

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0065

DU Yuxia, MING Feng, ZHAO Shuping, et al. Investigation on the influence of temperature on soil dielectric constant[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(2):634-642. [杜玉霞, 明锋, 赵淑萍, 等. 温度对土壤介电常数的影响规律研究[J]. 冰川冻土, 2022, 44(2): 634-642.]

温度对土壤介电常数的影响规律研究

杜玉霞¹, 明 锋¹, 赵淑萍², 张淑娟¹, 杨 旭³

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 南京师范大学 地理科学学院 虚拟地理环境教育部重点实验室, 江苏 南京 210023; 3. 中石化第五建设有限公司, 甘肃 兰州 730060)

摘 要: 介电常数是频域反射法测定土样含水率的关键参数之一。为获取温度对土壤介电常数的影响规律,利用矢量网络分析仪测得不同含水率、含盐量的试样在不同试验温度下的介电常数。通过分析土样介电常数随不同因素的变化规律,最后建立了介电常数与温度的关系。结果表明:温度对土样介电常数的影响主要表现在冰水剧烈相变阶段。当温度低于某一温度或者高于冻结温度后,介电常数受温度的影响较小。负温条件下,土样介电常数随含盐量增大而增大。引入阶梯函数建立的三阶段模型,可有效描述土样介电常数随温度的变化规律。

关键词: 冻土; 融化过程; 介电常数; 频域反射; 预测模型

中图分类号: P642.14; O631.2³ **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2022)02-0634-09

0 引言

土壤含水率在农业、园林、生态等领域发挥着极其重要的作用^[1]。土壤含水率决定了土壤中有机养分的分解程度,而作植物的根系需要通过水分介质来吸收水分^[2]。土壤含水率不仅是影响地表渗流、降雨入渗、地表蒸散发以及大气热量交换的重要因素^[3],而且土壤水分的积累可能孕育和诱发地质灾害^[4]。因此,准确测定土壤含水率,对于水资源管理以及地质灾害防治具有重要意义。

目前,测量土壤含水率的方法有很多,如烘干法、时域反射法、频域反射法等。频域反射法因其具有测量快、扰动小、精度高的优点,被广泛用于测定土壤含水率^[5-6]。在介质极化理论基础上,学者们对土壤介电常数特性展开研究^[7-8]。研究发现:介电常数的实部与土壤的体积含水量呈单值函数关系,并建立了含水率与介电常数的关系^[9]。当测试频率低于0.1 GHz时,介电常数和介质损耗因数均随孔隙率增大而增大。但在频率高于0.1 GHz条件下,

介电常数和介质损耗因数几乎不受孔隙率影响^[10]。此外,有学者研究矿物质含量、盐分含量对土壤介电性质的影响规律,并用介电常数来反映土壤的含盐量和盐渍化程度^[11-12]。随着黏粒含量的增加、土壤的介电常数呈现降低趋势。这是因为土壤黏粒中带有电荷,导致其固相介电特性有所改变而增大介电损失^[13]。但对于磁性土壤,需要对其测量结果进行修正,否则会高估土壤的介电常数。可以看出,关于土壤介电常数的研究大多是集中在常温下的,很少考虑低温及负温对介电常数的影响。

冻土是一种对温度十分敏感且物理性质不稳定的特殊土,其特性受温度影响明显^[14]。实验研究表明,当温度降低至冻结温度以下,土中未冻水含量的降低,引起土壤介电常数减小。Patterson等^[15]研究表明,冻土未冻水含量的变化可以采用时域反射法测得的介电常数来表示。通过比较测温法和时域反射法对土壤冻结深度的预测结果,验证了时域反射法确定冻土未冻水含量的有效性^[16-17]。然

收稿日期: 2022-02-22; 修订日期: 2022-03-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(41801041;42171125);中国科学院关键技术人才项目(张淑娟);中国科学院青年创新促进会项目(2021426)资助

作者简介: 杜玉霞,工程师,主要从事冻土物理性质测试研究. E-mail: yuxiadu83@lzb.ac.cn

通信作者: 明锋,副研究员,主要从事水热力三场耦合研究. E-mail: mingfeng@nieer.ac.cn

而,因冻土本身含有冰且对温度非常敏感,难以对未冻水含量进行精准测量。在大量测试数据的基础上,Mironov等^[18]提出了考虑土质、温度和频率的冻土介电常数经验模型,但具有极大的局限性。He等^[8]从冻土组分出发,建立了冻土混合介电常数模型。虽然该模型具有通用性,但其计算过程极为复杂。

整体来看,负温下土壤介电特性的研究成果很少,土壤介电常数随温度、含水率等的变化规律还不是很清楚^[19]。本文以粉质黏土为研究对象,研究0.1~1.5 GHz频段内,土壤在不同初始含水率、不同含盐量和不同温度条件下的介电特性及其规律,并建立介电常数与温度的关系,为后期水分传感器研制提供基础。

1 试验方案

1.1 土样制备

选取粉质黏土为研究对象,颗粒级配曲线如图1所示。土样塑限为14.18%、液限为28.96%、土颗粒密度 $2.71 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。因需要研究含盐量对介电常数的影响,按照土工试验方法标准对土样进行洗盐处理。将洗盐后的土样在 105°C 的烘箱中进行烘干,然后碾碎过1 mm孔径的标准筛,最后得到无盐、干燥土颗粒。

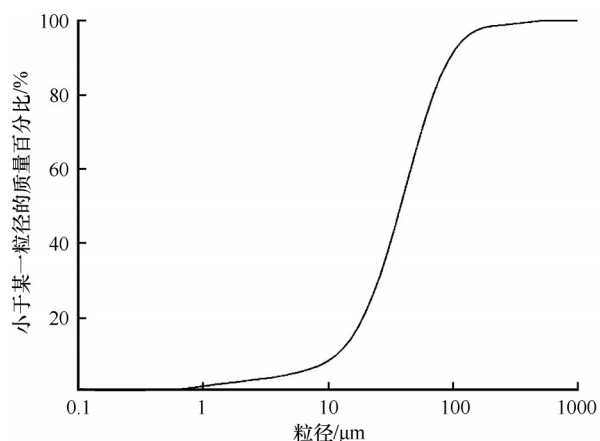


图1 土样颗粒级配曲线

Fig. 1 The curve of soil particle gradation

根据土样采集点的含水率范围(10.8%~21.2%),确定了试样含水率的下限10%、上限22%。结合最优含水率,确定了的三个土样含水率(10%、16%、22%)。参照已有文献^[20],设置5个含盐量。根据试验安排,称取相应质量的干土、水分(去离子水)和盐(NaCl)。将配置好的盐溶液与干土混合,

并搅拌均匀。用保鲜袋将土样包裹使其水盐分布均匀,24 h将土样装入试样筒中。为减少电磁干扰,试样罐采用圆柱形有机玻璃筒(图2)。



图2 有机玻璃试样罐

Fig. 2 The picture of the plexiglass sample jar

1.2 试验仪器

本次土样介电特性测试的主要装置有Agilent公司生产的83628型矢量网络分析仪以及配套的85070E介电常数测量软件、同轴探头和恒温箱(图3)。为保证测量数据的有效性,每次测量前采用空气、短路件和去离子水在常温下对矢量网络分析仪进行校准^[10]。测量样品时,先将同轴探头与试样表面紧密接触。然后开始测试,由信号发生器发出测试信号。当反射信号与发射信号被传送至矢量网络分析仪后,测试软件通过比较信号的幅值和相位,就可以给出测量结果。每个温度点测量时,保证一组样品一次性测量完成,确保测量条件一致。

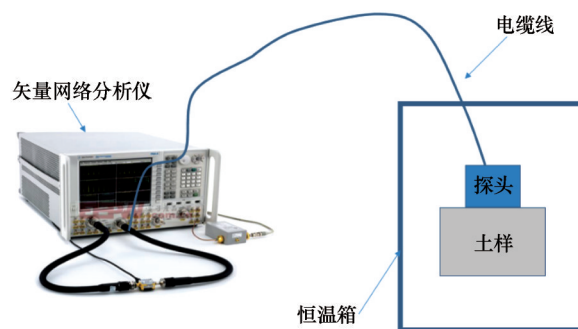


图3 矢量网络分析仪

Fig. 3 The vector network analyzer

1.3 试验步骤

将准备好的试样放入设置试验温度的恒温箱中,样品恒温12 h后进行土样介电常数测试。试验从 -20°C 开始,完成该温度下的测量后再升温。待

下一个测试温度恒温 12 h 后,再进行介电参数测量。为减小环境温度对测量结果的影响,当常温下校准的探头放入恒温箱 2 h 后,方可进行介电常数测量。考虑到土样中的水分在 0~5 ℃ 区间将发生剧烈相变^[21],故在此区间加密了温度测点。试验共设置 10

个测试温度,分别为-20 ℃、-10 ℃、-5 ℃、-2.5 ℃、-1 ℃、0 ℃、5 ℃、10 ℃、15 ℃和 20 ℃。为减小试验误差,设置了平行样。若平行样之间的误差小于 20%,则取两次试验的平均值;若误差大于 20%,则重做该组试验。具体试验安排如表 1 所示。

表 1 试验计划
Table 1 Test program

质量含水率(3组)	含盐量(5种)	温度点(10个)
10%		
16%	0、0.2%、0.6%、1.0%、1.5%	-20 ℃、-10 ℃、-5 ℃、-2.5 ℃、-1 ℃、0 ℃、5 ℃、10 ℃、15 ℃、20 ℃
22%		

2 试验结果

2.1 频率对土样介电特性的影响

图 4 为不同试验条件下土样介电常数随频率的变化趋势图。从图中可以看出,不同含水率、不同含盐量和不同温度试验条件下,介电常数均呈现出随着频率的增大而减小的趋势,但在不同频率下其

降低速率有所不同。根据变化速率可将该曲线划分为三个阶段:介电常数在阶段 I(0~0.1 GHz)迅速降低,其降低速率在阶段 II(0.1~0.5 GHz)有所减缓,并在阶段 III(0.5~1.5 GHz)逐渐趋于平稳。这是因为土样介电常数形成主要是偶极子定向排列产生极化引起的。当频率很高时,土样内部的阻力

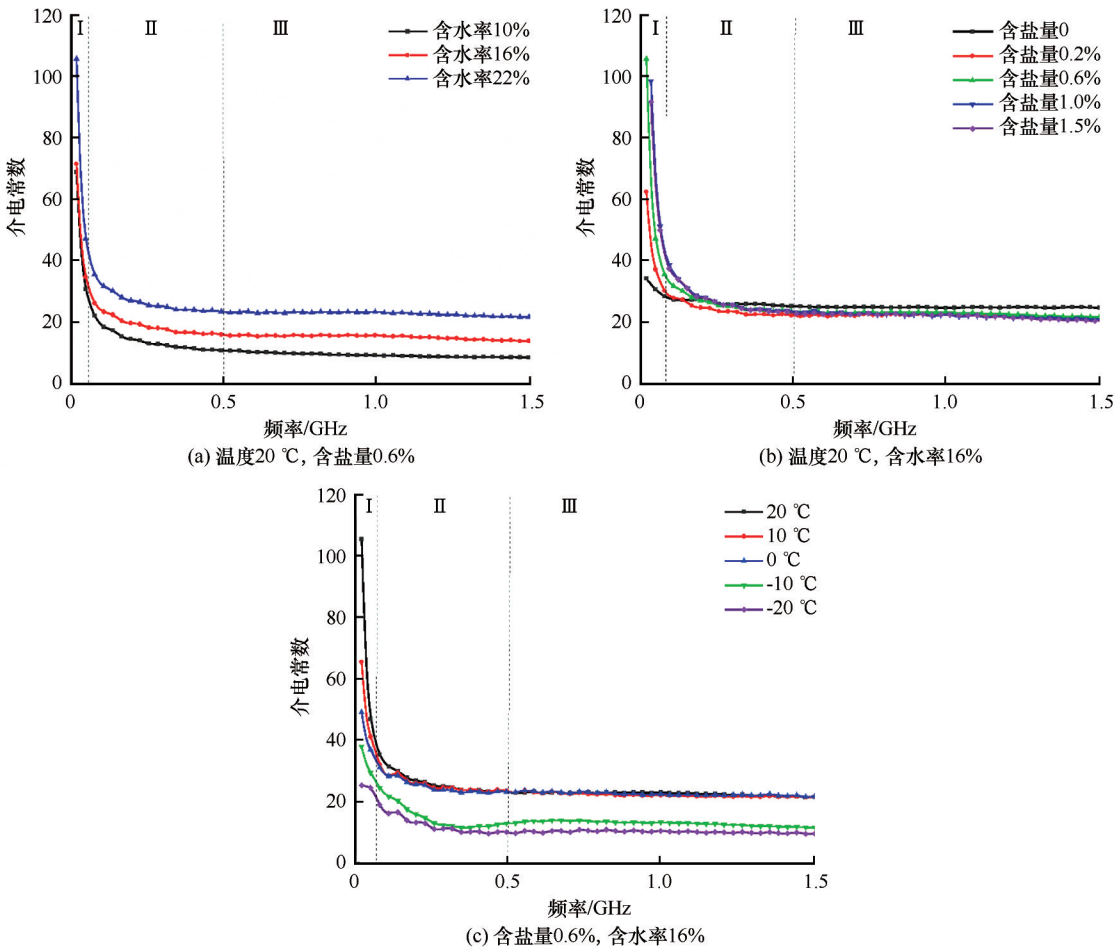


图 4 不同试验条件下介电常数随频率变化规律
Fig. 4 Variation of the dielectric constant with frequency

导致偶极子反转速度小于电场的转动速度。在更高频率下,部分偶极子将停止反转,其对介电常数的贡献基本为零^[22]。因此,介电常数随着频率的升高而减小。需要注意的是,因材料中存在多种极化方式,极化弛豫发生的频段将有所不同。鉴于频率 1 GHz 时的介电常数相对稳定,在分析不同因素对介电常数的影响规律,本文取 1 GHz 时的介电常数值作为土样介电常数。

2.2 初始含水率对土样介电常数的影响

图 5 给出了不同温度下,土样介电常数随初始含水率的变化曲线。从图 5 中可以看出,随着试验温度的降低,介电常数随含水率变化的逐渐变得平稳。在相同温度下,初始含水率越高的土样其介电常数越大。但在不同的温度区间,初始含水率对介电常数的影响不同。如图 5(a) 所示,当温度低于 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,土样中未冻水含量较低,因此,增大初始

含水率对介电常数影响较小。当掺入 1% 的盐分时,土样中的未冻水含量增大。对于初始含水率 10% 和 22% 的试件,其介电常数在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时分别为 9.31 和 11.54,相差 2.23;而当温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,其介电常数分别为 14.98 和 24.15,相差 9.17[图 5(b)]。可以看出,初始含水率在正温阶段对土样介电常数的影响较大,而在负温阶段的影响较小。这是因为当温度低于冻结温度后,土中的大部分水分被冻结,此时土样中的未冻水主要为离子活性较差的结合水^[23]。因此,负温阶段初始含水率对土样介电常数的影响较小。随着土样温度的升高,大量液态水分被释放,自由水的极化作用加强^[3],所以初始含水率在正温阶段对土样介电常数的影响较大。需要注意的是,土样的未冻水含量随着初始含水率的增大而增大。因此,土样介电常数也随初始含水率的增大而增大。

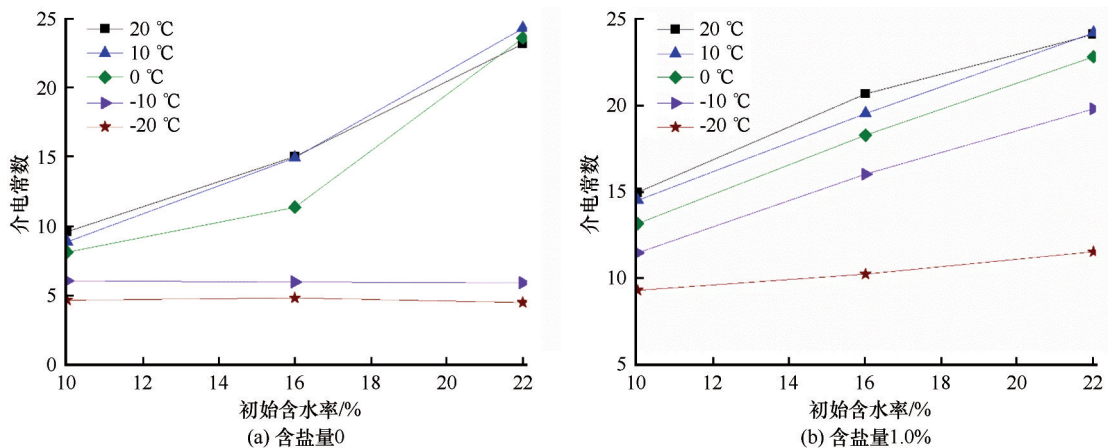


图 5 介电常数随初始含水率变化规律

Fig. 5 Variation of the dielectric constant with initial water content

2.3 含盐量对土样介电常数的影响

图 6 给出了不同温度条件下土样介电常数随含盐量的变化曲线。可以看出,在正温条件下($0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$),不同含盐量下的土样介电常数在一个较小的幅值范围波动。在负温条件下($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$),介电常数随含盐量的增加而显著增加。温度为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,土样介电常数随含盐量的变化曲线非常接近。温度从 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升高至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,不含盐的土样介电常数从 4.52 上升到 23.62,增大了 19.10,增幅约 422%。含盐量 1.5% 的土样介电常数从 16.17 上升到 23.76,增大了 7.59,增幅约 47%[图 6(c)]。随着土样含盐量的增大,土样介电常数增幅逐渐减小。这是因为盐分的加入,降低了含盐土样的冻结温度^[21]。低于冻结温度的某一负

温下,含盐量高的土样拥有较多的未冻水,也就拥有较大的介电常数。从图 6(a)、图 6(b) 和图 6(c) 中结果来看, $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的曲线斜率随着初始含水率的增大而增大。不难看出,含盐量改变了负温条件下土样的介电性质。若直接利用无盐土的拟合参数预测盐渍土的含水率,将会出现较大误差。

2.4 温度对土样介电常数的影响

图 7 给出了不同试验条件下,土样介电常数随温度的变化曲线。在不同含水率和含盐量条件下,土样介电常数呈现出随温度升高而增加的趋势。从图 7 中可以看到,土样的介电常数在 $-10\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内迅速增加。但在 $0\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内,土样介电常数几乎保持不变。这是因为在升温过程中发生了冰水相变,而冰的介电常数(3.15)和水的介电常数

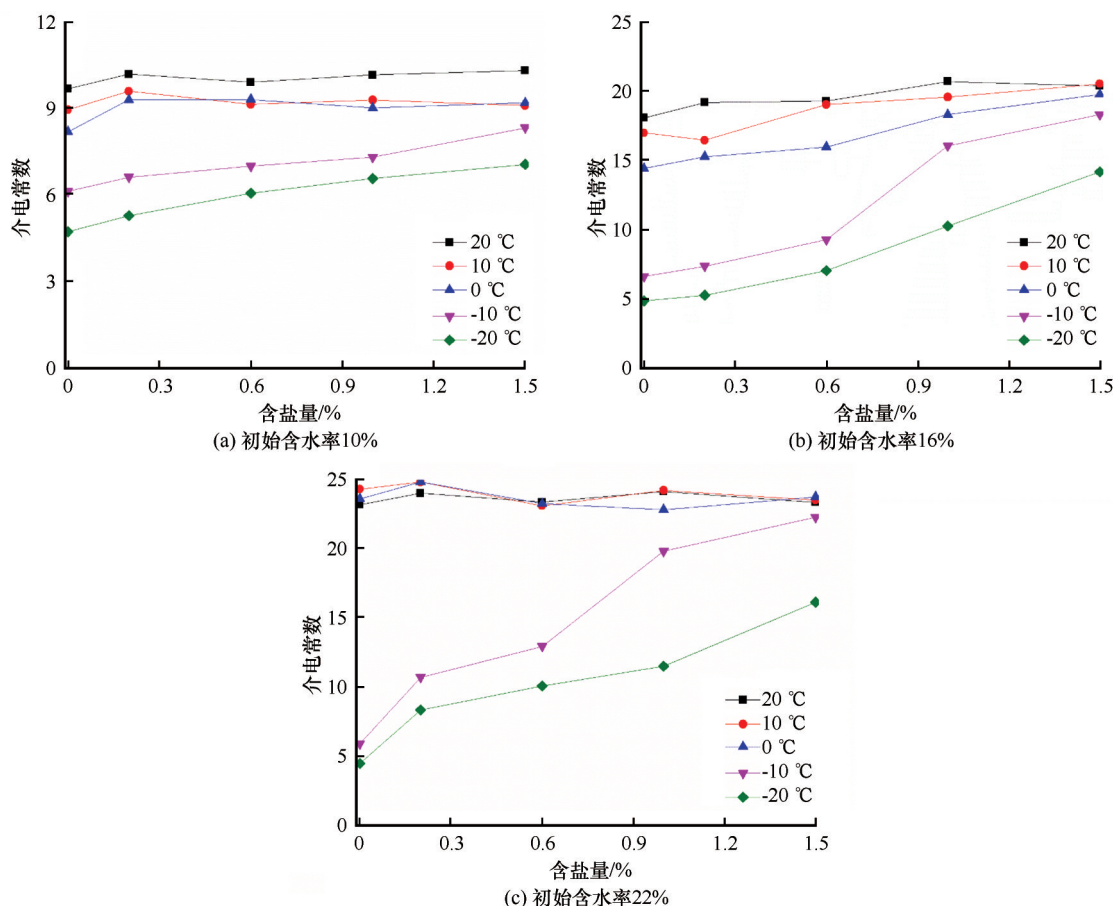


图6 介电常数随含盐量变化规律

Fig. 6 Variation of the dielectric constant with salt content

(80)存在极大的差异所引起。当土样温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,土样内部的水分绝大部分处于冻结状态^[21],此时的介电常数值处于最低水平。随着温度的升高,土样中的未冻水含量略有增加,介电常数有所增大。随着温度进一步升高,土中未冻水含量逐渐增多,并在冻结温度附近显著增加。这可以解释为在冻结温度附近,因液态水的大量释放导致土中含水率增加明显^[8],所以此阶段的介电常数迅速增大。当温度高于冻结温度后,土中未冻水含量不再改变。然而,温度升高可以加速分子运动,所以此阶段的介电常数有小幅上涨。在低含盐量及高含水率条件下[图7(b)、7(c)],介电常数与温度表现出较为明显的非线性关系。

3 讨论

3.1 线性模型

试验结果表明,土样介电常数是随着温度变化而变化,这与已有研究结果是吻合的^[23]。材料介电常数的温度影响系数是指随介电常数随温度的相

对变化率。根据克劳修斯-莫索提方程,在一定温度范围内,材料介电常数的温度系数可以表示为^[24]

$$\alpha = \frac{1}{\epsilon} \frac{d\epsilon}{dT} \quad (1)$$

式中: ϵ 为介电常数; T 为温度; α 为介电常数的温度影响系数。

由微分原理可得

$$\alpha = \frac{1}{\epsilon_0} \frac{\epsilon_0 - \epsilon}{T_0 - T} \quad (2)$$

整理式(2)可得

$$\epsilon = \epsilon_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (3)$$

式中: T_0 为参考温度; ϵ_0 为温度 T_0 对应的介电常数。

当 α 取常数时,式(3)为线性模型。选择图7中含水率22%,含盐量为0、0.6%和1.5%的结果代入线性模型, T_0 取 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,可以得到三种含盐量土样介电常数随温度的变化规律(图8)。可以看出,预测值与实测值相差较大,最大相关系数为0.7722,最小相关系数为0.5585。因此,不宜采用线性模型来描述 $-20\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内温度与介电常数的关系。

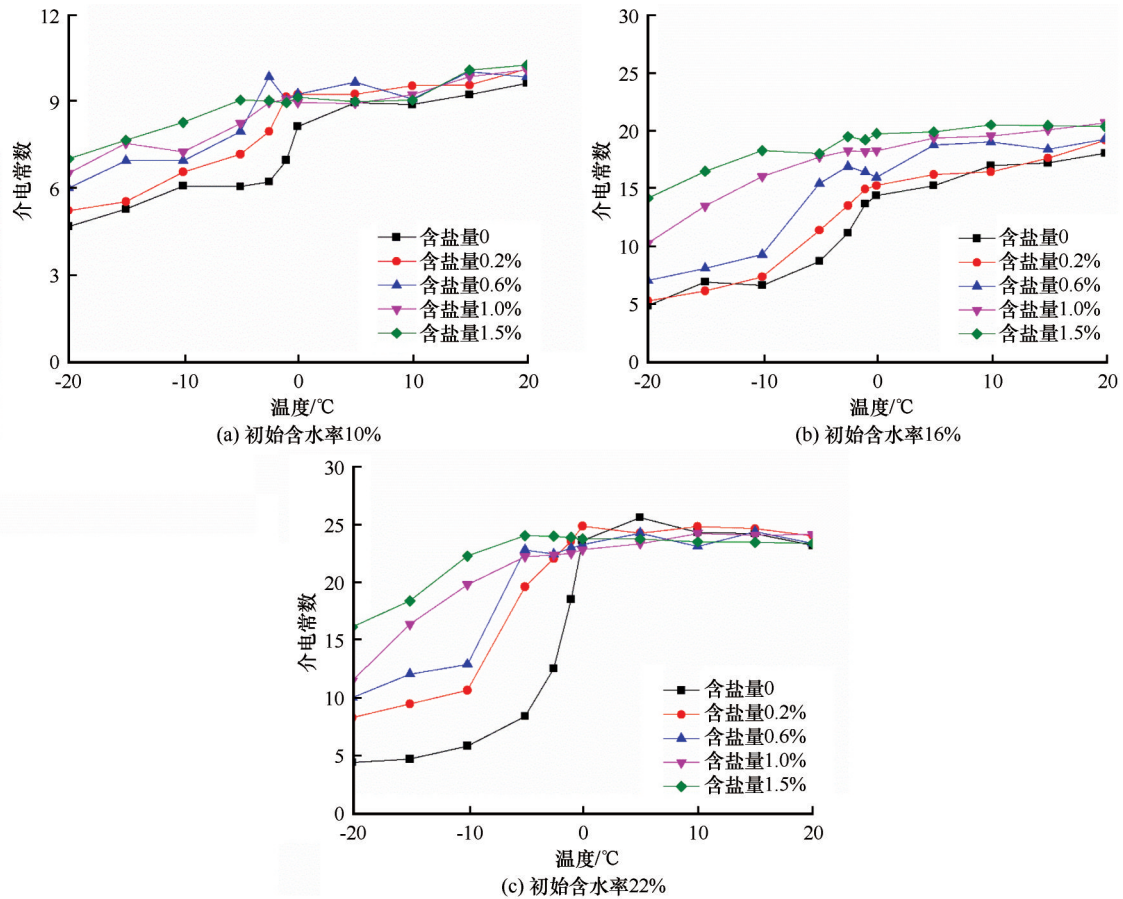


图7 介电常数随温度变化规律

Fig. 7 Variation of the dielectric constant with temperature

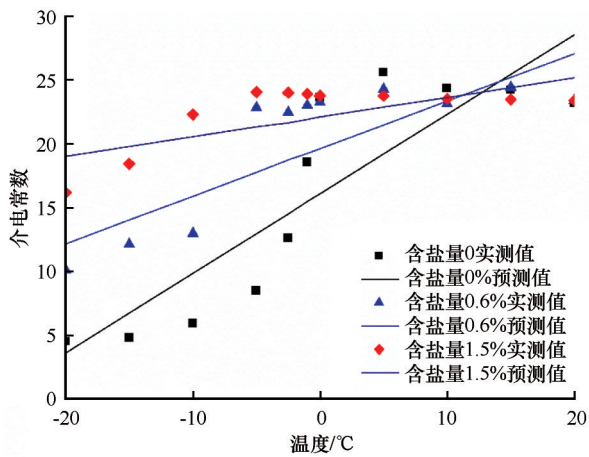


图8 土样介电常数实测值与式(3)预测值对比

Fig. 8 Comparison of the measured and predicted dielectric constant of Eq. (3)

3.2 非线性模型

鉴于线性模型不能准确描述-20~20 °C范围内温度与介电常数的关系,本文将提出更为合适的模型来描述温度与介电常数的关系。分析发现,所有介电常数随温度的变化曲线均可划分为3个阶段:

在阶段I和阶段III,介电常数随温度升高呈现小幅线性增加;在阶段II,介电常数随温度升高呈现大幅的非线性增加(图9)。据此,本文引入阶梯函数来描述介电常数随温度的变化规律。

鉴于阶段I和阶段III内的介电常数变化呈现近似线性变化,仍然采用式(3)来描述阶段I和阶段III

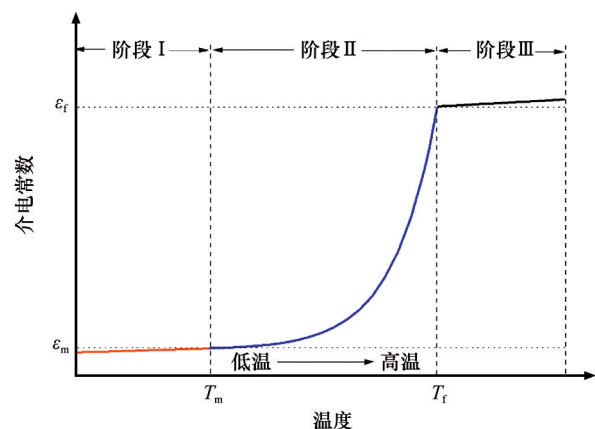


图9 介电常数随温度变化趋势示意图

Fig. 9 The schematic of the variation of the dielectric constant with temperature

的介电常数变化。但其中的系数有所变化,具体表示为:

阶段 I:

$$\varepsilon_I = \varepsilon_m [1 + \alpha(T - T_m)] \quad (4)$$

阶段 III:

$$\varepsilon_{III} = \varepsilon_f [1 + \beta(T - T_f)] \quad (5)$$

式中: ε_I 、 ε_{III} 分别为阶段 I、III 任意温度的介电常数; T_m 为参考温度, T_f 为冻结温度; ε_m 、 ε_f 分别为 T_m 、 T_f 时对应的介电常数; α 和 β 分别为阶段 I 和阶段 III 介电常数的温度系数。

在阶段 II,介电常数随温度呈现非线性变化。为了使过渡函数具有更好的光滑性,本文引进阶梯函数 $H(T, d)^{[25]}$:

$$H(T, d) = \begin{cases} 0 & T \leq T_m \\ A \exp\left(\frac{T_f - T}{T - T_m}\right)^\beta & T_m < T < T_f \\ 1 & T \geq T_f \end{cases} \quad (6)$$

式中: A 和 B 为拟合参数。

借助阶梯函数 $H(T, d)$,可将整个温度区间内的介电常数表示为:

$$\varepsilon = \varepsilon_I + (\varepsilon_{III} - \varepsilon_I)H(T, d) \quad (7)$$

选取含水率为 22%, 3 种含盐量下的试样结果对式(7)进行验证,所用模型参数如表 2 所示。当含盐量为 1.5% 时,因 T_m (-22°C) 低于实验的最低温度,所以没有第一阶段和参数 α 。预测值与实测值对比结果如图 10 所示。

表 2 模型参数

Table 2 Model parameters in Eq. (7)

参数	α	β	A	B	T_m	T_f
含盐量 0	0.015	0.0012	-1.75	0.37	-12	-0.5
含盐量 0.6%	0.026	0.0024	-1.58	1.54	-16	-2.7
含盐量 1.5%	/	0.0007	-1.29	1.79	-22	-7.2

从图 10 的对比结果来看,介电常数预测值与实测值相差较小,最大相对误差为 7.85%,相关系数可达 0.96。需要注意的,不同条件下土样的冻结温度以及未冻水含量变化速率有所差异。采用非线性的阶梯函数可以有效的描述介电常数从负温到正温的变化过程,但不同条件下的模型参数有所区别。

4 结论与展望

本文以粉质黏土为研究对象,通过分析土样介电常数随温度的变化规律,建立了温度与介电常数

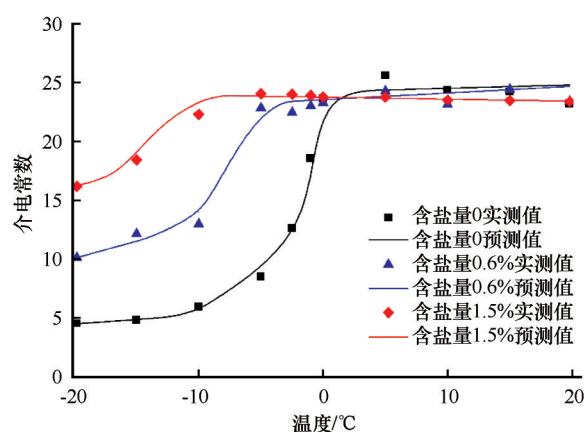


图 10 土样介电常数实测值与式(7)预测值对比

Fig. 10 Comparison of the measured and predicted dielectric constant of Eq. (7)

的关系模型。主要结论如下:

(1) 温度对土样介电常数的影响主要存在于冰水剧烈相变阶段。常温范围内以及稳定冻结状态范围内,介电常数随温度的变化很小。

(2) 初始含水率的增大,引起土样介电常数增大,表现为介电常数随含水率增大而增大。

(3) 引入阶梯函数建立考虑温度影响的土样介电模型,此模型可将表示冻土和未冻土的介电常数方法统一起来。预测值与实测值的对比结果显示,新提出的介电模型能够较好地描述土样介电常数随温度的变化规律。

(4) 本文采用表面接触法,测量了土样在不同温度下的介电常数。然而,在冻结过程中,土样冻胀影响表面平整度,进而影响样品和探头的接触,导致测量结果存在一定误差。如何消除这种影响,正在进一步深入研究中。

参考文献(References):

- [1] Saeid G, Ryutaro T, Brian A J. Mineral soil texture-land cover dependency on microwave dielectric models in an arid environment[J]. Land, 2020, 9(39): 1-13.
- [2] Prieto I, Armas C, Pugnnaire F I. Water release through plant roots: New insights into its consequences at the plant and ecosystem level[J]. New Phytologist, 2012, 193: 830-841.
- [3] 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. [徐爽, 郭颖, 单伟. 基于频域反射原理的土冻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.]
- [4] Guan S P, Liu W Y, Liu W, et al. Dielectric properties based detection of heavy metal contaminated soil in the frequency range from 10 MHz to 1 GHz[J]. Soil and Sediment Contamination: An International Journal, 2018, 27(5): 1-14.
- [5] Zhao Y, Ling D S, Wang Y L, et al. Study on a calibration

- equation for soil water content in field tests using time domain reflectometry [J]. *Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics & Engineering)*, 2016, 17(3): 240-252.
- [6] Chen Quan, Zeng Jiangyuan, Li Zhen, et al. Relationship model of soil moisture and dielectric constant monitored with remote sensing [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2012, 28(12): 171-175. [陈权, 曾江源, 李震, 等. 遥感监测介电常数与土壤含水率关系模型[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(12): 171-175.]
- [7] Liao Hongjian, Sun Junyu, Zan Yuewen, et al. Dielectric constant model for soil and its application in engineering [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(Suppl 2): 36-41. [廖红建, 孙俊煜, 詹月稳, 等. 土的介电常数模型及其工程运用探讨[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(增刊2): 36-41.]
- [8] He H, Dyck M. Application of multiphase dielectric mixing models for understanding the effective dielectric permittivity of frozen soils [J]. *Vadose Zone Journal*, 2013, 12(1): 2-22.
- [9] Mitja A S. Non-destructive determination of moisture content in hazelnut [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2016, 121: 320-330.
- [10] Zhang Peng. Analysis to effects of main factors on dielectric properties of soils [D]. Northwest Agriculture & Forestry University, 2013. [张鹏. 主要因素对土壤介电特性的影响分析研究[D]. 西北农林科技大学, 2013.]
- [11] Wei Long, Wang Weizhen, Wu Yueru, et al. Comparative analysis of soil water and salt dielectric model [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2017, 32(6): 1022-1030. [魏龙, 王维真, 吴月茹, 等. 土壤水盐介电模型对比与分析[J]. *遥感技术与应用*, 2017, 32(6): 1022-1030.]
- [12] Wu Y R, Wang W Z, Zhao S J, et al. Dielectric properties of saline soils and an improved dielectric model in C-Band [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(1): 440-452.
- [13] Pan Jinmei, Zhang Lixin, Wu Haoran, et al. Effect of soil organic substance on soil dielectric constant [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2012, 16(1): 1-24. [潘金梅, 张立新, 吴浩然, 等. 土壤有机物质对土壤介电常数的影响[J]. *遥感学报*, 2012, 16(1): 1-24.]
- [14] Bai R Q, Lai Y M, Zhang M Y, et al. Theory and application of a novel soil freezing characteristic curve [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 129: 1106-1114.
- [15] Patterson D E, Smith M W. The measurement of unfrozen water content by time domain reflectometry: results from laboratory tests [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1981, 18(1): 131-144.
- [16] Baker T H W, Davis J L, Hayhoe H N, et al. Locating the frozen-unfrozen interface in soils using time-domain reflectometry [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1982, 19: 511-517.
- [17] Hayhoe H N, Topp G C, Bailey W G. Measurement of soil water contents and frozen soil depth during a thaw using time domain reflectometry [J]. *Atmosphere Ocean*, 1983, 21(3): 299-311.
- [18] Mironov V L, Dobson M C, Kaupp V H, et al. Generalized refractive mixing dielectric model for moist soils [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(4): 773-785.
- [19] Jin Xiao, Yang Wen, Zhao Jianqi. Study on the permittivity mixing model of freezing soil [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(3): 570-579. [靳潇, 杨文, 赵剑琦. 冻结土壤介电常数混合模型机理研究[J]. *冰川冻土*, 2018, 40(3): 570-579.]
- [20] Lu Xinghang, Shi Haibin, Li Ruiping, et al. NMR-based research on unfrozen water and pore water content in saline freezing-thawing soils [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(2): 111-116. [卢星航, 史海滨, 李瑞平, 等. 基于 NMR 技术的盐渍化冻融土壤未冻水及孔隙水含量试验研究[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(2): 111-116.]
- [21] Xu Xiaozu, Wang Jiacheng, Zhang Lixin. *Physics of frozen soil* [M]. Beijing: Science Press, 2010: 43-49. [徐敦祖, 王家澄, 张立新. *冻土物理学* [M]. 北京: 科学出版社, 2010: 43-49.]
- [22] Zhong Lisheng, Li Shengtao, Xu Chuanxiang, et al. *Physical properties of engineering dielectric* [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2013: 118-119. [钟力生, 李盛涛, 徐传骧, 等. *工程介电物理性质* [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2013: 118-119.]
- [23] Li Liying, Zhang Lixin, Zhao Shaojie. Laboratory measurement of the dielectric constant of frozen soil [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2007, 43(6): 241-244. [李丽英, 张立新, 赵少杰. 冻土介电常数的实验研究[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2007, 43(6): 241-244.]
- [24] Or D, Wraith J M. Temperature effects on soil bulk dielectric permittivity measured by time domain reflectometry: a physical model [J]. *Water Resources Research*, 1999, 35(7): 371-383.
- [25] Lin Qun. *Based tutorial on numerical solutions of differential equations* [M]. Beijing: Science Press, 2003: 82-85. [林群. *微分方程数值解法基础教程* [M]. 北京: 科学出版社, 2003: 82-85.]

Investigation on the influence of temperature on soil dielectric constant

DU Yuxia¹, MING Feng¹, ZHAO Shuping², ZHANG Shujuan¹, YANG Xu³

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment of Ministry of Education, School of Geographic Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 3. Sinopec Fifth Construction Co. LTD, Lanzhou 730060, China)

Abstract: The dielectric constant is one of the key parameters for measuring soil moisture content through the frequency domain reflection method. To obtain the influence of temperature on soil dielectric constant, the vector network analyzer was used to test the dielectric constant of soil samples with different water contents and salt contents at different temperatures. By analyze the change law of soil dielectric constant with different factors, a step function was introduced to describe the relationship between dielectric constant and temperature. The results show that through the water-ice phase change, the temperature controls the soil dielectric constant. When the temperature is lower than a certain temperature or higher than freezing point, the dielectric constant is less affected by temperature. The dielectric constant has a great change in the severe phase of ice-water transformation. The dielectric constant of soil increases with the increase of salt content. The increase of initial water content will increase the dielectric constant. A three-stage model based on step function can be well describe influence of temperature on the soil dielectric constant.

Key words: frozen soils; thawing process; dielectric constant; frequency domain reflection; prediction model

(责任编辑: 张泽)