

# 土壤介电常数模型研究综述

徐兴倩<sup>1</sup>, 王海军<sup>1</sup>, 屈新<sup>2</sup>, 彭光灿<sup>1</sup>, 赵熹<sup>1\*</sup>

(1.云南农业大学 水利学院, 昆明 650201; 2.安阳工学院 土木与建筑工程学院, 河南 安阳 455000)

**摘要:**【目的】调查影响土壤介电常数的主控因子, 归纳分析土壤介电常数模型的研究现状。【方法】从土壤介电理论出发, 系统梳理土壤介电常数的主要影响因素, 对现有土壤介电常数模型进行分类总结, 并对比分析各模型的优势、局限和应用现状及其发展趋势。【结果】国内外不同土壤类型的介电常数主控影响因素各异, 且对测试频率的依赖性较大, 但能有效反映土壤的水分状态; 土壤介电常数模型分为四类: 理论模型、半经验理论模型、经验模型和边界模型。【结论】目前针对区域性特殊土类的介电特性及模型构建研究较少; 考虑土壤三相组比、矿物成分和微观结构对介电常数的贡献度将有助于提升模型精度, 进而拓展基于介电常数测试的土壤理化性质评价分析方面的应用研究。

**关键词:** 土壤; 含水率; 电磁波; 介电常数; 模型

中图分类号: S152

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023380

OSID:



徐兴倩, 王海军, 屈新, 等. 土壤介电常数模型研究综述[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(3): 61-70.

XU Xingqian, WANG Haijun, QU Xin, et al. Study on soil dielectric constant models: A review[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(3): 61-70.

## 0 引言

【研究意义】土壤介电常数是表征其介电性质或极化能力的物理参数之一, 用相对介电常数表示。相对介电常数等于介电常数的实部与真空介电常数的比值。不同土壤的介电常数差异较大, 与含水率、密度、温度、含盐量、有机质、污染物以及物质组成等因素密切相关。其中, 土壤含水率对介电常数最为敏感, 通过介电常数模型可快速评价土壤的水分状态。因此, 土壤介电常数模型在土壤水分检测、监测及高效节水灌溉等领域具有潜在的应用前景。

【研究进展】土壤介电常数模型是水分传感器快速检测土壤含水率的基本依据。目前, 土壤介电常数测试手段主要有探地雷达(GPR)、时域反射(TDR)、频域反射(FDR)等<sup>[1-4]</sup>。考虑土壤介电常数主要影响因素, 通过电磁波测量土壤的介电常数, 借助介电常数模型反演获取土壤含水率, 准确性依赖于所构建模型的精度。国内外学者研究发现土壤介电常数与含水率之间的相关性受多种因素的影响, 如: 土壤种类、颗粒形态、温度、含盐量、有机质和污染物等<sup>[5-8]</sup>。

所以, 系统分析土壤介电常数的影响因素, 有助于筛选土壤介电常数模型构建的主控因子, 建立更为合理、可靠的模型。

土壤介电常数模型构建大多基于理论与试验相结合, 代表性的土壤介电常数模型主要有4类: 理论模型、半经验半理论模型、经验模型和边界模型。在理论模型方面, 考虑了土壤各组分的权重影响, 强调土壤颗粒与周围环境的相互作用效应, 按土壤三相的贡献度进行加权平均获取介电常数模型<sup>[9-12]</sup>。在半经验理论模型方面, 通过实测数据分析获取理论模型参数, 有效解决了理论模型参数较难确定的问题, 模型应用于微波遥感反演土壤水分取得了良好效果<sup>[13-14]</sup>。在经验模型方面, 通过大量的试验数据分析获取介电常数与含水率的量化经验关系, 对区域性土壤含水率指标的评价具有较好的适用性<sup>[15-17]</sup>。在边界模型方面, 基于理论假设估算土壤介电常数的上下限, 划定土壤介电常数的取值范围, 具有较好的普适性, 但模型精度受假设条件限制<sup>[18-20]</sup>。随着土壤介电常数模型的逐步改进, 可为土壤质量检测、土壤修复效果评价及农田高效节水灌溉等领域的应用研究提供理论支撑。

【切入点】土壤介电常数模型形式及种类复杂多样, 其预测精度受土壤类型、物理化学性质影响, 为提高模型反演土壤离散点含水率的精度, 亟需梳理影响土壤介电常数的主控因子, 分析不同土壤介电常数模型构建思路和改进方向。【拟解决关键问题】通过分析土壤介电常数的主要影响因素, 归纳总结土壤介电常数模型研究现状, 详细介绍不同模型的构建思

收稿日期: 2023-08-20 修回日期: 2023-11-08

基金项目: 云南省基础研究计划面上基金项目(202101AT070271); 国家自然科学基金项目(42367025); 云南省高层次人才支持计划“青年拔尖人才”专项(YNWR-QNBJ-2020-030); 云南省教育厅科学研究基金项目(2023Y1017)

作者简介: 徐兴倩(1985-), 男, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事环境岩土工程及数值分析研究。E-mail: xuxingqian\_123@163.com

通信作者: 赵熹(1987-), 男, 讲师, 博士, 主要从事工程抗震方向研究。E-mail: zhaoxi426@foxmail.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

路、适用条件、优缺点及发展趋势,重点分析如何提升土壤介电常数模型的精度问题,为建立更科学、合理、可靠的评价模型,更好的服务于农业工程、灌溉节水等领域的应用研究。

## 1 土壤介电理论

介电常数指介质对外加电场的响应特征,是介质抵御内部形成电场的能力。在外加电场作用下,介质发生极化,极化方式包括:电子极化、离子极化、偶极极化等<sup>[21]</sup>,用极化矢量定量描述:

$$P = \chi_c \varepsilon_0 E, \quad (1)$$

式中:  $\chi_c$  为介质极化率,  $E$  为电场强度 (V/m), 真空介电常数  $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$  F/m 物质的介电能力或极化能力通常用介电常数表征:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 (1 + \chi_c). \quad (2)$$

水是土壤中一种极性材料,在外加静电场作用下会产生转向极化,使其内部电场强度小于外部施加的电场强度。土壤介电常数同时反映了土壤的介质极化能力和电荷保持能力,土壤介电常数取决于土-水-气的介电性质、含量及结构特征等<sup>[22]</sup>。土壤介电常数作为预测土壤含水率的基本物理量,反映了介质与电磁波相互作用特征。在静电场中,介电常数等于实际电场强度与原电场强度比值,表示极化过程中偶极子在电场中存储的能量;在物理学中,介电常数指相对介电常数与真空介电常数的乘积;在交变电磁场中,介电常数通常为复数形式,以真空介电常数为标准值;而介质的介电常数用相对介电常数表示:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \varepsilon_r' - j \varepsilon_r'' = \varepsilon_r' (1 - j \tan \delta), \quad (3)$$

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'}, \quad (4)$$

式中:  $\varepsilon_r$  为相对介电常数,  $\varepsilon$  为绝对介电常数,  $j$  为虚数单位,  $\varepsilon_r'$  为复介电常数实部,  $\varepsilon_r''$  表示复介电常数虚部,  $\tan \delta$  表示损耗角正切。土壤介电常数描述了土壤对电磁波的响应特性,其极化能力与电磁波频率、土壤种类、含水率、温度等因素密切相关。在土壤三相组成中,含水率决定了介电常数,一般情况下,水的介电常数约为 80.36,土壤颗粒的介电常数约为 3~7,气体的介电常数约为 1,且自由水的介电常数远大于结合水的介电常数。

## 2 土壤介电常数影响因素

### 2.1 土壤种类

不同土壤的理化性质差异较大,其介电常数大小也不同。巨兆强<sup>[23]</sup>对比 12 种典型土壤介电常数发现,

南方红壤黏粒和铁铝矿物量是引起红壤介电常数异常的主要原因;朱安宁等<sup>[24]</sup>基于 4 种典型土壤和 8 种地质指出土壤类型对介电常数与含水率的关系影响较大。不同土壤砂粒量、黏粒量及其物质组成、成土方式会直接影响孔隙结构,对孔隙水分布造成较大影响,因而影响土壤介电常数<sup>[25-27]</sup>。土壤种类对介电常数的影响主要在于土壤物质组成、结构特征及土水形态,而质地的影响主要归结于颗粒组成及黏粒含量。不同土壤砂粒量、黏粒量以及溶液离子量、物质成分不同会引起土壤介电常数的差异。

### 2.2 物理因素

#### 2.2.1 土壤含水率

土壤含水率具有较强的介质极化能力,对土壤介电常数大小起决定性作用。Topp 等<sup>[28]</sup>指出土壤介电常数对含水率最为敏感;随后,诸多学者也发现土壤中水的极化方式主导了土壤介电常数<sup>[29-30]</sup>。土壤水作为极性分子,在外加电场作用下发生转向极化,主导了土壤三相的介电性能。土壤中液相水从无到有依次出现强结合水、薄膜水、毛细水和重力水,其液态水存在形态及受力作用不同使土壤介电常数存在较大差异。但是,土壤种类、结构、物质组成以及温度、盐度、污染物质、冻融变化等因素都会影响土壤中水分特性,对土壤水的极化产生影响,宏观表现为土壤介电特性的变化。

#### 2.2.2 土壤干体积质量

土壤干体积质量表征了土壤孔隙结构及连通性,对孔隙水分布影响较大,从而影响土壤介电常数。土壤干体积质量增加会使颗粒内部结构发生改变,孔隙的连通性也随之改变,使土壤水的分布状态发生改变,进而影响介电常数<sup>[31-33]</sup>。随着干体积质量增加土壤内部结构发生改变,孔隙减小,使土壤表面水膜厚度增大,从而引起介电常数的增大。可见,干体积质量改变了土颗粒间的距离,使内部孔结构连通性改变,孔隙水重新分布,引起附着水的变化。

#### 2.2.3 土壤温度

土壤介电常数对温度的敏感阶段主要集中于土中冰水变相阶段。土壤由固相颗粒、空气和水组成,其中固相和气体的介电常数相对稳定,而水的介电常数随温度波动性大<sup>[34-35]</sup>。在土壤冻结过程中,温度对介电常数的影响主要集中于冰水剧烈相变阶段,在负温阶段介电常数受温度影响较大,在正温范围内介电常数受温度影响较小<sup>[36-40]</sup>。正温时,温度降低使土壤溶液晶体被析出,土壤中水或盐溶液量降低,进而使介电常数减小;负温时,温度降低至冰结点时土壤中液态水变相,形成冰,增加了凝固态(束缚水增加),而固态冰的介电常数远小于水的介电常数。

### 2.3 化学因素

#### 2.3.1 土壤含盐量

含盐量对土壤介电常数的影响主要集中于盐渍土，盐渍土介电常数虚部对含盐量十分敏感。在半干旱盐渍土地区，土壤介电常数实部由含水率高低决定，而虚部由含盐量多少决定<sup>[41-45]</sup>。盐渍土中含盐量增加会增强土壤导电性，从而引起土壤介电常数虚部随之增大，且实部几乎不随含盐量变化而变化<sup>[46]</sup>。含水率、含盐量、盐分类型及质地对土壤介电常数均有影响，考虑土壤盐分对介电常数影响有助于反演土壤水分、盐分，可用于土壤盐渍化程度评价。

#### 2.3.2 土壤有机质和矿物成分

矿物质和有机质是土壤中常见的化学物质，其对介电常数均有显著影响。土壤介电常数随有机质量增加而增大，不同矿物成分会影响介电常数测定值，有机质对土壤介电常数作用小于矿物质<sup>[25,47-48]</sup>。潘金梅等<sup>[49]</sup>测量 5 种不同有机质量的黑土，发现腐殖质降低了土壤介电常数，植物性残留物作用强于腐殖质。土壤有机质组成复杂，以腐殖质为主，有机质成分、种类及含量不同，土壤介电特性各异。然而，金属矿物对介电常数影响较大，其中磁铁矿对土壤介电常数影

响最大，赤铁矿次之，针铁矿几乎无影响<sup>[50-51]</sup>。金属矿物质增强了土壤磁性，从而导致土壤介电常数明显增加。

#### 2.3.3 土壤污染介质

污染介质对土壤介电常数影响主要分为重金属污染和非水相液体 (NAPLs) 污染。在重金属污染方面，土壤介电常数随重金属质量浓度增大而显著增大，原因在于重金属污染增加了土壤导电性，使污染土壤介电常数虚部显著增大<sup>[52-54]</sup>。在非水相液体污染研究方面，NAPLs 污染改变了土壤溶液的运移特性，增强了液相极化能力，使得土壤介电常数明显增加<sup>[55-57]</sup>。土壤污染物离子在外加电场作用下发生迁移，引起介质损耗，促使介电常数发生明显变化。

## 3 土壤介电常数模型分类总结

### 3.1 理论模型

理论模型将土壤视为多相混合介质，考虑了土壤颗粒形状、含量与各组分之间介电常数的相互作用效应，引入了去极化因子和权重因子<sup>[58]</sup>。基础理论满足  $\epsilon_{\text{eff}} = \sum v_i \epsilon_i$  ( $\epsilon_{\text{eff}}$  为有效介电常数， $v_i$ 、 $\epsilon_i$  为第  $i$  相介电常数和体积分数)。

表 1 理论模型

Tab.1 Theoretical model

模型类别	代表性模型	表达式	极化因子或权重因子
M-G 模型	体积混合模型 <sup>[59]</sup>	$\frac{\epsilon_{\text{eff}} - \epsilon_1}{\epsilon_{\text{eff}} + 2\epsilon_1} = \phi_1 \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + 2\epsilon_1} + \phi_3 \frac{\epsilon_3 - \epsilon_1}{\epsilon_3 + 2\epsilon_1}$	极化因子为 1/3
	DeLoor 模型 <sup>[60]</sup>	$\epsilon_{\text{eff}} = \epsilon_{\text{crit}} + \sum_{j=1}^n \frac{v_j (\epsilon_j - \epsilon_{\text{crit}})}{3} \cdot \sum_{j=1}^3 \left[ 1 + \left( \frac{\epsilon_j}{\epsilon_{\text{crit}}} - 1 \right) A_j \right]^{-1}$	极化因子为 1
DEM 模型	DEM 模型 <sup>[61]</sup>	$\frac{d\epsilon_{\text{eff}}}{3\epsilon_{\text{eff}}} = \frac{\epsilon_2 - \epsilon_{\text{eff}}}{\epsilon_2 + 2\epsilon_{\text{eff}}} d\phi_1 + \frac{\epsilon_3 - \epsilon_{\text{eff}}}{\epsilon_3 + 2\epsilon_{\text{eff}}} d\phi_3$	极化因子为 1/3
	EMT 模型 <sup>[62]</sup>	$\frac{\epsilon_1 + \epsilon_{\text{eff}}}{\epsilon_1 + 2\epsilon_{\text{eff}}} \phi_1 + \frac{\epsilon_2 + \epsilon_{\text{eff}}}{\epsilon_2 + 2\epsilon_{\text{eff}}} \phi_2 + \frac{\epsilon_3 + \epsilon_{\text{eff}}}{\epsilon_3 + 2\epsilon_{\text{eff}}} \phi_3$	极化因子为 1/3
	Dobson 模型 <sup>[63]</sup>	$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{3\epsilon_s + 2(\theta_w - \theta_{bw})(\epsilon_{fw} - \epsilon_s) + 2\theta_{bw}(\epsilon_{bw} - \epsilon_s) + 2(\phi - \theta_w)(\epsilon_a - \epsilon_s)}{3 + (\theta_w - \theta_{bw})(\epsilon_s/\epsilon_{fw} - 1) + \theta_{bw}(\epsilon_s/\epsilon_{bw} - 1) + (\phi - \theta_w)(\epsilon_s/\epsilon_a - 1)}$	极化因子为 1/3
EMT 模型	Friedman 模型 <sup>[64]</sup>	$\epsilon_{\text{eff}} = \left( \frac{C^2}{16} + \frac{\epsilon_{\text{SWA}} \epsilon_{\text{ASW}}}{2} \right)^{1/2} - \frac{C}{4}$ $C = f_W^{\text{SWA}} (\epsilon_{\text{ASW}} - 2\epsilon_{\text{SWA}}) + f_W^{\text{ASW}} (\epsilon_{\text{SWA}} - 2\epsilon_{\text{ASW}})$	考虑水连续和气连续 2 种极端排列下 (SWA、ASW) 的权重因子满足： $f_W^{\text{SWA}} = 1 - S_r$ , $f_W^{\text{ASW}} = S_r$
	Miyamoto 模型 <sup>[65]</sup>	$\theta_v < \theta_{hc}$ , $\epsilon_{\text{eff}} = \left( \frac{C^2}{16} + \frac{\epsilon_{\text{AWSA}} \epsilon_{\text{ASW}}}{2} \right)^{1/2} - \frac{C}{4}$ $C = f_W^{\text{AWSA}} (\epsilon_{\text{ASW}} - 2\epsilon_{\text{AWSA}}) + f_W^{\text{ASW}} (\epsilon_{\text{AWSA}} - 2\epsilon_{\text{ASW}})$ $\theta_v \geq \theta_{hc}$ , $\epsilon_{\text{eff}} = \left( \frac{C^2}{16} + \frac{\epsilon_{\text{WSWA}} \epsilon_{\text{ASW}}}{2} \right)^{1/2} - \frac{C}{4}$ $C = f_W^{\text{AWSA}} (\epsilon_{\text{ASW}} - 2\epsilon_{\text{WSWA}}) + f_W^{\text{ASW}} (\epsilon_{\text{WSWA}} - 2\epsilon_{\text{ASW}})$	考虑水连续和气连续 2 种极端排列情况下 (ASW、AWSA、WSWA) 的权重因子，引入 sigmoidal 函数来调节权重因子关系： $f_W^{\text{ASW}} = \frac{1}{1 + \exp(-10S_r + 5)}$ $f_W^{\text{AWSA}} = f_W^{\text{WSWA}} = 1 - f_W^{\text{ASW}}$
	Blonquist 模型 <sup>[66]</sup>	$\theta_v < \theta_{hc}$ , $\epsilon_{\text{eff}} = \epsilon_{\text{SWA}}$ $\theta_v \geq \theta_{hc}$ , $\epsilon_{\text{eff}} = \left[ \sqrt{\epsilon_{\text{sat}} \left( \frac{\theta_v - \theta_{hc}}{n_c} \right)} + \sqrt{\epsilon_{\text{SWA}} \left( 1 - \frac{\theta_v - \theta_{hc}}{n_c} \right)} \right]^2$	考虑临界含水率 $\theta_{hc}$ , $\theta_{hc}$ 前采用 Friedman 权重因子, $\theta_{hc}$ 后采用 Robinson 权重因子。
	徐云山模型 <sup>[20]</sup>	$\epsilon_{\text{eff}} = K_I (\epsilon_l - \epsilon_g) + \epsilon_g$	引入权重因子 $K_I$ , 与饱和度、比表面积、塑液有关。

注  $\epsilon_{\text{eff}}$  为有效介电常数,  $\epsilon_{\text{crit}}$  为主体介电常数,  $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$ 、 $\epsilon_3$  和  $\phi_1$ 、 $\phi_2$ 、 $\phi_3$  分别为对应土颗粒、水、气的介电常数和占比分数,  $\epsilon_{fw}$ 、 $\epsilon_{bw}$ 、 $\epsilon_a$ 、 $\epsilon_s$  分别表示自由水、结合水、气体、固体颗粒的介电常数,  $A_j$  为极化因子,  $\phi$ 、 $\theta_w$ 、 $\theta_{bw}$  分别表示土壤孔隙率、水体积分数、结合水体积分数,  $\theta_{hc}$  为水力临界含水率,  $\theta_v$  为体积含水率, SWA 表示各相由内至外按固、液、气相排列, ASW 表示各相由内至外按气、固、液相排列, AWSA 表示各相由内至外按气、液、固、气相排列, WSWA 表示各相由内至外按液、固、液、气相排列,  $C$  为系数,  $\epsilon_{\text{ASW}}$ 、 $\epsilon_{\text{SWA}}$ 、 $\epsilon_{\text{AWSA}}$  和  $f_W^{\text{ASW}}$ 、 $f_W^{\text{SWA}}$ 、 $f_W^{\text{AWSA}}$  分别为对应排列下的介电常数和权重因子,  $S_r$  为饱和度,  $n_c$  为粘团间孔隙率,  $\epsilon_{\text{sat}}$  为饱和土介电常数,  $\epsilon_l$  为水连续下的介电常数 ( $\epsilon_l = \epsilon_{\text{ASW}}$ ),  $\epsilon_g$  为气连续下的介电常数 ( $\epsilon_g = \epsilon_{\text{SWA}}$ )。

理论模型充分考虑土壤结构与电磁波的作用效应，通过各相介电常数、极化因子、权重因子量化了介电常数与含水率之间的关系。将气体作为连续相，固体颗粒作为分散相，M-G 理论引入去极化因子  $A=[0,0,1]$  描述了土壤颗粒形状、各相含量与电磁波的作用效应<sup>[59-60]</sup>；DEM 理论则以“自洽方式”考虑土中水、气形态对电磁波的影响<sup>[61]</sup>；而 EMT 理论通过介质极化理论和洛伦兹电场理论考虑了介质有效性对电磁场的影响<sup>[62-64]</sup>。相比之下，M-G 理论和 DEM 理论考虑的微观结构参数复杂且难以获取，而 EMT 理论充分考虑结构属性，认为土壤颗粒、水和空气相互作用形成了表观介电常数，更易于电磁波法反演土壤含水率。Miyamoto 等<sup>[65]</sup>、Blonquist 等<sup>[66]</sup>就基于 EMT 理论考虑土壤“二级”微孔中水饱和过程的几个阶段，引入了水连续 (ASW) 与气连续 (SWA) 2

种极端情况下的介电常数，直观地描述了土水特性与介电常数之间的关系。土壤介电常数理论模型以介电混合模型为基础，解释了土壤介电常数与含水率的相关性。

在土壤含水率反演过程中，介电常数对含水率的预测精度受多种因素影响，往往需要引入权重因子来解决模型中极化因子难以获取的问题。尽管该类模型无法直接对土壤水分、盐分进行定量分析，但可为半经验理论模型的建立提供依据。

### 3.2 半经验理论模型

半经验理论模型以理论模型为基础，主要通过实测数据分析理论模型，并引入半经验参数。主要模型有 Looyenga 模型、Wang 模型、Dobson 模型和普适折射率指数混合介电模型 (GRMDM) 等。

表 2 半经验理论模型

Tab.2 Semi-empirical theoretical model

模型类别	代表性模型	表达式	半经验参数
Looyenga 模型	Looyenga 模型 <sup>[67]</sup>	$\epsilon = (\theta_w \epsilon_w^\alpha + (1-\theta) \epsilon_g^\alpha + (\phi - \theta_w) \epsilon_a^\alpha)^{1/\alpha}$	$\alpha$
	Dasberg 模型 <sup>[68]</sup>	$\epsilon = (\theta_{bw} \epsilon_{bw}^\alpha + \theta_{fw} \epsilon_{fw}^\alpha + (1-\theta) \epsilon_g^\alpha + (\phi - \theta_w) \epsilon_a^\alpha)^{1/\alpha}$	$\alpha$
Wang 模型	Wang 模型 <sup>[69]</sup>	$\theta_v < \theta_{cr}, \epsilon = \theta_v \epsilon_{bw} + (P - \theta_v) \epsilon_a + (1 - P) \epsilon_s$	$\gamma$
		$\theta_v \geq \theta_{cr}, \epsilon = \theta_v \epsilon_{bw} + (\theta_v - \theta_{cr}) \epsilon_{fw} + (P - \theta_v) \epsilon_a + (1 - P) \epsilon_s$	
Dobson 模型	Dobson 模型 <sup>[63]</sup>	$\epsilon' = \left[ 1 + \frac{\rho_d}{\rho_s} (\epsilon_s^\alpha - 1) + \theta_{fw}^\beta \epsilon_{fw}^\alpha - \theta_v \right]^{1/\alpha}$	$\alpha, \xi, \gamma$ 与温度有关
		$\epsilon'' = \gamma \theta_v^{\beta' / (\alpha - 2)} \frac{S}{f}, \gamma = \frac{A \xi (\rho_s \rho_d) \rho_d}{2 \pi \epsilon_0 \rho_s}$	
GRMDM 模型	Mironov 模型 <sup>[70-71]</sup>	$n_s^*(\mu, \theta_v, f, t) = \sqrt{\epsilon_s(\mu, \theta_v, f, t)}$ $= \sqrt{\epsilon_b(\mu, t) + (\sqrt{\epsilon_d(\mu, t, f)} - 1) \theta_v * [\theta_v + \theta_{vt} - \theta_v * H(\theta_v - \theta_{vt})]}$ $+ \left( \sqrt{\epsilon_m(\mu, t, f)} - 1 \right) * (\theta_v - \theta_{vt}) * H(\theta_v - \theta_{vt})$ <p>复折射指数形式为: <math>n_s = \text{Re}(n_s^*)</math>; <math>k_s = \text{Im}(n_s^*)</math></p> $\epsilon' = n^2 - k^2; \quad \epsilon'' = 2nk$ $n\sqrt{2} = \sqrt{(\epsilon')^2 + (\epsilon'')^2 + \epsilon'}; \quad k\sqrt{2} = \sqrt{(\epsilon')^2 + (\epsilon'')^2 - \epsilon'}$	折射指数 $n$ 消光系数 $k$

注  $\theta_{bw}$  为结合水体积含水率,  $\theta_{fw}$  为自由水体积含水率,  $\epsilon_{fw}, \epsilon_{bw}$  分别表示自由水、结合水的介电常数,  $\epsilon_i$  与结合水有关的介电常数,  $\theta_{cr}$  为临界含水率,  $P$  为孔隙度,  $f$  为频率,  $\chi$  为温度校正系数,  $\rho_d$  为干体质量,  $\rho_s$  为比重,  $\beta', \beta''$  与砂粒和粘粒含量的函数,  $S$  为含盐量,  $A$  为经验参数,  $\mu$  为质地,  $t$  为地表温度,  $\epsilon_d, \epsilon_b, \epsilon_m$  分别为与干土、结合水、自由水有关的介电常数,  $\theta_{vt}$  为过渡含水率,  $\epsilon', \epsilon''$  为介电常数实部和虚部,  $H(\theta_v - \theta_{vt})$  为与体积含水率有关的函数,  $n_s, k_s$  分别为土的折射指数和消光系数。

半经验理论模型基于大量实测数据引入半经验参数，有效提高了介电常数模型的预测精度和适用性<sup>[68-69]</sup>。土壤介电常数与含水率之间的关系受电磁波频率、自由水、结合水、含盐量、温度等因素影响，因而需根据实际工程引入多种优化的半经验参数来修正模型<sup>[70-73]</sup>。在一定测试频段范围，充分考虑土壤

物理化学特性对介电常数的贡献度，将理论值与实测值相互结合，更有利于介电技术解决实际工程问题。

相比而言，Dobson 半经验理论模型在土壤水盐检测、监测方面具有较好的应用前景。该模型利用波导介电常数测量系统和自由空间传播技术 (1.4~18 GHz) 获取了不同土壤介电常数后，确定了经验参数

$\alpha$ 介于 0~1 (土壤取 0.65),  $\xi$ 取 0.14, 并通过引入温度校正系数 $\chi$ 和频率  $f$  等应用于微波遥感或水分传感器技术。随后, 国内外学者在 Dobson 模型基础上考虑电导率、冰水混合物、负温、高频等参数, 扩展了模型在土壤水分、盐分含量以及盐碱化、冻融化等领域的应用<sup>[74-75]</sup>。在土壤水分反演方面, Dobson 模型依赖于微波遥感技术对经验数据的优化求解, 未能将结合水介电机理表现出来。因此, 该模型在超低频和

超高频条件下精度相对低, 但对区域性土壤含水率反演较为可靠。

### 3.3 经验模型

经验模型主要通过大量试验直接获取土壤介电常数与含水率之间的经验关系, 从而获取土壤离散点含水率。随着模型精度逐步提高, 在区域性土壤质地和含水率等指标评价方面具有较好的应用前景。

表 3 经验模型

Tab.3 Empirical models

模型类别	代表模型	表达式	经验参数
Topp 模型	Topp 模型 <sup>[28]</sup>	$\epsilon = a + b\theta_v + c\theta_v^2 + d\theta_v^3$	$a \sim d$
Hallikaine 模型	Hallikaine 模型 <sup>[76]</sup>	$\epsilon = (a_0 + a_1 S + a_2 C) + (b_0 + b_1 S + b_2 C)\theta_v + (c_0 + c_1 S + c_2 C)\theta_v^2$	$a_0 \sim c_2$
	Alharathi 模型 <sup>[77]</sup>	$\theta_v = a\sqrt{\epsilon} + b$	$a, b$
Alharathi 模型	Malicki 模型 <sup>[47]</sup>	$\theta_v = \frac{\sqrt{\epsilon} + a + b\rho_d + c\rho_d^2}{d + e\rho_a}$	$a \sim e$
	Zhao 模型 <sup>[78]</sup>	$\theta_v = \frac{\left(\frac{a\rho_d}{\rho_w} + b\right) + \sqrt{\epsilon}}{\left(\frac{c\rho_d}{\rho_w} + d\right) + \left(\frac{e\rho_d}{\rho_w} + f\right) + \sqrt{\epsilon}}$	$a \sim f$
虚部模型	虚部模型 <sup>[79]</sup>	$f < 3\text{GHz}$ 时, $\epsilon'' = A_1\theta_v^{1-\beta}L^\alpha + A_2$	$A_1, A_2, A_3, \alpha, \beta, \beta_1$
		$f > 3\text{GHz}$ 时, $\epsilon'' = A_1\theta_v + A_2\theta_v^{1-\beta}L^\alpha + A_3$	
对数模型	廖红建模型 <sup>[11]</sup>	$\theta_w = \eta \lg \frac{\epsilon}{a}$	黏土 $\eta$ 取 0.60~0.66 粉土 $\eta$ 取 0.58~0.60 砂土 $\eta$ 小于 0.58
	Liao 模型 <sup>[80]</sup>	$\theta_w < \theta_{wL}, \lg \epsilon = \theta_s \lg \epsilon_s + [S_c \lg 81 + (1 - S_c) \lg 25] \theta_w$ $\theta_w \geq \theta_{wL}, \lg \epsilon = \theta_s \lg \epsilon_s + S_c \theta_{wL} \lg 81 + (1 - S_c) \theta_{wL} \lg 2 + (\theta_w - \theta_{wL}) \lg 81$	$S_s, S_c$ 为砂土、粘土含量

注  $L$  为含盐量,  $\theta_{wL}$  为液限体积含水率,  $\rho_w$  为水的密度。

该类模型直接建立了土壤介电常数与体积含水率的经验公式, 对不同土壤需不断校正<sup>[76-77]</sup>。土壤介电常数受含水率、含砂量、含泥量、干体积质量影响, 因而在经验模型中引入相关物理修正参数, 可提高模型预测精度<sup>[78-81]</sup>。然而, 在盐渍土中电导率、溶液电导率、离子质量浓度、含盐量对虚部影响较大, 在虚部经验模型中引入化学参数有助于提升模型精度<sup>[79]</sup>。经验模型不依赖于理论基础, 其经验参数往往需要频繁标定后才能确定。不同土壤类型、砂粒量、黏粒量、密度、温度以及测试频率等都会影响水分传感器的标定<sup>[82-87]</sup>。经验模型没有理论推导, 在低频测试阶段误差相对较大, 经验参数的准确性影响测试结果。

### 3.4 边界模型

边界模型主要用于估算土壤介电常数的上限、下限范围, 具有代表性的模型为 Wiener 模型和 S-H 模型。其中, Wiener 模型上限为串联模式, 下限为并联模型; S-H 模型认为土壤具有各向同性、近似均质体, 并利用变分原理推导出了上限、下限范围。相比而言,

Wiener 模型假设参数少、精度低, 而 S-H 模型假设条件严密, 模型精度比 Wiener 模型更准确。边界模型作为初步探究土壤介电常数范围的模型, 随着实测样本数据的增加能有效提高模型的预测精度。

表 4 边界模型

Tab.4 Boundary model

代表模型	表达式	假设条件
Wiener 模型 <sup>[18]</sup>	下限: $\epsilon_{\text{eff}} = v_1\epsilon_1 + v_2\epsilon_2 + v_3\epsilon_3$	满足体积混合模型 基本假设
	上限: $\epsilon_{\text{eff}} = \frac{1}{v_1/\epsilon_1 + v_2/\epsilon_2 + v_3/\epsilon_3}$	
S-H 模型 <sup>[19]</sup>	下限: $\epsilon_{\text{eff}} = \epsilon_3 + \frac{3\epsilon_3 \sum_{i=1}^2 v_i (1+C_i^U)}{v_3 + \sum_{i=1}^2 v_i C_i^U / (1+C_i^U)}$	$\epsilon_1 < \epsilon_2 < \epsilon_3$
	上限: $\epsilon_{\text{eff}} = \epsilon_1 + \frac{3\epsilon_1 \sum_{i=1}^2 v_i (1+C_i^L)}{v_1 + \sum_{i=1}^2 v_i C_i^L / (1+C_i^L)}$	$C_i^U = 3\epsilon_3 / (\epsilon_i \epsilon_3)$ $C_i^L = 3\epsilon_1 / (\epsilon_i \epsilon_1)$

注  $C_i^U, C_i^L$  与土壤三相有关的介电常数因子。

### 3.5 模型对比与分析

土壤介电常数理论模型以物理模型为基础, 边界模型为估算范围, 参数复杂且较难求解, 不易应用于解决实际土壤水分反演问题。边界模型作为快速预估

土壤介电常数范围的方法,只能用于初步评判土壤的干湿程度。相比之下,半经验理论模型和经验模型的推广应用较好, Dobson 模型在微波频段为 1.4~18 GHz 条件下实测了不同土壤类型、干体质量和含水率后确定了权重因子,有效提高了模型预测含水率的精度,且克服了模型依赖于土壤类型的问题<sup>[11,63]</sup>;同时,普适折射指数混合介电模型(Mironov 模型),

在微波频段范围内考虑了结合水静态介电常数、弛豫时间和电导率,也有效提高了模型预测精度<sup>[73-74,86]</sup>。经验模型对特定土壤频繁标定进行参数的校正,具有较好的应用效果。如: Topp 模型、Hallikaine 模型、Alharathi 模型等。现有经验模型结构相对简单,存在频率、土壤类型、温度等依赖性以及经验参数较难标定等问题。

表 5 土壤介电常数模型的对比分析

Tab.5 Comparative analysis of soil dielectric constant model

模型种类	代表性模型	模型分析
理论模型	M-G 模型 <sup>[59-60]</sup>	该类模型充分反映了土壤各相之间的介电效应,但存在假设因子复杂且难以确定问题。未来结合数值模拟手段分析土壤理化组分及颗粒、结合水、自由水、气体等因素对介电常数的贡献度将有助于模型的改进和精度的提高。
	DEM 模型 <sup>[61]</sup>	
	EMT 模型 <sup>[20,62-66]</sup>	
半经验理论模型	Looyenga 模型 <sup>[67-68]</sup>	该类模型引入半经验参数后扩大了电磁波法反演土壤含水率的适用范围,但适用频段处于微波频率,且存在频率依赖性问题。未来应重点考虑特殊地质、气候环境条件下的土壤类型,使模型更好的应用于土壤理化性质评价。
	Wang 模型 <sup>[69]</sup>	
	Dobson 模型 <sup>[63,70]</sup>	
	GRMDM 模型 <sup>[71-72]</sup>	
经验模型	Topp 模型 <sup>[28]</sup>	该类模型对区域性土壤含水率评价效果较好,但经验参数需要大量的试验数据进行标定,同样存在测试频率的依赖性问题。未来应该重点考虑区域土类的成土环境、关键主控因子和敏感性波段,进而提升模型的预测精度。
	Hallikaine 模型 <sup>[77]</sup>	
	Alharathi 模型 <sup>[47,78-79]</sup>	
	虚部模型 <sup>[80]</sup> 对数模型 <sup>[11,81]</sup>	
边界模型	Wiener 模型 <sup>[18]</sup>	该类模型能快速估算土壤介电常数的上下限,但参数的确定仍然依靠理论假设,介电常数的取值还需要结合测试结果进行确定。未来应融合土壤多元信息,与其他模型充分结合,向着适用范围更广、精度更高的模型方向发展。
	S-H 模型 <sup>[19]</sup>	

## 4 结论与展望

1) 确定不同区域土壤介电常数影响因素主次关系和筛选关键控制因子,厘清不同区域土壤形成条件、理化性质及敏感波段对土壤介电常数的影响程度,以提高模型的预测精度。如半干旱的盐渍化地区应重点考虑土壤含水率和含盐量,受污染区域应重点考虑含水率、重金属离子和 NAPLs 污染类型等;极寒区应重点考虑温度、未冻水含量和冻融过程等。

2) 考虑跨区域、多尺度、交叉性、特殊气候环境条件下的土壤介电常数是有效提高区域性土壤介电常数模型预测精度的热点问题。随着土壤介电常数模型预测精度的提高,采用电磁波无损技术快速获取特殊土壤层物理力学指标将具有一定可行性。如黄土的湿陷性、红土的低压缩性、软土的流变性、膨胀土的变形性、冻土的冻融循环等特性评价分析。

3) 充分耦合土壤介电常数与微波遥感光谱特征参数的关系,多种模型有机结合和互为补充,逐步提高模型对土壤水分的预测精度将是未来的难点问题。联合研发基于介电特性的土壤水分遥感监测技术,拓展土壤介电常数模型的应用范围,有助于推动土壤水分检测、耕地质量评价及高效灌溉节水等领域的深入研究。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

## 参考文献:

- [1] 胡建东, 李林泽, ABDULRAHEEM Mukhtar Iderawumi, 等. 介电特性土壤水分测定方法研究进展[J]. 河南农业大学学报, 2021, 55(4): 603-611, 638.  
HU Jiandong, LI Linze, ABDULRAHEEM Mukhtar Iderawumi, et al. Research progress of soil water content measurements using dielectric properties[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2021, 55(4): 603-611, 638.
- [2] 吴志远, 杜文凤, 聂俊丽, 等. 基于探地雷达早期信号振幅包络值的黏性土壤含水率探测[J]. 农业工程学报, 2019, 35(22): 115-121.  
WU Zhiyuan, DU Wenfeng, NIE Junli, et al. Detection of cohesive soil water content based on early signal amplitude envelope of ground penetrating radar[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(22): 115-121.
- [3] 穆青翼, 郑建国, 于永堂, 等. 基于时域反射技术(TDR)的黄土湿陷原位评价研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(6): 1115-1123.  
MU Qingyi, ZHENG Jianguo, YU Yongtang, et al. In-situ evaluation of collapsible loess through time-domain reflectometry[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(6): 1115-1123.
- [4] 董翰川, 庞丽丽, 史云. 频域反射分析法测定土壤含水率标定试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(3): 55-61.  
DONG Hanchuan, PANG Lili, SHI Yun. An experimental study of calibration of soil moisture content by using the frequency domain reflectometry[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(3): 55-61.
- [5] 刘宁, 李新举, 郭斌, 等. 基于修正介电常数模型的煤矿区复垦土壤压实评价[J]. 水土保持学报, 2016, 30(4): 318-322.  
LIU Ning, LI Xinju, GUO Bin, et al. Compaction evaluation of

- reclamation soil in coal mining district based on modified dielectric constant model[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(4): 318-322.
- [6] 左佃云, 田昊, 周晋成, 等. 土壤介电特性与其影响因素的相关性研究[J]. *浙江农业学报*, 2017, 29(10): 1 712-1 719.  
ZUO Dianyun, TIAN Hao, ZHOU Jincheng, et al. Study on correlation among soil dielectric properties and its influencing factors[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2017, 29(10): 1 712-1 719.
- [7] 曹尤崧, 肖波. 9种介电类水分传感器对风沙土含水率的测定精度及校准模型比较[J/OL]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2024(3):1-14[2023-11-09]. <https://doi.org/10.13207/j.cnki.jnwf.2024.03.013>.
- [8] PAN X C, HAN Y D, CHUN K P, et al. On the laboratory calibration of dielectric permittivity models for agricultural soils: Effect of systematic porosity variation[J]. *Vadose Zone Journal*, 2021, 20(1): 20 096.
- [9] KOLEDINTSEVA M Y, DUBROFF R E, SCHWARTZ R W. A Maxwell Garnett model for dielectric mixtures containing conducting particles at optical frequencies[J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2006, 63: 223-242.
- [10] 刘军, 赵少杰, 蒋玲梅, 等. 微波波段土壤的介电常数模型研究进展[J]. *遥感信息*, 2015, 30(1): 5-13, 70.  
LIU Jun, ZHAO Shaojie, JIANG Lingmei, et al. Research progress on dielectric constant model of soil at microwave frequency[J]. *Remote Sensing Information*, 2015, 30(1): 5-13, 70.
- [11] 廖红建, 孙俊煜, 咎月稳, 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(S2): 36-41.  
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(S2): 36-41.
- [12] TSOGTBAATAR A, KAWAI T, SATO M. Ground penetrating radar for soil-water measurement in a semi-arid climate in the Orkhon River basin, central Mongolia[J]. *Exploration Geophysics*, 2022, 53(2): 229-236.
- [13] COSENZA P, GHORBANI A, CAMERLYNCK C, et al. Effective medium theories for modelling the relationships between electromagnetic properties and hydrological variables in geomaterials: A review[J]. *Near Surface Geophysics*, 2009, 7(5/6): 563-578.
- [14] 宫燕, 刘宝江, 宋开山. 盐渍土土壤溶液 1.43GHz 复介电常数计算模型的构建与检验[J]. *土壤与作物*, 2020, 9(1): 83-93.  
GONG Yan, LIU Baojiang, SONG Kaishan. Construction and verification of the complex dielectric constant calculation model in saline soil solution at 1.43GHz [J]. *Soils and Crops*, 2020, 9(1): 83-93.
- [15] XU X Q, WANG H J, QU X, et al. Study on the dielectric properties and dielectric constant model of laterite[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 1 035 692.
- [16] GHAZALI M D, ZAINON O, MOBSIN R, et al. Estimated relative permittivity of contaminated laterite soil: An empirical model for GPR waves[J]. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 2020, 540: 012056.
- [17] KABIR H, KHAN M J, BRODIE G, et al. Measurement and modelling of soil dielectric properties as a function of soil class and moisture content[J]. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 2020, 54(1): 3-18.
- [18] 吕海波, 蒋文字, 赵艳林, 等. 南宁膨胀土的体积含水率-等效介电常数关系[J]. *岩土力学*, 2016, 37(8): 2 145-2 150.  
LYU Haibo, JIANG Wenyu, ZHAO Yanlin, et al. Relationship between volumetric water content and effective dielectric permittivity of Nanning expansive soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(8): 2 145-2 150.
- [19] HASHIN Z, SHTRIKMAN S. A variational approach to the theory of the effective magnetic permeability of multiphase materials[J]. *Journal of Applied Physics*, 1962, 33(10): 3 125-3 131.
- [20] 徐云山. 红黏土介电常数-体积含水率关系的试验研究及模拟[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2017.  
XU Yunshan. Experimental study and simulation on the relationship between volumetric water content and dielectric constant of red clay [D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2017.
- [21] 秦佳佳. Q3 黄土介电参数与含水率、压实度关系的研究及工程应用[D]. 西安: 西安理工大学, 2014.  
QIN Jiajia. Research and application for the relationship between dielectric parameters and moisture content、compactness of Q3 loess[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2014.
- [22] LYU G, YANG J, LI N, et al. Dielectric characteristics of unsaturated loess and the safety detection of the road subgrade based on GPR[J]. *Journal of Sensors*, 2018, 2018: 1-8.
- [23] 巨兆强. 中国几种典型土壤介电常数及其与含水量的关系[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.  
JU Zhaoqiang. Dielectric permittivity and its relationship with water content for several soils in China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2005.
- [24] 朱安宁, 吉丽青, 张佳宝, 等. 不同类型土壤介电常数与体积含水量经验关系研究[J]. *土壤学报*, 2011, 48(2): 263-268.  
ZHU Anning, JI Liqing, ZHANG Jiabao, et al. Empirical relationship between soil dielectric constant and volumetric water content in various soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(2): 263-268.
- [25] 高菁, 李志萍, 刘少康, 等. 土壤介电常数影响因素的研究综述[J]. *人民珠江*, 2017, 38(5): 15-18.  
GAO Jing, LI Zhiping, LIU Shaokang, et al. Review on factors affecting soil dielectric constant[J]. *Pearl River*, 2017, 38(5): 15-18.
- [26] 许景辉, 赵钟声, 王一琛, 等. 基于双线性理论的土壤介电测量研究[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(12): 322-331.  
XU Jinghui, ZHAO Zhongsheng, WANG Yichen, et al. Soil dielectric measurement based on bilinear theory[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(12): 322-331.
- [27] 赵钟声, 许景辉, 王一琛, 等. 基于双线性理论的黏质土介电谱与含水量频域测量研究[J]. *土壤学报*, 2021, 58(3): 685-693.  
ZHAO Zhongsheng, XU Jinghui, WANG Yichen, et al. Measurement of dielectric spectra and water content frequency domain of clay soil based on bilinear theory[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(3): 685-693.
- [28] TOPP G C, DAVIS J L, ANNAN A P. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines[J]. *Water Resources Research*, 1980, 16(3): 574-582.
- [29] 谭霄, 伍靖伟, 吴谋松, 等. 盐分对改进 TDR 测量土壤水分的影响及模型标定[J]. *灌溉排水学报*, 2014, 33(S1): 352-355.  
TAN Xiao, WU Jingwei, WU Mousong, et al. The effect of salinity on measurement of soil water content using improved TDR and calibration of models[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2014, 33(S1): 352-355.
- [30] 胡慧玲, 王峰, 冯泉清, 等. 盐分对土壤水分传感器测量精度的影响及适用性评价[J]. *灌溉排水学报*, 2023, 42(9): 102-109.  
HU Huiling, WANG Feng, FENG Quanqing, et al. The effect of soil salinity on accuracy of soil moisture sensors[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2023, 42(9): 102-109.
- [31] HU Jun, WANG Xinbin, ZHANG Fujun, et al. Experimental study on the variation of soil dielectric permittivity under the influence of soil

- compaction and water content[J]. *Geofluids*, 2022, 2022: 3 575-541.
- [32] 赵贵章, 闫永帅, 闫亚景, 等. 介质含水率与探地雷达电磁波特征参数关系[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(3): 85-90.  
ZHAO Guizhang, YAN Yongshuai, YAN Yajing, et al. The relationship between soil water content and parameters of electromagnetic wave of ground penetration radar[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(3): 85-90.
- [33] 徐韩笑, 曹银贵, 罗古拜, 等. 晋北露天煤矿区重构土壤容重差异研究: 探地雷达识别与反演[J]. *生态与农村环境学报*, 2021, 37(1): 127-135.  
XU Hanxiao, CAO Yingui, LUO Gubai, et al. Differences of reconstructed soil bulk density in open pit coal mine of northern Shanxi Province: Based on feature identification and inversion of ground penetrating radar[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, 37(1): 127-135.
- [34] NOBORIO K. Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: A review[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2001, 31(3): 213-237.
- [35] 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.  
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.
- [36] 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.
- [37] 张越. 基于季冻区路基土介电特性量测含水率的应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.  
ZHANG Yue. Applied research on measuring water content of subgrade in seasonal frozen area based on dielectric properties[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [38] 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.  
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.
- [39] 徐爽. 冻融作用下非饱和土介电常数和盐分迁移规律研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2018.  
XU Shuang. Study on the law of dielectric constants and water and salt transport in unsaturated soils under freezing and thawing [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2018.
- [40] HE H L, DYCK M. Application of multiphase dielectric mixing models for understanding the effective dielectric permittivity of frozen soils[J]. *Vadose Zone Journal*, 2013, 12(1): 1-22.
- [41] 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[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(16): 125-133.  
LEI Lei, TASHPOLAT Tiyip, DING Jianli, et al. Constant characteristic and model verification of saline soil dielectric in arid area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(16): 125-133.
- [42] TASHPOLAT N, DING J L, YU D L. Dielectric properties of saline soil based on a modified Dobson dielectric model[J]. *Journal of Arid Land*, 2015, 7(5): 696-705.
- [43] WYSEURE G C L, MOJID M A, MALIK M A. Measurement of volumetric water content by TDR in saline soils[J]. *European Journal of Soil Science*, 2005, 48(2): 347-354.
- [44] WANG W Z, DONG L L, MA C F, et al. Experimental investigation of ground radiation on dielectric and brightness temperature of soil moisture and soil salinity[J]. *Sensors*, 2020, 20(10): 2 806.
- [45] 赵爽, 丁建丽, 韩礼敬, 等. 新疆典型盐渍土微波介电特性响应分析与建模[J]. *干旱区地理*, 2022, 45(5): 1 534-1 546.  
ZHAO Shuang, DING Jianli, HAN Lijing, et al. Response analysis and modeling of microwave dielectric properties of typical saline soil in Xinjiang[J]. *Arid Land Geography*, 2022, 45(5): 1 534-1 546.
- [46] 池涛, 李丙春, 孜克尔·阿不都热合曼, 等. 频率响应下盐渍土介电特性及含盐量估算[J]. *新疆大学学报(自然科学版)*, 2017, 34(3): 332-338.  
CHI Tao, LI Bingchun, Ziker, et al. Dielectric properties of soil under frequency response and its estimation of salinity[J]. *Journal of Xinjiang University (Natural Science Edition)*, 2017, 34(3): 332-338.
- [47] MALICKI M A, PLAGGE R, ROTH C H. Improving the calibration of dielectric TDR soil moisture determination taking into account the solid soil[J]. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47(3): 357-366.
- [48] KIM D J, CHOI D J, RYSZA O, et al. Determination of moisture content in a deformable soil using time-domain reflectometry (TDR)[J]. *European Journal of Soil Science*, 2000, 51(1): 119-127.
- [49] 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.  
PAN Jinmei, ZHANG Lixin, WU Haoran, et al. Effect of soil organic substance on soil dielectric constant[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2012, 16(1): 1-24.
- [50] SAVIN I V, MUZALEVSKIY K V. Dielectric model for thawed organic soils at frequency of 435 MHz[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2021, 18(2): 218-221.
- [51] FOMIN S V, MUZALEVSKIY K. Dielectric model for thawed mineral soils at a frequency of 435 MHz[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2021, 18(2): 222-225.
- [52] 乔翠平, 赵贵章, 刘少康, 等. 重金属污染对土壤介电特性的影响规律研究[J]. *灌溉排水学报*, 2017, 36(8): 77-82.  
QIAO Cuiping, ZHAO Guizhang, LIU Shaokang, et al. Study of the impact of heavy metals contamination on dielectric properties of soils[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2017, 36(8): 77-82.
- [53] GUAN S P, LIU W Y, LIU W, et al. Dielectric properties based detection of heavy metal contaminated soil in the frequency range from 10MHz to 1 GHz[J]. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 2018, 27(5): 343-356.
- [54] LIU Z H, LI J Q, LIU Y T, et al. Analyzing the behavior of GPR wave propagation in zinc contaminated soil combining the dielectric properties: Experimental study[J]. *Acta Geophysica*, 2021, 69(2): 483-495.
- [55] 李晔, 鹿琪, 刘财. LNAPLs 迁移的数值模拟和土壤介电性质的变化分析[J]. *地球物理学进展*, 2014, 29(2): 936-943.  
LI Ye, LU Qi, LIU Cai. Numerical simulation of LNAPLs migration and analysis on variation of soil dielectric properties[J]. *Progress in Geophysics*, 2014, 29(2): 936-943.
- [56] 陈福新. 利用时域反射技术测定饱和土壤中非水相液体的含量[D]. 太原: 太原科技大学, 2015.
- [57] ABDELGWAD A H, SAID T M. Measured dielectric permittivity of contaminated sandy soil at microwave frequency[J]. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, 2016, 15(2): 115-122.
- [58] 潘保芝, 栗猛, 张瑞. 混合流体岩石介电常数的 CRI 模型与 Maxwell-Garnett 模型研究[J]. *测井技术*, 2016, 40(3): 257-261.  
PAN Baozhi, LI Meng, ZHANG Rui. CRI model and maxwell-garnett model of saturated rocks' dielectric constant[J]. *Well Logging*



- Technology, 2016, 40(3): 257-261.
- [59] PARK C H, MONTZKA C, JAGDHUBER T, et al. A Dielectric mixing model accounting for soil organic matter[J]. *Vadose Zone Journal*, 2019, 18(1): 1-19.
- [60] MISHRA V, PUTHUCHERI S, SINGH D. An efficient use of mixing model for computing the effective dielectric and thermal properties of the human head[J]. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 2018, 56(11): 1 987-2 001.
- [61] COSENZA P, GHORBANI A, CAMERLYNCK C, et al. Effective medium theories for modelling the relationships between electromagnetic properties and hydrological variables in geomaterials: A review[J]. *Near Surface Geophysics*, 2009, 7(5/6): 563-578.
- [62] KOLEDINTSEVA M Y, DUBROFF R E, SCHWARTZ R W. A maxwell Gamett model for dielectric mixtures containing conducting particles at optical frequencies[J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2006, 63: 223-242.
- [63] DOBSON M C, ULABY F T, HALLIKAINEN M T, et al. Microwave dielectric behavior of wet soil-part II: Dielectric mixing models[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1985, 23(1): 35-46.
- [64] FRIEDMAN S P. A saturation degree-dependent composite spheres model for describing the effective dielectric constant of unsaturated porous media[J]. *Water Resources Research*, 1998, 34(11): 2 949-2 961.
- [65] MIYAMOTO T, ANNAKA T, CHIKUSHI J. Extended dual composite sphere model for determining dielectric permittivity of andisols[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(1): 23-29.
- [66] BLONQUIST J M Jr, JONES S B, LEBRON I, et al. Microstructural and phase configurational effects determining water content: Dielectric relationships of aggregated porous media[J]. *Water Resources Research*, 2006, 42(5): W05 424.
- [67] SUMAN S, SRIVASTAVA P K, PANDEY D K, et al. Comparison of soil dielectric mixing models for soil moisture retrieval using SMAP brightness temperature over croplands in India[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 602: 126 673.
- [68] DASBERG S, HOPMANS J W. Time domain reflectometry calibration for uniformly and nonuniformly wetted sandy and clayey loam soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(5): 1 341-1 345.
- [69] WANG M R, PAN N. Predictions of effective physical properties of complex multiphase materials[J]. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 2008, 63(1): 1-30.
- [70] 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.
- [71] MIRONOV V L, FOMIN S V. Temperature and mineralogy dependable model for microwave dielectric spectra of moist soils[J]. *PIERS Online*, 2009, 5(5): 411-415.
- [72] SZYŁOWSKA A, LEWANDOWSKI A, JONES S B, et al. Impact of soil salinity, texture and measurement frequency on the relations between soil moisture and 20 MHz-3 GHz dielectric permittivity spectrum for soils of medium texture[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 579: 124-155.
- [73] 马战林. Mironov 介电常数模型对土壤水分反演误差的定量研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2018.
- [74] WU Yueru, WANG Weizhen, ZHAO Shaojie, 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.
- [75] 董磊磊, 王维真, 吴月茹. 盐渍土介电特性及模型改进研究[J]. *遥感技术与应用*, 2020, 35(4): 786-796.
- DONG Leilei, WANG Weizhen, WU Yueru. Dielectric properties of saline soil and an improved dielectric model[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2020, 35(4): 786-796.
- [76] HALLIKAINEN M T, ULABY F T, DOBSON M C, et al. Microwave dielectric behavior of wet soil-part 1: Empirical models and experimental observations[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1985, 23(1): 25-34.
- [77] ALHARTHI A, LANGE J. Soil water saturation: Dielectric determination[J]. *Water Resources Research*, 1987, 23(4): 591-595.
- [78] 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*, 2016, 17(3): 240-252.
- [79] 熊文成. 含水含盐土壤介电特性及反演研究[D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2005.
- [80] LIAO H J, DONG H, NING C M, et al. A new logarithmic dielectric constant model of soils[J]. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 2019, 7(2): 281-286.
- [81] HU W, ZHANG L, CHEN B L, et al. Quantitative evaluation of soil ion content using an imaginary part model of soil dielectric constant[J]. *Scientia Agricola*, 2019, 76(4): 299-304.
- [82] THRING L M, BODDICE D, METJE N, et al. Factors affecting soil permittivity and proposals to obtain gravimetric water content from time domain reflectometry measurements[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2014, 51(11): 1 303-1 317.
- [83] 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.
- 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*, 2012, 28(12): 171-175.
- [84] 曾江源, 李震, 陈权, 等. SAR 土壤水分反演中的介电常数实部简化模型[J]. *红外与毫米波学报*, 2012, 31(6): 556-562.
- ZENG Jiangyuan, LI Zhen, CHEN Quan, et al. A simplified model of the real part of the soil complex permittivity for soil moisture estimation from SAR image[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2012, 31(6): 556-562.
- [85] 罗迪汉, 宇宙, 王勇, 等. FDR-土壤水分测定仪标定方法初探[J]. *灌溉排水学报*, 2014, 33(S1): 113-115.
- LUO Dihan, YU Zhou, WANG Yong, et al. Calibration method of FDR-soil moisture measuring instrument[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2014, 33(S1): 113-115.
- [86] 张松, 刘展, 徐凯军, 等. 陕北典型黄土断面电性特征及其地电模型[J]. *物探与化探*, 2017, 41(2): 224-230.
- ZHANG Song, LIU Zhan, XU Kaijun, et al. Electrical characteristics of typical loess sections in northern Shaanxi and the relevant geoelectric model[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2017, 41(2): 224-230.
- [87] PARK C H, BEHRENDT A, LEDREW E, et al. New approach for calculating the effective dielectric constant of the moist soil for microwaves[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(7): 732.

## Study on soil dielectric constant models: A review

XU Xingqian<sup>1</sup>, WANG Haijun<sup>1</sup>, QU Xin<sup>2</sup>, PENG Guangcan<sup>1</sup>, ZHAO Xi<sup>1\*</sup>

(1. College of Water Conservancy, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China;

2. School of Civil and Construction Engineering, Anyang Institute of Technology, Anyang 455000, China)

**Abstract:** **【Objective】** Soil dielectric constant measures the ability of a soil to transmit electric fields. It is the ratio of the capacitance of a soil sample to the capacitance of air-filled space of the same volume. In this paper, we systematically analyze the factors that influence the dielectric constant, offering an updated perspective on soil dielectric constant modeling. **【Method】** This study systematically identifies the primary factors influencing soil dielectric constant based on soil dielectric theory. Additionally, it categorizes and summarizes existing soil dielectric constant models, facilitating a comparative analysis of their strengths, weaknesses, applications, and future development. **【Result】** The primary influencing factors governing the dielectric constant varied with soil types, with notable dependence on testing frequency. However, the dielectric constant remains a valuable indicator of soil water content. The soil dielectric constant models were broadly categorized into four types: theoretical, semi-empirical, empirical, and boundary models. **【Conclusion】** Presently, there is a dearth of research focusing on the dielectric properties and model development specific to regional soils. Enhancing model accuracy necessitates incorporating the influence of soil-phase composition, mineral composition, and microstructure on the dielectric constant. This refinement will broaden the application studies for assessing and analyzing soil physical and chemical properties based on dielectric constant testing.

**Key word:** soil; water content; electromagnetic wave; dielectric constant; model

责任编辑: 白芳芳