

# FDR 自动土壤水分数据标定问题及解决方法

周旭辉<sup>1</sup> 王黎明<sup>1</sup> 王建波<sup>1</sup> 陈晨<sup>1</sup> 王爱珍<sup>2</sup> 刘焕乾<sup>1</sup> 廖华<sup>1</sup>

(1 湖南省气象技术装备中心,长沙 410007; 2 湖南省气象局,长沙 410118)

**摘要** 针对目前 FDR 自动土壤水分数据可用性低的实际情况,本文从 FDR 自动土壤水分站传感器原理出发,结合数据处理流程与方法对湖南 60 个站点不同层次的标定参数及部分站点的相关观测数据进行了分析,指出目前田间标定法在自然条件下几乎无法得到覆盖土壤各个湿度区间的均匀样本数据,导致二次标定参数不合理是造成 FDR 自动土壤水分站数据可用性差的根本原因。二次标定方程参数不合理主要表现为方程斜率过大、过小、负值 3 种情况,导致观测数据增幅过大、常年不变、与实际土壤湿度变化趋势完全相反等问题。最后针对该问题提出了大样本原状取土,实验室标定的解决方法,并对方法进行了初步验证,结果表明该方法能从源头上有效改善土壤水分站观测数据质量。

**关键词** FDR;土壤水分传感器;土壤体积含水量;原状取土;实验室标定;数据质量控制

## 引言

湖南自 2010—2011 年先后投资 270 万建设了 60 套 DNZ3 型自动土壤水分观测设备,其中 58 套通过验收并投入业务运行。2013 年 7 月 1 日至 8 月 14 日湖南出现罕见连续高温干旱天气,造成严重旱灾,从自动土壤水分站监测数据应用情况来看,有相当部分站点的自动土壤水分观测数据可用性较差,在气象防灾减灾服务中效果不明显。

DNZ3 型自动土壤水分站传感器基于频域反射原理设计,可以直接测量出土壤体积含水量,结合土壤相关参数能进一步反演出土壤相对湿度、土壤重量含水率、土壤有效水分贮存量等二次产品,由于测定土壤湿度不仅与传感器自身的电学特性、使用环境及合理安装有关,而且还与传感器的准确标定、数据处理相关配置参数密切相关,任何一个环节出现纰漏都会影响数据质量,所以数据业务可用性不高是一个普遍存在问题。近几年,随着中国气象局土壤水分观测网的建立,相关业务及科研人员对此展开了研究<sup>[1-5]</sup>,鲁韦坤等<sup>[6]</sup>按照土壤业务化检验标准对云南 20 个土壤水分站观测值进行了检验,结果显示干季时土壤水分站观测值与人工观测值偏差较大,认为当前土壤水分站业务化检验评判标准值得

商榷和进一步论证;王晓东等<sup>[7]</sup>对安徽全省自动土壤水分站数据质量进行了分析,对人工观测数据与自动站观测数据绝对误差与相关性进行了分析,探讨了部分导致误差的原因;黄飞龙等<sup>[8]</sup>通过对土壤水分传感器的安装标定、田间标定以及测量数据标定,使得土壤水分自动站所获得的测量数据准确性大大提高;徐学义等<sup>[9]</sup>分析 FDR 测定土壤水分与烘干法的差异,指出烘干法和 FDR 观测数据存在较明显的差异,不仅表现在数据差距大,而且在增减趋势上也存在明显差异。

针对目前存在的问题,本文从 FDR 自动土壤水分站传感器原理及数据处理流程出发,对湖南 60 个站点不同层次的二次标定参数及部分站点的相关观测数据进行了分析,初步找出了造成湖南自动土壤水分站测量数据质量差的主要原因,最后针对该问题提出了基于大样本原状取土,实验室标定的解决方法,并对方法进行了初步验证,结果表明该方法能从源头上有效改善土壤水分站的观测数据质量。

## 1 原理及数据处理流程

FDR 自动土壤水分观测仪基于频域反射法(Frequency Domain Reflectometry)原理设计,简称 FDR 法。原理简单描述如下:平行排列的圆形金属

环组成一个电容,电容与振荡器组成一个调谐电路,用100 MHz正弦曲线信号扫描土壤,电容量的变化与两极间被测介质(土壤)的介电常数成正比。因水的介电常数比一般介质的介电常数要大,所以当土壤中水分增加时,其介电常数相应增大。根据电容量与土壤水分之间的对应关系,即可测出土壤体积含水量。FDR自动土壤水分传感器工作原理如图1所示,数据处理流程如图2所示。

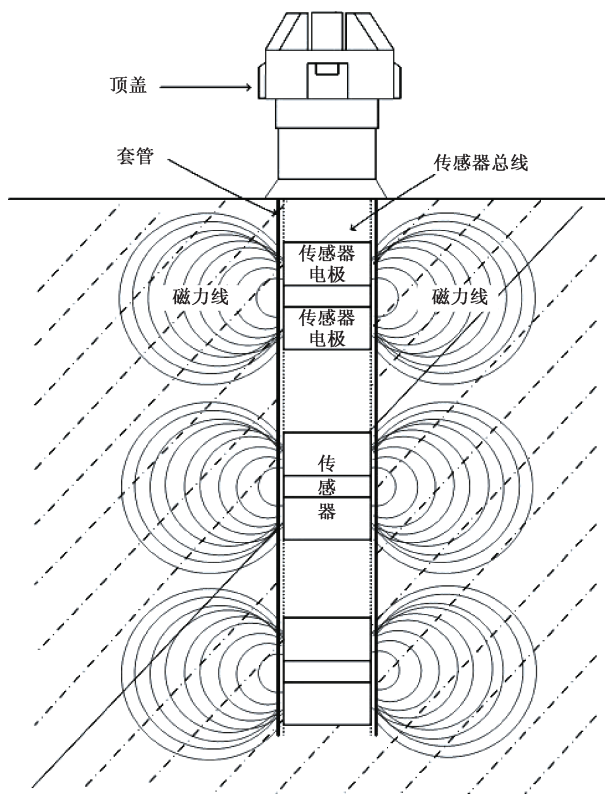


图1 FDR自动土壤水分传感器工作原理

定义归一化频率  $S_F$  如式(1)所示:

$$S_F = \frac{F_a - F_s}{F_a - F_w} \quad (1)$$

其中  $F_a$ 、 $F_w$  分别为传感器置于空气、水中所测得的频率,传感器标定安装后一般不进行更改,为固定值,称  $F_a$ 、 $F_w$  为基准频率,  $F_s$  为土壤中实测频率。

传感器生产厂家在分析了不同土壤样本的基础上建立归一化频率  $S_F$  与土壤体积含水量  $\theta_v$  之间的经验关系为式(2),即一次标定方程。

$$S_F = 0.1957\theta_v^{0.404} + 0.02852 \quad (2)$$

在湖南实际业务应用中,一次标定方程采用传感器厂家默认参数,即体积含水量仪器原始观测值  $\theta_v$  通过式(2)计算得到。由于仪器安装地点及传感

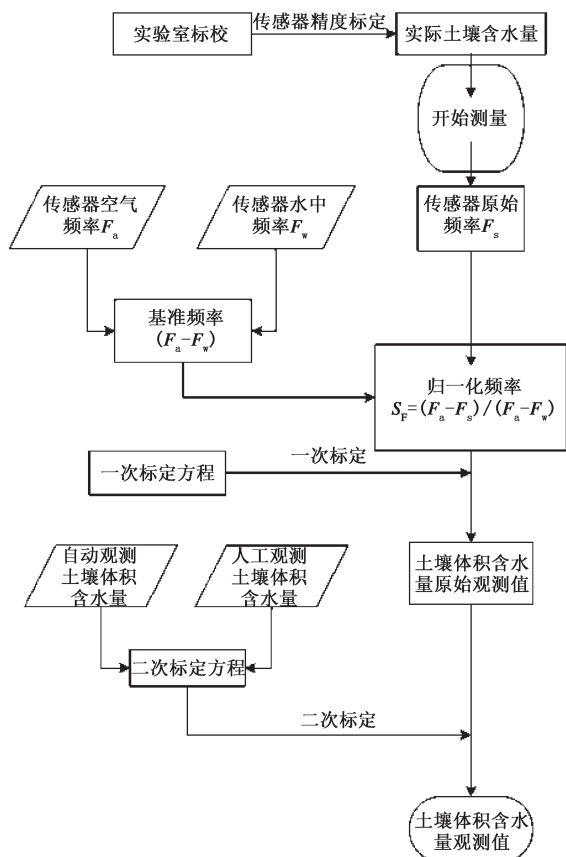


图2 FDR自动土壤水分站数据处理流程图

器安装位置土壤质地、物理结构、化学成分等不同,经由式(2)计算所得到的体积含水量  $\theta_v$  并不能直接业务化应用,需要进一步根据一段时间内同时次仪器自动观测值、人工观测值联合计算得到的标定参数来对自动观测值  $\theta_v$  进行修订。具体过程就是积累某一段时间内体积含水量仪器原始观测数据  $\theta_v$  与同时次人工观测数据  $\theta_m$  做线性拟合,得到二次直线标定方程(3)中的参数  $A_0$ 、 $A_1$ ,然后通过二次标定方程(3)对体积含水量仪器原始观测值  $\theta_v$  进行修正即得到业务化自动土壤体积含水量观测值  $\theta_{xy}$ 。

$$\theta_{xy} = A_1\theta_v + A_0 \quad (3)$$

联合式(2)、(3)得到业务化土壤体积含水量观测值  $\theta_{xy}$  与归一化频率  $S_F$  的关系为:

$$\theta_{xy} = A_1 \left( \frac{S_F - 0.02852}{0.1957} \right)^{\frac{1}{0.404}} + A_0 \quad (4)$$

从方程(4)可以看出,数据质量的好坏不仅与归一化频率  $S_F$  相关,而且还与  $A_0$ 、 $A_1$  密切相关,传感器在出厂前以及运行后每隔一段时间都要经过严格的实验室标定,故认为归一化频率  $S_F$  是可靠的。所以,

影响数据质量的关键因子为参数  $A_0$ 、 $A_1$ , 因此在设备正式业务化运行之前, 必须对每一个土壤层次的二次标定参数  $A_0$ 、 $A_1$  进行标定, 此过程称为二次标定, 方程(3)称为二次标定方程。

## 2 目前二次标定方法介绍

人工观测采用烘干称重法, 按照中国气象局《农业气象观测规范》中的有关规定执行, 各层次取均匀分布在自动土壤水分传感器周围的4个样本, 半径在2~10 m范围内。每旬逢8观测, 遇有降水大于10 mm以上的情况, 降水过程结束后加测1次。过程结束后, 将烘干称重法得到的人工观测土壤体积含水量与同一时间自动土壤水分站观测得到的体积含水量原始观测值做线性拟合, 得到二次直线标定方程(3)中的参数  $A_0$ 、 $A_1$ , 通过方程(3)将自动土壤水分站观测值人为修正, 使得经过标定后的数据更接近人工测定值, 称为田间标定法。由方程(3)可以看出, 直线方程参数是否合理准确, 对观测数据的质量起决定性的作用, 理论上用田间标定方法确定参数  $A_0$ 、 $A_1$  时, 原则上每一个土壤体积含水量等级样本数应不少于4个, 总样本数不少于30个, 且样本必须均匀分布在在0~10%、10%~15%、15%~20%、20%~25%、25%~30%、30%~35%和大于35%等7个不同土壤水分体积含量区间, 但在实际操作过程样本很难达到此要求。

## 3 标定存在的问题分析及解决办法

### 3.1 主要原因

一般认为, 目前采用的田间标定法所得到的二次方程参数在数据处理中是可行的, 确实能有效消除因土壤环境不同而造成的测量偏差。但用此方法来确定二次标定方程参数有以下3个致命弱点: ①土壤水分自动站安装处土壤的类型、剖面各组织层、质地、密度、颗粒和安装结合紧密度各不相同, 使得传统人工取土样本与设备安装处土壤可能存在差异。②在自然条件下, 人工样本土壤体积含水量数据很难全方位涵盖5%~60%等各个湿度区间, 特别是南方地区, 在野外自然条件下短时间内很难获得覆盖高中低湿的样本数据, 50 cm以下的土壤层, 样本数据跨度更难拉开, 样本跨度太小导致得到的二次标定方程参数可能不够合理, 无法保证在各种湿度条件下的数据质量。③人工对比观测人员素质

参差不齐、观测时间长、取土劳动强度大, 导致人工观测数据存在人为误差的可能性很大。

针对田间标定方法存在的问题, 本文对湖南目前运行的60个站点约450个层次的二次标定参数进行分析, 发现约32个台站的110个层次的二次标定参数不合理, 初步可归纳为以下3种情况: ①二次标定方程系数  $A_1 < 0.2$ , 相当于对传感器实测数据进行了至少5倍甚至数10倍缩小, 导致观测数据几乎常年在很小的范围内振荡, 对降水完全不敏感, 无法反映出实际的土壤湿度; ②  $A_1 < 0$ , 即对传感器实测数据进行了反向修正, 导致的后果是若土壤本身湿度增加, 传感器观测到的土壤体积含水量增加, 但通过二次标定方程后得到的土壤体积含水量反而减小, 当湿度大到一定程度时, 计算结果甚至为负, 导致部分台站一旦有较大降水发生时, 观测得到的土壤体积含水量数据反而为0甚至为负数, 这种情况最严重, 与客观实际完全背离; ③  $A_1 > 3$ , 即通过二次标定方程后对传感器实测数据进行了至少3倍甚至数10倍放大, 传感器观测值一个微小的变化都会导致数据跳变大, 导致观测值长期处于高湿或饱和状态, 甚至长期超过土壤体积含水量理论极值, 与实际土壤湿度完全不符(图3~5)。

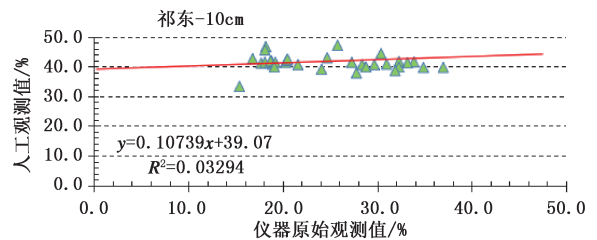


图3 二次订正系数  $0 < A_1 < 0.2$  时, 体积含水量

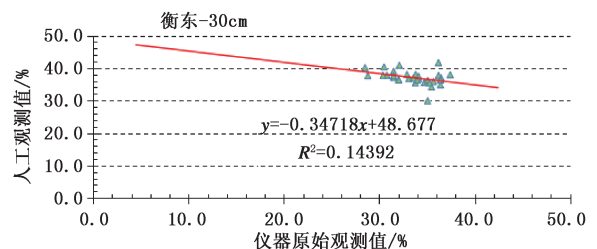


图4 二次订正系数  $A_1 < 0$  时, 体积含水量

### 3.2 解决方法

针对人工田间标定方法的先天性缺陷, 本文提出了一种野外与实验室标定相结合的二次标定方法, 基于原状取土, 在不破坏土壤结构、紧密度、有机

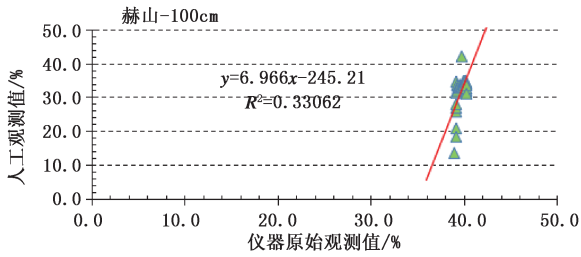


图5 二次订正系数  $A_1 > 3$  时, 体积含水量

质含量、电解质含量等物理化学特性的前提下,从台站获取与观测设备安装处土壤样本接近一致的完整土壤大样本,在实验室人为模拟并观测真实情况下实际土壤干湿变化时土壤体积含水量与传感器频率之间的关系,通过自然晾干、称重获得全量程观测样本数据。

通过大样本原状取土,用实验室观测数据来代替传统人工观测数据来对自动土壤水分观测数据进行校正,以此来弥补自然状态下人工观测数据样本区间过窄没有很好地覆盖低湿—中湿—高湿各区间、人工去除土壤有机质等杂质改变土壤容重等物理化学特性而造成的标定结果偏差较大不符合客观实际的缺陷,从理论上是完全可行的。

### 3.3 实例分析及效果检验

湖南常德澧县土壤水分站(站点号:57565)位于澧县气象局院内,建于2010年,环境符合建设要求。自2013年5月修改二次标定默认参数后,数据出现异常,60 cm数据几乎不变,当遇到强降水或有连续长时间降水时,80 cm、100 cm两个层次观测值不升反降,有时降到0甚至小于0。该站业务化二次标定参数如表1所示,从表1分析,初步可以判断,10—50 cm层次参数基本无异常,但60 cm、80 cm、100 cm直线标定方程一次项为负值,经过二次标定方程计算后,仪器观测数值被强制反向修正,导致遇到强

表1 澧县(57565)二次标定方程参数

土壤深度/cm	$A_0$	$A_1$	说明
10	14.8	0.6369	无异常
20	1.1603	1.0792	无异常
30	6.6647	0.9388	无异常
40	22.628	0.4318	无异常
50	29.491	0.2533	无异常
60	36.365	-0.0911	负相关
80	49.908	-1.0636	负相关
100	51.775	-1.4528	负相关

降水时,虽然土壤本身湿度增加,传感器频率相应增大,仪器观测到的原始体积含水量增加,但经过二次标定方程计算后,观测值减小,结果甚至为负,而60 cm一次项-0.0911尽管为负数,但值小,导致数据几乎长期不变化,此3层参数均为明显错误。图6a为2013年9月23日00:00至24日23:00该站60 cm、80 cm、100 cm 3个层次原始归一化频率值与该站小时降水量对应序列图,其中横坐标为时间序列,左纵坐标为土壤水分站原始频率值,右纵坐标为小时降水量,从图中可以看出,传感器频率变化与降水量变化趋势一致,传感器原始频率值变化趋势符合土壤湿度变化;图6b为2013年9月23日00:00至24日23:00该站60 cm、80 cm、100 cm 3个层次业务化体积含水量与该站小时降水量对比,从图中可以看出,业务化土壤体积含水量与小时降水量变化趋势完全反向,有降水发生时,业务化体积含水量减小,100 cm甚至减少到0,业务化土壤体积含水量与土壤湿度实际变化趋势完全相反。

针对这种异常参数,采用本文提出的基于原状土壤实验室标定方法对澧县60 cm、100 cm两个层次的二次参数进行重新标定。以60 cm样本为例,在实验室得到有效样本数据44组,从图7中可以看出,样本分布较均匀,土壤体积含水量数据几乎完整覆盖了从1%~50%的各个湿度区间。重新计算得到新的二次标定直线方程式,如图8所示,人工观测数据与仪器观测数据有很好的相关性,若按此方程对仪器原始观测值修正,基本能消除因土壤质地不同造成的测量偏差。以新的二次标定参数对2013年9月23日00:00至27日10:00频率数据重新进行反演,得到该站土壤体积含水量与小时降水量对应序列如图9c。图9a为传感器原始频率与小时降水量序列图,从图中可以看出60 cm、100 cm层次原始频率都随着降水发生而增高,由于水渗透到这两层需要一定时间,所以频率值上升有延时,符合客观实际,也符合传感器设计原理。图9b为二次标定参数订正前业务化体积含水量与小时降水量序列图,从图中可以看出,随着降水发生,业务化土壤体积含水量不增反降,特别是100 cm,由于其二次标定方程一次项为-1.4528,所以表现相当明显,一旦有降水发生,其业务化体积含水量迅速降低,这与客观实际完全相反;对于60 cm层次而言,由于其二次标定参数一次项为-0.0911,尽管其值为负数,但



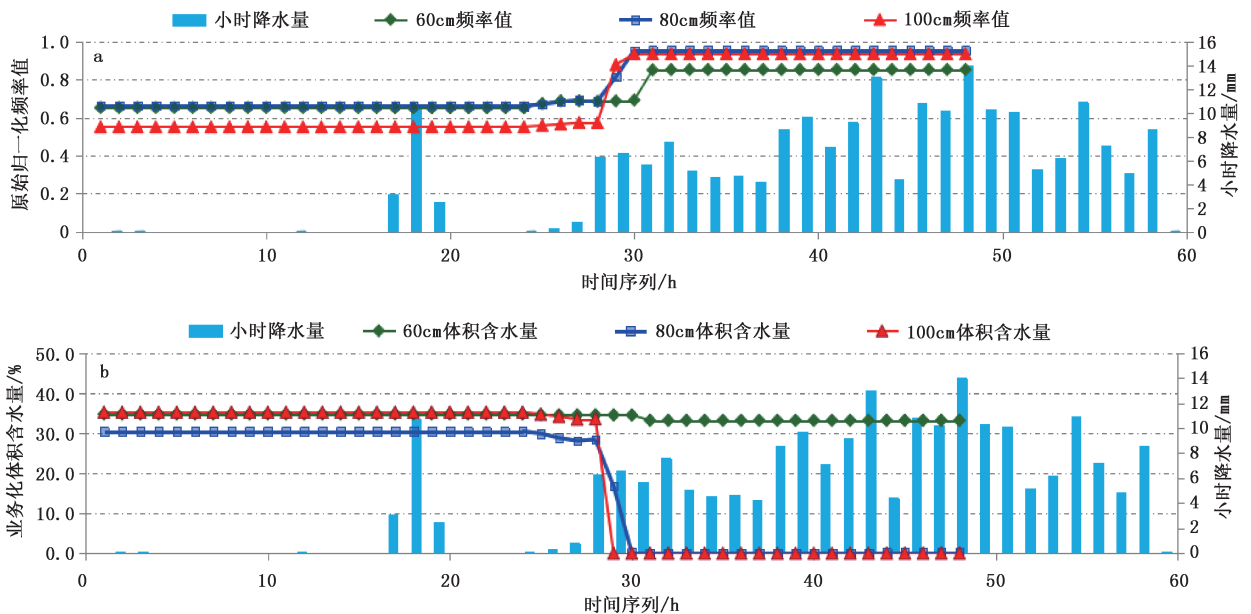


图 6 澧县小时降水量与原始归一化频率对比(a)和小时降水量与业务化体积含水量对比(b)  
(2013年9月23日00:00至24日23:00)

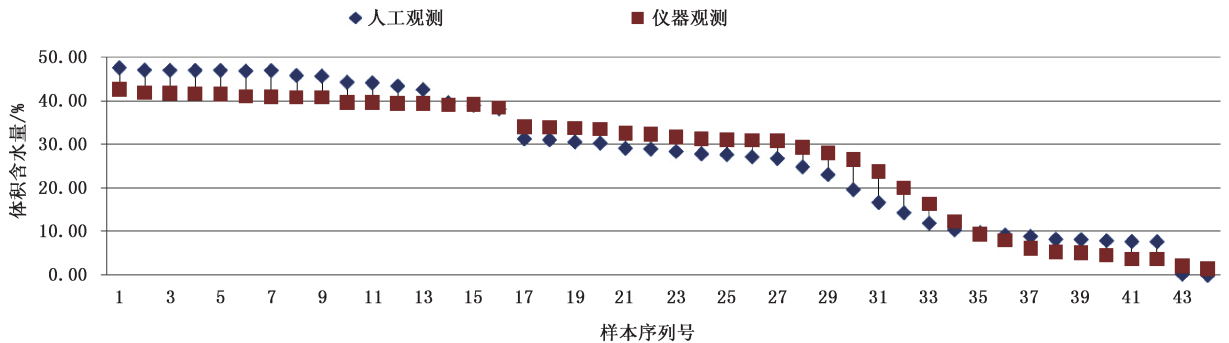


图 7 澧县 60 cm 原状取土实验室标定样本数据序列

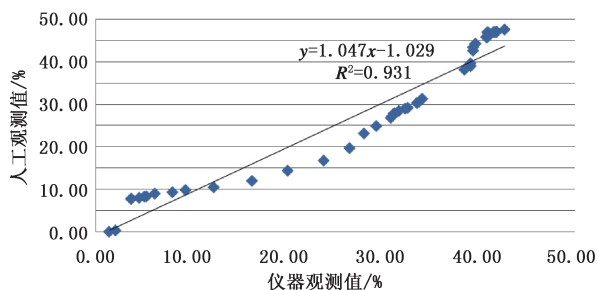


图 8 采用本文方法得到的观测数据散点图及二次标定直线方程(澧县 60 cm)

法重新计算得到的业务化体积含水量与小时降水量序列图,从图中可以看出,随着降水发生,体积含水量随着降水发生迅速上升,随着降水的结束,维持高湿一段时间后逐渐减少,与土壤实际湿度变化趋势非常吻合。

#### 4 结论与分析

(1)造成目前 FDR 土壤水分数据可用性低的最根本原因是二次标定方程参数不合理,主要表现在二次标定直线方程斜率过大、过小、负值 3 种情况,造成观测数据增幅过大、常年几乎不变、与实际土壤湿度走势完全相反等问题。田间标定法的先天局限性,土质不均、样本数据跨度不够、野外无法进行全

0.0911 说明仪器原始观测到的体积含水量经过二次标定方程后被压缩了约 11 倍,所以变化幅度很小,同样不符合客观实际情况。图 9c 为采用本文方

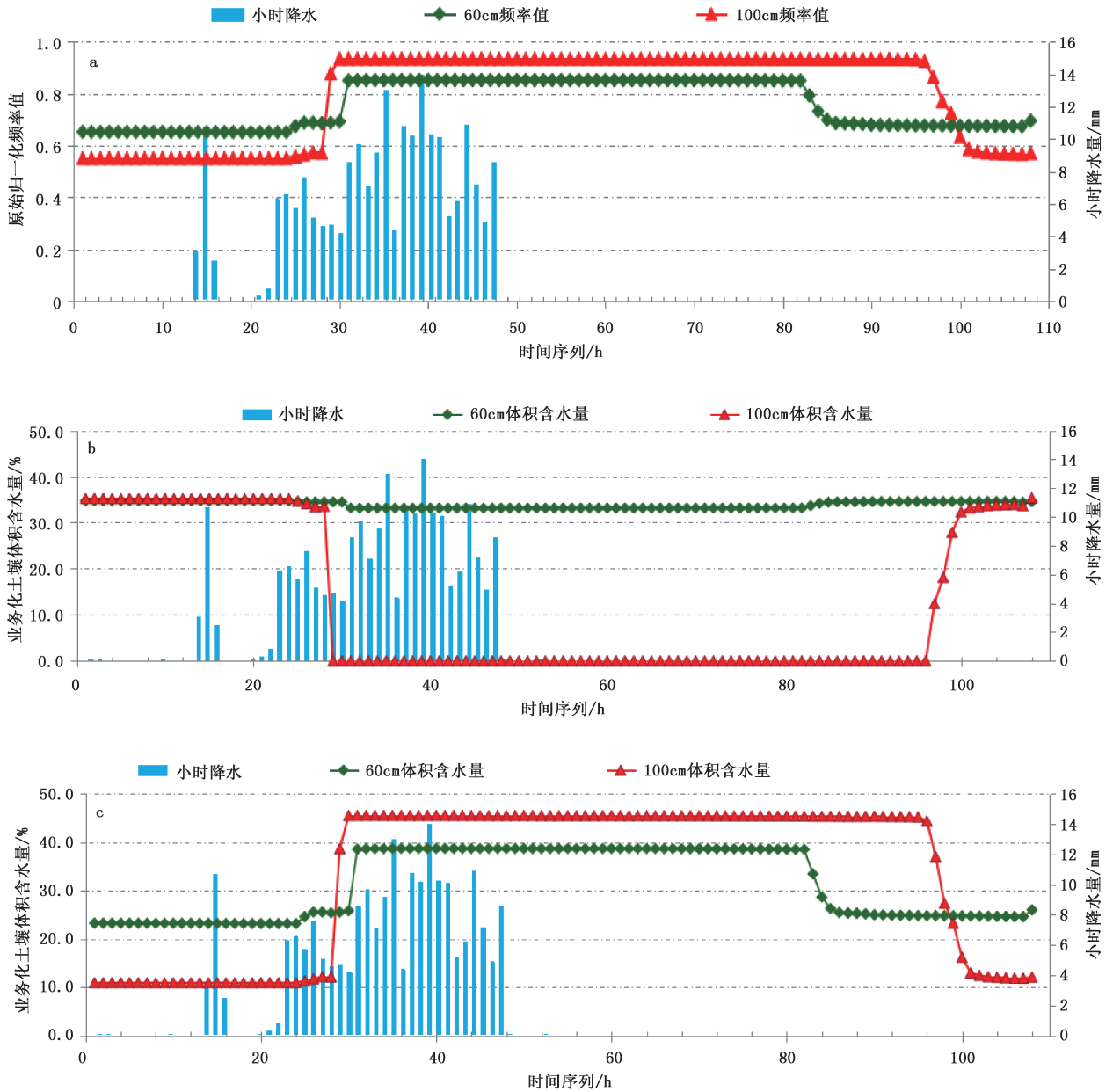


图9 澧县原始归一化频率与小时降水量对比(a)和二次标定参数修改前小时体积含水量与小时降水量对比(b)和二次标定参数修改后小时体积含水量与小时降水量对比(c)

(2013年9月23日00:00至27日10:00)

量程标定等因素是造成二次标定参数不合理的主要原因。

(2)二次参数不合理但大部分站点能通过业务验收,究其原因业务验收同样没针对跨越干湿两季进行全量程数据考核,考核时观测数据仍局限在某一小范围内浮动,与人工观测数据差值能满足验收指标<sup>[10]</sup>,但遇到干旱或强降水等极端天气,观测值往往很难反映土壤湿度实际变化情况。所以目前

的土壤业务化检验标准同样有一定的局限性,需要进一步修改完善,增加数据全量程考核检验方能治本。

(3)二次标定实质是一次人为数据修正过程,是将仪器观测值往人工观测值靠近,采用严谨的标定方法、合理的参数在数据质量控制与处理中是可行的,确实能有效消除因土壤环境不同而造成的测量偏差,但在实际操作过程中,由于田间标定法的先天

局限性,其科学性差,加之用于标定的人工取土数据代表性不好,导致二次标定后观测数据存在较大的偏差。

(4)本文提出的大样本、原状取土实验标定方法确定二次标定直线方程在技术上具有合理性、可行性,初步验证结果表明能从根本上有效解决目前FDR自动土壤水分站数据质量问题,但该方法的普遍适应性需要进一步分析与验证。

(5)本文判定二次标定参数异常的标准是初步以二次标定系数斜率  $A_1 > 3$  与  $A_1 < 0.2$  判断,欲从理论上推导出  $A_1$  的合理区间需结合土壤电导率的上下限及传感器相关设计参数估算,需要进一步研究。

## 参考文献

[1] 胡新华,杜筱玲,全根元.人工与自动土壤水分平行观测资料对比分析[J].气象科技,2010,38(2):239-242.

- [2] 王良宇,张艳红,程路.自动土壤水分观测资料应用误差分析[J].气象科技,2014,42(5):731-736.
- [3] 黄文杰,吕军,翟伶俐,等.人工与自动土壤水分观测资料差异探讨[J].中国农学通报,2013,29(14):146-149.
- [4] 杨波,王钦良,薛庆禹,等.自动土壤水分观测站业务化检验分析[J].气象科技,2014,42(6):992-996.
- [5] 吴东丽,梁海河,曹婷婷,等.中国自动土壤水分观测网运行监控系统建设[J].气象科技,2014,42(2):278-282.
- [6] 鲁韦坤,李湘,朱斌.云南土壤水分自动站观测值的业务化检验及其标准[J].气象科技,2015,43(2):202-206.
- [7] 王晓东,杨天明,吴必文,等.安徽省自动观测土壤水分质量控制方法[J].气象科技,2015,43(3):399-404.
- [8] 黄飞龙,何艳丽,陈武框.FDR土壤水分自动站三级标定的方法[J].广东气象,2011,33(6):60-63.
- [9] 徐学义,崔兆韵,黄华,等.FDR与烘干法测定土壤水分对比分析[J].山东农业大学学报(自然科学版),2013,44(2):190-192.
- [10] 中国气象局监测网络司.自动土壤水分观测仪功能需求书[Z].2008:6-7.

# Problems and Solutions of FDR Automatic Soil-Moisture Data Calibration

Zhou Xuhui<sup>1</sup> Wang Liming<sup>1</sup> Wang Jianbo<sup>1</sup> Chen Chen<sup>1</sup> Wang Aizhen<sup>2</sup>  
Liu Huanqian<sup>1</sup> Liao Hua<sup>1</sup>

(1 Meteorological Technical Equipment Center of Hunan Province, Changsha 410007;

2 Hunan Meteorological Service, Changsha 410118)

**Abstract:** Aiming at the problem of low data availability of FDR automatic soil-moisture station, based on the working principles of FDR automatic soil moisture sensors, combined with the data processing procedures and methods, about 450 secondary-level calibration parameters of 60 station in Hunan and the related observation data are analyzed. It is noted that by the current calibration methods, it is difficult to conducted full scale calibration under natural conditions, and the unreasonable secondary calibration parameters are the root cause of the low data availability of FDR automatic soil-moisture data. The two calibration parameters are not reasonable, for the slope of the equation is too large, too small, or negative values, leading to such problems as too large increase amplitude, unchanging, or opposite to the reality of observation data. The suggestions of large-sample undisturbed soil sampling and laboratory calibration are put forward aiming at the problems of current data calibration method. The method is verified preliminarily, and the results show that the method can effectively improve the quality of soil moisture observation data from the sources.

**Keywords:** FDR; soil moisture sensor; volumetric soil moisture content; undisturbed soil; full-scale calibration; data quality control