

中子水分仪在黄土丘陵区标定研究^{*}

邓建强, 魏江生, 何金军, 贺晓, 卢立娜

(内蒙古农业大学 生态环境学院, 呼和浩特 010019)

摘 要: 通过在黄土丘陵地区进行中子水分仪的标定研究, 运用分段标定方法、线型标定及非线性型标定相结合、数据平滑处理得到了土壤不同深度的 3 条标定直线: 0~30 cm 土层标定曲线采用一元二次回归方程, r 值为 0.93; 其余两层采用直线回归方程标定, r 值均大于 0.93。结果表明: 以上方法结合标定可提高中子水分仪标定方程的准确性, 证实了中子水分仪在黄土丘陵地区野外长期水分动态变化监测中的可行性及可靠性。同时证明了与容积权重平滑法相比, 三点平滑法更具有实际的应用意义。

关键词: 黄土丘陵区; 中子水分仪; 标定方法; 土壤水分

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2008)06-0218-04

Calibration of Neutron Probe in the Soil of Loess Hilly Region

DENG Jian-qiang, WEI Jiang-sheng, HE Jin-jun, HE Xiao, LU Li-na

(College of Ecological Science, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010019, China)

Abstract: From the study of calibrating neutron probe in the loess hilly region, making use of hierarchical section method, line correlation, multinomial correlation and data smoothing method, we got the three calibration equations: the calibration equation of soil layer between 0 cm and 30 cm, use multinomial correlation, and the correlation coefficient is 0.93; the others two calibration equations use line correlation, and both of correlation coefficients are more than 0.93. The result showed that: using the above methods together can enhance the accuracy of calibration equation, it also confirms the neutron probe is a reliable and feasible way of long term measuring soil moisture in the loess hilly region. In the meantime, comparing with volume weighted smoothing method, the three dot smoothing method has more actual applied meaning.

Key words: loess hilly region; neutron probe; calibrating method; soil moisture

土壤水分是作物生长、植被恢复的关键性限制因素, 如何准确、快速、定位测量土壤水分对农田的节水灌溉、最优调控以及植被建设中植被的适宜密度、合理布局等具有重要意义。目前, 测量土壤水分的方法有许多, 如土钻法、张力计法、电阻(石膏)法、中子仪法以及时域反射仪(TDR)法等, 其中中子仪法是近几年应用较为广泛的方法之一^[1]。

从 1952 年 Gardner W. R. 和 Kirkham D. 首次应用中子散射法测量土壤体积含水量后, 人们也开始利用该方法测定土壤水分含量以及一段时间内土壤水贮量的变化^[2]。在我国, 已有学者对中子仪的计数误差合理计数时间、测量次数、探测半径以及率定曲线^[3], 室内外标定曲线产生误差的成因, 率定方程及其测量精度, 土壤水分监测空间变异性^[4-6]等问题进行了研究。由于黄土丘陵地区生态环境脆弱, 应用中子水分仪及时、准确、快速的监测土壤水分动态变化规律, 可为农业生产、植被恢复, 水土保持提供理论基础。该文将主要探讨中子仪在黄土丘陵地区的标定方法, 数据处理方法, 以促进中子仪在野外长期水分动态变化监测中的应用。

1 研究方法

1.1 研究区自然概况

研究区位于黄土高原与毛乌素沙地之间的过渡地带, 海拔 1 100~1 300 m, 由南向北逐渐抬升。气候特点属中温带半干旱气候, 干旱少雨多风沙。多年平均降水量约 400 mm, 年内变率与年际间变率均很大, 降水多集中在 7~9 月, 约占全年降水量的 60%~65%。年蒸发量约 2 000 mm, 干燥度约为 2。年均气温 8℃, $\geq 10^\circ\text{C}$ 的积温约 3 000℃, 无霜期约 156 d。多年平均大风日数 15 d 以上, 最多可达 40 多天, 最大风速可达 20 m/s 以上。主要地貌类型为黄土丘陵梁峁起伏、沟壑纵横, 相对高差 10~40 m, 地面组成物质为黄土^[7]。

1.2 中子水分仪埋设及使用方法

试验于 2006 年 4~9 月, 在神府-东胜矿区大柳塔煤矿三盘区, 应用样本法对中子仪进行标定。土壤含水量应用经典烘干法, 分别在降雨前 10 d 与降雨后第一天采样。相应的铅管在各地坡顶埋设, 长度为 2.0 m, 埋入 1.8 m, 露出

* 收稿日期: 2007-05-19

基金项目: 内蒙古自然科学基金项目(200308020304); 神华集团公司科技创新项目(SH_04_02_1)

作者简介: 邓建强(1984-), 男, 内蒙古乌兰察布市人, 在读本科, 研究方向: 土壤水分动态研究。E-mail: djqljq2@sina.com

通信作者: 魏江生(1969-), 男, 内蒙古鄂尔多斯市人, 博士生导师, 教授, 主要从事森林土壤研究。E-mail: jiangshengwei@hotmail.com

地面 0.2 m。测定深度为 0– 130 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。中子水分仪标定时先安装好中子导管, 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质量水分含水率(%), 3 次重复; 土壤容重用环刀法, 计算土壤容积含水量(g/cm^3), 与中子仪计数比进行标定。

2 结果及分析

2.1 异常数据的剔除

在进行点聚图时可以看出: 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), 而有个别“野子点”却四处散落, 这种与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 各层土壤回归直线的初步确定

以中子水分仪在第 M 层土壤中测定的计数比率(cnt/std)为自变量 x , 同一层次土壤样品的容积百分含水量 θ 为因变量 $y(v\%)$, 分层进行直线回归分析^[8], 其回归方程的形式为: $y = ax + b = a \times \text{cnt}/\text{std} + b$ 。统计分析参数如(表 1)所示。

表 1 土壤各层次标定直线的统计参数

土层深度/cm	n	a	b	r
5	5	98.75	0.24	0.88
15	5	91.61	- 7.59	0.94
25	6	72.07	- 5.45	0.89
35	6	51.93	- 0.87	0.93
45	6	60.18	- 2.60	0.94
55	5	64.67	- 4.96	0.93
65	5	45.78	0.20	0.95
75	7	42.12	1.17	0.92
85	8	47.61	- 0.39	0.92
95	7	44.94	0.86	0.95
105	5	34.62	4.30	0.93
115	7	37.48	3.44	0.91
125	6	37.59	3.58	0.92

注: $r_{0.05(3)} = 0.878$; n 为样本数; a , b 分别为回归直线的斜率和截距; r 为相关系数。

由表 1 看出各层次土壤的标定直线均成立。但在实际应用中不便于运用标定直线, 且对 13 条回归直线进行重合

性检验^[9], 结果如表 2: 因为 $F > F_{0.05}$, 重合性检验不显著, 它们不能重合。所以应对这 13 条回归直线分段进行标定。

表 2 13 条回归直线重合性检验表

n	k	a	b	$Q_{e\text{重}}$	Q_e	F	$F_{0.05(n1, n2)}$
78	13	43.34	1.97	203.19	141.97	2.07	1.74

注: k 为回归直线数; $Q_{e\text{重}}$ 为该回归直线的剩余平方和; Q_e 为 K 条回归直线的剩余平方和之和。

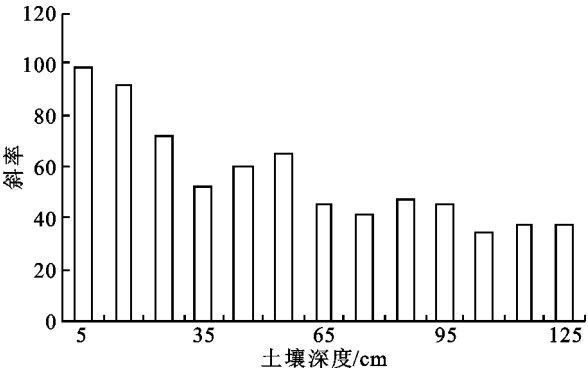


图 1 回归直线的斜率变化图

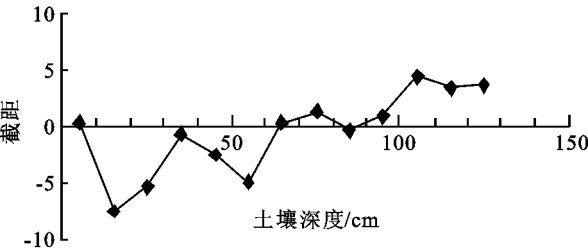


图 2 回归直线的截距变化图

2.2.1 13 条回归直线进行分组

通过图 1 和图 2, 可把这 13 条回归直线分成如下三组: ①0– 30 cm 间的 3 条回归直线合为第一组。虽然该组中的 3 条回归直线的斜率变化和截距变化都比较大, 但是由于该层为土壤浅层, 中子外逸及土壤根系影响, 使得中子仪的准确度不高, 所以应对该层进行单独标定。②30– 60 cm 间的 3 条回归直线为第二组。因为这 3 条回归直线的斜率 50 到 65 之间变化且截距都小于 0。③60– 130 cm 间的 7 条回归直线为第三组。因为这几条的回归直线的斜率在 34~ 48 之间变化, 截距也基本都为正。

2.2.2 分组后回归直线的重合性检验及 0– 30 cm 间一元二次曲线回归的验证

分组的人为因素比较大, 所以应对回归直线分组后进行重合性检验。根据表 3 所示: 除第一组不重合($F > F_{0.05}$) 外, 其余两组都可以重合。

表 3 分组后回归直线重合性检验表

组名	土壤层次/cm	n	k	a	b	$Q_{e\text{重}}$	Q_e	F	$F_{0.05(n1, n2)}$	r
1	0– 30	16	3	43.26	2.87	118.4	46.3	3.81	3.48	–
2	30– 60	17	3	57.46	- 2.05	43.6	39.8	0.27		0.932
3	60– 130	45	7	41.48	1.85	62.7	55.3	0.34		0.924

0– 30 cm 由于中子的外逸及植物根系的影响, 其计数比与土壤容积含水率直线性关系不明显, 胡顺军就浅层的标

定问题曾提出运用非直线标定, 所以根据该层数据的点分布图的特征, 可采用一元二次曲线回归。经过曲线回归的方差

分析^[10]可知:0– 30 cm 土层的一元二次曲线回归是显著的,且相关系数 $r> 0.9$,回归方程具有可信性。

2.3 回归直线的精度的提高

2.3.1 提高精度的方法

(1) 三点平滑法。中子水分仪测定土壤水分时,探头对从不确定容积,即所谓的“影响圈”返回的热中子进行反应^[11],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(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,以提高标定方程的精度。因此基于上述的中子仪原理,可将烘干称重法所测得的容积含水率进行三点平滑处理,获得的某层的容积含水率就可以近似看成以该层中点为中心,上下二层容积内的容积含水率,可以得到新的序列。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:

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

式中: Q_i ——三点平滑处理后的第 i 层土壤水分含水率;
 $q(i)$ ——烘干称重法测得第 i 层的土壤水分体积含水率;
 m ——测定土壤水分最深层次,即末端点^[12]。

(2) 容积权重平滑。该处理的原理同上,惟一不同的是计算的方法更为精细。球为中子仪测量的“影响圈”,可看成由 $L_{(i-1)}$, $L_{(i+1)}$ 两个球缺和一个 L_i 鼓组成。

其中“影响圈”的半径为 15 cm,球缺 $L_{(i-1)}$, $L_{(i+1)}$ 及中间鼓 $L_{(i)}$ 的高度都为 10 cm。根据相应体积公式可分别算出球(影响圈),球缺及中间鼓的体积。以球缺、中间鼓的体积占球体积的份额为权重,得出用烘干法测量的 $L_{(i-1)}$, $L_{(i)}$, $L_{(i+1)}$ 层土壤相对湿度 $q_{(i-1)}$, $q_{(i)}$, $q_{(i+1)}$ 的权重分别是 0.26, 0.48, 0.26。所以新序列第 i 层的相对湿度的公式如下:

两端点:

$$Q_1 = 0.74q_1 + 0.26q_2 \tag{1}$$

$$Q_m = 0.26q_{(m-1)} + 0.74q_{(m)} \tag{2}$$

其它:

$$Q_i = 0.26q_{(i-1)} + 0.48q_{(i)} + 0.46q_{(i+1)} \tag{3}$$

式中: Q_i ——容积权重平滑处理后的第 i 层土壤水分含水率; $q_{(i)}$ ——烘干称重法测得第 i 层的土壤水分体积含水率;
 m ——测定土壤水分最深层次,即末端点^[13]。

表 4 不同层次不同处理方法回归方程的比较

土壤层次/cm	处理方法	方程	r	相对误差/%
0– 30	未平滑	$y = 183.37x^2 - 31.75x + 8.96$	0.903	14.4
	三点平滑	$y = 143.94x^2 - 19.462x + 8.2746$	0.933	10.0
	容积平滑	$y = 141.87x^2 - 18.474x + 8.1462$	0.934	10.0
30– 60	未平滑	$y = 57.46x - 2.05$	0.932	7.82
	三点平滑	$y = 59.993x - 2.7048$	0.943	5.83
	容积平滑	$y = 60.084x - 2.7275$	0.944	5.71
60– 130	未平滑	$y = 41.48x + 1.85$	0.924	5.74
	三点平滑	$y = 43.732x + 0.8836$	0.933	4.43
	容积平滑	$y = 43.853x + 0.8636$	0.935	4.40

2.3.2 提高精度方法的比较

通过表 4 不同层次不同处理方法的回归方程比较中得知:(1) 三点平滑和容积权重平滑相对于未平滑处理的 r 值都有提高,其中提高最大的是土壤表层 0– 30 cm 间的相关系数提高了 0.03,其各层均提高了 0.01 左右。三点平滑和容积权重平滑相对于未平滑处理的相对误差都有所降低,降低最大的是土壤表层为 4.4%,其它层次降低 1.5% 左右。所以三点平滑及容积权重平滑法都能有效地提高中子水分仪标定曲线方程的准确性。(2) 通过三点平滑和容积权重平滑法后所得的标定方程不论是 r 值或是相对误差都无明显差异。而且容积权重平滑法的各层次权重的计算及应用相对于三点平滑法比较繁琐,所以三点平滑法更具有实际的应用意义。

2.4 中子水分仪标定方程的确定

表 5 为通过三点平滑法处理后获得的标定方程。从表 5 可知:(1) 虽然 0– 30 cm 层回归曲线的 r 值为 0.933,相对误差却达到 10.0%,所以在应用该层的标定曲线时,要用土

钻法不定期进行补测来调整其标定曲线,以降低其相对误差。(2) 在土壤的垂直方向上,随着深度的下降,相对误差也随之下降。这是因为随着深度的下降,中子外逸及土壤根系对中子仪的影响也随之减小。

表 5 标定方程

土壤层次/cm	标定方程	样本数	r	相对误差/%
0– 30	$y = 143.94x^2 + 19.462x + 8.2746$	16	0.933	10.0
30– 60	$y = 59.993x - 2.7048$	17	0.943	5.83
60– 130	$y = 43.732x + 0.8836$	45	0.933	4.43

3 结 论

(1) 在分组分段标定法中,不同层次的分组过程有一定的人为因素,所以对分组后的组内的多条回归直线进行重合性检验,以确保分组的正确性。因为 0– 30 cm 间的回归直线没有通过重合性检验。而根据胡顺军曾提出浅层的标定可运用非直线标定,所以采用一元二次回归曲线标定。结

果效果显著, 回归的相关系数 $r > 0.90$ 。

(2) 运用三点平滑或容积权重平滑对数据进行处理都能有效地提高回归曲线的相关系数, 降低其相对误差, 提高标定方程的准确度。而三点平滑法和容积权重平滑法相比不论是 r 值或是相对误差都无明显差异, 且容积权重平滑法中的权重计算及应用较三点平滑法繁琐, 所以三点平滑法更具有实际的应用意义。

(3) 0—30 cm 层回归曲线的 r 值为 0.933, 相对误差却达到 10.0%, 所以要用土钻法不定期进行补测来调整其标定曲线, 以降低其相对误差。

(4) 此标定工作是应用中子水分仪长期定点监测黄土地陵区土壤水分变化的前提, 证实了其研究的可靠性及可行性。另外, 及时、准确掌握黄土地陵区土壤水分动态变化是农业生产、植被恢复、水土保持的理论基础, 具有一定的理论和实践意义。

参考文献:

[1] 陈洪松, 邵明安. 中子仪的标定及其在坡地土壤水分测量中应用[J]. 干旱地区农业研究, 2003, 21(2): 68-72.
[2] Gardner W R, Kirkham D. Determination of soil moisture by neutron scattering [J]. Soil Sci., 1952, 73: 391-401.

[3] 胡顺军, 田文彦, 周宏飞. 提高中子仪土壤墒情监测方法研究[J]. 干旱地区农业研究, 2000, 18(6): 70-75.
[4] 陈本华. 中子仪室内外标定曲线误差成因略析[J]. 仪器仪表与分析监测, 2000(3): 56-60.
[5] 刘文兆. 中子法测定渭北旱塬西部土壤水分的试验研究[J]. 干旱地区农业研究, 1988, 6(3): 52-60.
[6] 李毅, 门旗, 罗英. 土壤水分空间变异性对灌溉决策的影响研究[J]. 干旱地区农业研究, 2000, 18(2): 80-75.
[7] 杨选民, 丁长印. 神府东胜矿区生态环境问题及对策[J]. 能源环境保护, 2000, 14(1): 68-70.
[8] 盖钧镒. 试验统计方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.
[9] 袁志发, 周静芋. 多元统计分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
[10] 裴喜春, 薛河儒. SAS 及应用[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.
[11] 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.
[12] 郭守平, 杨秀春, 徐斌. 中子水分仪在流动沙丘上的标定研究[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(4): 68-76.
[13] 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.

(上接第 217 页)

参考文献:

[1] 张凤麟. 发达国家矿地复垦保证金制度及对中国的启示[J]. 中国矿业, 2006, 15(9): 5-8.
[2] 包志毅, 陈波. 工业废弃地生态恢复中的植被重建技术[J]. 水土保持学报, 2004, 18(3): 160-199.
[3] 李海波, 李克顺, 李亚东. 我国矿业废弃地复垦现状及对策分析[J]. 环境科学与技术, 2005, 28(增刊): 59-101.
[4] 徐海顺, 卞新民, 汤国辉. 城郊矿区废弃地观光农业生态规划[J]. 中国农学通报, 2006, 22(2): 275-279.
[5] 黄义雄. 厦门海沧采石废弃地景观生态重建探究[J]. 福建师范大学学报: 自然科学版, 2002, 18(1): 112-115.
[6] Heinz W. The tows matrix: a tool for situational analysis[M]. New York: McGraw Hill, 1982.
[7] Chiung Hsin Hsu, George C T, Chen Ching Ta Chuang. An analysis of Wang An Island ecotourism and its sustainable management[J]. J. Fish. Soc. Taiwan, 2005, 32(4): 367-381.
[8] Hasan A. Assessment of rural tourism in Turkey using SWOT analysis[J]. Journal of Applied Sciences, 2006, 6(13): 2837-2839.
[9] Nicos L K, George K. Developing Cyprus as a sport

tourism destination: the results of a swot analysis[J]. Journal of Sport & Tourism, 2002, 7(4): 3-17.
[10] Irandu E M. The potential for cruise tourism in Kenya [J]. Anatolia, 2004, 15(1): 69-86.
[11] Leonidas M, Annakirikaki D G. A community approach to mountain adventure tourism development[J]. Anatolia, 2004, 15(1): 5-18.
[12] Brent W R. Bicycle tourism in the South Island of New Zealand: planning and management issues[J]. Tourism Management, 1998, 19(6): 567-582.
[13] Andrea H. Cultural tourism: marketing challenges and opportunities for German cultural heritage[J]. International Journal of Heritage Studies, 2007, 13(2): 170-184.
[14] Marcel M, Drago R. Marketing identity of the tourist product of the Republic of Croatia[J]. Tourism Management, 1999, 20(5): 635-643.
[15] Grace W P, Eric L. Tourism development of Australia as a sustained preferred destination for Chinese tourists[J]. Asia Pacific Journal of Tourism Research, 2003, 8(1): 37-47.
[16] Trevor H B. Sofield Indonesia's national tourism development plan[J]. Annals of Tourism Research, 1995, 22(3): 690-694.