

基于改进 Topp 模型的红黏土介电特性试验研究

王海军¹, 徐兴倩^{1*}, 赵 熹¹, 屈 新², 彭光灿¹, 蔡 波¹

(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】探讨红黏土介电特性的影响因素并提升 Topp 模型精度。【方法】以云南红黏土为例, 开展以干密度、含水率、温度为变量的介电特性试验, 分析不同条件下红黏土相对介电常数的变化规律, 构建红黏土相对介电常数模型并对含水率进行预测。【结果】红黏土相对介电常数与含水率、温度、干密度呈正相关, 影响因素的相关性程度依次为: 含水率>温度>干密度。恒温条件下, Topp 模型拟合精度较高; 当温度发生变化时, Topp 模型拟合精度显著降低。【结论】不同温度条件下 Topp 模型拟合得到的相对介电常数 (ϵ_r) 与体积含水率 (θ) 的关系存在较大差异, 引入温度改进后的 Topp 模型精度明显提高。

关键词: 红黏土; 相对介电常数; 介电特性; 含水率

中图分类号: S152

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023001

王海军, 徐兴倩, 赵熹, 等. 基于改进 Topp 模型的红黏土介电特性试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(Supp.1): 70-75.
WANG Haijun, XU Xingqian, ZHAO Xi, et al. Experimental Study on the Dielectric Properties of Laterite Based on the Improved Topp Model[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(Supp.1): 70-75.

0 引言

【研究意义】红黏土是由碳酸盐岩在温湿气候条件下经强烈红土化作用而形成的棕红色、褐黄色土壤, 具有高含水率、大孔隙比、低压缩性等物理特性^[1]。红黏土的介电特性与水分、温度、干密度、孔隙率、饱和度等物理指标密切相关, 尤其对土体水分最为敏感^[2-3]。基于探地雷达 (GPR)、时域反射 (TDR) 和频域反射 (FDR) 等技术快速获取土体介电常数后, 采用 Topp 模型可间接反演土壤含水率^[4-6]。因此, 开展红黏土介电特性及 Topp 模型预测精度分析, 对于准确评估红黏土含水率具有重要意义。

【研究进展】土体介电特性的影响因素较多, 其中含水率是土体介电特性的最敏感因素, 且土体介电常数与含水率之间存在 Topp 模型关系, 该模型精度受土壤质地、温度、干密度等因素影响。朱安宁等^[7]基于 4 种典型土壤的 8 种质地介电特性修正了 Topp 模型; 康学远等^[8]发现, 引入干体质量的 Malicki 模型精度更高; Zhao 等^[9]基于 TDR 技术引入田间土

壤干密度后发现, 新标定经验模型精度更高; 赵贵章等^[10]以风积沙土为研究对象, 对比分析 Topp 模型、Roth 模型和 Herkelrath 模型后发现 Topp 模型精度最低; 吕海波等^[11]通过南宁膨胀土介电特性研究发现膨胀土中 Topp 模型的模拟值偏高; 罗古拜等^[12]也发现该模型模拟值略高于实测值, 并指出 Topp 模型适用范围存在局限性; Jin 等^[13]研究指出, 土壤湿度、温度、质地对介电特性的敏感性不同, 针对不同土壤类型需考虑不同的关键因素。【切入点】上述研究表明, 不同类型土体介电特性差异较大, 但现有研究忽略了不同地区气候条件的影响。在干湿季节和全球气候变暖的背景下, 考虑温度影响的红黏土介电特性及其 Topp 模型预测精度研究鲜有报道。【拟解决的关键问题】鉴于此, 本研究开展云南红黏土介电特性室内试验研究, 分析干密度、含水率、温度对介电特性的影响, 从而引入温度改进 Topp 模型进行红黏土表层含水率评价, 为红黏土表层含水率精确预估提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

红黏土样取自云南省, 取土深度介于 2~3 m, 呈棕红色和硬塑状态, 去除表面扰动土后, 将土样自然风干、碾碎后过 2 mm 筛, 然后将土样放入 105 ℃烘箱中烘干 24 h, 将烘干后的土样装入密封塑料盒保存备用。根据《土工试验方法标准》(GB/T50123-2019) 进行常规土力学室内试验, 得到基本物理参数, 见表 1。

收稿日期: 2023-01-01 修回日期: 2023-01-01

基金项目: 云南省基础研究计划面上基金项目 (202101AT070271); 云南省高层次人才支持计划“青年拔尖人才”专项 (徐兴倩); 国家自然科学基金项目 (41867040); 云南省教育厅科学研究基金项目 (2023Y1017)

作者简介: 王海军 (1996-), 男, 硕士研究生, 主要从事农业水土工程研究。E-mail: wanghaijun_6@163.com

通信作者: 徐兴倩 (1985-), 男, 副教授, 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

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

表 1 红黏土基本物理参数

Table 1 Basic physical parameters of laterite

最大干密度/(g·cm ⁻³)	最优含水率/%	液限/%	塑限/%	体积质量/(g·cm ⁻³)	天然含水率/%
1.40	29.5	55.1	33.9	2.74	25.3

1.2 试验方案

将红黏土配置为不同质量含水率、不同干密度的土柱（土样直径 61.8 mm，高 20 mm），并在不同温度条件下测定其相对介电常数。试验共制备 108 组土柱，试验处理如下：①设置质量含水率：19%、22%、25%、28%、31%、34%；②设置干密度：1.15、1.20、1.25、1.30、1.35、1.40 g/cm³；③设置温度：5、10、15、20、25、30 ℃。每个处理重复 3 次。

1.3 试验步骤

将土样放入 105 ℃烘箱中 12 h 后，按照同体积质量法称取不同干密度对应的干土质量；均匀配置不同质量含水率的土样，密封静置 12 h 使其水分均匀分布后，进行土工击实试验；制备好的土样用保鲜膜密封后放入恒温箱中，在不同温度下分别恒温控制 8 h 后，测定其相对介电常数；测量结束后，将土样烘干测量实际质量含水率。

1.4 试验原理

试验采用改进的平行板电极装置进行土体相对介电常数的测量，其测试原理及装置见图 1 和图 2。试验采用 VC4090A 型 LCR 精密数字电桥与改良平行板电极导线相连，用压力夹具将 2 个直径为 62 mm 的铜制电极与土样紧密连接，并施加相同压力使每次接触效果相同。设定相同测试频率和电压（1 V），通过读取电容指标，获取土柱相对介电常数。

相对介电常数计算式为：

$$\varepsilon_r = \frac{t_m \times C_p}{A \times \varepsilon_0} = \frac{t_m \times C_p}{\pi \times \left(\frac{d}{2}\right)^2 \times \varepsilon_0} = \frac{4 \times t_m \times C_p}{\pi \times \varepsilon_0 \times d^2}, \quad (1)$$

式中： ε_r 为相对介电常数， ε 为绝对介电常数； $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m； A 为土样有效面积； t_m 为土样厚度；

d 为土样直径； C_p 为电容量。

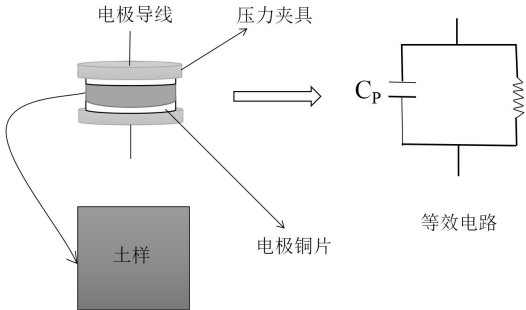


图 1 平行板电容测试原理

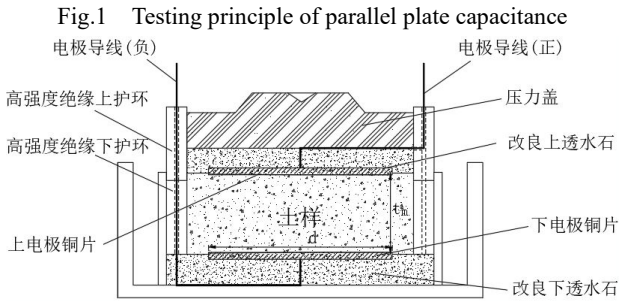


图 2 改良的平行板电极装置

Fig.2 Improved parallel plate electrode device

2 结果与分析

2.1 不同含水率条件下红黏土介电特性的变化规律

在土体三相组成中，水分不仅影响土体物理性质，还会对土体介电特性起到决定性作用^[14]。探讨红黏土含水率对介电特性的影响，在干密度为 1.15 g/cm³ 时，测试不同温度条件下相对介电常数随含水率的变化（图 3（a））；在室温为 15 ℃ 时，测试不同干密度条件下的相对介电常数随含水率的变化（图 3（b））。

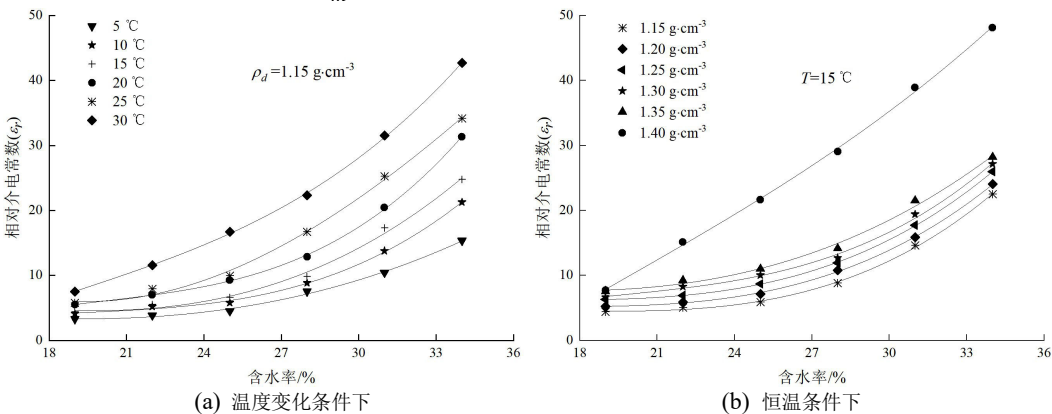


图 3 红黏土相对介电常数与含水率的关系

Fig.3 Relationship between relative dielectric constant and water content of laterite

红黏土相对介电常数随含水率增加呈增大趋势。当含水率较低时，土颗粒构成土体基本骨架，相对介

电常数受介电特性影响,变化相对较小;随着含水率逐渐增大,土壤中自由水量增加,自由水的极化作用增强^[15],因此土体相对介电常数显著增加。在相同含水率条件下,随着温度和干密度的增大,土体表面自由水量增加,水分子运动性增强,促使水的极化能力增加,相对介电常数也随之增加。可见,在不同温度或干密度条件下,红黏土相对介电常数对含水率十分敏感。

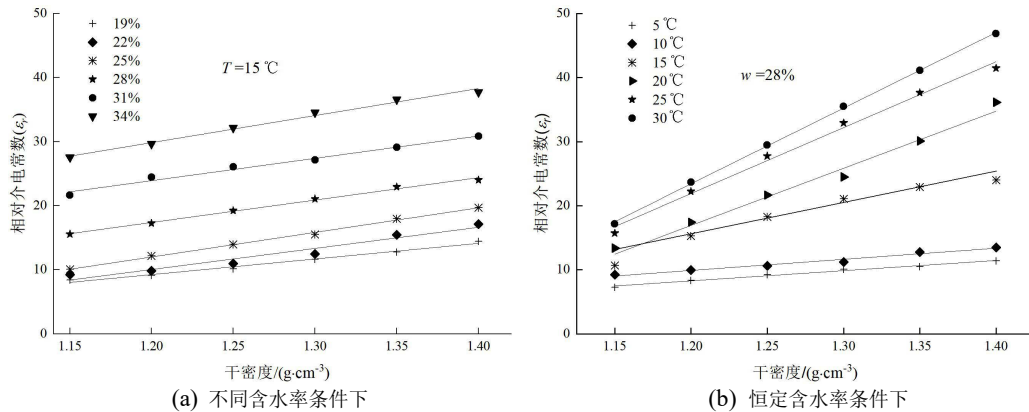


图4 红黏土相对介电常数与干密度的关系

Fig.4 Relationship between relative dielectric constant and dry density of laterite

红黏土相对介电常数随干密度的增加而增大,且相对介电常数与干密度呈正比例关系。红黏土本身吸水性强,在较低干密度条件下,土颗粒间孔隙较大,相对介电常数较低;随着干密度的增大,土颗粒间孔隙减小,但水的体积保持不变,使土体表面水膜厚度增大,相对介电常数随之增加;随着干密度的增加,土颗粒间挤压作用增大,因此相对介电常数呈增加趋势。在相同干密度条件下,随着含水率或温度的增大,土中自由水量增加,土壤孔隙中水分子活跃能力增强,红黏土相对介电常数呈增大趋势。

2.3 不同温度条件下红黏土介电特性的变化规律

温度是影响土体介电特性的重要因素,对液态水而言,温度升高,水分子热运动加剧,影响土中水的

2.2 不同干密度条件下红黏土介电特性的变化规律

土颗粒的紧密状态对土体介电特性具有显著影响,随着干密度的增加,土颗粒间的距离发生变化,使土颗粒接触表面介电特性发生改变^[15-16]。在室温为 15°C 时,红黏土不同含水率条件下相对介电常数随干密度的变化见图 4 (a); 在含水率为 28% 时,不同温度条件下相对介电常数随干密度的变化见图 4 (b)。

密度、粘滞性及分子极化能力^[17-18]。在干密度为 1.15 g/cm^3 条件下,不同含水率条件下相对介电常数随温度的变关系见图 5 (a); 在含水率为 28% 条件下,不同干密度条件下的相对介电常数随温度的变化见图 5 (b)。

红黏土相对介电常数随温度升高呈逐渐增大的趋势。温度升高加快了土中孔隙水的布朗运动及水分子极化能力^[19],促使不同干密度或不同含水率的红黏土相对介电常数显著增大。当含水率大于 28% (接近最优含水率) 时,温度对介电特性敏感性显著增加,此时随含水率进一步增加,温度的影响更加剧烈。由图 5 (b) 可知,当含水率为 28% 时,相对介电常数随温度升高的增长率先增大后减小。

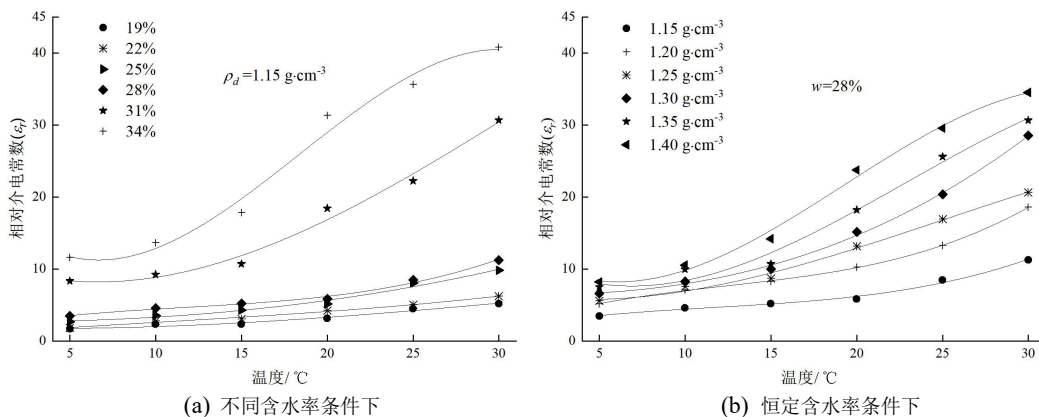


图5 红黏土相对介电常数与温度的关系

Fig.5 Relationship between relative dielectric constant and temperature of laterite

2.4 红黏土介电特性影响因素的敏感性分析

基于红黏土相对介电常数与含水率、干密度、温

度的相关性程度,探寻红黏土各影响因素与相对介电常数的显著相关性,为合理构建红黏土介电常数模型

提供重要依据。根据测试结果，以含水率、干密度、温度为自变量，相对介电常数为因变量，并运用回归分析进行相关性统计，结果见表 2。

红黏土基本物理指标与相对介电常数均有一定相关性，且各自变量之间相关性较弱 ($R<0.04$)。探讨红黏土相对介电常数敏感性因素，需检验各自变量之间的独立性。多元线性回归方程要求各自变量之间具有较强独立性，根据最小二乘法，令偏差最小，以红黏土相对介电常数为因变量，含水率、干密度、

温度为自变量，进行回归分析（表 3）。

表 2 影响因素相关分析结果

Table 2 Analysis on the correlation results of influence factors				
相关系数 (R)	相对介电常数	含水率	干密度	温度
相对介电常数	1.000	0.622	0.334	0.498
含水率	0.622	1.000	0.032	0.008
干密度	0.334	0.032	1.000	0.001
温度	0.498	0.008	0.001	1.000

表 3 影响因素回归分析结果

Table 3 Analysis on the regression results of influence factors								
模型	非标准化系数		标准系数		t	p	共线性统计量	
	B	标准误差	$Beta$	R			容差	VIF
(常量)	-104.820	7.366	-	-	-14.230	0.000**	-	-
含水率	1.667	0.098	0.608	0.622	16.998	0.000**	0.999	1.001
干密度	47.257	5.389	0.314	0.334	8.770	0.000**	0.999	1.001
温度	0.936	0.068	0.493	0.498	13.792	0.000**	1.000	1.000

注 B 表示回归系数； $Beta$ 表示标准化偏回归系数，绝对值越大，影响程度越高； t 表示回归系数的显著性检验； p 为显著性水平，“*”表示 $p<0.05$ （显著相关），“**”表示 $p<0.01$ （极显著相关）； VIF 表示方差膨胀因子，容差 >0.2 且 $VIF<5$ 时，不存在多重共线性。

红黏土相对介电常数与含水率、干密度、温度均极显著相关 ($p<0.01$)，且含水率、干密度、温度的容差介于 0.999~1， VIF 介于 1~1.001，接近于 1，表明自变量之间的共线性非常弱，均为独立自变量。标准化偏回归系数 ($Beta$) 绝对值越大，自变量对目标因子影响程度越大，3 个变量中，含水率对红黏土介电特性影响程度最大，温度次之，而干密度影响最小。

3 讨论

土体介电常数随含水率的增加而增加，当干密度增加时，土壤孔隙中的自由水活性增强，使整个土体介电常数显著增大^[20]。红黏土含水率对介电特性的影响最大，干密度的影响最小，通过式（2）引入体积含水率来定量描述红黏土含水率和干密度对介电特性的影响。

$$\theta = \frac{w\rho_d}{\rho_w}, \tag{2}$$

式中： θ 为体积含水率 (cm^3/cm^3)， ρ_w 为水的密度 ($1\text{ g}/\text{cm}^3$)。采用体积含水率讨论红黏土介电特性的变化规律，采用三维坐标系绘制相对介电常数随体积含水率、温度的变化（图 6）。随着体积含水率的增加，土体相对介电常数逐渐增大，土体相对介电常数随温度升高也逐渐增大，土体相对介电常数整体上随体积含水率和温度增加的增长速率加快。

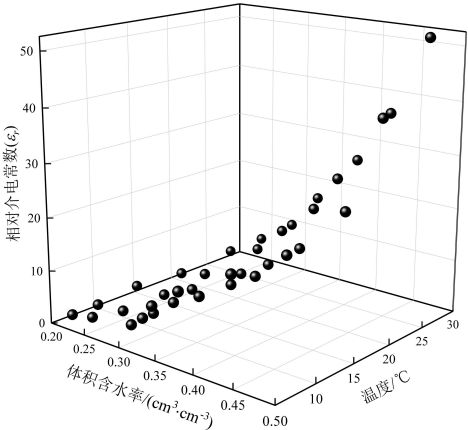


图 6 红黏土相对介电常数与体积含水率、温度的关系

Fig.6 Relationship between relative dielectric constant and volumetric water content, temperature of laterite

从图 6 中提取温度为 5~30℃ 条件下的体积含水率与相对介电常数的试验结果，并采用 Topp 模型进行数据拟合（图 7），拟合关系如下^[6]：

$$\varepsilon_r = a + b\theta + c\theta^2 + d\theta^3. \tag{3}$$

结合表（3）和图 7 可以看出，Topp 模型拟合曲线满足一元线性回归方程。由图 7（a）可知，在相同温度条件下，Topp 模型的拟合精度大于 0.97，但在不同温度条件下经验参数值存在较大误差；由图 7（b）可知，当温度在 5~30℃ 范围内变化时，Topp 模型拟合精度仅为 0.858 3。Topp 模型在温度恒定时的拟合精度高，但当温度在一定范围变化时，拟合精度明显降低。因此，Topp 模型需重点考虑温度的影响。

采用多元非线性拟合方程定量描述红黏土体积含水率、温度与相对介电常数的关系。采用二元一次

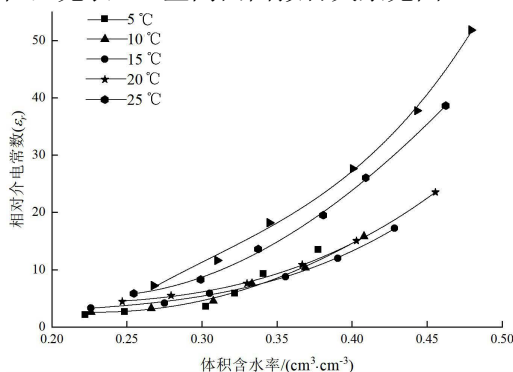
非线性方程引入温度参数, 如下:

$$\varepsilon_r = a + b\theta + cT + d\theta T, \quad (4)$$

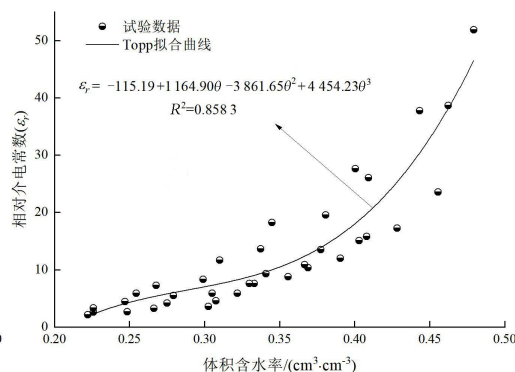
考虑到 Topp 模型中任意项的参变量具有不同幂指数特征, 则在式 (4) 基础上引入参变量幂指数因子 α 和 β , 进而在红黏土中改进 Topp 预测模型, 改进的 Topp 预测模型为:

$$\varepsilon_r = a + b\theta^\alpha + cT^\beta + d\theta^\alpha T^\beta, \quad (5)$$

式 (3) — 式 (5) 中, a 、 b 、 c 、 d 均为经验参数。将图 6 中的试验结果进行式 (5) 拟合后得到参数取值及系数相关性, 见表 5。空间曲面拟合关系见图 8。



(a) 相同温度条件下



(b) 温度变化条件下

图 7 Topp 模型的拟合结果 (5~30 °C)

Fig.7 The fitting results from the Topp model (5~30 °C)

表 5 改进 Topp 模型的参数取值及相关系数

Table 5 Parameter values and correlation coefficients of the improved Topp model

参数	拟合值	系数相关性	R^2
a	0.13	0.931 46	0.984 69
b	248.56	0.994 36	
c	-1.46×10^{-6}	0.954 76	
d	5.07×10^{-3}	0.999 66	
α	3.25	0.998 09	
β	3.36	0.999 63	

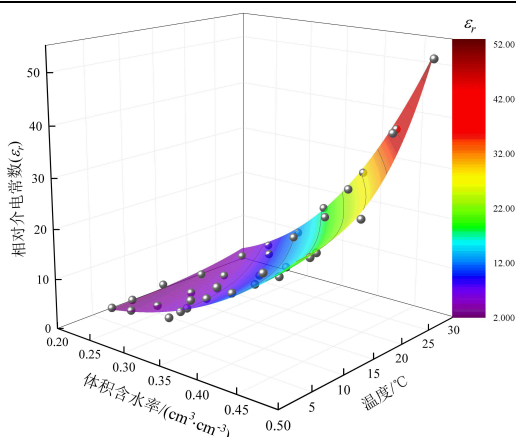


图 8 改进 Topp 模型的空间曲面拟合关系

Fig.8 The fitting relationship spatial surface from the improved Topp model

由图 8 可知, 红黏土相对介电常数与体积含水率、温度之间满足空间曲面方程拟合关系, 其

表 4 采用 Topp 模型的拟合关系 (5~30 °C)

Table 4 The fitting relationships from the Topp model (5~30 °C)

温度/°C	Topp 拟合方程	R^2
5	$\varepsilon_r = 60.26 - 519.37\theta + 1332.55\theta^2 - 750.40\theta^3$	0.979 63
10	$\varepsilon_r = 23.95 - 183.97\theta + 387.61\theta^2 - 34.55\theta^3$	0.985 84
15	$\varepsilon_r = -7.28 + 119.53\theta - 520.07\theta^2 + 873.78\theta^3$	0.996 21
20	$\varepsilon_r = 4.12 + 23.59\theta - 253.22\theta^2 + 644.59\theta^3$	0.999 10
25	$\varepsilon_r = 47.34 - 384.45\theta + 965.16\theta^2 - 376.99\theta^3$	0.997 18
30	$\varepsilon_r = -114.6 + 984.7\theta - 2808.1\theta^2 + 3808.6\theta^3$	0.995 59

$R^2=0.984\ 69$, 与图 7 (b) 相比, 其拟合精度明显提高。改进的 Topp 预测模型表达式为:

$$\varepsilon_r = 0.135 + 248.56\theta^{3.254} - 1.46 \times 10^{-6} T^{3.356} + 0.005\theta^{3.254} T^{3.356}. \quad (6)$$

由式 (6) 可以看出, 参变量幂指数因子 α 和 β 较接近, 两者差值仅为 0.1。为提高该预测模型反演实际工程问题的能力, 将参变量幂指数因子 α 和 β 简化为同一幂指数因子 λ , 简化模型为:

$$\varepsilon_r = a + (b + dT^\lambda)\theta^\lambda + cT^\lambda, \quad (7)$$

基于简化模型 (7) 评价红黏土表层体积含水率, 其原理在于利用介电技术快速、精确地测定红黏土相对介电常数和温度后, 将其带入模型即可反演体积含水率, 进而评价红黏土工程物理特性^[21]。结合式 (7) 和表 5, 可知红黏土含水率评价满足:

$$\theta = 3.3 \sqrt[3]{\frac{\varepsilon_r + 1.46 \times 10^{-6} T^{3.3} - 0.135}{248.56 + 0.005 T^{3.3}}}. \quad (8)$$

为检验式 (8) 对红黏土含水率预测的准确性, 测试 5 组不同水分条件下的红黏土相对介电常数 (ε_r) 和温度 (T), 将结果带入式 (8) 计算得出红黏土含水率预测值 ($\theta_{\text{预}}$)。通过分析含水率实际值与预测值的误差, 可判断该模型的准确性 (表 6)。

5 组红黏土含水率预测值与实际值的绝对误差值均小于 0.02, 误差相对较小。因此, 基于红黏土介电特性改进的 Topp 预测模型能有效评价红黏土水分

量,可为云南红黏土含水率快速、精确地预估评价提供参考。

表 6 红黏土水分预测评价

Table 6 Laterite moisture prediction evaluation

ε_r	温度/℃	$\theta_{\text{质}}(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	$\theta_{\text{容}}(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	误差值
5.73	10.2	0.312 8	0.322 2	-0.009 4
8.45	13.6	0.346 1	0.326 9	+0.019 2
12.06	14.2	0.384 2	0.365 7	+0.018 5
22.54	19.3	0.440 4	0.420 6	+0.019 8
26.41	20.5	0.454 4	0.436 7	+0.017 7

4 结 论

1) 红黏土相对介电常数随含水率、干密度和温度的增加呈逐渐越大趋势。当含水率高于 28% (接近最优含水率) 时, 温度对红黏土介电特性的敏感性显著增加。

2) 红黏土介电特性对各影响因素的敏感性不同, 含水率对介电特性影响最大, 温度次之, 干密度影响最小。

3) Topp 模型在恒温时拟合精度较高, 但当温度变化时拟合精度明显降低, 引入温度后显著提高了 Topp 模型的预测精度。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] 孙德安, 高游, 刘文捷, 等. 红黏土的土水特性及其孔隙分布[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(2): 351-356.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 康学远, 林琳, 刘义佳, 等. 土壤介电常数-含水量关系模型研究[J]. 中国农村水利水电, 2015(8): 8-12.
- [9] ZHAO Yun, LING Daosheng, WANG Yunlong, et al. Study on a calibration equation for soil water content in field tests using time domain reflectometry[J]. Journal of Zhejiang University. A. Science, 2016, 17(3): 240-252.
- [10] 赵贵章, 乔翠平, 闫永帅, 等. 介质含水量与介电常数模型参数试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(3): 7-10.
- [11] 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.
- [12] 罗古拜, 曹银贵, 白中科, 等. 黄土露天矿区重构土壤体积含水率表征与反演[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(4): 529-537.
- [13] JIN Xiao, YANG Wen, GAO Xiaoqing, et al. Analysis and modeling of the complex dielectric constant of bound water with application in soil microwave remote sensing[J]. Remote Sensing, 2020, 12(21): 3 544.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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): e20 096.
- [17] 杜玉霞, 明峰, 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.
- [18] 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.
- [19] 冉景江, 梁川, 赵燮京. 基于分形的土壤水分输运机制与模型研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2006, 38(4): 10-14.
- [20] 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.
- [21] 徐爱珍, 胡建民, 熊永, 等. TDR 法、干烧法及烘干法测定土壤含水量的比较研究[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(2): 253-256.

Experimental Study on the Dielectric Properties of Laterite Based on the Improved Topp Model

WNAG Haijun¹, XU Xingqian^{1*}, ZHAO Xi¹, QU Xin², PENG Guangcan¹, CAI Bo¹

(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】Explore the influencing factors of the dielectric properties of laterite and improve the accuracy of the Topp model. 【Method】Taking Yunnan laterite as an example, the dielectric properties test with dry density, water content and temperature as variables were carried out. The variation law of relative dielectric constant of laterite under different conditions was analyzed. The relative dielectric constant model of laterite was constructed and the water content was predicted. 【Result】The relative dielectric constant of laterite are positively correlated with water content, temperature and dry density. The correlation degree of influencing factors is: water content > temperature > dry density. Under the condition of constant temperature, the fitting accuracy of Topp model is higher; when the temperature changes, the fitting accuracy of the Topp model decreases significantly. 【Conclusion】The relationship between the relative dielectric constant (ε_r) and the volumetric water content (θ) fitted by the Topp model under different temperature conditions is quite different, and the accuracy of the Topp model improved by introducing temperature is obviously improved.

Keyword: laterite; relative dielectric constant; dielectric properties; water content

责任编辑: 韩 洋