

## 体积置换法测量土石混合物组分含量

马玉莹<sup>1</sup>, 雷廷武<sup>1,2\*</sup>, Xiusheng Yang<sup>3</sup>

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100; 3. Department of Natural Resources and the Environment, University of Connecticut, Storrs, CT 06269, USA)

**摘 要:** 土石混合物组分含量测量在农业生产、建筑施工及水利工程等方面都有重要的意义。该文根据体积置换原理测量土石混合物比例、土壤含水率、容重、孔隙度/孔隙比等一系列土壤物理参数。给出了测量原理、设备、试验方法与过程。采用陕西杨凌的黏黄土、吉林黑土以及粒径为 5~10 mm 的石砾, 预制不同体积含水率(10%、15%、20%)、石砾体积比例(10%、15%、20%)和土壤颗粒体积比例(40%、45%、50%)的土样。首先采用体积置换法测得土样中石砾、土壤颗粒和土壤水的总体积, 随后取出土样中的石砾, 用体积置换法测得石砾体积, 进而得到土壤颗粒和土壤水的体积, 并据此得到土壤含水率、土壤容重、土中气体含量、土壤孔隙度和孔隙比。用烘干法测量得到土壤容重和含水率, 将 2 种方法测得的结果对比分析表明, 使用体积置换法测得的土壤含水率比烘干法测量的结果大, 相对误差在 5% 左右, 测量的土壤容重偏小约 1%, 土壤气体含量的测量相对误差约为 2%。测量土壤孔隙度的相对误差约为 1%, 土壤孔隙比的测量误差为 1%~1.5%。表明体积置换法可以较为准确地测量土石混合物中各组分的相对含量, 具有操作便捷、测量精度高、有普遍适用性等优点, 可以为相关研究和测量提供参考。

**关键词:** 孔隙; 水分; 测定; 土石混合物; 体积置换; 恒容容器

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.09.014

中图分类号: S151.9<sup>2</sup>

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-09-0085-07

马玉莹, 雷廷武, Xiusheng Yang. 体积置换法测量土石混合物组分含量[J]. 农业工程学报, 2015, 31(9): 85—91.

Ma Yuying, Lei Tingwu, Xiusheng Yang. Volume replacement method for partitioning contents of rocks, soil particles and water mixture[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(9): 85—91. (in Chinese with English abstract)

### 0 引 言

土壤不仅是农业生产的重要资源, 也是地面车辆行驶的主要介质和建筑施工工程的主要工作对象<sup>[1-2]</sup>。土体通常是由大小、形状不同的固体组分和孔隙以一定的形式连结所形成的多孔介质, 各固体组分的大小及数量影响土的物理性质<sup>[3-6]</sup>。除少数冲积平原外, 所有的农耕坡地土壤都含有或多或少的石砾。土壤中石砾的存在, 影响耕作、降雨入渗、水分养分在土壤中的运动与重分布、地表蒸发过程、作物根系的生长以及坡面土壤侵蚀<sup>[7-12]</sup>。水利建设和土方施工工程涉及大量的土石填方, 如港口陆域填方、土石堤坝、土石地基等, 作为填料的土石混料是由土壤颗粒、岩石颗粒、颗粒间的孔隙以及孔隙中的气体和水等部分组成的多相体<sup>[13]</sup>。由于土石混料组成部分的相对比例关系不同所表现的物理状态<sup>[14]</sup>, 决定土体结构的差异, 进而影响土体功能<sup>[15-16]</sup>。土壤与岩石颗

粒是组成土体的重要物质基础, 是拟定土地利用、管理和改良措施的重要依据。土壤水分和土壤空气主要存在于固体颗粒间的孔隙中<sup>[17-20]</sup>, 对成土过程有重要意义。颗粒间容纳水分和空气的土壤孔隙, 在土体结构中起着重要作用<sup>[21-26]</sup>, 土壤的孔隙比和孔隙度通常反映土体密实程度<sup>[27-30]</sup>, 决定土的通气性和透水性。

在农业生产中, 土壤含水率等相关土壤参数的测定对于农田灌溉、作物生长、土壤生物等方面非常重要。在常规土壤含水率测量中, 测量对象主要是细粒土, 选取细粒土壤或者将土样中的大粒径石砾去除后进行测量。目前, 土壤水分的测量可采用多种仪器和途径, 传统烘干法长期以来作为标定所有其他间接测量方法的基础, 虽然测量精度较高, 但耗费资源和时间。早期的研究者们曾尝试采用容量瓶替代烘干法测量含水率<sup>[31-33]</sup>, 但由于容量瓶的瓶颈很细, 将待测的湿润土样转移至容量瓶中时操作困难, 且易造成土样损失和水分流失。除此之外, 在测量的过程中排出的气体常在容量瓶瓶颈内浮在液体表面难以去除, 影响读数结果。并且在表面张力作用的影响下, 难以准确读取液体的体积。在不同的环境温度测量的结果还应根据室内温度进行校正。因此, 在测量过程中存在的诸如此类的一些问题和困难都制约这种容量瓶方法的使用和推广。而在水利建设和建筑施工工程中, 涉及到大量的土石填料, 土体中掺杂一定量的大粒径石砾, 或需要测量的土壤样品夹杂在石缝中, 造成细粒土取样困难。因此, 在这种情况下不宜采用常

收稿日期: 2014-11-17 修订日期: 2015-04-10

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41230746); 国家自然科学基金创新研究群体科学基金(51321001)

作者简介: 马玉莹, 女, 天津人, 博士生, 主要从事水文学及水资源方面的研究。北京 中国农业大学水利与土木工程学院, 100083。

Email: myuying2010@163.com

\*通信作者: 雷廷武, 男, 湖北洪湖人, 教授, 博士生导师, 中国农业工程学会常务理事, 主要从事土壤侵蚀和旱地农业等方面研究。北京 中国农业大学水利与土木工程学院, 100083。Email: leitingwu@cau.edu.cn

规选取细粒土的方法进行测量。另外,对于土石混料中含水率、容重、土壤孔隙度/孔隙比等参数的测量研究记载较少。

本文使用恒容容器,采用体积置换法测量土石混合物中土壤颗粒、石砾、土壤水分和气体的相对含量,对以往仅针对细粒土壤含水率等参数的测量进行拓展,对前期使用的环刀<sup>[34]</sup>和普通容器测量装置<sup>[35]</sup>进行改进,提出可应用于农业生产、水利工程以及建筑施工等方面的土壤石砾混合物的含水率、容重、孔隙度/孔隙比测量的体积置换方法。以陕西杨凌的黏黄土和吉林的黑土为例进行试验测量,并将测量的结果与传统烘干法的测量结果进行比较分析。

## 1 体积置换法

### 1.1 测量原理

土壤的固相物质组成中常含有大小、形状不同的碎石、卵石或岩石颗粒<sup>[36]</sup>,因此土壤中的固相物质由土壤颗粒与石砾组成。称量得到环刀内土样的质量,对于采用一定体积环刀取得的土样,各组分间的体积和质量关系有:

$$V_a + V_w + V_s + V_{st} = V \quad (1)$$

$$M_a + M_w + M_s + M_{st} = M \quad (2)$$

式中:  $V_a$ 、 $V_w$ 、 $V_s$ 、 $V_{st}$ 、 $V$  分别为土壤气体、土壤水、土壤颗粒、石砾以及初始土样的体积,  $\text{cm}^3$ ;  $M_a$ 、 $M_w$ 、 $M_s$ 、 $M_{st}$ 、 $M$  分别为土壤气体、土壤水、土壤颗粒、石砾以及初始土样的质量,  $\text{g}$ 。

在计算中忽略土壤气体的质量,则式(2)变为:

$$\rho_w V_w + \rho_s V_s + \rho_{st} V_{st} = M \quad (3)$$

式中:  $\rho_s$ 、 $\rho_{st}$ 、 $\rho_w$  分别为土壤颗粒、石砾和水的密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ 。

试验采用恒容容器<sup>[37]</sup>,使用体积置换法测量土石混合物的含水率、容重和孔隙度/孔隙度等一系列参数。

恒容容器制作完成后,在  $2\sim 4^\circ\text{C}$  状态下测量装满蒸馏水后的质量,由水的质量精确标定恒容容器的容积,误差为  $0.01 \text{ g} (\text{cm}^3)$ ,测量精度为万分之一。

将用标准环刀取得的土石混合物放入恒容容器中,称量其质量后向容器中注入蒸馏水置换土体中的气体,称量得到土壤颗粒、石砾和水的总质量  $M'$ 。根据质量关系有:

$$M_r + M_w + M_s + M_{st} = M' \quad (4)$$

式中:  $M_r$  为替代恒容容器和土体中的气体所占空间而补充的水分质量,  $\text{g}$ 。

恒容容器中各物质体积关系如图1所示,为:

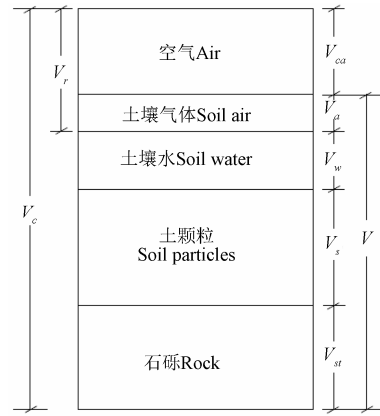
$$V_{ca} + V_a + V_w + V_s + V_{st} = V_c \quad (5)$$

式中:  $V_{ca}$  为恒容容器内空气所占的体积,  $\text{cm}^3$ ;  $V_c$  为恒容容器的体积,  $\text{cm}^3$ 。

向恒容容器中补水置换气体的体积为:

$$V_r = V_a + V_{ca} = M_r / \rho_w(T) \quad (6)$$

式中:  $\rho_w(T)$  为在试验温度环境下置换气体所补充的蒸馏水的密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ 。



注:  $V_a$  为土壤气体的体积,  $\text{cm}^3$ ;  $V_w$  为土壤水的体积,  $\text{cm}^3$ ;  $V_s$  为土壤颗粒的体积,  $\text{cm}^3$ ;  $V_{st}$  为石砾的体积,  $\text{cm}^3$ ;  $V$  为土样体积,  $\text{cm}^3$ ;  $V_{ca}$  为恒容容器内空气的体积,  $\text{cm}^3$ ;  $V_r$  为将恒容容器注满水所置换出土中以及容器内空气空隙的总体积,  $\text{cm}^3$ ;  $V_c$  为恒容容器体积,  $\text{cm}^3$ 。

Note:  $V_a$  is air-filled volume in soil,  $\text{cm}^3$ ;  $V_w$  is volume of soil water,  $\text{cm}^3$ ;  $V_s$  is volume of soil particles,  $\text{cm}^3$ ;  $V_{st}$  is volume of rocks,  $\text{cm}^3$ ;  $V$  is volume of soil sample,  $\text{cm}^3$ ;  $V_{ca}$  is air-filled volume,  $\text{cm}^3$ ;  $V_r$  is air-filled volume replaced by the added water,  $\text{cm}^3$ ;  $V_c$  is volume of constant volume container,  $\text{cm}^3$ .

图1 恒容容器中各物质体积关系

Fig.1 Volume relationship of components in constant volume container

### 1.2 石砾含量与密度计算

测量土水混合物的质量后,取出石砾洗净、干燥并放入恒容容器中,称量石砾初始质量后,将恒容容器注满蒸馏水,然后称量注满水后恒容容器的总质量,计算得到补水置换气体的体积和石砾的体积。

$$V_{rst} = (M_{st}' - M_{st}) / \rho_w(T) \quad (7)$$

$$V_{st} = V_c - V_{rst} \quad (8)$$

式中:  $V_{rst}$  为测量石砾体积时补水置换恒容容器内气体的体积,  $\text{cm}^3$ ;  $M_{st}'$  为恒容容器注满水后石砾与水的总质量,  $\text{g}$ 。

同时,石砾的密度可以由称量得到的石砾质量  $M_{st}$  和用体积置换法测得的石砾体积  $V_{st}$  确定。

$$\rho_{st} = M_{st} / V_{st} \quad (9)$$

### 1.3 土壤含水率计算

根据式(3)、式(5)和式(6)有:

$$\rho_w V_w + \rho_s V_s = M - M_{st} \quad (10)$$

$$V_w + V_s = V_c - V_{st} - V_r \quad (11)$$

联立式(10)和式(11),得到土壤含水率:

$$\theta = \frac{(V_c - V_{st} - V_r)\rho_s - (M - M_{st})}{(M - M_{st}) - (V_c - V_{st} - V_r)\rho_w} \times \frac{\rho_w}{\rho_s} \times 100\% \quad (12)$$

### 1.4 土壤容重、孔隙度、孔隙比计算

土壤容重根据定义有:

$$\rho_b = \frac{V_s \rho_s}{V_s + V_w + V_a} \quad (13)$$

根据式(7)、式(8)测量的石砾体积,式(10)、式(11)测得的土壤颗粒和土壤水的体积,由式(1)确定土壤充气孔隙的体积,继而确定土壤容重。随后可以确定土壤基质的孔隙容积,即土壤水和土中空气的体积和,用土壤孔隙度  $n$  或孔隙比  $e$  表示:

$$n = \frac{V_a + V_w}{V} \times 100\%$$

(14)

$$e = \frac{V_a + V_w}{V_s + V_{st}}$$

(15)

2 体积置换法应用试验

2.1 土石混合物设计

采用陕西杨凌的黏黄土和吉林的黑土进行试验。2 种土壤的特性分析如表 1 所示。

表 1 试验土壤特性分析  
Table 1 Properties of two soils used in this study

土壤类型 Soil type	黏粒 Clay (<0.002mm)	粉粒 Silt (≥0.002~ 0.05 mm)	砂粒 Sand (≥0.05~ 1 mm)	CaCO <sub>3</sub>	有机质 Organic matter
黏黄土 Clay loam	29	48	23	7.68	0.73
黑土 Black soil	15	40	45	0.64	1.72

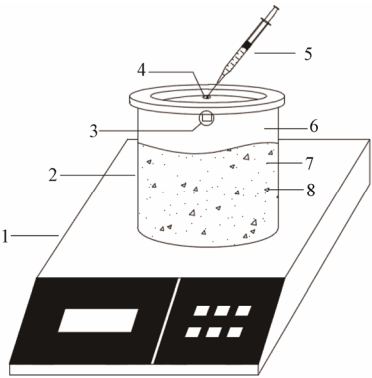
本课题组采用体积置换法获得黏黄土和吉林黑土的颗粒密度分别为 2.6565 和 2.6417 g/cm<sup>3</sup>[37]。试验前将土样烘干并过 2 mm 筛，得到均匀细颗粒的干燥土样。选取粒径为 5~10 mm 的石砾洗净并风干。选取体积为 100 cm<sup>3</sup> 的标准环刀，将干燥的细土壤颗粒、洗净并风干的石砾以及蒸馏水按照一定的体积比例混合后制备成试验土样，再按设定的容重装入环刀内。根据一般土壤中固相率为 50%~60%，容积含水率约 20%以及气相率约 20%，设计预制土样的体积含水率约为：10%、15%、20%；石砾的体积比例约为：10%、15%、20%；土壤颗粒占有的体积比例约为：40%、45%、50%，即将土壤颗粒、石砾以及土壤水按照不同设计比例配制土样，如表 2 所示。每种土壤在不同设计体积含水率、石砾体积比例、土壤颗粒体积比例的条件 下各设有 3 个重复，即每种土壤分别预制成 81（27×3）份土样。

表 2 预制土样中土壤颗粒占有的体积比例  
Table 2 Proportion of soil particles under different volume of rocks and volumetric moisture contents

石砾体积比例 Proportion of rock	体积含水率 Volumetric water content								
	10			15			20		
	40	45	50	40	45	50	40	45	50
10	40	45	50	40	45	50	40	45	50
15	40	45	50	40	45	50	40	45	50
20	40	45	50	40	45	50	40	45	50

2.2 试验装置

试验装置主要包括容积固定的恒容容器、标准环刀（100 cm<sup>3</sup>）和电子秤（精度为 0.01 g）。试验测量的主要装置如图 2 所示。测量试验在中国农业大学土力学实验室进行，试验条件温度为 25~30℃。



1. 电子秤 2. 恒容容器 3. 溢水口 4. 注水口 5. 针头注射器 6. 补充水  
7. 土壤颗粒 8. 石砾  
1. Electronic balance 2. Constant volume container 3. Liquid outlet  
4. Liquid adjusting hole 5. Water injector 6. Added water 7. Soil particles  
8. Rocks

图 2 测量装置图

Fig.2 Diagram of experimental device

2.3 土样配制

配制试验土样的过程为：将蒸馏水、石砾、细粒土根据式（16）、式（17）和式（18）计算质量并装入选定的标准环刀（体积为 100 cm<sup>3</sup>）内。

$$m_w = A \times V \times \rho_w(T_r)$$

(16)

$$m_{st} = B \times V \times \rho_{st}$$

(17)

$$m_s = C \times V \times \rho_s$$

(18)

式中： $m_w$ 、 $m_{st}$ 、 $m_s$  分别为应装入环刀内蒸馏水、石砾、土壤颗粒的质量，g； $A$ 、 $B$ 、 $C$  分别为水、石砾、土壤颗粒占有的体积比例，%； $\rho_w(T_r)$  为水的密度，1 g/cm<sup>3</sup>； $\rho_{st}$  和  $\rho_s$  分别为石砾和土壤颗粒的密度，g/cm<sup>3</sup>； $T_r$  为室内温度，℃。

配制试验土样时石砾密度的确定方法如下：取不同质量的洗净并干燥后的石砾（10、20、40、60、80 g），分别放入恒容容器中，采用体积置换法，根据式（7）和式（8）测量得到不同质量石砾的体积，然后根据式（9）计算得到试验选用石砾的平均密度约为 2.6550 g/cm<sup>3</sup>。随后，根据不同的设计体积含水率、石砾的体积比例和土壤颗粒的体积比例，按照水的密度、测量的石砾平均密度、选用土壤的颗粒密度与各自所占体积的乘积，由上述式（16）~（18）分别计算向环刀内加入蒸馏水、石砾以及土壤颗粒的质量。

2.4 试验过程

试验前，需采用恒容容器用蒸馏水测量得到环境温度下水的体积密度。将土样（从环刀中）取出，称量初始质量后置于恒容容器内，向容器内加蒸馏水，边注水边缓慢搅拌，以便土样中的气体排出。当蒸馏水将近注满恒容容器时，将恒容容器加盖，然后用注射器通过恒容容器盖上的微调注水口向容器内补充微量的水，直至将恒容容器注满，此时恒容容器的排水口有水排出。补充的蒸馏水将容器中的气体全部置换出来，准确得到了土壤颗粒、石砾与水的混合物的体积，即恒容容器的容积。随后称量土壤颗粒、石砾、

水与恒容容器的总质量, 根据式 (3)、式 (4) 和式 (6) 确定补水体积, 继而确定土壤颗粒、土壤水和石砾的总体积。

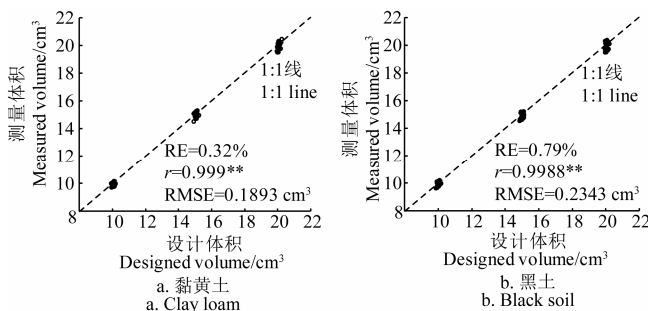
取出土样中的石砾, 洗净并干燥后放入恒容容器内, 称量石砾质量后将恒容容器注满蒸馏水, 根据式 (7) 计算补水置换气体的体积后由式 (8) 计算石砾的体积。由石砾的质量和体积可以计算得到石砾的密度。

根据测量得到的含石砾土样的初始质量和石砾的质量, 由式 (10) 计算得到土壤颗粒与土壤水的质量和, 根据恒容容器的容积和测得的石砾体积, 由式 (11) 计算得到土壤颗粒与土壤水的体积和。随后根据选用土壤的颗粒密度和试验环境条件下的水密度, 由式 (12) 计算得到土壤含水率, 由式 (13) 计算得到土壤容重。根据环刀体积、体积置换法测得的土壤颗粒体积、土壤水体积以及石砾的体积, 由式 (1) 测得土壤充气孔隙体积, 进而根据式 (14)、式 (15) 计算得到土壤孔隙度和孔隙比。同时, 用传统烘干法 (72 h, 105℃) 测量土壤容重、含水率、土中气体含量以及土壤孔隙度/孔隙比。然后将采用体积置换法测量的结果与传统烘干法测量的结果进行对比。

### 3 结果与分析

#### 3.1 土壤石砾

将体积置换法测量得到的石砾体积与试验设计的石砾体积进行对比 (每种土壤分别测量 81 份土样), 结果如图 3 所示, 体积置换法测量石砾体积的相对误差 (relative error, RE) 小于 1%, 均方根误差 (root-mean-square error, RMSE) 分别为 0.1893 和 0.2343 cm<sup>3</sup>, 并且在 0.01 水平下相关性显著, 表明采用体积置换法可以较为准确地测量石砾的体积。



注:  $r$  是相关系数; RE 是相对误差; RMSE 是均方根误差; \*\*表示在 0.01 水平显著; 下同。

Note:  $r$  is correlation coefficient; RE is relative error; RMSE is root-mean-square error; \*\* indicate correlation is significant at 0.01 level; Same as below.

图 3 体积置换法测量石砾体积与石砾设计体积对比

Fig.3 Designed and measured volume of rocks by volume replacement method in soil samples

根据称量的石砾质量和采用体积置换法测得的石砾体积, 由式 (9) 可以计算得到石砾的密度 (每种土壤分别测量 81 份土样), 如图 4 所示。图 4 表明 2 种土壤样品测量的石砾密度都集中在 2.62~2.72 g/cm<sup>3</sup>, 测量最大值与最小值比较的相对误差约为 3%, 说明采用体积置换法可以较为准确地测量石砾的密度。

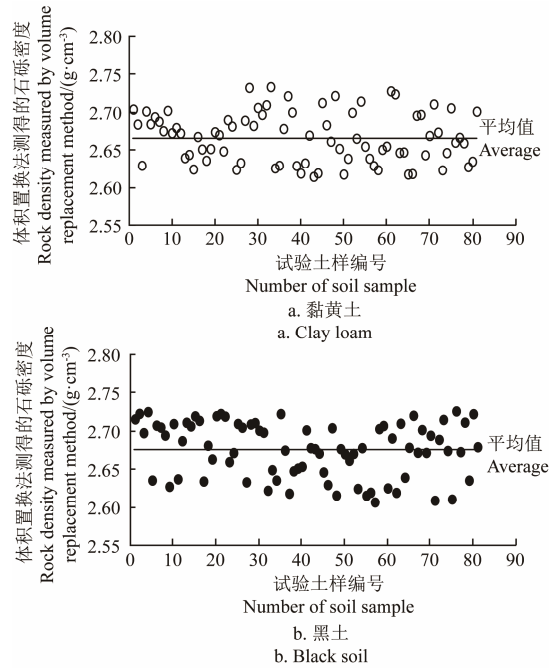
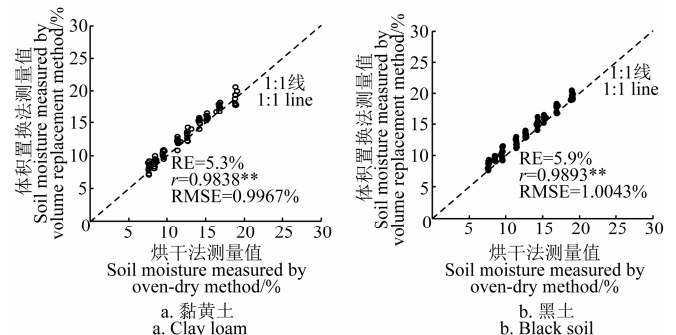


图 4 体积置换法测量土样中的石砾密度

Fig.4 Rock densities measured by volume replacement method

#### 3.2 土壤含水率

将采用体积置换法测得的土壤含水率与传统烘干法测得的结果进行比较 (每种土壤分别测量 81 份土样), 列入图 5 所示。



注: 105℃条件下烘干土样 72 h 测量土壤含水率。

Note: Drying soil samples under condition of 105℃ for 72 h to determine soil moisture.

图 5 体积置换法测量含水率与传统烘干法测量结果对比

Fig.5 Soil moisture measured by volume replacement method and by conventional oven-dry method

图 5 说明测量土石混合物中土壤的含水率时, 采用体积置换法测得的结果与传统烘干法测量的结果相差不大, 采用体积置换法测得的土壤含水率比传统烘干法测得的结果大, 相对误差约为 5%, 考虑土样烘干时难以达到彻底干燥, 造成烘干法测量得到的水的质量偏低。测量结果显示均方根误差分别为 0.9967% 和 1.0043%, 并且 2 种方法测量的含水率在 0.01 水平下相关性显著。试验结果表明使用体积置换法可以较为准确地测量土石混合物多相体系中土壤水的相对含量。

#### 3.3 土壤容重、气体体积和孔隙度/孔隙比

根据式 (1)、式 (13)、式 (14) 和式 (15) 分别

可以计算土中气体含量、土壤容重、土壤孔隙度和孔隙比, 将2种土壤采用体积置换法和传统烘干法测量的结果进行对比, 结果如表3所示。

测量结果表明采用体积置换法测量得到的土壤容重较烘干法的结果小约为1%, 测量的土壤充气孔隙体积小

约2%。测量的土壤孔隙度大约1%, 测量的土壤孔隙比大1%~1.5%。除此之外, 2种方法测量上述参数的结果在0.01水平下相关性显著。试验结果说明采用体积置换法测量土石混合物的土壤容重、土中气体含量、土壤孔隙度和孔隙比具有可行性与合理性。

表3 体积置换法与烘干法测量结果对比分析

Table 3 Statistical analysis of results measured by volume replacement with those obtained by oven-dry method for two soils

土壤 Soils	容重 Bulk density			空气体积 Volume of soil air			孔隙度 Soil porosity			孔隙比 Soil void ratio		
	RE/%	<i>r</i>	RMSE/ (g·cm <sup>-3</sup> )	RE/%	<i>r</i>	RMSE/cm <sup>3</sup>	RE/%	<i>r</i>	RMSE/%	RE/%	<i>r</i>	RMSE
黏黄土 Clay loam	0.61	0.9985**	0.0117	1.79	0.9982**	0.6304	0.69	0.999**	0.38	1.19	0.9994**	0.0108
黑土 Black soil	0.72	0.9989**	0.0122	1.96	0.9987**	0.639	0.77	0.9993**	0.39	1.26	0.999**	0.0112

注: *r* 是相关系数; RE 是相对误差; RMSE 是均方根误差; \*\*表示在0.01水平显著。

Note: *r* is correlation coefficient; RE is relative error; RMSE is root-mean-square error; \*\* indicate correlation is significant at 0.01 level.

#### 4 结论与讨论

该文提出采用体积置换法测量土石混合物的土壤含水率、容重、土中气体含量、石砾体积/密度以及土壤孔隙度/孔隙比。测量结果表明, 与传统烘干法(72 h, 105℃)测得的结果相比较, 采用体积置换法测得的土壤含水率偏大, 相对误差在5%左右, 测量的土壤容重偏小约1%, 测量土壤充气孔隙体积的相对误差约为2%。体积置换法测量土壤孔隙度的相对误差约为1%, 测量土壤孔隙比的相对误差为1%~1.5%。说明体积置换法测量土石混合物中各组分的相对含量具有合理性与可行性, 可以采用恒容容器较为准确地测得土石混合物的土壤含水率、容重、孔隙比/孔隙度等土壤物理参数。同时, 该研究对以往的测量主体主要为细粒土进行拓展, 在农业生产、水利工程以及建筑施工等应用方面具有重要意义。测量操作过程表明采用恒容容器的体积置换法测量稳定性良好, 具有低能耗、操作便捷、测量精度高等优点。

除此之外, 测量土石混合物的含水率、容重等一系列参数是体积置换法在土壤物理方面相关测量的研究, 根据土石混合物是三相物质(空气、水、石砾和土颗粒)组成的混合体系, 采用恒容容器的体积置换法可以定量测定混合物中各相物质含量, 因此, 根据该测量原理与测量思路, 可以将体积置换法应用到其他领域。对于由其他物质(互不发生理化反应)组成的固-液或者固-液-气混合物, 采用该恒容容器的体积置换法进行其组成物的成分含量测量分析具有可行性。虽然到目前为止未进行对由其他物质所组成混合物的组分含量测量分析试验, 但体积置换法为其开辟了一条新的测量思路, 具有广泛的应用前景。

#### [参 考 文 献]

- [1] 夏拥军, 丁为民. 土壤机械阻力的测定及其应用[J]. 农机化研究, 2006(10): 190—192.  
Xia Yongjun, Ding Weimin. Measurement of soil mechanical resistance and its application[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2006(10): 190—192. (in Chinese with English abstract)

- [2] 刘占锋, 傅伯杰, 刘国华, 等. 土壤质量与土壤质量指标及其评价[J]. 生态学报, 2006, 26(3): 901—909.  
Liu Zhanfeng, Fu Bojie, Liu Guohua, et al. Soil quality: concept, indicators and its assessment[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(3): 901—909. (in Chinese with English abstract)
- [3] 黄冠华, 詹卫华. 土壤颗粒的分形特征及其应用[J]. 土壤学报, 2002, 39(4): 490—497.  
Huang Guanhua, Zhan Weihua. Fractal property of soil particle size distribution and its application[J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 39(4): 490—497. (in Chinese with English abstract)
- [4] Bird N R A, Perrier E, Rieu M. The water retention function for a model of soil structure with pore and solid fractal distributions[J]. European Journal of Soil Science, 2000, 51(1): 55—63.
- [5] Millan H, Gonzalez-Posada M, Aguilar M, et al. On the fractal scaling of soil data. Particle-size distributions[J]. Geoderma, 2003, 117(1/2): 117—128.
- [6] Prosperini N, Perugini D. Particle size distributions of some soils from the Umbria Region (Italy): Fractal analysis and numerical modeling[J]. Geoderma, 2008, 145(3/4): 185—195.
- [7] 王清, 张民, 王通. 不同石砾条件对土壤水分入渗的影响[J]. 湖南农业科学, 2012(21): 43—47.  
Wang Qing, Zhang Min, Wang Tong. Influences of different gravel conditions on soil water infiltration[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2012(21): 43—47. (in Chinese with English abstract)
- [8] Cerda A. Effects of rock fragment cover on soil infiltration, inter-rill runoff and erosion[J]. European Journal of Soil Science, 2001, 52(1): 59—68.
- [9] 朱元骏, 邵明安. 不同碎石含量的土壤降雨入渗和产沙过程初步研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(2): 64—67.  
Zhu Yuanjun, Shao Ming'an. Processes of rainfall infiltration and sediment yield in soils containing different rock fragment contents[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(2): 64—67. (in Chinese with English abstract)



- [10] 朱元骏, 邵明安. 含砾石土壤降雨入渗过程模拟[J]. 水科学进展, 2010, 21(6): 779—787.  
Zhu Yuanjun, Shao Ming'an. Simulation of rainfall in filtration in stony soil[J]. Advance in Water Science, 2010, 21(6): 779—787. (in Chinese with English abstract)
- [11] 王慧芳, 邵明安. 含碎石土壤水分入渗试验研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(5): 604—609.  
Wang Huifang, Shao Ming'an. Experimental study on water infiltration of soil containing rock fragments[J]. Advance in Water Science, 2006, 17(5): 604—609. (in Chinese with English abstract)
- [12] Hanson C T, Blevins R L. Soil water in coarse fragments[J]. Soil Science Society of America Journal, 1979, 43(4): 819—820.
- [13] 汪魁. 多相土石复合介质电阻率特性理论及应用研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.  
Wang Kui. Theoretical and Applied Research on Electrical Resistivity of Multiphase Earth-rock Composite Medium[D]. Chongqing: Chongqing Jiao tong University, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [14] 杨林丰, 钟南. 根系生长与土壤物理性状之间的关系[J]. 农机化研究, 2007, 8: 22—24.  
Yang Linfeng, Zhong Nan. The relationship between root system growth and soil physical property[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007, 8: 22—24. (in Chinese with English abstract)
- [15] 陈玉真, 王峰, 尤志明, 等. 不同土壤类型茶园土壤物理性状特征研究[J]. 茶叶科学技术, 2014(1): 12—17.  
Chen Yuzhen, Wang Feng, You Zhiming, et al. Soil physical properties with different soil types of tea garden[J]. Tea Science and Technology, 2014(1): 12—17. (in Chinese with English abstract)
- [16] 曾德超. 机械土壤动力学[M]. 北京: 科学技术出版社, 1995: 108—115.
- [17] 王小波. 土壤通透性对作物生长的影响[J]. 农民科技培训, 2011, 4: 34.
- [18] 程云生. 土壤空气研究概况[J]. 土壤学报, 1965, 13(3): 344—353.
- [19] 史立本. 土壤空气、水分及其气水比变化规律的研究[J]. 土壤肥料, 1980, 3: 6—11.
- [20] 吕德方, 王险峰, 刘赞林, 等. 浅析调节土壤空气应注意的问题[J]. 现代农业, 2003, 12: 16—17.
- [21] Blavet D, Noni G De, Bissonnais Y Le, et al. Effect of land use and management on the early stages of soil water erosion in French Mediterranean vineyards[J]. Soil and tillage research, 2009, 106(1): 124—136.
- [22] Bottinelli N, Henry-des-Tureaux T, Hallaire V, et al. Earthworms accelerate soil porosity turnover under watering conditions[J]. Geoderma, 2010, 156(1/2): 43—47.
- [23] Lipiec J, Kuś J, Słowińska-Jurkiewicz A, et al. Soil porosity and water infiltration as influenced by tillage methods[J]. Soil and tillage research, 2006, 89(2): 210—220.
- [24] Glab T, Szewczyk W. Influence of simulated traffic and roots of turfgrass species on soil pore characteristics[J]. Geoderma, 2014, 230/231: 221—228.
- [25] Pires L F, Brinatti A M, Saab S C, et al. Porosity distribution by computed tomography and its importance to characterize soil clod samples[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2014, 92: 37—45.
- [26] 刘月秀, 李银, 曹福亮. 广东桉树林土壤物理性质及其影响因子分析[J]. 林业科技开发, 2012, 26(4): 13—18.  
Liu Yuexiu, Li Yin, Cao Fuliang. Soil physical properties and their influencing factors under *Eucalyptus* plantations in Guangdong Province[J]. China Forestry Science and Technology, 2012, 26(4): 13—18. (in Chinese with English abstract)
- [27] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [28] 秦耀东. 土壤物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 19.
- [29] 陈仲颐, 周景星, 王洪瑾. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 15.
- [30] Kuncoro P H, Koga K, Satta N, et al. A study on the effect of compaction on transport properties of soil gas and water. II: Soil Pore Structure Indices[J]. Soil and Tillage Research, 2014, 143: 180—187.
- [31] Papadakis J S. A rapid method for determining soil moisture[J]. Soil Science, 1941, 51(4): 279—282.
- [32] Prihar S S, Sandhu B S. A rapid method of soil moisture determination[J]. Soil Science, 1967, 105(3): 142—144.
- [33] Aggarwal G C, Tripathi B R. A simple and rapid method of soil water determination[J]. Journal of Soil Science, 1975, 26(4): 437—439.
- [34] 马玉莹, 雷廷武, 张心平, 等. 体积置换法直接测量土壤质量含水率及土壤容重[J]. 农业工程学报, 2013, 29(9): 86—93.  
Ma Yuying, Lei Tingwu, Zhang Xinping, et al. Volume replacement method for direct measurement of soil moisture and bulk density[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(9): 86—93. (in Chinese with English abstract)
- [35] 马玉莹, 雷廷武, 张心平. 测量土壤质量含水率的体积置换方法[J]. 农业机械学报, 2013, 44(12): 148—153.  
Ma Yuying, Lei Tingwu, Zhang Xinping. Direct measurement method of soil moisture by volume replacement[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(12): 148—153. (in Chinese with English abstract)
- [36] Soil and Rock Classification and Logging[M]. Geotechnical Design Manual, 2013: 5—28.
- [37] 马玉莹, 雷廷武, 庄晓晖. 测量土壤颗粒密度的体积置换法[J]. 农业工程学报, 2014, 30(15): 130—139.  
Ma Yuying, Lei Tingwu, Zhuang Xiaohui. Volume replacement methods for measuring soil particle density[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(15): 130—139. (in Chinese with English abstract)

## Volume replacement method for partitioning contents of rocks, soil particles and water mixture

Ma Yuying<sup>1</sup>, Lei Tingwu<sup>1,2\*</sup>, Xiusheng Yang<sup>3</sup>

(1. College of Hydraulic and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China

3. Department of Natural Resources and the Environment, University of Connecticut, Storrs, CT 06269, USA)

**Abstract:** The effective measurement of the components in soil and rock mixture composition is of great importance in such studies and applications as agricultural production, civil and hydraulic engineering. This paper presents a volume replacement method for accurate measurement of soil, water and rock mixture components, including a series soil physical parameters measurement such as rock content and density, water content, soil bulk density, volume of soil air, porosity and void ratio. The measurement principle is based on the physic model of gas-liquid-solid composition in soils. Typically, soil consists of soil particles, rock fragments, water and air. A clay loam from Yangling of Shaanxi Province and a black soil from Jilin Province were used for the demonstrational measurements. The cleaned and dried rock fragments with the particle sizes of 5-10 mm were used for the experiments. Soil samples were prepared at 3 volumetric moisture contents as 10%, 15%, and 20%. The percentage volumes of rock mass were about 10%, 15%, and 20%. And the volumes of soil particles were designed as 40%, 45%, and 50%. Soil samples prepared were packed into the sampling rings of 100 cm<sup>3</sup> in volume. The samples were placed into a constant volume container (CVC) with a known volume before it was weighted. Then the CVC was filled full of distilled water to replace air-filled space in the soil sample and the container, before it was weighted to determine the replaced air-filled space, and the total volume of rock, soil particles and soil water. The rock fragments were cleaned and dried before were weighted and put into the CVC to be filled full of water, so as to determine their volumes. The volumes and mass of soil particles and soil water were calculated after the volume and mass of rocks were determined. The volume of air was computed by the difference between the volume of sampling ring and the total volume of rocks, soil particles and soil water. After the soil samples were measured by volume replacement method, they were put into an oven to dry under 105°C for 72 h to determine the mass of soil particles and soil water, to determine the soil moisture content and bulk density by using conventional oven-dry method. The air-filled volume in soil, as well as soil porosity and void ratio could be determined after measuring the volume of rocks, soil particles and soil water. The results measured by these two methods were compared. The results showed that the soil water contents measured by the volume replacement method with a CVC were higher than those obtained by the oven-dry method, with the relative errors about 5%. The measurement errors in soil bulk densities between the two methods were about 1%. The air-filled volumes of the soil measured by the 2 methods produced errors of about 2%. Compared with conventional oven-dry method, the relative errors in the measured soil porosities by applying volume replacement method were about 1%, and the measurement errors of void ratios were 1%-1.5%. The results indicate the feasibilities of accurate and effective measurement of soil particle and rock mixture components using the volume replacement method, which is the expansion and improvement for the previous measurement method by using fine-grained soils. Generally, for the measurement of soil particle and rock mixture composition, the proposed volume replacement method by using a CVC for a group measurement of soil physical parameters (soil water content, bulk density, soil air-filled volume, porosity and void ratio) in this study has such advantages as simple operation procedure, time efficient and low energy consumption. Besides, this volume replacement method with a CVC also can provide a helpful tool for the related experiments and measuring methods.

**Key words:** porosity; moisture; measurements; soil and rock mixture; volume replacement; constant volume container (CVC)