

HH2型土壤湿度计测定土壤含水量的标定研究¹

甘卓亭^{1,2}, 刘文兆^{1,3}

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039; 3. 西北农林科技大学, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 就 HH2 型土壤湿度计在黄土高原沟壑区黑垆土表层的应用进行了标定研究, 分析了 HH2 测量的准确性, 各容重标定曲线的精度和灵敏度。结果表明: 在各种容重条件下用 HH2 测量土壤水分, 输出电压的变异系数小于 6%, 仪器的准确性较高。线性标定方程斜率 a 随容重的增大而增加, 常数 b 则相反。容重标定曲线对 HH2 的可调参数 a_0 , a_1 , 影响较小。当土壤水分含量为 18% ~ 19% 时, 不同容重的标定曲线的差别最低。

关键词: HH2 型土壤湿度计; 黑垆土; 黄土高原; 标定; 土壤水分

中图分类号: S 152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2005)04-0069-04

在土壤水分运动和农田水量平衡研究中, 土壤水分含量是必不可少的基本资料。土壤水分测定的方法较多, 其中以烘干法和中子仪法运用较广。烘干法是土壤水分测定的标准方法, 是其它测定方法的基准, 但该方法每次测定必须采样烘干, 不仅测定过程繁琐, 且破坏原状土从而不能进行长期定位观测; 中子仪法适用于田间长期定位观测, 但该方法对表层土壤水分的测定不够准确, 且存在辐射防护问题^[1]。

由以色列生产, 采用测量介电常数的 HH2 型土壤湿度计 (Soil moisture probe type SMS2 and meter type HH2) 在测定土壤水分时具有反应速度快、携带方便、安全无辐射、对土壤扰动轻微等优点。HH2 型土壤湿度计 (以下简称 HH2) 由 SMS2 型探头和 HH2 型手持式读表组成。SMS2 型探头是一个前端有 4 根不锈钢探针、后端连接缆线、中部为 40 mm 圆柱体型聚氯乙烯外壳的探头, 探头探针直径 3 mm, 长度 60 mm; HH2 型手持式读表是底端有 25 针插口, 可与 SMS2 型探头相连, 在测量时显示和储存数据的采集装置, 其内置 PP3 型碱性电池向探头和手持读表供电。在测量时, 将探针直接插入土壤, SMS2 探头通过特殊设计的内置传输线产生高频电磁脉冲信号, 并通过探针发射到土壤。这种脉冲信号沿着探针产生一个电磁区域, 并在其中进行传播, 在探针的末端由于电阻抗突变被反射回来。当被测量的土壤含水量不同时, 其介电常数 E 也不同。介电常数 E 变化被转换成直流电压 v , 直流电压与土壤含

水量直接相关, 从而测得土壤容积含水量 H_{Topp} ^[2] 认为介电常数与土壤容积含水量之间的关系不受土壤质地、容重等物理因素的影响。后来的研究^[3]表明, 在测量精度要求较低时, 这一结论是正确的。但精度要求更高时, 就必须对不同质地和容重的土壤分别进行标定。由于作为 HH2 型土壤湿度计输出结果的电压值是由介电常数转换而成, 因而需要对其进行标定。

本实验选取黄土高原沟壑区典型土壤黑垆土进行了标定, 并分析了容重标定曲线精确度以及标定曲线的灵敏度, 为 HH2 在黄土高原沟壑区的使用提供参考。

1 材料与方 法

供试土壤黑垆土取自中国科学院长武农业生态试验站。由于 HH2 多用于表层土壤水分的测定, 所以在试验中仅采集了黑垆土表层 (0~30 cm) 混合样进行标定研究。

考虑到线性方程最为简单, 因此将输出电压 (v) 与土壤容积含水量 (H) 关系进行线性拟合:

$$H = a \times v + b \quad (1)$$

作为标定曲线, 式中 a 、 b 分别为斜率和截距。

在使用 HH2 进行测定时, 针对不同的标定曲线, 可通过设定仪器的可调参数 a_0 、 a_1 来更改仪器的内置曲线, 从而可以直接读出特定曲线下的土壤水分含量, 因此, 我们在试验中同时给出了各标定曲线的 a_0 、 a_1 值, 以供测量操作时使用。根据 HH2 电

¹ 收稿日期: 2004-10-21

基金项目: 国家 973 前期专项 (2003CCB001); 国家自然科学基金项目 (90202011) 资助

作者简介: 甘卓亭 (1973-), 男, 安徽池州人, 硕士研究生, 主要从事流域水文生态和节水农业研究。

压输出(v)在 0~1.0V 范围内与土壤介电常数 E 的算术平方根拟合方程:

$$\bar{E} = 1.1 + 4.44v \quad (R^2 = 0.99) \quad (2)$$

以及 Whally, White, Knight, Zeggelin 和 Topp 等的研究结果,介电常数 E 的算术平方根与土壤水分容积含水量($H_{\text{容}}$)呈线性关系^[4]:

$$\bar{E} = a_0 + a_1 \times H_{\text{容}} \quad (3)$$

式中 a_0 、 a_1 为 HH2 的可调参数。

将(2)式代入(3)式,得:

$$H_{\text{容}} = 4.44/a_1 \times v + (1.1 - a_0)/a_1 \quad (4)$$

由(1)、(4)可求得:

$$a_1 = 4.44/a \quad (5)$$

$$a_0 = 1.1 - 4.44b/a \quad (6)$$

其具体标定步骤如下:

1) 将采集的表层黑垆土风干,过 2 mm 孔筛,除去根系、杂草、砾石,105℃烘干,分别称取预处理成容重是 1.10、1.15、1.20、1.25、1.30 g/cm³, 体积为 1 200 cm³ 的土样所需烘干土,在大容器中均匀洒入一定容积的水(超过配制成容积含水量为 10%、15%、20%、25%、30% 的水量),然后分层均匀填入直径 16 cm,容积 1 200 cm³ 的耐高温的

PVC 容器中,并用烘箱调节含水量,使其达到各级容重水分处理。

2) 各种处理密封静置 24 h,然后用 HH2 探头测量输出电压 v ,每个样本测定次数为 25 次。

3) 线性拟合确定 a 、 b 值。

4) 由(5)和(6)式求算 a_0 、 a_1 。

2 结果与讨论

2.1 测量的准确性

试验中,用同一样本的多点测定结果来判断仪器测量的准确性。表 1 为多点测定供试样本(不同容重和水分处理)的结果,可以看出,HH2 输出电压的变异系数在 2.3%~5.9% 之间,重现性较好,表明在此样本水分含量范围内,仪器的测量误差较小,准确性较高。

上述变异性除仪器本身误差外,同样受到土壤水分空间变异影响,在测量时探针插孔对容重的影响以及前、后期插孔位置重叠都会增加输出电压的变异系数。实际上,如果把探头固定在一点上做多次测量,其重现性是非常好的;对田间土壤也是如此。因此,可以认为由仪器造成的系统误差较小。

表 1 HH2 法的测量误差
Table 1 Measuring error of HH2

土样 Soil	容重 Bulk density (g/cm ³)	各级含水量的输出电压平均值(\bar{v})与标准差(S)(mV) Mean values (\bar{v}) and standard errors (S) of output voltage under different soil water contents									
		10%		15%		20%		25%		30%	
		$\bar{v} \pm S$	CV (%)	$\bar{v} \pm S$	CV (%)	$\bar{v} \pm S$	CV (%)	$\bar{v} \pm S$	CV (%)	$\bar{v} \pm S$	CV (%)
黑垆土 Heilu soil	1.10	272.0 ± 11.3	4.2	342.1 ± 13.2	3.9	456.8 ± 15.0	3.3	674.6 ± 30.8	4.6	810.0 ± 24.61	3.0
	1.15	280.7 ± 8.0	2.9	383.9 ± 13.8	3.6	473.2 ± 18.8	4.0	622.3 ± 27.8	4.5	773.05 ± 45.72	5.9
	1.20	293.3 ± 7.6	2.3	394.7 ± 14.8	3.7	509.7 ± 16.0	3.1	614.3 ± 16.5	2.7	767 ± 34.7	4.5
	1.25	299.3 ± 9.5	3.2	405.2 ± 9.1	2.3	512.0 ± 14.8	2.9	635.7 ± 18.0	2.8	755.3 ± 27.7	3.7
	1.30	321.5 ± 10.1	3.1	420.3 ± 12.9	3.1	532.0 ± 18.9	4.2	648.2 ± 21.1	3.3	734.3 ± 32.7	4.5

2.2 不同容重的标定曲线和精确度

标定曲线的通用式为 $\bar{H} = a \times v + b$, 式中 \bar{H} 为含水量估计值, v 为输出电压, a 、 b 同上。

$$\text{标定曲线的误差估计值为: } s = \frac{\sum (H_i - \bar{H})^2}{n - 2}$$

式中 s 为标准误, n 为样本数, \bar{H} 同上, H 为各处理的实际含水量。各容重的标定曲线、参数及标准误列于表 2。

由表 2 可见,容重标定曲线的斜率 a 随着容重增大呈现出增大趋势,从 0.3927 增加到 0.4563,而截距 b 则呈现出减小趋势,从 -0.0065 降低到

-0.0416。容重大于 1.15 g/cm³ 时,标准误一般很小(≤ 0.008),表明各观测点与标定曲线靠得很近,数据的分散程度小,标定曲线精度较高;而容重较小时,标准误较大,标定曲线的精度降低,在容重为 1.10 g/cm³ 时,标准误最大,为 0.023,标定曲线精度最低。HH2 的可调参数 a_0 、 a_1 值除了容重为 1.10 g/cm³ 时相差较大外,其余的相差很小。当容重为 1.20 g/cm³ 和 1.25 g/cm³ 时两者完全一致,均为 9.9 和 1.4,换句话说,对于这两种容重标定曲线而言,无法通过可调参数 a_0 、 a_1 的设置来区别其内置曲线,因而,在测量精度要求较高时,直接利用内置曲

线来读出特定容重曲线下土壤含水量是不可靠的, 容重标定曲线来求算土壤含水量较为可靠。在使用中, 应通过读数表中的输出电压值和相应的

表 2 不同容重的供试土壤标定曲线和误差

Table 2 Regression error and correlation curves of different bulk densities of tested soil

土样 Sample	容重(g/cm ³) Bulk density	a	b	相关系数 Correlation coefficient	a ₀	a ₁	标准误 Standard error (cm ³ /cm ³)	样本数 Sample number
黑垆土 Heilu soil	1.10	0.3927	- 0.0065	0.981	11.3	1.2	0.023	6
	1.15	0.4404	- 0.0248	0.995	10.1	1.4	0.013	6
	1.20	0.4477	- 0.0323	0.998	9.9	1.4	0.008	6
	1.25	0.4491	- 0.0349	0.999	9.9	1.4	0.004	6
	1.30	0.4563	- 0.0416	0.999	9.7	1.5	0.005	6

2.3 综合标定曲线及其精确度

由于土壤容重存在空间变异性, 在野外用 HH2 测定土壤含水量时很难准确获取所测点的容重, 因此有必要进行容重综合标定。所谓容重综合标定, 即以上述 5 种样本的输出电压(V) 和含水量(H) 进行线

性拟合。

表 3 为黑垆土容重综合标定结果, 综合标定曲线标准误为 0.013 cm³/cm³, 标定曲线精度可以达到一般野外测定要求。

表 3 供试土壤的容重综合标定曲线和误差

Table 3 Regression error and synthesis correlation curves of tested soil

土样 Sample	容重(g/cm ³) Bulk density	a	b	相关系数 Correlation coefficient	a ₀	a ₁	标准误 Standard error (cm ³ /cm ³)	样本数 Sample number
黑垆土 Heilu soil	1.10~1.30	0.4345	- 0.0267	0.992	9.7	1.4	0.013	30

2.4 容重标定曲线的灵敏度分析

通过对相同输出电压下不同容重曲线的土壤含水量进行比较, 可分析容重标定曲线的灵敏度。根据试验测定, HH2 输出电压一般在 80~900 mV 之间变动, 现选取输出电压 100、300、500、700 和 900 mV 分别代表不同梯度土壤含水量的可能输出电压, 计算出相应标定曲线的土壤含水量读数, 结果如表 4 所示。

由表 4 可见, 在输出电压为 100 mV 时, 容重 1.10 g/cm³ 的标定曲线土壤含水量读数最高为 3.28%, 并随着容重增加读数逐渐降低, 当容重为

1.30 g/cm³ 时, 读数接近零, 极差为 3.28%。输出电压为 300 mV 时, 容重 1.10 g/cm³ 的读数最高为 11.13%, 容重 1.30 g/cm³ 的最低为 9.53%, 极差减少到 1.60%。当输出电压为 500、700 和 900 mV 时, 读数最高值出现在容重 1.15 g/cm³, 而且极差不断增大, 分别为 0.89%、1.51% 和 2.46%。由此可见, 输出电压 500 mV 左右(即相应的容积含水量在 19% 左右)时, 各标定曲线对电压的灵敏度较低, 而当输出电压升高或降低时亦即含水量升高或降低时, 灵敏度增大。

表 4 不同容重相同电压的容积含水量读数 (%)

Table 4 H_v of the same voltage in different calibration curves

容重(g/cm ³) Bulk density	输出电压 Output voltage (mV)				
	100	300	500	700	900
1.10	3.28	11.13	18.99	26.84	34.69
1.15	1.92	10.73	19.54	28.35	37.16
1.20	1.25	10.20	19.16	28.11	37.06
1.25	1.00	9.98	18.97	27.95	36.93
1.30	0.00	9.53	18.66	27.78	36.91

3 结 论

本文通过对黄土高原典型土壤黑垆土表层土样不同容重和水分处理的多点测定表明, HH2 的稳定性较高, 由仪器造成的系统误差较小。不同容重处理的标定试验表明, 测定不同容重的土壤含水量时, 应先进行标定, 再由各自的标定曲线来计算土壤含水量。在不能进行标定或精度要求不高的情况下, 可采用综合标定曲线, 但综合标定曲线的精度同容重标定曲线相比, 误差偏大, 在试验中要特别注意。根据对容重标定曲线的灵敏度分析结果, 当土壤含水量偏高或偏低时容重标定曲线的灵敏度高, 而在中等含水量时, 标定曲线的灵敏度较低, 因此在测量中等含水量时也可直接利用综合标定曲线。以上结论与我们用陡坡地林草黄土_土表层土壤进行的试验结

论基本一致。由于本试验土样仅为黑垆土表层土壤, 对于用 HH2 测定其深层土壤水分的有关问题还有待于进一步研究。

参 考 文 献:

- [1] 龚元石. 农田土壤水分测定三种方法的比较[J]. 中国农业大学学报, 1997, 2(3): 53- 58.
- [2] Topp G C, Davis J L, Annan A P. Electromagnetic determination of soil water content: measurement in coaxial transmission lines[J]. Water Resources Research, 1980, 16: 574- 582.
- [3] Topp G C, Davis J L, Annan A P. Measurement of soil water content using time-domain reflectometry (TDR): A field evaluation[J]. Soil Sci Soc Am J, 1985, 49: 19- 24.
- [4] 澳作生态仪器有限公司. 高精度土壤水分测量仪 HH2 使用说明书[M]. 北京: 澳作生态仪器有限公司, 2004. 29- 30.

Calibration on measurement of soil water content using SMS2 Soil Moisture Probe and HH2 Meter

GAN Zhuo-ting^{1,2}, LIU Wen-zhao^{1,3}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 3. Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The calibration of SMS2 Soil Moisture Probe and HH2 Meter (HH2) was studied in surface stratum of Heilu soil in the tableland and gully region of Loess Plateau, and the veracity of HH2 and the precisions and sensitivities of different calibration curves were analyzed. The results demonstrate that the CV of voltage by HH2 under different soil densities is less than 6%, and the measurements by HH2 are credible. The slope a of linear regression is increased with the accretion of soil densities, but the constant b is reverse. The calibration curves cannot be discriminated by a_0 and a_1 . The difference of calibration curves is minimum when soil water content is 18%~19%.

Key words: SMS2 Soil Moisture Probe and HH2 Meter; Heilu soil; Loess Plateau; calibration; soil water