

烧杯中，先加100毫升水，然后加0.5N NaOH 标准溶液至沉淀完全溶解，再过量约10毫升，将坩埚用水洗涤后取出。加1毫升混合指示剂，用0.25N HCl标准溶液滴定至溶液从紫色经灰色转为黄色，即为终点。同时按上述手续进行空白试验。

结果计算

$P_2O_5\% =$

$$\frac{[N_1(V_1 - V_1') - N_2(V_2 - V_2')] \times 0.002730}{G \times \frac{V_3}{V}} \times 100$$

式中：
 N_1 ——氢氧化钠标准溶液的当量浓度
 N_2 ——盐酸标准溶液的当量浓度
 V_1 ——用去氢氧化钠标准溶液的体积(毫升)
 V_1' ——空白试验所用氢氧化钠标准溶液的体积(毫升)
 V_2 ——滴定用去盐酸标准溶液的体积(毫升)
 V_2' ——空白试验用去盐酸标准溶液的体积(毫升)
0.002730——每毫克当量 P_2O_5 的克数
 G ——试样重量(克)
 V^3 ——吸取试样溶液的体积(毫升)
 V ——提取液总体积(毫升)

参 考 文 献

- [1] 中国科学院南京土壤研究所，土壤理化分析，97—101页，科学出版社，1968年。
- [2] 浙江农业科学院中心实验室，土壤全磷方法的比较。土壤学报，13卷3期，300页，1965。
- [3] Bray, R. H. & Kurtz, L. T., Soil Sci., 59:39, 1945.
- [4] Welch, L. F., Ensminger, L. E. & Wilson, C. M., Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 21:618—620, 1957.
- [5] Olsen, S. R., et al., U. S. Dept. Agr., 939, 1954.
- [6] 史陶均等，酸性水稻土有效磷的测定。土壤学报，16卷4期，409—413页，1979。
- [7] Chang, S. C. & Jackson, M. L., Soil Sci., 84:133—144, 1957.
- [8] 中国科学院土壤研究所磷矿粉工作组，磷矿粉中有效磷的分析和检定。土壤学报，14卷1期，91—93页，1966。
- [9] 北京大学化学系分析专业，分析化学中应用杂多酸的进展。理化检验通讯化学分册，4—5期，84—93页，1976。
- [10] 杰克逊 M. L. (蒋柏藩等译)，土壤化学分析法，153—173, 1964。
- [11] Murphy, J. & Riley J. P., Anal. Chem. Acta, 27:31—36, 1962.
- [12] Watanabe, F. S. & Olson, S. R., Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 29:677, 1965.
- [13] John, M. K., Soil Sci., 109: 214, 1970.

中子测水法在冻土研究中的应用*

章 乃 森

(中国科学院高能物理研究所)

多年冻土地区约占地球陆地面积的26%。在我国东北的大小兴安岭、西部高山和青藏高原地区，分布的多年冻土，其总面积约占我国领土的20%[1]。在冻土地区，伴随着土壤中水分的冻结和融化，发生着一系列奇异独特的冻土现象，如冻胀丘、融冻滑塌，热融沉陷等等，往往造成房屋破坏，道路翻浆，管道折断、变形等危害，严重威胁工矿和交通的安全。因此，必须作好冻土研究勘测工作，掌握冻土层中水分随深度的分布和随季节的迁移等变化规律，测定冻土的季节冻融速率和多年冻土的上、下限等冻土参数是十分重要的。用烘干法测定冻土水分，需要在不同深度的冻土地层中取样，这比在冻土中取样更为困难，为此，需

要采用新的测水方法——中子测水法，以适应冻土地区开发建设的需要。

中子测水法[2,3,4]的优点是：(1) 不需取土样，也不破坏土壤结构可以进行连续和重复测量，便于进行长期定点观测；(2) 测量快速，灵敏度高，一般测一个点的含水量只需1—2分钟，便于进行大面积普查勘探；(3) 根据需要可以进行自动控制，自动纪录，易

* 本工作是作者在兰州大学现代物理系工作期间，1976年4—11月随同中国科学院兰州冰川冻土沙漠研究所青藏高原冻土队，在唐古拉山南侧少年冻土地带进行的。得到冻土队徐学祖、柴家龙等同志的协助。在此致谢。

于实现测量自动化。

一、中子测水法基本原理

中子测水法是根据快中子与土壤相互作用的慢化过程，主要是和土壤中的氢原子核含量有关的原理，用来测量土壤中的含水量。

中子源发射出来的快中子，能量一般为几百万电子伏特。快中子和土壤中各种原子核碰撞时，开始主要通过非弹性散射损失能量。当能量很快降低到不能再使原子核激发后，继续通过弹性散射损失能量。快中子与最轻的原子核——氢核碰撞中，每次弹性碰撞，能量平均要损失一半，需要最少的碰撞次数，即可慢化成慢中子。而且快中子容易与氢核发生作用，即其弹性散射截面较大。因此对于快中子慢化起重要作用的是土壤中的氢原子核。

中子源发射出来的许多快中子，在土壤中，通过慢化和扩散（即向四外迁移）过程，形成了以中子源为中心的慢中子球形分布，称为“慢中子云球”。靠近球心部分，慢中子密度大，离球心越远越稀。在土壤中，除了水分外，若无其他含氢物质时，“慢中子云球”的半径，主要由土壤中的含水量确定，一般变动于十到几十厘米之间。

用中子水分计探头中的慢中子计数管，测量土壤中某点附近的慢中子计数率，即反映该点附近“慢中子云球”范围内，水分分布的加权平均值。在一定源强，效率，几何等条件下，测出慢中子计数率与含水量关系的刻度曲线后，可以在相同条件下，测量土壤中的含水量。

二、中子水分计简介

本工作中所使用的ZS-2型中子水分计是兰州大学现代物理系中子测水组研制的，其原理结构及线路可参阅有关文献资料¹⁾⁽⁵⁾。该仪器属于插入式，由探头、主机、电源三部分构成，略述如下。

1. 探头部分 包括钋—铍($\text{Po}-\text{Be}$)中子源，强度约 10^5 中子/秒。计数管采用北京261厂SZJ-1型BF₃计数管，长度245毫米，坪长150—300V，高压选用2100V左右。前置放大器由两极负反馈放大节组成，放大倍数约100倍。输入偶合电容取56PF/3KV，对输入脉冲有一定微分作用，可提高中子和 γ 本底的分辨能力。探头内、振荡型高压电源为1800—2500V。

2. 主机部分 包括主机电路和定标显示电路。前者由放大器、甄别成形器、计数率仪、检验脉冲发生器和低压电源组成；后者由MOS集成电路十进计数器、译码器及荧光数码管组成。

3. 电源部分 主机电路电压为正20V。定标显示

电路电压为负20V。可共用一乙电池，中间抽头为零，两端分别供给±22.5V（可使用到电池电压下降为±18V为止）。数码管灯丝电压1.5V。由三节一号电池并联供电，因而，适宜于野外工作。

ZS-2型中子水分计的主要性能指标为：

1. 测量固定点含水量，仪器可连续工作八小时，计数率漂移小于±1%。长期多次测量数据重复性平均偏差小于±2.5%。仪器用数码管和计数率表同时显示，每点次测量用1—2分钟，统计误差约为±1%。

2. 探头外径Φ58毫米，长550毫米，重1.6公斤；主机尺寸300×132×140毫米³，重4.6公斤；其他附件如高频电缆、标准石蜡桶、中子源容器、电池等共重约20公斤。

3. 仪器的刻度曲线是兰州大学中子测水组根据实验室模拟实验标定的。预先作成一系列含水量不同的圆型土样，土样直径和高度均约为一米，中间插有钢管（Φ76×9, Φ82×5, Φ89×8毫米）或塑料管（Φ91×12, Φ85×10毫米）。每个土样的含水量都搅拌均匀，并同时用烘干法测定。测量时需将探头中子源部位固定在土样套管中心位置，测出慢中子计数率N_水。为了消除钋-铍中子源衰变的影响，同时测出探头在标准石蜡桶中固定位置的慢中子计数率N_标，以N_水/N_标来标志该土样的含水量情况。将一系列土样的N_水/N_标与相应的用烘干法测出的含水量值作出曲线，即仪器的刻度曲线。多个探头，多次标定结果表明，刻度曲线的实验点在约0.05—0.4克/立方厘米，和0.5—1克/立方厘米两绝对含水量区间。基本上落在两条直线上。因此，将这两个区间的实验数据，用最小二乘法，按两条直线处理，而中间部分则根据实

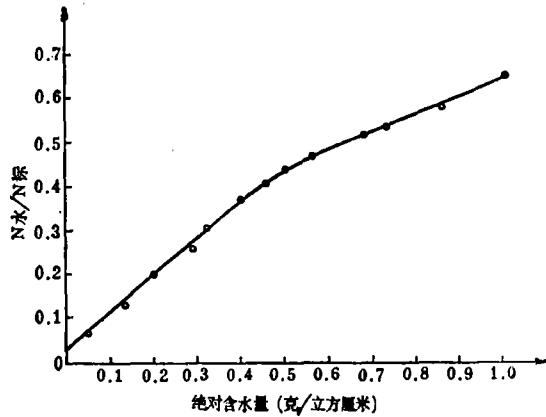


图1 中子水分计刻度曲线

1) 1977年度全国同位素应用经验交流会（哈尔滨）报告，兰州大学现代物理系中子测水组。

验点平滑连接(图1)。这是使用外径76毫米，内径67毫米($\phi 76 \times 9$)的钢套管测定的一条刻度曲线，根据刻度曲线制成刻度表格。在进行中子测水时，测出 $N_{\text{水}}/N_{\text{标}}$ ，即可从刻度曲线或表格中找出对应的绝对含水量数值。

三、中子测水法在冻土地区的应用

在中国科学院冰川冻土沙漠研究所的要求和支持下，于1976年4—11月，利用ZS-2型中子水分计在青藏高原唐古拉山南侧海拔五千米左右多年冻土地区，进行了长期定点观测和大面积普查勘探。对14口钻井，进行70余井次，共约2000点次的测量。实践证明，中子水分计具有小型、轻便、省电、操作方便等优点，在高原、负温、潮湿、雷电等恶劣气候条件下，能够正常工作。利用中子测水法，在冻土地区进行测量工作，不仅比烘干法节省大量艰巨劳动，而且可以测量一些过去难以测量的冻土参数，用以研究冻土现象和变化规律。在多年冻土地区进行7个多月的现场实测，摸索了一些经验，总结中子测水法在冻土参数测量上，可以作以下几方面工作：

1. 定点长期观测

在冻土地区选定井位，作定点长期重复观测。监察冻土地层各个深度中含水量随时间的变化规律，这对于冻土地区热平衡计算，研究冻土发育，提供长期

预报等有重要意义。我们在青藏高原多年冻土南界某地几个测井中进行了长期观测。5—10月间，在每个测井的十多次测水曲线分析中，得知冻土深部各点数据变化不大(图2)，平均变化在 $\pm 2.5\%$ 以内，变化最大值约 ± 0.01 克/立方厘米。如果该处含水量基本不变，则这一变化即反映仪器多次测量重复性误差，其中包括仪器长期漂移 $< \pm 1\%$ ，统计误差 $\pm 1\%$ ，而主要是测量几何条件的不重复性造成的误差(约 $\pm 2\%$)。由于所测多年冻土上部季节冻融地层，含水量变化较大，每立方厘米可达零点儿克。因而仪器可以满足冻土地层含水量长期定点观测的要求。

2. 融深测量

融化季节，某一时间的瞬时融深与最大融深的比值，反映融化速率，是冻土勘测中需要测量的一个参数。由于水分下渗到冻融界面时，不易再下渗，因此在适当的条件下，在融深处，水分随深度分布曲线上会有突起，随着融深下移，这个突起也会下移。这在长期定点观测各条测水曲线比较中，较易观察到。特别在多雨季节，水分下渗较多，而原地层含水量又不很大时，在某些测井测水曲线融深处可能发现有明显的峰值。图3表明某测井的多次测水曲线，峰值随时间移动情况。中子法和用冻土器测量结果基本符合(图4)。但是，用中子法测得的融深略深一些，分析原因可能是沿钢套管热传导较快，而使钢管附近冻土比远

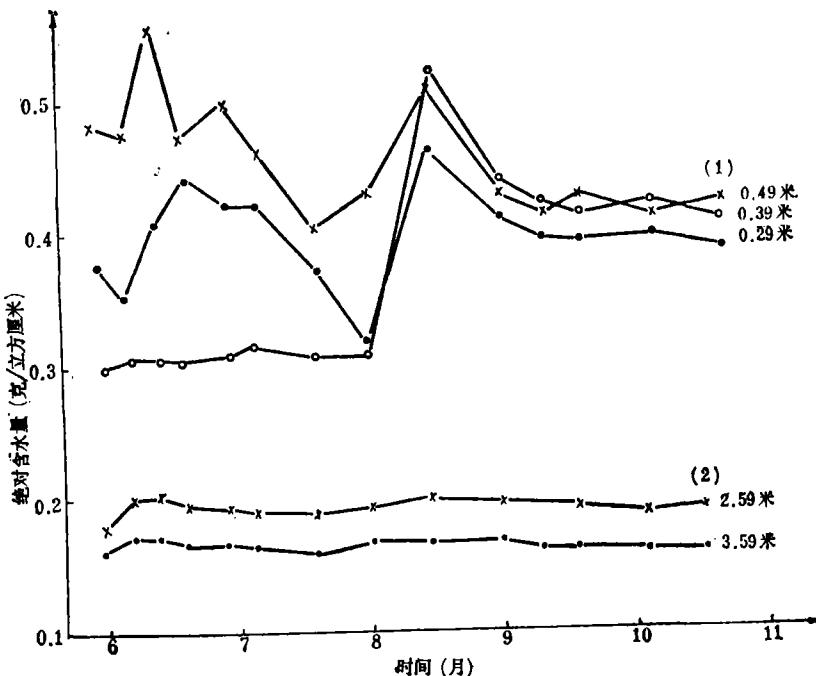


图2 某测井冻土层中含水量曲线

(1) 冻土上部季节冻融地层(0.29米, 0.49米, 0.89米)
含水量随时间变化大。

(2) 冻土深部地层(2.59米, 3.59米)含水量随时间基本无变化。

处融化得较早一些。

3. 多年冻土上限埋深测量

多年冻土顶板埋置深度，即为多年冻土上限。上限埋深随当地纬度、海拔、地貌、地表状况和土壤颗粒情况及含水量而异，由几十厘米到几米。各地区上限埋深资料，对冻土工程，科研都很有价值。过去测定冻土上限埋深是靠坑探，劳动量很大，难以进行，中子法则可避免坑探。由于冻土上限位于衔接多年冻土每年的最大融深处，多年的冻融过程中，水分向冻结面迁移，因而在上限附近含水量有聚集现象，而且常有冰层，夹冰层存在。反映在测水曲线上，上限处应有含水量峰值，据此，可以判断上限埋深。经验表明，在冻土上限附近的水分分布，大致可分为三种情况。

(1) 上限处有薄冰层：在冻土边缘地带，上限处常有冰层，但很薄。反映在测水曲线上，有一尖锐的峰值。这时较易判断上限埋深(图5)。

(2) 上限以下有厚冰层：在冻土腹部地区，上限以下有时存在厚达几米的冰层，这时在测水曲线上有很宽的峰值(图6)。

(3) 上限处有一些分布的冰晶，没有明显的厚冰层，这时上限附近测水曲线峰值较宽，但绝对值不大。

上述三种情况，均可按测水曲线峰值半高度上全宽度的上沿(图5、6)以下约0—10厘米处，同时参考测水曲线形式和根据其他经验，最后估计上限埋深。用这种方法判定的上限埋深，多次与坑探结果相符合。

4. 多年冻土下限和季节冻土的最大冻土深度测量

多年冻土底板的埋置深度，称为多年冻土下限。下限以下为融土层。冻土腹部地区，下限埋深一般很大，难以测准，而下限或季节冻土最大冻深的研究，对掌握冻土发展趋势却很关键。中子法测量表明，和上限处相似，在多年冻土下限或季节冻土最大冻深处，也有水分聚集现象。在冻土边缘地区某测井5.8米深处，中子测水曲线上又有一尖锐的峰值(图7)与测温法估计的最大冻深位置相符合。

图7所示，青藏高原多年冻土地区南侧海拔4839米处某测井，中子测水曲线上三个尖锐的峰值，反映了当时的融深(与实测结果相符)，上限埋深(与理论计算及坑探结果一致)和下限埋深(与测温法所得结果相符合)。表明了中子测水法在冻土参数测量中，得到的典型结果。

根据以上实测结果，可以认为，中子测水法在冻土工程中，研究某些工程兴建后，而引起的人为

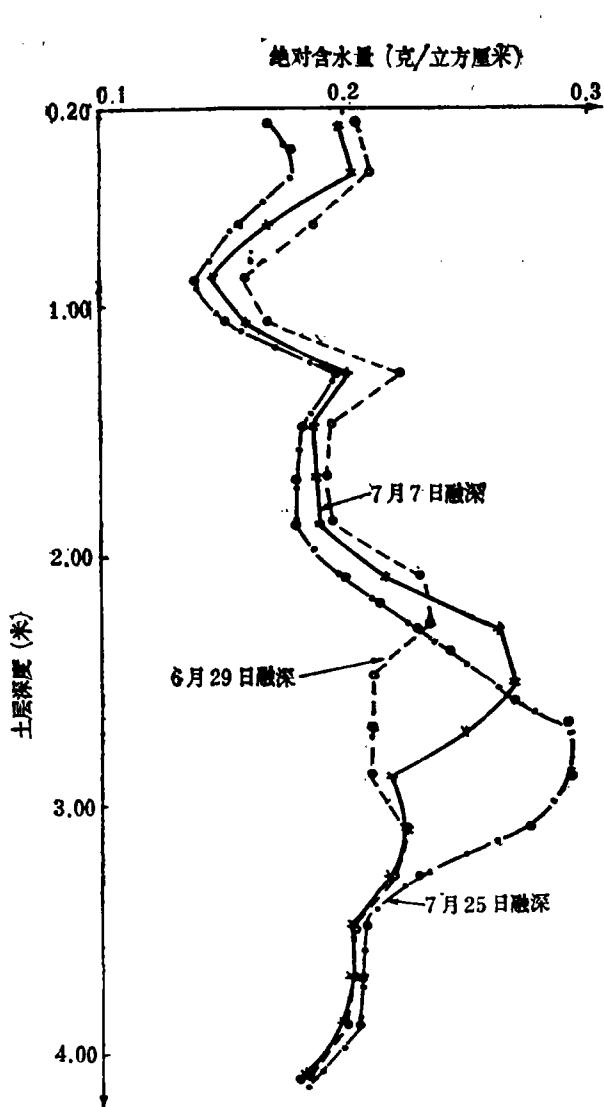


图3 中子测水曲线峰值随时间移动情况

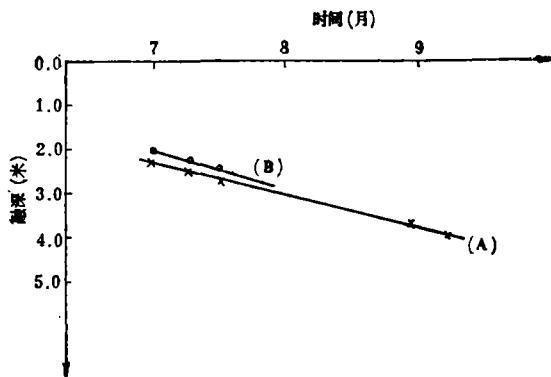


图4 中子水分计(A)及冻土器(B)所测融深随时间变化曲线比较

上限形成过程与结果，冻土保温材料对冻土水分迁移的影响，以及冻土地质普查勘探等方面，都具有广泛的应用价值。

四、存在问题与改进意见

冻土现场测量结果说明，中子测水法在冻土工程、科研中基本上是适用的，但目前应用的设备还应改进：

1. 为了进一步减轻工作人员的劳动强度，应增加测井自动升降和自动纪录设备。

2. 为了提高测量的稳定性，并减少中子和 γ 射线的照射剂量，应改用镅铍中子源（半衰期458年），或脉冲中子源。

3. 为了适应冻土工程和一般土建工程中浅层勘测的大量需要，应考虑进一步减小探头尺寸，仪器重量，与触探结合和不用套管进行测井等的可能性。

4. 为了提高中子水分计的位置分辨率[6]，以便更准确地掌握地层中含水量变化情况和上、下限位置，应采取小灵敏体积，高探测效率的慢中子探测器。例如，可试用厚度小于1厘米的玻璃闪烁体等。

5. 掌握中子法测水工作，需要对中子源及一般同位素防护剂量，安全使用有一定了解，也需对放射性及射线探测有基本了解。因此，实际使用部门，需要固定专人，进行专业知识的短期培训，以便正确认识与使用同位素中子源，防止发生事故。

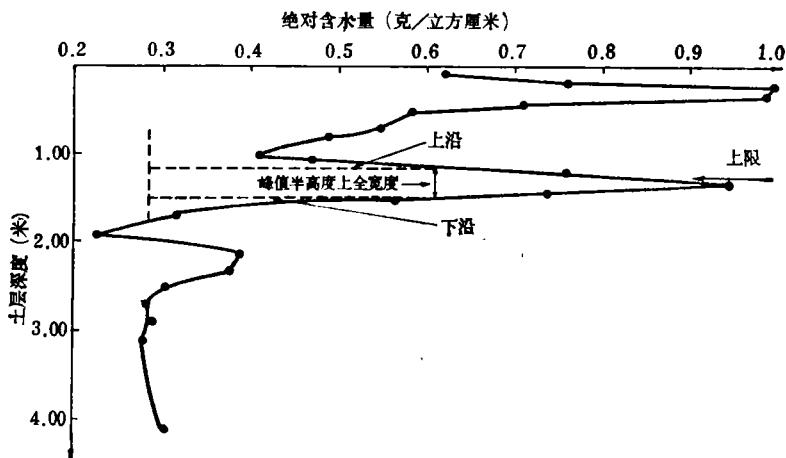


图5 上限处有薄冰层时的测水曲线

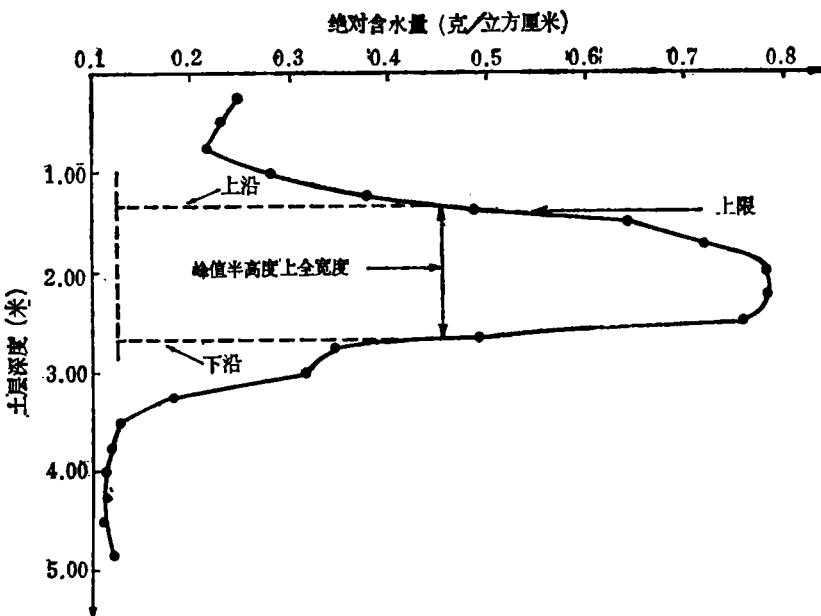


图6 上限处有厚冰层时的测水曲线

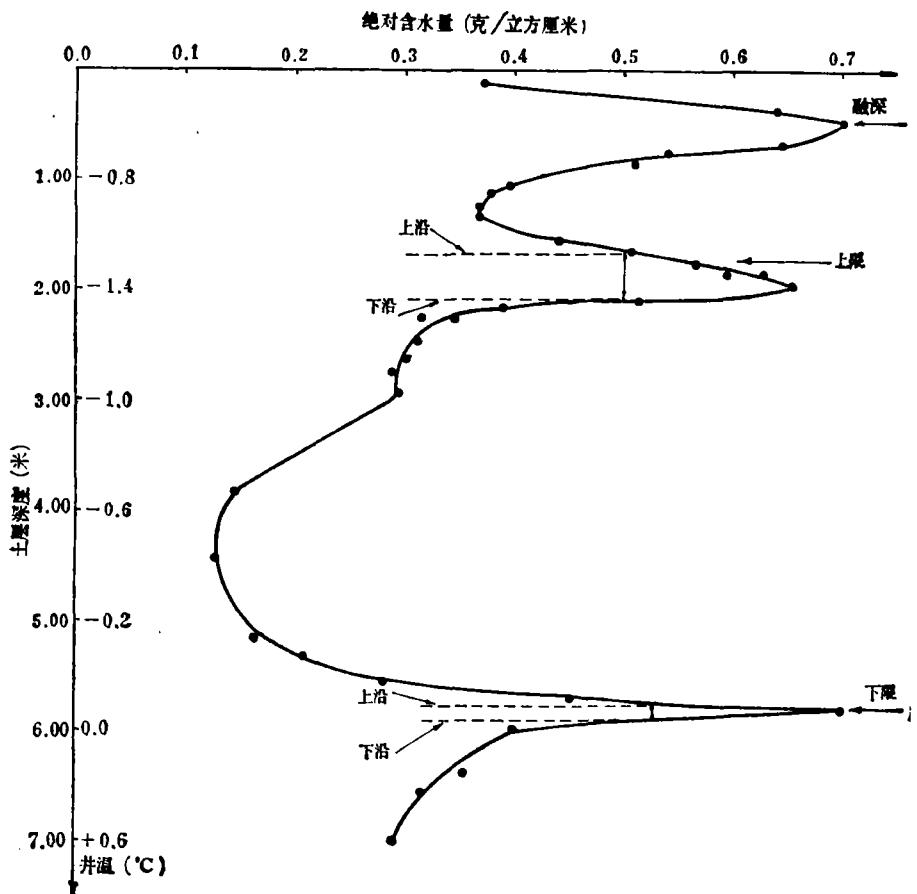


图7 多年冻土地区某测井用中子法测得的水分曲线

目前，国内同位素中子源的产生、获得、运输与使用上都还存在一定的困难，中子测水法的使用，还只能限于某些特殊的课题或工程之中。在中子源问题解决后，预期可在更多的领域得到进一步的推广使用。

参 考 文 献

[1] 中国科学院兰州冰川冻土沙漠研究所著，冻土，科学出版社，1975年。
 [2] 叶美里扬诺夫等(王玉常译)，土壤湿度中子测量法

及其前景，同位素应用译丛，第3期，24页，1964年。

[3] Gardner, W. and Kirkham, D., Soil Sci., 73, 391, 1952年。

[4] Stewart, G.L. and Taylor, S.A., Soil Sci., 83:151, 1957.

[5] 兰州大学现代物理系中子测水组，冻土勘测用中子水分计，物理，7(3):175, 1978年。

[6] Lawless, G.P. et al. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 27(5):502, 1963.