

伽马透射法在土壤水分动态研究 中的应用及其改进

熊运章 林性粹 董家伦 沈定言

(西北农学院)

前 言

利用伽马射线透射原理进行土壤水分动态的观测具有某些特点：毋需预埋传感元件，不扰动被测土体，能从土体外部进行土壤水分测定，测量迅速不受土壤盐分影响，这样就基本上保证了土壤水分运动的原有条件。它属于一种非破坏、非接触性测量方法。它同中子法、张力计法以及某些其他方法一样，可以进行长时期定位观测，以便系统掌握同一测点土壤水分动态的详细过程。它较中子法能够更仔细地进行土壤水分的分层测定，其间距可达到2—3厘米，而且较中子法更易于防护。另一方面它消除了某些传感器（如石膏块或张力计磁头）所具有的滞后作用，能够迅速反映出各时期土壤水分状态，甚至可以测量土壤浸润过程中土壤剖面各点土壤湿度随时间的变化。这就为合理进行灌溉、排水、土壤耕作和土壤改良工作，特别对于同土壤水分运动有关的科学研究，提供了必要的条件。因此它很早就为一些科学研究人员所注意，并不断得到改进和发展。

五十年代初苏联水文气象仪器科学研究所丹尼林(Данилин А. И.)等人首次进行了伽马透射法观测土壤含水量的试验，接着又进行了供测量之用的田间辐射仪。五十年代末期，特别是六十年代以后，在美国和欧洲一些国家，也广泛地进行了这方面的研究，在测试设备和测定方法方面都有一些发展。

在国内，我们曾在1960年前后进行了实验室条件下利用伽马透射法测定大型土柱内水分动态的试验研究^[1-5]。在中断了十多年试验研究以后，于1978年结合喷灌试验，进行了伽马透射法测定土壤水分动态的田间试验，取得肯定成果。本文仅就伽马透射法的基本方法和我们所进行的室内外试验以及改进意见作一概述。

基本原理和计算方法

当伽马射线穿过物质时，它同物质之间发生着复杂的相互作用过程，主要是：光电效应、康普敦效应和形成电子对，其结果，部分能量被吸收，穿过物质后的射线强度因而被减弱。减弱的程度与射线的能量、物质的性质、密度、厚度等有关。可以利用这些

关系进行厚度测量、密度测量、质量检验与控制，以及与此有关的其他测量，如液位变化、土壤容重及含水量、泥浆浓度、雪层厚度、蒸发量变化等方面，在工业上还被用来进行生产过程自动化控制。

伽马射线穿过物质后射线强度被减弱的程度服从下述指数规律：

$$I = I_0 e^{-\mu L} \tag{1}$$

式中 L ——被透射物质的厚度 (CM)

I_0, I ——伽马射线束未穿过和穿过被透射物质后的射线强度，单位以每分钟脉冲次数表示，(次/分) (图1)

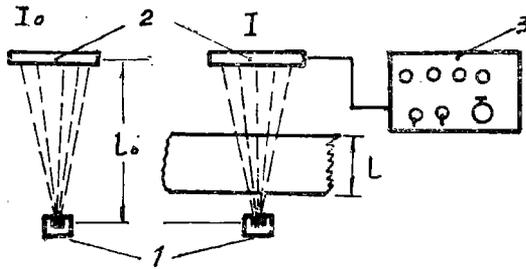


图1 1. 放射源 2. 计数管 3. 定标器

μ ——被透射物质对伽马射线的线性吸收系数 (cm^{-1})，与物质的密度有关。

$$\mu = \mu_m \cdot \rho \tag{2}$$

式中

μ_m ——被透射物质对伽马射线的质量吸收系数 (cm^2/g)

ρ ——被透射物质的单位体积重量 (g/cm^3)。

如果被透射物质是由两种物质所组成，则线性吸收系数为：

$$\mu = \mu_1 \rho_1 + \mu_2 \rho_2 \tag{3}$$

式中

ρ_1, ρ_2 ——被透射物质单位体积中各组成部分的物质重量 (g/cm^3)

μ_1, μ_2 ——各组成物质对伽马射线的质量吸收系数。

以含水土层作为研究对象，可以认为伽马射线穿过此土层后强度的减弱主要是由于土和水两种介质的作用，于是

$$\mu = \mu_s \rho_s + \mu_w \rho_w \tag{4}$$

式中

μ_s, μ_w ——相应为水及干土的质量吸收系数，其值取决于伽马射线的能量和水、土的性质；可通过计算或实测确定。

ρ_s ——含水土块单位体积中的水重量，即土壤容积含水量 (g/cm^3)

ρ_w ——含水土块单位体积中的干土重，即土壤干容重 (g/cm^3)

于是得
$$I = I_0 e^{-(\mu_s \rho_s + \mu_w \rho_w) L} \tag{5}$$

式中 L ——含水土层厚度 (cm)，其余符号意义同前。

在含水量测定中， μ_s, μ_w, ρ_s, L 及 I_0 应保持常数值。

设在开始时刻 t_1 和以后任意时刻 t 测得伽马射线穿过厚度 L 固定不变的土层后其强度分别为 I_1, I ，土壤容积含水量相应为 ρ_{s1}, ρ_s ，代入 (5) 式整理后得：

$$\rho_s = \rho_{s_1} + \frac{1}{\mu_s L} \ln \frac{I_1}{I} = \rho_{s_1} + \Delta \rho_s \quad (6)$$

式中 $\Delta \rho_s$ 表示 t_1 到 t 时刻土壤容积含水量的变化, 即

$$\Delta \rho_s = \frac{1}{\mu_s L} \ln \frac{I_1}{I} \quad (7)$$

公式(6)、(7)中土壤容积含水量可用常用符号 θ 代之

$$\theta = \theta_1 + \frac{1}{\mu L} \ln \frac{I_1}{I} = \theta_1 + \Delta \theta \quad (\text{g/cm}^3) \quad (8)$$

$$\Delta \theta = \frac{1}{\mu L} \ln \frac{I_1}{I} \quad (\text{g/cm}^3) \quad (9)$$

式中 θ 、 θ_1 、 $\Delta \theta$ ——相应表示 t 时刻和 t_1 时刻的土壤容积含水量及其差值。

μ ——代替 μ_s , 水的质量吸收系数。

当土壤含水量的变化值用水层厚度表示时, 式(9)可以改写为

$$\Delta L = \frac{1}{\mu} \ln \frac{I_1}{I} \quad (\text{cm}) \quad (10)$$

土壤含水量以“干土重%”(ω %) 表示时, 公式(8)、(9)相应改变为

$$\omega = \omega_1 + \frac{100}{\mu \rho L} \ln \frac{I_1}{I} = \omega_1 + \Delta \omega \quad (\text{干土重}\%) \quad (11)$$

$$\Delta \omega = \frac{100}{\mu \rho L} \ln \frac{I_1}{I} \quad (\text{干土重}\%) \quad (12)$$

式中 ω 、 $\Delta \omega$ ——相应为以干土重百分数表示的 t 时刻的土壤含水量和变化值

ρ ——土壤干容重 (g/cm^3)

其它符号意义同前。

在研究土壤水分变化的整个时期内应保持土层厚度 L 、土壤干容重 ρ 和水的质量吸收系数 μ 为固定值, 因此当测得伽马射线穿过土层的初始强度 I_1 及相应的土壤含水量 θ_1 或 ω_1 和任意 t 时刻的伽马射线强度 I 后, 利用公式 8 到 12 各式, 不难求得该时期内土壤含水量的变化和 t 时刻的土壤含水量。

从公式 8 到 12 可以看出, 土壤含水量与伽马射线强度的对数值成直线关系, 即在半对数纸上为一条直线。因此可以根据每一测点实测原始资料 ($\theta_1, \mu_1, L, \omega_1, \rho$) 按照公式 8 或 11 绘出相应的直线图以便查找。

室内实验

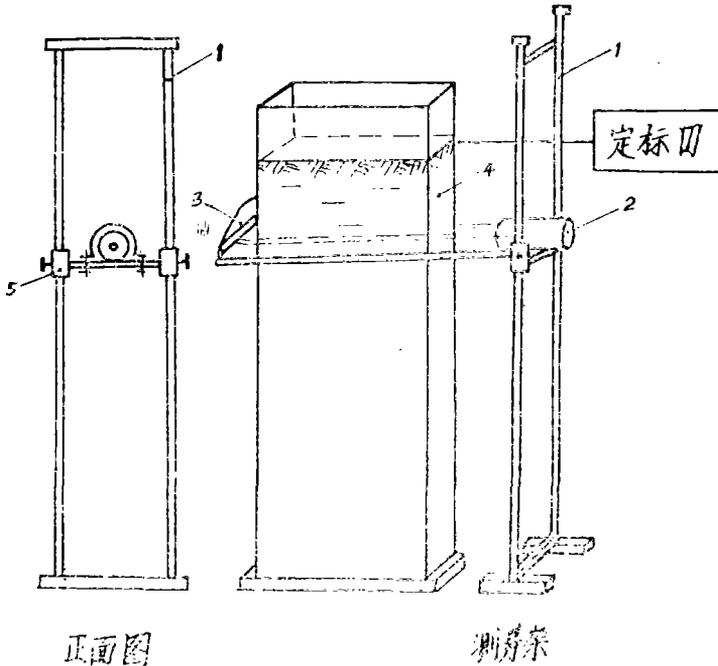
在实验室条件下应用伽马透射法可以进行多种有关土壤水分运动的试验, 如土壤入渗过程中或蒸发过程中土壤水分动态的测定, 某些土壤水分参数 (如导水率、扩散率) 的测定等。我们曾用伽马透射法进行了灌溉水在大型土柱内入渗过程中的动态和蒸发过

程中的水分动态的测定，得到相当满意的结果。

室内试验采用的大型土柱的断面尺寸为15厘米×30厘米。填土高度60—70厘米。根据设备性能，测量高度可以达到180厘米，基本满足一般室内试验要求。

试验设备包括装有伽马放射源和探测器的试验架，定标器等（图2）。装有伽马放射源的铅柱和探测器分别固定在环形悬臂杆的两端，悬臂杆可以沿测量架的两根竖直铁杆上下滑动，并借助固定螺旋固定在任意高度上，以便测量不同高度上的土壤含水量变化。

试验中曾分别使用过⁶⁰Co和¹³⁷Cs作为伽马放射源。理论和实践证明用¹³⁷Cs作为伽马放射源较优于⁶⁰Co，因前者半衰期较长(33.2年)且能量适中(0.66兆电子伏)。放射源强度曾先后采用7毫克镭当量和3.3毫克镭当量，以3~4毫克镭当量为宜，既便于防护并具有必要的精度。



1. 试验架 2. 装有伽马放射源的铅柱 3. 探测器 4. 土柱 5. 固定螺旋

图2 伽马透射法实验室装置示意图

试验中采用的探测器是装在塑料管中的小尺寸盖革计数管。

试验前对土柱剖面原始含水量 ω_1 及土壤容重 ρ 以及水的质量吸收系数 μ 值进行了测定。灌水前并对土壤剖面进行伽马射线透射测量，得到土壤剖面各观测点（沿土柱深度每5厘米设一测点）的初始 I_1 值。在本实验测得 μ 值对于⁶⁰Co为0.056，对¹³⁷Cs为0.055。

灌水后进行了土壤入渗过程中土壤剖面水分动态测量和以后蒸发过程中土壤剖面水

分动态测量。入渗过程中水分动态测量是较为紧张的，特别是在入渗初期，既要及时跟踪水分下移湿沿，又要隔一定时间监测上部各点水分变化。但是由于采用本装置，移动一次只需几秒钟时间，每测一点只需 1—2 分钟，而且没有滞后作用，因此能够及时反映出各点的水分变化。正是在这一点上，发挥了伽马透射法的特点。土壤浸润过程中水分动态观测资料如图 3 所示。其中 N_0 表示相应于灌水前伽马射线穿过风干土壤层强度， N_m 表示该土层灌水达饱和时伽马射线穿过后

的强度； $\varepsilon = \frac{N_0 - N_t}{N_0 - N_m}$ 表示灌水后

任意时刻 t 时土壤剖面上某点土壤水分增加量与饱和含水量的比值，与饱和度相应。此值应变化在 0.00 到 1.00 之间。当 ε 值为零时（即 $N_t = N_0$ 时）表示土壤水分尚未变化，土壤处于风干状态；当 $N_t = N_m$ 时表示土壤水分已达饱和状态。曲线清楚反映了土壤浸润过程中土壤剖面各点水分变化过程。由图可以看出，上层土壤浸润曲线坡度较陡，土壤达到饱和过程时间很短，进程迅速；土层愈向下，曲线坡度愈缓，土壤达到饱和状态的时间较长，进程缓慢。

利用同一土柱继续进行人工蒸发条件下土壤剖面水分动态的测定。试验共进行了 9 天，测定资料如图 4 所示，表明了不同时期土壤含水量（容积含水量）沿土壤剖面的分布。由图看出在蒸发条件下，上层土壤水分含量减少很快，迅速达到稳定值，此时表层形成干枯层，土壤水分含量不再变化；中层土壤仍在不断减小，但其变化的速度越来越缓慢；下层土壤水分仍在缓慢下渗，且含水量有微小增值。所测定的土壤剖面水分变化的这种状况很好地反映了本实验条件下土壤水分的变化规律，并给出数值概念。

试验中对蒸发条件下土壤剖面温度梯度变化也进行了测定，以便于同土壤湿度变化资料相配合，进一步进行蒸发条件下土壤剖面水分动态的理论分析，以求得其数值关系。

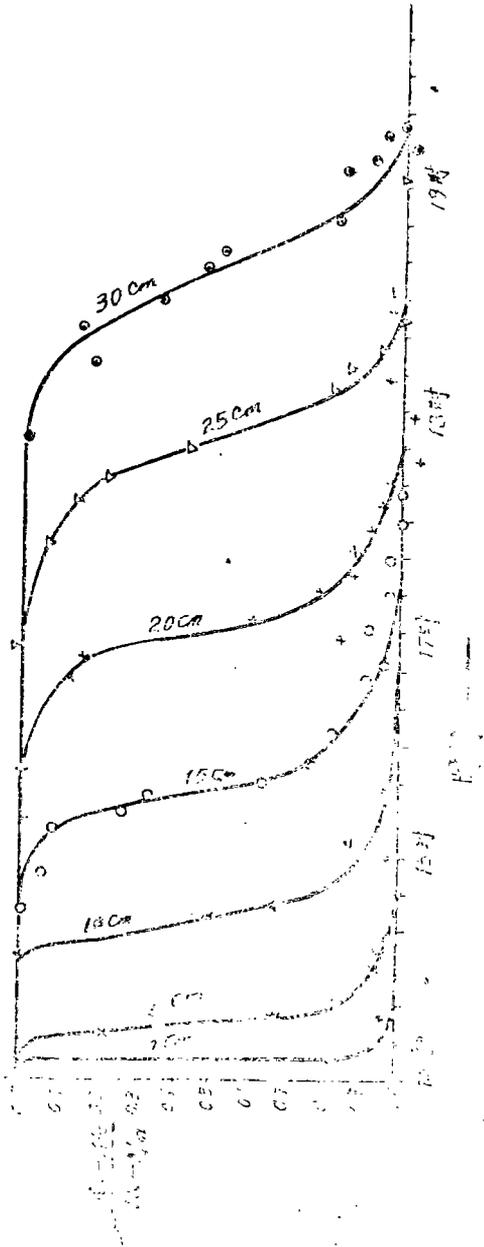


图 3 土壤浸润过程线

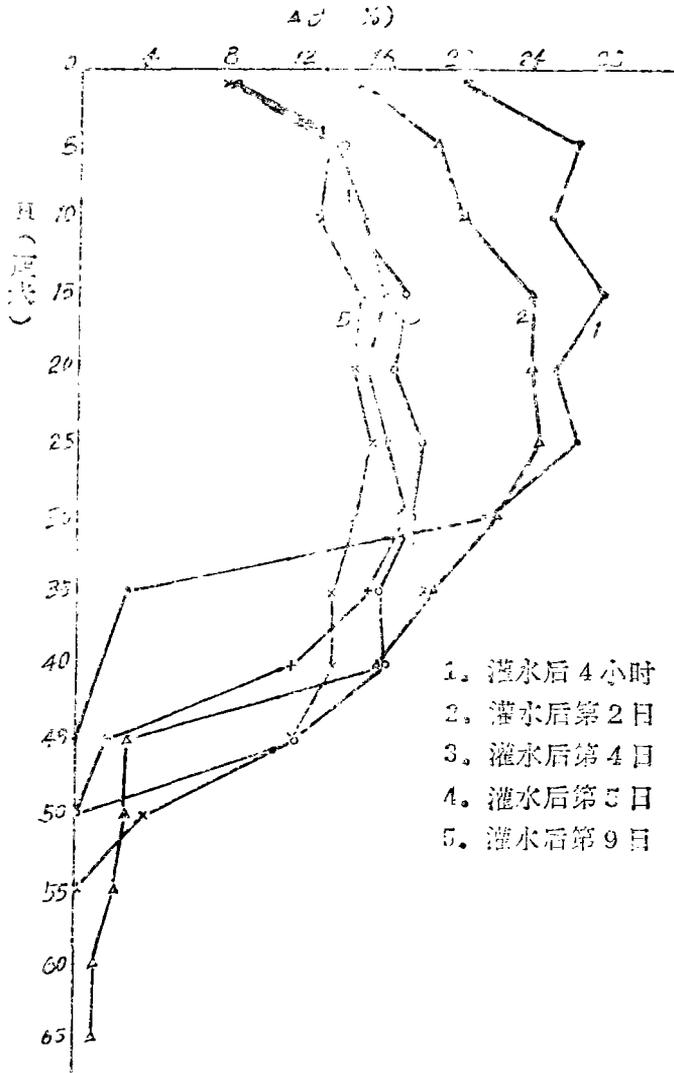


图 4 蒸发条件下灌水后土壤剖面水分动态

田间试验

利用伽马透射法进行田间土壤水分动态测定，通常可以采用两种方法，即水平透射法（图 5）和垂直透射法（图 6）。鉴于后者不便于分层进行土壤水分动态测定，因此本试验采用了水平透射法。但是在实际应用时，由于田间上层土壤容重随耕作、灌溉等影响而有所变化，因此在测量表层土壤水分变化以及整个耕作层水分变化时，还常常用到垂直透射法。

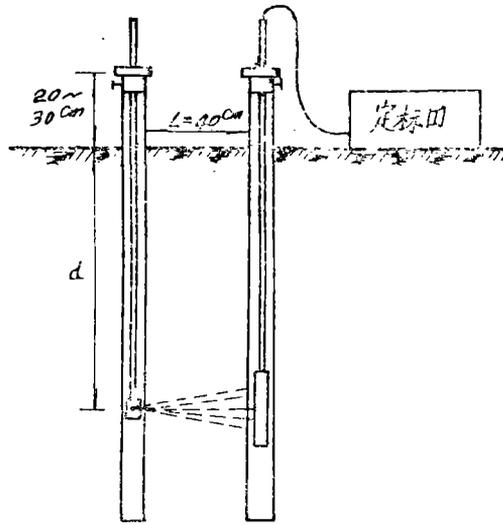


图5 水平透射法田间装置示意图

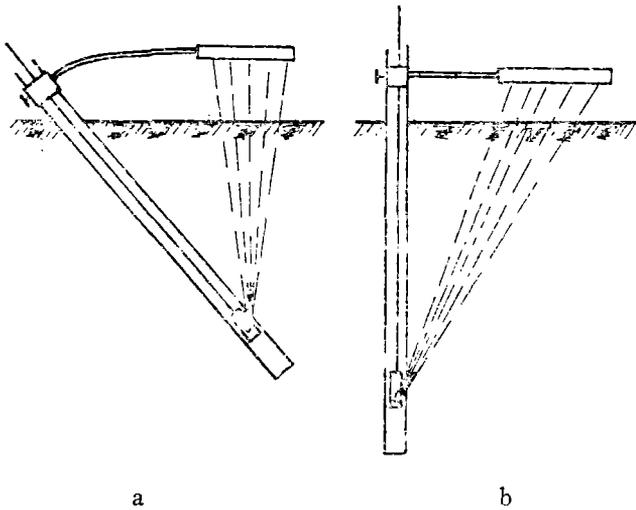


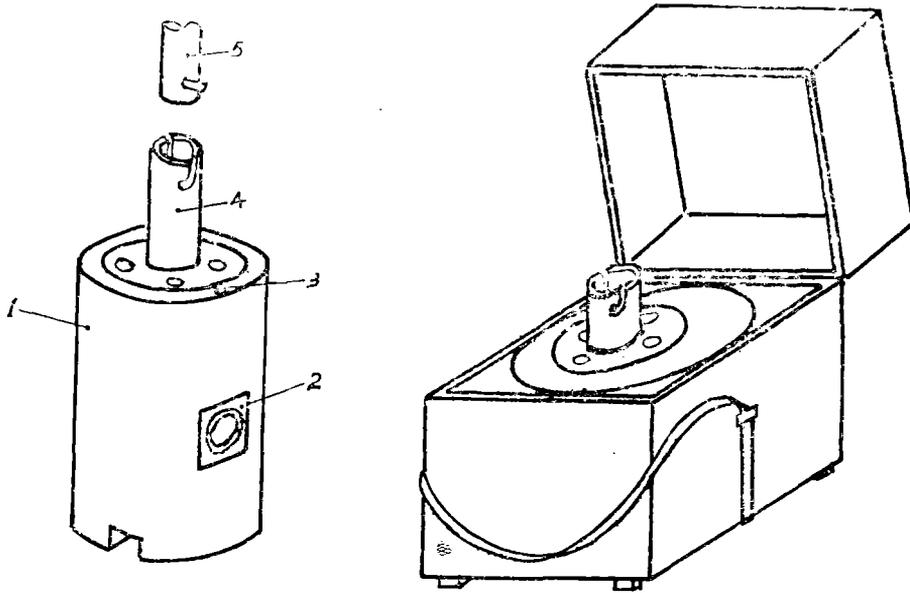
图6 竖直透射法田间装置示意图

水平透射法田间试验设备主要包括装在一根测杆下的探测器，装在另一根测杆下的伽马放射源、田间定标器。

试验前用洛阳铲沿铅直方向挖掘两个互相平行的测孔，相距约40厘米。孔的深度决定于需要观测的土层深度，曾采用1.2米。每一测孔中安放一根塑料管，用来保护测孔壁，以免在多次测量中孔壁土壤遭受破坏，并有利于固定观测条件。管顶高出地面20—30厘米。管内径约50毫米。

探测器仍采用盖革计数管，但较之室内试验所采用的盖革计数管尺寸稍大。定标器

采用了带有四个步进管的 DPX-1A 型野外定标器, 可记录10,000 次计数, 万位以上可配合心记法以扩大计数。采用6支XYD-20型蓄电池或1号干电池作为电源, 工作电压为 9 ± 1.5 伏与定标器装在同一小木箱中以便携带, 在条件允许时也可以使用交流电, 进行整流变压。采用3.3毫克当量 ^{137}Cs 作为伽马放射源, 装于直径为50毫米的圆形铅柱内(图7)。铅柱顶部安装带有卡口的插座, 以便用测杆从携带箱中取放; 下部设有矩形槽, 恰好同携带箱中的键条重合, 使伽马源孔口固定在规定位置, 正对准携带箱中偏心铅环的最厚处, 使放射源四周屏蔽厚度相同。



1. 铅柱 2. 放射孔及塑料盖片 3. 孔口方向标记 4. 测杆插座 5. 测杆

图7 携带式伽马源装置图

田间试验曾于1978年先后在西北农学院和长安县王庄公社喷灌试验地分别进行, 并与烘干法进行了对比。根据三个试验区7个测点所测的66组对比资料得出伽马透射法所测定的土壤含水量与用烘干法所测得的土壤含水量误差范围从0.42%到1.74% (干土重), 平均误差为1.27% (干土重)。

方法的探讨与改进

伽马透射法的优点已如前述, 但是仍然存在一些应该研究改进的方面, 以便能够广泛地推广应用, 如核衰变所具有的统计误差对观测精度的影响, 由于灌溉、耕作而使土壤容重变化所产生的影响, 安全防护问题等。

1. 提高测定精度

伽马透射法测定土壤含水量变化的精度取决于各施测因子的精度, 以公式(9)为

例，当测定土壤容积含水量变化时，其精度决定于 μ ， L ， I_1 和 I 四项测定值的精度，如果要测定土壤重量含水量变化，如公式(12)所示，则还要加上土壤容重测定的精度。

根据误差传递原理，可以求出土壤容积含水量变化值 $\Delta\theta$ 的绝对误差 $d(\Delta\theta)$ 和相对误差 $\frac{d(\Delta\theta)}{\Delta\theta}$

$$\frac{d(\Delta\theta)}{\Delta\theta} = \frac{d\mu}{\mu} + \frac{dL}{L} + \frac{\frac{dI_1}{I_1} + \frac{dI}{I}}{\ln \frac{I_1}{I}} \quad (13)$$

式中 $d\mu$ 、 dL 、 dI_1 和 dI 相应表示 μ 、 L 、 I_1 和 I 各值的测量误差。

即土壤容积含水量变化测量的相对误差等于 μ 、 L 以及两次透射测量的相对误差之和，为了提高测量精度，必须降低各项测量值的相对误差。在精细测量下应尽力降低 $\frac{d\mu}{\mu}$ 、 $\frac{dI}{I}$ 两项相对误差值，例如分别降到0.01左右。至于第三项（透射测量相对误差），则需要进一步分析，为要减少此项相对误差值，应使 $\frac{I_1}{I}$ 具有较大值，实际上由于 $\Delta\theta$ 值一般不超过0.30，因此从公式(9)可以算出 $\frac{I_1}{I}$ 比值一般也不会超过2。此外，在辐射测量中误差值 dI_1 和 dI 通常可用 $\sqrt{I_1}$ 和 \sqrt{I} 来代替，于是

$$\frac{dI_1}{I_1} + \frac{dI}{I} = \frac{I}{\sqrt{I_1}} + \frac{I}{\sqrt{I}} \quad (14)$$

表明为要减少第三项透射测量相对误差，还应尽可能增加 I_1 和 I 的数值。如果使初始计数率达到5000次/分钟，相对误差值约为0.05，加上前两项相对误差值，总相对误差值大约为0.07，绝对误差为 0.02g/cm^3 ，当 $\frac{I_1}{I}$ 比值小于2时相对误差会有相对增加，其绝对误差则稍有减少，一般在 $0.01-0.02\text{g/cm}^3$ 之间。这一误差等于或略低于烘干法的误差，可以满足一般科学试验的要求。

应该指出，上述误差主要属于方法误差，即由测量方法本身所形成的误差，至于仪器误差和环境影响等误差，也像其他方法一样，会或多或少存在。为了提高测量精度，这类误差应减少到最低程度。最近经过对仪器线路和电源部分的改进，仪器性能和测量精度已有显著提高。

2. 土壤容重变化的影响

前述水平透射测量中，含水量变化值的计算是以土壤容重及透射层总厚度均固定不变为前提的，如果土壤容重发生变化，就会得出不正确结果，预计到在测定土壤含水量变化的总时期内土壤容重有可能发生变化，应该事前采取适当措施，否则必须按照变化后的土壤容重另行测定。

解决土壤容重变化对土壤含水量测定影响的措施之一是在预计土壤容重变化区域内(主要是表层30厘米范围内)采取竖直透射法,如图6所示,在这种情况下,土壤容重(ρ_1)的变化是同土层厚度(L)的变化相配合的, ρ_1 增加, L 相应减小;由此我们得到类似公式(8)的新公式

$$\theta_2 = \theta_1 \frac{L_1}{L_2} + \frac{1}{\mu L_2} \ln \frac{I_1}{I_2} \quad (15)$$

式中 $\theta_1, \theta_2; L_1, L_2; I_1, I_2$ 相应表示竖直透射条件下土壤容重变化前和变化后的土壤容积含水量,土层透射厚度及透射强度。因此当预计到土壤容重会发生变化时应注意测得变化前土壤容积含水量 θ_1 、土壤层厚度 L_1 及相应的竖直透射强度 I_1 。

Soane(1967), Corey(1971)等人曾研究了应用双伽马源同时确定土壤容重和土壤含水量的方法,以适应二者同时变化时测量工作的需要。这种方法叫做“双源法”。其基本原理是同时使用两种不同能量不同强度的伽马放射源和相应的探测器进行伽马透射测量,所得结果分别代入公式(5)中,由此得到两个方程:

$$(I/I_0)_{Am} = \exp - (\mu_{Am} \rho_s + \mu_{Am} \theta) L \quad (16)$$

$$(I/I_0)_{Cs} = \exp - (\mu_{Cs} \rho_s + \mu_{Cs} \theta) L \quad (17)$$

式中带有脚注Am, Cs的项目分别表示 ^{241}Am 和 ^{137}Cs 所测得的相应数值, μ_s, μ_w 分别表示伽马射线穿过干土和水后的质量吸收系数。

Soane曾经使用了350毫居的低能量 ^{241}Am (能量为59.6—Kev)和30毫居的高能量 ^{137}Cs (662Kev)作为双伽马源;Corey等人则用了29毫居的 ^{241}Am 和70毫居的 ^{137}Cs 作为双伽马源。都以杂有铊的碘化钠($NaI(Tl)$)闪烁计数器作为伽马探测器。并用多道脉冲幅度分析仪进行测量。

Corey等人(1970)曾提出过一种伽马——光激中子法来解决这一问题。根据具有大于2.23Mev的高能量伽马射线同重水(2H_2O)形式的氘相互作用以产生光激中子和质子的原理进行测定。光激中子可借热中子探测器来测定,此法不受普通水(1H_2O)含量、土壤容重和土壤类型的影响。

上述双源法和伽马——光激中子法(特别是后者)需要伽马放射源具有较高的能量和很大的强度,因而防护层厚度较大,目前还仅处于实验室试验阶段。

参 考 文 献

1. 熊运章: γ 射线法测定土柱内水分移动之初步试验(《西北农学院学报》, 1960年第2期)。
2. 西北农学院水利系喷灌科研组: γ 透射法在农田土壤水分动态研究中的应用(1979年全国喷灌田间试验会议报告)。
3. Беликов М. П., Емельянов В. А., Нестеров В. Е.: Применение

Радиоактивных Изотопов в Гидротехническом Строительстве. /Москваем
1961 р./.

4. Емельянов В. А. Гамма-Лучи и Нейтроны в полевых Почвенно
мелиоративных Исследованиях. /ГОСАТОМИЗДАТ 1962/

5. Петров Е. Г. и Емельянов В. А. ; Результаты и Перспективы
Применения Ядерных Излучений и Радиоактивных Индикаторов в Гид-
ротехнических и Мелиоративных Исследованиях.

/“Труды ВНИИГим”. Москва, 1962/

6. D. Kirkham, J. C. Corey Recent progress in the design of Radiation
equipment and its practical implications. («Soil-Moisture and irrigation study II»,
1973, Vienna,) .

7. А. И. Данилин, ; Опыт и некоторые особенности применени,
Гамма-лучей и Нейтронов в исследованиях Влажности Почв и Грунтов

8. B. D. Soane, ; Dual Energy Gamma-ray Transmission for Coincident Mea-
surement of Water Content and dry Bulk Density of Soil («Nature» vol. 214. 1967)

9. J. C. Corey, S. F. Peterson, and M. A. Wakat, ; Measurement of Attenuation
of ^{137}Cs and ^{241}Am Gamma Rays for Soil Density and Water Content Deter-
mination («Soil science society of Am proc. » vol. 35. March-April, 1971,)

10. J. C. Corey, R. H. Hawkins, R. F. Overman, ; A Gamma-photon neutron
method for laboratory studies of soil water («Soil science society of Am. proc.
vol 34, 557, 1970)

摘 要

60年代初步进行了室内试验,在此基础上,1978年进行了田间实验设备的研究,并改进了室内试验设备,试验表明利用伽马透射法测量土壤含水量,其精度约等于或稍低于称重法,但能进行定点观测,不破坏观测条件,测量迅速简便,较之中子法易于防护,本文对影响伽马透射法精度的因素进行了分析,提出了提高观测精度的途径。

Application of Gamma Transmission Method on Research of Soil water movement and its Development

By Xiong Yun-Zhong, Lin Xing-Cui

Dong Jia-Lun and Shen Ding-Yan

Abstract

The test was conducted in the lab in early 60s, on the basis of which researches on the lab equipment were carried out in the field in 1978 with the improvement of the lab equipment.

The results obtained from the test have shown that the accuracy of measurement of water content by Gamma Transmission method is more or less equal to that by Gravimetric method, but Gamma Transmission method can be used to do the fixed point of observation without destroying the observation conditions, which is quicker and simpler to measure and easier to be protected than that of Neutron method.

This paper deals with the analysis of accuracy factors and ways of raising accuracy of observation by Gamma Transmission method.