doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.02.024

滴灌下 AHFO 法监测砾石区土壤水分时空变异研究

胡　优[1]　任瑞琪[2]　刘燕芳[2]　李　敏[1]　何海龙[1]　司炳成[1,2]

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100;
2. 鲁东大学资源与环境工程学院, 烟台 264000)

摘要: 为监测滴灌条件下的田间土壤水分变化,利用主动加热光纤(Active heated fiber optics,AHFO)法监测山东省砾石区地下滴灌下的土壤水分时空变异,并用时域反射技术(Time domain reflectometry, TDR)法对比其测量精度。结果表明,AHFO 法与 TDR 法测得的土壤含水率具有较好的相关关系($P<0.01$),AHFO 法测量精度在 0.025 ~ 0.038 m^3/m^3之间;由于砾石的影响,AHFO 法的测量精度略有降低;采用 AHFO 法测得的土壤含水率对灌溉有较好的响应,说明 AHFO 法能够获取滴灌过程土壤水分的演变;采用 AHFO 法测得的土壤含水率空间分布与砾石含量具有显著相关关系($P<0.05$),说明砾石含量是控制田间土壤水分的主导因素。

关键词: 土壤水分; 砾石区; 滴灌; 主动加热光纤; 分布式温度传感器; 时空变异

中图分类号: S152.8; S275.6　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2021)02-0257-09　　**OSID**:

Spatial-temporal Variation of Soil Moisture Monitored Using AHFO under Drip Irrigation in Gravel Area

HU You[1]　REN Ruiqi[2]　LIU Yanfang[2]　LI Min[1]　HE Hailong[1]　SI Bingcheng[1,2]

(1. *Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*
2. *School of Resource and Environmental Engineering, University of Ludong, Yantai* 264000, *China*)

Abstract: Precision irrigation can improve water use efficiency and reduce environmental pollution under extensive irrigation. However, it is necessary to accurately know the pattern of soil moisture in high spatial-temporal resolution in the field, which can be measured by the active heated fiber optics (AHFO) method. However, the measuring accuracy of soil moisture under drip irrigation conditions in high spatial-temporal resolution remained unclear. The AHFO method was applied to monitor spatial-temporal variation of soil moisture under subsurface drip irrigation, which was in Shandong Province gravel area. Then, the measurement accuracy was also compared with that by TDR method. The results showed that the measured soil water content by the AHFO was well consistent with that by TDR method($P<0.01$). The accuracy of AHFO method was ranging between 0.025 m^3/m^3 and 0.038 m^3/m^3, which was slightly lower than that of other studies due to the higher gravel content. Through the real-time monitoring, soil water content showed a better response to irrigation, indicating that AHFO method can capture the evolution of soil moisture during drip irrigation. Meanwhile, soil moisture distribution was significantly correlated with gravel content($P<0.05$), which dominated soil moisture in the field. The research result showed that AHFO can provide the fundamental parameter for appropriate irrigation time and amount, which was of great significance to water management in the field and the application of precise irrigation.

Key words: soil moisture content; gravel area; drip irrigation; active heated fiber optics; distributed temperature sensing (DTS); spatial-temporal variability

0　引言

土壤水分是地表过程的重要组成部分,也是描述陆地水文过程最基本的参数之一,直接影响着全球环境和人类社会的可持续发展[1-2],已被全球气候观测系统列为第二大气候变量[3]。土壤水分具

收稿日期: 2020-11-02　修回日期: 2020-12-08
基金项目: 国家自然科学基金项目(41601222、41630860)和西北农林科技大学基本科研业务费专项资金项目(2452017317)
作者简介: 胡优(1991—),男,博士生,主要从事分布式光纤测定土壤水热性质与土壤物理研究,E-mail: hyagriwater@126.com
通信作者: 司炳成(1964—),男,教授,主要从事土壤物理与水文过程研究,E-mail: bingchengsi@sina.com

有强烈的时空变异,其特征空间尺度能从几厘米跨越到几千米,特征时间尺度能从几分钟跨越到几年。在当今全球气候变化日趋严峻的背景下,农业已经面临极端气温、干旱等诸多挑战[4],发展可持续的灌溉农业是保障粮食安全的重要举措。滴灌是最节水且易实现自动化的灌溉技术之一[5],因而被广泛应用。地下滴灌是将滴灌管埋入一定深度的土层、将水肥精确输送到作物根区、从而大大提高水肥利用效率[6-7]的灌溉技术。制定高效的节水灌溉制度需要精确掌握地下滴灌土壤湿润模式和水分时空分布,因而需要精确测定土壤含水率的方法。中子法[8]和电容法[9]等点尺度水分传感器被用于监测滴灌系统局部的土壤水分分布,但点尺度法不具有空间代表性,传感器位置会影响土壤水分分布的观测结果,从而影响灌溉制度的制定[10]。LI 等[11]尝试采用宇宙射线中子法(COSMOS)测量地下滴灌的土壤水分,由于该方法只能监测田间尺度水分的平均值,故导致探测大面积中子数对滴灌灌溉的响应并不显著。因此,亟需研究新的高时空分辨率方法来监测地下滴灌的土壤水分时空分布,从而制定高效的节水灌溉制度。

分布式温度传感器(Distributed temperature sensing,DTS)可以测量沿光纤厘米至千米的温度,已被广泛应用于生态水文和地球科学的监测[12-14]。借鉴单探针热脉冲方法[15-19],把光纤上某一段看成一根单探针,对埋在土壤中的光纤金属层进行短时间通电加热,用 DTS 记录其升温和冷却过程的温度变化,根据光纤的温度变化与含水率的校准关系来推求土壤含水率。因此,主动加热光纤(Active heated fiber optics,AHFO)法可以实现从厘米至千米的中尺度土壤水分实时连续原位监测。近 10 年来,研究者陆续通过室内和野外试验进行了方法探索[20-21]和田间验证与应用[22],研究表明,土壤含水率测量误差能控制在 0.05 m^3/m^3 以内,随着 DTS 性能的不断改善,测量精度也在不断提高。AHFO 法凭借其高时空分辨率土壤水分监测的优势,有望解决土壤水分空间信息不易获取的难题。胡优等[21]探讨了基于加热光纤不同方法测量土壤水分的可行性。SAYDE 等[23]通过圆形喷灌机变量灌溉控制田间土壤水分,采用 AHFO 法测量沿光纤方向的土壤水分分布及水通量。GAMAGE 等[24]利用 AHFO 法监测玉米全生育期根层的土壤水分,证明了该方法测量作物根区土壤水分的可行性。GIL-RODRIGUEZ 等[25]和 GAMAGE 等[26]分别测量了均质土柱在单个滴头下土壤水分的二维和三维分布,并分别刻画了湿润锋和湿润体的演变过程,但其研究的是室内单个滴头的情况,在田间地下滴灌条件下,需确认 AHFO 法能否捕捉高时空分辨率的土壤水分信息。

土壤颗粒的大小影响光纤与土壤的接触,进而影响热传导过程。目前,利用单探针热脉冲原理的 AHFO 法测试的土壤类型主要包括砂土[20]、砂壤土[23]、壤土[27]和粉土[22]等细颗粒土壤,对含有砾石的粗粒径土壤水分测量精度有待验证。本研究利用 AHFO 法的高空间分辨率(0.25 m)监测地下滴灌条件下土壤水分随灌溉、降雨和季节的变化,从而监测地下滴灌条件下土壤水分的时空变异,验证和评价砾石区 AHFO 法测量土壤水分的精度,为滴灌条件下及砾石区制定适宜的灌溉制度、发展精准农业提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地点位于山东省烟台市鲁东大学北校区后山(37°31′33″N,121°21′19″E)。试验区属于温带季风气候,多年平均降雨量为 619.1 mm,夏季(7—9 月)降雨最多(占全年降雨量的 60% 以上),冬季最少。2019 年遇到干旱年,年降雨量仅有 427.7 mm。试验时间为 2019 年 9 月 8 日—12 月 18 日。试验田(宽 8 m,长 60 m)属于典型丘陵区,地势较为平坦(坡度小于 2%)。土壤类别为棕壤,土壤颗粒以砾石和砂粒为主(表 1),容重为(1.48 ± 0.08) g/cm^3,饱和含水率为(0.49 ± 0.06) m^3/m^3,田间持水率为(0.27 ± 0.03) m^3/m^3。土壤表现出一定分层,其中表层(0 ~ 0.2 m)为砂质淋溶层,其下(0.3 m)为较明显的沉积层,沉积层粘粒含量较高,再下为半风化母岩。土层薄弱,质粗、砾石多,保水保肥能力差,是山地丘陵区十分贫瘠的土壤。试验田为枣树园,光纤沿地块东北方向埋设在田块中间(图 1)。

表 1 不同土层土壤颗粒粒径分布

Tab. 1 Soil particle size distribution in different soil layers %

土层深度/m	砾石(Gravel,粒径大于 2 mm)质量分数	粘粒(Clay)体积分数	粉粒(Silt)体积分数	砂粒(Sand)体积分数
0.15	27.15 ± 4.96	13.28 ± 1.81	16.51 ± 1.85	70.21 ± 3.47
0.20	25.05 ± 7.11	14.38 ± 2.04	17.21 ± 1.52	68.41 ± 3.47
0.30	25.57 ± 3.24	15.62 ± 2.89	17.17 ± 2.42	67.21 ± 5.26

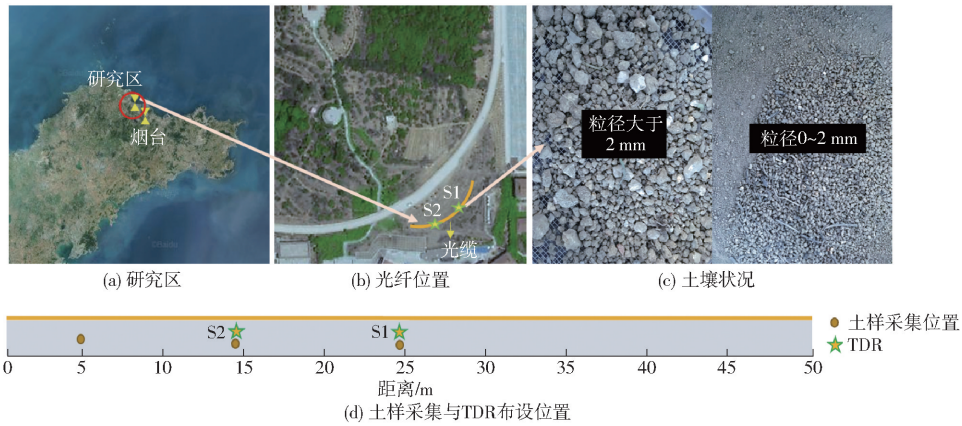

图 1　研究区概况

Fig. 1　Overview of research area

1.2　田间布置和试验设计

埋设光缆应尽量减少对土壤的扰动。采用自制的犁埋设光缆(图 2b),一块倾斜 45°钢板背部拖着 3 根弯曲细钢管,钢管尾端水平。将 3 根光纤穿入钢管中,拖拉机拖着犁缓慢行驶,光缆也随着钢管埋入土壤中,这可使光缆与土壤接触紧密。3 根光纤的埋深分别为 0.15、0.20、0.30 m,每根光缆长 50 m(图 2a)。用光纤熔接机将 3 根光缆首尾两端熔接,形成一个光通道。

每根光缆两端连接铜电线,用于给光缆通电加热(图 2e)。将可调变压器接入 220 V 电压,用万用表记录输出电压,换算后得到输出功率为 5 W/m,光缆每次加热 10 min,每天加热 3 次。采用以色列耐特菲姆压力补偿式滴灌管进行灌溉,滴灌管外径 16 mm,壁厚 0.9 mm,滴头间距为 0.3 m,流量为 1.6 L/h。以地下滴灌的方式灌溉,在地下 5 cm 处水平布设 3 支滴灌管,滴灌管间距 0.3 m,灌溉水通过水泵从蓄水池经过滤器提到田间。光缆沿滴灌管平行布置,横截面位置如图 2g 所示。第 1 次灌溉从 10 月 11 日至 14 日历时 4 d,灌溉量为 563 mm。第 2 次灌溉从 11 月 11 日至 12 日月历时 2 d,灌溉量为 481 mm。为了获取灌溉过程中土壤水分动态变化,第 2 次灌溉后 0.5 h 进行第 1 次加热,此后每间隔 1 h 加热 1 次,直至灌溉后 48 h 为止。停止灌溉后,第 1 次加热在灌后 0.5 h,此后每间隔 1 h 加热 1 次,直至灌溉后 12 h 为止。

1.3　光纤分布式温度传感系统

分布式温度传感器为英国 Silixa 公司生产的 ULTIMA－S 型,其最小采样间距为 0.125 m,最大采样间距为 1.0 m,空间分辨率为 0.25 m,时间分辨率为 1 s,温度分辨率为 0.01℃,感测距离长达 5 km。在 10 s 的采样间隔下,温度精确度在 0.2℃以内。

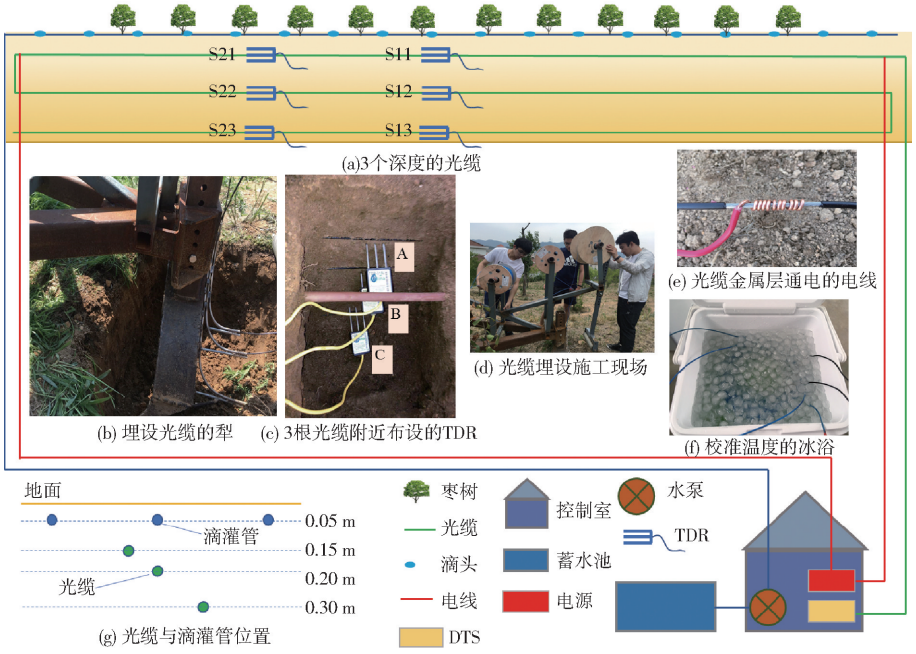

图 2　田间试验布置

Fig. 2　Field experiment layout

DTS 测温原理是:一定能量的脉冲泵浦光注入光纤后,光子与光纤分子发生非弹性碰撞,产生 2 束背向拉曼散射光。其中,波长大于入射光的斯托克斯散射光对温度不敏感,而波长小于入射光的反斯托克斯散射光有很强的温度依赖性。因此,可以根据斯托克斯与反斯托克斯的光强比计算温度[28]。光纤上任意一点的温度可表示为[29]

$$T(z)=\frac{\frac{\Delta E}{k}}{\ln C-\ln R(z)+\Delta\alpha z} \tag{1}$$

式中 T——绝对温度,K

$R(z)$——斯托克斯与反斯托克斯的光强比

ΔE——驱动拉曼散射的分子能态的差值,J

k——玻尔兹曼常数,J/K

$\Delta\alpha$——斯托克斯与反斯托克斯背向散射光损失系数之差

z——DTS 光源的距离,m

C——可校准参数,与入射光的波长、频率、背向拉曼散射光、仪器的光子探测器有关

光纤上任一点到光源的距离 z,即为光行走路程的一半,计算公式为

$$z=\frac{ct'}{2n} \tag{2}$$

式中 c——光在真空中的速度,m/s

n——光纤包层的折射率

t'——光向前与向后传播所需要的时间,s

设置 DTS 采样时间间隔为 10 s,空间间距为 0.25 m,沿光纤共有 603 个采样点。采用光佳光电科技有限公司生产的测温光缆(图 3),内部有 2 根 50/125 的多模纤芯,不锈钢管无缝包裹纤芯,使光纤具有抗压抗剪能力,12 根钢丝紧密螺旋缠绕着不锈钢管,使光纤具有较强的抗拉能力。最外围是黑色 PE 护套,具有防水、防晒、抗老化和良好的电气绝缘性能,保证光缆在通电加热过程不漏电。光缆直径为 3.5 mm,钢管外径为 1.36 mm,内径为 1 mm,钢丝直径 0.45 mm。PE 护套厚 0.85 mm,金属层电阻为 0.35 Ω/m。

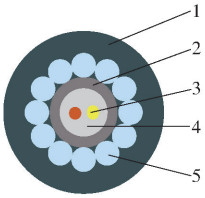

图 3 光缆结构图

Fig. 3 Fiber optic cable structure diagram

1. PE 护套 2. 不锈钢管 3. 纤芯 4. 填充油膏 5. 不锈钢丝

1.4 数据分析

光纤温度的改变主要受热脉冲的影响,也一定程度会遇到环境温度变化的干扰,需要去除背景温度。将加热后的升温值减去加热前 5 min 与加热后 15 ~ 20 min 的温度数据线性回归值得到去除背景温度的升温 ΔT。

光纤在一定加热时长后,累积升温 ΔT_{cum} 随着土壤含水率的增大而减小,ΔT_{cum} 与土壤含水率具有非常好的单调函数关系,所以 ΔT_{cum} 可以用来推求含水率。ΔT_{cum} 计算公式为

$$\Delta T_{cum}=\int_0^{t_e}\Delta T_i\mathrm{d}t \tag{3}$$

式中 t_e——停止加热的时间,取 600 s

ΔT_i——第 i 个时刻的升温,℃

考虑到光纤加热功率因每日交流电压的微弱变化而产生一定的波动,为了去除这一影响,采用归一化累积升温 $\Delta T'_{cum}$ 推求含水率,$\Delta T'_{cum}$ 计算式为

$$\Delta T'_{cum}=\frac{\Delta T_{cum}}{q_i} \tag{4}$$

式中 q_i——光纤每次加热功率,W/m

1.5 TDR 原位校准和验证

田间随机选取 2 个位置 S1 和 S2(相距 10 m,图 1d),在每个土层光缆附近布设 1 个 TDR 探针,用冰袋确定 TDR 对应光缆上点的位置。位置 S1 的 TDR 于 2019 年 9 月 8 日布设,位置 S2 的 TDR 于 2019 年 10 月 11 日布设。TDR 连续监测土壤水分,5 min 采集 1 次数据。随机选择一半的 DTS 测得的 $\Delta T'_{cum}$ 与其对应的 TDR 测得的土壤含水率数据采用最小二乘法拟合,获得校准曲线。另外一半数据用来验证含水率的测量精度。在理想情况下,每个光缆测量长度(0.25 m)需要一个标定曲线,因此获得的测量精度也会更高。但是实际应用中较难实施。本试验中,由于 S1 和 S2 2 个位置代表着田间土壤质地的最大变异区间,所以可由 S1 和 S2 获得的标定曲线评估田间土层的标定曲线的变异程度。

1.6 土壤质地测定

考虑到田间土壤砾石和砂子含量非常高,因此选择激光粒度仪(APA2000 型,马尔文公司,英国)测量土壤质地。先将田间采集的风干土样过 2 mm 筛,计算砾石(粒径大于 2 mm)和剩余土壤颗粒(粒径 0 ~ 2 mm)的质量占比。再从过 2 mm 筛的剩余土壤中取 5 g,用激光粒度仪测量砂粒、粉粒和粘粒的体积占比。

2 结果与分析

2.1 归一化累积升温与含水率校准曲线

$\Delta T'_{cum}$ 随含水率增加而减小(图 4)。每个层次

的 2 个 TDR 对应的散点趋势一致($P<0.01$)，说明尽管 S1、S2 水平方向的土壤质地有空间变异，但没有引起校准曲线的明显变化，所以可以通过每个土层的校准曲线推求土壤含水率。$\Delta T'_{cum}$ 与含水率关系曲线可以用指数函数表达(表 2)，采用最小二乘法拟合位置 S1 和 S2 处 TDR 测得的土壤含水率与其对应的归一化累积升温 $\Delta T'_{cum}$，土层深度 0.15、0.20、0.30 m 的决定系数 R^2 达到显著水平($P<0.01$)，分别为 0.82、0.93 和 0.86。其次，土层深度 0.15、0.20、0.30 m 对含水率观测值(TDR 测得的含水率)和预测值(校准曲线预计算值)的 RMSE 分别为 0.027、0.025、0.038 m^3/m^3(图 5)，均具有较好的测量精度。在低含水率部分散点接近 1∶1线，而高含水率部分散点偏离 1∶1线，说明在低含水率部分测量精度更高，3 条校准曲线均可分别应用于 3 个土层沿光纤所有点的土壤含水率测量。$\Delta T'_{cum}-\theta$ 关系曲线的斜率随含水率增加不断减小，说明 $\Delta T'_{cum}$ 的敏感性随含水率的增加不断减小，这与 SAYDE 等[23]和 GAMAGE 等[24]的研究结果契合。

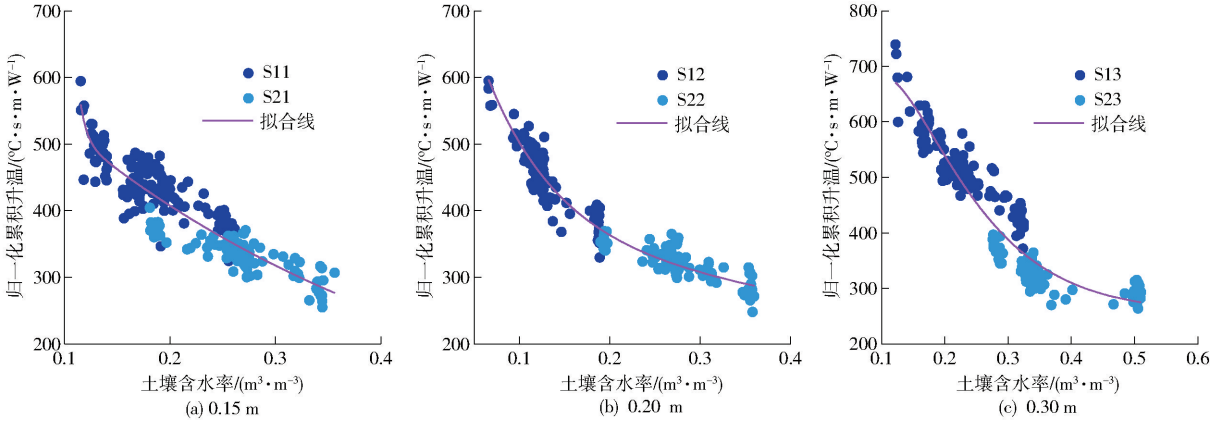

图 4　$\Delta T'_{cum}$ 与土壤含水率的关系

Fig. 4　Relationship between $\Delta T'_{cum}$ and soil moisture content

表 2　3 个深度土壤校准曲线及其拟合参数

Tab. 2　Calibration curves and fitting effects of different positions on optical fiber obtained by three methods

土层深度/m	函数模型	残差 SSE	决定系数 R^2	均方根误差 RMSE/($m^3\cdot m^{-3}$)
0.15	$\theta=1.12\exp(-0.005\Delta T'_{cum})+0.072\exp(-0.0005\Delta T'_{cum})$	0.15	0.82	0.026
0.20	$\theta=2.13\exp(-0.006\Delta T'_{cum})+0.0007\exp(0.006\Delta T'_{cum})$	0.11	0.93	0.022
0.30	$\theta=0.73\exp(-0.002\Delta T'_{cum})+1233\exp(-0.034\Delta T'_{cum})$	0.32	0.86	0.039

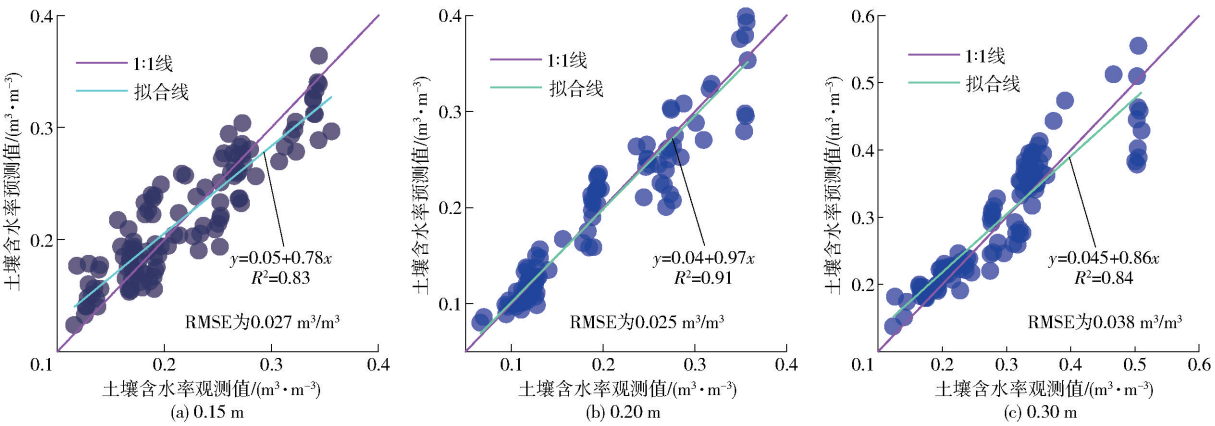

图 5　土壤含水率测量精度

Fig. 5　Measurement accuracy of soil water content

2.2　滴灌条件下土壤水分时空变异

根据 2.1 节中 3 条校准曲线可以获得土壤水分时空分布(图 6c～6e)，可以看出 3 个土层深度土壤含水率分布相似，并且土壤水分对 2 次灌溉事件的响应非常显著。由于第 1 次灌溉时间更长，导致第 1 次灌溉引起的土壤含水率处于峰值的时间比第 2 次长(图 6c～6e)。土壤含水率的变化主要由灌溉、蒸发和入渗引起，这是因为试验期间降雨量较小

(图 6a)。例如,9 月 10 日—10 月 11 日期间,0.15 m 土层含水率的变化明显大于 0.2、0.3 m 土层。这是由于该期间无灌溉发生,表层蒸发导致表层土壤水分减少,而 0.2、0.3 m 土层则受到较少影响。不同深度土壤水分随时间表现出较为强烈的空间变异性(图 6b),变异系数随土层深度的增加而增大,随灌溉的发生变异系数不断减小。根据光纤对滴灌条件下田间尺度土壤水分高分辨率监测,在持续灌溉后,土壤含水率维持在 0.15 ~ 0.27 m^3/m^3 之间(图 7h),说明该丘陵区土壤持水能力的强烈变异性。

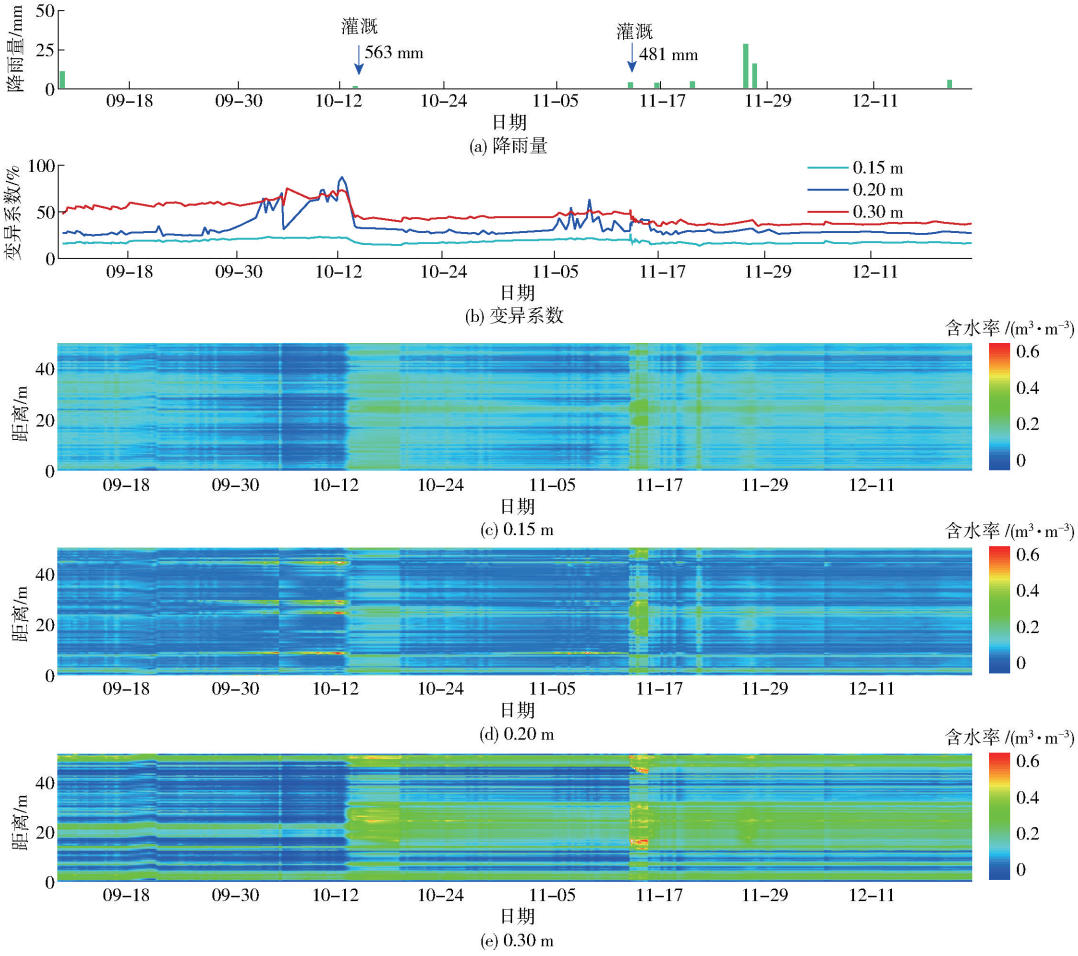

图 6 土壤水分时空分布

Fig. 6 Spatial and temporal distribution of soil moisture

2.3 基于 AHFO 法的滴灌过程土壤含水率动态变化

通过 AHFO 法监测滴灌过程的土壤水分,可以发现灌溉过程的土壤水分动态变化与土壤质地密切相关,土壤质地的空间变异决定了土壤水分的分布格局(图 7)。对比 3 个土层,0.15 m 土层在灌溉中和结束以后土壤水分分布较均匀(图 7a、7d),因为土壤质地在该土层空间变异较小(图 7l)。0.20、0.30 m 土层土壤含水率集中分布在 20 ~ 30 m 之间,30 ~ 40 m 之间土壤含水率较低(图 7b、7c、7e、7f)。主要是因为在 20 ~ 30 m 之间土壤砾石和砂粒含量较低,粘粒含量较高增强了土壤的持水性,而在 30 ~ 40 m 之间砾石、砂粒和粘粒含量却刚好相反(图 7i ~ 7k)。

灌溉开始后,土壤含水率迅速增大,增加速率不断减小,至灌溉后的 18 h,土壤水分几乎不再增加,达到了最大含水率(0.18 ~ 0.45 m^3/m^3),说明此时土壤水分达到了饱和或均匀流的状态。在灌溉结束后(图 7d ~ 7f),0.15、0.2 m 的土层含水率因粘粒含量低而迅速减小,0.3 m 土层因为粘粒含量较大,持水能力较强,灌溉结束后含水率降低得较为缓慢,呈现较大的水分贮存。因此,研究区 0.3 m 处的土层增强土壤水分贮存,有利于水分保持及作物生长。在灌溉结束 6 h 之后,土壤水分不再减小而达到了稳定状态(下文称为稳定土壤含水率)。在灌溉中达到的最大土壤含水率和灌溉结束后达到的稳定土壤含水率都具有较大的空间变异(图 7g、7h),并且 0.3 m 土层因土壤质地空间变异最大而导致该土层二者的空间变异最大。相对稳定土壤含水率(相对稳定含水率为每个位置的稳定含水率除以其均值)与砾石含量呈显著负相关(图 8),且相关系数在 3 种粒级中最高,说明砾石含量主导了该丘陵区土壤水分的空间分布。因此 AHFO 法可以获取灌溉过

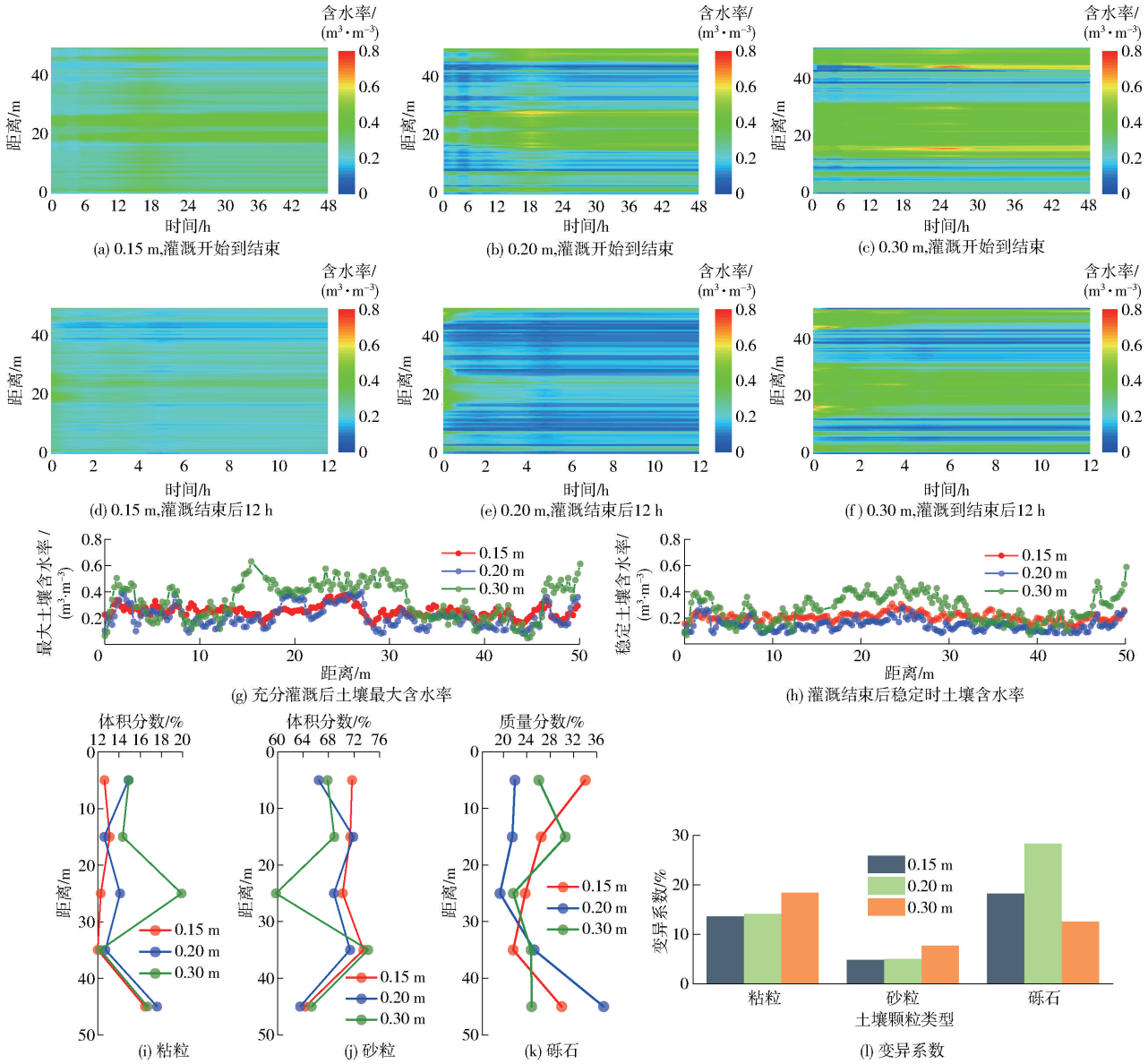

图 7　灌溉开始到结束和灌溉结束后土壤含水率

Fig. 7　Soil moisture content from beginning to end of irrigation and after irrigation

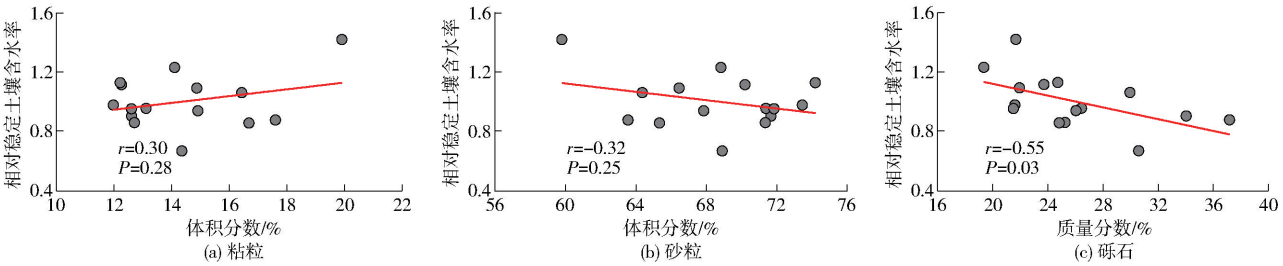

图 8　相对稳定土壤含水率与土壤质地的相关性

Fig. 8　Correlation between relatively stable soil moisture content and soil texture

程中土壤水分动态变化,从而得知土壤含水率达到最大持水上限的含水率及具体时间,进而精确把控灌溉的时间和灌溉量,避免过量灌溉造成水源浪费。

3　讨论

3.1　不同土壤类型的土壤含水率测量精度

本研究利用 AHFO 法测量了砾石土壤滴灌下的土壤水分,一方面砾石会增大光缆与土壤颗粒的接触空隙从而影响热传导,另一方面砾石的存在会增大土壤的异质性,最后降低水分测量精度。研究区土壤中除了砂粒含量变异系数小于 10%,为弱变异外,砾石和粘粒含量则为中等程度变异,且砾石的空间变异最大(图 7l)。对比分析不同土壤类型的测试结果可以看出(图 9),对于砂壤土,SAYDE

等[23]使用 Silixa 型仪器的测量精度在 0.001 6 ~ 0.024 m^3/m^3之间,测量精度高于其他研究,但其采用室内装填土校准的方法存在破坏土壤结构的弊端。STRIEGL 等[22]虽然测试的是细质粉壤土,因为采用的 Sensortran 型仪器测温精度较低,使其土壤含水率测量误差较大。GAMAGE 等[24]在砂壤土玉米地进行了试验,当含水率较低时,土壤水分测量精度与本研究相近,而在高含水率水平时高于本研究。值得注意的是,在种植作物的情况下,作物根系可能会带来土壤异质性、增大光缆与土壤的接触空隙等问题,给水分测量带来误差。因此,在假设没有作物的情况下,GAMAGE 等[24]在砂壤土中的测量精度应高于本研究砾石土壤的测量精度。结合在不同土壤类型的测量结果表明,含有砾石的土壤可能会一定程度降低 AHFO 法测量土壤含水率的精度,未来应进一步考虑砾石土壤与光缆之间接触热阻的影响。

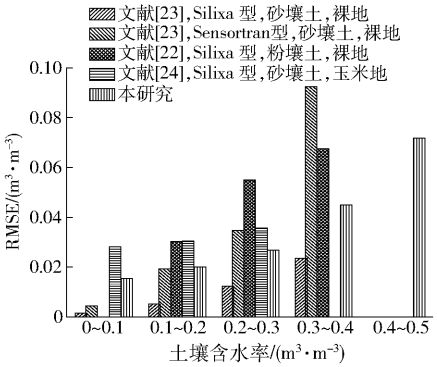

图 9 文献中不同含水率范围的水分测量精度

Fig. 9 Moisture measurement accuracy for different moisture content ranges in literatures

3.2 AHFO 法测量土壤含水率的不确定性

主动加热光纤法是近十年发展起来测量土壤水分的一种新方法,与热脉冲探针法在原理上具有相似性[18],但又因与探针结构上的区别,导致存在一些不确定性。在解析光纤温度变化对热脉冲的响应过程中,太阳辐射给光纤提供了额外的热源,可以通过减去加热前短时间内温度线性回归值去除背景温度的影响[30]。从热传导角度看,光纤与土壤的接触程度也是一个重要的影响因素,但对其了解处于定性的层面[31],还有待量化光缆与土壤间的接触热阻来校正不完美接触。光缆的结构和尺寸在研究中也很少考虑到,光缆护套的热导率一般小于土壤,在加热前期热量不能迅速传递出去,温度急剧升高,但后时段的升温与土壤水分才有直接的联系,所以前期的升温可能给测量带来不确定性。在田间光缆埋设时,一般采用45°倾角的犁[23],尽量保证光缆与土壤接触紧密。但对于粗颗粒土壤,特别是砾石土壤,光缆与土壤难以避免存在接触空隙。采用交流电源给光缆加热,由于电流呈周期性变化,导致加热功率存在一定的波动,可以采用归一化的累积升温来消除这种影响[32]。另外,DTS 仪器的性能也对测量精度有很大影响,SAYDE 等[23]的研究表明,在相同的热脉冲和水分状况条件下,Silixa 型仪器测量土壤含水率精度比 Sensortran 型高出 3 倍。最后,作物根系生长在土壤中穿插以及土壤冻融循环可能也会给测量带来一些不确定因素。

3.3 应用 AHFO 法测量土壤含水率的问题分析

精准灌溉是农业可持续发展需要解决的重要问题[33]。精准灌溉的实现需要绘制高分辨率土壤水分的四维时空分布图。因此,通过 DTS 高时空分辨率监测田间土壤水分对精准灌溉的实施具有巨大潜力,但也存在诸多挑战。首先,田间土壤的异质性增加了校准曲线获取的难度和工作量,这意味着需要在田间不同位置布设很多的 TDR。校准曲线可以接受一定程度的土壤空间变异,如本研究中,一个土层对应一条校准曲线就能满足需求。其次,加热光缆分布式温度传感系统与灌溉系统的耦合也是一个难题。对于滴灌系统,在考虑光缆布置在滴灌管的什么位置才能更全面地掌控田间土壤水分,滴灌管和光缆在田间如何机械化平行布设。光缆护套在利物碰触下容易破损,在田间需要机械化耕作、种植时,埋在地下的光缆如何有效避开机械作业的破坏,或多年生作物,如苜蓿、葡萄等可以避开这些考虑。同样需要考虑的是,DTS 价格昂贵,目前多用于基础研究,还未广泛应用到田间土壤水分监测及农业生产实践。如果能降低 DTS 仪器的成本并提高测温精度和分辨率,DTS 必将成为实现农业精准灌溉的很大助力。

4 结论

(1)将 AHFO 法测定土壤含水率从细颗粒土壤扩展到砾石土壤,验证结果表明 AHFO 法可以较为准确地测定砾石区的土壤含水率。

(2)采用 AHFO 法监测的土壤含水率对灌溉、蒸发和降雨具有很好的响应。

(3)采用 AHFO 法测得的土壤含水率的空间分布与砾石含量具有显著相关关系($P < 0.05$),说明砾石含量影响该区域土壤含水率的空间变异。

参 考 文 献

[1] TULLER M, BABAEIAN E, JONES S B, et al. The paramount societal impact of soil moisture [J/OL]. EOS, 2019. https://

doi. org/10. 1029/2019EO128569.
[2] LI X, ZHAO N, JIN R, et al. Internet of Things to network smart devices for ecosystem monitoring [J/OL]. Sci. Bull. , 2019. https://doi. org/10. 1016/j. scib. 2019. 07. 004.
[3] BROCCA L, CIABATTA L, MASSARI C, et al. Soil moisture for hydrological applications: open questions and new opportunities [J/OL]. Water, 2017. DOI:10. 3390/w9020140.
[4] JU H, VAN DER VELDE M, LIN E, et al. The impacts of climate change on agricultural production systems in China [J]. Climatic Change, 2013, 120(1 - 2): 313 - 324.
[5] 徐文静, 王翔翔, 施六林, 等. 中国节水灌溉技术现状与发展趋势研究 [J]. 中国农学通报, 2016, 32(11): 184 - 187.
[6] LAMM F R. Cotton, tomato, corn, and onion production with subsurface drip irrigation: a review [J]. ASABE Irrigation Symposium,2016, 59(1): 263 - 278.
[7] DOUH B, BOUJELBEN A. Improving water use efficiency for a sustainable productivity of agricultural systems with using subsurface drip irrigation [J]. Journal of Agricultural Science and Technology B,2011(1):881 - 888.
[8] BADR A E, ABUARAB M E. Soil moisture distribution patterns under surface and subsurface drip irrigation systems in sandy soil using neutron scattering technique [J]. Irrigation Sci. ,2013, 31(3): 317 - 332.
[9] DOMINGUEZ-NINO J M, OLIVER-MANERA J, ARBAT G, et al. Analysis of the variability in soil moisture measurements by capacitance sensors in a drip-irrigated orchard [J]. Sensors, 2020, 20(8): 5100.
[10] SOULIS K X, ELMALOGLOU S, DERCAS N. Investigating the effects of soil moisture sensors positioning and accuracy on soil moisture based drip irrigation scheduling systems [J]. Agricultural Water Management, 2015, 148:258 - 268.
[11] LI D, SCHR N M, KHLI M, et al. Can drip irrigation be scheduled with cosmic-ray neutron sensing? [J]. Vadose Zone Journal, 2019, 18(1): 190053.
[12] DES TOMBE B F, BAKKER M, SMITS F, et al. Estimation of the variation in specific discharge over large depth using distributed temperature sensing (DTS) measurements of the heat pulse response [J]. Water Resources Research, 2019, 55(1): 811 - 826.
[13] SCHILPEROORT B, COENDERS-GERRITS M, LUXEMBURG W, et al. Technical note: using distributed temperature sensing for Bowen ratio evaporation measurements [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2018, 22(1): 819 - 830.
[14] SEYFRIED M, LINK T, MARKS D, et al. Soil temperature variability in complex terrain measured using fiber-optic distributed temperature sensing [J]. Vadose Zone Journal, 2016, 15(6):1 - 18.
[15] BLACKWELL J H. A transient-flow method for determination of thermal constants of insulating materials in bulk part I—theory [J]. Journal of Applied Physics, 1954, 25(2): 137 - 144.
[16] DE VRIES D A. On the cylindrical probe method of measuring thermal conductivity with special reference to soils: 1. Extension of theory and discussion of probe characteristics [J]. Austjphys, 1958, 11(2): 255 - 271.
[17] MOENCH A F, EVANS D D. Thermal conductivity and diffusivity of soil using a cylindrical heat source [J]. Proceedings Soil Science Society of America, 1970, 34(3): 377 - 381.
[18] HE H, DYCK M F, HORTON R, et al. Distributed temperature sensing for soil physical measurements and its similarity to heat pulse method [J]. Adv. Agron. ,2018, 148:173 - 230.
[19] LI M, SI B C, HU W, et al. Single-probe heat pulse method for soil water content determination: comparison of methods [J]. Vadose Zone Journal, 2016,15(7):1 - 13.
[20] SAYDE C, GREGORY C, GIL-RODRIGUEZ M, et al. Feasibility of soil moisture monitoring with heated fiber optics [J]. Water Resources Research, 2010, 46(6):W06201.
[21] 胡优, 李敏, 任妲烨, 等. 基于加热光纤分布式温度传感器的土壤含水率测定方法 [J]. 农业工程学报, 2019, 35(10): 42 - 49.
[22] STRIEGL A M, LOHEIDE S P. Heated distributed temperature sensing for field scale soil moisture monitoring [J]. Ground Water, 2012, 50(3): 340 - 347.
[23] SAYDE C, BUELGA J B, RODRIGUEZ-SINOBAS L, et al. Mapping variability of soil water content and flux across 1 - 1 000 m scales using the actively heated fiber optic method [J]. Water Resources Research, 2015, 50(9): 7302 - 7317.
[24] GAMAGE D N V, BISWAS A, STRACHAN I B, et al. Soil water measurement using actively heated fiber optics at field scale [J]. Sensors, 2018, 18(4): 1116.
[25] GIL-RODRIGUEZ M, RODRIGUEZ-SINOBAS L, BENITEZ-BUELGA J, et al. Application of active heat pulse method with fiber optic temperature sensing for estimation of wetting bulbs and water distribution in drip emitters [J]. Agricultural Water Management, 2013, 12:72 - 78.
[26] GAMAGE D N V, BISWAS A, STRACHAN I B. Actively heated fiber optics method to monitor three-dimensional wetting patterns under drip irrigation [J]. Agricultural Water Management, 2018, 210:243 - 251.
[27] CIOCCA F, LUNATI I, VAN D G N, et al. Heated optical fiber for distributed soil-moisture measurements: a lysimeter experiment [J]. Vadose Zone Journal, 2012, 11(4): 2344 - 2354.
[28] TYLER S W, SELKER J S, HAUSNER M B, et al. Environmental temperature sensing using Raman spectra DTS fiber-optic methods [J]. Water Resources Research, 2009, 45:W00D23.
[29] HAUSNER M B, SUAREZ F, GLANDER K E, et al. Calibrating single-ended fiber-optic Raman spectra distributed temperature sensing data [J]. Sensors, 2011, 11(11): 10859 - 10879.
[30] DONG J, AGLIATA R, STEELE-DUNNE S, et al. The impacts of heating strategy on soil moisture estimation using actively heated fiber optics [J]. Sensors, 2017,17(9):2102.
[31] SOURBEER J J, LOHEIDE S P. Obstacles to long-term soil moisture monitoring with heated distributed temperature sensing [J]. Hydrological Processes, 2016, 30(7): 1017 - 1035.
[32] GAMAGE D N V, BISWAS A, STRACHAN I B. Field water balance closure with actively heated fiber-optics and point-based soil water sensors [J]. Water, 2019, 11(1):135.
[33] PALLOTTINO F, BIOCCA M, NARDI P, et al. Science mapping approach to analyze the research evolution on precision agriculture: world, EU and Italian situation [J]. Precision Agriculture, 2018, 19(6): 1011 - 1026.