

# 土壤水分光学测量方法的田间应用潜力分析

马孝义 熊运章 孙明勤

(西北农业大学·陕西杨陵·712100)

**摘 要** 光学测量法是土壤水分测量中一类重要方法,但是对其在田间土壤理化特性变异情况下的适应性还缺乏分析。该文以我国几种有代表性理化特性变异资料为依据,分析土壤颗粒的介电特性、折射率的变异,进而研究光学测量时土壤容重、化学成份、质地及其温度变化对测量的影响。研究得出:利用光学方法来测量土壤水分将强烈地受土壤理化特性变异的影响,田间应用的潜力不甚乐观。

**关键词** 土壤水分 光学 测量误差 潜力 介电特性 折射率

## An Analysis on Potential of Optical Soil Moisture Measurement Method Applied in Field

Ma Xiaoyi Xiong Yunzhang Sun Mingqin

(Northwestern Agricultural University, Yangling, Shaanxi, 712100)

**Abstract** Optical method is a important method for soil moisture measurement. Until now, the adaptability of the method to field soil is lack. In this paper, based on the variation data of field soil physical and chemical characteristics, by analysing the variation of dielectric constant, refractive index, the influency of the soil bulk density and chemical composition, texture and temperature for optical measurement method are struied. It was concluded that while soil bulk density and texture have a rather effect upon optical mesaurement method, it is difficult to use the optical mesaurement method to determine soil moisture in the fields.

**Key words** soil moisture optical measurement error potential dielectric refractive index

### 1 问题的提出

土壤水分测量方法一直是水利、农业等领域的一个重要问题,已有半个世纪的研究,先后提出了烘干、电测、核技术等几十种方法,但是到目前为止仍没有满意的解决。光学测量方法是土壤水分的一类重要方法。Bower 等(1965年)就发现多孔介质光的反射与其含水量相关<sup>[8]</sup>。Hoa 等(1977年)以石英砂的光传输随其水分增加而增加为依据,研究多孔介质样品的水分分布<sup>[10]</sup>。Brown(1980年)描述光纤镜在田间情况下监测植物生长。Alessi 等(1986年)探讨利用镶嵌在土壤中的玻璃棒的光的衰减来测量土壤水分<sup>[7]</sup>。Cary(1989年)则研究由发光二极管、光敏电阻和土壤构成的水分材料装置,来测定土壤水分<sup>[9]</sup>。Scholefield 利用偏振光方法来测定土壤表面水分<sup>[12]</sup>。

但到目前为止的研究,均没有从理论上分析这种方法在田间土壤理化特性变异情况下的适应性,由于土壤复杂性和田间土壤变异性的存在,研究存在着相当大的局限性,本文试图探讨这一问题,以研究这种方法的田间应用潜力。

## 2 理论基础

任何一种非吸收的光学土壤水分测量方法,其具体技术原理可能各不相同,但是无论建立在反射基础上,还是透射、偏振等基础上的方法,其依据的物理机制是共同的,都是通过土壤水分含量变化所引起对土壤的折射率的变化来测量的。这可用菲涅耳定律<sup>[1][5]</sup>来说明。

若入射波各分量为  $A_L$  和  $A_{11}$ ,  $A_L$  和  $A_{11}$  分别为入射的垂直和平行分量,从而得到反射波和透射波各分量为:

$$T_{11} = \frac{2 \sqrt{\epsilon_1} \cdot \cos \theta_i}{\sqrt{\epsilon_2} \cos \theta_i + \sqrt{\epsilon_1} \cos \theta_i} A_{11}$$

$$T_L = \frac{2 \sqrt{\epsilon_1} \cdot \cos \theta_i}{\sqrt{\epsilon_1} \cos \theta_i + \sqrt{\epsilon_2} \cos \theta_i} A_L \quad (1)$$

$$R_{11} = \frac{\sqrt{\epsilon_1} \cos \theta_i - \sqrt{\epsilon_2} \cos \theta_i}{\sqrt{\epsilon_2} \cos \theta_i + \sqrt{\epsilon_1} \cos \theta_i} A_{11}$$

$$R_L = \frac{\sqrt{\epsilon_1} \cos \theta_i - \sqrt{\epsilon_2} \cos \theta_i}{\sqrt{\epsilon_1} \cos \theta_i + \sqrt{\epsilon_2} \cos \theta_i} A_L \quad (2)$$

在垂直入射情况下,得出反射能量与入射能量之比,即反射率为:

$$R = \left[ \frac{\sqrt{\epsilon} - 1}{\sqrt{\epsilon} + 1} \right]^2 \quad (3)$$

在垂直入射时,得出的透射能量与入射能量之比,即透射率为:

$$T = 1 - \frac{(\sqrt{\epsilon} - 1)^2}{(\sqrt{\epsilon} + 1)^2} = \frac{4 \sqrt{\epsilon}}{(\sqrt{\epsilon} + 1)^2} \quad (4)$$

对光学段通常用折射率来表达,折射率与介电特性的关系为:

$$n = \sqrt{\epsilon} \quad (5)$$

在分析光学方法的潜力时,假设其它测量误差均可通过技术手段消除,仅考虑由于土壤理化特性变异对折射率的影响,进而分析其在测量时的误差,便可对此方法的潜力给出正确评价。

## 3 土壤和土壤颗粒的介电特性、折射率公式的确定

### 3.1 土壤介电特性、折射率公式的确定

土壤是土壤颗粒、水、空气三相组成的混合物,其介电特性受多个因素的影响,但是同其他混合物类似,其内各成份的介电特性和相对含量为其主要因素,对此一般用反映上述两方面影响的混合模型公式来表达。

由于混合物介电特性的复杂性,反映混合物介电特性的混合模型公式很多,笔者在文献<sup>[6]</sup>中对其概括成以下几类公式,即建立在平均场理论、自治理论、随机理论、约束理论公式、“折射率”

公式、“对数”公式、经验公式几大类。并将物理机理分析、理论解析、试验技术分析和资料拟合等方法有机结合,分析得出:在射频和光学段,介电特性的实部  $\epsilon'$  起主导作用,土壤介电特性服从“折射率”公式;在其他波段土壤电导或介电损耗一般较大,其服从“对数”公式;其他经验公式,不具有普遍适用性。也即对土壤光学测量波段内土壤介电特性可近似用式(6)表达

$$\sqrt{\epsilon} = \theta \sqrt{\epsilon_w} + \frac{\rho}{G} \times \sqrt{\epsilon_s} + \left(1 - \frac{\rho}{G} - \theta\right) \sqrt{\epsilon_a} \quad (6)$$

用折射率表示:

$$n = \theta n_w + \frac{\rho}{G} n_s + (1 - \frac{\rho}{G} - \theta) n_a \quad (7)$$

式中:  $\epsilon, \epsilon_w, \epsilon_s, \epsilon_a$  分别为土壤、水、土壤颗粒、空气的介电特性;  $n, n_w, n_s, n_a$  为对应的折射率;其中  $n_s$  随土壤化学组成而变,  $n_w = 1.33, n_a = 1$ ;  $\rho, G, \theta$  分别为土壤的干容重、比重、含水量。

### 3.2 土壤颗粒的介电特性公式

土壤是多种物质的混合物,其介电特性受多方面因素的影响,目前由于测量方法限制,不同资料给出的介电特性数据差异较大,即使对同一土壤,不同的测量方法给出的结果有较大的差异。正是由于现有测量方法的限制而造成的资料离散,试图利用经验模型来建立介电特性公式,将有相当大的不确定性。而按介电特性的理论,其介电特性主要取决于其化学成分。现有的地物介电特性资料也证明了这一点<sup>[5]</sup>。笔者以分子光学和电介质物理学理论为基础,提出了一个以下土壤颗粒介电特性与化学组成的关系的半理论模型<sup>[5]</sup>。

$$\left(\frac{\epsilon}{\rho}\right)^\alpha = \theta_1 \left(\frac{\epsilon_1}{\rho_1}\right)^\alpha + \theta_2 \left(\frac{\epsilon_2}{\rho_2}\right)^\alpha + \theta_3 \left(\frac{\epsilon_3}{\rho_3}\right)^\alpha \quad (8)$$

式中:  $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$  分别为  $\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3$  的介电常数;  $\rho_1, \rho_2, \rho_3$  为对应的密度;  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  为对应的重量百分含量;  $\alpha$  为反映其结构组成的参数,一般在  $1/3 \sim 1/2$  之间。

在  $\alpha$  近视取其中间值,  $\alpha = 0.4$ 。将式8中的各个参数代入,经验证,其相对误差在  $2.9\% \sim 14\%$  之间,平均相对误差为  $8.3\%$ ,表明公式能较好地反映土壤颗粒介电特性与化学组成的关系,以下以此式分析土壤介电特性、折射率。

## 4 土壤颗粒介电特性、折射率的层间与空间变异

### 4.1 土壤颗粒介电特性、折射率的层间变异

对典型几种土壤<sup>[2]</sup>,按式(8)计算土壤介电特性、折射率,并分析其层间变异,见表1。

由表1可看出:由于土壤理化特性的层间变异,同一土壤不同层次的介电特性和折射率存在着一定的变异。

### 4.2 土壤颗粒介电特性、折射率的空间变异

4.2.1 土壤化学成份对  $n_s$  的影响 土壤化学成分的分析,一般采用平均取样的方法,缺乏小范围田块土壤化学成分空间变异资料,但现有的研究表明,同一土壤化学成分与其颗粒组成相联系,土壤颗粒由粗变细时,  $\text{SiO}_2$  含量有明显减小的趋势,而  $\text{Fe}_2\text{O}_3, \text{Al}_2\text{O}_3$  则有相反趋势<sup>[2]</sup>,见表2。对表2各种成份含量归一化后,按式(8)计算几种典型土壤的介电特性 ( $\epsilon_s$ ) 和折射率 ( $n_s$ ),进而分析粘粒和砂粒含量变化  $1\%$  时,  $n_s$  的变化值  $\frac{\partial n_s}{\partial C_{粘}}、\frac{\partial n_s}{\partial C_{砂}}$ ,见表2。可以看出:粘粒的  $n_s$  明显高于全土,而砂粒则相反。

表1 几种典型土壤的介电特性、折射率的层间变异

代表地区	代表性土壤	深度 (cm)	化学组成(%)			$\epsilon_s$	$n_s$
			SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		
华南	广西表潜土	0~10	61.34	10.52	1.88	4.46	2.11
		20~30	67.69	11.73	3.75	4.62	2.15
		32~42	66.69	13.22	5.52	4.88	2.21
		46~56	68.53	13.83	8.45	5.17	2.27
华北	河北栾城	0~15	46.11	24.33	9.93	5.98	2.45
		15~38	48.33	25.49	9.98	5.93	2.44
		38~57	43.30	21.69	10.01	6.05	2.46
		57~85	45.32	21.32	9.03	5.86	2.42
		85~100	54.43	23.73	10.37	5.79	2.41
西北	陕西武功红油土	0~20	70.14	16.22	5.91	4.94	2.22
		20~35	71.31	15.54	6.10	4.93	2.22
		35~60	71.59	10.59	5.70	4.78	2.19
		60~100	69.29	17.44	6.82	5.05	2.25
		137以下	70.75	15.59	6.09	4.94	2.22
东北	黑龙江逊克黑土	0~12	67.0	5.9	19.2	6.19	2.49
		12~35	68.6	6.7	18.8	6.11	2.47
		35~60	69.1	7.2	17.5	5.98	2.45
		60~90	65.9	8.2	20.3	6.35	2.52
		90~120	66.7	7.3	19.5	6.24	2.50
		120~150	67.2	7.5	18.7	6.15	2.48

表2 土壤介电特性、折射率的空间变异

文献来源	项目	化学组成(%)			$\epsilon_s$	$n_s$	$\frac{\partial n_s}{\partial \phi}$	$\frac{\partial n_s}{\partial C_{M}}$
		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>				
壤 <sup>[11]</sup>	全土	68.82	7.777	11.38	5.37	2.32	-0.0017	0.0046
	砂粒	86.3	5.19	6.77	4.64	2.15		
	粘粒	37.65	15.3	21.97	7.77	2.78		
黄土 <sup>[4]</sup>	全土	63.23	8.94	16.27	6.03	2.46	-0.0027	0.0031
	砂粒	76.0	6.67	7.25	4.82	2.19		
	粘粒	89.65	16.45	22.5	7.69	2.77		
黄土 <sup>[4]</sup>	全土	67.27	17.52	5.88	4.99	2.23	-0.0022	0.0027
	砂粒	94.55	1.08	1.75	4.04	2.01		
	粘粒	43.15	31.75	11.13	6.26	2.50		
白 <sup>[2]</sup>	全土	58.54	12.45	4.26	4.83	2.20	0.0034	
	粘粒	38.25	20.15	7.93	5.93	2.44		
均值							-0.0022	0.0035

4.2.2 典型土壤砂粒与粘粒含量的变异性 对典型土壤的田块空间变异,采用文献<sup>[2]</sup>资料整理成表3。

田间土壤的颗粒、成份含量之间存在着一定的相关关系。一般而言,砂粒和粘粒存在着负相关关系,利用文献<sup>[3]</sup>资料分析华北土壤的各种颗粒间的相关性,见表4。

因此土壤的砂粒含量和粘粒含量存在着高度显著的相关关系,其它颗粒含量之间可近似

认为是相互独立的。

4.2.3 土壤颗粒折射率的空间变异 土壤的  $n_s$  随粘粒含量  $C_{粘}$  增加而增加,随砂粒含量  $C_{砂}$  增加而减少,可近似用下式表达:

$$n_s = \frac{\partial n_s}{\partial C_{砂}} C_{砂} + \frac{\partial n_s}{\partial C_{粘}} C_{粘} \quad (9)$$

按随机向量具有相关性的方差计算公式<sup>[6]</sup>:

$$\sigma_{n_s} = \left( \frac{\partial n_s}{\partial C_{砂}} \right)^2 \cdot \sigma_{C_{砂}}^2 + \left( \frac{\partial n_s}{\partial C_{粘}} \right)^2 \sigma_{C_{粘}}^2 + 2 \cdot \frac{\partial n_s}{\partial C_{砂}} \frac{\partial n_s}{\partial C_{粘}} \cdot \sigma_{C_{砂}} \sigma_{C_{粘}} R^2$$

式中的各项参数分别取表2,3,4,由此计算有:  $\sigma_{n_s} = 0.025$

表3 典型田块土壤特性的空间变异<sup>[3]</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>3</sup> )	1.435	0.087

表中粘粒含量可以按类似于式(3)推算。

表4 土壤颗粒组成之间的相关关系(R)

	砂粒	粉粒	粘粒
砂粒	—		
粉粒	-0.451 *	—	
粘粒	-0.881 * *	-0.692	—

(表中,\*不显著,\*\*高度显著,负号表示负相关)

## 5 建立在光学基础上的土壤水分测量方法潜力分析

### 5.1 层间土壤理化特性变异对测量的影响

为分析层间土壤理化特性变异对测量的影响,将式(7)变换有

$$\theta = \frac{n - \frac{\rho}{G}(n_s - 1) + 1}{n_w - 1} \quad (11)$$

由式(11)变换有:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \rho} = \frac{n_s - 1}{n_w - 1} \cdot \frac{1}{G} \quad (12)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial n_s} = \frac{1}{n_w - 1} \cdot \frac{\rho}{G} \quad (13)$$

在  $G = 2.65\text{g/cm}^3$ ,  $\rho = 1.4\text{g/cm}^3$  时,可有:

$$\frac{\partial \theta}{\partial n_s} = 1.6 \quad (14)$$

计算土壤折射率的层间变异和容重变化0.05g/cm<sup>3</sup>含水量测量误差:

$$\Delta \theta(n_s) = \frac{\partial \theta}{\partial n_s} \times \Delta n_s \quad (15)$$

$$\Delta \theta_\rho = \frac{\partial \theta}{\partial \rho} \times 0.05 \quad (16)$$

按式(15)、(16)计算几种典型土壤容重和化学组成变化对测量的影响由表5可见,建立在光学基础上的测量方法,强烈地受土壤容重和层间土壤化学组成变异的影响,会产生相当大的测量误差。

### 5.2 空间变异对测量的影响

一般而言,土壤干容重和化学组成不存在相关关系,因此按随机向量相互独立来计算典型土壤容重和理化特性的空间变异产生的误差<sup>[6]</sup>

(下转第64页)

生、丰产的效果。“七五”国家攻关项目——黄土高原抗旱造林技术研究专题,在降雨量不足500mm/a的山西省方山县,海拔1200m左右的阳向坡面营造的刺槐林和侧柏林,正是由于采取了以上三大技术措施,即把整地深度提高到60cm,整地宽度提高到1m,行距加大到6~9m(造林密度550~830株/hm<sup>2</sup>),苗木全部采用一级苗。5年生刺槐平均胸径7.1cm,平均树高6.7m,约相当于刺槐在华北平原地区的生长量。侧柏的生长高度也达到2.5m以上。这不能不说是黄土高原地区人工造林速生丰产的典型事例。中日合作造林项目(山西省吉县蔡家川)也正是狠抓了这三大措施,所以幼林也是表现出异乎寻常的良好长势,引起了许多人的注目。

上述黄土高原地区人工造林的三大技术措施,可以看作是这一地区人工造林速生丰产的关键技术措施,三者相辅相成,缺一不可。无疑,在黄土高原乃至我国北方年降水量大于450mm的地区,只要紧紧抓住这三大技术措施,就能取得造林的成功,就能取得较大的生态和经济效益。上述三大技术措施并不复杂,人人都能掌握。然而,它却是我国林业科学工作者几代人的心血和这一地区数十年来林业生产实践的结晶。因此,重要的是要认真总结建国以来40多年的造林实践,不少地方正是由于忽视了这三大技术措施,因而导致了造林工作上事倍功半的结果。

当然,人工造林以及人工林培育中,影响林木生长的因素很多,例如抚育、施肥、间伐等都是极为重要的营林措施,但就人工造林而言,这三大技术措施则是最基本的重要措施。

(上接第53页)

$$\sigma_{\theta}^2 = \left( \frac{\partial \theta}{\partial \rho} \right)^2 \sigma_{\rho}^2 + \left( \frac{\partial \theta}{\partial n_s} \right)^2 \sigma_{n_s}^2 \quad (17)$$

式中:分别  $\frac{\partial \theta}{\partial \rho}$  取自表5的华北土壤;  $\frac{\partial \theta}{\partial n_s}$  取自式(14);  $\sigma_{\rho}$ 、 $\sigma_{n_s}$  取自表2,代入计算有

$$\sigma_{\theta} = 14.8 (\% \text{cm}^3 / \text{cm}^3)$$

由此可以看出,由于土壤理化特性的空间变异,利用光学测量方法将产生相当大误差。

表5 典型土壤理化特性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
$n_s$ 最小	2.11	2.41	2.19	2.45
$n_s$ 最大	2.27	2.46	2.25	2.52
$n_s$ 几何中位值	2.19	2.43	2.22	2.48
$\frac{\partial \theta}{\partial \rho} \%$	1.36	1.64	1.40	1.69
$\Delta \theta_{\rho} \%$	6.80	8.6	7.1	8.5
$\Delta \theta [\Delta n_s] \%$	±12.8	±4.8	±4.8	±6.4

表中:  $\frac{\partial \theta}{\partial \rho}$  为容重变化0.01g/cm<sup>3</sup>产生测量误差,单位%cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>,下同;  $\Delta \theta_{\rho}$  为容重变化0.05g/cm<sup>3</sup>产生测量误差;  $\Delta \theta [\Delta n_s]$  为层间土壤化学组成变化产生测量误差。

## 6 结 语

综合上文的分析可以得出:由于土壤理化特性层间和空间变异,利用光学方法进行土壤水分测定时,存在着相当大的误差。除此而外,在实际中影响测量结果准确性的因素很多,问题更为复杂。建立在光学基础上的测量方法的田间应用潜力有限,研究前景不甚乐观。