

DOI: 10.11779/CJGE202208009

非饱和土水分迁移感测的主动加热光纤光栅法试验研究

刘喜凤¹, 朱鸿鹄^{*1,2}, 王家琛^{1,3,4}, 李杰¹, 王静¹, 曹鼎峰^{2,5}, 施斌¹

(1. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏南京 200023; 2. 广东省海洋土木工程重点实验室, 广东广州 510275; 3. 中国长江三峡集团雄安分公司, 河北雄安新区 071700; 4. 长江三峡集团雄安能源有限公司, 河北雄安新区 071700; 5. 中山大学土木工程学院, 广东广州 510275)

摘要: 非饱和土水分迁移是诱发多种地质灾害和环境岩土问题的重要因素, 对其机理的认识因测试技术的不足尚不明确。为探究主动加热光纤光栅(AH-FBG)法监测非饱和土水分迁移的效果, 分析单探针和双探针AH-FBG法的误差来源及分布特征, 开展了一组室内土柱试验。在试验中同时采用AH-FBG法和传统的频域反射(FDR)法监测毛细水上升和水分蒸发的全过程, 对比单探针法和双探针法的监测精度, 分析不同方法的适用工况。结果表明: 基于单探针AH-FBG的3种数据分析方法中, 热导率法的监测精度最高, 但是单探针法在监测毛细水上升过程中, 当湿润锋刚没过探针感测位置时, 受纵向传热的影响会使得测量的含水率值偏低; 相比于单探针法, 双探针法受纵向传热的影响更大, 监测土体水分迁移有较大误差, 误差大小与测点位置处的土体含水率值及土柱纵剖面的含水率分布情况有关; 为减小纵向传热影响, 从传感器结构和数据处理两方面提出了AH-FBG法的改进措施。

关键词: 主动加热光纤(AHFO)法; 单探针法; 双探针法; 蒸发; 毛细水

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2022)08-1443-10

作者简介: 刘喜凤(1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事地质与岩土工程监测方面的研究工作。E-mail: liuxf@smail.nju.edu.cn。

Experimental study on actively heated fiber Bragg grating method for sensing seepage in unsaturated soils

LIU Xi-feng¹, ZHU Hong-hu^{1,2}, WANG Jia-chen^{1,3,4}, LI Jie¹, WANG Jing¹, CAO Ding-feng^{2,5}, SHI Bin¹

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. Guangdong Key Laboratory of Marine Civil Engineering, Guangzhou 510275, China; 3. Xiong'an Branch, China Three Gorges Corporation, Xiong'an 071700, China; 4. Yangtze Three Gorges Group Xiong'an Energy Company Limited, Xiong'an 071700, China; 5. School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: The seepage in unsaturated soils is a key factor that induces various geohazards and geoenvironmental problems, but the mechanism has not been clearly understood due to the limitations of measuring techniques. A series of soil column tests are carried out to study the performance of actively heated fiber Bragg grating (AH-FBG) in monitoring the seepage in unsaturated soils and analyze the error sources and distribution characteristics of the single-probe and dual-probe methods. Both the AH-FBG and the frequency domain reflectometry are used to monitor the whole process of rise of capillary water and water evaporation. The monitoring accuracy of the single-probe and dual-probe methods is compared, and the applicable conditions of different methods are analyzed. The results show that the thermal conductivity method has the highest accuracy among the three data analysis methods based on the single-probe AH-FBG method. However, when the wetting front just exceeds the sensing section of the probe in the process of the rise of capillary water, the measured moisture content will be low due to the influences of longitudinal heat transfer. Compared with the single-probe method, the dual-probe method is more affected by longitudinal heat transfer and has a larger error in monitoring the seepage. The error is related to the value of moisture content of soils at the position of the measuring point and the distribution of moisture content of soils in the vertical profile of the soil column. In order to reduce the influences of longitudinal heat transfer, the improvement measures of AH-FBG method are proposed from two aspects of sensor structure and data processing.

Key words: actively heated fiber optic method; single-probe method; dual-probe method; evaporation; capillary water

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1505104); 广东省海洋土木工程重点实验室开放基金项目(LMCE202006); 软弱土与环境土工教育部重点实验室开放基金项目(2019P05)

收稿日期: 2021-05-16

*通信作者(E-mail: zhh@nju.edu.cn)

0 引言

含水率是非饱和土的基本参量，在很大程度上控制着土体的物理力学性质^[1]。土壤中的水分迁移直接影响植物的水循环和生长过程，且与多种地质灾害、环境岩土问题密切相关^[2]。例如，降雨入渗和毛细水上升会增加土壤的湿度，降低土体强度和稳定性^[3]；水分蒸发可能导致土壤收缩、开裂，不仅影响土壤的水力特性，而且会削弱土壤的工程特性^[4]。因此，非饱和土水分迁移的准确监测对于预防地质灾害、指导工程实践具有重要的意义。

目前，这一领域常用的测量方法主要有时域反射法 (time domain reflectometry, 简称 TDR)、频域反射法 (frequency domain reflectometry, 简称 FDR)、中子仪法、电阻率法、遥感法、探针热脉冲法等。TDR 法、FDR 法是测量浅层土壤含水率的常用方法，但其测量精度易受土壤性质的影响，且受探头埋深限制，难以测量深部土层的含水率^[5-6]。中子仪法可在不同土壤深度进行测量，但成本高且具有放射性^[7]。电阻率法和遥感法对土体扰动小，适用于浅部地质体探测，但其结果存在多解性，其精度易受环境因素的影响^[8-9]。探针热脉冲法利用土体导热性质的差异来测量含水率，分为单探针法和双探针法两类^[10]。该方法具有简便易用、无放射性等优点^[10-11]，但以金属探针为主，多为单点测量，适用于土体浅表少量点位的原位监测。

光纤感测技术在 20 世纪末开始兴起，由于光纤传感器具有小且轻、柔且韧、抗腐蚀和电磁干扰、可移植性和可嵌入性强等突出的优点，已被成功应用于地质与岩土工程监测领域^[12]。利用主动加热光纤 (actively heated fiber optic, 简称 AHFO) 原理，可对埋入土体的光纤探针脉冲加热，通过监测土体温度场来获取原位土体的含水率^[13-18]。主动加热光纤光栅 (actively heated fiber Bragg grating, 简称 AH-FBG)

技术是基于高精度光纤光栅测温的一种新型 AHFO 方法，该方法将探针热脉冲法从点式测量扩展到准分布式测量，可以实现大面积、高精度的水分场自动监测^[19-22]。但该方法应用于土体水分迁移监测的案例不多，其性能有待进一步检验。

本文在室内土柱试验中，用 AH-FBG 传感器对非饱和土毛细水上升和蒸发过程进行了连续监测，分析对比了单探针和双探针 AH-FBG 法的监测效果，并探究了它们的误差来源，讨论了不同方法的适用工况。相关结论能够为 AH-FBG 技术在地下水分迁移监测领域的应用和完善提供参考依据。

1 基于 AH-FBG 的土壤水分监测技术

AHFO 法指对埋入土体的光纤传感器内部电阻丝通电加热，由于水与土颗粒、空气的热导率不同，热量在不同含水率土体中的扩散速度会存在差异，从而通过分析土体温度变化特征可以达到测试土壤水分的目的。本文试验采用的测温光纤传感器为 FBG 传感器，FBG 具有反射特定波长光波的特性，应变和温度会使光栅反射光谱中心波长发生漂移，因此可以通过分析光栅反射光谱得出相应 FBG 的应变和温度变化量^[12]。根据装置设置和分析原理的不同，AH-FBG 法又可以分为单探针法和双探针法两类。

1.1 单探针法

单探针法中，电阻丝和含有 FBG 的光纤通过封装管组装成一根探针。利用电阻丝通电加热，向土体释放热脉冲，同时 FBG 监测这个过程中的温度变化。由于土体的导热性质与含水率密切相关^[23-24]，可以通过标定加热过程中的升温特征参数来测定土体含水率。根据选取的标定参数不同，单探针法又可分为最大升温值法、累计升温值法和热导率法 3 种，其原理如图 1 所示。

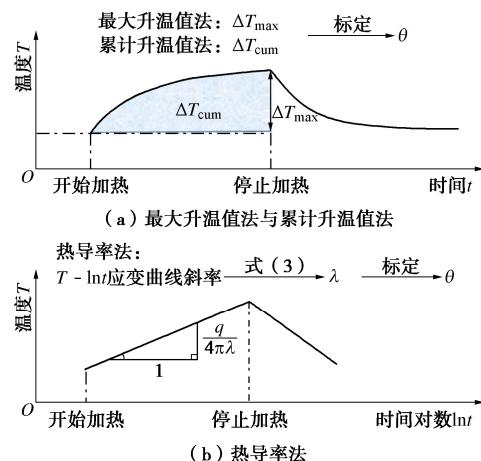


图 1 单探针 AH-FBG 法监测原理

Fig. 1 Principle of monitoring by single-probe AH-FBG method

(1) 最大升温值法(特征值法): 最大升温值 ΔT_{\max} 指加热过程中温度升高的最大值， ΔT_{\max} 与含水率之间为负相关关系。通过标定建立两者间的经验关系，便能根据获取的最大升温值推求待测土体的含水率^[19-21, 25]。

$$\Delta T_{\max} = T_1 - T_0 \quad , \quad (1)$$

式中， T_0 为加热起始时的温度， T_1 为加热停止时的温度。

(2) 累计升温值法: 累计升温值 ΔT_{cum} 最早由 Sayde 等^[13]提出，指的是加热过程中升温值对时间的积分：

$$\Delta T_{\text{cum}} = \int_{T_0}^{T_1} \Delta T_i dt \quad , \quad (2)$$

该值与含水率之间为负相关关系, 应用前需要进行标定^[17]。

(3) 热导率法(斜率法): 该方法把探针看成被均质且各向同性土体包裹的无限长线性热源^[22], 结合传热学原理可知, 土体在加热持续时间为 t 时的温度增量 ΔT 与时间自然对数 $\ln t$ 间存在线性关系:

$$\Delta T = -\frac{q}{4\pi\lambda} \ln t + B \quad , \quad (3)$$

式中, q 为单位长度加热电阻丝在单位时间内传输的热量, λ 为土体热导率, B 为与土体性质相关的常数。由式(3)可知, 在加热功率不变的情况下, 可以由 $\Delta T - \ln t$ 直线的斜率推求 λ 。由于土体含水率越高, 热导率越大, 因此可以通过标定建立两者之间的经验关系。

1.2 双探针法

双探针法需要平行排布两根探针, 一根用于加热(加热探针), 一根用于感测(感测探针)。加热探针内部的电阻丝通电加热, 感测探针内部的 FBG 能够监测周围土体温度场的变化, 如图 2 所示。

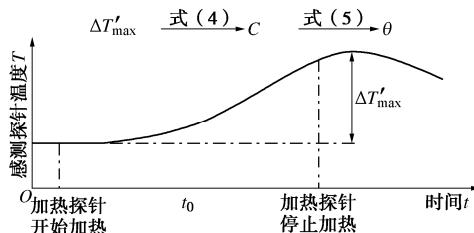


图 2 双探针 AH-FBG 法监测原理

Fig. 2 Principle of monitoring by dual-probe AH-FBG method

双探针法推导假设与热导率法一致, 假定加热探针为被无限均质且各向同性土壤包裹的无限长均质线性热源。在此理想假设下, 若对加热探针脉冲加热, 则感测探针 FBG 监测的最大升温值 $\Delta T'_{\text{max}}$ 为^[26]

$$\Delta T'_{\text{max}} = \frac{q'}{e\pi r^2 C} \quad , \quad (4)$$

式中, q' 为加热探针电阻丝单位长度传输的热量, e 为欧拉常数(约为 0.5772), r 为感测探针与加热探针间的距离, C 为土体的体积热容, 为土壤各成分热容的加权总和。由于常温下空气的体积热容(约 1.3×10^{-3} J/cm³·K), 远小于水和土颗粒的体积热容, 可忽略空气的影响。因此, 土体的体积热容可表示为

$$C = \rho_b c_s + \rho_w c_w \theta \quad , \quad (5)$$

式中, ρ_b 为土壤的干密度, c_s 为土颗粒的质量热容, ρ_w 为水的密度, c_w 为水的质量热容, θ 为土壤体积

含水率。利用式(5)可求得土壤体积含水率^[27-29]。

随着双探针理论的发展, 为减小加热持续时间较长造成的误差, Knight 等^[30]对模型进行了修正, 提出了一个改进模型:

$$\Delta T'_{\text{max}} = \frac{q'}{e\pi r^2 C} = \left| 1 - \frac{\varepsilon^2}{8} \left\{ \frac{1}{3} + \varepsilon \left[\frac{1}{3} + \frac{\varepsilon}{8} \left(\frac{5}{2} + \frac{7\varepsilon}{3} \right) \right] \right\} \right| \quad , \quad (6)$$

式中, $\varepsilon = t_0 / t_m$, t_0 为加热持续时间, t_m 为感测光纤温度到达最大值的时间。

单探针法中的热导率法和双探针法都是基于理想假设推导, 要求待测土体均质且各向同性。显然, 在水分迁移的过程中, 土体并不能满足理想假设。基于此, 本文在试验的基础上研究了水分迁移过程中土体含水率分布的不均匀性对 AH-FBG 法含水率测量精度的影响, 分析不同 AH-FBG 法的误差分布特征及适用工况。

2 室内试验

2.1 试验材料

为探究 AH-FBG 法监测非饱和土水分迁移的可行性和适用性, 在南京大学大地探测与感知研究院开展了室内土柱试验。试验用土为级配良好的砂土, 干密度为 1.7 g/cm^3 , 饱和渗透系数为 $1.25 \times 10^{-4} \text{ m/s}$, 土样的粒径分布曲线如图 3 所示。

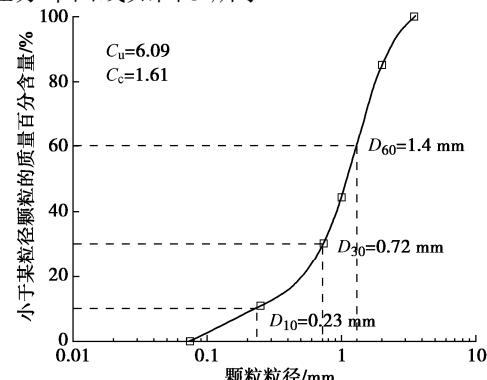


图 3 土样粒径分布曲线

Fig. 3 Grain-size distribution curve of soil sample

试验所用的有机玻璃容器内高 65 cm, 内径 24 cm, 上端开口, 底端的水阀连接马氏瓶, 水阀与承土隔网高差为 5 cm。试验采用的 AH-FBG 传感器由苏州南智传感科技有限公司定制, 总长 67 cm。该传感器由四孔刚玉管封装, 内部贯穿有光纤和加热电阻丝, 光纤上串联了 5 个 FBG, 栅距为 10 cm, 如图 4 所示。为了验证 AH-FBG 法监测水分迁移的效果, 本试验同时采用频域反射技术(FDR)监测土体的含水率, 所用传感器为 METER Group 公司生产的 EC-5 型含水率传感器, 该传感器在试验前已采用烘干法进行校准。

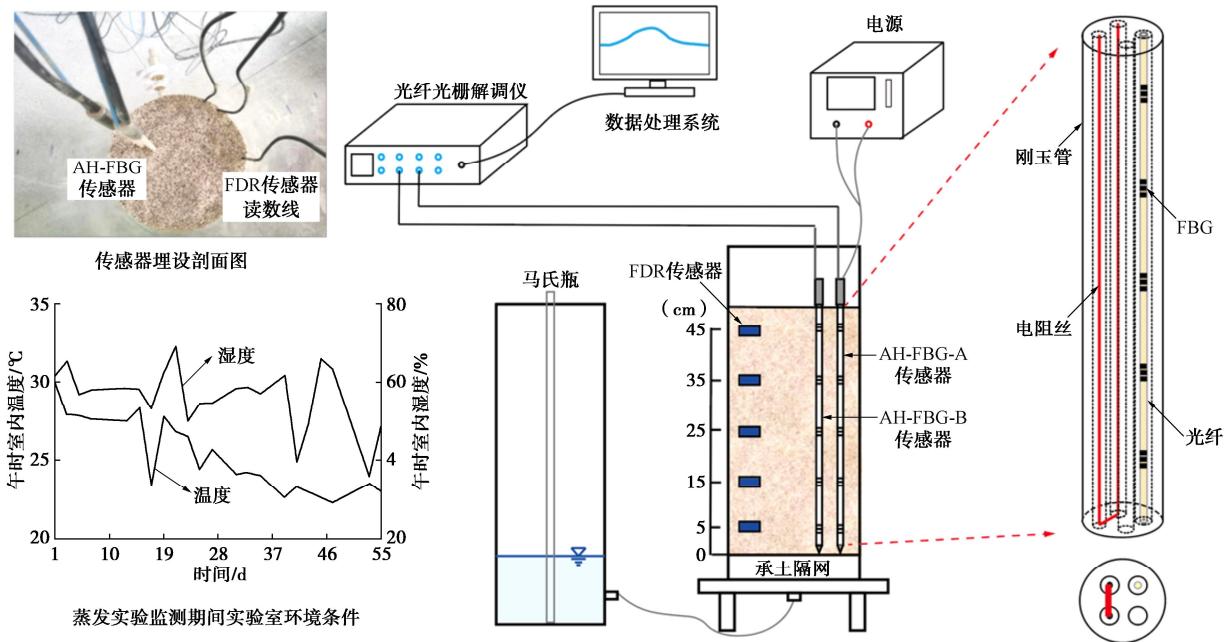


图 4 试验装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of experimental equipment

2.2 试验方案

将土烘干后分层压实填入有机玻璃容器，填土总高度为 50 cm。在填土时竖直平行埋设两个 AH-FBG 传感器（编号为 AH-FBG-A、AH-FBG-B），传感器中心间距为 3.1 cm。每个传感器内串联了 5 个 FBG，分别位于距土柱底部 5, 15, 25, 35, 45 cm 高度处，在 FBG 同一高度布设 5 个 FDR 传感器。AH-FBG-A 传感器中的加热电阻丝通过导线和加热电源连接，AH-FBG-A 和 AH-FBG-B 传感器中的光纤通过跳线和 FBG 解调仪连接。

室内土柱试验包括毛细水上升试验和蒸发试验两组。试验过程中只对 AH-FBG-A 传感器通电加热。因此，AH-FBG-A 传感器内部加热和感测同时进行，满足单探针法条件，故用单探针法对监测数据进行分析。而 AH-FBG-B 传感器（感测探针）与 AH-FBG-A 传感器（加热探针）共同构成双探针，满足双探针法条件，故用双探针法对 AH-FBG-B 传感器监测数据进行分析。加热过程中利用 FBG 解调仪采集各 FBG 的中心波长读数，经数据处理可得到 AH-FBG-A 传感器的最大升温值 ΔT_{\max} 、累计升温值 ΔT_{cum} 、热导率 λ 、以及 AH-FBG-B 传感器的最大升温值 $\Delta T'_{\max}$ ，组成 1 组 AH-FBG 法试验数据。

由于 AH-FBG-A 传感器加热功率过大、加热时间过长会影响土柱内部水分迁移，而加热功率过小、加热时间过短会使得 AH-FBG-B 传感器无法感测到明显的温度上升，从而影响含水率测定的灵敏度。故本文在参考前人经验的基础上^[18, 31-32]，在试验开始前选用不同加热功率对 AH-FBG-A 传感器主动加热以测试

传感器的升温效果。根据测试结果综合考虑，本试验选取单次加热功率为 39.7 W/m，加热时间为 12 min，以使得单探针法和双探针法同时适用。

在毛细水上升试验中，利用马氏瓶给土柱供水，保持马氏瓶水面与承土隔网高程一致。试验初期由于毛细水上升速度较快，将传感器加热、采集数据的时间间隔设置为 30 min。随着毛细水上升速度逐渐减小，不断增大数据采集的时间间隔。毛细水上升试验总共历时 27 d，得到 20 组 AH-FBG 法试验数据。

在蒸发试验开始前，将马氏瓶抬高，通过底部水阀给土柱给水，直到水面没过土柱顶面，关闭水阀后使土柱自然蒸发。蒸发试验中每隔 1~2 d 采集一次监测数据。蒸发试验历时 53 d，得到 20 组 AH-FBG 法试验数据。需要说明的是，在蒸发试验中容器底部不慎出现少量漏水的情况，对水分迁移产生了一定影响。

3 试验结果与分析

3.1 单探针法监测精度

毛细水上升试验和蒸发试验共获取了 40 组 AH-FBG 法试验数据。利用其中 AH-FBG-A 传感器的监测数据对单探针 AH-FBG 法的监测精度进行分析。

由图 4 可知，AH-FBG 传感器内的加热电阻丝和光纤与刚玉管之间为空气充填，由于空气与管壁热性质差异较大，且不能保证传感器内的电阻丝和光纤全长都位于管孔中同一位置，因此探针内各点的传热效应有所不同。同时，土柱不同位置处的密实度不可避免地存在差异。因此，为提高监测精度，需将 AH-FBG 传感器中的 5 个 FBG 分开标定。从 40 组 AH-FBG 法

试验数据中随机挑选 20 组, 用于拟合单探针不同数据分析方法中的标定参数 (ΔT_{\max} , ΔT_{cum} , λ) 与体积含水率 θ 之间的标定关系。标定曲线如图 5 所示, 由幂函数拟合而成。

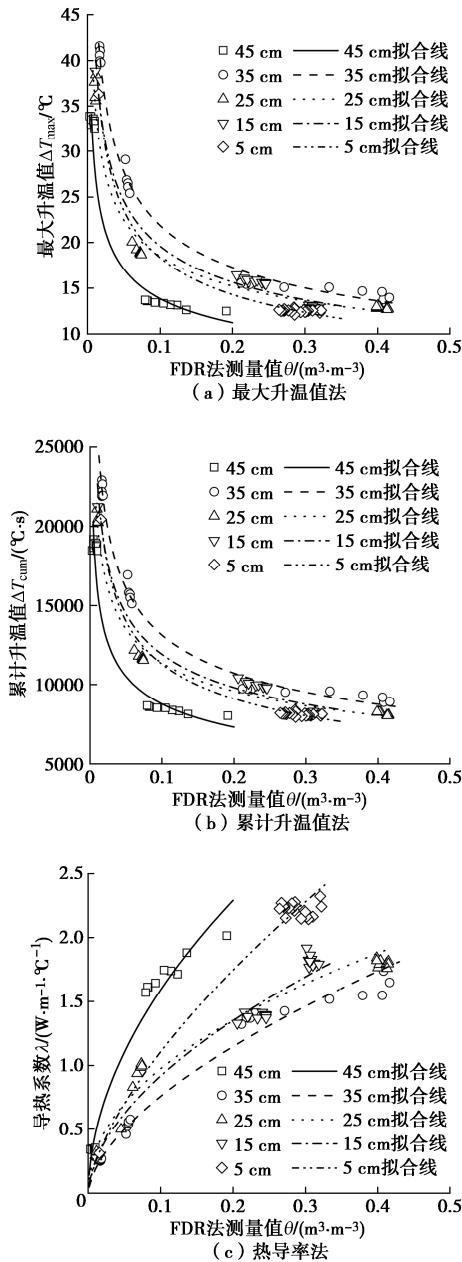


图 5 单探针法标定曲线

Fig. 5 Calibration curves by single-probe method

由图 5 可知, 土体含水率越高, ΔT_{\max} 和 ΔT_{cum} 越小, λ 越大。3 种单探针方法都是在低含水率时标定曲线斜率较大, 灵敏度高, 随含水率增加斜率放缓, 灵敏度降低。由表 1 可知, 标定曲线拟合都有较高精度, 热导率法拟合公式的指数绝对值最大, 说明热导率法的标定曲线斜率放缓幅度最小, 相较于其他两种方法在高含水率时具有更高的灵敏度。

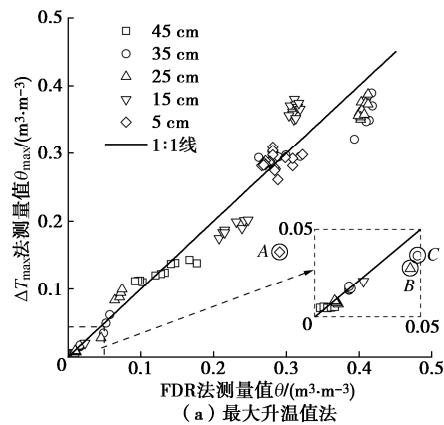
本文用除标定外剩余的 20 组 AH-FBG 法试验数据对标定曲线(表 1)推求含水率的准确性进行验证。

如图 6 所示, 最大升温值法与累计升温值法在低含水率范围内 ($\theta \leq 0.2 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) 的测量效果较好, 在高含水率范围内的测量误差相对较大。这主要是由于这两种方法标定曲线在高含水率时灵敏度较差, ΔT_{\max} 和 ΔT_{cum} 的测量误差对依据标定曲线换算得的含水率影响较大。整体而言, 单探针 3 种方法中热导率法在整个含水率范围内的测量效果最好。

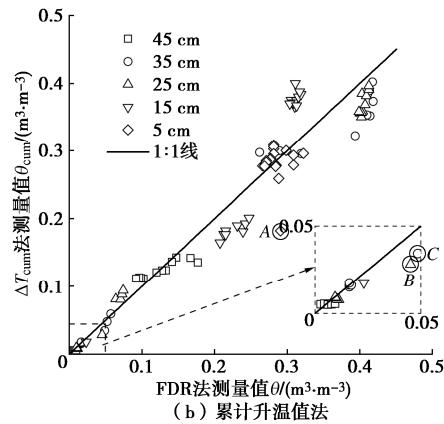
表 1 单探针法标定曲线拟合公式及拟合效果

Table 1 Fitting formula and results of calibration curve by single-probe method

分析方法	FBG 高程/cm	$y = ax^b$	R^2	RMSE	
最大升温值法	45	6.925	-0.301	0.958	2.915 °C
最大升温值法	35	9.951	-0.342	0.990	0.877 °C
最大升温值法	25	9.696	-0.280	0.980	1.407 °C
最大升温值法	15	9.290	-0.324	0.943	0.907 °C
最大升温值法	5	8.032	-0.358	0.992	0.271 °C
累计升温值法	45	4798	-0.261	0.953	1516 °C·s
累计升温值法	35	6680	-0.293	0.989	485.8 °C·s
累计升温值法	25	6403	-0.246	0.988	515.3 °C·s
累计升温值法	15	6241	-0.280	0.916	598.0 °C·s
累计升温值法	5	5519	-0.310	0.992	146.3 °C·s
热导率法	45	5.333	0.525	0.958	0.108 W·m⁻¹·°C⁻¹
热导率法	35	3.002	0.598	0.992	0.087 W·m⁻¹·°C⁻¹
热导率法	25	2.899	0.473	0.958	0.114 W·m⁻¹·°C⁻¹
热导率法	15	3.312	0.557	0.975	0.102 W·m⁻¹·°C⁻¹
热导率法	5	5.024	0.657	0.988	0.103 W·m⁻¹·°C⁻¹



(a) 最大升温值法



(b) 累计升温值法

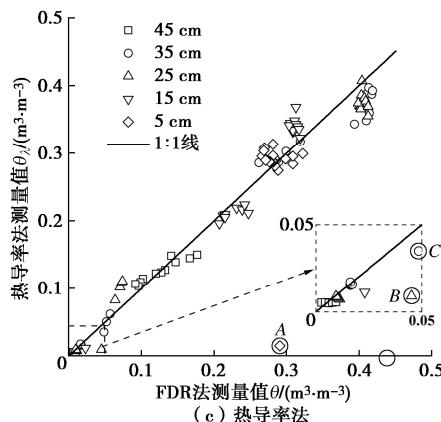


图 6 单探针法测量值与 FDR 法测量值比较

Fig. 6 Comparison of single-probe method and FDR method

除此之外, 图 6 中存在 3 个特殊点, *A* 点在所有验证数据中偏离 1:1 线最为明显, 测量误差最大, *B*, *C* 两点是在 $0 \leq \theta \leq 0.05 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ 的范围内偏离 1:1 线最大的两点, 且这 3 点的单探针法含水率测量值均低于 FDR 法测量值。*A*, *B*, *C* 三点分别由 AH-FBG-A 传感器内部距土柱底面 5, 25, 35 cm 高度处的 FBG 测得, 是毛细水上升湿润锋刚没过对应高度 FBG 时测得的数据。以湿润锋面为界, 上层为干土, 导热能力弱, 升温大; 下层为湿土, 导热能力强, 升温小, 使得不同含水率土层间存在纵向温差。由热力学第二定律可知, 热量会自发地从高温物体向低温物体传递^[33-34]。因此, 随着加热过程的持续, 热量会从低含水率位置向高含水率位置传递, 产生纵向传热。基于此, 在毛细上升湿润锋刚没过 FBG 时, 相比于埋设于相同含水率土体但沿传感器纵向含水率分布不存在明显差异的 FBG, 湿土层 FBG 测得的升温过程会受到纵向传热的影响, ΔT_{\max} , ΔT_{cum} 的值会相应增大, 所求 λ 值变小, 从而使得含水率测量值低于含水率实际值。由于纵向传热受控于土体含水率分布梯度, 因此, 单探针法含水率测量误差受以湿润锋为界的干湿土层的含水率差值的影响, 含水率差值越大, 误差越大。图 6 中 *A* 点的误差最大, 正是因为距土柱底面 5 cm 高度处的 FBG 在湿润锋面刚没过时上(干土)下(湿土)两层土的含水率差值最大。

图 7 反映了单探针法的测量效果, 整体而言, 单探针 3 种方法测量的均方根误差 RMSE 都较小, 说明单探针 AH-FBG 法能较好地描述土体毛细水上升和蒸发过程的水分迁移情况, 都可用于土体水分迁移监测。但也能发现距土柱底面 15 cm 高度处的 FBG 含水率测量误差相对较大, 这主要是由于单探针法的测量精度依赖于标定精度, 该高度处 FBG 拟合标定曲线时低含水率范围的数据量较少, 相对于其他高度处的 FBG, 标定曲线准确性较差。

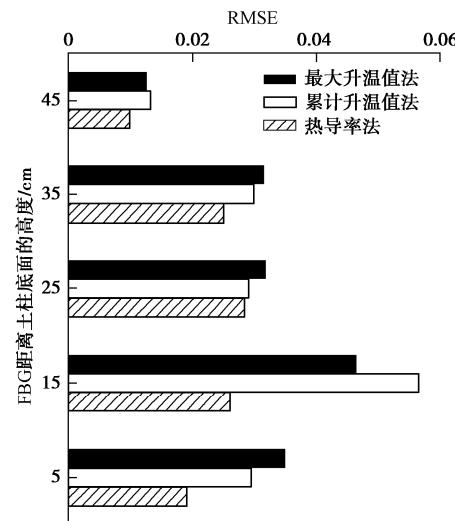


图 7 单探针法测量效果

Fig. 7 Predicted effect by single-probe method

3.2 双探针法监测精度

本文从毛细水上升试验和蒸发现象获取的试验数据中各挑选 10 组 AH-FBG-B 传感器的最大升温值 $\Delta T'_{\max}$ 数据, 依据式 (4) ~ (6) 处理得土体的体积热容值 C (图 8) 和对应的含水率值 θ (图 9)。

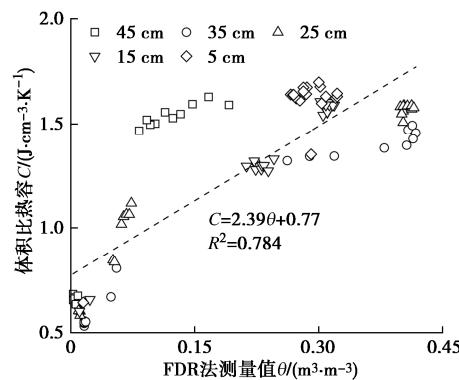


图 8 体积比热容与含水率

Fig. 8 Volume specific heat capacity and water content

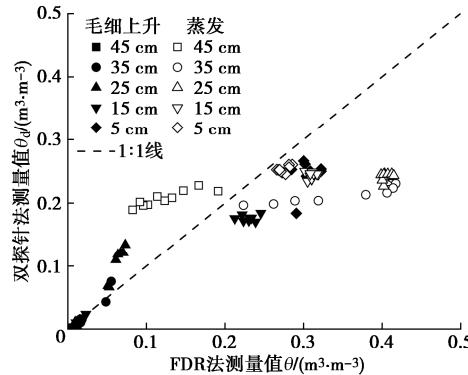


图 9 双探针法测量值与 FDR 法测量值比较

Fig. 9 Comparison between dual-probe method and FDR method

由图 8 可知土体的体积热容与含水率间的线性拟合关系式为 $C = 2.39\theta + 0.77$ 。由式 (5) 可知, C 与 θ

间的比例系数为 $\rho_w c_w$, 常温下通常取 $4.2 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$, 图中线性拟合的斜率为 2.39, 两值差距较大, 说明本文试验中双探针法求得的土体体积热容有较大误差。

图 9 显示了双探针法的土体含水率测量效果, 在含水率较低时 ($\theta \leq 0.2 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$), 双探针法测量值大多高于 FDR 法测量值, 而在高含水率范围 ($\theta > 0.2 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) 内测量值普遍较低。整体而言, 试验中双探针 AH-FBG 法监测的土体含水率误差较大, 不能准确反映土体水分迁移情况。

图 10 由在毛细水上升和蒸发过程中 FDR 传感器和双探针 AH-FBG 法测得的土壤含水率数据得到, 反映了土柱的水分迁移趋势。由于单探针 AH-FBG 法含水率测量精度较高, 监测效果较好(表 1, 图 7), 由单探针方法测得的土柱水分迁移趋势云图与由 FDR 法测得的云图大致相同, 故此处不再赘述。

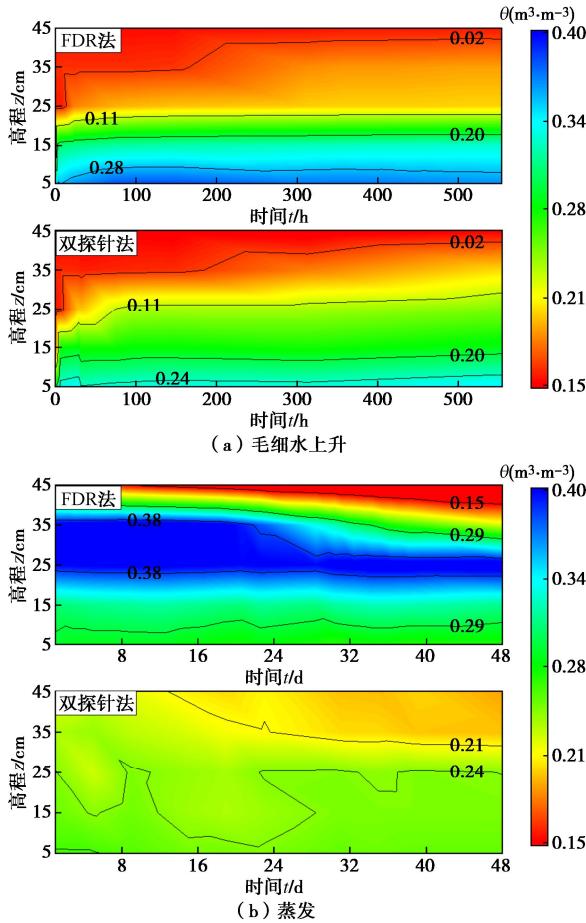


图 10 毛细水上升过程和蒸发过程水分迁移趋势

Fig. 10 Changing trend of moisture migration during capillary rise and evaporation

由图 10 可知, 相比于作为验证的 FDR 法, 双探针法监测的土柱含水率值整体误差较大。误差主要由试验过程中土柱纵剖面各高度位置处的含水率分布差异引起。在双探针法监测过程中, 低含水率位置升温

快, 高含水率位置升温慢, 土体纵向存在温差, 出现纵向传热。相比于双探针法的理想假设条件, 在纵向传热作用下, 感测探针内部的 FBG 测得的最大升温值 $\Delta T'_{\max}$ 会发生变化。低含水率位置 $\Delta T'_{\max}$ 变小, 高含水率位置 $\Delta T'_{\max}$ 变大, 从而使低含水率位置处的双探针法含水率测量值偏大, 高含水率位置处的测量值偏小, 测得的含水率范围变小, 与图 9 显示的数据误差分布情况相符。由于 AH-FBG-A 传感器加热电阻丝与 AH-FBG-B 传感器光纤间存在封装管和土体两部分, 因此纵向传热也包括探针传热和土体传热两部分。

纵向传热是由土体纵向含水率分布差异引起, 与土体纵向含水率分布梯度有关。图 11 给出了双探针法含水率测量误差与土体纵向含水率分布梯度之间的关系。图 11 中, 中间的 FBG 测点 (15, 25, 35 cm), 其含水率分布梯度由该测点与相邻两个测点的含水率差值的绝对值之和除以相邻两测点间的距离得到, 两端的 FBG 测点 (5, 45 cm) 由与相邻测点的含水率差值绝对值除以距离得到。图中散点的不同颜色对应 FDR 法实测的含水率值。

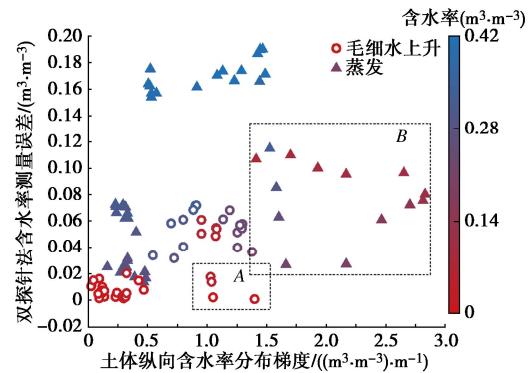


图 11 双探针法含水率测量误差分布

Fig. 11 Error distribution of water content measured by dual-probe method

由图 11 可知, 整体上说, 在土体蒸发和毛细水上升过程中, 双探针法的含水率测量误差会随着土体纵向含水率分布梯度的增加而增大。但在图中的 A、B 区域, 含水率梯度增大, 测量误差反而变小。这是由于位于 A、B 区的测量点, 监测时 FBG 测点周围土体的含水率值较低。由式 (4), (5) 可知, $\Delta T'_{\max}$ 与 C 间为反比例关系, 而 C 与 θ 之间存在线性关系, 即 $\Delta T'_{\max}$ 随 θ 增加呈现双曲线型递减变化。纵向传热直接影响 $\Delta T'_{\max}$ 的测量值, 在土体含水率较小时, 相同 $\Delta T'_{\max}$ 误差所引起的双探针法含水率测量误差要小于土体含水率较高的情况。由此可知, 纵向传热引起的测量误差不仅与土体纵向含水率分布梯度相关, 同时会受到测点位置处的土体含水率值的影响。

除此之外,由图 10, 11 可以看出,整体而言,双探针法对毛细水上升过程的监测效果要好于蒸发过程。这是由于在毛细水上升试验过程中,土柱的含水率顶部低、底部高,加热过程中纵向传热只存在一个方向,即由顶部向底部传递,受纵向传热影响较小。而在蒸发试验过程中,由于底部渗漏,土柱中部含水率最高,顶部、底部相对较低,纵向传热存在两个方向,即由顶部、底部向中部传递。相比于毛细水上升试验的监测过程,蒸发试验的监测过程中的纵向传热速度更快,受纵向传热的影响更大,双探针法的测量误差更大(图 12)。总的来说,在土体含水率沿传感器纵向方向单调变化时,若纵向含水率分布梯度小于 $0.5 \text{ (m}^3 \cdot \text{m}^{-3}\text{) / m}$, 双探针法含水率监测精度较高。含水率分布非单调变化时纵向传热引起的测量误差较大,而在监测土体含水率较低时的监测精度较高。

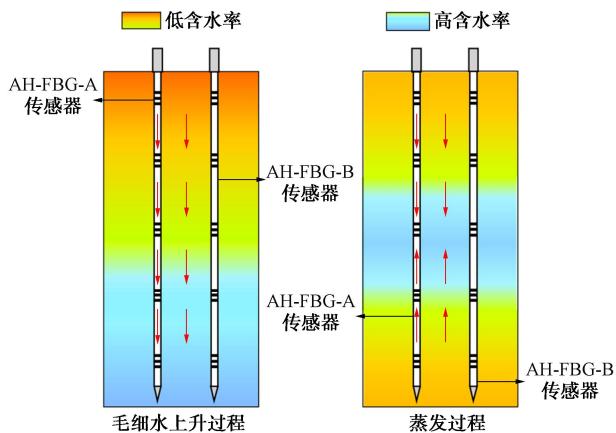


图 12 纵向传热示意图

Fig. 12 Schematic diagram of vertical heat transfer

相比于单探针法,双探针法的试验装置更为复杂且布设要求更高,但可以依据热容与含水率之间的函数关系直接求解,省去标定过程。单探针法和双探针法都会由于土体含水率纵向分布差异引起的纵向传热造成含水率测量误差,但其中单探针法受到的影响较小,监测精度明显高于双探针法。

由于在非饱和土水分迁移监测中含水率分布差异不可避免。因此,需要根据待测场地的土性、气候特征、监测精度要求等因素综合确定场地的含水率监测方案。相比于渗透性高的砂土土层,渗透性较低的黏土土层,其水分迁移速度较慢,纵向含水率分布差异较小,更适合使用 AH-FBG 法进行监测。若待测场地由多层持水性差异较大的土层构成,其纵向含水率分布差异通常较大,且传热方向不单一,双探针法的监测精度较低,更适合用单探针法进行监测。

为减小土体含水率纵向分布差异带来的 AH-FBG 法含水率测量误差,从两方面提出了改进措施:

(1) 减少纵向传热。纵向传热包括探针传热和土体传热两部分。一般来说,为使得 AH-FBG 传感器内部加热电阻丝的热量能有效传递到土体,引起土体较明显的热响应以测定含水率,传感器封装管的导热性能普遍较强。通常封装管的热导性远高于土体,热量主要沿传感器纵向传递。因此,为减小纵向传热的影响,可考虑在 AH-FBG 传感器制作过程中沿纵向在封装管内加入由低导热性能材料制成的薄隔热夹层,以减少纵向传热,提高含水率监测精度。

(2) 对监测数据进行修正。由于土体结构的复杂性,很难对其中的纵向传热过程定量分析。但由于纵向传热是由土体纵向含水率分布差异引起,可考虑结合能反映含水率分布特征的数据对 AH-FBG 法含水率测量值进行修正,这个过程可借助人工智能算法强大的非线性数据映射处理能力。目前,笔者正在开展试验、丰富数据,以探究利用人工神经网络算法改进 AH-FBG 法含水率监测技术的可行性。

4 结 论

本文开展了室内土柱试验,采用 AH-FBG 法监测了非饱和土的毛细水上升和蒸发过程,分析对比了单探针和双探针法的监测效果,探究了它们的误差来源及改进方法,讨论了不同监测方法的适用工况,得到以下 4 点结论。

(1) 整体而言,基于单探针 AH-FBG 的 3 种数据分析方法都能较好地描述土体毛细水上升和蒸发过程的水分迁移情况,都能较好适用于非饱和土的水分迁移监测。其中,热导率法的测量效果最好。

(2) 采用单探针法监测毛细水上升过程时,当湿润锋刚没过 AH-FBG 探针感测位置时,受纵向传热的影响会使得测量的含水率值偏低,误差大小与湿润锋面上下两层土的含水率差值有关,两者间呈正相关关系。

(3) 相比于单探针法,双探针法受纵向传热的影响更大,监测土体水分迁移有较大的误差,误差大小与测点位置处的土体含水率值及土柱纵剖面的含水率分布情况有关。

(4) 基于试验结果从传感器结构和数据处理两方面提出了 AH-FBG 法的改进措施,以降低纵向传热的影响。

本文通过室内土柱试验研究了 AH-FBG 法在非饱和土水分迁移监测中的适用性,但室内试验在试验尺度、边界条件和原位土体性质等方面均存在一定的局限性。目前,课题组正在四川成都、甘肃会宁和重庆奉节等地开展现场监测示范,为该技术的完善和推广

应用提供进一步的数据支撑。

参考文献:

- [1] 邢鲜丽, 李同录, 李萍, 等. 黄土抗剪强度与含水率的变化规律[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(3): 53–59, 97. (XING Xian-li, LI Tong-lu, LI Ping, et al. Variation regularities of loess shear strength with the moisture content[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2014, 41(3): 53–59, 97. (in Chinese))
- [2] CHEN H, LEE C F, LAW K T. Causative mechanisms of rainfall-induced fill slope failures[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(6): 593–602.
- [3] LU N, LIKOS W J. Unsaturated Soil Mechanics[M]. Hoboken: John Wiley & Sons Inc, 2004.
- [4] TANG C S, CUI Y J, SHI B, et al. Desiccation and cracking behaviour of clay layer from slurry state under wetting-drying cycles[J]. Geoderma, 2011, 166(1): 111–118.
- [5] SERRARENS D, MACINTYRE J L, HOPMANS J W, et al. Soil moisture calibration of TDR multilevel probes[J]. Scientia Agricola, 2000, 57(2): 349–354.
- [6] NADLER A, GAMLIEL A, PERETZ I. Practical aspects of salinity effect on TDR-measured water content: a field study[J]. Soil Science Society of America Journal, 1999, 63(5): 1070–1076.
- [7] EVETT S R, STEINER J L. Precision of neutron scattering and capacitance type soil water content gauges from field calibration[J]. Soil Science Society of America Journal, 1995, 59(4): 961–968.
- [8] FRIEDMAN S P. Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2005, 46(1/2/3): 45–70.
- [9] ANDERSSON P M, LINDER B G, NILSSON N R. Radar system for mapping internal erosion in embankment dams[J]. International Water Power and Dam Construction, 1991, 43(7): 11–16.
- [10] BRISTOW K L, KLUITENBERG G J, GODING C J, et al. A small multi-needle probe for measuring soil thermal properties, water content and electrical conductivity[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2001, 31(3): 265–280.
- [11] OCHSNER T E, HORTON R, REN T S. Use of the dual-probe heat-pulse technique to monitor soil water content in the vadose zone[J]. Vadose Zone Journal, 2003, 2(4): 572–579.
- [12] 施斌, 张丹, 朱鸿鹄. 地质与岩土工程分布式光纤监测技术[M]. 北京: 科学出版社, 2019. (SHI Bin, ZHANG Dan, ZHU Hong-hu. Distributed Fiber Optic Sensing for Geoengineering Monitoring[M]. Beijing: Science Press, 2019. (in Chinese))
- [13] 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.
- [14] 曹鼎峰, 施斌, 严君凡, 等. 基于C-DTS的土壤含水率分布式测定方法研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(5): 910–915. (CAO Ding-feng, SHI Bin, YAN Jun-fan, et al. Distributed method for measuring moisture content of soils based on C-DTS[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(5): 910–915. (in Chinese))
- [15] BENÍTEZ-BUELGA J, SAYDE C, RODRÍGUEZ-SINOBAS L, et al. Heated fiber optic distributed temperature sensing: a dual-probe heat-pulse approach[J]. Vadose Zone Journal, 2014, 13(11): 1–10.
- [16] YAN J F, SHI B, ZHU H H, et al. A quantitative monitoring technology for seepage in slopes using DTS[J]. Engineering Geology, 2015, 186: 100–104.
- [17] 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.
- [18] 胡优, 李敏, 任姮烨, 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. (HU You, LI Min, REN Heng-ye, et al. Measurement of soil water content using distributed temperature sensor with heated fiber optics[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(10): 42–49. (in Chinese))
- [19] CAO D F, SHI B, ZHU H H, et al. A soil moisture estimation method using actively heated fiber Bragg grating sensors[J]. Engineering Geology, 2018, 242: 142–149.
- [20] 段超喆, 施斌, 曹鼎峰, 等. 一种准分布式内加热刚玉管FBG渗流速率监测方法[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(3): 504–510. (DUAN Chao-zhe, SHI Bin, CAO Ding-feng, et al. A quasi-distributed seepage velocity monitoring method using FBG embedded in internal heated alumina tube[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(3): 504–510. (in Chinese))
- [21] 王家琛, 朱鸿鹄, 王静, 等. 基于主动加热光纤法的毛细阻滞入渗模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(1): 147–155. (WANG Jia-chen, ZHU Hong-hu, WANG Jing, et al. Experimental study of the capillary infiltration model based on active heating fiber optic method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(1): 147–155. (in Chinese))

- al. Laboratory model tests on capillary barrier infiltration using actively heated fiber optic method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(1): 147 – 155. (in Chinese))
- [22] CAO D F, ZHU H H, WU B, et al. Investigating temperature and moisture profiles of seasonally frozen soil under different land covers using actively heated fiber Bragg grating sensors[J]. Engineering Geology, 2021, **290**: 106197.
- [23] 陈 强, 刁少波, 孙建业, 等. 热脉冲探针-时域反射技术测量含水合物沉积物的热导率及水合物饱和度[J]. 岩矿测试, 2013(1): 108 – 113. (CHEN Qiang, DIAO Shao-bo, SUN Jian-ye, et al. Measurement of thermal conductivity and saturation of gas hydrates in sediment by thermal pulse probe-time domain reflection technique[J]. Rock and Mineral Analysis, 2013(1): 108 – 113. (in Chinese))
- [24] SUN M Y, SHI B, ZHANG D, et al. Study on calibration model of soil water content based on actively heated fiber-optic FBG method in the in situ test[J]. Measurement, 2020, **165**: 108176.
- [25] STRIEGL A M, LOHEIDE S P I. Heated distributed temperature sensing for field scale soil moisture monitoring[J]. Groundwater, 2012, **50**(3): 340 – 347.
- [26] CAMPBELL G S, CALISSENDORFF C, WILLIAMS J H. Probe for measuring soil specific heat using A heat-pulse method[J]. Soil Science Society of America Journal, 1991, **55**(1): 291 – 293.
- [27] TARARA J M, HAM J M. Measuring soil water content in the laboratory and field with dual-probe heat-capacity sensors[J]. Agronomy Journal, 1997, **89**(4): 535 – 542.
- [28] BRISTOW K, WHITE R, KLUITENBERG G. Comparison of single and dual probes for measuring soil thermal properties with transient heating[J]. Soil Research, 1994, **32**(3): 447 – 464.
- [29] BASINGER J M, KLUITENBERG G J, HAM J M, et al. Laboratory evaluation of the dual-probe heat-pulse method for measuring soil water content[J]. Vadose Zone Journal, 2003, **2**(3): 389 – 399.
- [30] KNIGHT J H, KLUITENBERG G J. Simplified computational approach for dual-probe heat-pulse method[J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, **68**(2): 447 – 449.
- [31] 吴 冰, 朱鸿鹄, 曹鼎峰, 等. 基于主动加热光纤法的冻土相变温度场特征分析[J]. 工程地质学报, 2019, **27**(5):165 – 172. (WU Bing, ZHU Hong-hu, CAO Ding-feng, et al. Investigation of phase change temperature field in frozen soil based on actively heated fiber optics method[J]. Journal of Engineer Geology, 2019, **27**(5):165 – 172. (in Chinese))
- [32] 吴 冰, 朱鸿鹄, 曹鼎峰, 等. 基于光纤光栅的冻土含冰量监测可行性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41** (12): 2323 – 2330. (WU Bing, ZHU Hong-hu, CAO Ding-feng, et al. Feasibility study on FBG-based monitoring method for ice content in frozen soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(12): 2323 – 2330. (in Chinese))
- [33] LIU I S. On Fourier's law of heat conduction[J]. Continuum Mechanics and Thermodynamics, 1990, **2**(4): 301 – 305.
- [34] DUBI Y, VENTRA M D. Fourier's Law: insight from a simple derivation[J]. Physical Review E, 2009, **79**(4): 1 – 4.