

用伽马射线测定土壤的含水量

水利部北京水利科学研究院译印

(56) 技字第10号

用伽马射线测定土壤的含水量

(ИЗМЕРЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ ПРИ

ПОМОЩЬ ТАММА-ЛУЧЕЙ)

А. И. 达尼林著

研究并控制土壤的水分状况乃是提高农业生产的一项重要因素。

在集体农庄和国营农场的多数农业气象站和试验站里用机械观测所得的土壤含水量资料是研究土壤的水分状况以及使水文气象有效地服务于农业的原始材料。

我们知道，测定土壤含水量最普遍的方法是称湿法或称重量法，即称量土样湿重及其烘干后重量以确定土壤含水量，但重量法极为费事，而且取之于某一深度的土壤要重复取四次以上的土样才能得到足够精确的含水量数据。

由于土样要在恒湿器中持续烘干，称量工作又很细致，故不能用此法得到野外含水量的资料。此外，用此法测定含水量时土壤结构要受到破坏。因此创立一种可以在野外测定土壤含水量的可靠而有效的方法，使得在测定含水量时不必自土壤中取出土样，也不会破坏土壤的结构，这样的任务是有重要的意义的。

所以，不必取土样而测定土壤含水量的方法及仪器有下面几种：

1) 电气法，此法主要是测定与含水量有关的土壤的导电率或欧姆电阻（根据插入湿土介质中的电解质，玻璃纤维以及各种陶瓷和石膏材料的电阻）或者是测定放入土壤中的一对通电电极的电势；

2) 电介质法,

3) 热学法, 其中作为含水量衡量标准的是导热性、热容量、导湿性或一些热学因素的综合 (A. Ч. 楚特诺夫斯基标准);

4) 根据土壤的《吸力》测定其含水量的方法;

5) 放射线法: 一种是中子法, 此法主要是利用含水介质的减慢快速中子使之成为慢(热)中子的性质; 另一种是新的伽马法, 此法主要是测定伽马射线穿过土壤时的减弱程度。

这些方法中前途最大的是伽马法和中子法。

由于土壤结构的不均匀性, 以及其紧密度, 毛细性和吸湿性的差异, 使得土壤对于雨水和融雪水具有不同的性质, 其地下水的上升也各有不同。由于这些原因, 故土壤中水分的分布是不均匀的。因而所有我们所知道的方法和仪器都祇能以某种精确程度测定土壤不同深度局部桌上的含水量。土壤含水量的这种局部测定, 往往有可能是偶然的, 并且不能代表所测定之土壤。我们知道, 在农业气象站里为了得到更可靠的土壤含水量资料, 每一深度的土壤要重复取四次以上的土样。然而用这种方法无数次测验含水量的经验告诉我们, 个别土样的含水量值与四次测验的平均值之间相差达10%以上。

下表中在1953年春夏季和秋季在农业气象站测定的含水量数据可以作为这种情况的说明(表1), 测定是在1953年播种的点麦地, 1952年播种的冬黑麦地以及1951年播种过三叶草1952年又播种冬小麦的地上进行的。

表1

农业气象站名称	测定土壤含水量的次数	与平均含水量有差别的次数						与平均含水量的最大差数(%)
		2-1	1-2	2-3	3-4	4-5	7-5	
加里宁省的托尔若克农业气象站	399	163	115	53	26	16	16	12.3
斯摩棱斯克省的绍基诺农业气象站	398	205	107	42	16	12	6	12.5
里里诺省的米哈依诺夫农业气象站	346	209	83	21	9	4		4.6
里里诺省的杜马农气象站	384	191	92	53	22	14	12	9.7
共 计	1517	798	397	169	73	46	34	—

根据这几个农业气象站对全一深度处土壤含水量作37-40次测验统计所得的平均平方差和或然差为0.61到2.2。

以上用烘干和称量土样的方法来测定土壤含水量的精确性方面的资料说明，若所取的土样不超过四个，那末用这种方法测定土壤含水量其精确性不会大于1.5-3%。

这里要适当地指出，所有其他测定土壤含水量的方法都是与这种绝对法相比较的，而对于测验的精确性也是根据用烘箱进行的不精确的（由于土壤中水分的分布不均匀）检查测定来估计的。因而，如果检查方法是用的《恒温》法，那末对于所有新的测验仪器和测验方法就都不能要求它们有比绝对《恒温》法更高的精确性。

由于考虑到不损坏土介质的测定土壤含水量的方法还远未

获得解决。故我们嘗試用伽马射线来测定它，并且进行了一些实验研究：

当佈置这个任务时通注意到下面一些情况：

伽马射线穿过某种介质时会有所减弱，减弱程度与它们的能量以及射线所穿过材料的厚度和密度有关。假设伽马射线穿过干土时的减弱程度为一常数，那末在保持地质学的和测量条件的情况下，其附加减弱乃是土壤中的水分所引起的，不管这种水分是什么方式进入土壤的。

用伽马射线测土壤的含水量可以量出土壤某一层中的水份含量，也就是说可以得出这一层中水份的全量，这一点对农业来说是特别重要的。

用伽马法测定土壤的含水量可以不破坏其天然结构，不必采取土样。

此法不必用土簪采取土样，不必做称量、烘干和计称的工作，可以大大减轻土壤含水量测验者的劳动。

此法可以直接得出以公厘和公分水层计的土壤含水量值，因而使其更为有效。

用伽马法测土壤含水量的精确性可以高出控湿法，因为此法并不量得出土壤某一点的含水量而是得出某一层中的含水量。

最后，伽马法在必要时还可以连续观测土壤含水量的变化，而这一点对科学研究是特别重要的。

系统地测定土壤某一层中的水份含量可以解决关于计称土壤不搅动表面蒸发的问题。这个问题目前是用人工制造的蒸发器来解决的，而蒸发器中的整体土样是与周围的介质隔绝的。

对于单色的伽马射线束而言，它们的散射以及为物质反子的吸收系数服从于指数定律，后者以公式表示如下：

$$I = I_0 e^{-\mu d} \quad (1)$$

式中 J_0 —— 伽马射线的开始强度；

J —— 伽马射线穿过厚度为 d 的物质之后的强度；

μ —— 该物质的线性吸收系数；

d —— 物质层厚度，以公分计。

当伽马射线光谱复杂时，它的减弱是由每一单色光束的吸收所组成的。除了伽马射线减弱的线性系数外在计算中还利用俘获吸收系数

$$\frac{\mu}{\rho}$$

式中 ρ —— 物质的密度，

这个系数的尺度为平方公分/克，它表征伽马射线通过每一平方公分含有一克物质的层时所产生的减弱。它与物质的状态无关，这一点对测定土壤含水量特别重要，因为土壤可能是松的，也可能是紧密的或是其他状态的。

有时也应用伽马射线减弱的原子系数 μ_a 或电子系数 μ_e ，它们表征一个原子或一个电子对伽马射线的吸收。伽马射线被其所通过的物质所减弱，是相当复杂的过程，它决定于三个因素：

a) 光电效应 —— Z ；

b) 康普顿散射 —— G ；

B) 偶正对的形成(电子，正电子) —— X ，即 $\mu = Z + G + X$ 。

作为伽马射线放射线源用的是钴的同位素 $^{60}_{27}\text{Co}$ ，它的半衰期是 5.3 年，它所放出的伽马射线比较均匀，平均能量为 1.25 MeV。同位素 $^{60}_{27}\text{Co}$ 是一种很便宜的放射线源，因此用来测定土壤的含水量最适宜。试验中所用的放射线制剂其活度为 10.5 mCi 和 8 mCi。

放射性钴 ($^{60}_{27}\text{Co}$) 所放出的能量为 1.33 和 1.17 MeV 的伽

马射线在土壤中的主要损失是因康普顿效应所损耗的，康普顿效应乃在于伽马量子与原子中电子的相互作用。我们知道，这种作用的结果就出现带较小能量的散射的伽马量子以及获得一部分伽马量子的能量后从原子中跑出的反射电子。在康普顿效应中一部分反给的伽马量子以散射伽马量子的形式跑出线系以外。

含有水分的土壤湿度极不均匀的，因此为了确定伽马法对测定含水量的适合性，不得不采用不同含水量的土壤进行了无数实验。

试验起初是用 MC-64 型换称器作为测定设备，在这种换称器中装有 MC-4 型伽马量子计数器。计量的统计是用 CB-1 型电动计数器进行的。试验内容如下。

重 1—3 公斤的干土置于铝制圆筒内，圆筒则放在盛有同位素 C_{60} 的镀锌容器中。镀锌容器有一放射伽马射线束的孔，它刚好对准圆筒底的中心。因而伽马射线的方向属于圆筒的轴线。在土壤上面的台架上放有伽马量子计数器。开始来计数伽马射线通过干土时 5 分钟时间内的伽马量子（二次或三次），以后则在土壤浸湿 5、10、15% 后进行计数，如此等等。

1953—1954 年冬在水文气象仪器科学研究所开始进行的试验表明，用伽马射线法来测定土壤的含水量是完全适合的。

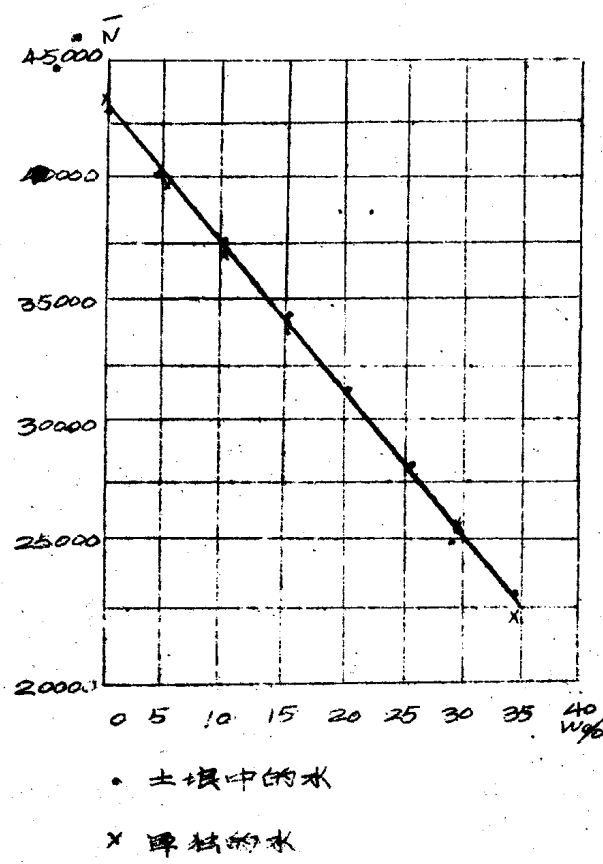


图1,伽马射线通过不同含水量的壤土灰(各为32公分厚)时其强度的变化。

图1所示为伽马射线与壤土(32公分厚的土灰)含水量间的关系图。这里应该指出,同样的水灰不管是在土壤中被单独存在时,它们所引起的伽马射线的减弱量是一样的。

图1中伽马射线的减弱程度,为土壤中所减弱者以圆圈表示,为土壤外水所减弱者以十字表示。

图1所得到的曲线乃是指数曲线并服从于公式(1)。

表2所示为伽马射线被黑钙土中的水分及单独的水分所引起减弱的体系数,它们是在试验室的条件下得到的。

从表2中可以看出,因土壤中水分所引起的伽马射线减弱的体系数是与单独水所引起的值一致的。

表 二

土壤中的水分 公分	减弱系数	土壤中的水分 公分	减弱系数
2	0.049	2	0.052
3	0.054	3	0.053
4	0.054	4	0.052
5	0.051	5	0.053
6	0.050	6	0.051

对于其他土壤中的水分这个系数也是一样。因此同一水分既存在于那一种类的土壤中而引起该能量的伽马线发生同样的减弱。这种情况有力地证明了用伽马射线来测定土壤含水量的可能性。

在野外测定伽马放射性我们是用最简单的计数伽马量子的速度计量器。这种计量器的特点是总共只用一个真空管，无独立的阳极电压。

图2所示为这种仪器的原理图。从此图可以看出，测验开始时正电势从小型高压电池进入2П1П型三极真空管的屏极和阳极。在电离放射的作用下电流的反脉动从伽马量子计数器管的阳极进入由电容器C和电阻器R所组成的积累电路进入真空管的阳极。

电容器C上所积累的电荷愈大则真空管阳极上的反电势愈高，而电荷的积累又与电离放射的强度有关。在真空管的线路中有一指示仪（微安培表），+6——+7伏特的正电势通过此指示仪而进入网络。当电离放射不存在时电流为最大。在电离放射的作用下阳极上的反电势将使网流减小，减小的量用来度量电离放射的强度。

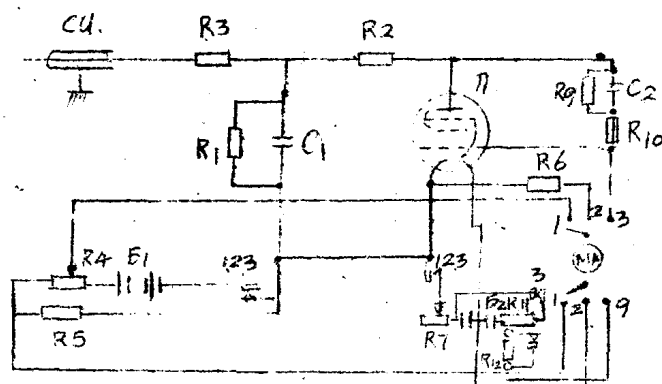


图2. 测定伽马射线强度的原理图。确定土壤中含水量及雪及中水的蕴藏量用。

为了稳定微安表的指针及减小其因电源放射率伏所引起的摇摆，在阳极网电路中接入 15 nF 左右的电容量，这样就提高了测验的精确性。

为了使通入伽马量子计数管及射线电真空管阴极的电压保持不变在仪器中用同一的微安表来控制这些电压。

控制电压便减小了因电压不稳而可能发生的误差，电压的不定是随着电池的衰变及消耗而发生的。真空管在网路中的移动也是被控制的。

测验时仪器的开动及控制电压时微安表的开动是用开关进行的。原理图上的数字表示各别电路的电键。

仪器安装在一块平板上。平板则固属于小箱内。

此仪器可测定土壤各种范围内的含水量；从田间持水量到绝对干的土壤，精确度为 15% 。

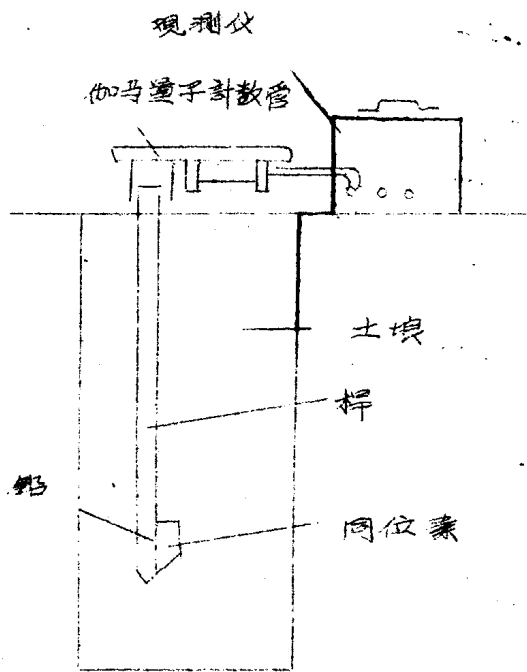


图3，在土壤中装置带放射性 Co^{60} 的杆及装置伽马量子计数管夹持器的草图，固定观测用。

用伽马射线测定土壤的含水量可以有二个方案。第一个方案是根据垂直伽马射线束的减弱测定50公分深度以内的土壤含水量。第二个方案可以测定1.5—3公尺以内的土壤含水量，这时系根据水平伽马线束的减弱。

测定50公分深度以内的土壤含水量系往土壤中打入一金属杆（图3），杆的末端有一尖的突出部分，其中有一容器放置钴的放射性同位素。杆的上部则装有伽马量子计数管的夹持器。金属杆打入土壤以后转动 90° ，以便突出部分下端的截面进入不扰动土壤。打杆入土时所形成的缝隙以土壤轻轻压实。金属杆在所有的观测时间内都留在土内。

当观测时将伽马量子计数管装在夹持器内，并藉软电线与仪器接通。仪器上预先定好刻度，以确定微安培表与刻度的值，也就是说确定土壤中加入多少厚的水灰（公厘）才能使仪器

指针移动一 刻度。仪器要计算并使土壤中的水反移动1 公厘相当于指针转动1 或15 刻度。

当金属焊安进土内时将支持器装于焊上的金属管垂直移动以选择计数管离开放射线源的最合适距离。后者是这样计算的,即要使仪器指针停在接近于所测土及内水的蕴藏量的刻度上。例如在20公分土及中水的蕴藏量等于40 公厘则计数管离开放射线源的距离是仪器指针停在刻度40 上。这种严格规定的计数管离射线源的距离在以后整个观测时期都保持不动。开始观测前需用烘箱法确定土及中的水分蕴藏量,土样系用土钻取自带同位素 $^{27}\text{Co}^{60}$ 的铁焊附近,取2—3 个。取土样要达到放置放射性同位素 Co^{60} 的深度。这焊所得到的土壤中水的蕴藏量就作为以后观测的原始(基准)量。

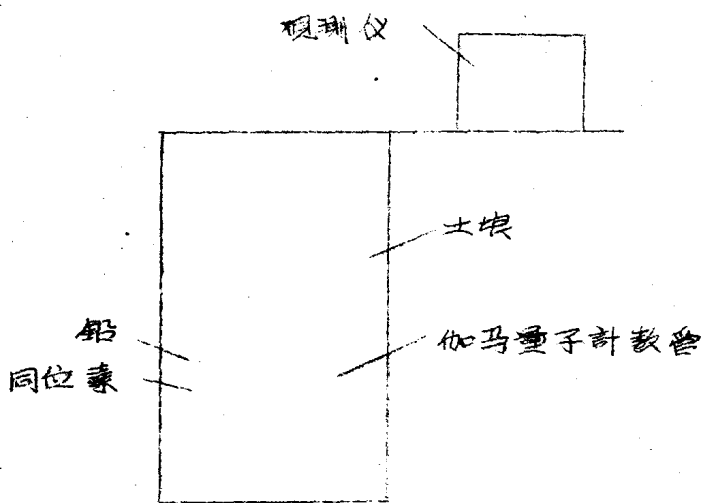


图4. 用水平伽马射线 测定土壤含水量
时在土壤中装设管子的草图

例如, 若在30公分深土壤中放置同位素时, 此处的持水量为80公厘, 而这时仪器指针则位于刻度70处(每一刻度相当于1公厘水反)。如果在以后的观测中指针跑到另一刻度处, 例

如刻度50处，那末就說明30公分深度处的土壤水分蘊藏量減小了20公厘。

强烈的风暴或暴雨能够刮走或冲掉一部分放射线表上面的土壤，这可以影响到測驗含水量精確性。遇到这种情况时可采用烘干法重复度量含水量。

用第二个方案測土壤含水量可以測定深度2—3公尺以内的含水量，这时需要在土壤中垂直設置两根由塑料或其他材料做的管子，它們间的距离为30—40公分（图4）。这两根管子在整個观测时间内都留在土内。測驗土壤含水量时在—根管中放入同位素 C^{60} 到需要的深度，另一根管中則放入計数器，放到同样的深度。計数管与仪器是连接的。不难看出，由于伽马放射源和伽马量子計数管可以放到任一深度故可以測定任一深度处的土壤含水量。这个方案中总共只需要一分 C^{60} 制剂，它可以装在容器内从一个地段移到另一地段。

測驗可利用土壤湿度計的抽管。在开始用水平伽马射线測驗土壤含水量前也必须采取檢驗性試样而用恒湿法确定其含水量以便针对以后进行測驗的深度确定土壤含水量若用水平伽马射线測定土壤含水量，风暴或暴雨冲走一部分土壤并不会影响其精確性，因为在伽马射线所经过途径中的土体几乎是固定不变的，祇有在上层的土壤其密度才可能发生不大的变化。

試驗室的实验結果指出，不同土壤中的同样水及其所引起的伽马射线的減弱是一样的。图5所示为仪器讀数和水分含量间的关系图，系指庫尔斯基黑土及莫斯科壤土。作試驗时是取二个干土样，重各2公斤。土样装在同样的鋁制圆筒内放在一只盛有同位素 C^{60} 的容器内，在圆筒上面的棒上装有伽马量子計数器。

最初系量伽马射线穿过干土壤时的伽马放射性强度，以后

則量每次潤湿后的强度。从圖上可以看出，土壤中水分与百分数含水量及仪器讀数間是很一致的。这兒得到的不是指数曲线而是一根直线，这是因为測驗系在接近于直线的指数曲线段上进行的；同时还因为伽马射线束相当寬广。圖6所示为用伽马法在野外測驗土壤含水量以及用烘干法測驗土壤含水量的結果。測驗是1954年夏秋在莫斯科附近的希恰克地方进行的；檢驗性試样是圆柱形的，取自土壤中放同位素 C^{60} 附近的同一深度（40公分）并經仔細烘干。从圖上可以看出，个别点子与所得直线的偏差不超过1%，这主要是属于檢驗（恒湿法）的不精确性。

仪器刻度

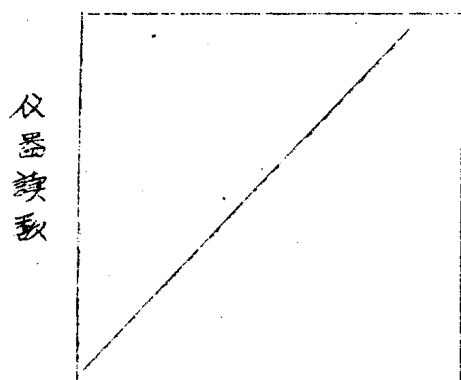


圖5

公厘水
%含水量

測驗伽马放射性隨土壤和
黑土中水分含量而变的仪
器讀数

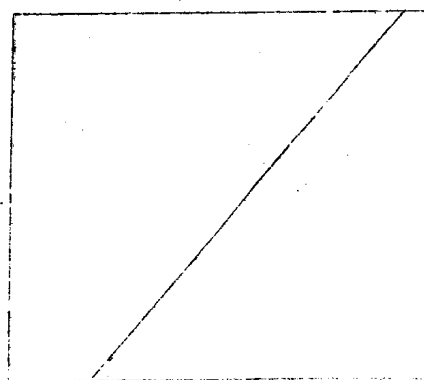


圖6

土壤含水量%

測伽马放射性的仪器讀数
与土壤百分数含水量之間
的关係

如果用伽马放射性仪測耕耘前的土壤含水量并在同一地方測土壤耕耘后的含水量，那末并不需要作耕耘土壤所引起的檢查性測驗。由于耕耘时土壤被帶走一部分所引起的仪器指針的移动是可以估計出来的。用放射性 C^{60} 工作时必须遵守規定

的防护办法。

但是改选测定土壤含水量时系应用活度不大 (10 mC 以下) 的制剂, 而且它们是放在能减弱伽马放射性的土壤内: 因此持有仪器的观测者位于离放射源 $70—100$ 公分的地方就是安全的。伽马制剂活度的选择与它们在土壤中的埋置深度及土的密度有关。深度达 $40—50$ 公分时制剂的活度应为 $10—15 \text{ mC}$ 左右, 深度为 $15—25$ 公分时约为 4 mC 。为了使用放射源伏所引起的误差小于 0.5% , 用仪器计称冲量的误差应为 $8000—26000$ 冲量/分钟。

因伽马法可以得到土壤这层或那层中含水量的最可靠资料。

用伽马法主要可以在固定的野外条件下当放射源与计数管间的土体固定不变时测定土壤的含水量。前面讨论过的在土壤中放置 ^{60}Co 同位素的方案可以达到这一点。在这种情况下只有土壤中水分含量的变化才能在伽马放射性强度的变化中引起误差。

对于一次行军式地测定土壤的含水量而言这种方法是不适宜的, 因为每次将带放射源的金属棒插入土时影响伽马放射性减弱的不仅是土壤中的水分含量而且还有土壤的密度。然而改选这种或那种土壤的比重变化颇小, 故在行军情况下用伽马法粗略地一次测定土壤的含水量也是可行的。为此应针对每一深度仔细率定仪器以计称土壤本身对伽马放射性的减弱。

用中子法测定土壤的含水量也颇诱人, 此法乃是根据含水介质能将快速中子减到慢(热)中子速度的性质。

揭露及测定热中子的密度度係应用 $\text{B}^{10} + n \rightarrow \text{Li}^7 + \text{He}^4$ 型的核子反应, 这种核子反应结果所引成的锂核子和氦核子向两个正相反的方向飞开, 这时它们的能量前者为 0.9 , 后者为 1.16 MeV 。它们并发生电离。

我们知道，热中子的计数器中系装填三氟化硼(BF_3)。

B. 加尔特涅尔和乃克利克希姆(4)曾用钋和铍的混合物作为中子源来测定土壤的含水量。此中子源能发射不同能量(最大约为5.2 MeV)的中子，其半衰期约为140天。

由于土壤中的氢不仅存于水中而且还存在于有机质中，故用中子法难以精确地测定土壤中所含的水量。虽然某些作者认为土壤腐植质中氢的含量不到腐植质重量的5%。

加尔特涅尔和克利克希姆所得到的计数冲量与土壤含水量的关系曲线指出，散离曲线的误差达3—5%。

目前中子法的大缺点是当测验时计数器必须受200—1300伏特左右的电压。但是核子测验技术的迅速发展将使我们的有可能用中子法来测定土壤的含水量。

结 论

1. 测定野外土壤含水量的伽马法已经在试验室和野外条件下研究出来并作过初步试验。伽马法可使我们得出土壤含水量的资料而不搞坏土壤的结构并不掘取土样。

2. 此法可以测得固定条件下三公尺(或更多)深度内任意土壤的土壤含水量资料。

3. 用伽马法测定土壤含水量的精确性并不小于绝对法(恒温法)，可能还要高些，因为伽马法可以包括土壤中的水分含量而恒温法所测定的只是土壤中某个别点的含水量。

4. 在测定土壤含水量时用来测验伽马放射性的轻便野外仪已研究出来。