

基于原状土柱土壤水分传感器率定方法的研究

智永明^{1,2}, 韩继伟^{1,2}, 邓超², 张松明⁴, 邓彬⁵, 何生荣², 刘满红², 施露阳¹

(1.水利部南京水利水文自动化研究所,江苏南京 210012;2.水利部水文仪器及岩土工程仪器质量监督检验测试中心,江苏南京 210012;3.水利部水文水资源监控工程技术研究中心,江苏南京 210012;4.安徽阜阳水文水资源局,安徽阜阳 236000;5.重庆市水文水资源勘测局,重庆 401147)

摘要:土壤水分传感器在现场安装后,需要针对现场土壤状况对其进行率定,以便校准率定关系。在工程实践中,土壤水分传感器现场率定是一项步骤繁杂、操作要求高、现场取土难度大、耗时较长的一项工作,严重困扰工程项目的实施。开展基于原状土柱率定土壤水分传感器研究,通过现场采集原状土柱,在实验室浸泡至饱和后取出,让土壤水分自然散失,用称重法定期称量原状土柱重量,同时记录土壤水分传感器原始测量值,以此来研究土壤水分传感器的工程率定问题,探讨提高现场安装的土壤水分传感器率定效率的方法,具有现实意义。

关键词:原状土柱;土壤水分传感器;率定方法

中图分类号:S152.7 文献标识码:A 文章编号:1000-0852(2016)04-0048-05

1 引言

在开展土壤水分测定工作中,水文部门目前采用的土壤水分传感器多种多样,但无论何种土壤水分传感器,都要求采用现场率定方法来校准,以保证自动监测仪器的精度^[1-2]。即在监测站现场,采用人工取土烘干法与自动监测仪器对比监测并进行数据分析,对土壤水分自动监测仪器的监测精度进行分析,校准原有率定公式。现场率定过程包括测定土壤干容重、率定数据要求、人工取样烘干、拟合率定公式等^[3]。

从国家防汛抗旱指挥系统一期、二期项目的各地工程实践中,对现场取土率定土壤水分传感器的操作难度有不少反应,一些试点单位近年来对固定墒情站的建设和维护积累了不少经验,也发现了土壤水分传感器现场率定主要存在两大问题:(1)现场取土操作性难度大,每次取土样的质量难以保证,多次现场取土样导致工作量加大等;(2)现场取土样的水分覆盖范围存在局限性,具体项目实施都有进度要求,在规定的进度

范围内进行现场取土样,土样的水分覆盖范围必然存在局限性,进而导致率定公式不能准确反映低水分到高水分的全范围准确测量。

针对工作实践中出现的问题,在调研了安徽阜阳、江苏、辽宁、吉林、黑龙江等地的实际情况后,由科研单位与部分试点水文局参与,共同开展基于原状土的土壤水分传感器实验室率定方法研究,以期减少土壤水分传感器现场率定的工作量,探讨完善现场率定方法。

2 实验

2.1 原状土取土装置

原状土柱又称不扰动土柱(undisturbed soil column),相对保持天然结构和天然含水率的土柱,用于测定天然土的物理、力学性质,如天然含水率、蒸渗系数等。为了采集适合土壤水分传感器率定用的原状土柱,笔者专门设计了现场采集原状土柱的装置,参见图1,该装置已获实用新型专利授权(专利号:ZL201420395690.0),该装置包含三个取土环刀,可同

收稿日期:2015-11-04

基金项目:水利部公益性行业科研专项经费项目“基于物联网的智能农业灌区关键技术研究”(201301014)

作者简介:智永明(1966-),男,山西晋中人,高级工程师,主要研究方向水文水资源自动监测技术和水文仪器检定装置研制等。

E-mail:zhiyongming@nsy.com.cn

时采集 10cm、20cm、40cm 三个土层的原状土柱, 主要组成部分:(1) 取土环刀(材料:3cm 厚不锈钢, 直径 24.4cm 高 11.3cm,);(2) 不锈钢取土环刀上下盖;(3) 十字固定架等。



图1 原状土柱取土装置

Fig.1 The borrow equipment for undisturbed soil column

原状土柱主要采集步骤:

将取土环刀加压盖, 均匀敲击压盖将取土环刀压入土壤, 当压盖中圆孔有土渗出, 取下压盖(见图 2)。用切土刀将凸出取土环刀的土壤削平, 盖上底盖, 用铁锹铲去周围土壤。将取土环刀挖出翻转, 用切土刀将凸出取土环刀的土壤削平, 盖上顶盖, 将取好土的环刀依次放入固定架, 用六角扳手锁紧螺栓。



图2 取土环刀取原状土柱

Fig.2 The borrow undisturbed soil column by ring knife

2.2 实验方法

2.2.1 实验设计

将现场采集的原状土柱运回实验室, 本实验采用的土壤水分传感器为 HRC-1 管式土壤水分传感器, 需要在运回的原状土柱中安装 PVC 护管, 该护管作为 HRC-1 土壤水分传感器的测试护管使用, 安装好 PVC

护管后, 用 300 目尼龙滤布包裹原状土柱下端, 放入盆中, 将水倒入盆中, 参见图 3, 浸泡水面需低于取土环刀上沿 1cm, 当土柱上表面有明显水渗出, 说明土柱已泡饱和, 取出土柱, 让土壤水分自然散失, 用称重法定期称量原状土柱重量, 同时记录土壤水分传感器原始测量信号值, 将获得的多组土壤水分传感器的原始测量信号值与对应土壤体积含水量值, 通过 MATLAB 软件计算, 拟合出率定公式。



图3 浸泡原状土柱

Fig.3 Soak undisturbed soil columns

2.2.2 称重率定实验方法

(1) 饱和称重及测量信号: 将泡至饱和的土柱从盆中取出, 放置在栈板上。

(2) 清理干净 PVC 套管内壁, 插入铜环式传感器, 测量传感器饱和状态下输出频率值(f_i)(见图 4), 同时记录饱和状态下的土柱重量(记为 G_1 , 初始重量)。



图4 测量信号及称重

Fig.4 Measurement signal and weighing

(3) 定期称重及测量: 将称重后的土柱放在厚度为

3cm 的干燥细沙上(粒径 1mm)自然失水。每隔 3~5d 定期监测土柱的重量(记为 G_i , 失水后的重量)和传感器输出频率(记为 f_i); 经过 30~50d 的自然失水, 将监测到的若干组传感器输出频率作为土壤率定的基础数据。

(4) 称原状土柱干土重: 取下 PVC 套管和不锈钢环刀, 将土壤取出敲碎, 烘干。分别计算每个测量时期的重量含水量、干容重、体积含水量 θ_i 。

(5) 率定关系式: 选中体积含水量 θ_i 和传感器输出频率 f_i 对应的归一化频率 SF_i (公式 1) 拟合出土壤率定公式:

$$SF_i = \frac{f_a - f_i}{f_a - f_w} \quad (1)$$

式中: SF_i 为第 i 次监测对应的归一化频率; f_a 为空气中监测传感器输出频率; f_w 为水中监测传感器输出频率; f_i 为第 i 次土壤中监测传感器输出频率。图 5 为安徽阜阳大寺站 10cm 土层原状土柱率定曲线。

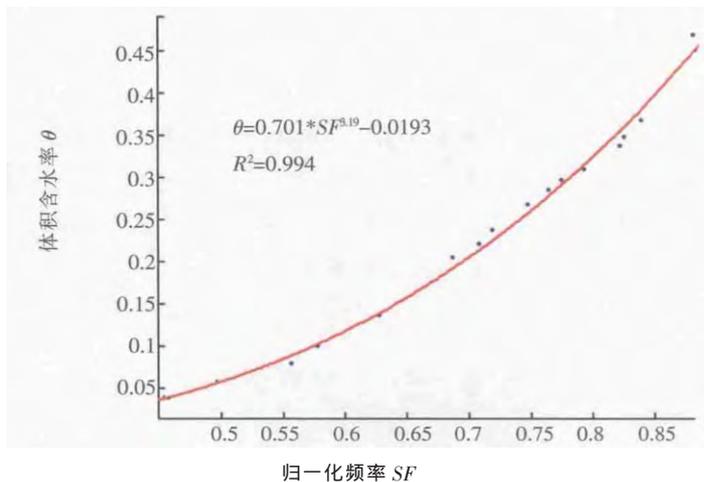


图 5 安徽阜阳大寺站 10cm 土层原状土柱率定曲线

Fig.5 10cm layer undisturbed soil column calibration curve for the Dasi station in Fuyang city of Anhui province

3 数据分析

3.1 率定数据及公式

表 1 为安徽阜阳亳州大寺站现场采集的 10cm、20cm、40cm 土层原状土柱, 在实验室测得的率定传感器公式所用数据, 测试用的传感器为南自所的 HRC-1 管式土壤水分传感器, 这组率定数据的水分值范围为: 10cm 土层: 3.8%~46.9%; 20cm 土层: 6.1%~39.2%; 40cm 土层: 7.1%~42.4%, 涵盖了土壤水分从干到饱和的全过程, 保证了率定数据的完整性。

表1 大寺站不同深度土层原状土柱率定数据

Table1 The calibrated data of the various layers soil undisturbed columns at the Dasi station

10cm 土层		20cm 土层		40cm 土层	
$\theta_i/\%$	SF_i	$\theta_i/\%$	SF_i	$\theta_i/\%$	SF_i
46.9	0.8817	39.2	0.8887	42.4	0.9135
36.7	0.8393	34.7	0.8605	38.2	0.8958
34.8	0.8252	33.8	0.8570	37.3	0.8958
33.7	0.8216	33.0	0.8464	36.4	0.8852
31.0	0.7934	30.9	0.8216	34.1	0.8534
29.7	0.7757	29.7	0.8040	32.9	0.8499
28.5	0.7651	28.7	0.8040	31.9	0.8464
26.7	0.7475	27.1	0.7934	30.3	0.8322
23.7	0.7192	24.2	0.7899	27.6	0.8358
22.0	0.7086	22.8	0.7757	26.3	0.8181
20.4	0.6875	21.3	0.7581	24.8	0.8005
13.6	0.6274	15.3	0.7157	18.5	0.7651
9.9	0.5780	11.9	0.6733	13.8	0.7157
7.9	0.5568	9.9	0.6486	11.3	0.6945
5.7	0.4968	7.7	0.5992	8.8	0.6310
3.8	0.4579	6.1	0.5709	7.1	0.6098
3.8	0.4544	6.1	0.5709	7.1	0.6062

对表 1 中的数据采用 MATLAB 软件, 进行计算, 拟合出率定公式, 参见表 2, 10cm、20cm、40cm 土层拟合公式的相关性系数均 >98%, 说明率定公式的相关性很好。

表2 大寺站10cm、20cm、40cm土层原状土柱率定公式
Table1 The calibration formula for 10cm, 20cm, 40cm layers undisturbed soil columns at the Dasi station

土层	率定关系式: $\theta = a \cdot x^b + c$			R^2
	a	b	c	
10cm	0.7011	3.191	-0.01932	0.9939
20cm	0.6602	3.604	-0.03005	0.9887
40cm	0.6363	4.043	-0.01724	0.9886

3.2 野外比测数据

表 3 为大寺站野外现场比测数据, 安徽阜阳大寺站的土壤类型为潮土, 监测站安装的传感器为南自所的 HRC-1 型管式土壤水分传感器, 现场取土烘干工作由阜阳水文站的技术员承担, 数据比测时间从 2013 年 1 月 1 日~7 月 26 日, 取土间隔时间为 5~10d, 取土层为 10cm 土层。表 3 中第 1 列“频率”为传感器实测频率值的归一化频率计算值(参见公式 1), 第 2 列“烘干法”为人工取土烘干的体积含水率值, 也是机测数据的比对基准值, 第 3 列“原状土柱法含水率”为传感器

采用原状土柱法率定公式测得的体积含水率值,第4列“原状土柱法误差”为第3列与第2列的差值,第5列“现场率定法含水率”为传感器采用现场法率定公式(由表3中前10组频率值和人工烘干值作为率定数据,拟合出的率定公式)测得的体积含水率值,第6列“现场率定法误差”为第5列与第2列的差值。

表3中的比测数据共42组,时间跨度涵盖冬、春、夏三季,10cm土层的水分变化范围为16.9%~32.8%,原状土柱法率定公式的测量误差,绝对误差在±4%范围内的数据占比为83.3%,现场率定法率定公式的测量误差,绝对误差在±4%范围内的数据占比为50%。《土壤水分监测仪器通用技术条件》(试行)中规定:准确性评估,与烘干法相比,绝对误差在±4%范围内的数据测次/人工监测的测次×100%,其值应不小于80%^[4]。

3.3 对比分析

现场率定方法中率定用的数据选择从2013年1月1日~2月21日期间的数据,总共10组数据,时间跨度近50d,取土间隔为5~10d,这期间人工取土烘干值的水分变化范围为22.1%~29.4%(体积含水率)。比测用数据选择2013年1月1日~7月26日,这期间人工取土烘干值的水分变化范围为16.9%~32.8%,从表3中数据可以看出,绝对误差在±4%范围内的数据占比为50%<80%,不满足《土壤水分监测仪器通用技术条件》(试行)中准确性评估条件,这个结果说明:在具体的工程操作中,由于工期等因素的考虑,率定数据所取得的水分区间的代表性存在局限性,这必然会影响到率定公式测试数据的准确性。

原状土柱率定方法中率定用的数据水分变化范围为3.8%~46.9%(体积含水率),比测用数据选择2013年1月1日~7月26日,这期间人工取土烘干值的水分变化范围16.9%~32.8%,表3中数据可以看出,绝对误差在±4%范围内的数据占比为83.3%>80%,满足《土壤水分监测仪器通用技术条件》(试行)中准确性评估条件,这个结果说明:在现场采集原状土柱,运回实验室开展的土壤水分传感器原状土柱率定法是可行的,它保证了率定公式所选用的水分数据从低到高的完整覆盖,这是现场率定方法无法比拟的。

4 两种方法对比

(1)现场率定法:主要步骤包括土壤干容重测定、人工取样、计算含水量、率定公式等,它的困难点主要

表3 大寺站野外比测数据
Table3 The comparative test data at the Dasi station

频率 SF	烘干法	原状土柱法		现场率定法	
	含水率/%	含水率/%	误差/%	含水率/%	误差/%
0.72193	24.6	22.9	-1.8	26.3	1.7
0.65298	27.9	16.1	-11.8	23.4	-4.5
0.70688	22.1	21.2	-0.9	25.6	3.5
0.71605	22.3	22.2	0.0	26.0	3.8
0.70372	23.9	20.9	-3.0	25.5	1.6
0.78579	29.4	30.6	1.2	29.0	-0.4
0.79368	29.4	31.6	2.2	29.4	0.0
0.73067	29.1	23.8	-5.3	26.6	-2.5
0.72200	23.6	22.9	-0.8	26.3	2.7
0.70874	24.3	21.4	-2.8	25.7	1.5
0.70544	23.5	21.1	-2.4	25.6	2.1
0.75201	23.9	26.3	2.4	27.6	3.7
0.74612	22.6	25.6	3.0	27.3	4.7
0.73099	22.8	23.9	1.1	26.7	3.9
0.74644	22.3	25.6	3.4	27.3	5.1
0.74035	22.5	24.9	2.4	27.1	4.6
0.72860	21.8	23.6	1.8	26.6	4.8
0.72494	21.3	23.2	1.9	26.4	5.2
0.70892	18.9	21.5	2.6	25.7	6.8
0.69039	21.3	19.6	-1.7	24.9	3.7
0.69598	21.1	20.1	-1.0	25.2	4.1
0.69125	20.4	19.6	-0.7	25.0	4.6
0.72731	22.5	23.4	0.9	26.5	4.0
0.72559	22.3	23.3	1.0	26.4	4.2
0.78228	29.5	30.1	0.6	28.9	-0.6
0.73741	21.6	24.6	3.0	26.9	5.3
0.80636	29.4	33.3	4.0	29.9	0.5
0.74910	23.4	26.0	2.6	27.4	4.1
0.77590	24.1	29.3	5.1	28.6	4.5
0.85066	32.8	39.9	7.2	31.8	-0.9
0.84256	31.6	38.7	7.0	31.5	-0.1
0.78615	29.8	30.6	0.9	29.0	-0.7
0.75160	23.0	26.3	3.3	27.5	4.5
0.72293	20.3	23.0	2.7	26.3	6.1
0.69104	17.8	19.6	1.9	25.0	7.2
0.70709	19.6	21.3	1.6	25.6	6.0
0.69061	18.3	19.6	1.3	24.9	6.7
0.73404	21.9	24.2	2.3	26.8	4.9
0.69613	16.9	20.1	3.3	25.2	8.3
0.67957	17.9	18.5	0.6	24.5	6.6
0.84141	31.5	38.5	7.0	31.4	-0.1
0.78751	26.5	30.8	4.3	29.1	2.6

集中在现场取土样,每次取土样的质量保证和多次现场取土样的要求,对于工程人员都是个不小的挑战,另外现场取土还受工程项目进度要求,取土期间取样点的土壤水分变化幅度也影响率定公式的适用性,因现场取样的土壤水分变化范围幅度存在比较大的差异。概括而言,现场率定方法在具体的工程操作中,因站点位置的不同会导致较大差异,而对于有些站点,由于位置较远,每次的取土工作都变得非常困难,现场操作是巨大的困难点。

(2) 原状土柱率定法:主要步骤包括采集原状土柱、浸泡土柱、称重及信号测量、率定公式等,该方法的现场操作主要是原状土柱采集,而原状土柱采集的关键是取土装置,我们研制的原状土柱取土装置从工程上解决了现场取土问题。其它操作如浸泡土柱、称重及信号测量等主要在实验室完成,操作步骤规范,从根本上解决了操作中差异性大的问题。这种方法在日常工作中仅是称重和信号测量,因此可同时开展多个监测点的土样率定工作,大大提高工程项目的率定工作效率。

5 结语

(1) 在具体工程实践中,土壤水分传感器现场率定方法是一项步骤繁杂、操作要求高、现场取土难度大、耗时较长的一项工作,而且由于率定公式所选用的水分数据覆盖代表性存在局限性,导致合格数据的占比存在偏差,严重时可能会影响到对监测站点数据合格性的判定,因此,开展原状土柱率定方法研究,改善工程率定方法的可操作性,优化数据代表性非常具有现实意义。

(2) 本文研究的原状土柱率定方法在安徽阜阳大寺试验站开展的试验研究表明,通过现场采集原状土柱以及后续在实验室开展的浸泡土柱、称重及测量信号等一系列工作得出的率定公式,在从2013年1月1日~7月26日历时半年多的比测中,绝对误差在 $\pm 4\%$

范围内的数据占比为 $83.3\% > 80\%$,满足土壤水分监测仪器通用技术条件中(试行)野外比测数据合格性要求^[4]。原状土柱率定方法与现场率定方法相比,率定公式所选用的水分数据包括低水分到饱和水分的完整覆盖性,从方法论的角度来看,率定公式用水分数据的代表性优于现场率定方法。

(3) 原状土柱取土装置保证了工程上现场取土稳定性问题,在取土过程中减少对原状土的扰动,在运输过程中保护原状土柱不被破坏。从根本上解决了操作中差异性大的问题。日常实验室工作仅是称重和信号测量,可同时开展多个监测点的土壤率定工作,因此原状土柱率定方法具有很好的工程操作性。

(4) 后续开展的研究:南自所与重庆水文局在重庆周边选取15个墒情站点,每个站点采集10cm、20cm、40cm三个土层的原状土柱,土壤类型涵盖紫色土、水稻土、黄壤、石灰岩土、黄棕壤等重庆地区7种主要土壤类型,已完成全部取样的实验室率定公式计算,在学坝、工农、三元等三个站点安装了南自所的HRC-1型管式传感器,准备开展野外比测试验,继续完善原状土柱率定方法研究。

参考文献:

- [1] SL364-2006, 土壤墒情监测规范 [S]. (SL364-2006, Soil Moisture Monitoring Standards [S]. (in Chinese))
- [2] 王光生, 杨建青, 邓英春. 关于土壤墒情自动监测精度的探讨[J]. 水文, 2013, (5). (WANG Guangsheng, YANG Jianqing, DENG Yingchun. A tentative discussion on precision of automatic soil moisture monitoring[J]. Journal of China Hydrology, 2013, (5). (in Chinese))
- [3] NFCS2-ICS-ST-05, 土壤墒情监测仪器现场率定方法[S]. (NFCS2-ICS-ST-05, Soil Moisture Monitoring Equipment On-site Calibration Method[S]. (in Chinese))
- [4] 国家防办, 水利部水文局. 土壤水分监测仪器通用技术条件(试行)[Z]. 2012. (Office of State Flood Control and Drought Relief Headquarters, Bureau of Hydrology, MWR. General Technical Condition for Soil Moisture Monitoring Instruments (Trial) [Z]. 2012. (in Chinese))

Soil Moisture Sensor Calibration Method Based on Undisturbed Soil Column

ZHI Yongming^{1,3}, HAN Jiwei^{1,3}, DENG Chao², ZHANG Songming⁴, DENG Bin⁵, HE Shengrong²,
LIU Manhong², SHI Luyang¹

(1. Nanjing Automation Institute of Water Conservancy & Hydrology, MWR, Nanjing 210012, China;

2. Quality Supervision and Testing Center of Hydrological Instruments & Geotechnical Instrumentation, MWR, Nanjing 210012, China;

3. Hydrology and Water Resources Engineering Research Center for Monitoring, MWR, Nanjing 210012, China;

4. Fuyang Hydrology and Water Resources Bureau of Anhui Province, Fuyang 236000, China;

5. Chongqing Bureau of Hydrology and Water Resources Survey, Chongqing 401147, China)

(下转第7页)

- and methodology [J]. *Journal of Hydrology*, 2005,301(1-4):75-92.
- [7] Sharma A. Seasonal to interannual rainfall probabilistic forecasts for improved water supply management: part 1—a strategy for system predictor identification[J]. *Journal of Hydrology*, 2000,239:232-239.
- [8] Bowden GJ, Dandy GC, Maier HR. Input determination for neural network models in water resources applications. part 1—background and methodology[J]. *Journal of Hydrology*, 2005a,301:75-92.
- [9] Bowden GJ, Maier HR, Dandy GC. Input determination for neural network models in water resources applications. part 2—case study: forecasting salinity in a river [J]. *Journal of Hydrology*, 2005b,301(1-4):93-107.
- [10] Burnham KP, Anderson DR. *Model Selection and Multimodel Inference: A Practical Information-Theoretic Approach*, seconded[M]. New York: Springer, 2002.

Application of A New Coupled Data-driven Model in Rainfall-Runoff Simulation

LIANG Ke¹, KAN Guangyuan^{2,3}, LI Zhijia¹

(1. *College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 2. *State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, Research Center on Flood & Drought Disaster Reduction of the Ministry of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China*; 3. *State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100038, China*)

Abstract: For the purpose of overcoming the disadvantages of the traditional data-driven model and implementing the high accuracy rainfall-runoff simulation by data-driven model, a new coupled data-driven model named PEK has been proposed in this paper. The PEK model was developed by coupling partial mutual information based on the input variable selection, novel ensemble back-propagation neural network based on discharge forecasting and K-nearest neighbor based on discharge error forecasting. The PEK model has the following characteristics: (1) The separate IVS strategy and the sliding window accumulative rainfall based on model candidate input vector. These two methods combined with the PMI-based IVS approach ensure the sufficiency and parsimony of the input information and is very important to the construction of the high quality data-driven model; (2) The novel ensemble back-propagation neural network and the methodology of calibration were proposed in this paper. The global optimal number of component networks, topology and network parameters were obtained simultaneously by using the NSGA-II multi-objective optimization algorithm and the early stopping LM algorithm. The combination weights of the component networks were obtained by the AIC-based component network weights assignment approach. The EBPNN model can make a good compromise between simulation accuracy and network complexity; (3) The PEK model implemented multi-step forecasting and high accuracy simulation under the non-updating mode. The forecast period was also increased; (4) The PEK model doesn't need to compute the catchment state variables and implements continuous simulation only by using the initial discharge. In this paper, the PEK and CLS models were applied in hourly rainfall-runoff simulation in the Chengcun watershed and the results were compared. The simulation results indicate that the PEK model is easy to use, is better than CLS in simulation accuracy, can realize multi-step high accuracy simulation and increase the forecasting period of the data-driven model.

Key words: rainfall-runoff simulation; non-updating; data-driven model; PEK model; optimization method

(上接第 52 页)

Abstract: After the soil moisture sensor being installed, it is necessary to make calibration on the soil conditions in the field for verifying the rating relation. In practice, field calibration of soil moisture sensor is a complicated step, during which high quality operation is needed, on-site taking soil is difficult, and it involves working long hours. In this study, the undisturbed soil columns were collected in field to send to laboratory, the soil was taken out after saturation, let a natural loss of soil moisture, then regularly weighting was made while the original values from the soil moisture sensor were recorded, so as to study the calibration of the soil moisture sensor, and discuss the ways of improving efficiency of installing soil moisture sensors.

Key words: undisturbed soil column; soil moisture sensor; calibration method