第 18 卷　第 2 期　2018 年 1 月
1671—1815(2018)002-0320-05

科　学　技　术　与　工　程
Science Technology and Engineering

Vol. 18　No. 2　Jan. 2018
© 2018　Sci. Tech. Engrg.

引用格式:徐　爽, 郭　颖, 单　炜. 基于频域反射原理的土冻结过程介电常数影响因素研究[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(2): 320—324
Xu Shuang, Guo Ying, Shan Wei. Study on influencing factors of dielectric constant in soil freezing process based on FDR[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(2): 320—324

建筑科学

基于频域反射原理的土冻结过程介电常数影响因素研究

徐　爽[1]　郭　颖[1,2*]　单　炜[2]
(东北林业大学土木工程学院[1], 寒区科学与工程研究院[2],哈尔滨 150040)

摘　要　为探究土冻结过程中介电常数(ε)随不同因素影响的变化规律,以哈尔滨市郊的黄土为研究对象,通过改变含水率、干密度、含盐量等因素,利用基于频域反射原理(FDR)的传感器,测量土壤冻结过程中的 ε 变化,分析各因素对土壤 ε 的影响。结果表明:温度对土壤 ε 的影响主要存在于土壤液态水相变阶段;常温范围内 ε 随温度的变化很小,可不考虑 FDR 传感器测量土壤体积含水率时引起的误差;随着含水率或干密度的增大,土壤 ε 均会相应增大,总体趋势符合 Topp 公式及传感器自带公式;含盐量的增加会引起 ε 急剧增大,此时直接利用传感器测量含水率会出现较大误差,需要额外进行校正。

关键词　冻土　介电常数　频域反射　模型
中图法分类号　TU18;　**文献标志码**　B

土壤介电常数(ε)表征了土壤介质极化能力的强弱。常温常压下,土壤由骨架颗粒、水溶液和气态物质这三相组成,其中水溶液的介电常数约为 81,固相介电常数为 3 ~ 5,空气介电常数仅为 1 左右。由于液态水的介电常数远远大于其他两相,其体积含量的变化对土介电常数最为敏感,这为根据介电常数反映土壤体积含水率(θ)提供了理论基础。自 1904 年 Maxwell-Garnett[1] 提出以介质极化理论为基础的土介电常数理论模型以来,许多学者对介电常数和土壤含水率的关系展开研究,提出不少有代表性的模型。其中,Topp 等[2] 和 Roth 等[3] 通过对测得的土壤体积含水率和介电常数的关系进行拟合,得到具有如下形式的三项式纯经验公式:

$$\theta = a\varepsilon^3 + b\varepsilon^2 + c\varepsilon + d \tag{1}$$

式(1)中,θ 为土壤体积含水率;ε 为土壤介电常数;a、b、c、d 为系数。

Herkelrath 等[4] 和 Alharathi 等[5] 发现土壤含水量在一定范围内时,体积含水量和介电常数的平方根具有良好的线性相关性,提出了 θ 与 $\varepsilon^{0.5}$ 的线性纯经验公式,基本形式为

$$\theta = a\sqrt{\varepsilon} + b \tag{2}$$

式(2)中,θ 为土壤体积含水率;ε 为土壤介电常数;a、b 为系数。Looynega[6]、Roth 等[7] 和 Dasberg 等[8] 根据土壤介电常数由各相组分按体积比例混合的原理提出了土壤介电常数多相混合半经验半理论模型。纯经验模型结构相对简单,只需测出土壤介电常数大小,就能得到对应体积含水率。尽管这类模型忽略了土壤质地、组分等对介电常数的影响,在普适性上达不到很好的精度,但对特定土壤经过标定之后具有较好的准确性,因此被广泛应用于水分传感器以及探地雷达等设备测定土壤含水率,比较适合室内外快速测定土壤体积含水率。半经验半理论模型由于考虑了土壤各相的物理联系,更能体现介电特性,所以在普适性上要优于纯经验模型,但需要额外知道被测土壤的孔隙率、三相体积组成等指标,并考虑土介质几何结构与电场的关系,不便于室内外快速测定含水率,适用性不高。此外,有相关研究发现土壤介电常数还受土壤温度、干密度(容重)、含盐量(电导率)和有机质含量等因素的影响[9,10]。到目前为止,关于土壤介电常数和体积含水率关系的研究几乎都是关于常温下的,极少涉及负温环境,负温下土壤含水率与介电常数的关系并不明确,导致大多数土壤水分监测设备不能准确反映冻结土体

2017 年 5 月 2 日收到　国家自然科学基金(41641024)资助
第一作者简介:徐　爽(1992—),男,浙江宁波人,硕士研究生。研究方向:环境冻土。
*通信作者简介:郭　颖(1971—),女,黑龙江哈尔滨人,高级工程师,硕士研究生导师。研究方向:滑波灾害。E-mail: samesongs@163.com。

的液态水含量。而在北方大部,尤其是高纬度地区,冬季气温很低,土壤水分伴随着剧烈相变过程,液态水含量的变化对于工程建设预防不利灾害和农林作物生长具有非常重要的意义,所以很有必要对冻土介电常数的影响因素展开研究。鉴于此,本文以一种黏土为试验对象,探究冻结过程中,温度,含水量,干密度和含盐量对土壤介电常数的影响。

1　试验方法

1.1　介电常数测量方法

常用的土壤表观介电常数测量方法有探地雷达(GPR),时域反射法(TDR)和频域反射法(FDR)等。GPR 通过分析电磁波在土壤中传播的路径和反馈得到的波形、振幅强度和时间变化等来确定土壤 ε 大小,适用于野外较大尺度的测量,但测量精度不高。TDR 依据电磁波沿探针传播的速率与探针周围一定范围内土壤 ε 的平方根成正比,通过测定电磁波沿着 TDR 探针的传播时间确定土壤 ε。FDR 利用矢量电压测量方法,通过向被测介质发射特定频率的电磁波,根据电磁波在不同介质中传播频率的变化得到土壤复介电常数,然后将该复介电常数进行实部和虚部分解,其中的实部即为土壤表观介电常数,可通过经验公式换算成体积含水率,而虚部和介质的电导率有关。与 TDR 技术相比,FDR 具有更多优点,尤其在电极的几何形状设计和发射频率的选择上具有更广的自由度[11,12]。故本试验采用 FDR 技术测定土壤介电常数,使用的仪器为美国 Decagon 公司生产的 GS3 传感器,该传感器利用 FDR 原理测定土壤介电常数,工作频率为 70 MHz,此外还能够同时测定土壤的温度和电导率,并可通过修正的经验公式将介电常数换算为土壤体积含水率。

1.2　试验用土

试验用土取自哈尔滨郊区,为黄土,天然含盐量极低,近似为 0。实验室测定其基本物理性质指标见表 1。

表 1　试验用土基本物理性质

Table 1　Physical properties of test soils

土类别	液限/%	塑限/%	塑性指数	最大干密度/($g \cdot cm^{-3}$)	最优含水率/%
低液限黏土	32.70	19.50	13.2	1.86	15.50

1.3　试验方案

为探究含水率、干密度、含盐量和温度对土壤冻结过程中介电常数的影响,试验选取质量含水率分别为4 %、8 %、1 2%、16 %、20 % 和24 % 的土样试验,并通过改变干密度和在土样中添加一定量的 NaCl 进行单因素对比,各因素水平见表 2。

表 2　试件基本参数

Table 2　Basic parameters of the specimen

试件编号	质量含水率/%	干密度/($g \cdot cm^{-3}$)	含盐量/%
1	4	1.20	0
2	8	1.35	0
3		1.50	0
4	12	1.20	0
5		1.35	0
6		1.35	0.5
7		1.35	1.8
8		1.50	0
9	16	1.20	0
10		1.35	0
11		1.50	0
12	20	1.35	0
13		1.50	0
14		1.50	0.5
15		1.50	1.8
16	24	1.35	0
17		1.50	0

首先,将试验用土放入烘箱,在 105 ℃下持续烘土 24 h,之后进行粉碎,过 2 mm 筛,按照试件具体要求配置成相应质量含水率和含盐量的土样,并放入恒定温度为 20 ℃的恒温箱内闷土 24 h,以使土样水分均匀,其中 NaCl 通过水溶液添加于土中。闷料结束后,迅速将土样分层装入内径 19.2 cm,高 20 cm的有机玻璃管内,通过人工击实的方法制成设定干密度的土试件,并在试样上下表面用保鲜膜覆盖,防止试验过程水分散失。土试件高度统一为 6 cm,在中间埋设 GS3 传感器,用于测定试验过程中试件温度和介电常数。接着,把试件放入高低温冻融试验箱内,调节箱内温度由室温逐渐降至 −20 ℃,对试件进行冻结试验,传感器每隔 5 min 采集一次数据。当试件内部温度达到 −15 ℃时停止试验,取出试件,进行下个试件的操作,以此类推。

2　结果与分析

2.1　质量含水率对介电常数的影响

图 1 表示干密度分别为 1.35 g/cm^3、1.50 g/cm^3 的试件介电常数随温度变化情况。可以看到,在整个降温过程中,质量含水率越高的试件其介电常数相对越大。在正温范围,各试件 ε 随温度发生一定程度变化,但总体幅度都不大。如图 1(a) 含水率 8 % 和 12% 的试件在 15 ℃时的 ε 分别为 7.98 和 9.79,而在 1 ℃时分别为 7.34 和 9.41,两者均有少量降低;含水率 24% 时,相应温度处 ε 分别为 14.80 和 15.48,ε 略有升高;16 % 和 20 % 的试件在正温范围内无明显变化,几乎与 x 轴平行。当温度低于 0 ℃之后,各试件

的 ε 出现不同幅度下降，表现为含水量越高时，ε 降得越快；除含水率 8 % 试件以外，其他试件都有出现明显下降拐点。总体上，该拐点出现时的温度值随初始含水率的下降而降低。考虑到负温阶段，土壤液相会发生相变，部分液态水凝结成冰，而冰的 ε 为3 ~4，远小于液态水，所以冻结的开始势必引起土壤表观介电常数的显著下降。根据徐学祖[13] 和郑秀清等[14] 的研究，土壤冻结温度随着含水率的增大而升高，这也与试验结果相吻合。在低于拐点温度之后，各试件介电常数先迅速下降，后随着液态水含量的不断减少，土壤总介电常数逐渐趋于稳定，各条曲线几乎重叠。而含水率 8 % 的试件本身 ε 就不大，在 0 ℃时也仅有 7.26，和土骨架颗粒的值相差很小，故冻结引起的 ε 突变不那么明显。

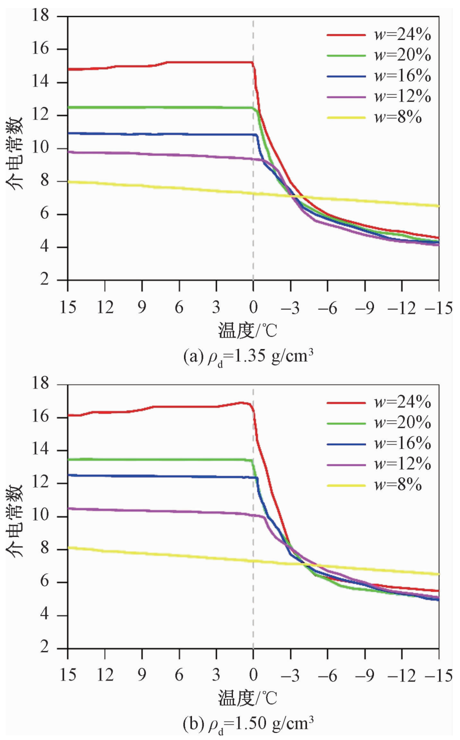

图 1 质量含水率和介电常数关系

Fig. 1 Relationship between mass water content and dielectric constant

2.2 干密度对介电常数的影响

图 2 为初始质量含水率为 12% 和 16% 的试件在不同干密度条件下 ε 随温度变化情况。可以看到，在试验过程中，干密度越大的试件 ε 越大。在正温范围内，随着温度的降低，含水率 12 % 的试件 ε 出现明显下降，且 1.20 g/cm^3 的下降幅度要大于 1.35 和 1.50 g/cm^3 的；含水率 16 % 时，各试件 ε 变化相对小很多，几乎不随温度变化。在负温范围，各试件的 ε 都随温度的下降而降低，在 0 ℃附近出现明显拐点。同一含水率时，拐点对应的温度值差别很小，说明干密度的变化对土壤冻结温度的影响不大。低于拐点温度之后，ε 呈现先迅速下降，后趋于平缓的趋势，且干密度越大的试件 ε 越大。

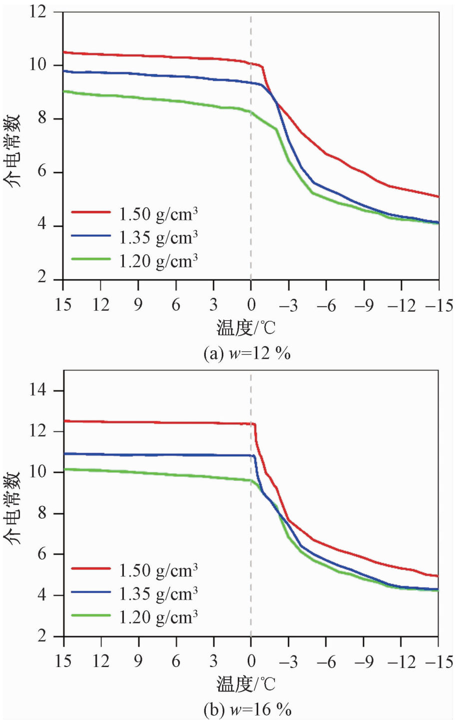

图 2 干密度和介电常数关系

Fig. 2 Relationship between dry density and dielectric constant

考虑到水分传感器所测的是土壤体积含水率，而非质量含水率，两者需要通过

$$\theta = \frac{w\rho_d}{\rho_w} \tag{3}$$

进行换算，ρ_w 为液态水密度。为分析干密度和质量含水率变化对传感器测量体积含水率的影响，将各试件在 15 ℃时的 ε 值绘于图 3。可以看到，土壤 ε 随体积含水率增大而增大，整体趋势与 GS3 自带经验式及 Topp 公式相似；且当体积含水率不小于

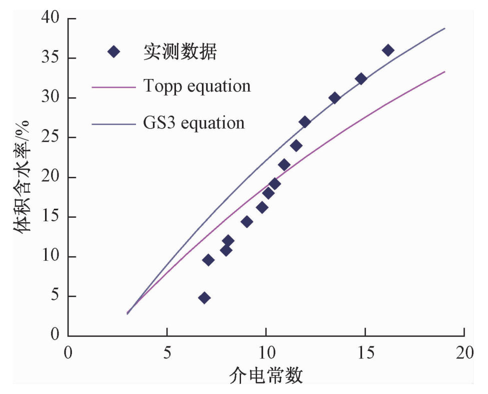

图 3 介电常数与体积含水率关系

Fig. 3 Relationship between dielectric constant and volume moisture content

27%(相当于塑限含水率)时,实际值与传感器公式计算值十分接近,但低于塑限时实际值要普遍小于经验公式,原因可能是试验用土含有比较多黏粒成分,部分液态水以束缚水形式存在,而束缚水 ε 要小于自由水,所以当含水量比较低时,土壤 ε 实测值比经验公式计算值小。也说明当含水率高于塑限时传感器直接测量的含水率较为准确,此时干密度和含水率变化对测量含水率带来的误差不明显。

2.3　含盐量对介电常数的影响

图 4 表示含水率 12 %、干密度 1.35 g/cm^3 和含水率 20 %、干密度 1.50 g/cm^3 时不同含盐量试件 ε 的变化。不难看出,随着含盐量的增加,土壤 ε 将明显增大,说明水分传感器测量高含盐量土壤含水率时会出现比较大的误差,需要对此进行校正。在正温区间,含盐量越高的试件,其介电常数随温度下降而产生的变化更加显著。例如,图 4(a)中,含盐量 1.8 % 的试件其介电常数由15 ℃时的 14.77 降低至 0 ℃时的 12.35,下降了 2.42,而在同样温度下,含盐量 0.5 % 和不含盐的试件分别只下降了 1.38 和 0.33;在图 4(b)中,含盐量 1.8 % 的试件其介电常数由 15 ℃时的 70.98 降低至 0 ℃时的 49.05,下降值达到了 21.93,但在同样温度下,含盐量 0.5 % 和不含盐的试件分别只下降了 14.67 和 0.12。另外,也可以看到相同含盐量时,初始含水率越高的试件,介电常数被"抬高"的能力越强。以 15 ℃时为例,同样是 1.8% 的含盐量,w = 20% 时测得的 ε 比 w = 12% 的高出 56.21,前者几乎是后者的 5 倍,而当含盐量为 0.5 时,前者比后者高出 22.7。在负温阶段,可以看到各试件都有出现明显拐点,但对应的温度值相差很大,表现出①在相同含水率时,拐点对应的温度值随试件含盐量增大而降低;②相同含盐量时,拐点对应的温度值随试件含水率增大而增大。考虑到含盐量的增大会降低土壤冻结温度,将图 4 中各曲线拐点对应温度值与试件含盐量绘于图 5 进行对比,发现冻结温度与试件含盐量成较好的线性关系,这与文献[13,14]的试验结果相吻合。

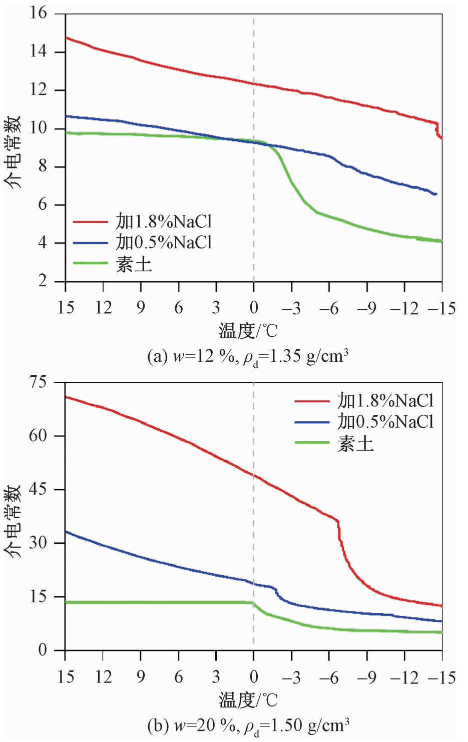

图 4　含盐量和介电常数关系

Fig. 4　Relationship between salt content and dielectric constant

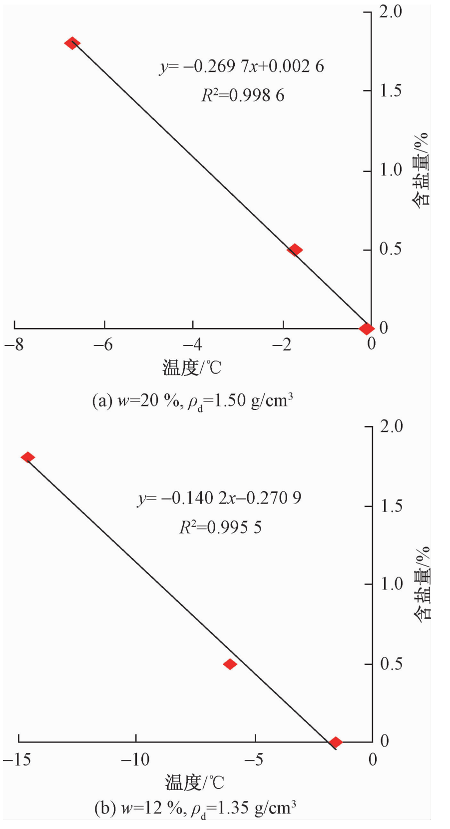

图 5　试件含盐量与拐点温度的关系

Fig. 5　Relationship between salt content and inflection point temperature

3　总结

(1)温度对土壤 ε 的影响主要存在于土壤液态水相变阶段;而常温范围内 ε 随温度的变化很小,可不考虑 FDR 传感器测量土壤体积含水率时由温度引起的误差。

(2)质量含水率或干密度的增大,都会引起土壤 ε 增大,表现出介电常数随体积含水率增大而增大,总体趋势符合 Topp 公式以及传感器自带经验公式。

(3)含盐量的增加会引起 ε 急剧增大,在高含水率时尤为明显,此时若直接利用传感器测量土壤含水率会出现较大误差,需要另外对经验公式进行校正。

参 考 文 献

1 Maxwell-Garnett J C. Colours in metal glasses and metal films. Philosophical Transactions of the Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences,1904;203(359—371):385—420

2 Topp G C, Davis J L, Anna A P. Electromagnetic determination of soil water content: measurement in coaxial transmission lines. Water Resources Research,1980;16(3):574—582

3 Roth C H, Malicki M A, Plagge R. Empirical evaluation of the relationship between soil dielectric constant and volumetric water content as the basis for calibrating soil moisture measurements by TDR. European Journal of Soil Science,1992;43(1):1—13

4 Herkelrath W N, Hamburg S P, Murphy F. Automatic, real-time monitoring of soil moisture in a remote field area with time domain reflectometry. Water Resources Research, 1991;27(2): 857—864

5 Alharthia A, Lange J. Soil water saturation: dielectric determination. Water Resources Research, 1987;23(4): 591—595

6 Looyenga H. Dielectric constants of heterogeneous mixtures. Physica, 1965;31(3): 401—406

7 Roth K, Schulin R, Flühler H, *et al.* Calibration of time domain reflectomely for water content measurement using a composite dielectric approach. Water Resources Research, 1990;26(10):2267—2273

8 Dasberg S, Hopmans J W. Time domain reflectometry calibration for uniformly and nonuniformly wetted sandy and clayey loam soils. Soil Science Society of America Journal, 1992; 56(5):1341—1345

9 雷 磊,塔西甫拉提·特依拜,丁建丽,等. 干旱区盐渍土介电常数特性研究与模型验证. 农业工程学报,2013;29(16):125—133
Lei Lei, Taxifulati T, Ding Jianli, *et al.* Studies on dielectric constant characteristics and model validation of saline soil in arid area. Journal of Agricultural Engineering, 2013; 29 (16):125—133

10 Pan J M, Zhang L X, Wu H R, *et al.* Effect of soil organic substance on soil dielectric constant. Journal of Remote Sensing, 2012; 16(1):1—24

11 Whalley W R, Dean T J, Izzard P. Evaluation of the capacitance technique as a method for dynamically measuring soil water content. Journal of Agricultural Engineering Research, 1992; 52 (2): 147—155

12 Bell J P, Dean T J, Hodnett M G. Soil moisture measurement by an improved capacitance technique, Part II. Field techniques, evaluation and calibration. Journal of Hydrology, 1987; 93 (1—2): 79—90

13 徐学祖,王家澄,张立新. 冻土物理学. 2 版. 北京:科学出版社,2010
Xu Xuezu, Wang Jiacheng, Zhang Lixin. Frozen soil physics. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2010

14 郑秀清,樊贵盛,邢述彦. 水分在季节性非饱和冻融土壤中的运动. 北京:地质出版社,2002
Zheng Xiuqing, Fan Guisheng, Xing Shuyan. Movement of water in seasonal unsaturated frozen-thawed soil. Beijing: Geological Publishing House, 2002

Study on Influencing Factors of Dielectric Constant in Soil Freezing Process Based on FDR

XU Shuang[1], GUO Ying [1,2 *], SHAN Wei [2]

(College of Civil Engineering[1], Institute of Cold Regions Science and Engineering[2], Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

[**Abstract**] In order to explore the variation law of the permittivity (ε) of soil freezing process with different factors, taking the loess in the suburbs of Harbin as the research object, by changing the water content, dry density, salt and other factors, the ε changes in the soil freezing process were measured by the frequency domain reflection principle (FDR). And the influence of each factor on ε was analyzed. The results show that the effect of temperature on soil ε is mainly in the stage of soil water phase change. The change of ε with temperature in the room temperature is very small, and the error caused by FDR sensor measurement of water content in liquid water volume is not significant. With the increase of water content or dry density, soil ε will be correspondingly increased, and the overall trend is consistent with the Topp formula and the formula that comes with the sensor. The increase in salt content will cause a sharp increase in ε, at this time directly measured by the sensor moisture content will be a greater error, the need for additional correction.

[**Key words**] frozen soil dielectric constant frequency domain reflection model