

线区域尺度土壤水分实时测量方法研究*

赵燕东 董晓晨 李 宁

(北京林业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 提出了一种线区域尺度的土壤水分测量方法, 设计了基于频域振荡法实时检测植物根区尺度土壤水分信息的传感系统。系统由土壤水分传感器、PVC 套管、电动机牵引系统以及控制器组成, 控制器控制电动机牵引传感器在套管中往复运动, 可以实时获取 240 cm 长度上的土壤体积含水率信息。土壤水分传感器的动态响应时间为 32 ms, 稳定性测试结果的标准差为 0.006 1 V, 与时域反射 (TDR) 土壤水分传感器测量结果的相关性决定系数达到 0.989, 满足区域性土壤水分实时检测的要求。野外试验证明: 当传感系统埋设深度为 30 cm 时, 与相距 10 cm 平行埋设的 BD-III 型土壤水分传感器 (精度为 $\pm 2\%$) 测量结果的均方误差小于 0.5%, 能够测量到因降水导致的土壤水分变化, 验证了系统的有效性。

关键词: 土壤水分 线区域尺度 测量 频域振荡法

中图分类号: S237 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)06-0168-07

Real-time Soil Moisture Measurement Method on Line Scale

Zhao Yandong Dong Xiaochen Li Ning

(School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: A real-time soil moisture measurement method on line scale was proposed and a real-time detection of plant root zone soil moisture information sensing system based on frequency domain oscillometry was designed. The system consisted of soil moisture sensor, PVC casing, electric traction system and controller. The sensor was reciprocated in the casing which was dragged by motors, and it can obtain 240 cm real-time soil volumetric water content information. The dynamic response time of sensor was 32 ms, standard deviation of stability test was 0.006 1 V, determination coefficient between measured results and TDR was 0.989, and the requirement of the soil moisture measurement was satisfied. The results of field tests showed that the mean squared error compared with that of BD-III soil moisture sensors based on SWR (accuracy of $\pm 2\%$) which were buried 10 cm apart and paralleled to the sensing system was less than 0.5% when the sensing system was buried under the ground of 30 cm. The measured data can reflect the volumetric water content of plant root zone under different rainfall conditions and verify the effectiveness of the system.

Key words: Soil moisture Line scale Measuring Frequency domain oscillometry

引言

水是植物赖以生长的一个重要因素, 在水资源严重短缺的情况下, 实时检测植物根区水分状况, 不仅对评价植物健康水平有着重要意义, 而且能为指导精准节水灌溉提供基础数据。

目前, 土壤水分的测量方法有几十种, 按照其测量范围可以分为点测量和面测量。传统的取样测量方法及近年来得到普遍认可的介电法以点测量为主。点测量具有准确度高、能实现长期定位连续监测和实时在线测量等优点^[1], 但是受限于点测量的测量范围 (一般为厘米级土体) 以及土壤水分的空

间变异性^[2-3],要实现区域尺度的土壤水分监测无疑会增加成本并且难以反映真实的区域土壤水分信息^[4]。面测量能解决大尺度土壤水分的监测问题,遥感法作为面测量方法中的代表能够迅速获得大面积、多时相的土壤水分信息^[5-6],但是无法直接监测植物根区深层土壤水分,而且需要建立相关模型进行分析演算,建立的模型通常不具有普适性,区域尺度上的数据精确度也无法达到点测量的水平^[7]。前人尝试性的将点测量^[8-9]和面测量^[10-11]方法应用于植物根区土壤水分的监测,但未取得良好效果^[12]。

针对上述情况,考虑到植物一般按照“垄”成行种植,寻找一种能够实时获取线区域尺度土壤水分检测方法成为当务之急。本文研究一种介于点测量和面测量之间的土壤水分线测量方法,设计基于频域振荡法的区域土壤水分实时检测系统,以期能够监测植物根区尺度上的土壤水分信息。

1 测量原理与系统结构

1.1 测量原理

区域土壤水分实时检测系统的测量原理是基于频域振荡法的一种快速检测土壤含水率方法,是土壤介电特性测量方法的一种,利用 LC 振荡电路在不同含水率土壤中的频率变化来测量土壤体积含水率^[13-16]。

LC 振荡电路的频率 f 计算式为

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_p}} \quad (1)$$

式中 L ——振荡电路的电感,为固定值

C_p ——与传感器探头和土壤有关的电容
电容器的电容与其介质的介电常数有关,即

$$C_p = k\varepsilon \quad (2)$$

式中 ε ——土壤的介电常数

k ——与电容的电极面积、电极间距等有关的常数

Topp 方程表征了土壤介电常数 ε 与土壤体积含水率 θ 之间的多项式关系^[17],即

$$\theta = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} \varepsilon - 5.5 \times 10^{-4} \varepsilon^2 + 4.3 \times 10^{-6} \varepsilon^3 \quad (3)$$

在式(3)的基础上,前人研究证实,土壤介电常数 ε 与土壤体积含水率 θ 之间具有线性关系^[18-19]

$$\theta = a\sqrt{\varepsilon} + b \quad (4)$$

式中 a 、 b ——与土壤类型有关的常数

土壤主要由土、水和空气组成,其中,土的介电常数大约为 4,空气的介电常数为 1,而纯水的介电常数为 80,是影响土壤体积含水率的主要因素^[20]。

根据式(1)、(2)、(4)可知,测量得到 LC 振荡电路的频率即可间接得到土壤体积含水率。土壤水分传感器的测量原理框图如图 1 所示,LC 振荡电路输出的频率经过频率/电压转换电路转换为电压作为传感器的信号输出。

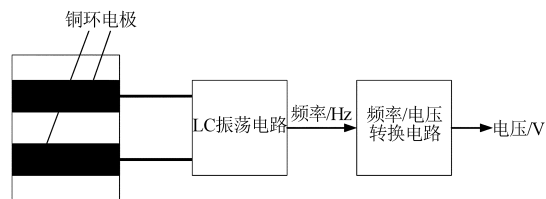


图 1 传感器测量原理框图

Fig. 1 Block diagram of soil moisture sensor

1.2 测量系统结构

区域土壤水分实时检测系统由土壤水分传感器、支架、电动机牵引系统以及控制器组成,如图 2 所示。

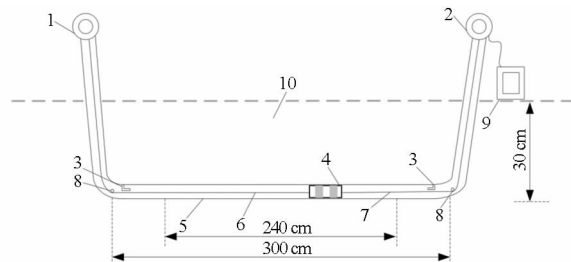


图 2 区域土壤水分实时检测系统结构示意图

Fig. 2 Line scale soil moisture sensing system structure schematic

1. 直流电动机牵引系统
2. 步进电动机牵引系统
3. 红外位置传感器
4. 土壤水分传感器
5. PVC 管
6. 牵引线
7. 电缆
8. 导向轮
9. 控制器
10. 土壤

(1) 土壤水分传感器

土壤水分传感器为双环电极结构,其实物如图 3 所示。2 个铜环电极形状大小完全一致,外径 44 mm、内径 42.5 mm、宽度 28 mm,电极间距 15 mm。传感器外壳材质是尼龙,长 96 mm、外径 44.5 mm,主体略粗于电极部分 0.5 mm,以防止传感器滑动过程中电极的磨损。传感器内固定有测量电路,并与铜环电极相连,电缆通过一端的防水端子引出,另一端连接有电动机牵引线,整体密封后构成完整的土壤水分传感器结构。土壤水分传感器与 PVC 套管之间的间隙在 0.4 ~ 0.6 mm 范围之内,保证其既可以在套管内自由滑动,又能准确测量套管周围土壤体积含水率。

(2) 支架结构

支架结构是呈“U”型的 PVC 套管,装有土壤水分传感器的横向 PVC 套管长 300 cm,使用时埋设在地下,两端通过弯头将套管伸向地面以上,弯头部分的圆柱形导向轮用来改变牵引线的运动方向,防止

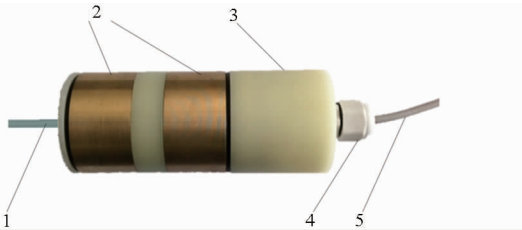


图3 土壤水分传感器实物图

Fig.3 Soil moisture sensor

1. 牵引线 2. 铜环电极 3. 外壳 4. 防水端子 5. 电缆

其与管壁摩擦。地面以上的套管用来安装直流电动机以及步进电动机的牵引系统。

(3) 电动机牵引系统

考虑到系统应用于露天环境,选择耐腐蚀、直径 0.5 mm、最大承受拉力 475.3 N 的 PE 材质钓鱼线作为土壤水分传感器牵引线,与连接在直流电动机轴上的绕线轮构成直流电动机牵引系统,如图 4a、4b 所示。步进电动机的牵引线是传感器的电缆,另一端连接至控制器,导线轮连接在步进电动机的轴上,上端的压线轮通过弹簧将电缆紧压在导线轮的凹槽上,凹槽两侧有橡胶圈,通过压线轮挤压橡胶圈产生与电缆的摩擦力来牵引传感器,它们共同构成步进电动机牵引系统,如图 4c、4d 所示。电动机牵引系统牵引土壤水分传感器在系统的横向 PVC 套管内进行往复运动,通过套管两端的红外位置传感器进行限位保护,运动距离是 240 cm。

(4) 控制器

控制器采用自制的 STM32F103ZET6 型单片机,主要用于控制电动机牵引系统、采集并存储土壤体积含水率、与 PC 和网站通信进行系统配置和工作状态显示。

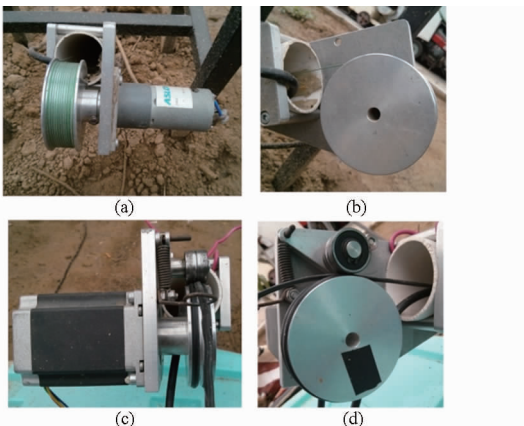


图4 线测量土壤水分传感系统两端电动机结构

Fig.4 Motor structure at both ends of system

(a) 直流电动机正视图 (b) 直流电动机侧视图

(c) 步进电动机正视图 (d) 步进电动机侧视图

2 传感器性能测试与结果分析

2.1 传感器标定试验

从北京林业大学试验苗圃 (116° 21' 14" E, 40° 00' 54" N) 中取土壤样本,并在自然条件下风干,过 40 目(孔径 0.4 mm)筛,分别均匀装入高 30 cm、直径 46 cm、中心固定有高 28 cm、直径 4.5 cm 的 PVC 管(可与自制土壤水分传感器紧密接触)的 6 个圆柱型容器中。给 6 个土壤样本加入不同体积的水分,密封静置 48 h,使土壤中的水分运移均衡,使用德国 IMKO 公司的 TRIME-HD2 型 TDR 土壤水分传感器(测量范围 0~100% 体积含水率,精度 $\pm 1%$ (0~40%)、 $\pm 2%$ (40%~70%)) 测量各个样本的体积含水率,分别为 6.7%、11.9%、20.1%、27.8%、36.7%、41.6%。将自制的土壤水分传感器置于 PVC 管中,连续测量 20 次电压后取平均值,使用最小二乘法与土壤样本的体积含水率进行拟合,得到结果如图 5 所示。

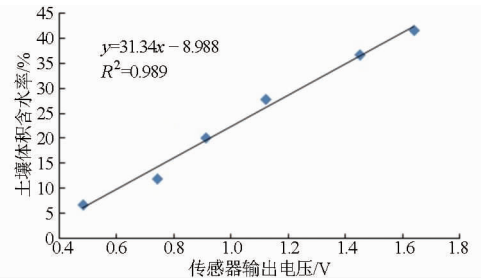


图5 传感器标定曲线

Fig.5 Sensor calibration curve

从图 5 中可以得到拟合曲线为 $y = 31.34x - 8.988$,拟合曲线的决定系数 R^2 大于 0.98,说明土壤水分传感器输出电压与土壤体积含水率有显著的线性关系。

2.2 传感器动态响应性能试验

土壤水分传感器的动态响应性能是指当土壤水分发生变化时,传感器的输出随之变化的快慢程度。在标定试验的基础上,将土壤样本替换为纯水,使用示波器捕获从传感器通电到传感器稳定输出的曲线,如图 6 所示,其中 CurA 和 CurB 分别是 2 个垂直光标测量的对应波形的时间值, ΔX 是 2 个光标间的时间差值, $1/\Delta X$ 是 2 个光标间的时间差值的倒数,说明传感器的输出从 0 跳变到 100% 土壤体积含水率需要用时 32 ms,即为土壤水分传感器的动态响应时间。

区域土壤水分实时检测系统的土壤水分传感器运动速度为 6.25 cm/s,运动 1 cm 需要用时 160 ms,大于土壤水分传感器的动态响应时间 32 ms,说明土壤水分传感器在运动过程中能够以 1 cm 为间隔获

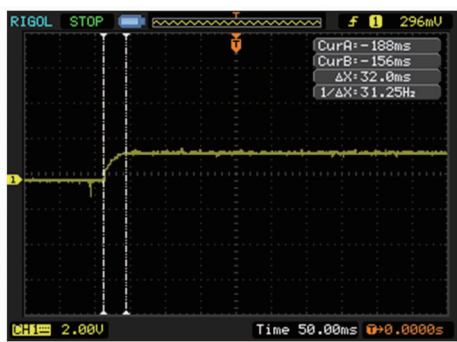


图6 传感器动态响应

Fig. 6 Dynamic response of soil moisture sensor

取土壤水分信息。

2.3 稳定性试验

将区域土壤水分实时检测系统置于饱和土壤中,土壤体积含水率为53.1%,每60 min运行一次,运行期间传感器以1 cm为间隔采集系统横向240 cm长度上共241个数据,从2014年04月28日—2014年04月30日连续运行50 h,共采集到50组数据,从每组数据中随机选取1个数据,作为稳定性试验的结果,如图7所示。

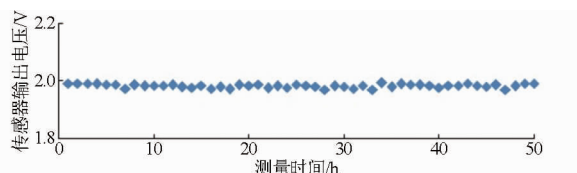


图7 稳定性试验结果

Fig. 7 Result of stability test

这50个数据的标准差为0.006 1 V,说明它们之间的差距很小,区域土壤水分实时检测系统具有较好的稳定性。

2.4 定位精度试验

由于传感器要在运动过程中采集数据,所以其定位精度很重要。规定数据采集的起点为直流电动机端,终点为步进电动机端,数据采集的位置设置为从0 cm到240 cm,下文同。在稳定性试验基础上,将区域土壤水分实时检测系统的横向PVC管50、125、200 cm处分别包裹宽15 cm、厚5 cm吸满水的海绵,传感器输出的电压如图8所示。

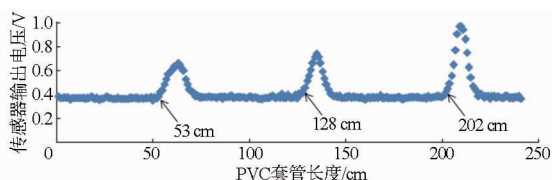


图8 定位精度试验结果

Fig. 8 Result of positioning accuracy test

从图8中可以观察到有3个尖峰,分别对应3块海绵,箭头标注位置为传感器测量得到的海绵位

置,与实际位置相比最大定位误差为3 cm。分析得到产生误差的原因是步进电动机在启动和停止阶段的加减速曲线过陡,导致少量失步和过冲。解决办法是调整控制器程序的加减速曲线,同时通过红外位置传感器设置系统每次运行时定位的零点来消除系统长时间运行产生的累积误差,并通过程序补偿最终消除该误差。

3 野外试验与结果分析

试验场地是北京林业大学试验苗圃,土壤为北京地区常见的粘壤土。区域土壤水分实时检测系统埋设深度为30 cm,每60 min运行一次,运行期间土壤水分传感器以1 cm为间隔采集系统横向PVC套管0~240 cm位置上共241个数据。同时架设一台Vantage Pro 2型无线自动气象站与6个BD-III型土壤水分传感器,前者是美国DAVIS公司的产品,用于采集试验环境的气象参数,采集间隔为30 min,主要包括环境温度、湿度、降水量等,其中降水量的分辨率为0.2 mm,精度为 $\pm 3\%$;后者是北京林业大学自主研发的基于SWR原理的土壤水分传感器^[21-23],测量范围为0~100%体积含水率,精度为 $\pm 2\%$,已通过国家分析仪器质量监督检验中心检验,与区域土壤水分实时检测系统相距10 cm平行埋设,每个BD-III型传感器之间间隔30 cm,每60 min采集一次数据,作为试验数据的参照。

3.1 无降水期间土壤水分变化情况

选取区域土壤水分实时检测系统与BD-III型土壤水分传感器在2014年6月4日14:00、2014年6月5日14:00和2014年6月6日14:00 3个时刻的数据,分别绘制曲线如图9所示。

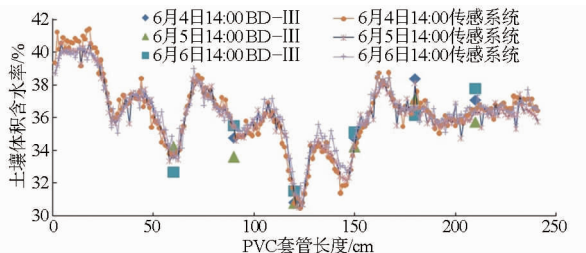


图9 无降水期间土壤水分变化情况

Fig. 9 Soil moisture from system and BD-III during no shower days

从图9中可以看出,地表下30 cm处的土壤水分在没有降水的48 h内基本保持稳定。进一步使用SPSS统计分析软件对这3组数据进行单因素方差分析,结果如表1所示。从表1可以看出,组间平方和是8.193,组内平方和是2764.489,组间平方和的 F 值是1.067,显著性是0.345,大于显著水平0.05,因此可以认为3组数据之间没有显著差异。

表1 无降水期间土壤水分的单因素方差分析结果

Tab.1 Analysis results of soil moisture with one-way ANOVA

| 项目 | 平方和 | 自由度 | 均方 | F | 显著性 |
|---------|----------|-----|-------|-------|-------|
| 组间 (组合) | 8.193 | 2 | 4.097 | 1.067 | 0.345 |
| 线性项 对比 | 2.058 | 1 | 2.058 | 0.536 | 0.464 |
| 偏差 | 6.135 | 1 | 6.135 | 1.598 | 0.207 |
| 组内 | 2764.489 | 720 | 3.840 | | |
| 总数 | 2772.682 | 722 | | | |

取2014年6月4日14:00与2014年6月6日14:00 2个时刻数据差值的绝对值代表48 h内土壤体积含水率的变化情况,使用SPSS统计分析软件将其绘制成直方图,如图10所示。

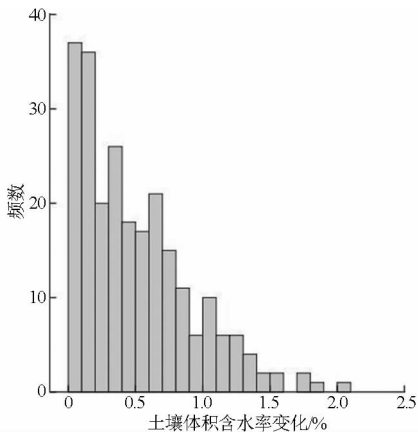


图10 土壤体积含水率变化直方图

Fig.10 Histogram of soil moisture changes

从图10可以看出,区域土壤水分实时检测系统测量得到的绝大部分位置上的土壤体积含水率的变化都小于1.5%,最大变化不超过2.1%,这是由于土壤水分在空间分布上具有相对稳定性^[24-26]。

将BD-III型土壤水分传感器与区域土壤水分实时检测系统对应位置上测量得到的土壤体积含水率进行对比,如表2所示。

从表2可以看出,区域土壤水分实时检测系统与BD-III型土壤水分传感器测量得到的土壤体积含水率的均方误差小于0.5%,说明系统能够检测植物根区真实的土壤体积含水率,测量精度可与点测量相媲美。

3.2 降雨前后土壤水分变化情况

从区域土壤水分实时检测系统在2014年6月6日10:00至2014年6月8日08:00期间的数据中随机选取横向PVC套管上5个位置的数据以及相应时刻全部数据的平均值来绘制土壤水分相对于时间的变化曲线,如图11所示。本试验主要探讨降水对地表下30 cm处土壤水分变化的影响,降水的时间是2014年6月6日11:00至17:00,总降水量为16.4 mm。

表2 区域土壤水分实时检测系统与BD-III型传感器测量的土壤体积含水率(2014年)

Tab.2 Soil volumetric water content from line scale soil moisture sensing system and BD-III

| 时间 | 数据点位置/cm | BD-III /% | 传感系统/% | 均方误差/% |
|------------|----------|-----------|--------|--------|
| 6月4日 14:00 | 60 | 33.81 | 33.72 | 0.18 |
| | 90 | 34.78 | 34.79 | |
| | 120 | 30.84 | 31.19 | |
| | 150 | 34.80 | 34.47 | |
| | 180 | 38.38 | 37.59 | |
| 6月5日 14:00 | 60 | 34.24 | 33.55 | 0.45 |
| | 90 | 33.60 | 34.57 | |
| | 120 | 30.80 | 30.61 | |
| | 150 | 34.23 | 35.03 | |
| | 180 | 37.15 | 36.60 | |
| 6月6日 14:00 | 60 | 32.66 | 33.51 | 0.21 |
| | 90 | 35.51 | 35.37 | |
| | 120 | 31.51 | 31.33 | |
| | 150 | 35.10 | 35.34 | |
| | 180 | 36.15 | 36.67 | |
| | 210 | 37.76 | 37.35 | |

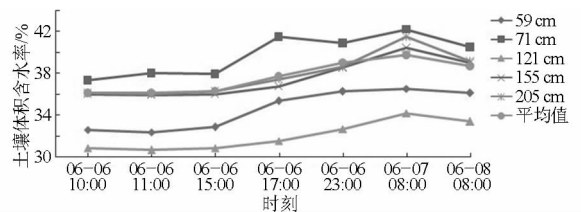


图11 降水期间土壤水分变化情况(2014年)

Fig.11 Soil moisture during shower days

图11中,59、71、121、155、205 cm是随机选取的5个位置,可以看出,由于土壤水分的滞后性^[27-29],在降水后约4 h区域土壤水分实时检测系统才能检测到入渗至地表下30 cm处的水分,随着时间推移该区域的土壤水分会持续增加直到2014年6月7日08:00达到峰值42%左右,在2014年6月8日08:00土壤水分开始有减少的趋势。这说明区域土壤水分实时检测系统能够测量到因降水导致的土壤水分变化,验证了系统的有效性。

4 结论

(1) 提出了一种适合线区域尺度的土壤水分快速获取方法,并设计了基于频域振荡法的区域土壤水分实时检测系统,系统由土壤水分传感器、PVC套管、电动机牵引系统和控制器组成,控制器控制电动机牵引传感器在套管中往复运动。通过传感器标定试验得到的拟合方程将传感器输出电压转化为土

壤体积分水率,获取运动过程中连续的土壤水分信息,为实时监测植物根区土壤水分奠定了基础。

(2) 设计了传感器性能检测试验,验证了自制土壤水分传感器的动态响应性能(动态响应时间为32 ms)、稳定性(测试结果的标准差为0.0061 V)以及系统定位精度(定位误差可以通过程序消除),满足区域性土壤水分实时检测的要求。

(3) 进行了传感器测量结果的对比试验,与通

过国家分析仪器质量监督检验中心检验的北京林业大学自制BD-Ⅲ型土壤水分传感器测量结果的均方误差小于0.5%,说明区域土壤水分实时检测系统达到了点测量传感器的测量精度。

(4) 设计了系统野外检测试验,检测地表下30 cm处、240 cm长度上的土壤体积分水率,测试期间有降水发生,结果表明系统能够测量到因降水导致的土壤水分变化,验证了系统的有效性。

参 考 文 献

- Schmugge T J, Jackson T J, McKim H L. Survey of methods for soil moisture determination[J]. *Water Resources Research*, 1980, 16(6): 961-979.
- 吴涛,张荣标,冯友兵. 土壤水分含量测定方法研究[J]. *农机化研究*, 2007(12): 213-217.
Wu Tao, Zhang Rongbiao, Feng Youbing. Research in measuring method of soil water content[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2007(12): 213-217. (in Chinese)
- 郁进元,何岩,赵忠福,等. 农田土壤水分各种测量方法的比较与分析[J]. *浙江水利科技*, 2007(6): 1-2.
Yu Jinyuan, He Yan, Zhao Zhongfu, et al. Comparison and analysis of measuring methods for soil moisture of farmland[J]. *Zhejiang Hydraulics*, 2007(6): 1-2. (in Chinese)
- 张艳玲,欧阳竹,郭建青,等. 作物根层土壤水分动态监测最佳测量深度研究[J]. *中国农村水利水电*, 2010(9): 102-104.
Zhang Yanling, Ouyang Zhu, Guo Jianqing, et al. Research on the best measurement depth for determining the dynamic soil moisture content of root layer soil moisture[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2010(9): 102-104. (in Chinese)
- Ahmad S, Kalra A, Stephen H. Estimating soil moisture using remote sensing data; a machine learning approach[J]. *Advances in Water Resources*, 2010, 33(1): 69-80.
- Njoku E G, Entekhabi D. Passive microwave remote sensing of soil moisture[J]. *Journal of Hydrology*, 1996, 184(1-2): 101-129.
- 杨涛,宫辉力,李小娟,等. 土壤水分遥感监测研究进展[J]. *生态学报*, 2010, 30(22): 6264-6277.
Yang Tao, Gong Huili, Li Xiaojuan, et al. Progress of soil moisture monitoring by remote sensing[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(22): 6264-6277. (in Chinese)
- Paltineanu I C, Starr J L. Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: laboratory calibration[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, 61(6): 1576-1585.
- Fernandez-Galvez J, Simmonds L P. Monitoring and modelling the three-dimensional flow of water under drip irrigation[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 83(3): 197-208.
- Jackson T J. Measuring surface soil moisture using passive microwave remote sensing[J]. *Hydrological Processes*, 1993, 7(2): 139-152.
- Kostov K G, Jackson T J. Estimating profile soil moisture from surface-layer measurements; a review[C]// *Proceedings of the SPIE 1941, Ground Sensing*, 1993: 125-136.
- Lü H, Yu Z, Horton R, et al. Multi-scale assimilation of root zone soil water predictions[J]. *Hydrological Processes*, 2011, 25(20): 3158-3172.
- Gaskin G J, Miller J D. Measurement of soil water content using a simplified impedance measuring technique[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1996, 63(2): 153-159.
- Velazquez M B, Gracia L C, Plaza G P J. Determination of dielectric properties of agricultural soil[J]. *Biosystems Engineering*, 2005, 91(1): 119-125.
- Kizito F, Campbell C S, Campbell G S, et al. Frequency, electrical conductivity and temperature analysis of a low-cost capacitance soil moisture sensor[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 352(3-4): 367-378.
- Wojciech S, Andrzej W. A FDR sensor for measuring complex soil dielectric permittivity in the 10~500 MHz frequency range[J]. *Sensors*, 2010, 10(4): 3314-3329.
- 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.
- Miller J D, Gaskin G J, Anderson H A. From drought to flood; catchment responses revealed using novel soil water probes[J]. *Hydrological Processes*, 1997, 11(5): 533-541.
- Cosenza P, Tabbagh A. Electromagnetic determination of clay water content; role of the microporosity[J]. *Applied Clay Science*, 2004, 26(1): 21-36.
- 赵燕东,王一鸣. 基于驻波率原理的土壤含水率测量方法[J]. *农业机械学报*, 2002, 33(4): 109-111.
Zhao Yandong, Wang Yiming. Study on the measurement of soil water content based on the principle of standing-wave ratio[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2002, 33(4): 109-111. (in Chinese)
- 赵燕东,王一鸣. 智能化土壤水分分布速测系统[J]. *农业机械学报*, 2005, 36(2): 76-78.
Zhao Yandong, Wang Yiming. Intelligent system of measuring the spatial distributions of soil moisture[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2005, 36(2): 76-78. (in Chinese)

- 22 赵燕东, 聂铭君. 双针结构土壤水分传感器探针最优长度分析与试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(11): 39-43.
Zhao Yandong, Nie Mingjun. Optimal analysis for determining the dual-pin length of soil moisture probe[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(11): 39-43. (in Chinese)
- 23 彭曾愉, 赵燕东. 基于 $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 操作系统的土壤水分实时监测系统[J]. 北京林业大学学报, 2010, 32(6): 114-119.
Peng Zengyu, Zhao Yandong. A monitoring system of real-time soil water content based on $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ operating system[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2010, 32(6): 114-119. (in Chinese)
- 24 王改改, 魏朝富, 吕家格, 等. 四川盆地丘陵区土壤水分空间变异及其时间稳定性分析[J]. 山地学报, 2009, 27(2): 211-216.
Wang Gaigai, Wei Chaofu, Lü Jiage, et al. Spatial variation and its temporal stability of soil water in hilly area of Sichuan basin [J]. Journal of Mountain Science, 2009, 27(2): 211-216. (in Chinese)
- 25 周启友, 岛田纯. 土壤水空间分布结构的时间稳定性[J]. 土壤学报, 2003, 40(5): 683-690.
Zhou Qiyu, Jun Shimada. Temporal stability of the spatial distribution pattern of soil water[J]. Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(5): 683-690. (in Chinese)
- 26 雷志栋, 杨秀秀, 许志荣, 等. 土壤特性空间变异性初步研究[J]. 水利学报, 1985, 9(9): 10-21.
Lei Zhidong, Yang Shixiu, Xu Zhirong, et al. Preliminary investigation of the spatial variability of soil properties[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1985, 9(9): 10-21. (in Chinese)
- 27 尹玉凤, 张妙仙, 沈海波, 等. 土壤水分特征曲线滞后性与比水密度拟合研究[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(6): 50-53.
Yin Yufeng, Zhang Miaoxian, Shen Haiibo, et al. Fitting research on hysteresis phenomenon of soil water characteristic curves and soil water capacity[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2013, 32(6): 50-53. (in Chinese)
- 28 任淑娟, 孙宇瑞, 任图生. 测量土壤水分特征曲线的复合传感器设计[J]. 农业机械学报, 2009, 40(5): 56-58.
Ren Shujuan, Sun Yurui, Ren Tusheng. Design of dual-sensor for measuring soil water characteristic curve[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(5): 56-58. (in Chinese)
- 29 刘继龙, 马孝义, 张振华. 不同土层土壤水分特征曲线的空间变异及其影响因素[J]. 农业机械学报, 2010, 41(1): 46-52.
Liu Jilong, Ma Xiaoyi, Zhang Zhenhua. Spatial variability of soil water retention curve in different soil layers and its affecting factors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(1): 46-52. (in Chinese)

(上接第 152 页)

- 5 Christiansen J E. Irrigation by sprinkling[R]. Berkeley, CA: University of California, 1942.
- 6 GB/T 50485—2009 微灌工程技术规范[S]. 2009.
GB/T 50485—2009 Technical code for micro-irrigation engineering[S]. 2009. (in Chinese)
- 7 张国祥. 考虑三偏差因素的滴灌系统流量总偏差率[J]. 农业工程学报, 2006, 22(11): 27-29.
Zhang Guoxiang. Calculating the total flow deviation rate of drip-irrigation system based on three deviation rates[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(11): 27-29. (in Chinese)
- 8 张国祥. 用凯勒均匀度进行微灌系统设计的质疑[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 6-9.
Zhang Guoxiang. Query about micro-irrigation system design using Keller uniformity[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(8): 6-9. (in Chinese)
- 9 张林, 吴普特, 牛文全, 等. 均匀坡度下滴灌系统流量偏差率的计算方法[J]. 农业工程学报, 2007, 23(8): 40-44.
Zhang Lin, Wu Pute, Niu Wenquan, et al. Method for calculating flow deviation in drip irrigation system under uniform slope[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(8): 40-44. (in Chinese)
- 10 张林, 范兴科, 吴普特, 等. 均匀坡度下考虑三偏差的滴灌系统流量偏差率的计算[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4): 7-14.
Zhang Lin, Fan Xingke, Wu Pute, et al. Calculation of flow deviation rate of drip irrigation system taking three deviation rates into account on uniform slopes[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(4): 7-14. (in Chinese)
- 11 朱德兰, 吴普特, 张青峰, 等. 微地形影响下滴灌均匀度设计指标研究[J]. 排灌机械, 2006, 24(1): 22-26.
Zhu Delan, Wu Pute, Zhang Qingfeng, et al. Study on the emission uniformity for the emitter under the condition of farmland micro-terrain action[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2006, 24(1): 22-26. (in Chinese)
- 12 Zhu D L, Wu P T, Merkle G P, et al. Drip irrigation lateral design procedure based on emission uniformity and field microtopography[J]. Irrigation and Drainage, 2010, 59(5): 535-546.
- 13 牛文全, 吴普特, 范兴科. 微灌系统综合流量偏差率的计算方法[J]. 农业工程学报, 2004, 20(6): 85-88.
Niu Wenquan, Wu Pute, Fan Xingke. Method for calculating integrated flux deviation rate of micro-irrigation system [J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(6): 85-88. (in Chinese)
- 14 牛文全. 微压滴灌技术理论与系统研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2006.
Niu Wenquan. Theory and system research of micro-pressure drip irrigation technology [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2006. (in Chinese)
- 15 姚振宪, 何松林. 滴灌设备与滴灌系统规划设计[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.
- 16 韩文霆, 崔利华, 吴普特, 等. 正三角形组合喷灌均匀度计算方法[J]. 农业机械学报, 2013, 44(4): 99-107.
Han Wenting, Cui Lihua, Wu Pute, et al. Calculation methods for irrigation uniformity with sprinklers spaced in regular triangle [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4): 99-107. (in Chinese)