

中子法测定土壤含水量的几个问题

周 凌 云

(中国科学院南京土壤研究所)

摘 要

对应用中子法测量土壤水分含量的有关问题进行了讨论,认为可靠的标定曲线、合理监测点位置和适当增加测点数量对降低测量误差是十分必要的。

中子测水技术已广泛应用于监测田间土壤含水量。此法具有迅速、准确和能定时定点连续监测的优点。此法是建立在快中子被土壤水中氢核慢化的慢中子数与土壤容积含水量相关的基础上的。鉴于快中子发射是随机的,而土壤质地、干容重和有机质含量等性质又将影响慢化中子的计数,要准确地测定土壤含水量,就必须将影响慢中子计数因素的变化线性化。本文就中子法测定土壤含水量的标定曲线(包括室内的及田间的)及其影响因子和测定误差等问题进行讨论。

一、标定曲线问题

(一)室内标定

主要讨论如何确定标定土桶的大小、不同含水量土样的制备以及探头与探管之间不同间隙对标定曲线的影响。

1. 标定土桶大小的确定

土桶的大小与标定土壤的含水量范围有关。Van Bavel^[1]曾提出“有效球体”(Sphere of influence)概念,即能获得95%中子通量密度的球体。Olgaard^[2]在此基础上,又提出“重要球体”(Sphere of importance)概念,认为若将球体外的介质和水分除去,在此范围内得到的中子通量密度,相当于无穷大介质中所获得的中子通量密度的95%。Olgaard^[2](1965)根据对5种不同组成和干容重的土壤进行的标定试验,提出的“重要球体”半径与土壤容积含水量的关系式为:

$$R = 100 / (1.4 + 10 \cdot \theta) \quad (\text{cm}) \quad (1)$$

式中:R为“重要球体”半径; θ 为土壤容积含水量;1.4为常数。

Olgaard^[2](1965)的研究表明,当 $\theta = 0\text{g}/\text{cm}^3$ 时,设土桶尺寸 $R = 70\text{cm}$,而 $\theta = 0.35\text{g}/\text{cm}^3$ 时,设 $R = 22\text{cm}$ 。而用公式(1)估计的值与之仅误差 $\pm 2\text{cm}$ 。

根据以上所述,我们只要将需标定的土壤容积含水量范围的下限值(θ),代入(1)式,即可求出土桶合适的半径尺寸(R值)。

2. 不同含水量土样的制备及标定曲线

采自田间的土样,经晾晒、粉碎等处理后过5mm筛备用。标定时应根据要求先制备不同含水量的土样。

$$(1) \text{ 每次装土的容积}(V): V = \pi(R^2 - r^2)h \quad (2)$$

式中: R为土桶半径(内); r为探管的半径(外); h为每次装土高度。

$$(2) \text{ 每次加风干土重}(W_s): W_s = V\rho(1 + W_s) \quad (3)$$

式中 ρ 为干土容重; W_s 为风干土含水率(重量)。

(3) 配制成容积含水量(θ)所需加的水重(W):

$$W = V(\theta - \rho W_s) \quad (4)$$

必须指出的是,在制备不同含水量土样时,要充分将土壤拌匀,以保证获得含水量一致的土样。另外,为使土桶中土壤容重均一(尽可能与田间土壤情况相同),装桶时以每10cm为一层,分层装入。为防止土桶表面蒸发,土装完后,用塑料布覆盖桶口,静置2天,待土壤中水分达到平衡后,再进行标定。

标定过程主要是测土壤的容积含水量(θ)和对应的中子计数比N(在土壤中的中子计数率(n)与在水体中的(n_0)比)。若 θ 和N呈线性关系,则应符合以下的线性标定方程:

$$\theta = a + bN \quad (5)$$

式中: b为标定曲线的斜率; a为截距。但实际土壤含水量(θ)和计数比(N)的关系不是函数关系,而是线性相关。所以,一般需测10至20个点据,利用最小二乘法进行线性回归,计算a和b两个回归系数公式为^[3]:

$$b = (\sum N_i \theta_i - n \bar{N} \bar{\theta}) / (\sum N_i^2 - n \bar{N}^2) \quad (6)$$

$$a = \bar{\theta} - b \bar{N} \quad (7)$$

式中n为测点总数, θ_i 和 N_i 分别为实测第i个样品的含水量和计数比, $\bar{\theta}$ 和 \bar{N} 分别为实测含水量平均值和计数比平均值。这种标定方法需测定较多的点据,故称多点法。另外,中子计数比(N)与 θ 的关系是非常密切,特别是在土壤含水量控制得比较准确的室内,可以用两点法标定,即测出两对 θ 与N。按下式计算a和b值。

$$b = (\theta_1 - \theta_2) / (N_1 - N_2) \quad (8)$$

$$a = \theta_2 - bN_2 \quad (9)$$

式中: θ_1 和 θ_2 分别为实测的高、低容积含水量; N_1 和 N_2 分别为与 θ_1 , θ_2 对应的实测计数比。用两点法标定的曲线进行土壤水分测量,其含水量差值最大为1.2%^[4],属于允许误差之内。为了节省时间和工作量,室内标定采用两点法是允许的。

3. 探头与探管之间的间隙对标定曲线的影响

在进行标定时,我们发现中子探头与探管之间间隙的不同,也就是说探管内径不同时,对土壤含水量测定会带来一定的误差。我们的试验结果表明(表1),当中子探头与探管内径之间间隙为3.5mm时, θ 与N的相关系数 $r = 0.997$ ($n = 12$), θ 的估计标准差 $S = \pm 0.009 \text{ cm}^3 / \text{cm}^3$ 。而当间隙为0.5mm时, $r \geq 0.999$, θ 的估计标准差 $S \leq \pm 0.003 \text{ cm}^3 / \text{cm}^3$ 。可见,当中子探头与探管之间的间隙越小时,标定曲线的相关性越好,3.5mm间隙较0.5mm间隙的标准差大3.4倍。

(二) 田间标定

1. 探管的安装和采样

首先选择有代表性的观测点;其次,用安装探管的钻孔器(其钻头外径略小于探管

表1 探头探管之间不同间隙的标定曲线统计结果

深度 (cm)	标定曲线方程	间隙 (mm)	相关系数 (r)	标准差 ($S, \text{cm}^3 / \text{cm}^3$)
50	$\theta = 2.54 \times 10^{-3}n - 1.38$	3.5	0.997	0.009
50	$\theta = 2.39 \times 10^{-3}n - 1.06$	0.5	0.999	0.003
45	$\theta = 2.34 \times 10^{-3}n - 1.50$	0.5	0.999	0.003
60	$\theta = 2.30 \times 10^{-3}n - 1.55$	0.5	0.999	0.002

n为中子在土壤中计数率,样本数均为12个。

外径)安装探管, 钻孔器一定要保证钻孔垂直; 第三, 从探管的钻孔器里取土, 以测定不同深度土壤的容积含水量。

在安装和采样时必须: (1) 装管时一定要使管壁与周围土壤接触良好, 防止有间隙造成测定误差; (2) 在探管周围采土标定时, 不能距管太远, 以免由于距离远受土壤水分空间变异的影响而产生误差。一般被探测的土壤是一个球体, 土壤较湿时, 球体半径为 15cm, 较干时为 50cm^[5]。故采土标定时, 不要扰动探管周围的土壤。以距管 50cm 以远采样较好。

2. 土壤物理性质对田间标定的影响

(1) 土壤容重: 在田间, 各土壤的标定曲线有明显区别。若一种土壤的重量含水量不变, 其干容重增加, 则说明单位体积内的水重和干土重都增加了。水中氢原子对快中子的慢化作用要比土壤颗粒的其他原子强几百倍, 因而中子仪对水分的增减非常敏感, 而对于容重的影响则不显著。Holmes 和 Jenkinson^[6] 研究发现, 土壤容重增大, 对测量结果的影响较小。容重从 1.4 变为 1.6g/cm³ 时, 标定曲线的斜率改变为 2.4%。但也有人认为, 标定曲线对容重变化不灵敏, 只要求含水量的变化值时, 受容重影响则在中子仪的测量误差范围之内。所以对同一质地的土壤, 不必按不同干容重分别标定。只要按容积含水量标定出一条曲线, 便适用于不同干容重情况。谢森传等^[4](1987) 室内测定也证实了这一结论。

(2) 土壤质地: 研究表明, 土壤质地不同造成标定曲线的平移, 产生恒定误差^[7]。但在 50 年代时, 人们还没有发现不同土壤之间有系统差异的问题, 这可能是由于质地的影响与土壤中对中子吸收强的物质的影响相互抵消之故^[7]。Mortier 等^[8] 发现了粘土、壤土和砂土 3 条独立的曲线。Holmes^[9] 发现, 粘土标定曲线斜率比壤土的平 40%。陈志雄和 Vauclin^[10] 在河南省封丘县的试验也表明, 质地对标定曲线的影响极大。除表层土壤必须有专门的标定之外, 他们还根据田间土壤剖面的质地与容重状况, 确定了两条不同的标定曲线, 表明深层土壤比较均一, 其截距方差($S^2(a)$)与斜率方差($S^2(b)$)都比较小。而表层最不均一, 加之中子容易在空气中散逸, 其截距方差与斜率方差都较大。

总之, 在田间, 不同质地的土壤, 特别是质地相差悬殊的土壤, 必须要有专门的标定曲线。以适用于田间状态的土壤, 减少测定误差的产生。

3. 不同研究内容对标定曲线的要求

在田间, 不同质地土壤的标定曲线是不同的。但如果要求知道土壤含水量的变化及实际土壤湿度的近似值, 可用少数几种代表性的土壤对仪器进行标定。例如, 对砂质土壤来说, 只要测得 3 种显著不同质地(粘质、壤质和砂质)土壤的 3 条标定曲线, 就可以包括在田间测定的所有土壤。

上述 3 条曲线, 只能作为研究土壤剖面含水量的变化用, 因为它是个积分变量。若需准确地测出土壤含水量实际值, 则要对土壤全剖面按质地分层进行田间标定。但中子法测定的是一定范围内土壤的容积含水量, 测定近土表时, 受土壤—空气界面的影响极大。袁小良^[11] 认为, 在黄土区的土壤湿度变化范围内, 中子水分仪垂直方向向上半径 $R \leq 15\text{cm}$ 时, 将有部分慢中子逸出土表使计数降低。若以每 10cm 土层为一测层, 则需用探管在 10cm 处测 1 条表层的标定曲线。而 20cm 处则不受土表影响 ($10 \leq R \leq 15\text{cm}$)。

此外, 中子仪测定地表 30cm 内或土壤水分有明显峰面者, 则误差较大^[4]。因而此法不适用于研究剖面中小范围内水分发生显著变化的层次, 即不适用于研究湿峰或干峰^[5]。但是, 若被探测的土壤体积较大, 则有利于农田水量平衡、估算径流、蒸散、含水量的变化、测定土壤蓄水变量和植物用水量、以及土壤水力特征和水分运动等方面的研究。

二、误差问题

以中子法监测田间土壤的水分状态,是根据若干个定位监测点测定数据的平均值表征的,因而有平均值误差。前人的研究^[12-14]表明,误差来源可分为位置的,标定的和仪器的3个因素。Haverkamp等^[12]的研究表明,在同一位置上,用无偏统计方法处理标定数据,可使标定方差减少。但标定因素是每个含水量估值的总方差主要来源。对于同一位置来说,主要是随土壤剖面层次而异。通常,表层最不均匀,加之中子慢化受土壤—空气界面影响,中子容易在空中散逸。其截距与斜率方差都大^[10]。Vauclin等^[13]的研究表明,用中子法数据估算一块田地的平均含水量时,对各个测点用同一的标定曲线,其线性关系都经过无偏和有偏方法处理。在测点均一或测点数多的情况下,标定因素对总方差的作用最大。而当田间湿度极不均一时,位置方差对平均值的总方差起主要作用。因此,位置方差主要是因测点之间的湿度变异而产生的,它反映了田间土壤湿度的空间变异性和不均一性。

陈志雄在河南省封丘县对5个监测点(麦田)测量结果^[14]表明,在大多数情况下,误差主要来自位置因素,而仪器方差最小,且比较稳定,它们对总方差的比重很小($< 4\%$)。说明土壤湿度空间变异是误差的主要来源。

由于田间水分存在空间变异,选择试验田时应尽可能使空间变异较小。在选择监测位置时,可根据田间湿度空间结构,采用地统计学原理找出其相关域。并依此来确定监测点的合理位置,使位置方差尽可能缩小。另外,要按土壤剖面的层次进行田间标定,确保曲线有代表性和准确性,提高测量精度。

参 考 文 献

- [1] Van Bavel, C. H.M., Trans. 6th Intern. Conger. Soil Sci. B. 355-360, 1956.
- [2] Olgaard, P. L., Danish Atomic Energy Commission Res. Est. Riso Rept. 97. 1965.
- [3] 赵仁容, 余松烈, 田间试验方法, 316-326页, 农业出版社, 1981.
- [4] 谢森传、段新杰, 503 DR 中子水分仪的标定. 核农学通报, 6期, 14-19, 1987.
- [5] Skinnerl, R. J., Soil physical condition and crop production, Thecnical Bullelin 20, London 1975.
- [6] Holmes, J. W. and Jenkinson, A. F., J. Agric. Eng. Res. 4, 100-109, 1959.
- [7] Visvalingam, M. et al., J. Soil Sci., 23, 499-511, 1972.
- [8] Mortier, P., De Boodt, M., Dansercoer, W. and De leenheer, L., Trans. 7th Int .Congr. Soil Sci., 1, 321-329, 1960.
- [9] Holmes, J. W., Soil Sci., 102, 355-360, 1966.
- [10] 陈志雄, Vauclin Michel. 黄淮海平原区域治理技术体系研究, 封丘地区浅水位麦田雨养条件下的水分平衡研究, 142-150页, 科学出版社, 1907.
- [11] 袁小良, 中子水分仪测量范围的几个试验, 土壤学报22(3): 302-304页, 1985.
- [12] Haverkamp, R., M. Vauclin and G. Vachaud, Soil Sci., 137, 78-90, 1984.
- [13] Vauclin, M., R. Haverkamp and G. Vachaud, Soil Sci., 137, 141-148, 1984.
- [14] 陈志雄, Vauclin Michel. 封丘地区土壤水分平衡研究, II. 中子探管法测定土壤含水量的误差分析, 土壤学报, 第3期, 第309页, 1990.