

# 土壤水分介电测量方法的潜力分析

马孝义<sup>①</sup> 熊运章 朱凤书 贺正中  
(西北农业大学) (陕西省水利厅)

**提 要** 该文以我国几种有代表性的土壤理化特性变异资料为基础,分析土壤颗粒的介电特性变异,研究介电法测量时土壤容重、化学成份、质地及其温度变化等对测量的影响。研究表明:用介电法来测量土壤水分是一种适应面广,精度较高的方法。

**关键词** 介电特性 土壤水分 土壤理化特性 测定误差

## The Potential Analysis on Soil Moisture Measurement by Dielectric Method

Ma Xiaoyi Xiong Yunzhang Zhu Fengshu

(Northwestern Agricultural University)

He Zhengzhong

(Water Resources Bureau of Shaanxi Province)

**Abstract** Radio frequency, microwave frequency dielectric method is an important way to measure soil moisture. But its adaptability to variation of field soil physical and chemical properties has not been studied so far. In this paper, using the data of several typical soil physical and chemical properties, the variation of soil dielectric constant ( $\epsilon_s$ ) is analyzed, and the influence of the soil bulk density, physical and chemical property, temperature and instrumental error to dielectric measurement is studied. It is concluded that the dielectric method is more adaptable and more precise for soil moisture content measurement than many other methods.

**Key words** Dielectric properties Soil moisture Soil physical and chemical properties Instrumental error

土壤水分测定是水利、农业等领域的一个重要问题,已有 70 多年的研究历史,先后提出了几十种方法。这些方法互有优缺,但将其用于田间土壤水分测定时,由于土壤复杂性和田间变异的存在,其应用受到很大的限制<sup>[1]</sup>,因此测定方法的田间适应性亟待研究,而对此尚未见理论报道。自本世纪 40 年代 Anderson 利用音频交流电桥测定土壤水分以来,众多学者先后从射频谐振电路、时域反射等不同技术角度探讨这一问题,提出许多种基于土壤介电特性基础上的水分测定法<sup>[2]</sup>。本文的目的正是从理论上分析该类方法在田间土壤理化特性变异时的测定误差,研究其田间应用潜力。

收稿日期:1994-05-05 1995-03-06 修订

①马孝义,工学博士,讲师,陕西省咸阳市杨陵区 西北农业大学水利与建筑工程学院,712100

## 1 理论基础

介电法的基本原理是:在一定的电磁频率范围内,水存在相当高且稳定的相对介电常数,其值约为 78,而土壤颗粒,空气的值则远低于此,土壤的介电特性随土壤含水量的增大而增大。尽管各种介电法采用各自不同的技术原理,但都是通过测定土壤介电特性随含水量的变化来实现土壤水分测定。为此首先分析土壤和土壤颗粒介电特性。

### 1.1 土壤介电特性公式

土壤介电特性的影响因素很多,但土壤各成份的介电特性和相对含量是主要因素,一般用反映上述两方面影响的混合模型来表达。混合模型公式很多,文献[1]从机理分析、理论解析、试验技术分析和资料拟合等方法结合得出:在介电法测定的波段,介电特性服从“折射率”公式

$$\sqrt{\varepsilon} = \theta \sqrt{\varepsilon_w} + \frac{\rho}{G} \sqrt{\varepsilon_s} + \left(1 - \frac{\rho}{G} - \theta\right) \sqrt{\varepsilon_a} \quad (1)$$

式中  $\rho$ 、 $G$ 、 $\theta$  分别为土壤的干容重、比重、体积含水量;

$\varepsilon$ 、 $\varepsilon_w$ 、 $\varepsilon_s$ 、 $\varepsilon_a$  分别为土壤、土壤水分、土壤颗粒、空气的介电特性,其中  $\varepsilon_a = 1$ ,  $\varepsilon_s$  随土壤颗粒的化学组成而变,  $\varepsilon_w$  随温度  $t$  而变;

$$\varepsilon_w = 78.54[1 - 4.60 \times 10^{-3}(t - 25) + 8.8 \times 10^{-6}(t - 25)^2] \quad (2)$$

### 1.2 土壤颗粒的介电特性与化学组成的关系

土壤颗粒介电特性的影响因素很多,但主要由组成它的大量化学元素即 Si、O、Fe、Al 的极化度、含量及结晶状态所决定。为简化分析忽略其它元素的影响,将土壤颗粒简化看成仅含  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$  组份的多种土壤结晶矿物的混合物,并进一步将各种土壤结晶矿物虚拟为由  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$  构成的多晶物质。按电介质物理学理论<sup>[3,4]</sup>,多晶体、多聚物、混合物等各种形态的多相体的介电特性由其内的各相介电特性和体积含量所决定,因此土壤颗粒的介电特性最终可粗略地用其内的各种土壤结晶矿物中  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$  总的体积百分含量和介电特性表示:

$$\varepsilon_s^\alpha = \theta_1 \cdot \varepsilon_1^\alpha + \theta_2 \cdot \varepsilon_2^\alpha + \theta_3 \cdot \varepsilon_3^\alpha \quad (3)$$

式中  $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$ 、 $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$ 、 $\varepsilon_3$  分别为各种土壤结晶矿物中  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$  总的体积百分含量和介电特性; $\alpha$  为反映其结晶和混合状态的系数,  $\alpha = \frac{1}{3} \sim \frac{1}{2}$

但在各种土壤结晶矿物中的  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$  与  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$  的单晶物质,如石英( $\text{SiO}_2$ )、刚玉( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )、赤铁矿( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )的存在状态不同。按分子光学的折射度理论<sup>[5,6]</sup>,对确定化学组成的物质,不同物态下的介电特性近似与其物质的密度成正比,由于各种含  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$  的土壤结晶矿物的密度和土壤密度近似相等,为此可以认为土壤结晶矿物中的  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$  的密度等于土壤颗粒的密度,即有:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{\rho}{\rho_A} \varepsilon_A & \varepsilon_2 &= \frac{\rho}{\rho_B} \varepsilon_B & \varepsilon_3 &= \frac{\rho}{\rho_C} \varepsilon_C \\ \theta_1 &= \omega_1 & \theta_2 &= \omega_2 & \theta_3 &= \omega_3 \end{aligned} \quad (4)$$

式中  $\rho_A$ 、 $\rho_B$ 、 $\rho_C$  分别为  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$  以某一单晶状态存在的密度; $\varepsilon_A$ 、 $\varepsilon_B$ 、 $\varepsilon_C$  分别在对应密度下的介电特性;

$\omega_1, \omega_2, \omega_3$  分别为土壤颗粒中  $\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_3\text{O}_4$  的重量的百分含量;若  $\alpha$  近似取 0.4, 代入(3)式有:

$$\left(\frac{\epsilon}{\rho}\right)^{0.4} = \omega_1\left(\frac{\epsilon_A}{\rho_A}\right)^{0.4} + \omega_2\left(\frac{\epsilon_B}{\rho_B}\right)^{0.4} + \omega_3\left(\frac{\epsilon_C}{\rho_C}\right)^{0.4} \quad (5)$$

$\epsilon_A, \epsilon_B, \epsilon_C, \rho_A, \rho_B, \rho_C$  分别取石英、刚玉、赤铁矿的介电特性和密度,对文献[7]给出的几种土壤和土壤矿物的介电特性资料进行验证,其相对误差在 2.9%~18.7%之间,平均相对误差为 8.3%,说明公式能较好地反映土壤颗粒介电特性随化学组成的变化规律。

## 2 土壤颗粒介电特性的层间与空间变异

### 2.1 土壤颗粒介电特性的层间变异

对几种典型土壤<sup>[8]</sup>按式(5)分析土壤介电特性的层间变异,结果表明:由于土壤理化特性的层间变异,不同土壤的介电特性有一定变异,同一土壤不同层次的介电特性存在一定变异。

### 2.2 土壤颗粒介电特性的空间变异

#### 2.2.1 土壤化学成份对 $\epsilon_s$ 的影响

目前尚缺乏小范围田块土壤化学成份空间变异资料,但现有的研究表明:同一土壤化学成份与其颗粒组成相联系。土壤颗粒由粗变细时, $\text{SiO}_2$  含量有明显减少的趋势,而  $\text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_3\text{O}_4$  则有相反趋势<sup>[8]</sup>(见表 1)。对表 1 各种成份含量归一化后,按式(5)计算粘粒和砂粒含量变化时, $\epsilon_s$  数值的相对变化,见表 1,可以看出:粘粒的  $\epsilon_s$  明显高于全土,而砂粒则相反。

表 1 不同粒径土壤颗粒的介电特性

文献来源	项目	化学组成(%)			$\epsilon_s$	$\frac{\partial \epsilon_s}{\partial C_{砂}}$	$\frac{\partial \epsilon_s}{\partial C_{粘}}$
		$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_3\text{O}_4$			
土 <sup>[9]</sup>	全土	68.82	7.78	11.38	5.37	-0.73	2.4
	砂粒	86.3	5.19	6.77	4.64		
	粘粒	37.65	15.3	21.97	7.77		
黄 <sup>[10]</sup>	全土	63.23	8.94	16.27	6.03	-1.21	1.66
	砂粒	76.0	6.67	7.25	4.82		
	粘粒	39.65	16.45	22.5	7.69		
黄 <sup>[10]</sup>	全土	67.27	17.52	5.88	4.99	-0.95	1.27
	砂粒	94.55	1.08	1.75	4.04		
	粘粒	43.15	31.75	11.13	6.26		
白 <sup>[8]</sup>	全土	58.54	12.45	4.26	4.83		1.1
	粘粒	38.25	20.15	7.93	5.93		
均值						-0.96	1.61

#### 2.2.2 典型土壤砂粒与粘粒含量的变异性

采用文献[11]给出华北某地  $70 \times 35\text{m}$  典型田块的资料整理得出典型田块土壤理化特性空间变异,见表 2。

表 2 典型田块土壤特性的空间变异<sup>[11]</sup>

土壤特性	均 值	标准差 $\sigma$
砂粒含量(%)	16.95	4.98
粘粒含量(%)	13.08	4.36
干容重/g·cm <sup>2</sup>	1.435	0.087

表中粘粒含量可以按类似于式(8)推算。

田间土壤的颗粒组成存在着一定的相关关系。利用文献[8]资料分析华北土壤的各种颗粒间的相关系数,土壤的砂粒含量和粘粒含量存在着高度显著的负相关关系,相关系数  $R=0.881$ ,其它颗粒含量之间可近似认为是相互独立的。

### 2.2.3 土壤颗粒介电特性的空间变异

土壤的  $\varepsilon_s$  随粘粒含量  $C_{粘}$  增加,随砂粒含量  $C_{砂}$  增加而减小,可近似用下式表达:

$$\Delta\varepsilon_s = \frac{\partial\varepsilon_s}{\partial C_{砂}} \Delta C_{砂} + \frac{\partial\varepsilon_s}{\partial C_{粘}} \Delta C_{粘} \quad (7)$$

按随机向量具有相关性的方差计算公式有:

$$\sigma_{\varepsilon_s} = \frac{\partial\varepsilon_s^2}{\partial C_{砂}^2} \cdot \sigma_{C_{砂}}^2 + \frac{\partial\varepsilon_s^2}{\partial C_{粘}^2} \cdot \sigma_{C_{粘}}^2 + 2 \cdot \frac{\partial\varepsilon_s}{\partial C_{砂}} \cdot \frac{\partial\varepsilon_s}{\partial C_{粘}} \cdot \sigma_{C_{砂}} \cdot \sigma_{C_{粘}} \cdot R^2 \quad (8)$$

式中的各项参数分别取表 1、2、3 中的华北土壤资料,由式(8)计算有:

$$\sigma_{\varepsilon_s} = 0.11$$

可以看出:由于土壤颗粒化学组成的空间变异,土壤颗粒的  $\varepsilon_s$  存在着一定的变异。

## 3 土壤水分介电测量方法的潜力分析

### 3.1 土壤理化特性变异对测量的影响

介电法测量土壤水分的关键是在土壤理化特性变异的稳定性,因此研究土壤理化特性对测量的影响是至关重要的。为此对式(1)变换有:

$$\theta = \frac{\sqrt{\varepsilon} - \frac{\rho}{G} \sqrt{\varepsilon_s} - (1 - \frac{\rho}{G})}{\sqrt{\varepsilon_w} - 1} \quad (9)$$

考虑式(2)  $\varepsilon_w \sim t$  的关系,按系统误差公式有:

$$\Delta\theta = \frac{\partial\theta}{\partial\varepsilon} \cdot \Delta\varepsilon + \frac{\partial\theta}{\partial\varepsilon_s} \cdot \Delta\varepsilon_s + \frac{\partial\theta}{\partial\rho} \cdot \Delta\rho + \frac{\partial\theta}{\partial t} \cdot \Delta t \quad (10)$$

由式(9)有:

$$\frac{\partial\theta}{\partial\varepsilon} = \frac{1}{2(\sqrt{\varepsilon_w} - 1) \sqrt{\varepsilon}} \quad (11)$$

$$\frac{\partial\theta}{\partial\varepsilon_s} = \frac{\rho}{G} \cdot \frac{1}{2(\sqrt{\varepsilon_w} - 1) \cdot \sqrt{\varepsilon_s}} \quad (12)$$

$$\frac{\partial\theta}{\partial\rho} = \frac{1}{G} \cdot \frac{\sqrt{\varepsilon_s} - 1}{\sqrt{\varepsilon_w} - 1} \quad (13)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\theta}{2 \sqrt{\varepsilon_w} (\sqrt{\varepsilon_w} - 1)} \cdot \frac{d\varepsilon_w}{dt} \approx 0.181 \cdot \frac{\theta}{\sqrt{\varepsilon_w} (\sqrt{\varepsilon_w} - 1)} \quad (14)$$

可以看出:各项误差随  $t$ 、 $\varepsilon_s$ 、 $\theta$ 、 $G$ 、 $\rho$  而变。为研究方便,在  $t=25^\circ\text{C}$ 、 $\varepsilon_s=5.45$ 、 $G=2.65\text{g}/\text{cm}^3$ 、 $\rho=1.4\text{g}/\text{cm}^3$ ,式(10)~(14)可简化为:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \varepsilon} = 0.0636 / \sqrt{\varepsilon}; \quad \frac{\partial \theta}{\partial \varepsilon_s} = 0.0144; \quad \frac{\partial \theta}{\partial \rho} = 0.0641; \quad \frac{\partial \theta}{\partial t} = 0.00259\theta$$

### 3.2 温度和电子测量产生的误差分析

$$\Delta \theta = \frac{\partial \theta}{\partial \varepsilon} \cdot \Delta \varepsilon = 0.0636 \sqrt{\varepsilon} \cdot \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} \quad (15)$$

按式  $\frac{\partial \theta}{\partial t} = 0.00259\theta$  计算温度变化产生的水分测量误差,按式(15)计算由于仪器方面原因引起的土壤介电常数  $\varepsilon$  的测量误差为  $\Delta \varepsilon/\varepsilon=1\%$  时,而产生的水分测量误差,见表 3。可以看出:采用介电法测量时对仪器的精度要求不苛刻;若不考虑温度变化的影响,测量误差较大,如果能将温度变化估计在  $\pm 5^\circ\text{C}$  以内,对其补偿后,则误差大为缩小。

表 3 温度和电子测量对水分测量的影响 (%)

含水量(%)	10	20	30	40
$\Delta \theta(\pm 20^\circ\text{C})$	$\pm 0.52$	$\pm 1.04$	$\pm 1.56$	$\pm 2.08$
$\Delta \theta(\pm 5^\circ\text{C})$	$\pm 0.13$	$\pm 0.26$	$\pm 0.40$	$\pm 0.54$
$\varepsilon$	6.18	10.56	16.49	23.5
$\Delta \theta(\Delta \varepsilon/\varepsilon=1\%)$	0.16	0.21	0.26	0.31

### 3.3 土壤理化特性的层间变异条件下的测量误差

按式(12)、(13)分析不同层次的土壤由于  $\varepsilon_s$  和  $\rho$  变化( $\Delta \rho=0.05\text{g}/\text{cm}^3$ )产生的测量误差,见表 4。

表 4 土壤理化特性的层间变异对测量的影响

土壤种类	广西表潜土	栾城褐土	武功红油土	逊克黑土
$\varepsilon_s$ 最小	4.46	5.79	4.78	5.98
$\varepsilon_s$ 最大	5.17	6.05	5.05	6.35
$\varepsilon_s$ 平均	4.78	5.92	4.93	6.17
$\Delta \varepsilon_s$	$\pm 0.39$	$\pm 0.13$	$\pm 0.15$	$\pm 0.19$
$\partial \theta / \partial \varepsilon_s$	0.015	0.014	0.015	0.014
$\Delta \theta(\Delta \varepsilon_s)(\%)$	$\pm 0.59$	$\pm 0.18$	$\pm 0.23$	$\pm 0.27$
$\Delta \theta(\Delta \rho)(\%)$	0.28	0.34	0.29	0.36

可以看出,土壤理化特性的层间变异测量的影响较小,一般不需每层土壤都进行单独标定。

### 3.4 土壤理化特性空间变异条件下的测量误差

同式(8)类似,可计算土壤容重和 $\epsilon_s$ 空间变异产生的水分测定误差:

$$\sigma_\theta = \left(\frac{\partial\theta}{\partial\epsilon_s}\right)^2\sigma_{\epsilon_s}^2 + \left(\frac{\partial\theta}{\partial\rho}\right)^2\sigma_\rho^2 \quad (16)$$

式中的各项参数取自前文表3,式(8)、(12)、(13)确定的华北土壤计算结果,由此计算有:

$$\sigma_\theta = 0.61\%(\text{cm}^3/\text{cm}^3) \quad (17)$$

可以看出:土壤理化特性的空间变异对测量影响较小,一般不需对田间每点土壤单独标定。

### 3.5 不考虑土壤质地变化时测量误差

对所研究的四种典型土壤, $\Delta\epsilon_s = \pm 0.72$ ,由式 $\frac{\partial\theta}{\partial\epsilon_s} = 0.0144$ 计算:

$$\Delta\theta(\Delta\epsilon_s) = 0.0144 \times (\pm 0.72) = \pm 0.010(\text{cm}^3/\text{cm}^3) = \pm 1.0(\% \text{cm}^3/\text{cm}^3)$$

可以看出:土壤种类对测量的影响较小,一般不需对每种土壤进行标定。

## 4 结 论

从理论上讲,利用介电法测定田间土壤水分时,层间和空间的土壤理化特性对测量影响较小,同时温度变化和测量装置的影响也较小。在进行田间土壤水分测量时,一般不需对每种土壤,同一土壤的不同点和不同层次分别标定,也能取得较高的精度。笔者在文献[1]中采用相同资料和类似方法从理论上分析了由于土壤理化特性变异,电磁射线、近红外、光学方法等其它电磁方法的水分测量误差,并与介电法比较表明,介电法适应性广、精度较高。

应该指出,利用介电法测量土壤水分还涉及到许多量测技术方面的问题,如合理的测量波段选择、高损耗介电特性的测量、电极极化、寄生电容等。对此笔者在文献[1]中进行了探索,并试制了一台土壤水分测量仪,取得了较好的结果。这说明介电法是有潜力的田间土壤水分测量方法,值得进一步深入研究。

### 参 考 文 献

- 1 马孝义. 土壤水分电磁测量的理论与方法的研究. 陕西杨陵:西北农业大学博士学位论文,1993
- 2 Topp et al. Electromagnetic determination of soil water content; measurements in coaxial transmission lines. *Water Res Res*, 1980, 16(3): 574~582
- 3 Bottcher et al. Theory of electric polarization. Amsterdam; Elsevier. 1973, 2
- 4 D E Loo. Dielectric properties of heterogeneous mixtures with a polar constituent. *Appl Res*, 1963, B11: 310~320
- 5 伏尔坚斯坦著. 王 昌译. 分子光学. 北京:高等教育出版社,1958
- 6 玻恩著,杨葭荪译. 光学原理. 北京:科学出版社,1981
- 7 肖金凯等. 岩石和土壤的微波介电特性及其在微波遥感中的应用研究. *科学通报*, 1983(17):
- 8 熊 毅等. 中国土壤. 北京:科学出版社,1987
- 9 Joffe et al. Mechanical separates and their fractions in the soil profile. *Soil Sci Soc Proc*, 1942, 6(2): 563~567
- 10 文启孝等. 中国黄土地球化学特征. 北京:科学出版社,1989
- 11 雷志栋等. 土壤水动力学. 北京:清华大学出版社,1988