

μ 值对 γ 透射法测定土壤含水量精度影响

王文焰 张建丰 汪志荣

(陕西机械学院水利水电学院)

摘要 水的质量吸收系数 μ 在 γ 透射法测定土壤含水量中起着重要的作用, 它直接影响着含水量的测量精度。本文通过室内试验研究了影响 μ 值的各种因素, 如探头屏蔽状况、探头与放射源间的距离、放射强度以及被探测物体的厚度等。和理论计算不同, 对同一确定的材料, μ 值的测量结果并不总是常数 (依赖于上述诸因素)。所以要得到土壤含水量的一个精确测量, 首先要在同样条件下测定 μ 值。作为对试验的总结, 本文给出一种合理测量 μ 值的方法和最佳工作条件。

关键词 水的质量吸收系数, 土壤含水量, 测量精度, 探头屏蔽

中图分类号 S152.7

1 问题的提出

γ 射线在穿透质地和密度一定而厚度为 L 的土体, 能量衰减程度主要取决于含水量大小。根据 γ 射线的衰减程度服从指数规律, 可导出测定土壤含水量的基本关系式^[1]:

$$\Delta\theta = \frac{1}{\mu L} \ln \frac{I_0}{I} \quad (1)$$

$$\theta = \theta_0 + \Delta\theta \quad (2)$$

式中: θ ——欲测某点的土壤容积含水量(cm^3/cm^3);

θ_0 ——该测点已知初始土壤容积含水量(cm^3/cm^3);

$\Delta\theta$ ——该测点土壤容积含水量的变化值(cm^3/cm^3);

I_0, I ——分别为所测 γ 射线在穿透土体含水量变化前后的衰减强度, 以单位时间所测脉冲数表示;

μ ——水的质量吸收系数(cm^2/g);

L —— γ 射线穿透土体的厚度(cm),

根据误差传播原理, 由式(1)进一步可得出土壤含水量变化值 $\Delta\theta$ 的相对误差表达式如下^[2]:

$$\frac{d(\Delta\theta)}{\Delta\theta} = \frac{d\mu}{\mu} + \frac{dL}{L} + \frac{dI_0/I + dI/I}{\ln(I_0/I)} \quad (3)$$

该式表示了土壤含水量的测量相对误差为右端三项因素的相对误差之和。由此可见, 提高土壤含水量测量精度, 其途径就在于尽可能地减小这些因素的测量相对误差。

研究土壤水分的动态规律,常需测定土壤水分在时空上的变化及分布。对于空间的任意一个测点来讲,穿透含水量为 θ_0 的土体 γ 射线的衰减强度 I_0 仅有一个,若在不同时刻($t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$)测定 θ 的变化值 $\Delta\theta_1$,则有一系列值 $\Delta\theta_1, \Delta\theta_2, \Delta\theta_3, \dots, \Delta\theta_n$,这时测量的 γ 射线衰减强度 I_t 也相应有一系列值 $I_1, I_2, I_3, \dots, I_n$ 。由式(1)可看出,对于任一测点,任意一次含水量 θ_t 的测量,相应的 I_t 值测量误差的大小,只影响到这一次的土壤含水量的测量精度;而对任一测点 I_0 的测量误差,将影响到该测点所观测的每一次含水量的测量精度。由于在每一个测点的任意一次土壤含水量的测量计算中,都涉及到 μ 及 L 值,因此水的质量吸收系数 μ 及 L 值的测量误差将影响到所有测点的每一次土壤含水量的测量精度。由此可见, μ 及 L 值的测定正确与否将影响整个土壤含水量的测量工作。

关于减小测量 γ 射线穿透土体后的衰减强度 I_0 及 I 的相对误差问题,已在文[6]中作了讨论。本文在试验研究的基础上着重分析讨论 μ 值的测定方法及影响因素,旨在提出测定 μ 值的合理方法及工作条件,以保证土壤含水量的测定具有足够的精度。

2 水的质量吸收系数 μ 值的测定方法

水的质量吸收系数 μ 值,理论上可以根据康普顿效应等原理进行计算,由放射源能量大小求得^[2~4]。如, ^{60}Co 能量为1.25Mev, $\mu=0.063\text{cm}^2/\text{g}$; ^{137}Cs 能量为0.66Mev, $\mu=0.087\text{cm}^2/\text{g}$ (图1)。但在实际应用时, μ 值除决定于 γ 射线的能量外,还受到 γ 放射源的强度和探头的屏蔽状况及各种测量条件的影响^[4,5],因此常需实际测量,否则直接引用理论计算值将会给土壤含水量的测定带来极大的误差。

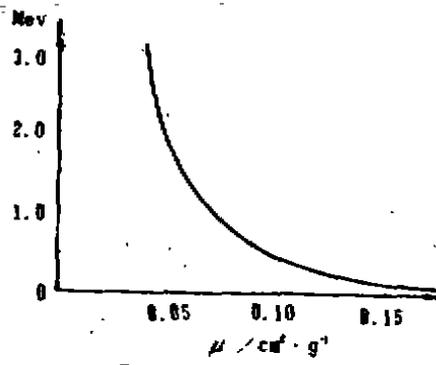


图1 钽源能量与 μ 值关系图

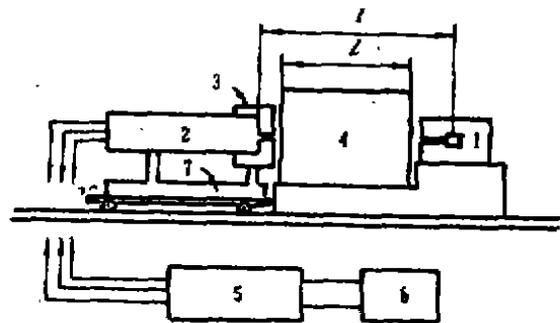


图2 μ 值测定装置示意图

1. ^{137}Cs 源铅罐; 2. FJ-367 探头; 3. 铅屏蔽罩; 4. 有机玻璃筒
 $L=21.15\text{cm}$; 5. FH-408 定标器; 6. 稳压电源; 7. 轨道车

室内测量 μ 值的方法一般有两种:水体法和反推法。前者是对一空桶在盛水前后分别进行 γ 射线透射,以测定 I_0 及 I 值,此时桶内水量的变化值 $\Delta\theta=1$,因此由式(1)得到以下关系:

$$\mu = \frac{1}{L} \ln \frac{I_0}{I} \quad (4)$$

由该式即可求得 μ 值。而反推法是对一土体在含水量变化前后, 分别测定其 I_0 及 I 值, 同时用烘干称重法对两次的含水量分别进行测定, 得出 $\Delta\theta$ 值, 代入式(1)反推求出 μ 值。

由于利用反推法较水体法多了两次因烘干称重法测量土壤含水量可能引起的误差, 故用水体法测定 μ 值更为精确。因此均采用水体法对 μ 值的测定影响因素进行试验研究。测量装置如图 2 所示。

3 μ 值的影响因素

为了解各因素对 μ 值的影响程度及其变化规律, 以便在实测时将可能产生的误差减至最小, 故在室内对 μ 值进行了以下不同条件下的实际测定和研究。

3.1 探头的屏蔽状况

为了提高 γ 透射法测定土壤含水量的层间分辨率及精度, 减小边界对测量的影响, 对接受 γ 射线的探头进行铅屏蔽是必要的(对此问题作者将在另文中讨论)。在土壤含水量的测量中, 我们采用北京核工业部仪器厂生产的 FJ-367 通用闪烁探头, 并在探头的前面加设铅屏蔽罩, 这样使透射土体后的 γ 射线主要由铅屏蔽罩中心圆孔($\Phi 8\text{mm}$)通过而被探头接受。为探明铅屏蔽罩的厚度 d 对 μ 值的影响关系, 我们采用了铯源 ^{137}Cs , 对厚度 d 为 7, 13, 20, 26, 35mm 的铅屏蔽罩进行了不同透射距离(即探头前端至放射源中心的距离)情况下的 μ 值测定, 其结果如图 3 所示。

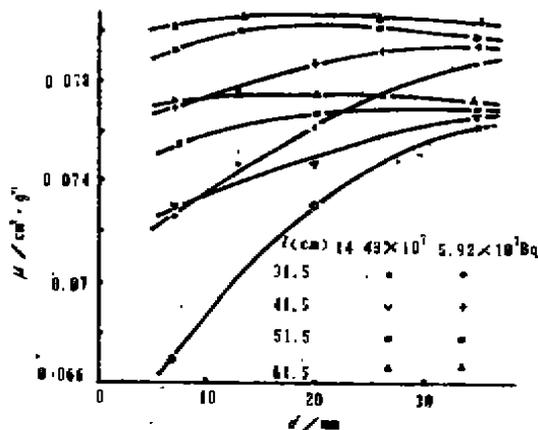


图3 铅屏蔽厚度 d 对 μ 值的影响关系图

表1 μ 值, I_0 及 I 随屏蔽厚度 d 的变化

$d(\text{mm})$	$I_0(\text{脉冲数}/\text{min})$	$I(\text{脉冲数}/\text{min})$	$\mu(\text{cm}^2/\text{g})$
7	2 794 989	605 940	0.072 48
13	1 803 922	374 434	0.074 65
20	1 169 610	236 325	0.076 11
26	808 683	161 962	0.076 71
35	595 655	115 143	0.078 78

注: $l=31.5\text{cm}$

由图可见, 当透射距离为 31.5cm(探头与放射源铅罐之间的最小距离)时, μ 值随 d 的增加明显增大; 但随着透射距离 l 的增加, μ 值随 d 的变化愈来愈小; 当 l 达到 61.5cm 时, μ 值基本稳定在 0.0803 左右, 不再随 d 的增减而变化。

铅屏蔽厚度增加, 提高了 μ 值, 也提高了含水量测量的层间分辨率, 但同时也使 γ 射线穿透土体后的衰减强度 I_0 及 I 值急剧下降(表 1), 因此在放射源强度较小的情况

下,一定程度上将会增大测量 I_0 及 I 值的相对误差^[6]。

3.2 探头至放射源的距离

由图 3 可以看出透射距离 l 对 μ 值的影响关系。如果进一步将不同屏蔽情况下实测 μ 值与透射距离 l 的关系点绘于图 4 中,即可看出:

1) 探头没有铅屏蔽的情况下, μ 值随透射距离 l 的增大而急剧增加,但远远小于屏蔽的情况。

2) 探头有铅屏蔽的情况下, μ 值仍具有随透射距离 l 增大而增加的变化规律,但随着 d 的增加其变化的幅度愈来愈小,而当透射距离增大到一定程度时,各种铅屏蔽厚度状况下所测的 μ 值均接近于同一稳定值。

由于探头在接受穿透物质后的 γ 射线强度是与距离的平方呈反比,因而随着透射距离 l 的增大,其衰减后的强度将大幅度下降,同样也会给 I_0 及 I 值的测量精度造成一定的影响。

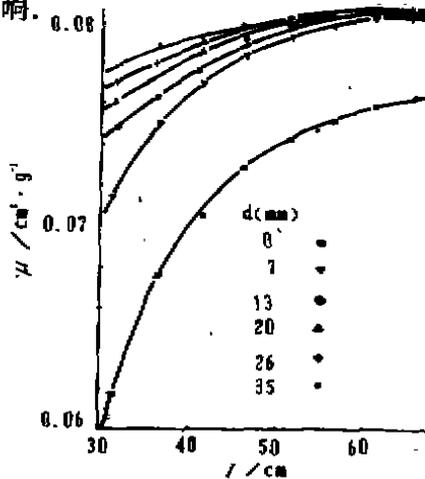


图 4 透射距离 l 对 μ 值的影响关系图

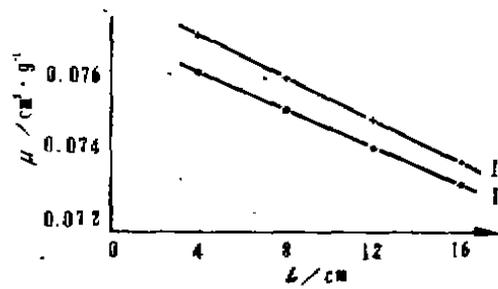


图 5 透射物体厚度 L 及水的矿化度对 μ 值影响的关系图

I—自来水; II—NaCl 不溶液 $l=33\text{cm}$, 室温 22°C

3.3 放射源的强度

图 3 的两组曲线表示了铯放射强度分别为 14.43×10^7 和 5.92×10^7 Bq 的 μ 值与屏蔽厚度 d 和透射距离 l 的关系,由图可知:

1) 放射源强度的增大使同类条件下所实测的 μ 值降低,如当 $l=61.5\text{cm}$, 使用 14.43×10^7 Bq 的铯源,所测 μ 值基本稳定在 0.0772 左右,较 5.92×10^7 Bq 的铯源所测 μ 值低 0.0031,下降了 4% 左右。

2) 在 l 相同的情况下,不同放射源强度所测的 μ 值与 d 的变化规律基本相同,二者近似呈平行关系。

3.4 被透射物体厚度 L 及水的矿化度

为了研究被透射物体的厚度 L 对 μ 值的影响,根据文献[5]设计制成了一个直径及高度分别为 20cm 的有机玻璃圆桶,将铯源置于圆桶下方,并将带有铅屏蔽罩的探头置于圆桶上方,试验中分别对圆桶内盛有厚度为 4, 8, 12, 16cm 的自来水进行测定,其

结果如图5所示。

由图可见, 随着被透射物体厚度 L 的增加, μ 值明显呈直线下降关系, 其下降速率, 在试验的厚度范围内, 每变化 1cm, μ 值下降 0.3425×10^{-4} , 约为 μ 值的 0.3%。同样, 当圆桶内注入具有 10g/L 高矿化度的 NaCl 水溶液时, 经过测定, L 与 μ 的关系仍具有以上性质, 与前者接近呈一平行关系, 二者相差不超过 1%。

3.5 温度

为检验温度对 μ 值的影响, 我们在其它条件相同的情况下, 对水的温度由 6℃ 至 50℃ 范围的 μ 值进行了测定, 其结果如图6所示。

由图可见, 随着温度的增高 μ 值呈直线关系减小, 但减小速率甚小, 每变化 10℃ 仅为 1.1352×10^{-4} , 约为 μ 值的 0.15%。

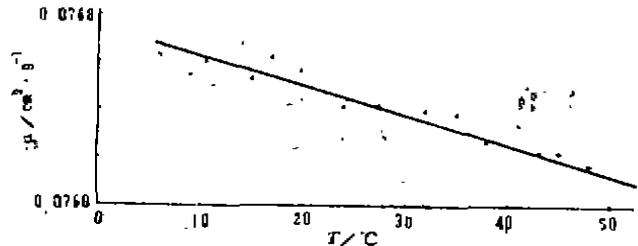


图6 水量 T 对 μ 值的影响关系图

$l=33\text{cm}$; 室温 22℃

4 结论

1) 由于测定条件及工作状态不同, 水的质量吸收系数 μ 的实测值一般均低于理论计算值, 因此, γ 透射法测定土壤含水量, μ 值的确定必须根据情况进行实测, 测定方法以具有较好测量精度的水体法为宜。

2) 由实测试验可知, 除温度及水的矿化度对 μ 值影响甚小外, 其它各因素都存在着不同程度的影响, 因此, 在实测 μ 值时, 应使测定条件和工作状况(土筒的形状和尺寸、放射源的强度、探头的铅屏蔽厚度及透射距离)保持与测定土壤水分时情况完全相同。

3) 采用有机玻璃圆筒进行扰动土柱的一维水分运动试验时, γ 射线呈放射状穿过土体, 而非全部由直径方向通过, 但由于在计算含水量时, 只能以圆筒内径长度表示透射土体的厚度 L , 因此对于这部分的误差影响, 在采用与测量土壤含水量相同的土筒进行实测 μ 值时, 实际上已反映在 μ 值中, 无形中消除了透射厚度 dL/L 的测量误差。

4) 水体法测定 μ 值, 可以认为水量变化值 ΔO 的相对测量误差为零, 故可将式(3)变为以下形式

$$\frac{d\mu}{\mu} + \frac{dL}{L} = -\frac{dI_0/I_0 + dI/I}{\ln(I_0/I)}$$

由此, μ 值及透射厚度 L 的测定误差主要取决于 I_0 和 I 值的相对误差, 为此, 延长测量时间, 可使 I_0 和 I 值足够大 ($> 10^4 \sim 10^5$), 相对误差减小到 1% 以下。

参 考 文 献

- 1 熊运章, 林柱梓, 董加伦等. γ 法在土壤水分动态研究中的应用及改进. 西北农学院学报, 1981(1): 23~34
- 2 Беликов М П, Емельянов В А, Нестеров В Е. Пояснение Радиоактивных Изотопов В Гидротехническом Строительстве, Москва, 1961
- 3 中国科学院原子能研究所编. 放射性同位素应用知识. 北京: 科学出版社, 1959, 73~76
- 4 土壤水分测定方法编写组编著. 土壤水分测定方法. 北京: 水电出版社, 1986, 118~130
- 5 Емельянов В А. Гама-лучи И Нейтроны В Полевых Почвенно-Мелиоративных Исследованиях, Москва, 1962
- 6 王文焰, 张建丰, 汪志荣. γ 透射法在土壤水测量中的精度控制. 地下水, 1989(3): 161~164

Effect of μ value of the Measuring Accuracy of Soil Moisture by γ -radiation Method

Wang Wenyang Zhang Jianfeng Wang Zhirong

(Shaanxi Institute of Mechanical Engineering)

Abstract The mass absorption coefficient of water μ plays an important role in measuring soil moisture using γ -radiation method. It can directly affect the measuring accuracy of soil moisture content. Based on the lab experiments, this paper studies various factors affecting μ value including the probe shield, the distance between probe and radiation source, the radiant intensity and the thickness of radiated objects, etc. This is different from the theoretical calculation of μ value, which is always a constant for any fixed material (i.e. independent of working conditions). Therefore, in order to get an accurate measurement of soil moisture, μ value must be measured under the same condition. To sum up the experiments, a rational method and the best working conditions for measuring μ value are given in this paper.

key words the mass absorption coefficient of water, soil moisture content, measuring accuracy, probe shield