

三种土壤水势传感器在原状与扰动黏壤土上测定精度评价

刘俏润¹, 朱志梅^{1*}, 樊军^{2, 3}

(1. 西北大学 城市与环境学院, 陕西 西安 710127; 2. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;

3. 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: 分别在田间原状黏壤土和室内扰动黏壤土上安装 MPS-1、MPS-6、pF 水势传感器与 TDR315L 土壤水分传感器测定土壤水分特征曲线, 通过比较测定结果的准确性, 提出了三种土壤水势传感器的使用建议。结果表明: MPS-1 传感器虽测量范围窄, 但无论在原状黏壤土还是扰动黏壤土上均表现良好; MPS-6 和 pF 传感器测量范围宽, 但测量的水势值精度不高, 且 MPS-6 传感器对温度敏感, pF 传感器在使用期间内表现不稳定。MPS-1 传感器应用于原状和扰动黏壤土由其数据拟合出的土壤水分特征曲线与对照曲线重合度较高, 而 MPS-6 和 pF 传感器应用于原状和扰动黏壤土, 当含水量高于 $0.30 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ 时测定结果拟合得到的水分特征曲线与对照曲线重合度较高。比较三个水势传感器的测量表现, 可以认为 MPS-1 传感器用于含水量高于 $0.30 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ 的原状黏壤土和含水量高于 $0.17 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ 的扰动黏壤土, MPS-6 传感器用于含水量高于 $0.30 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ 的原状和扰动黏壤土测定土壤水势的效果较好。本研究结果可为使用上述三种传感器测定土壤水分特征曲线提供参考。

关键词: 土壤水势; 水势传感器; 土壤水分特征曲线

中图分类号: S152 文献标识码: A 文章编号: 0564-3945(2019)06-1315-08

DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2019.06.08

刘俏润, 朱志梅, 樊军. 三种土壤水势传感器在原状与扰动黏壤土上测定精度评价[J]. 土壤通报, 2019, 50(6): 1315-1322

LIU Qiao-run, ZHU Zhi-mei, FAN Jun. Measuring Accuracy Evaluation of Three Kinds of Water Potential Sensors for Undisturbed and Disturbed Clay Loam[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, 50(6): 1315-1322

土壤水分特征曲线是描述土壤含水量与吸力(负的基质势)之间的关系曲线, 反映了土壤水能量与土壤含水量之间的函数关系, 是土壤最重要的水力特性之一^[1]。通过土壤水分特征曲线能了解土壤的持水性和土壤水分有效性, 了解土壤中各级大小孔隙的分布, 有利于应用数学物理方法对土壤水分运动进行定量分析^[2], 因此, 准确量化土壤含水量和基质势对获得土壤水分特征曲线至关重要。目前, 关于土壤水分特征曲线的研究已经有了一定的进展, 已有多种技术方法可在实验室测定土壤水分特征曲线, 最常用的方法有张力计法、压力膜法、砂芯漏斗法和平衡水汽压法, 这些方法分别测量含水量和相应的水吸力, 用各个散点拟合成关系曲线。张力计法仅能测量 $0 \sim 0.08 \text{ MPa}$ 的吸力范围且需长时间才能达到平衡。压力膜法步骤较为繁琐且耗时长达 2 周。砂芯漏斗法费时, 在测定范围上有限制, 测定田间水分特征曲线时存在较大的不确定性^[3]。平衡水汽压法对测定过程中恒温、密封条件要求较高^[4]。除了各测量方法的内在限制之外, 实验室测定

土壤水分特征曲线时, 可能会因采样过程改变原有土壤的自然物理性质, 且实验室测量是在一定的控制条件下进行的, 不能代表原有的自然环境条件^[5]。因而, 实验室测定土壤水分特征曲线不能更好的反映土壤真实的水文特征。通过同时测量土壤含水量和土壤水势直接获得田间土壤水分特征曲线, 这种方法允许远程采集土壤含水量和土壤水势, 得到的数据动态且连续, 可以克服实验室所获得的土壤水分特征曲线的大部分局限性^[6]。已有几种技术用于现场测量土壤含水量, 其中用时域反射仪(TDR)测量土壤体积含水量已得到较为广泛的接受^[7], Robinson^[7]等总结和研究了 TDR 在测量介电常数和土壤导电率方面的进展。田间直接测量土壤水势的传感器也已有多种技术方法, 其中, 热电偶湿度计在土壤较湿时分辨率较差^[8], 热扩散传感器通过已知的土壤水势校准传感器来获得土壤水势值, 但在含水量接近田间持水量时测量的水势值不准确^[9]。目前关于各水势传感器的评估研究较少, Malazian^[10]等的研究认为, MPS-1 传感器灵敏度高度非线性, 且随着水势的变

收稿日期: 2019-03-11; 修订日期: 2019-11-05

基金项目: 国家自然科学基金(41571224)“水蚀风蚀交错区灌草植被对降雨入渗过程的影响与模拟”资助

作者简介: 刘俏润(1995-), 女, 陕西省西安市人, 硕士研究生, 主要从事土壤水分研究。E-mail: liuqiaorun@163.com

* 通讯作者: E-mail: zhzhmx@126.com

化有较大的变化,单点校准只能消除部分差异。MPS-6 传感器采用六点校准准确度较高,对盐分不敏感,测量范围广,可测量湿润土壤(-9 kPa)和风干土(-100000 kPa)。pF 传感器价格昂贵但测量范围较广,值得进一步分析其读数的正确性。本文选用 MPS-1、MPS-6 和 pF 传感器测量土壤水势,并采用 TDR315L 传感器测量土壤含水量,绘制原位的土壤水分特征曲线,并与实验室法测定的土壤水分特征曲线相比较(WP4-T 露点水势仪和压力膜法测量水势,烘干法测含水量),分析三个水势传感器读数的稳定性、准确性。

1 材料与方法

1.1 土壤基质势传感器

MPS-1 土壤水势传感器(Decagon Devices)是通过传感器陶瓷盘孔空间存在的水量来确定圆盘的介电常数从而得到土壤水势,该传感器的工作范围由多孔陶瓷盘的进气吸力决定,水势测量上限为 -10 kPa(约 1 m

或约 0.1 bar),下限为 -500 kPa(约 50 m 或约 5 bar)。MPS-6 传感器(Decagon Devices)采用多点校正法扩展了 MPS-1 的测量范围,其水势测量范围为 -9 ~ -100000 kPa (pF: 1.96 ~ 6.01)。pF 传感器(ecoTech Umwelt-Memwelt-Me GmbH)通过测量传感器底部圆锥体的热脉冲继而转换成土壤水势,使得传感器在极端干旱和高盐度的环境下能准确测量土壤的水势。各传感器的测量范围、准确度和分辨率见表 1。

1.2 土壤含水量传感器

TDR315L(Acclima)是真正的依据时域反射仪原理测定土壤水分含量的传感器。在本试验过程中,取不同土壤含水量土样采用烘干法测含水量,并同时用 TDR315L 传感器测定土壤含水量,由两种方法获得的数据对 TDR-315 传感器进行标定(图 1),烘干法与传感器测得数据的 R^2 都大于 0.96,均方根误差(RMSE)分别为 2.95 和 2.37,说明 TDR315L 传感器用于原状和扰动黏壤土上可测得准确的土壤含水量。

表 1 各传感器的范围、准确度和分辨率

Table 1 Range, accuracy and resolution of the sensors

传感器 Sensor	范围 Range	准确度 Accuracy	分辨率 Resolution
MPS-1	-10 ~ -500 kPa	-10 ~ -50 kPa: ± 5 kPa -50 ~ -500 kPa: $\pm 20\%$	0.1 kPa
MPS-6	-9 ~ -100000 kPa	-9 ~ -100 kPa: $\pm 25\%$	0.1 kPa
pF	0 ~ 1,000,000 kPa	$\pm 50\%$	0.01 pF
TDR315L	0 ~ 100% VWC	$\pm 2\%$ VWC	0.1% VWC

注:VWC,体积含水量

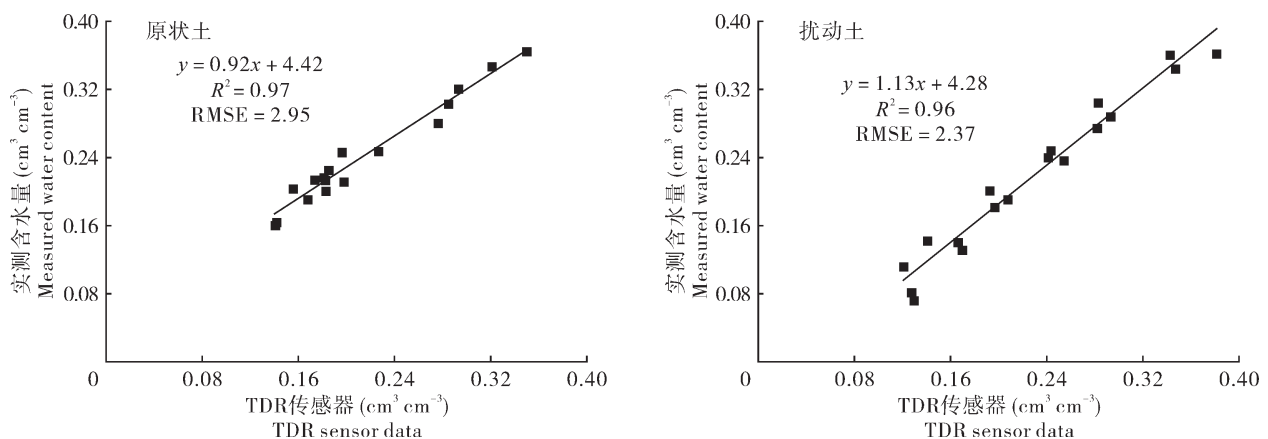


图 1 TDR315L 传感器标定曲线

Fig. 1 TDR315L sensor calibration curve

1.3 试验设置

1.3.1 田间试验 在陕西省咸阳市杨陵区西北农林科技大学水土保持研究所内试验田选取三个相距 1 m 左右的试验点为三个重复,分别在距离地表 15 cm 处安装 MPS-1、MPS-6、pF 土壤水势传感器和 TDR315L

土壤水分传感器,确保四种传感器与土壤之间接触良好。所有传感器测量时间间隔为 1 h,选用 CR850 数据采集器收集数据。该试验田壤土容重为 1.3 g cm^{-3} ,砂粒、粉粒和黏粒含量分别为 5.64%、62.39%、31.97%,土壤质地为粉质黏壤土,有机质含量为 2.27%。

1.3.2 室内试验 从试验田采取土样经风干、碾压、去除残留物后过 2 mm 筛,将土样按照设定容重 1.3 g cm^{-3} 分别装入三个试验箱(长 × 宽 × 高为 $36.5 \text{ cm} \times 26.5 \text{ cm} \times 28 \text{ cm}$)为三个重复,填装厚度为 20 cm,分四层填装、每层 5 cm,装土过程中填完一层后将其表面打毛再装下一层以使层间充分接触。在土样填装至 10 cm 时分别在三个土箱内安装 MPS-1、MPS-6 土壤水势传感器和 TDR315L 土壤水分传感器。土壤填装完成后加水直至饱和,抽取土壤表层多余积水,将 pF 传感器分别垂直插入在三个试验容器内,确保传感器与土壤之间接触良好。传感器测量时间间隔为 1 h,选用 CR850 数据采集器收集数据,将土箱置于通风良好的实验室内,使其缓慢且持续干燥。为防止土壤水分从裂缝中蒸发损失,干燥过程中及时处理裂缝。当土壤干燥至 TDR 传感器监测的含水量不再降低时周期 1 试验结束,再次加水使土壤饱和、干燥进行周期 2 试验。

1.3.3 测量土壤水分特征曲线 用 WP4-T 露点水势仪和压力膜仪法测量原状土和扰动土不同含水量下的水势,通过 RETC 软件拟合土壤水分特征曲线,作为对照标准,用于和各传感器数据拟合的土壤水分特征曲线作比较。

1.4 数据处理

利用 Origin 绘制各传感器数据随时间的变化图及各传感器数据拟合的土壤水分特征曲线。

2 结果与讨论

2.1 土壤水势变化

在整个试验过程中,田间原状土受降水影响表现

为湿润—干燥循环(图 2),实验室扰动土从饱和持续干燥,除试验前期蒸发速率有下降之外蒸发速率较稳定(图 3),这与 Idso 等^[11]的研究结果一致。TDR 传感器显示了整个试验期间土壤水分含量的变化;由于 MPS-1 传感器的测量范围比另外两种水势传感器窄,当原状土土壤体积含水量低于 $0.15 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$,土壤水势超出了 MPS-1 传感器的测量范围,导致一段时间数据缺失;安装在扰动土周期 1 试验 1 号试验土箱的 pF 传感器由于与土壤接触不良,导致数据缺失,其余的水势传感器均有数据输出。在试验期间内,与 MPS-6 传感器的变化幅度相比,扰动土上 MPS-1 和 pF 传感器的变化幅度较小(图 2 上),单独分析两种传感器变化趋势可以更精准的观测 MPS-1 和 pF 传感器随着土壤湿润—干燥循环的变化趋势(图 2 下)。

应用于原状土和扰动土上的 MPS-1 和 MPS-6 传感器在 $-10 \sim -20 \text{ kPa}$ 开始响应,pF 传感器在 $0 \sim -10 \text{ kPa}$ 开始响应,经润湿—干燥循环后 MPS-1 传感器在 -10 kPa 左右有响应,除扰动土内的 MPS-1 传感器外,所有传感器测量数值与制造商提供的测量范围一致。Malazian 等^[10]在观察 MPS-1 的响应差异后建议该传感器安装使用之前应进行润湿和干燥循环过程,这与本试验过程中观察结果一致。当原状土和扰动土土壤含水量高于 $0.30 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$,三种水势传感器读数较一致,含水量低于 $0.30 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ 时,各水势传感器数据出现较大差异(图 2,图 3)。

在原状土上的整个试验期间,MPS-1 传感器输出的水势值一直较大,除了 2 号试验点 pF 传感器数据在土壤干燥时有较小的变化之外,另外两个试验点 pF

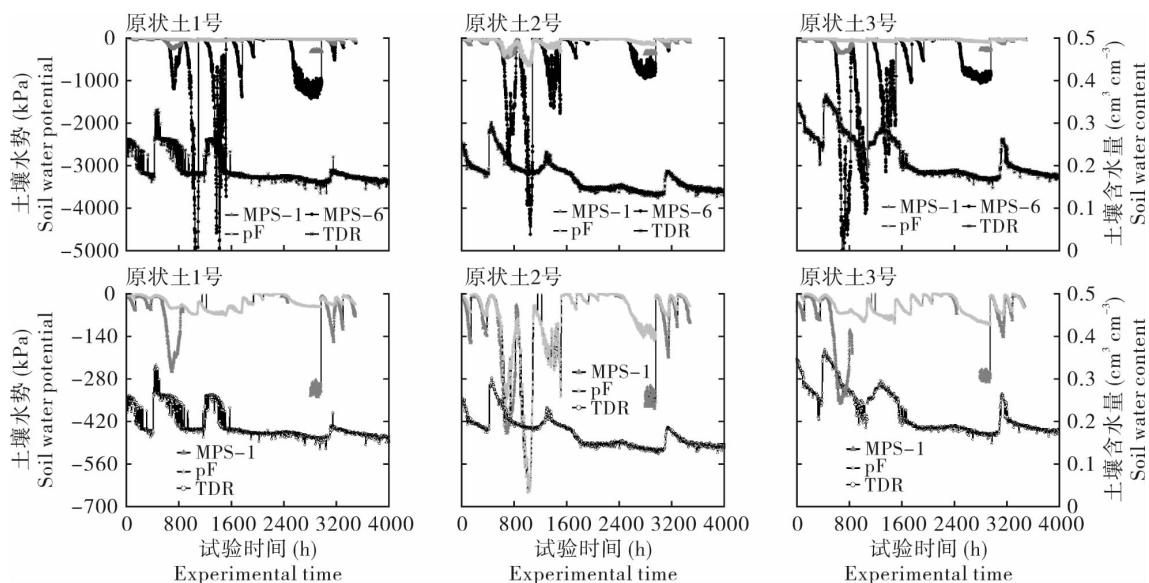


图 2 原状土传感器数据随试验时间的变化趋势

Fig. 2 Temporal evolution of the undisturbed soil sensor readings

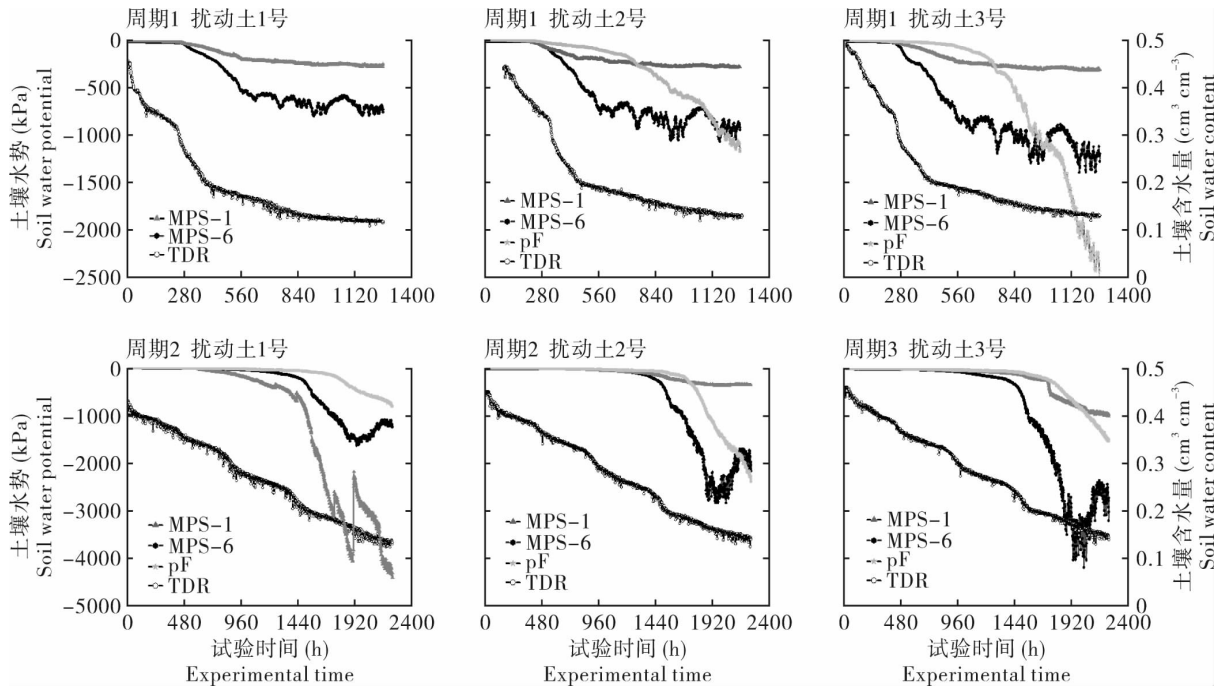


图3 扰动土传感器数据随试验时间的变化趋势

Fig. 3 Temporal evolution of the disturbed soil sensor readings

传感器数据也较大,水势值未有明显的变化,只有MPS-6传感器在土壤含水量较低时能输出较小的水势值,会随着土壤干燥-湿润循环水势值有较大变化。且发现,在试验初期,随着土壤干燥,三种水势传感器能输出较小的水势值,在试验后期,尽管含水量降至更低,但水势值始终偏大,并未能像之前一样降低,而在扰动土持续干燥过程中未发现该情况出现,可能是传感器在原状土中经初始干燥后,传感器与土壤之间出现空隙而接触不良,影响了这三种水势传感器在原状土上应用的准确性。

在扰动土第一周期试验末期,土壤含水量较低时,用WP4-T实测水势(表2),实测的水势值较所有的水势传感器数值小,说明在土壤干燥条件下,三种水势传感器测量的水势值均不准确。MPS-1传感器用于原状土较干燥时超出测量范围,虽该传感器在扰动土较干燥时能持续输出数据,但其输出的数值并不准确。观察到周期1和周期2试验末期,三个MPS-6传感器出现了较大波动,两个周期的pF传感器在同一较低含水量下测量的水势值差异较大,说明MPS-6和pF传感器在土壤较干燥时,虽然在其测量范围但表现并不稳定。

表2 扰动土实测水势值与水势传感器数据

Table 2 Measured water potential and water potential sensors data of disturbed soil

编号 Number	MPS-1 传感器数据 (kPa) MPS-1 sensor data	MPS-6 传感器数据 (kPa) MPS-6 sensor data	pF 传感器数据 (kPa) pF sensor data	实测水势 (kPa) Measured water potential	TDR 传感器数据 (cm ³ cm ⁻³) TDR sensor data
扰动土 1 号	-257.9	-756.2	-	-6383.33	0.12
扰动土 2 号	-291.2	-924.0	-1177.61	-6762.67	0.13
扰动土 3 号	-317.9	-1278.0	-2443.43	-7040.00	0.13

MPS-1传感器在原状土和扰动土第1周期上重复性较好(图4,图5)。Malazian^[10]等在对MPS-1传感器的研究中表明该传感器在使用过程中能输出较稳定一致的数据,这与本试验结果较一致。在扰动土第二周期试验中,1号土箱中MPS-1传感器测量的水势远远超出了其测量范围,该传感器与另外两个MPS-1传感器测量的水势值有较大差异,2号土箱中MPS-1传感器测量的水势值陡降,可能由于周期1试验后期土壤过于干燥,致使1号和2号MPS-1传感器和土壤之间的良

好接触被破坏。MPS-6传感器在原状土和扰动土上重复性较好。应用于原状土的pF水势传感器重复性较差,由于扰动土周期1试验上1组pF传感器数据缺失,无法比较其重复性,但剩余的两组pF传感器数据重复性较差。同一水势传感器之间的标准偏差表明:MPS-1传感器之间的重复性好于MPS-6和pF传感器(表3),尽管原状土和扰动土周期2中,MPS-6传感器之间标准偏差的平均值和最大值高于pF传感器,但MPS-6传感器之间的变化趋势较pF传感器一致

(图 4,图 5)。总的来说,应用于扰动土和原状土上时, pF 传感器重复性不如 MPS-6和 MPS-1传感器好,可能是传感器测量范围宽,导致其对特定水势测量结果的精度较低。

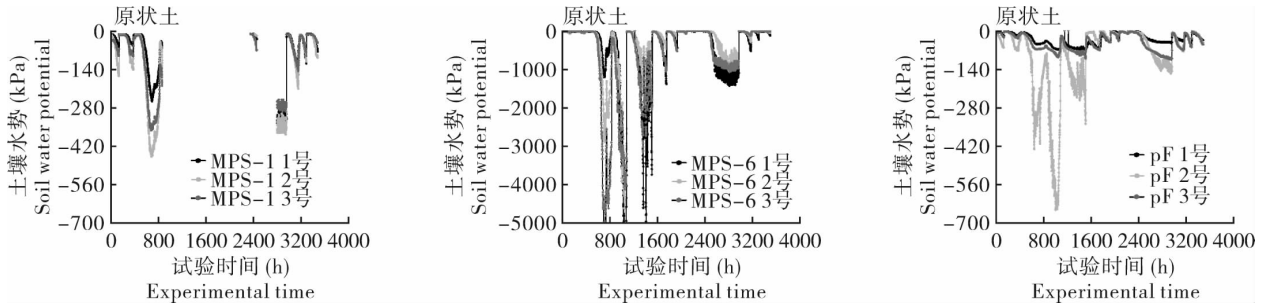


图 4 原状土水势传感器重复性
Fig.4 Repeatability of undisturbed soil water potential sensors

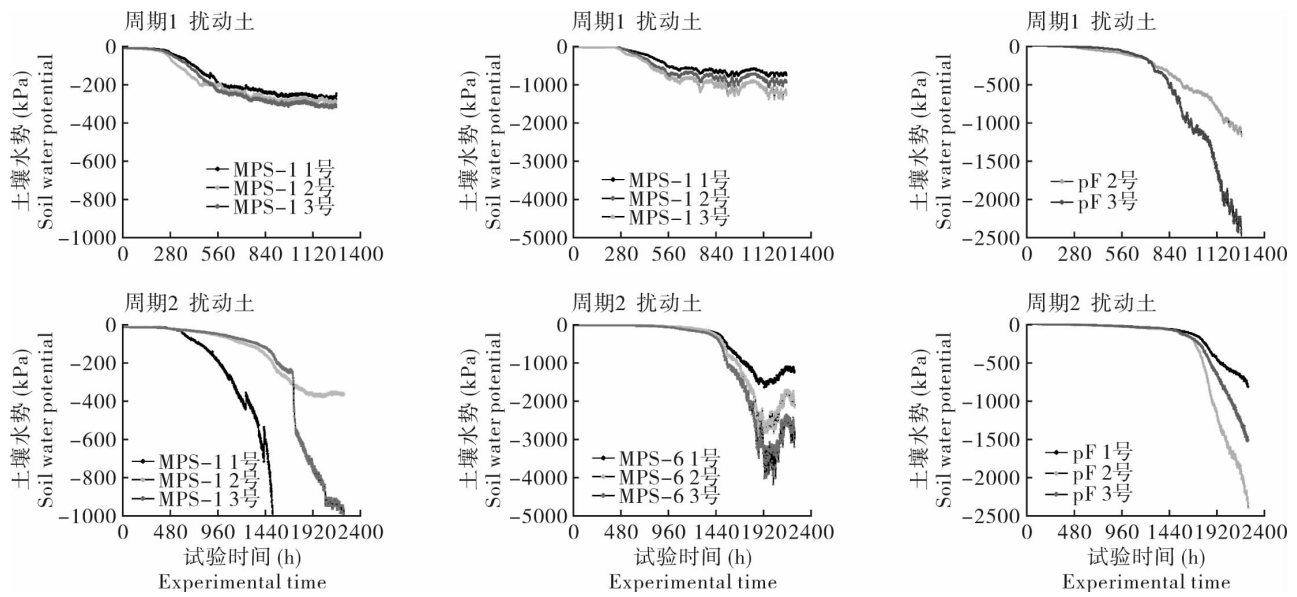


图 5 扰动土水势传感器重复性
Fig.5 Repeatability of disturbed soil water potential sensors

表 3 同一水势传感器的标准偏差
Table 3 Standard deviation of the same water potential sensors

编号 Number	MPS-1 传感器的标准偏差 (kPa) Standard deviation of MPS-1 sensor		MPS-6 传感器的标准偏差 (kPa) Standard deviation of MPS-6 sensor		pF 传感器的标准偏差 (kPa) Standard deviation of pF sensor	
	平均值 Average	最大值 Maximum	平均值 Average	最大值 Maximum	平均值 Average	最大值 Maximum
	原状土	26.82	164.72	220.37	2623.32	42.25
扰动土周期 1	19.38	39.07	126.83	319.34	169.60	950.65
扰动土周期 2	-	-	209.23	1339.01	101.21	789.10

2.2 土壤水分特征曲线

MPS-1, MPS-6, pF 水势传感器和 TDR315L 水分传感器输出数据拟合原状土和扰动土的土壤水分特征曲线, 与实验室方法得到对照土壤水分特征曲线相比较, 对比分析两种方式获得的土壤水分特征曲线(图 6,图 7)。

在原状土中, 各传感器拟合的曲线和对照曲线在水势值为 $-300 \sim 0$ kPa(含水量高于 $0.30 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)时

重合较好, 说明在土壤湿润时, 各个探头数值较准确。在土壤较干燥阶段, MPS-1 和 pF 传感器拟合的曲线低于对照曲线, 在其测量范围内高估了土壤水势, 且只拟合出含水量较高段的土壤水分特征曲线。MPS-6 传感器数据与 TDR 传感器数据拟合出了较完整的曲线, 但拟合的曲线只在含水量为 $0.17 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ 时与对照曲线交叉, 在低于 $0.17 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ 含水量下, MPS-6 传感器低估了土壤水势, 在含水量为 $0.17 \sim 0.30 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$

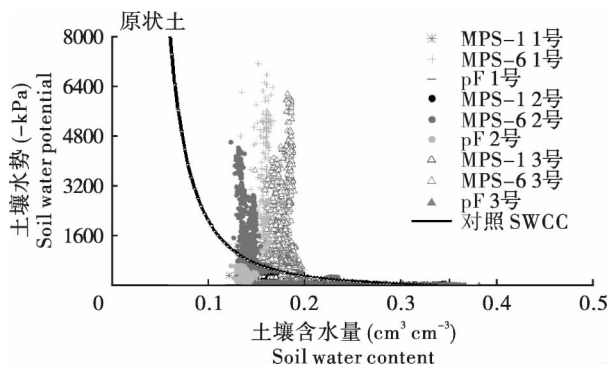


图6 传感器和实验室法测量的原状土土壤水分特征曲线 (SWCC)

Fig. 6 Soil water characteristics curves (SWCC) of undisturbed soil measured by sensors and laboratory method

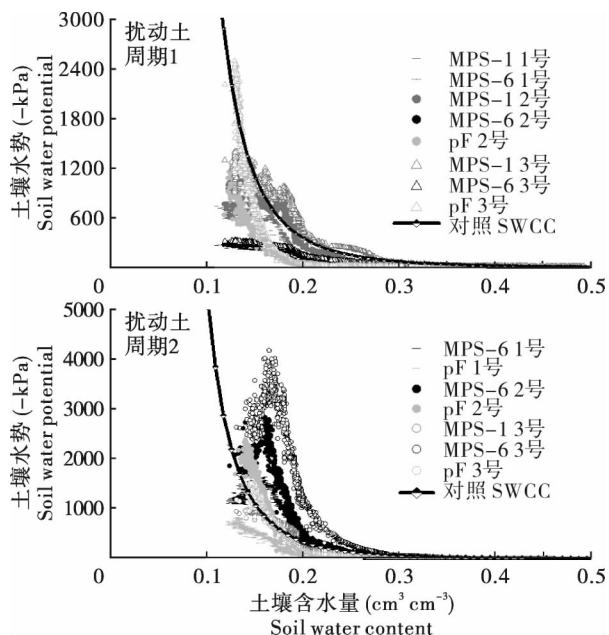


图7 传感器和实验室法测量的扰动土土壤水分特征曲线 (SWCC)

Fig. 7 Soil water characteristics curves (SWCC) of disturbed soil measured by sensors and laboratory method

时,高估了土壤水势。

在土壤水势为 $-300 \sim 0$ kPa (含水量高于 $0.30 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) 时,扰动土中各传感器拟合的土壤水分特征曲线与对照土壤水分特征曲线重合,说明在高于 $0.30 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ 含水量下,各水势传感器表现良好。在周期1试验中,尽管MPS-1传感器超出了测量范围,该传感器拟合的曲线在土壤水势为 -800 kPa ~ 0 (含水量高于 $0.15 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) 时与对照曲线重合度较高,能在该范围内测量到较准确的水势值。在周期2试验中,1号和2号土箱的MPS-1传感器测量失败,3号土箱的MPS-1传感器拟合的曲线与对照曲线重合度较高。含水量低于 $0.30 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ 时,周期1试验中MPS-6传感器高估了土壤水势,周期2试验中低估了土壤水势。周

期1试验中,pF传感器在土壤含水量低于 $0.30 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ 时高估了土壤水势。周期2试验中,pF传感器在土壤含水量为 $0.17 \sim 0.30 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ 时低估了土壤水势,在含水量低于 $0.17 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ 时高估了土壤水势。

所有的曲线比较说明,MPS-1传感器用于较湿润的原状土和扰动土(含水量高于 $0.30 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ 的原状土和含水量高于 $0.17 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ 的扰动土)时在表现较好,表明尽管该传感器测量范围窄,但能在其测量范围内输出较准确的水势值。

MPS-6传感器只在含水量高于 $0.30 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ 时能测量到较准确的水势值。MPS-6传感器为电容传感器,Kizito等^[12]认为电容传感器会受到温度的影响,Seyfried和Kořárek等^[13,14]认为电容传感器不仅仅对纯水响应,土壤中其他溶质也会影响传感器的准确性。Lorenz Walthert等^[15]评估了温度对MPS系列传感器的影响,并以pF传感器作为标准校准了MPS-6传感器,但pF传感器测量的水势值不一定为准确的水势值,其校准方法不能得以采用。本研究表明MPS-6传感器只适用于含水量高于 $0.30 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ 的原状和扰动黏壤土。

当pF传感器用于原状黏壤土时,在低含水量段测量的水势值始终偏大,用于扰动土时,只有周期1试验中3号土箱的pF传感器在水势为 $-1500 \sim -100$ kPa时测量的水势值较准确,说明该传感器测量范围广但精度低,稳定性不好。Davis等^[16]研究表明在极干燥范围内传感器的不同行为可能是由传感器的多孔陶瓷的差异引起的,不同的陶瓷材料可能会以不同的方式记录滞后效应。Degre等^[17]测试pF传感器的研究表明,该传感器表现不佳且传感器之间的差异很大,这与本文研究结果一致,但Lorenz Walthert等^[15]研究质疑了Degre等人的研究,认为pF传感器的差异性与版本有关,较新版本的pF传感器相比于Degre等研究所用版本和MPS传感器表现较好,Kloss,Zaller等^[18,19]的研究认为pF传感器适用于控制灌溉系统且在 -2000 kPa水势下表现最佳,本研究表明pF传感器测量水势值准确性较差且不稳定,不适用于原状土和扰动土测量水势。

三个水势传感器相比较来说,MPS-1传感器虽测量范围窄,但能在其测量范围内得到较准确的水势值。MPS-6和pF传感器虽然能同时测量土壤温度但测量水势值不准确,尽管MPS-6传感器使用了六点校准,但Kizito等^[12]的研究表明该传感器仍需要温度校准,pF传感器测重复性较差且数据不稳定。

3 结论

MPS-1传感器测量范围窄,但用于原状和扰动

黏壤土时在其测量范围内表现较好。MPS-6 传感器测量范围较宽,在原状和扰动土黏壤土含水量高于 $0.30 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ 时均表现良好,但在低于该含水量时表现欠佳。尽管 pF 传感器测量范围广,但在黏壤土上重复性较差,结果不可靠。建议 MPS-1 传感器与 TDR315L 传感器配合,用于测量原状黏壤土高于 $0.30 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ 含水量段、扰动黏壤土高于 $0.17 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ 含水量段土壤水分特征曲线;MPS-6 传感器与 TDR315L 传感器配合,用于测量原状和扰动黏壤土高于 $0.30 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ 含水量段的土壤水分特征曲线。

参考文献

- [1] 韩祥伟, 邵明安, 王全九. 简单入渗法在确定 Brooks - Corey 水分特征曲线模型参数中的应用研究[J]. 土壤学报, 2006, 43(3): 506 - 508.
- [2] 马昌臣, 王飞, 穆兴民, 等. 小麦根系机械作用对土壤水分特征曲线的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(2): 105 - 109.
- [3] 李韵珠, 李保国. 土壤溶质运移[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 142 - 144.
- [4] 邵明安, 王全九, 黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 71.
- [5] BORDON M, BITTELLI M, VALENTINO R, et al. Improving the estimation of complete field soil water characteristic curves through field monitoring data[J]. Journal of Hydrology, 2017, 552: 283 - 305.
- [6] ROBERT CERNY. Time - domain reflectometry method and its application for measuring moisture content in porous materials: A review[J]. Measurement, 2009, 42(3): 329 - 336.
- [7] ROBINAON 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).
- [8] SCANLON B R, KEESE K, REEDY R C, et al. Variations in flow and transport in thick desert vadose zones in response to paleoclimatic forcing (0 - 90 kyr): Field measurements, modeling, and uncertainties[J]. Water Resources Research, 2003, 39(7): 303 - 303.
- [9] WOHLING, THOMAS. Characterizing disturbed desert soils using multiobjective parameter optimization[J]. Vadose Zone Journal, 2013, 12(1): 1196 - 1196.
- [10] MALAZIAN A, HARTSOUGH P, KAMAI T, et al. Evaluation of MPS-1 soil water potential sensor[J]. Journal of Hydrology, 2011, 402(1 - 2): 126 - 134.
- [11] IDSO S B, REGINATO R J, JACKSON R D, et al. The three stages of drying of a field Soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 1974, 38(5): 831 - 837.
- [12] 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.
- [13] KOCAREK M, KODESOVA R. Influence of temperature on soil water content measured by ECH2O-TE sensors[J]. International Agrophysics, 2012, 26(3): 259 - 269.
- [14] SEYFRIED M S, GRANT L E. Temperature effects on soil dielectric properties measured at 50 MHz [J]. Vadose Zone Journal, 2007, 6(4): 759.
- [15] LORENZ WALTHERT, PATRICK SCHLEPPL. Equations to compensate for the temperature effect on readings from dielectric Decagon MPS-2 and MPS-6 water potential sensors in soils [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2018, 181(5).
- [16] DAVIS D D, HORTON R, HEITMAN J L, et al. Wettability and hysteresis effects on water sorption in relatively dry soil [J]. Soil Science Society of America Journal, 2009, 73(6): 1947 - 1951.
- [17] AUORE DEHRE, CADWELL T, PLOEG M V D. Comparison of soil water potential sensors [J]. Expert Review of Proteomics, 2015, 7(1): 39 - 53.
- [18] KLOSS S, GRUNDMANN J, SEIDEL S J, et al. Investigation of deficit irrigation strategies combining SVAT - modeling, optimization and experiments[J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 72(12): 4901 - 4915.
- [19] ZALLER J, SIMMER L, TANI TATAW J, et al. Future rainfall patterns will reduce arthropod abundance in model arable agroecosystems with different soil types [C]// EGU General Assembly Conference. EGU General Assembly Conference Abstracts, 2013: 35 - 45.

Measuring Accuracy Evaluation of Three Kinds of Water Potential Sensors for Undisturbed and Disturbed Clay Loam

LIU Qiao-run¹, ZHU Zhi-mei^{1*}, FAN Jun^{2,3}

(1. College of Urban and Environment Science, Northwest University, Xi'an 710127, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China)

Abstract: The accuracy of three soil water potential sensors were investigated for undisturbed and disturbed clay loam soil, in order to provide reference for soil water potential measurement and in-situ soil water characteristic curve measurement. MPS-1, MPS-6 and pF water potential sensors and TDR315L soil moisture sensor were installed in the undisturbed and disturbed clay loam soil respectively. The soil water characteristic curves were fitted by the laboratory data and the sensor data, and then the accuracies of the three water potential sensors were compared. The results showed that MPS-1 sensor had a narrow measurement range, but performed accurately in its range of measurement when it was used in the disturbed and undisturbed clay loam soils. The MPS-6 and pF sensors had a wide measurement range but a low accuracy. The MPS-6 sensors were temperature sensitive and pF sensors were unstable during the measurement. The soil water characteristic curve fitted by MPS-1 sensors in the undisturbed and disturbed clay loam soils had a higher coincidence with the control curve. The curves fitted by MPS-6 and pF sensors for disturbed and undisturbed soils had good coincidences with the control curve at water content higher than $0.30 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Comparing the three water potential sensors, MPS-1 sensors are suitable to measure soil water potential in undisturbed clay loam soil with water content higher than $0.30 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ and in disturbed clay loam soil with water content higher than $0.17 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, MPS-6 sensors are suitable to measure soil water potential in undisturbed clay loam soil and in disturbed clay loam soil with water content higher than $0.30 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$.

Key words: Soil water potential; Water potential sensor; Soil water characteristic curve

[责任编辑:韩春兰]