

中子水分仪在流动沙丘上的标定研究

郭守平, 杨秀春, 徐斌

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要: 运用分段标定及分层标定的方法, 并结合点聚图筛选及容积含水量的三点平滑处理, 线性标定及非线性标定相结合, 在流动沙丘上进行了中子水分仪的田间标定研究。结果表明, 多种方法结合进行标定大大提高了标定方程的精度, 且降低了标定误差, 相对误差降低到 5.0% 以下, 结果令人满意; 同时证实了中子水分仪在流动沙丘风沙土测定土壤水分的可行性及可靠性。

关键词: 中子水分仪; 田间标定; 流动沙丘; 土壤水分

中图分类号: S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2006)04-0072-04

中子散射法(The neutron scattering method)测量土壤体积含水量在 20 世纪 50 年代已有介绍^[1]。此后, 中子水分仪被广泛应用于长期定点监测土壤水分, 长期以来土壤水分一直是植被恢复和沙化治理的研究热点问题, 应用中子水分仪在沙地及流动沙丘上进行土壤水分研究较多, 冯起等应用中子水分仪研究了干旱地区和半湿润地区半固定沙丘、裸沙及其固定沙丘的沙地水分的动态变化规律及其影响因子^[2~3], 王新平等利用中子水分仪测定土壤水分对干旱沙区进行了陆面蒸散量与土壤水分关系的数值计算^[4], 但就中子水分仪在流动沙丘上的标定问题一直缺乏深入系统的研究。本研究探讨了中子水分仪在流动沙丘风沙土测定土壤水分的可行性, 并综合应用多种方法研究了中子水分仪在流动沙丘上的标定问题, 为干旱区沙化的土壤水分动态变化研究及植被恢复工作提供基础性数据。

前人对中子水分仪的标定方法进行了很多的研究, 提出了几种行之有效且提高标定方程精度的方法^[5~9], 如分段标定、分层标定、容积含水量三点平滑及容积权重平滑处理以及进行点聚图筛选等。本研究采用分层标定和分段标定相结合的方法, 并对土壤容积含水量进行三点平滑和点聚图处理, 对中子水分仪在流动沙丘上进行了系统和多种方法比较标定。

1 中子水分仪田间标定的必要性

中子水分仪的读数(R)与土壤体积含水量(W)是成比例的, 存在着一定的函数关系。中子水分仪在出厂时都有标定方程, 但是, 此标定关系受很多因

素影响: 通路管材料和种类, 土壤容重, 土壤化学成分等; 而且土壤基质中的每一种要素都具有散射和吸收中子的性质, 各种要素综合起来影响读数, 其量是不可忽略的, 因此, 在理论上每种土壤都应该有其独特的标定曲线, 不同类型土壤测定时不能使用同一条标定曲线, 与给定的标定方程有很大的差异, 在利用其测定土壤水分时进行田间标定是必要的。

准确的标定是应用中子水分仪测定土壤水分中最为重要的一环, 也是基础。冯起研究表明, 中子仪在沙地测定土壤水分的方差分析中, 仪器方差、位置方差及标定方差中标定方差占 95% 以上^[10], 其它方差影响很小, 可以不考虑。说明在应用中子水分仪测定土壤水分时标定工作至关重要, 其标定方程的精度直接影响测定土壤水分的准确度。

2 测定试验与标定方法

2.1 测定试验

试验区设在内蒙古自治区阿鲁科尔沁旗, 处于干旱区重要交通沿线的一个流动沙丘上, 其土壤是典型的风沙土, 机械组成中主要为砂粒, 且各个土层粗砂粒均占 55% 以上, 土壤各层次质地均匀, 土壤基本物理性质见表 1。

试验于 2004 年 7 月及 2005 年 5 月测定, 土壤容积含水量应用传统的烘干称重法测得。相应的铝管按沙丘上、中、下等坡位埋设, 长度为 2.0 m, 埋入 1.8 m, 露出地面 0.2 m。测定深度为 0~150 cm, 每 10 cm 测定一次。中子水分仪为北京核子仪器公司生产的 CNC503B(DR), 计数时间是 64 s。在田间标定前, 将中子水分仪在室内标准条件下测定标准

收稿日期: 2005-10-20

基金项目: 农业部“发展生态农业治理沙漠化土地技术与示范”(2003070405)项目

作者简介: 郭守平(1980—), 女, 山东禹城人, 硕士研究生, 主要从事干旱区土壤水分生态研究。

通讯作者: 徐斌, E-mail: xubin@mail-caas.net.cn。

计数(*std*),然后在田间测定计数值(*cnt*),计算计数比(*cnt/std*)。

表 1 土壤基本物理性质
Table 1 The basic physical properties of tested soil

层次(cm) Soil layer	容重(g/cm ³) Bulk weight	机械组成 Particle composition(%)			
		1~0.25 mm	0.25~0.01 mm	0.01~0.001 mm	<0.001 mm
0~20	1.792	67.05	22.33	5.21	5.41
20~40	1.768	57.47	32.11	4.81	5.61
40~60	1.765	60.56	26.82	6.41	6.21
60~80	1.666	58.72	30.66	6.01	7.61
80~100	1.730	81.40	8.38	5.01	5.21
100~120	1.750	72.55	17.83	4.61	5.01
120~140	1.759	73.78	14.41	5.41	6.41
140~160	1.735	72.74	18.65	5.41	6.41

中子水分仪标定时按坡上、坡中、坡下的坡位选择有代表性的管号,先安装好中子导管,取土,在管子周围 10 cm 以内用土钻法取土样,并同步在管内用中子水分仪计数,将土样带回实验室,烘干称重法测得土壤重量水分含水率(%),两次重复;土壤容重用环刀法(g/cm³),计算土壤容积含水量(g/cm³),与中子仪计数比进行标定。

2.2 标定方法

中子水分仪测定土壤水分时,探头对从不确定的容积,即所谓的“影响圈”返回的热中子进行反应^[9],所得的不是对一个点的测量,大多数计数值是来自反射源 10~15 cm 的范围内(干土范围更大)。所以,一般意义上可以认为:中子仪所测得土壤湿度是一定球形容积(半径 10~15 cm)内的容积含水量,因此,深度间隔定为 10 cm 所取的读数能得到真实土壤剖面的一个平滑水分反映形式,因此,在标定工作中,进行了容积含水量的三点平滑及点聚图筛选处理,以提高标定方程的精度。

2.2.1 三点平滑 基于上述的中子仪的测湿原理,将烘干称重法得到的容积含水率进行三点平滑处理。公式如下,两端点:

$$Q_1 = \{3q_1 + q_2\}/4 \tag{1}$$

$$Q_m = \{q_{(m-1)} + 3q_{(m)}\}/4 \tag{2}$$

其它:

$$Q_i = \{q_{(i-1)} + 2q_{(i)} + q_{(i+1)}\}/4 \tag{3}$$

其中:*Q_i* 为三点平滑处理后的第 *i* 层土壤水分含水率,*q_(i)* 为烘干称重法测得第 *i* 层的土壤水分体积含水率,*m* 为测定土壤水分最深层次,即末端点。

2.2.2 点聚图筛选 在进行点聚图分析时可以看出:大部分点都集中在一条直线周围(在理论上中子

仪的计数率比与土壤容积含水率成直线关系),而有极个别“野点子”却四处散落,这种测量原理的差异将对方程的精度产生一定的影响,在回归分析前,有必要将这些数据进行剔除,这种人为的参与既不违背统计的原则,又弥补了中子仪测量土壤水分的不足,对提高回归方程的精度大有裨益。

2.2.3 分段标定与分层标定相结合 由于中子水分仪测定土壤表层含水量时,有部分中子溢出,因此表层数据标定差异较大,据前人研究成果,土壤表层 0~30 cm 计数比与土壤容积含水率线性关系不明显^[8];胡顺军等提出中子水分仪标定分层标定,监测深度小于探测半径的与大于探测半径的分开标定,同样选定 30cm 为分界点^[8],另外,CNC503DR 中子水分仪的探测半径为 25~30 cm,因此与深层同时标定误差高,应分段标定,0~30 cm 浅层,30~150 cm 为深层,浅层应用非线性标定。

另外,由于深层 30~150 cm 所含深度跨度较大,用一条标定方程误差较高,且考虑试验地风沙土的特性,采用伍维模等提出的分层标定^[2],再根据当地土壤特性及每层标定的统计参数合并成几条有代表性的标定直线,以降低标定误差,提高标定精度。

3 结果与分析

3.1 浅层 0~30 cm 土壤标定方程的确定

胡顺军^[11]就表层 10 cm 处的标定问题曾提出运用非直线标定,本研究根据风沙土本身的性质,土质疏松均匀,且土壤含水量较低等确定 0~30 cm 为表层进行综合标定,采用二项式回归,运用三点平滑及点聚图筛选处理,最终确定标定方程:*y*=72.97*x*²+11.847*x*+4.6901,相关系数 *r*=0.8953,相对误差(%)为 8.58。相关系数达到高度相关,且通过

$\gamma_{0.0001}$ 下的检验, 因此方程是可信的。散点图如图 1 所示。

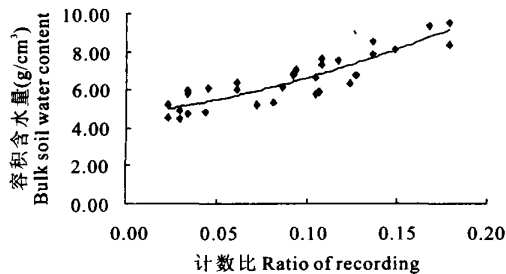


图 1 表层 0~30 cm 标定直线

Fig. 1 Calibrating curve of 0~30 cm soil

3.2 深层土壤标定方程的确定

以中子水分仪在土壤中的计数比 (cnt/std) 为

自变量 x , 同一层土壤容积含水量为因变量 y , 分层对 30~150 cm 进行直线回归, 标定直线为 $y = ax + b$, 由表 2 可知, 深层各层次土壤的标定直线均成立, 且相关系数达到高度相关, 相对误差较低。

在实际应用中, 不可能如此详细的每层进行标定及运用标定方程, 根据当地的土壤状况及表 2 中的每层土壤标定直线的统计参数, 可以合并几层有代表性的方程, 分别是 30~80、80~100、100~130 及 130~150 cm 四层; 另外, 在进行深层土壤最终方程确定过程中, 对深层 100~130 cm 及 130~150 cm 两层进行了直线回归和二项式回归的比较, 发现这两层二项式回归标定效果要好于直线方程, 结果见表 3。

表 2 30~150 cm 各层土壤的标定直线的统计参数

Table 2 The statistical parameters of calibration equations of different soil depth in 30~150 cm

土壤层次 Soil depth (cm)	样本数 Number of samples n	斜率 Slope a	截距 Intercept b	相关系数 Correlation coefficient r	相对误差 Relative error (%)
35	12	41.656	0.2158	0.9766	4.63
45	12	49.098	-0.9145	0.9842	4.50
55	11	42.283	-0.3459	0.9842	4.14
65	11	40.476	-0.0568	0.9798	4.35
75	12	45.687	-0.7821	0.9846	3.26
85	15	65.004	-3.2090	0.9978	4.26
95	15	59.566	-2.6354	0.9958	3.90
105	14	48.066	-1.2038	0.9941	4.17
115	14	45.745	-0.9004	0.9943	3.67
125	15	56.766	-2.3069	0.9984	4.52
135	16	56.839	-2.3571	0.9983	4.79
145	14	57.110	-2.2207	0.9990	4.21

表 3 100~130 cm 及 130~150 cm 不同回归方程比较

Table 3 The comparison of calibration equations in 100~130 cm and 130~150 cm soil depth

土壤层次 Soil depth (cm)	方程类型 Equation type	标定方程 Calibration equation	样本数 Number of samples n	相关系数 Correlation coefficient r	相对误差 Relative error (%)
100~130	直线 Linear	$y = 48.119x - 1.231$	43	0.9966	3.66
	二项式 Binomial	$y = 12.787x^2 + 40.374x - 0.4439$	43	0.9968	3.60
130~150	直线 Linear	$y = 57.020x - 2.3029$	30	0.9987	5.02
	二项式 Binomial	$y = 18.708x^2 + 42.636x - 0.7865$	30	0.9988	4.25

由表 3 可以看出, 深层土壤标定方程二项式回归相关系数和相对误差均较直线回归好, 因此最终深层标定方程的确定见表 3。

分别标定, 相关系数均达到高度相关, 且利用回代法检验的相对误差较低; 另外可以看出, 100~130 cm 和 130~150 cm 两层的标定方程的精确度要稍高于 30~80 cm 和 80~100 cm 两层。

由表 3 表 4 可以看出, 将深层土壤分为 4 层来

表 4 深层土壤不同层次的标定方程

Table 4 The calibration equations of different soil depth

土壤层次 Soil depth (cm)	标定方程 Calibration equation	样本数 Number of samples <i>n</i>	相关系数 Correlation coefficient <i>r</i>	相对误差 Relative error (%)
30 ~ 80	$y = 43.467x - 0.3423$	55	0.9781	4.74
80 ~ 100	$y = 60.713x - 2.7173$	30	0.9919	4.19
100 ~ 130	$y = 12.787x^2 + 40.374x - 0.4439$	43	0.9968	3.60
130 ~ 150	$y = 18.708x^2 + 42.636x - 0.7865$	30	0.9988	4.25

4 结 论

1) 本研究表明,中子水分仪的标定工作是有必要的,将土壤层次分为浅层及深层分段标定能大大提高标定方程的精度且相对误差大大降低,效果远远好于单纯使用一条标定直线。本研究标定土壤范围广,且就表层及深层不同土壤层次利用不同方法同时标定,在提高标定方程精度的同时,标定方程的误差也大大降低,结果令人满意。

2) 土壤表层 0~30 cm 标定方程的精确度明显低于深层 30~150 cm 标定方程的精度,相对误差较深层高,目前对浅层的标定方法的研究方法比较深层较少,其标定精度有待于进一步提高。

3) 本研究结合多种方法进行标定,浅层用非线性标定;深层用分层标定,再根据当地土壤特性及每层的标定统计参数合并为几条标定直线;另外,将深层两层直线回归和二项式回归进行了比较,结果表明部分深层用二项式标定效果要比线性标定稍好,误差会降低;最终确定的标定方程效果较好,此方法具有一定的推广价值。

4) 前人就中子水分仪在农田的标定及应用做了很多研究,而沙土尤其是典型的风沙土的研究很少,本研究对中子水分仪在流动沙丘测量土壤水分进行了尝试,应用多种方法其标定方程达到高度相关(0.98 左右),且相对误差较低,在 5.0% 以下。证实了中子水分仪在流动沙丘测定土壤水分测定的可

行性及可靠性。

5) 此标定工作为应用中子水分仪长期定点监测流动沙丘土壤水分变化的基础性工作,证实了其研究的可行性及可靠性,另外,是及时掌握流动沙丘土壤水分动态变化从而进行固沙植被恢复的重要前提性工作,其理论和实践意义深远。

参 考 文 献:

[1] Gardner W R, Kjrksam D. Determination of soil moisture by neutron scattering[J]. Soil Sci, 1952, 73, 391—401.

[2] 冯 起, 高前兆. 禹城沙地水分动态规律及其影响因子[J]. 中国沙漠, 1995, 15(2): 151—157.

[3] 冯 起. 半湿润沙地水分状况及动态规律研究[J]. 干旱地区农业研究, 1995, 13(1): 25—30.

[4] 王新平, 张立平, 刘立超, 等. 干旱区沙区陆面蒸散量与土壤水分关系数值计算[J]. 中国沙漠, 1996, 16(4): 388—391.

[5] 伍维模, 吕双庆, 王冀平. 中子水分仪在棉田土壤上的标定研究[J]. 干旱地区农业研究, 2002, 20(1): 84—87.

[6] 郭洪飞, 熊恩章. 中子法测定旱地土壤水分中标定方法的改进[J]. 西北农业大学学报, 1991, 19(1): 39—42.

[7] 张仁祖, 徐为根. 一种中子仪测定土壤湿度田间标定的新方法[J]. 气象, 2003, 29(2): 26—28.

[8] 简慰民, 周有芬, 杜筱玲, 等. 改善土壤浅层中子测湿精度的研究[J]. 南京气象学院学报, 1997, 20(1): 80—84.

[9] 康桂红. 中子仪测定土壤湿度田间标定方法初探[J]. 气象, 1996, 22(10): 42—43.

[10] 冯 起. LAE—Ⅱ型中子水分仪在半湿润沙地中的应用研究[J]. 核技术, 1994, 17(4): 246—251.

[11] 胡顺军, 田长彦, 周宏飞. 中子仪土壤墒情监测方法研究[J]. 干旱地区农业研究, 2000, 18(2): 70—75.

Calibration of neutron probe in soil of mobile sand dunes

GUO Shou-ping, YANG Xiu-chun, XU Bin

(Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Science, Beijing 100081, China)

Abstract: The field calibration of neutron probe in the soil of mobile sand dunes was researched by using the subsection and delaminating method together with dot clustering plot selecting and three—dots smoothing of volumetric moisture content, and by using linear and binomial models. The results showed that the calibration was satisfied, that is, the accuracy was greatly advanced and the error was reduced. It was proved that the neutron probe is a feasible and reliable way in measuring soil moisture of mobile sand dunes.

Keywords: neutron probe; field calibration; mobile sand dune; soil moisture