

# 土壤水分介电测量的频率上限分析

马孝义<sup>1</sup>, 马建仓<sup>2</sup>

(1 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨陵 712100; 2 西北工业大学高技术应用研究所, 陕西 西安 710048)

摘 要: 以德拜模型为基础, 分析了不同电磁测量频率下土壤质地对土壤水分介电测量的影响规律, 确定了不同误差要求下的土壤水分介电测量频率上限值, 可作为进一步研制适用面较广的土壤水分测定仪的基础。

关键词: 土壤水分; 电磁测量; 介电常数; 频率

中图分类号: S 152.7.T H79 文献标识码: A 文章编号: 1005-3409(2002) 02-0082-05

## The Maximum Electromagnetic Frequency of Soil Moisture Dielectric Measurement Method

MA Xiao-yi<sup>1</sup>, MA Jian-cang<sup>2</sup>

(1 College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Northwest Sci-tech University of

Agriculture and Forestry, Yangling 712100, Shaanxi Province, China; 2 Institute of

High Technology Application of Northwest Industrial University, Xi'an 710004, Shaanxi Province, China)

**Abstract:** Based on the Debye model, the influence of electromagnetic frequency on soil dielectric constant ( $\epsilon$ ) is analyzed, and the maximum electromagnetic frequency in the different measurement variation of soil moisture dielectric measurement is decided.

**Key words:** soil moisture; electromagnetic measurement; dielectric properties; frequency

田间土壤水分的方便、快速测定一直是农业、水利等领域的一个重要问题。已有近 80 年的研究历史, 至今已经提出了数十种方法。其中研究较多的有重量、能量、热特性、中子、阻抗、电容、时域反射(TDR)、微波、近红外、光学、X—射线、 $\gamma$ —射线等方法及适于大面积的各种遥感法等, 但将这些方法用田间土壤水分测量时, 由于土壤的复杂性和田间变异的影响, 其应用受到很大的限制。文献[1]基于广义电磁波与物质相互作用原理, 分析了土壤理化特性变异对土壤介电常数、折射率、质量吸收系数等电磁特性参数的影响规律, 得出了土壤介电常数的水分敏感性强而土壤的容重、质地影响小, 土壤水分介电测量法是最具潜力的一类方法的结论。自上世纪 40 年代 Anderson 利用音频交流电桥测定土壤水分以来, 众多的学者从射频谐振电路、时域反射、微波吸收与反射等角度探讨这一问题, 先后提出许多种

基于土壤介电常数的水分测定法<sup>[2~4]</sup>。但把这些方法用于田间土壤水分测量时, 发现其仍受到土壤质地、结构的显著影响。本文目的正是试图以德拜模型为基础, 探讨不同电磁测量频率下土壤质地对介电常数的影响规律, 确定在不同允许误差下土壤水分介电测量频率上限, 以期研制适用于不同质地土壤的免标定土壤水分测定仪提供理论依据。

### 1 问题的提出

土壤是一个十分复杂的物质, 它有复杂的空间结构和颗粒结构, 土壤颗粒的化学组成、尺寸和形状, 土壤孔隙和有机质、水分、盐分都有很大的变异。而土壤作为自然界最为重要的物质资源和空间电波传播的边界, 它的介电特性的研究对资源勘测、军事、通信等领域的研究都具有十分重要的意义。为此 Smith<sup>[5]</sup> (1933)、Scott 等<sup>[6]</sup> (1967)、Lundian<sup>[7]</sup>

<sup>1</sup> 收稿日期: 2001-09-25  
基金项目: 国家自然科学基金项目(49871040); 国家重大科技产业示范工程项目: “渠灌类型区农业高效用水模式与产业化示范”(99-021-01-02)。  
作者简介: 马孝义, 男, (1965-), 陕西凤翔人, 教授, 博士, 主要从事农业水土工程方面的研究。

(1971)、Hoekstra 和 Delaney<sup>[8]</sup> (1974)、Selig 和 Mansukhani<sup>[9]</sup> (1975)、Davis 和 Annan<sup>[10]</sup> (1976)、Hallikainen<sup>[11]</sup> (1985)、Kraft<sup>[12]</sup> (1987)、陈定一<sup>[13]</sup> (1988)、Campbell<sup>[14]</sup> (1990) 等都对其进行了研究, 但大多是在固定频率或较小的频率段内测量的。本文对几个较大频率段资料进行整理分析, 以此来研究土壤介电常数随电磁频率的关系见图 1 和式(1)。

$\epsilon(f) = \epsilon(f) - j[(\epsilon(f) + \frac{\sigma}{2\pi f \epsilon_0})]$  (1)  
式中:  $\epsilon(f)$ ,  $\epsilon(f)$ ,  $\epsilon(f)$  分别为土壤复介电常数、介电常数、介电损耗;  $\sigma$ ——土壤电导;  $f$ ——电磁频率;  $\epsilon_0$ ——真空介电常数。

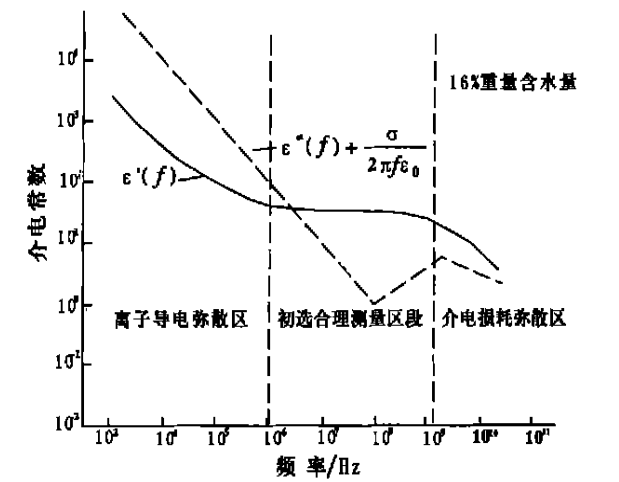


图 1 土壤介电特性与电磁频率的关系  
影响土壤介电特性的因素很多, 主要包括电磁频率、土壤含水量、土壤质地、容重、含盐量等, 但以电磁频率对其影响最大。由图 1 可以看出: 当电磁频率低于 1 MHz 时, 土壤的介电常数[ $\epsilon(f)$ ] 很大, 特别在低于 10 kHz 时, 土壤的介电常数在 100 以上, 远高于水的介电常数(78.54, 在 25 °C 时), 其介电常数受土壤质地、容重、含盐量影响很大, 存在一个离子电导而造成的介电常数的分散区, 只有当电磁频率高于 1 MHz 时, 介电常数才较为稳定, 较少受土壤质地、结构的影响。而当电磁频率高于 2~3 GHz 时, 随其电磁频率的升高, 介电常数迅速降低, 并伴随产生介电损耗, 同时其介电常数显著受到土壤质地、温度的影响。这也和其它含水物质如岩石、植物、动物等的介电常数是相似的<sup>[15~17]</sup>。由此可以得出: 在利用介电法测量土壤水分只能在上述电磁测量频率范围内。但图 1 中给出的频率范围仍相当大, 即使在此频率范围内, 利用介电法测量土壤水分也仍在相当程度上受到土壤质地、结构的影响, 产生相当大的误差, 也就是说实际的测量频率更应在上述频率

段内, 但目前国内外对其更准确合理测量频率段尚未见到报道, 这已成为影响这一研究深入的关键问题之一。以下以电介质物理学的德拜模型(Debye Medel) 为依据, 确定土壤质地变化对土壤水分介电测量影响较小, 可以满足田间土壤水分测量实用要求的频率上限。

2 理论基础

现代物理学认为: 所有非金属, 甚至一定情况的金属, 都属于电介质。土壤也不例外, 而且是一种十分复杂的电介质。电介质是以感应而非传导方式反映电场的作用和影响, 在电介质中, 起主要作用的是束缚电荷, 在电场的作用下, 它们以正、负电荷重心分离或取向的电极化方式作出响应, 电介质的介电特性可用德拜模型来分析, 它与电磁频率的关系为:

$\epsilon(f) = \epsilon + \frac{\epsilon_0 - \epsilon}{1 + j(f/f_m)}$  (2)

式中:  $\epsilon(f)$ 、 $\epsilon_0$ 、 $\epsilon$  分别为物质介电常数、低频时的静态介电常数和高频时的稳态介电常数;  $f$ ——电磁频率;  $f_m$ ——介电损耗峰值频率。

由式(2)可写出物质介电常数的实部和虚部分别为:

$\epsilon(f) = \epsilon + (\epsilon_0 - \epsilon) \frac{1}{1 + (f/f_m)^2} = \epsilon [1 - \frac{1}{1 + (f/f_m)^2}] + \epsilon_0 \frac{1}{1 + (f/f_m)^2}$  (3)

$\epsilon(f) = (\epsilon_0 - \epsilon) \frac{f/f_m}{1 + (f/f_m)^2}$  (4)

由式(3) 可见, 当电磁频率远小于物质的介电弛豫峰值频率时, 即  $f \ll f_m$  时,  $\epsilon = \epsilon_0$ ,  $\epsilon = 0$ ; 当电磁频率远大于物质的介电弛豫峰值频率时, 即  $f \gg f_m$  时,  $\epsilon = \epsilon$ ,  $\epsilon = 0$ ; 同时在  $f = f_m$  时,  $\partial \epsilon / \partial f = 0$ ,  $\epsilon$  出现极大值; 当电磁频率接近于峰值频率值时, 由于介电弛豫,  $\epsilon$ 、 $\epsilon$  存在着剧烈变化, 强烈地影响物质的介电常数。

由于不同质地土壤的介电弛豫峰值频率变化很大, 要使土壤质地对测量的影响较小, 满足田间土壤水分测量的实用要求, 则应使土壤水分介电测量的频率小于土壤的介电弛豫最小峰值频率, 并使土壤水分介电测量的频率与土壤的介电弛豫最小峰值频率比值小于一个确定值, 以保证土壤介电弛豫对土壤介电常数影响较小, 土壤质地变化而造成土壤水分测量误差小于允许值, 满足田间土壤水分测量的实用要求。以下以此为基础, 确定其土壤水分介电测量的频率上限。

### 3 土壤水分介电测量允许频率上限确定

#### 3.1 土壤的介电常数

土壤介电常数公式: 影响土壤介电常数的因素很多, 但组成土壤的各成份介电常数和相对含量是主要因素, 一般可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, 笔者从机理分析、理论解析、试验技术和资料拟合方法结合得出: 土壤的静态和稳态介电常数服从“折射率”公式<sup>[1]</sup>

$$\overline{\epsilon} = \theta \overline{\epsilon_w} + \frac{\rho}{G} \overline{\epsilon_s} + (1 - \frac{\rho}{G} - \theta) \overline{\epsilon_a}$$

(5)

式中:  $\rho$ 、 $G$ 、 $\theta$  分别为土壤的干容重、比重、体积含水量;  $\epsilon_s$ 、 $\epsilon_w$ 、 $\epsilon_a$ 、 $\epsilon_s$  分别为土壤、土壤水分、土壤颗粒、空气的介电常数, 其中  $\epsilon_a = 1$ ,  $\epsilon_s$  随土壤颗粒的化学组成而变化,  $\epsilon_w$  也随温度  $t$  而变化。

土壤颗粒的  $\epsilon_0$  和  $\epsilon_s$ : 由于土壤颗粒主要由非极性物质组成, 对所研究的频率段土壤颗粒不存在介电弛豫现象, 土壤颗粒的静态介电常数与稳态介电常数近似相等。通过对多种土壤介电常数的研究表明: 它随土壤颗粒化学组成而变, 但变化不大, 其值在 4 ~ 7 之间, 均值为:

$$\epsilon_0 = \epsilon_s = 5.45$$

(6)

水的  $\epsilon_0$  和  $\epsilon_w$ : 研究表明<sup>[9]</sup>: 水的静态介电常数( $\epsilon_0$ ) 值随温度而变, 但变化较小。

$$\epsilon_0 = 78.54[1 - 4.60 \times 10^{-3}(t - 25) + 8.8 \times 10^{-5}(t - 25)^2]$$

(7)

水的稳态介电常数  $\epsilon_w$  为:

$$\epsilon_w = 4.9$$

(8)

综合式(5)至式(8)可以看出: 由于水的静态介电常数很大, 远高于土壤颗粒的静态介电常数, 故土壤的静态介电常数  $\epsilon_0$  受土壤含水量和容重等因素

的影响, 其中土壤含水量变化对其影响十分显著; 而由于水的稳态介电常数与土壤颗粒的稳态介电常数十分接近, 土壤含水量和容重变化对土壤的稳态介电常数  $\epsilon$  影响要小得多; 同时土壤的静态介电常数  $\epsilon_0$  明显高于土壤的稳态介电常数  $\epsilon$ 。为分析简便计, 以  $t = 25$ ,  $\epsilon_0 = \epsilon_s = 5.45$ ,  $G = 2.65 \text{ g/cm}^3$ ,  $\rho = 1.4 \text{ g/cm}^3$ , 将式(6)至式(8)代入式(5)计算不同含水量下土壤的静态与稳态介电常数, 见表 1。

表 1 不同含水量下土壤的静态与稳态介电常数

含水量/ %	10	20	30	40
$\epsilon_0$	6.18	10.56	16.49	23.5
$\epsilon$	3.35	3.79	4.28	4.80

#### 3.2 土壤的峰值频率 $f_m$

据大量的研究表明: 土壤的介电特性可用德拜模型来描述<sup>[8, 11, 13]</sup>, 由于不同质地土壤的介电弛豫峰值频率不同, 在所研究的电磁频率段内, 虽然不同质地土壤静态介电常数  $\epsilon_0$  和稳态介电常数  $\epsilon$  接近, 而土壤介电常数  $\epsilon$  有较大的差异, 因此分析土壤的介电弛豫峰值频率对研究十分重要。研究表明<sup>[19]</sup>: 纯水在常温下的介电弛豫峰值频率值约为 17.4 GHz。存在于土壤中的水分由于受到土壤颗粒, 主要是土壤粘粒的吸附作用, 含水土壤的峰值频率  $f_m$  低于纯水的值, 且该值受多种因素影响, 变化较大, 土壤黏粒含量是主要因素。目前对土壤的峰值频率  $f_m$  与上述因素还很难给出严格的定量关系, 分析国内外研究成果见表 2。可以看出: 土壤的峰值频率主要土壤质地影响, 黏性土由于其颗粒较小, 有较大的比表面积, 单位吸附的水分较多, 其极值频率较低, 沙性土则相反。据文献[20], 我国主要土壤的地区分布和黏粒含量见表 3。综合以上分析, 可以确定我国主要土壤的峰值频率在 1.0 GHz ~ 10 GHz 之间变化, 其最小峰值频率约为 1.0 GHz。

表 2 不同质地土壤的介电弛豫峰值频率

土 壤	黏土 <sup>[8]</sup>	粉沙土 <sup>[8]</sup>	沙土 <sup>[13]</sup>	黏土 <sup>[11]</sup>	沙土 <sup>[11]</sup>
含黏量	47	33	18.18	47.4	13.5
含水量	10	10	10 ~ 40	10 ~ 40	30
温度	24	- 10	25	- 10	23
峰值频率	1.0	1.5	10	1.4	8

表 3 我国主要土壤的地区分布和黏粒含量

土 壤	地 区	质地名称	黏粒含量( % )	土 壤	地 区	质地名称	黏粒含量/ %
黑土	东北	沙壤土	26	黑垆土	陕、甘、宁	沙粉土	14
淡栗钙土	内蒙古	粗沙土	5	褐土、土	陕、晋、冀	沙壤土	16
栗钙土	新疆北部	多砾质沙壤土	19	潮土	冀、鲁、豫	粉土	27
棕钙土	新疆北部	多砾质沙壤土	19	黄棕壤	陕西南部、南京	壤土	29
灰漠土	新疆	沙壤土	23	黄壤	川、滇、黔、桂	粉黏土	30
灰棕漠土	新疆北部	多砾质沙壤土	17	红壤	粤、桂	粉黏土	33
棕漠土	新疆南部	多砾质粗沙土	14	赤红壤和砖红壤	粤、桂、滇	壤黏土	39
黄绵土	新疆南部	粉土	13				

3.3 土壤水分介电测量误差与峰值频率的关系

由式(3)及上文分析可得,在假定 $f/f_m$  较小于1 的数值时,由于 $\epsilon$  较小,  $\epsilon [1 - \frac{1}{1 + (f/f_m)^2}]$  远小于,  $\epsilon [\frac{1}{1 + (f/f_m)^2}]$ , 为分析方便计, 则式(3)可近似写为:

$$\epsilon^{(7)} \approx \epsilon_0 \frac{1}{1 + (f/f_m)^2} \tag{9}$$

将式(5)代入式(9)有:

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \frac{1}{1 + (f/f_m)^2} = \theta \frac{\epsilon_0}{\epsilon_0} + \frac{\rho}{G} \frac{1}{\epsilon_0 + (1 - \frac{\rho}{G} - \theta) \epsilon_0} \frac{1}{1 + (f/f_m)^2} \tag{10}$$

将式(10)变换则有:

$$\theta = \frac{\epsilon [1 + (f/f_m)^2] - 1 - (\rho/G)}{\epsilon_0 - 1} \tag{11}$$

在测量频率较低时,即认为 $f/f_m$  很小时, $f/f_m$  值不影响土壤的介电常数, 则上式可写为:

$$\theta_1 = \frac{\epsilon - (\rho/G) \epsilon_0 - 1(1 - \rho/G)}{\epsilon_0 - 1} \tag{12}$$

由式(11)可以看出:土壤水分介电测量结果受到土壤介电常数和容重等因素的影响,同时也受到其电磁测量频率与土壤的介电弛豫峰值频率比值,即 $f/f_m$  的影响。文献[1]对在不考虑土壤介电弛豫产生的介电常数变化影响时,即 $f/f_m$  很小时,土壤质地及田间土壤理化特性的层间和空间变异对测量的影响进行分析表明:土壤的化学组成、容重等理化特性的层间和空间变异对测量的影响很小,不同质地、容重对土壤水分测量产生的误差在1%以内。因此在对本文研究测量频率段,不同质地土壤的介电常数的显著差别,以及由此而造成对土壤水分介电测量的误差主要是由不同质地土壤的介电弛豫峰值频率不同产生的。为此将式(12)与式(11)相减确定不同的 $f/f_m$  值下,由于不同质地土壤的介电弛豫峰值频率不同产生的土壤含水量测量误差为:

$$\Delta\theta = \frac{\epsilon}{\epsilon_0 - 1} ( \frac{1}{1 + (f/f_m)^2} - 1 ) \tag{13}$$

由式(13)计算要使土壤质地变化产生的土壤水分测量误差小于 $\Delta\theta$ 时的测量频率上限值为:

$$f = f_m \sqrt{ \frac{ \Delta\theta ( \epsilon_0 - 1 ) }{ \epsilon_0 } + 1 } - 1$$

$$= f_m \sqrt{ \frac{ \Delta\theta ( \epsilon_0 - 1 ) [ 2 \frac{ \epsilon_0 + \Delta\theta }{ \epsilon_0 } - \Delta\theta ( \epsilon_0 - 1 ) ] }{ \epsilon_0 } } \tag{14}$$

为简化分析计,考虑温度为25 时,  $\epsilon_w = 78.54$ , 则土壤质地变化造成的土壤水分测量误差小于1%、2%(体积含水量)时,即 $\Delta\theta = 0.01, 0.02$  的电磁测量频率上限值分别为:

$$f_{1\%} = f_m \sqrt{ \frac{ 0.07862 ( \frac{2}{\epsilon} + 0.07862 ) }{ \epsilon } } \tag{15}$$

$$f_{2\%} = f_m \sqrt{ \frac{ 0.1571 ( 2 \frac{2}{\epsilon} + 0.1571 ) }{ \epsilon } }$$

由于对测量的土壤 $\epsilon$  一般在6~25 之间变化,则远大于0.157 2, 则式(15)可近似简化

$$\begin{aligned} f_{1\%} &= 0.3965 f_m \sqrt{\epsilon} \\ f_{2\%} &= 0.5605 f_m \sqrt{\epsilon} \end{aligned} \tag{16}$$

3.4 合理测量频率上限

考虑到对研究的频率段,不同含水量的土壤 $\epsilon$  与 $\epsilon_0$ 、虽有一定差别,但差别不大,且这一差别对估算测量频率上限的影响相对较小,为简化分析计,假设 $\epsilon = \epsilon_0$ , 由式(16)估算要使各种土壤在不需单独标定条件下的允许误差小于1%、2%时的电磁测量频率上限见表4。可以看出:不同允许误差下的电磁测量频率随含水量的不同而有所变化,但变化范围不大,随允许误差值的减小而减小。对我国主要土壤种类在满足其对土壤质地不需单独标定条件下的电磁测量频率上限值应在0.18~0.25 GHz,也即180~250 MHz 之间。这也同文献[21]对实测资料的分析的介电测量频率上限应在300 MHz 的结果相近,说明本文的分析结论是可靠的。

表 4 不同允许误差下的电磁测量频率上限

含水量/%	10	20	30	40
$\epsilon_0$	6.18	10.56	16.49	23.5
$f_{1\%}/\text{GHz}$	0.252	0.219	0.197	0.179
$f_{1\%}/\text{MHz}$	0.356	0.309	0.278	0.253

4 结 论

(1) 通过上文的分析可以得出,利用介电法测量土壤水分时,其测量频率高于土壤的峰值频率时,土壤水分对其介电常数的影响急剧减弱,而土壤质地对其水分测量影响急剧增大,因此利用介电法测量土壤水分时,因使其测量频率低于其田间土壤的介电弛豫最小峰值频率。

(2) 在测量频率低于其峰值频率但接近田间土壤的介电弛豫最小峰值频率时,土壤介电常数仍受

介电弛豫的影响,越接近这一峰值频率,干扰越大,在允许测量误差小于 1%、2%( 体积含水量) 时,其对应测量频率上限值分别为:  $f_{1\%} = 0.3965f_m / \sqrt[4]{\epsilon}$ 、 $f_{2\%} = 0.5605f_m / \sqrt[4]{\epsilon}$ , 对我国土壤,在质地变化产生的体积含水量测量误差小于 1%、2% 时,其测量频率上限值分别为: 0.18 GHz、0.25 GHz。

(3)在介电法测量土壤水分中,还存在一个合理电磁频率下限值及高损耗介电常数的测量技术等问题,本文的研究有待进一步深化。

参考文献:

[ 1 ] 马孝义,马建仓. 土壤水分广义电磁测量的潜力分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2002(1):25- 35.

[ 2 ] Anderson, ABC. A method of determining soil moisture content based on the variation of electrical capacitance of soil at low frequency with moisture content[J]. Soil Sci. , 1943, 56:29- 41 .

[ 3 ] Topp, GC, Davis, JL, Annan, AP. Electromagnetic determination of soil water content measurements in coaxial transmission lines[J]. Water Resou. Res., 1980, 16( 3 ):245- 256.

[ 4 ] Brunfeldt, DR. Theory and design of a field portable dielectric measurement system[A]. Symp. of IEEE Int. Geosci. Remote Sensing Dig. , 1987, 1: 559- 563.

[ 5 ] Smith- rose RL. The electrical properties of soil for alternating currents at radio frequencies[J], Proc. Roy. Soc. London, 1933, 140:359- 377.

[ 6 ] Scott,JR, Carroll, RD, Cunningham,DR. Dielectric constant and electrical conductivity of moist rock from laboratory measurements[J]. J. of Geophysics Res., 1967;72: 5101- 5110.

[ 7 ] Lundian,EG. Terrain analysis by electromagnetic means[J]. J. of Geophysics Res. , 1971;76: 2 810- 2 820.

[ 8 ] Hockstra, P, Delaney, A. Dielectric properties of soils at UHF and microwave frequencies[J]. J. of Geophysics Res. , 1974; 79 : 1 699- 1 708.

[ 9 ] Selig, ET, Mansukani, S. Relationship of soil moisture to dielectric property[J]. J. Geotech. Eng. Div. , 1975, 101, GT8; 755- 769.

[ 10 ] Davis JL, Annan, AP, Electromagnetic determination of soil water constant: progress report - I[ J]. Can. J. Remote Sens., 1976; 3: 76- 78.

[ 11 ] Hallikainen MT, Dobson, MC, Ulaby, FT. Microwave dielectric behavior of wet soil- part[J]. IEEE Trans, 1985: GE- 23 (1): 25- 34.

[ 12 ] Kraft, C. Constitutive parameter measurements of fluid and soil between 500 KHz and 5 MHz using transmission line technique[J]. J. of Geophysics Res. , 1987; 92: 10 650- 10 656.

[ 13 ] 陈定一, 等. 湿土微波介电性质的实验研究[ J ]. 上海交通大学学报, 1988, 22( 4 ):83- 92.

[ 14 ] Campbell , JE . Dielectric properties and influence of conductivity in soil at 1- 50 MHz[J]. Soil Sci. Soc. Am . J. , 1990; 54:333- 341.

[ 15 ] Sen PN . Relation of certain geometrical features to the dielectric properties of rocks[J]. Geophysics, 1982; 46( 12 ): 1714- 1720.

[ 16 ] Pething, R. Dielectric properties of biological materials: biophysical and medical application[J]. IEEE Trans, 1984, IE- 19(5): 453- 469.

[ 17 ] D E Loo. Dielectric properties of wet materials[J]. IEEE Trans, 1983, GE- 21(3): 364- 369.

[ 18 ] 方俊鑫, 殿之文. 电介质物理学[ M ]. 北京: 科学出版社, 1989.

[ 19 ] Hasted, JB. Aqueous dielectrics[ M ]. London: Chapman and Hall Publisher, 1974.

[ 20 ] 熊毅, 等. 中国土壤[ M ]. 北京: 科学出版社, 1987.

[ 21 ] 马孝义. 土壤水分电磁测量的理论与方法的研究[D]. [ 博士论文 ], 杨陵: 西北农业大学, 1993.

( 上接第 60 页 )

经天达- 2116 处理,能增加产量三因子,其增产效果以处理 D 最大,比 CK 增加 19.7%,初步看来,以处理 D 效果最好。

参考文献:

[ 1 ] 陈明灿,孔祥生, 等. 钾对旱地小麦生育及籽粒灌浆的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2000, 18 ( 1 ):33- 37.

[ 2 ] 张保军, 等. 渭北旱塬不同类型小麦产量结构初探[J]. 西北林学院学报, 1998( 2 ).

[ 3 ] 王广兴, 等. 节水灌溉与农业综合技术[J]. 中国水利, 2000, ( 11 ).

[ 4 ] 李明兵, 杨兆生. 小麦品种性状演变规律的分析[J]. 麦类作物, 1999, 19(6): 30- 34.