

近红外土壤含水率传感器设计与试验*

殷哲¹ 雷廷武^{1,2} 董月群¹

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083;

2. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 设计了一种适用于快速测量土壤含水率的近红外传感器。发光二极管(LED)作为传感器的光源,中心波长为1 940 nm的光为测量光,1 800 nm为参考光,土壤含水率对这2个波长的光有不同的吸收特性。光源发出的光照射到土壤表面,经反射后进入光电转换器,将光信号转换为电信号,送至两级放大电路、模数转换器(A/D)、显示和存储设备,输出的反射光强与土壤含水率存在一定的关系。仪器性能试验表明:光源传感器到土壤表面的距离对采集信号的强度有一定影响,根据传感器的结构,可以选择一定的距离使反射信号的强度和稳定性最好。两波长光的反射光强随着土壤粒径的增大而减小;土壤含水率与相对吸收深度之间具有很好的线性相关性,回归分析的决定系数为0.863。

关键词: 土壤含水率 土壤颗粒 近红外 发光二极管

中图分类号: S152.7; S237 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)07-0073-05

Design and Experiment of Near Infrared Sensor for Soil Moisture Measurement

Yin Zhe¹ Lei Tingwu^{1,2} Dong Yuequn¹

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, China Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: A near infrared reflection (NIR) soil water sensor was developed for rapid measurement of soil moisture content. Light emitting diodes (LEDs), at 1 940 nm and 1 800 nm respectively, were used as measurement and reference light sources. The photodiode received the light reflected from the soil surface to produce an output electronic signal, which was related to the soil moisture content. The received signals were put into a two stage pre-amplifier, an analogue/digital (A/D) transfer, and then were displayed and stored. A certain relationship was found between the output reflected light and soil moisture content. The experiment results showed that the distance from light sensor to soil surface had some influences on the intensity of received signal. According to the sensor structure, a certain distance could be chosen to make a better intensity and stability of reflected signal. The reflectance of the two light sources decreased with increase of soil particle size. There was a strong linear correlation between the relative absorption depth and soil moisture content, and the determination coefficient was 0.863.

Key words: Soil moisture content Soil particle Near infrared Light emission diode

引言

土壤含水率在植物生长、土壤生化作用、土壤侵

蚀和干旱区土地管理中起重要作用^[1],准确测量土壤含水率对理解和模拟以上过程有重要意义。

目前,应用较为广泛的土壤含水率测量方法包

收稿日期: 2012-07-20 修回日期: 2012-09-01

* 国家自然科学基金重点项目(41230746)和中国农业大学研究生科研创新专项资助项目(KYCX2010101)

作者简介: 殷哲, 博士生, 主要从事水土保持研究, E-mail: yinzhe-2002@163.com

通讯作者: 雷廷武, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀和旱地农业研究, E-mail: leitingwu@cau.edu.cn

括:重量法、中子法、频域反射法(FDR)、时域反射法(TDR)和微波技术^[2~8]。重量法测量结果精确,但时间较长,对土壤有一定的破坏性,而且不适于长期定点连续监测;中子存在潜在的辐射,无法对表层土壤进行测量。TDR 和 FDR 测量精度较高,无放射性且适于长期定点观测,但 TDR 测量的含水率是整个探针长度的平均含水率,所以在同一土壤中不同的埋置方式会导致测量结果的不同,FDR 在使用中对导管的安装要求高,土壤和导管外壁不能存在间隙。

近红外反射法能够实现物质成分的定量测量,并且测量速度快、非接触、重复性强,已经被广泛应用于土壤成分的测量中^[9~14]。研究证明,物质中的水分对近红外光谱特定波长有强烈吸收,土壤水分吸收波长为 1 400、1 900 和 2 200 nm,其中 1 900 nm 波长吸收最强烈,同时,土壤水分对 1 800 nm 波长的光有微弱吸收。

本文设计一种满足便携式仪器需求的近红外土壤含水率传感器,验证土壤颗粒大小对 1 800 nm 和 1 940 nm 波长反射光强的影响,并建立土壤含水率与相对吸收深度之间的关系及测试传感器运行稳定性。

1 传感器设计原理与组成

本文采用中心波长为 1 940 nm 的光为测量光,1 800 nm 为参考光。光源发出的近红外光照射到土壤表面后,一部分光被土壤吸收,一部分被反射,通过光电传感器接收到的反射光信号强度与土壤含水率存在一定的相关关系。因此,通过测量土壤的反射光强,可以得到土壤的含水率。

本文设计的土壤含水率传感器包括电路单元和光路单元,如图 1 所示。电路单元包括光源驱动电路、放大电路、A/D 转换电路、数据显示和存储电路。光路单元包括光源和光电转换器。传感器高度为 2.5 cm,顶部直径为 2 cm,底部直径为 5.5 cm。在传感器顶端装有 1 个光电传感器,围绕着光电传感器,在其侧面均匀安装 6 个 LED 光源,分别是 3 个参考波长光源和 3 个测量波长光源,相邻 2 个光源的水平投影夹角是 60°。6 个光源布设在近似的椭球面上,接收用的光电传感器放置在椭球面的焦点上,采用椭球面设计可以使土壤表面反射光经椭球面反射聚焦后进入光电转换器中。6 个光源发射的光应尽可能集中在椭球体的对称轴上。来自土壤表面的漫发射光通过椭球体的反射集中后进入光电转换传感器中。接收到的反射光经光电转换传感器产生电压信号,再送至电路单元进行放大、滤波、

A/D 转换、数据显示和存储。

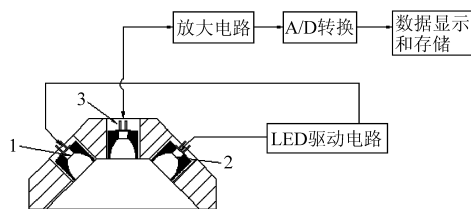


图 1 传感器结构图

Fig. 1 Structure diagram of sensor

1. 测量波长光源 2. 参考波长光源 3. 光电转换传感器

1.1 光源和光电转换传感器的设计

(1)光源:试验所需光源要求发出具有很窄频率的单色光,传统的卤钨灯发出的光波段太宽,需采用滤光片产生波段相对较窄的光源,在消耗大量能源的同时光强大大降低,很难满足测量要求。激光能够发出单波长的光,但成本昂贵。通过几种光源的比较,选用 GaInAsSb 型发光二极管,其发出的光波段窄,不必使用滤光片就可以产生波段很窄的近似激光的光源。而且具有体积小、耗能少、寿命长、响应速度快的特点,大大节省了测试时间和成本,适合便携式仪器的使用。发光二极管的发光芯片安装在特殊形状的小孔的底部,小孔的内表面是类似于抛物面的镜面,能够增加发光二极管的发光效率。光源的性能参数包括:直径 5 mm,最大脉冲模式电流 1 A,最大连续模式电流 220 mA,发光区域为 $3\text{ }\mu\text{m} \times 3\text{ }\mu\text{m}$ 。光源与物体表面垂直距离为 15 mm 时,在物体表面形成直径为 6 mm 的光斑。

(2)光电转换器:选用 GaInAsSb-PD24 型光电转换传感器。它具有较短的响应时间,非常适合检测近红外波段的光,1 800 nm 和 1 940 nm 波长的光都位于其敏感检测波段。光电转换传感器的光敏芯片也安装在小孔的底部,小孔与发光二极管有同样的外形和内部结构,类似抛物面的镜面设计增加了部分反射光线到达光电二极管的敏感区域,提高了收集辐射光的效率。光电转换传感器的性能参数包括:敏感区域直径 0.3 mm,截止波长 $2.4\text{ }\mu\text{m}$,暗电流 $0.7 \sim 3\text{ }\mu\text{A}$,峰值波长 $2.0 \sim 2.2\text{ }\mu\text{m}$,对 1 800 nm 和 1 940 nm 波长的光具有很强的感应特性。

1.2 电路单元设计

电源电压为 24 V,发出的光强度与输入电流成正比,可以通过增加输入电流来提高输出光强。但是在连续模式下工作的 GaInAsSb 型发光二极管,额定输入电流为 220 mA,超过额定值后,发热量增大会降低光源的使用寿命,容易造成光源提前损坏。若采用脉冲模式驱动光源,当脉冲宽度小于 1 ms 时,输入的电流可以提高到 1 A,输出光强有很大提高。因此,在保证光源不被损坏的前提下,光源选用

脉冲模式发光,输入电流为 600 mA,脉冲间隔为1 s,脉冲宽度为 700 μs。脉冲光源输出如图 2 所示。图 3 为光源驱动电路。单片机系统控制 2 个波长光源的闭合,相隔一定时间交替发光。

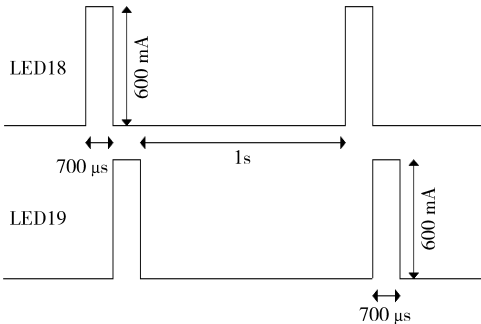


图 2 LED 光源脉冲波形图
Fig. 2 Pulse cycle of LED

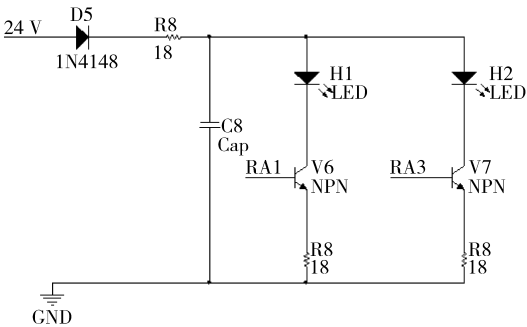


图 3 LED 光源驱动电路
Fig. 3 Driving circuit of LED

经土壤表面反射后进入光电传感器的光信号很微弱,因此放大电路的设计对整个传感器的稳定性和可靠性起重要作用。如图 4 所示,放大电路具有高速、低噪声等优点。整个电路系统由 microchip 单片机控制,控制 2 个波长光源的闭合,相隔一定时间交替发光。控制采样电路对光电传感器放大滤波后的信号进行模数转换,将模拟量转换成数字量,再将转换好的数字量通过信号输出电路传送到外围接收设备。

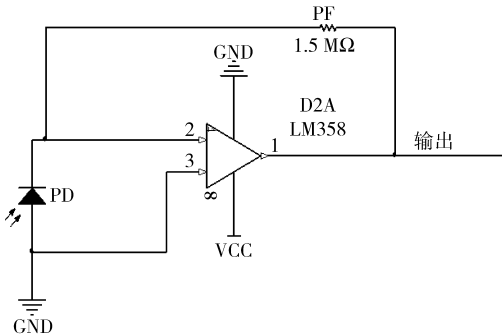


图 4 放大电路
Fig. 4 Amplifier circuit

2 试验材料和方法

选用我国西南地区的紫土为试验用土。试验所

用土壤中沙粒(粒径 0.05 ~ 2 mm)质量分数为 61%,粉粒(粒径 0.002 ~ 0.05 mm)为 20%,黏粒(粒径 0 ~ 0.002 mm)为 19%。

由于入射光只能与土壤表面发生反射和吸收作用,为保证土壤内水分的均匀,不同含水率土壤的具体配置方法如下。将田间采集的土样风干、粉碎后过直径 1 mm 的筛网,除去土壤中的杂质,使样品颗粒均匀。过筛的土壤放入直径 5 cm、高度 5 cm 的环刀内。环刀底部用滤纸封闭,滤纸的作用是支撑环刀内的土壤并且允许水分通过滤纸进入土壤中。环刀顶部的土壤用直尺刮平。将装好土样的环刀放入水中,水的液面高度低于环刀顶部。静置 24 h,水分通过土壤底部的滤纸进入土壤中,待土壤充分饱和。然后,将土样放入压力膜仪内加压排水。根据试验设计,设置在不同压力下排水,得到不同的均匀土壤含水率。设置的压力变化范围为 0 ~ 1.5 × 10³ kPa。当在设定压力下排水完成后,取出土样,测量土壤表面的光反射信号。然后用天平称量土壤的质量,用以计算土壤的含水率。将土壤再次放入压力膜仪内,在不同的压力下排水。重复以上操作,直到测量完不同的设定水势下土壤含水率。然后对样品进行加热干燥(105℃, 24 h),对干燥后的土壤进行同样的测量。通过测量得到的土壤质量,计算得到不同条件下的土壤含水率。测量的土壤含水率如表 1。为减少测量误差,反射光强连续测量 5 次,然后取平均值。

表 1 土壤样品参数

Tab. 1 Soil sample parameters

样品集合	样品数	含水率/%	均值/%	标准差/%
标定集	43	0 ~ 47.1	30.5	11.2
验证集	28	15.1 ~ 45.0	30.9	7.6

测量得到土壤含水率与相对吸收深度之间关系后,建立两者之间的关系模型并检验。将不同含水率的土壤样品随机分为标定集和验证集。标定集合 43 个样本,用于建立预测模型;验证集合 28 个样本,用于检验预测模型。

土壤含水率与吸收波长的反射光强度存在一定的关系,为了最小化土壤类型和传感器形状对光在土壤表面反射产生的影响,将 1 940 nm 和 1 800 nm 波长的反射光强转化为相对吸收深度 R 。首先测量 1 940 nm 和 1 800 nm 两波长的反射光强,然后分别用 1 800 nm 的反射光强进行归一化处理,求得两波长归一化处理后的差值即为相对吸收深度。定义公式为

$$R = \frac{R_1 - R_2}{R_1} = 1 - \frac{R_2}{R_1}$$

(1)

式中 R_1 、 R_2 ——1 800 nm、1 940 nm 的反射光强

建立相对吸收深度 R 与土壤体积含水率 θ 之间的线性关系模型

$$R = A\theta + B \tag{2}$$

当用相对吸收深度来预测土壤体积含水率时,土壤体积含水率计算公式为

$$\theta = aR + b \tag{3}$$

式中 A 、 B 、 a 、 b ——模型系数

3 结果与讨论

图 5 说明了传感器与土壤表面距离对反射信号的影响。反射信号强度是指光电转换器接收的土壤表面反射光信号转换为电压信号,然后通过一定倍数的放大器放大后的读数,读数越大反射信号强度越强。结果表明,在一定距离范围内,2 个波长的反射信号强度维持相对稳定。当超过一定距离后,随着距离的增大,2 个波长的反射信号强度都随距离呈线性减小。对于本结构,当距离小于 15 mm 时,2 个波长反射信号强度都很高,但强度存在一定的差异,这可能是由于传感器的内部结构及表面的不规则反射引起的。当距离超过 25 mm 时,信号强度变得非常微弱。随着距离的增大,传感器接收到的有效信号减弱。干土壤表面对 1 800 nm 和 1 940 nm 两波长没有吸收,因此传感器接收 2 个波长的反射信号大小接近。

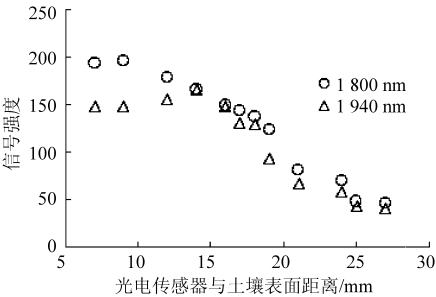


图 5 传感器与土壤表面的距离对采集信号的影响

Fig. 5 Effect of acquired signal under different distances between sensor and soil surface

3.1 土壤粒径对反射光强的影响

土壤表面粗糙度对光反射有很大影响,如图 6 所示,随着土壤粒径的变化,1 800 nm 和 1 940 nm 波长的反射光强基本相同。当土壤粒径小于 1 mm 时,反射光强度随着粒径减小而增强。当土壤粒径大于 1 mm 时,反射光强接近于常数,基本不随土壤粒径变化,表明当粒径超过一定值时,粒径对光辐射能的影响不大。这是由于,当土壤粒径较大时,颗粒之间会存在很大的空隙,当光照射到土壤表面时会引起光的散射、吸收和(穿过颗粒间空隙的)透射。因此,大的土壤颗粒会导致较少的能量反射。通过

计算表明,土壤粒径从 0.18 mm 到 5 mm 的变化过程中,有将近 43.2% 的辐射能被吸收。

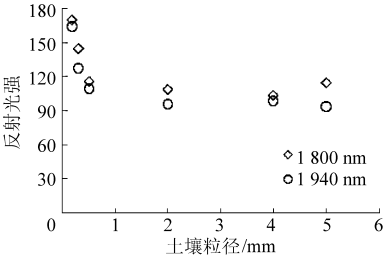


图 6 土壤粒径对反射光强的影响

Fig. 6 Effect of particle sizes on reflection light

3.2 相对吸收深度与土壤体积含水率的关系

图 7 为相对吸收深度与土壤体积含水率的关系及其拟合结果。图 7 表明,二者呈显著线性正相关关系,线性回归的决定系数为 0.863,相对吸收深度随着土壤含水率增大而增大。因此,在相应的水分吸收波段,通过测量相对吸收深度可以定量计算得到土壤含水率。相对吸收深度受土壤含水率的影响,还与土壤的类型、有机质含量及表面粗糙度有一定关系。土壤体积含水率与相对吸收深度的拟合结果为

$$\theta = 250R - 12.5 \tag{4}$$

将式(4)乘以一个系数对模型进行修正,修正模型表达式为

$$\theta = 0.911(250R - 12.5) \tag{5}$$

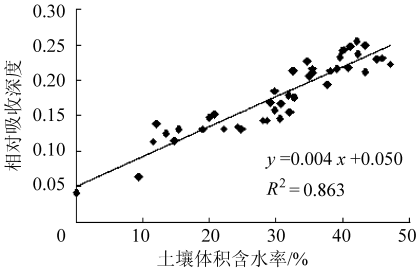


图 7 土壤体积含水率与相对吸收深度关系

Fig. 7 Relationship between soil water content and relative absorption depth

干燥法测量土壤质量含水率计算公式为

$$\omega = \frac{m - m_0}{m_0} \times 100\% \tag{6}$$

式中 ω ——土壤质量含水率,%
 m ——湿润土壤的质量,g
 m_0 ——加热干燥后土壤的质量,g

土壤体积含水率计算公式为

$$\theta = \frac{V_w}{V} \times 100\% \tag{7}$$

其中 $V_w = (m - m_0) / \rho_w$ $V = m_0 / \rho_b$

则
$$\theta = \frac{(m - m_0) \rho_b}{m_0 \rho_w} \tag{8}$$

式中 ρ_w ——水的密度, g/cm^3
 ρ_b ——土壤容重, g/cm^3
水的密度近似等于 $1\text{ g}/\text{cm}^3$, 将式 (6) 代入式 (8) 得到 θ 与 ω 的换算公式为

$$\theta = \omega \rho_b \tag{9}$$

图 8 为干燥法测量得到的含水率与仪器测量得到的土壤含水率的对比结果。图 8 表明, 仪器测量结果的均方根误差为 4.76%, 干燥法测量得到的含水率与仪器测量得到的土壤含水率平均相对误差约为 10%。可以通过对仪器的标定, 减小这种误差。标定后仪器测量结果与干燥法测量得到的含水率如图 9 所示, 预测精度有显著提高, 二者的均方根误差为 3.29%。结果表明, 设计的传感器可以准确地测量土壤含水率。

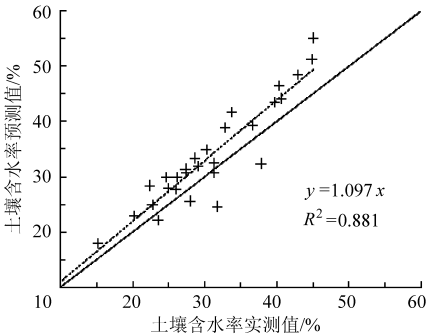


图 8 土壤含水率实测值与线性模型预测值关系
Fig. 8 Relationship between soil moisture content measured values and predicted values by linear model

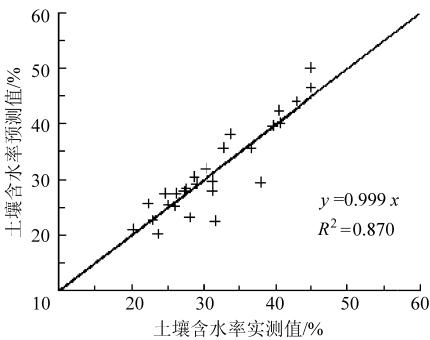


图 9 土壤含水率实测值与线性标定模型预测值关系
Fig. 9 Relationship between soil moisture content measured values and predicted values by calibration linear model

4 结束语

设计了近红外土壤含水率传感器, 包括光路系统和电路系统。光路系统包括 LED 光源和光电转换传感器。电路系统包括光源驱动电路、放大电路、A/D 转换电路、数据显示和存储电路。光电传感器与土壤表面、地表紧密接触时信号强度好。当土壤粒径较小时, 干土壤表面的反射光强随着颗粒的减小而增大。

用紫土测量得到的数据表明, 土壤含水率与相对吸收深度之间存在很好的线性相关关系, 一元线性模型适用于土壤含水率传感器的标定。结果表明用土壤表面反射光强预测土壤含水率具有可行性。

参 考 文 献

1 Wigneron J, Schmugge T, Chanzy A, et al. Use of passive microwave remote sensing to monitor soil moisture [J]. Agronomie, 1998, 18(1): 27 ~ 43.
2 Gardner W H. Water content[M] // Methods of soil analysis: part 1—physical and mineralogical methods, SSSA book series 5. 1. Am. Soc. Agronomy, 1986; 493 ~ 544.
3 Goodspeed M J. Neutron moisture meter theory[M] // Greacen E L. Soil water assessment by the neutron method. Australia CSIRO;1981; 16 ~ 23.
4 Stone J F. Neutron physics considerations in moisture probe design[C]. Irrigation and drainage: proceedings of the national conference, 1990.
5 Greacen E L, Schrale G. The effect of bulk density on neutron meter calibration[J]. Australian Journal of Soil Research, 1976, 14(2): 159 ~ 169.
6 Parkes M E, Siam N. Error associated with measurement of soil moisture change by neutron probe[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1979, 24(1): 87 ~ 93.
7 Topp G C, Reynolds W D. Time domain reflectometry: a seminal technique for measuring mass and energy in soil [J]. Soil and Tillage Research, 1998, 47(1 ~ 2): 125 ~ 132.
8 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)
9 孙建英, 李民赞, 郑立华, 等. 基于近红外光谱的北方潮土土壤参数实时分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2006, 26(3): 426 ~ 429.
Sun Jianying, Li Minzan, Zheng Lihua, et al. Real time analysis of soil moisture, soil organic matter and soil total nitrogen with NIR spectra[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2006, 26(3): 426 ~ 429. (in Chinese)

- 4 Tsheko R, Savage M J. Calibration of a frequency-domain reflectometer for determining soil-water content in a clay loam soil[J]. Water SA, 2005, 32(1): 37 ~ 42.
- 5 Robinson D A, Campbell C S, Hopmans J W, et al. Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories; a review[J]. Vadose Zone Journal, 2008, 7(2): 358 ~ 389.
- 6 Skierucha W, Wilczek A. A FDR sensor for measuring complex soil dielectric permittivity in the 10 ~ 500 MHz frequency range[J]. Sensors, 2010, 10(4): 3 314 ~ 3 329.
- 7 Mironov V L, Dobson M C, Kaupp V H, et al. Generalized refractive mixing dielectric model for moist soils[J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 2004, 42(4): 773 ~ 785.
- 8 Blonquist J M Jr, Jones S B, Robinson D A. Standardizing characterization of electromagnetic water content sensors; part 2. Evaluation of seven sensing systems[J]. Vadose Zone Journal, 2005, 4(4): 1 059 ~ 1 069.
- 9 Lasne Y, Ph Paillou, Ruffié G, et al. Effect of salinity on the dielectric properties of geological materials; implication for soil moisture detection by means of radar remote sensing[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(6): 1 674 ~ 1 688.
- 10 高磊, 施斌, 唐朝生, 等. 温度对 FDR 测量土壤体积分含水量的影响[J]. 冰川冻土, 2010, 32(5): 964 ~ 969.
- 11 Kizito F, Campbell G S, Cobos D R, et al. Frequency, electrical conductivity and temperature analysis of a low-cost capacitance soil moisture sensor[J]. Journal of Hydrology, 2008, 352(5): 367 ~ 378.
- 12 Shang J Q, Rowe R K, Umana J A, et al. A complex permittivity measurement system for undisturbed/compacted soils[J]. Geotechnical Testing Journal, 1999, 22(2): 159 ~ 168.
- 13 Logsdon S D, Laird D A. Dielectric spectra of bound water in hydrated Ca-smectite[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2002, 305(7): 243 ~ 246.
- 14 Logsdon S D. Soil dielectric spectra from vector network analyzer data[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2005, 69(11): 983 ~ 989.
- 15 冯慈章, 马西奎. 工程电磁场导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- 16 Logsdon S D. Electrical spectra of undisturbed soil from a crop rotation study[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2008, 72(2): 11 ~ 15.
- 17 Campbell J E. Dielectric properties and influence of conductivity in soils at one to fifty megahertz[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1990, 54(2): 332 ~ 341.
- 18 Thevanayagam S. Dielectric dispersion of porous media as a fractal phenomenon[J]. J. Appl. Phys., 1997, 82(5): 2 538 ~ 2 547.
- 19 关振铎, 张中太, 焦金生. 无机材料物理性能[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- 20 Xu J, Ma X, Logsdon S D, et al. Multi-needle FDR sensor suitable for measuring soil water content[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2012, 76(12): 1 929 ~ 1 937.
- 21 Robinson D A, Jones S B, Wraith J M, et al. A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soils using time domain reflectometry[J]. Vadose Zone Journal, 2003, 2(4): 444 ~ 475.

~~~~~  
(上接第 77 页)

- 10 Odlare M, Svensson K, Pell M. Near infrared reflectance spectroscopy for assessment of spatial soil variation in an agricultural field[J]. Geoderma, 2005, 126(3 ~ 4): 193 ~ 202.
- 11 Cozzolin D, Moron A. Potential of near infrared reflectance spectroscopy and chemometrics to predict soil organic carbon fractions[J]. Soil and Tillage Research, 2006, 85(1 ~ 2): 78 ~ 85.
- 12 Skidmore E L, Dickerson J D, Schimelpennig H. Evaluating surface soil water content by measuring reflectance[J]. Soil Science Society of American Journal, 1975, 39(2): 238 ~ 242.
- 13 Kano Y, McClure W F, Skaggs R W. A near infrared reflectance soil moisture meter[J]. Transactions of the ASAE, 1985, 28(6): 1 852 ~ 1 855.
- 14 Belisle W R, Sharma A, Coleman T L. An optical reflectance technique for soil moisture measurement—part 1: theory, description and application[C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1996, 2: 1 315 ~ 1 319.
- 15 李民赞, 郑立华, 安晓飞, 等. 土壤成分与特性参数光谱快速检测方法 & 传感技术[J]. 农业机械学报, 2013, 44(3): 73 ~ 87.  
Li Minzan, Zheng Lihua, An Xiaofei, et al. Fast measurement and advanced sensors of soil parameters with NIR spectroscopy[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(3): 73 ~ 87. (in Chinese)