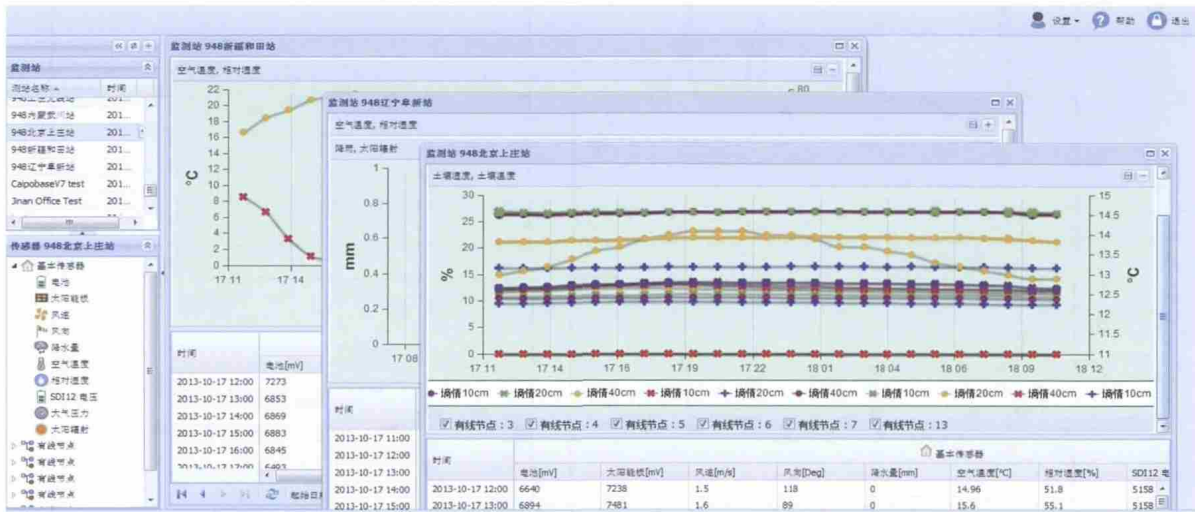


图 2 迈特斯网络数据平台

Fig. 2 The internet data platform of Caipos measurements

### 3 对比结果分析

仪器测量的准确性是评价传感器质量好坏的关键标准。烘干法一直被公认为最精确的测定土壤含水量的方法,因此将烘干法所测土壤含水量作为验证的标准值,以检验不同土壤水分传感器测量数据准确性的程度。

连续观测的土壤水分测定仪器 Z100 传感器和 EnviroSCAN 传感器自动采集数据从 7 月 1 日起至 12 月 27 日止,人工烘干数据分析从 7 月 1 日起至 12 月 25 日止。本研究主要从传感器工作的稳定性、灵敏性以及测量数据的准确性评价测试结果。如图 3 所示,土壤各层次含水量随降水而增加,土层的含水量基本保持在 30%左右,能够满足作物的生长需求。试验点的土壤为壤土,保水性较好。在三种土层中,土壤含水量的峰值出现基本相同,但随着土层加深,峰值出现延迟,保持时间也延长,这是由于土层越深,水分需要一定的入渗时间,同时其保水性也越好,水分不易流失。

传感器稳定性是衡量传感器质量的重要指标。稳定性主要看数据表现有无异常。从图 3 可以看出,两种

FDR 型传感器在 7 月~11 月稳定性较好,能够正常采集数据,且各层数据表现正常,没有异常跳跃、振荡或测量间断;而 12 月份 10cm 和 20cm 深度的监测数据均出现异常下降。分析认为由于 12 月份气温下降,浅层土壤( $\leq 20\text{cm}$ )出现冰冻现象,而冻土对介电常数影响很大,因此基于 FDR 原理土壤水分监测传感器不能够监测冻土水分。

烘干法测得的三种土层的体积含水率与迈特斯监测站 Z100 传感器监测的体积含水率都相差不大。但 EnviroSCAN 传感器 40cm 土层的监测数据与烘干法测得的土壤含水量偏差较大(图 3)。分析原因可能是由于后者的传感器采用套管的形式,不能与土壤充分接触导致。另外从传感器对降水的灵敏性反应情况来看,由于传感器埋设深度不同,以及降雨强度和下渗蒸发的影响,对比降雨量数据及各个监测层自动监测数据,两种 FDR 型传感器在监测 0~20cm 深的土层时,其土壤含水量随降雨变化明显;监测 40cm 深的土层时,土壤含水量变化相对缓和。Z100 传感器测定值与烘干法比较的均方差根 RMSE 为 2.8,相对误差为 9.9%(图 4(d),

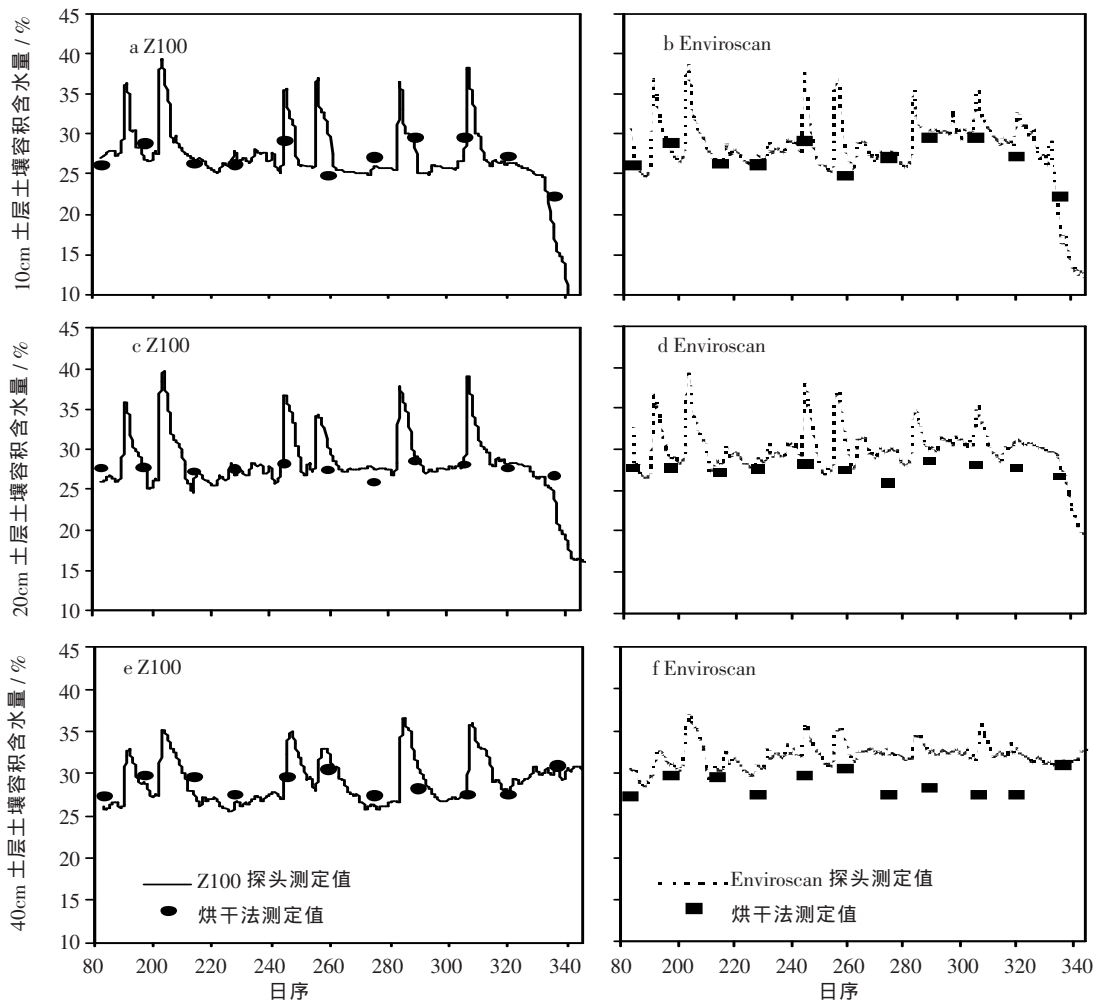


图3 Z100 和 EnviroSCAN 传感器连续监测值与烘干法测定值的比较

Fig. 3 Comparison of the continuous soil moisture measurements sensors Z100 and EnviroSCAN with dry weight method

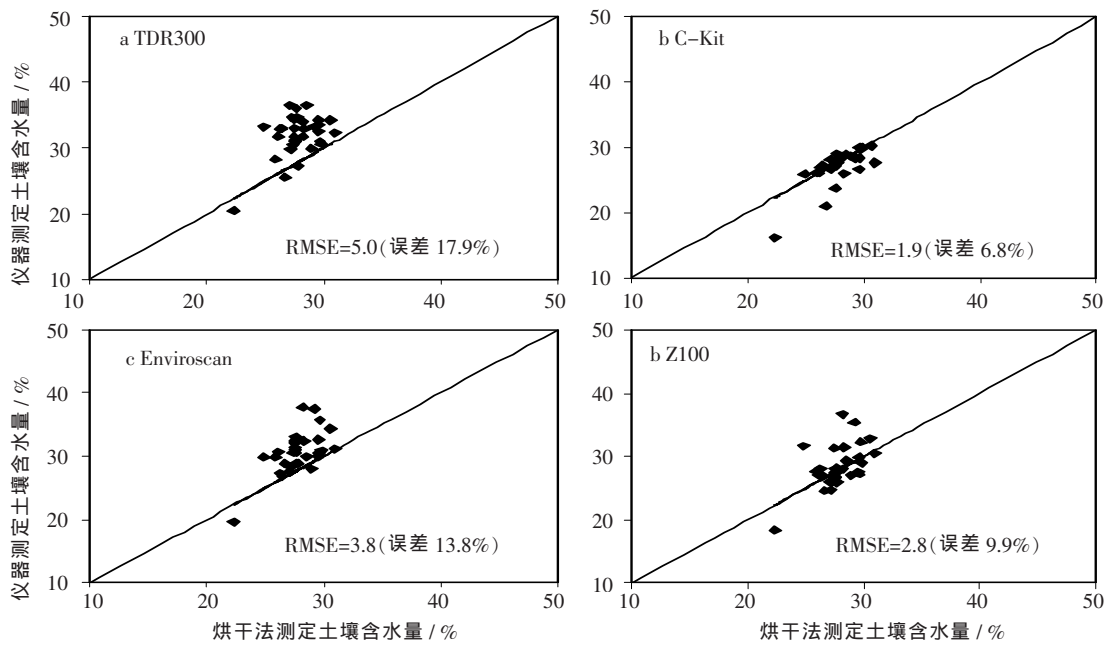


图4 4种传感器监测值与人工烘干法数据比较

Fig.4 Comparison of the 4 types of the soil moisture measurement sensors with dry weight method

而 EnviroSCAN 传感器测定值与烘干法比较的均方差根 RMSE 为 3.8, 相对误差为 13.8%(图 4(c))。因此, 传感器的灵敏性和准确性都是 Z100 优于 EnviroSCAN。

非连续测定的土壤水分传感器 C-Kit 和 TDR300 的测定结果与烘干法的比较如图 4(a 和 b)所示, 土壤水分传感器与烘干法的监测数据相比, 便携式土壤水分传感器 C-Kit 的均方根误差最小为  $0.019 \text{ m}^3/\text{m}^3$ , 说明 C-kit 型传感器具有很高的准确性, 其测量值与传统称重法的测量值具有很高的相关性和一致性。其次是 Z100 型土壤水分传感器, 其均方根误差为  $0.028 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。而 TDR300 型土壤水分测量仪, 其监测数据普遍高于烘干法, 均方根误差为  $0.050 \text{ m}^3/\text{m}^3$ , 可能是由于该测定方法受土壤电导率影响较为明显, 也可能是在监测过程中, 使用的 7.9 英寸探针过长导致误差偏大。TDR300 外形设计不适合作为剖面水分测量仪器, 主要应用于土壤表层水分测量。

#### 4 讨论

经过对不同土壤水分测量仪器进行综合比较, 研究发现, 各土壤水分自动监测站在稳定性及操作便利性方面均显著优于烘干法, 但是由于测量原理有所不同, 各方法在测量结果方面有所不同, 主要体现在以下几点:

(1) TDR300 测试方法操作比较复杂, 价格比较昂贵, 且测试结果受土壤电导率影响明显, 需要进行严格标定, 属于便携式土壤水分测试仪器。

(2) C-Kit 采用驻波原理, 测试结果受土壤类型和电导率影响较小, 在中低盐土范围内应用时, 无需标定。该设备价格比较低, 设计合理, 操作简单, 非常适宜作为移动便携式水分监测仪器。与 RTU 连接后也可以实现自动监测。

(3) EnviroSCAN 采用 FDR 原理, 价格相对较高, 能够同时监测土壤剖面不同层次的水分含量, 与 RTU 连接后可以实现自动监测。通过一根安装在土壤中的套管进行测试, 套管和周围土壤孔隙对测试结果影响较大, 所以对现场安装要求非常严格, 更适合用于科研项目。

(4) Z100 采用 FDR 原理, 监测数据与烘干法相差很小, 传感器长期测试性能稳定。传感器设计合理, 现场安装非常方便, 价格与同类传感器相比明显较低, 适合大范围土壤墒情的自动监测。而且该传感器耗电很小, 能够实现传感器与主机之间的无线传输, 每个主机的 RTU 可

以扩展连接数十个传感器, 整体性能非常优越。

总体来看, 通过土壤水分传感器田间对比实验的研究, 利用稳定性、灵敏性和准确性指标, 可以从不同角度反应对比土壤水分传感器产品的真实情况。以上各类传感器在监测效果方面表现各有优缺点, 各类传感器均表现出较好的稳定性, 对降水反应也良好, 准确率略有差别, 监测数据基本在烘干法值附近上下波动。在零度以下的浅层土壤中, 受冰冻影响, 基于介电原理的土壤水分监测方法, 均不能够准确监测冻土内的水分含量。以北京为例, 冬天结冰土壤深度一般不会超过 40cm 以上, 根据已经进行的试验, 在 40cm 深安装的传感器不受冰冻影响, 准确度依然较高, 可以正常反映土壤的水分情况, 对冬季大田墒情具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 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):84-86. (SHI Xinling, WANG Guodong. Research advances in measuring method of soilwater content [J]. China Rural Water and Hydropower, 2003,(10):84-86. (in Chinese))
- [2] 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 Jiazhao, CHEN Mingliang, HE Yuanqiu. Specific advanced soil moisture measurement technologies [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2001,22(3):25-28. (in Chinese))
- [3] G.C. Topp, J.L. Davis. Measurement of soil water content using time domain reflectometry (TDR): a field evaluation [J]. Soil Science Society of America Journal, 1985, 49 (1): 19-24.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] B. G. Leib, J. D. Jabro, G. R. Matthews. Field evaluation and performance comparison of soil moisture sensors [J]. Soil Science, 2003,168(6):396-408.
- [7] 刘燕, 赵武, 郭文远, 等. 两种土壤水分监测仪测墒精度的比较[J]. 气象与环境科学, 2007,30(增刊 1):175-178. (LIU Yan, ZHAO Wu, GUO Wenyuan, et al. Accuracy comparative analysis of two soil moisture monitor [J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2007,30(Supp1):175-178. (in Chinese))
- [8] 李炎, 王丹. 不同土壤水分测定方法的比较研究[J]. 安徽农业科学, 2010,38(17): 9110-9112. (LI Yan, WANG Dan. Comparative study oil diferent determination methods of soil moisture [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010,38(17):9110-9112. (in Chinese))
- [9] 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):61-65. (ZHANG Xian, JIANG Jing,

- WANG Jinsong. The design of the soil moisture sensor based on FDR[J]. *Instrumentation and Measurement*, 2011,30(11):61-65. (in Chinese)
- [10] G.C. Topp, J.L. Davis, A.P. Annan. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines [J]. *Water Resources Research*, 1980,16(3): 574-582.
- [11] 王景才,夏自强,杨建青,等. 土壤水分传感器田间比测实验研究[J]. *水利信息化*, 2012,2: 41-45. (WANG Jingcai, XIA Ziqiang, YANG Jianqing, et al. Study on field comparison test of soil moisture sensor [J]. *Water Resources Informatization*, 2012,2:41-45. (in Chinese))
- [12] 杨建青,王吉星,章树安,等. 土壤水分监测仪器野外对比测试分析研究[J]. *水文*, 2012,32 (5):57-61. (YANG Jianqing, WANG Jixing, ZHANG Shuan, et al. Comparison on performance of soil moisture monitoring sensors through field monitoring [J]. *Journal of China Hydrology*, 2012,32(5):57-61. (in Chinese))
- [13] 章树安,王爱平,杨桂莲,等. 旱情监测与评价进展研究与思考[J]. *水文*, 2010,30 (3):15-21. (ZHANG Shuan, WANG Aiping, YANG Guilian, et al. Thought and research on progress of drought severity monitoring and assessment [J]. *Journal of China Hydrology*, 2010,30(3):15-21. (in Chinese))

### Comparative Analysis of 4 Types of Soil Moisture Sensors

SU Zhicheng<sup>1</sup>, ZHANG Lizhen<sup>2</sup>, DING Liuqian<sup>1</sup>, ZHANG Wenting<sup>3</sup>, HAN Shuo<sup>2</sup>, WANG Qi<sup>2</sup>

(1. *China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;*

2. *College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China;*

3. *Tongzhou Branch of Road Administration of Beijing Municipal Commission of Transport, Beijing 101100, China)*

**Abstract:** In this study, 4 different types of soil moisture sensors with different operating principles were employed to conduct a half-year comparative analysis at Shangzhuang Experimental Station in Beijing. Based on the monitored data, analysis of soil moisture sensor's stability, sensitivity and accuracy were carried out. The results show that each type of the sensor exhibits its own advantages and disadvantages. In general, all types of the sensors exhibits good stability and good reaction to precipitation. The accuracy of the 4 types of sensors show little difference, by fluctuating around the value of oven drying method. This comparative analysis will provide a reference to understand the performance of different soil moisture sensors, and then promote their wide application.

**Key words:** soil moisture; sensor; comparative analysis

(上接第 31 页)

### Application of Grid-based Xin'anjiang Model in Ganjiang River Basin

SHAN Hongcui, REN Liliang, ZHOU Yujia

(*State Key Laboratory of Hydrology & Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

**Abstract:** On the basis of grid digital elevation data, the digital river network and spatial topological relation were generated over the area controlled by the Xiashan Hydrometry Station in the Ganjiang River Basin, including 21 198 grid cells at a resolution of 30s. The grid-based precipitation and evaporation data obtained from the nearest stations were applied to calculate the hydrograph at Xiashan Station. In daily mode, the duration from 1978 to 1985 was taken as the calibration period for the Xin'anjiang Model with the objective function of minimal runoff error, the duration from 1986 to 1987 as the verification period of model parameters. In flood event-based mode, the 16 flood hydrographs were used for parameters calibration, and the other 6 hydrographs for model verification, by taking runoff depth, flood peak discharge, peak timing and model efficiency coefficient as the objective functions. The computational results show that 88% of the flood events for calibration are acceptable in the event-based mode, and other 6 flood events for verification are valid. Therefore, the grid-based Xin'anjiang model performs well as applied in the study catchment.

**Key words:** digital elevation model; Xin'anjiang Model; daily model; flood event-based mode; parameters calibration