

# 用铯-137 $\gamma$ 射线衰减法测量 土壤密度和含水量\*

戚隆溪 谢斌

(中国科学院力学研究所)

## 摘 要

本文介绍了用于土壤密度和含水量测量的 $^{137}\text{Cs}\gamma$ 射线衰减装置的研制、校准及其测试方法的研究。通过充分地屏蔽和准直,适当地控制计数率和计数时间等途径,使测量误差达到1%之内。本文还设计了多格容器逐格加水的实验方法,简便而准确地校准和标定了测量系统,证明了计数系统具有较好地线性。最后,本文讨论了分辨时间校正问题和测量精度问题,给出了测量误差的估算公式。

在土壤非饱和和水流动研究中,必须精确地测量土柱中的含水量。测量土壤含水量的常规方法,如称重法、张力计法、中子散射法以及许多涉及测量多孔介质的热性质和电性质的方法都有一些缺陷,要受到诸如缺乏精度、分辨率差、范围小,跟随含水量变化有滞后以及干扰破坏系统等限制。国内通常采用的取样烘干称重法因要干扰破坏系统,在时间-水分分布的研究结果中可能会带来严重的误差。

利用 $\gamma$ 射线衰减法测量土壤的湿容重是1953年由Bernhard和Chasek创立的,以后很快被用于土壤干容重的测量<sup>[2]</sup>和土壤含水量变化的测量<sup>[3-5]</sup>。原则上利用 $\gamma$ 射线衰减法测含水量可以避免常规方法的大部分限制,明显地具有分辨率高,不受滞后影响和不干扰系统等优点。因此,它很快发展成为实验室内测量含水量的常用手段<sup>[6]</sup>。还有人发展到田间上应用<sup>[7]</sup>。国内应尽快发展这种测量仪器为土壤科学研究服务。

## 一、理 论

当放射源和探测器的距离固定不变时,湿土对准直的单能 $\gamma$ 射线束的衰减可用下面的方程来描述:

$$N_m = N_c \exp[-X(\mu_s \rho_s + \mu_w \theta)] \quad (1)$$

式中 $N$ 为计数率, $\mu$ 为质量吸收系数(厘米<sup>2</sup>/克)下标m、c、s、w分别代表容器、湿土、水和干土。 $\rho_s$ 为干土密度(克/厘米<sup>3</sup>), $\theta$ 为含水量(克/厘米<sup>3</sup>), $X$ 为吸收厚度(厘米)。对于干土 $\theta = 0$ 此时有:

$$N_s = N_c \exp[-X \mu_s \rho_s] \quad (2)$$

\*本课题得到国家自然科学基金的资助。

由式(1)和(2)可得:

$$\theta = \frac{\ln(N_s/N_m)}{X \mu_w} \quad (3)$$

从方程(2)和(3)可知,只要在实验中准确测定计数率和标定吸收材料的质量吸收系数、密度和含水量就可以确定。

## 二、测试装置

图 1 所示  $\gamma$  射线衰减测试装置包括放射源探测器、计数器、屏蔽和准直系统以及测试支架组成。

### (一) 放射源

已经证明最适用土壤测量的放射源为铯源<sup>[4]</sup>。<sup>137</sup>Cs  $\gamma$  射线峰值能量为 0.661 兆电子伏,本系统所用放射性活度为 60 毫居里。放射性物质密封在铝柱中心,一端开有准直孔,孔径 4 厘米,长度 8 厘米。 $\gamma$  射线束从准直孔辐射出来,透过吸收材料,一部分被吸收,一部分穿透到达探测器。

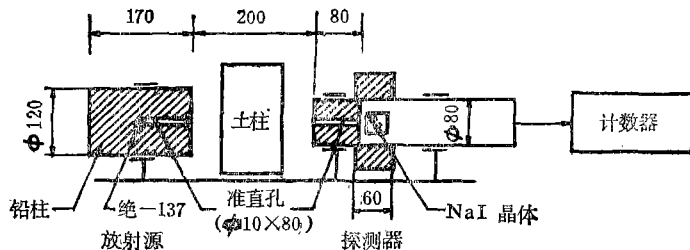


图 1  $\gamma$  射线衰减装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of  $\gamma$ -rays attenuation device

### (二) 探测区和计数器

探测器由碘化钠闪烁晶体,光电倍增管和前置放大器组成。碘化钠晶体直径 4 厘米,厚度 4 厘米。发光持续时间为 0.25 微秒,它易于潮解,因此被密封在不锈钢盒内。由探测器输出的放大电脉冲输入到计数器计数。

### (三) $\gamma$ 射线的准直和屏蔽

为了获得高空间分辨率和保证测量精度,要求放射源和探测器两侧都有准直。准直孔径大小规定了空间分辨率(辐射源和探测器之间直接传输所通过的空间大约等于沿路径上的不变面积)。准直孔还必须足够长,以保证测量精度。如果要求误差小于 0.001 克/厘米<sup>3</sup>,在  $X = 10$  厘米,  $\rho_s = 1.4$  克/厘米<sup>3</sup> 时,对 Cs-137 源来说,要求两侧的准直孔长度为 8 厘米<sup>[5]</sup>。根据需要准直孔可以是圆孔或狭缝。

用铅可以有效地屏蔽  $\gamma$  射线,以达到准直的目的。除此之外,探测器还必须屏蔽来自周围的环境辐射。本系统的准直器的结构与尺寸如图 1 所示,孔径为 1 厘米,孔长为 8 厘米。

### 三、质量吸收系数的标定

质量吸收系数  $\mu$  主要取决于  $\gamma$  射线光子能量和吸收材料的化学组分。各种土壤的化学组分不尽相同,因此,必须对每一种土质都进行标定。当放射源确定后,质量吸收系数只取决于材料。对  $^{137}\text{Cs}$  放射源来说,水的质量吸收系数的理论值为  $0.0857$  厘米<sup>2</sup>/克,各种土壤吸收系数的平均值为  $0.0775$  厘米<sup>2</sup>/克<sup>[9]</sup>。一般说来,标定值总是低于理论值,因为事实上总会有一些散射的光子也到达探测器。如有人测的  $\mu_w$  分别为  $0.0826$ <sup>[9]</sup> 和  $0.0815$ <sup>[10]</sup>。

表 1 为本系统标定的各种材料吸收系数的结果。标定是在几个矩形的有机玻璃容器中进行的,布置如图 1 所示,计算  $\mu_w$  和  $\mu_s$  分别用式(1)(此时  $\rho_s = 0, \theta = 1$ )和式(2)。值得指出的是在标定土壤吸收系数  $\mu_s$  时需要采用多点平均法,因为装土不可能完全均匀。

表 1 几种试验材料的质量吸收系数

Table 1 Mass absorption coefficients of several materials

吸收材料 Materials	质量吸收系数(厘米 <sup>2</sup> ·克 <sup>-1</sup> ) Mass absorption coefficients for Cs-137 (cm <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )	
	标定值 Calibrated value	理论值 Theoretical value
水	0.0814	0.0857
有机玻璃	0.0775	
砂 土	0.0746	0.0775
壤 土	0.0744	
粘 土	0.0732	

### 四、试验与结果

下面设计的几个实验是为了验证准直系统和计数系统的线性度和质量吸收系数标定值的可信度;检验本系统的测量精度。试验结果是令人满意的。

#### (一) 试验(I)

当  $\gamma$  射线透过一等分分格容器时,逐格加水,并且每加一格水测一次计数,直到全部加满为止。此时有:

$$\ln N_m = \ln N_c - \rho_w \mu_w \sum_0^N X_i \quad (N = 0, 1, 2, \dots, 13) \quad (4)$$

式中  $X_i$  为分格厚度。对测得的结果(表 2)作线性回归分析(图 2),得校正系数  $0.99999$ ,由截距  $\ln N_c$  得  $N_c = 7005$ ,与实测的  $N_c$  相符。以上结果,表明本系统有较高的线性度。由直线斜率  $\rho_w \mu_w$  ( $\rho_w = 0.9965$  克/厘米<sup>3</sup>)得到  $\mu_w = 0.08144$ ,这和标定值完全相同。

#### (二) 试验(II)

为了标定本系统测量土壤含水量的精度,设计了一个模拟实验容器,如图 3 所示,它

表 2 分格加水实验结果

Table 2 The results of water addition experiment in the compartment box

$i$	加水厚度 $\sum X_i$ (厘米) Thickness of water (cm)	计数率 $N_{mi}$ Counts · Sec <sup>-1</sup>
0	0.000	7006
1	1.020	6449
2	2.054	5929
3	3.092	5455
4	4.092	5036
5	5.036	4635
6	6.118	4270
7	7.133	3930
8	8.133	3648
9	9.125	3344
10	10.131	3080
11	11.157	2837
12	12.157	2612
13	13.207	2397

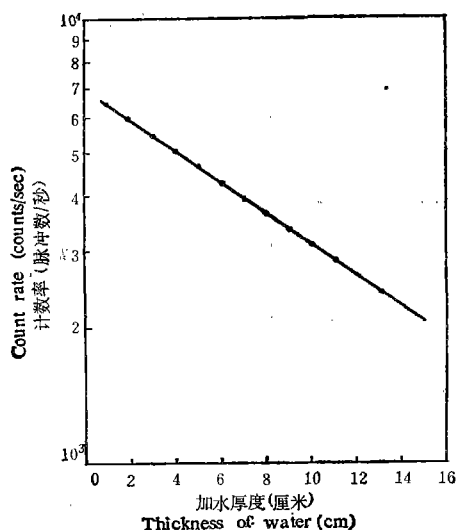


图 2 计数率随加水厚度的变化关系

Fig. 2 Variation of counts with water thickness

是一个有一半分格的有机玻璃盒。先在大格内装满风干土样,并测出相应的计数率  $N_s$ , 然后在小格内逐格加水,并测出相应的计数率  $N_{mi}$ , 利用(3)式可以计算出对应的含水量  $\theta_i$ 。另一方面,每加一格水相当于体积含水量增加  $\frac{\Delta X_i}{X}$ , 即  $\theta_i = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta X_i}{X}$  ( $n = 1, 2, \dots, 5$ ), 其中  $\Delta X_i$  为各小格的厚度、 $X$  为大格的厚度,均可以直接用千分卡度量得到。

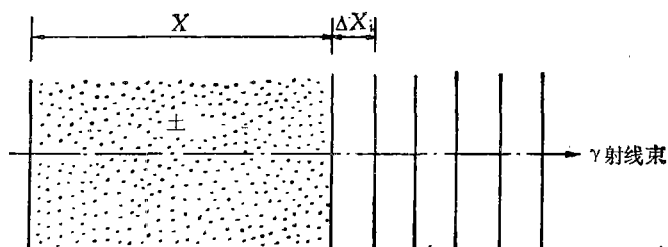


图 3 测量精度标定试验示意图

Fig. 3 Schematic diagram of calibration tests for measurement accuracy

表 3 给出了上述两种测量结果的比较,最大偏差为 0.0025 克/厘米<sup>3</sup>, 相对误差小于 1%。本文设计的模拟容器校准方法比传统法直接将水加入土中更优越,这样既可避免水分平衡过程等待时间过长,又可避免因潮胀或驱气收缩而引起土密度的变化。

表3 两种测量含水量方法的比较

Table 3 Comparison of water-content results measured by two methods

i	$\theta(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$	
	衰减法 Attenuate method	$\frac{\sum_i^n \Delta X_i}{X}$
1	0.0992	0.0991
2	0.2009	0.2001
3	0.3001	0.3026
4	0.4052	0.4041
5	0.5055	0.5074

## 五、计数测定中两个问题的讨论

在计数测定中有两个问题需要讨论,一个是关于分辨时间的校正问题,另一个是测量误差的估计。

### (一) 分辨时间的校正

所谓分辨时间是指能够分辨出两个连续记录下的 $\gamma$ 射线光子的最小时间,这个最小时间又叫做死时间。死时间的修正,可采用下述方程进行<sup>[11]</sup>。

$$I = \frac{N}{1 - \tau N} \quad (5)$$

式中: $I$ 是真正的计数率, $N$ 是观测到的计数率, $\tau$ 是分辨时间。其校正量 $\frac{I - N}{I} = \tau N$ ,它和死时间成正比。一般认为校正只需在高计数率时进行。也有研究者认为当 $(I - N) > 0.1 \times I^{-\frac{1}{2}}$ 时就应当进行死时间的修正<sup>[8]</sup>。

分辨时间随所用仪器的增益电平和鉴别器、计数器电平以及计数率等因素有所变化,因此必须对每一个计数系统进行测定。测定方法如下:首先测定系统的空气中计数 $N_0$ 。然后用两块等厚的铁块,测出每块铁的计数并求平均值 $N_1$ ,再测出两块铁重叠在一起时的计数率 $N_2$ 。分辨时间可以由下式求出:

$$\tau = \frac{N_1^2 - N_0 N_2}{N_1^2(N_0 + N_2) - 2N_0 N_1 N_2} \quad (6)$$

表4为本文的实验结果,从中可以看到:分辨时间 $\tau$ 与计数率 $N_0$ 、衰减比 $N_0/N_2$ 有关,并且在每个 $N_0$ 下都下一个最佳的吸收厚度,在相应的衰减比下,其分辨时间最小。

计数系统的分辨时间应控制在1微秒以下以避免修正。通过选择 $N_0$ 和吸收厚度可以达到分辨时间的目的。

### (二) 测量误差的估计

土壤密度和含水量的测量误差可由方程(2)、(3)中的参数 $N_0$ 、 $N_1$ 、 $N_m$ 、 $\mu_0$ 、 $\mu_w$ 、 $X$ 等的测量误差来估计。如果各个变量是独立的,根据标准误差传递理论<sup>[1]</sup>,测量密度和含水量

表 4 不同  $N_0$  和  $N_0/N_2$  下的分辨时间Table 4 Resolution time at various  $N_0$  and  $N_0/N_2$ 

铁块厚度 Thickness of iron slab (cm)	衰减比 Attenuation ratio ( $N_0/N_2$ )	分辨时间(微秒) Resolution time ( $\mu\text{sec}$ )		
		$N_0 = 904125$	782078	598630/min
0.50	1.74	2.4	2.3	1.7
1.00	2.96	1.2	1.0	0.3
1.50	5.12	0.8	0.8	0.6
1.90	7.64	0.3	1.5	5.5
2.24	10.85	1.7	2.6	7.0
2.50	14.47	3.4	5.4	10.4
3.00	23.27	9.2	1.7	

的标准误差  $\sigma_{\rho_s}$  和  $\sigma_{\theta}$  可以写成:

$$\sigma_{\rho_s}^2 = \left(\frac{\partial \rho_s}{\partial N_s}\right)^2 \sigma_{N_s}^2 + \left(\frac{\partial \rho_s}{\partial N_c}\right)^2 \sigma_{N_c}^2 + \left(\frac{\partial \rho_s}{\partial \mu_s}\right)^2 \sigma_{\mu_s}^2 + \left(\frac{\partial \rho_s}{\partial X}\right)^2 \sigma_X^2 \quad (7a)$$

$$\sigma_{\theta}^2 = \left(\frac{\partial \theta}{\partial N_s}\right)^2 \sigma_{N_s}^2 + \left(\frac{\partial \theta}{\partial N_m}\right)^2 \sigma_{N_m}^2 + \left(\frac{\partial \theta}{\partial \mu_w}\right)^2 \sigma_{\mu_w}^2 + \left(\frac{\partial \theta}{\partial X}\right)^2 \sigma_X^2 \quad (7b)$$

考虑到  $\mu_s$ 、 $\mu_w$  和  $X$  都是校准值,在误差分析中可以忽略,这样式(7)可写成:

$$\sigma_{\rho_s}^2 = \left(\frac{\partial \rho_s}{\partial N_s}\right)^2 \sigma_{N_s}^2 + \left(\frac{\partial \rho_s}{\partial N_c}\right)^2 \sigma_{N_c}^2 \quad (8a)$$

$$\sigma_{\theta}^2 = \left(\frac{\partial \theta}{\partial N_s}\right)^2 \sigma_{N_s}^2 + \left(\frac{\partial \theta}{\partial N_m}\right)^2 \sigma_{N_m}^2 \quad (8b)$$

上式表明测量误差主要来自计数误差,它主要由  $\gamma$  射线从活化源发射的无规本性所决定,无规发射的本性使测得的计数率是一个随机变量。实验表明该随机变量的标准误差与计数时间和计数率的大小有关,测量的相对误差随总计数值(计数时间乘以计数率)的增加而减少。其标准误差可以近似地按总计数值  $N$  的平方根来估计,即  $\sigma_N = \sqrt{N}$ , 其相对误差  $\frac{\sigma_N}{N} = \frac{1}{\sqrt{N}}$ 。例如,在实验中测得的  $N = 10000$ , 那末测量的相对误差  $\frac{1}{\sqrt{N}} = 0.01$ 。

由此可知,欲提高测量精度,可以根据具体情况通过延长计数时间或提高计数率来实现。

对式(2)、(3)进行分部微分,并取  $\sigma_{N_c} = \sqrt{N_c}$ ,  $\sigma_{N_s} = \sqrt{N_s}$ ,  $\sigma_{N_m} = \sqrt{N_m}$ , 代入式(8)可得:

$$\sigma_{\rho_s}^2 = \frac{1}{X \mu_s} \left(\frac{1}{N_c} + \frac{1}{N_s}\right)^{1/2} \quad (9a)$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{1}{X \mu_w} \left(\frac{1}{N_s} + \frac{1}{N_m}\right)^{1/2} \quad (9b)$$

上式中的  $N$  值都是总计数值。利用(9)式就可以很方便地估计土壤密度和含水量的测量误差了。本估计方法与表 3 结果相符。

## 参 考 文 献

- [1] 冯师颜编: 1964, 误差理论与实验数据处理, 科学出版社。
- [2] Van Bavel, C. H. M., 1957: Transmission of gamma radiation by soils and soil densitometry. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 21: 588—591.
- [3] Gurr, C. G., 1962: Use of gamma ray in measuring water content and permeability in unsaturated columns of soil. *Soil Sci.*, 94: 224.
- [4] Ferguson, H. and Gardner, W. H., 1962: Water content measurement in soil columns by gamma ray absorption. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 26: 11—14.
- [5] Reginato, R. J. and Van Bavel, C. H. M., 1964: Soil water measurement with gamma attenuation. *Soil Sci. Soc. Am. J. Vol. 50.*
- [6] Shalhevet, J. and Yaron, B., 1967: Ion distribution moisture content and density of soil columns measured with gamma radiation. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 31: 153—156.
- [7] Gurr, C. G. and Jakobsen, B., 1978: Gamma probe for measurement of field bulk density and water content. In modification of soil structure, pp. 127—133.
- [8] Gardner, W. H., Campbell, G. S. and Calissendariff, C., 1972: Systematic and random errors in dual gamma energy soil bulk density and water content measurement. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 36: 393—398.
- [9] Bridge, B. J. and Collis-George, 1973: A dual source gamma ray traversing mechanism suitable for the non-destructive simultaneous measurement of bulk density and water content in columns of swelling soil. *Aust. J. Soil Res.*, 11: 83—93.
- [10] Davidson, J. M., Biggar, J. W. and Nielsen, D. R., 1963: Gamma-radiation attenuation for measuring bulk density and transient water flow in porous materials. *J. geophys. Res.*, 68: 4777—4783.
- [11] Fritton, D. D., 1969: Resolving time mass absorption coefficient and water content with gamma ray attenuation. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 33: 651—655.

## MEASUREMENT OF SOIL DENSITY AND WATER CONTENT WITH Cs-137 GAMMA RAY ATTENUATION

Qi Longxi and Xie Bing

(*Institute of Mechanics, Academia Sinica*)

### Summary

The present paper describes a nondestructive method in which gamma ray attenuation is used to determine the soil density and water content in a laboratory column. The gamma ray apparatus consists of a radiation source, a detector, a counting system and a mounting platform. The source is a 60 mCi cesium-137 with a peak gamma ray energy of 0.661 MeV. The detector contains a sodium iodide (NaI) scintillation crystal of 4 cm diameter and 4 cm thick, a photomultiplier tube and a preamplifier.

Sufficient shielding and collimating of gamma radiation is essential to improve space resolution and measurement accuracy, and to warrant personal safety. Collimation is required on both source and detector sides. In our equipment, the holes in source-side and detector-side collimators are 8 cm in length and 1 cm in diameter and then standard errors less than  $0.001 \text{ g/cm}^3$  may be obtained for a 10 cm thick soil with a bulk density of  $1.4 \text{ g/cm}^3$ . By means of shielding the source, collimating the beam and controlling the counting rate and time, percentage errors for the system may reach 1% and even less.

To determine the soil density and water content with gamma ray attenuation, it is necessary to know mass absorption coefficients which depend only on material if the source is specified. The calibration experiments were conducted in plexiglas containers. Measured mass absorption coefficients for water, plexiglas, sand, loam and clay were 0.0814, 0.0775, 0.0746, 0.0744 and 0.0732 respectively. For the soil samples mentioned above, measurements were made at several points and averaged due to nonuniform packing.

Two experimental procedures were designed where water is successively filled into a compartmented box. This method provides a convenient and accurate approach to calibrate the system. The results of calibration measurement indicate that the system possesses a good linearity of 0.99999 and measurement deviation of  $0.0025 \text{ g/cm}^3$ .

Resolving time correction is an important problem, especially at high count rates. To avoid the correction, the resolving time of counting system should be less than  $1 \mu\text{s}$ . According to error analysis, errors in the soil density and water content measurements is primarily due to the counting error which results from the random nature of gamma ray emission. The formula for estimation of measurement error is given in this paper.