

γ 透射法在土壤水运动研究中的应用

王文焰, 张建丰, 汪志荣

(西安理工大学水资源研究所, 西安 710048)

摘要: 在作者对 γ 透射法测定土壤含水量的精度与分辨率研究的基础上, 首先介绍了利用 γ 透射法在室内外一维入渗实验过程中, 同时测定几个土壤水分运动参数的原理与方法; 其次对作者近十多年来, 根据不同实验要求所研制的室内一维与不同类别的二维土壤水分运动实验装置的结构组成与应用情况做了介绍; 最后对 γ 透射法用于大型称重式蒸渗仪的土壤水分剖面检测也做了概述。在上述各实验方法及实验装置中均采用了计算机对土壤水分的自动检测、控制与数据处理, 从而为非饱和土壤水分运动的研究提供了重要条件。研究表明, 在利用 γ 透射法进行土壤含水量测定时, 当穿透土体后的射线强度记数率不小于 104 情况下, 室内实验的测点间距为 2.5 cm, 其误差不超过 $\pm 2\%$; 而大田试验的测点间距为 5.0 cm, 其误差范围为 3% ~ 5%。

关键词: γ 透射法; 土壤水运动; 土壤含水量; 测定

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2004)01-0095-04

0 引言

在土壤水分运动研究中, 采用非破损定点测量土壤含水量的方法很多, 但利用核物理的方法即中子仪与 γ 透射法仍是目前研究人员常常采用的量测手段。其中 γ 透射法由于可在瞬时状态下较为准确地测定土壤水分剖面的变化, 且具有层间分辨率高等特点, 因而愈来愈受到国内研究者的重视, 取得了不少研究成果^[1-3]。

γ 透射法自 1950 年 Belcher D. 等人^[4]提出以来, 经室内和田间实验验证, 肯定了 γ 透射法测量土壤含水量的精度不低于烘干法^[5]。60 年代以后, 美国和欧洲也广泛进行了 γ 透射法的实验研究, 在测试设备和测试手段上都得到进一步的改进和发展。双源和单源双能 γ 法的问世, 使得 γ 透射法可以同时测定土壤容重和含水量。但是由于所需放射源防护问题、设备不完善以及测试过程中的其他技术性问题使得应用受到一定程度的限制。因此正确使用和提高 γ 透射法精度一直是人们关注的问题。

近十多年来, 为了能够将 γ 透射法较好地应用于室内外各项土壤水分运动的研究中, 作者对其测量精度的控制、层间分辨率的大小及有关影响因素等问题做了较系统的实验研究与理论分析。主要研究成果表明: 在接受 γ 射线的探头前端设置铅屏蔽罩对防止周边环境射线的影响及提高测量精度与层间分辨率是极其有效的。根据室内系统地实验研究, 铅屏蔽罩厚度为 4~10 mm, 准直孔径为 10 mm, 即可在满足测量精度不小于 3%, 层间分辨率达到 22 mm。同时为确保测量精度, 需将测量读数的随机相对误差控制在 1/100, 还应考虑使穿透土体后的射线强度记数率尽可能不小于 $10^{4[3-5]}$ 。根据室内及大田多项土壤入渗试验的结果表明, 在利用 γ 透射法进行土壤水分剖面测定时, 室内实验的测点间距为 2.5 cm, 误差为 $\pm 2\%$; 大田试验的测点距为 5.0

cm, 误差 $\pm (3\% \sim 5\%)^{[3,6,7]}$ 。

本文就 γ 透射法运用于室内外非饱和土壤水分运动参数的测定、一维与二维土壤水分运动实验及大型称重式蒸渗仪中土壤水分剖面变化的测定情况分述如下, 并对相关实验装置与计算机检测、数据处理也做了概述。

1 γ 透射法用于土壤水分运动参数的测定

在各类有关土壤水分运动的数学问题求解中, 土壤水分运动参数——即导水率 $k(\theta)$ 、比水容量 $C(\theta)$ 及扩散率 $D(\theta)$ 的确定是一项非常重要的工作。一般这些参数均需通过实测的方法才能确定。由于这三个参数都是土壤含水量的函数, 因此目前无论是在室内或在大田进行实测, 几乎所有的的方法都离不开测量土壤含水量或水分剖面变化的问题。为此作者在利用 γ 透射法测量土壤含水量这一先进手段的基础上, 先后提出了在一个水平土柱上同时测定非饱和土壤水各运动参数的室内测定方法^[8], 及在大田利用一维垂向入渗试验测定土壤水分运动参数的方法^[9]。

1.1 室内测定方法

该法的基本思路是: 在水平土柱入渗试验过程中, 利用 γ 透射法可在瞬时状态下较为准确检测到不同入渗时刻 t_i 的土壤含水量分布曲线 $\theta(t_i)$, 并且在入渗试验结束后, 又可利用土壤水分再分布的缓慢过程, 在湿润锋前端采用 γ 透射法与张力计定点同步测量土壤含水量 θ 与吸力 S 的变化关系, 从而实现在一个水平土柱入渗试验过程中, 同时测定 3 个非饱和土壤水分运动参数的目的。其试验装置如图 1 所示。

该法的主要特点是:

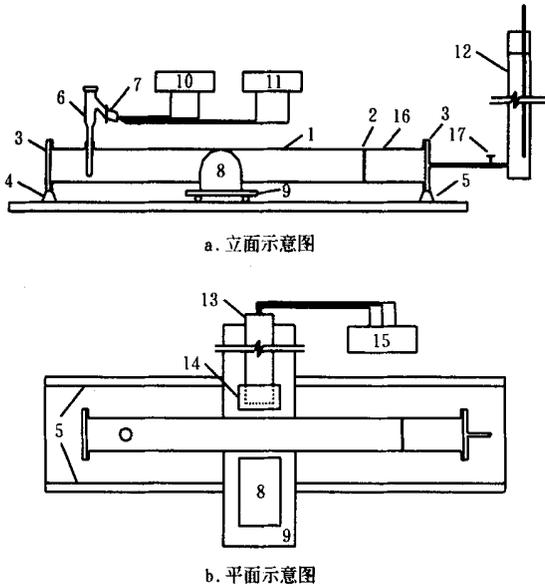
(1) 根据水量平衡原理, 可由马氏瓶的入渗供水量对 γ 透射法所检测到不同入渗时刻 t_i 的土壤水分剖面 $\theta(t_i)$ 进行检验与筛选, 以取得具有足够量测精度的土壤水分剖面做为计算参数的可靠依据。

(2) 根据水平土柱入渗法测定扩散率的原理^[10], 可由任一筛选后的土壤水分剖面 $\theta(t_i)$ 计算得出扩散率

收稿日期: 2003-05-06 修订日期: 2003-09-16

作者简介: 王文焰, 教授, 博士生导师, 西安市 西安理工大学水资源研究所, 710048

$D(t_i)$; 也可由多个筛选后的土壤水分剖面计算出多个扩散率, 再取其平均值, 以保证取值的可靠性。



1. 土筒 2 透水石 3 堵板 4 支架 5 道轨 6 张力计 7 压力传感器 8 放射源 9 跑车 10 恒流源 11 数字电压表 12 马氏瓶 13 探头 14 铅屏蔽罩 15 定标器 16 水室 17 供水阀

图 1 室内土壤水分运动参数测定装置示意图

Fig. 1 Indoor measuring equipment schematic diagram of soil water parameters

(3) 根据水平土柱瞬时剖面法测定导水率的原理^[8,10], 同样可由筛选后的任意两土壤水分剖面计算出多个导水率 $k(\theta)$, 再取其平均值。

(4) 由于 3 个土壤水分运动参数均都在同一水平土柱入渗试验中取得, 不仅大大减小了试验工作量, 而且也避免了在分别测定各参数试验中, 因土样制备的不尽相同所带来的困扰。

由于采用 γ 透射法测定土壤水分剖面及具有压力传感器的张力计测量吸力, 因此整个试验数据的采集、水量平衡计算、土壤水分剖面的筛选及水分运动参数的拟合等均由计算机进行处理。

1.2 大田测定法

该法的基本思路是: 在大田进行一维垂向入渗试验的同时, 采用 γ 透射法检测不同入渗时间 t_i 的土壤水分剖面 $\theta(t_i)$ 。同样在入渗试验结束后, 在湿润锋前端的一个固定深度上, 采用 γ 透射法及张力计同步测量土壤含水量 θ 与吸力 s 的变化关系, 即可通过计算得到导水率 $k(\theta)$ 及土壤水分特征曲线 $C(\theta)$ 。其试验装置如图 2 所示。

在取得以上两个参数后, 即可根据 $D(\theta) = k(\theta)/C(\theta)$ 关系求得扩散率。

这一方法除具有室内测定方法的一些特点外, 主要在利用 γ 透射法进行土壤水分剖面测定时, 预设的两个观测管是处于下渗仪内外环之间的保护带中, 因而它对内环中入渗试验的主体土壤没有产生任何影响, 从而保证了测定参数的可靠性与准确性。与之相比中子仪测量入渗过程土壤水分剖面的变化, 一则其空间分辨率差; 二则虽中子仪只需一个观测管, 但它需设置于下渗仪的

内环之中, 这样必然对入渗试验的主体土壤构成破坏, 以致影响到试验的准确性。

这一方法在陕西宝鸡峡灌区及甘肃秦王川地区的大田实际应用中, 取得良好效果^[7,9]。

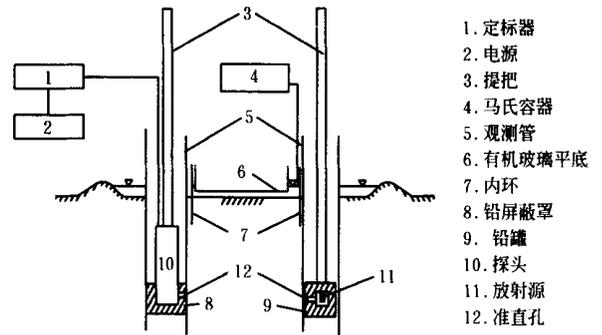


图 2 大田土壤水分运动参数测定装置示意图

Fig. 2 Outdoor measuring equipment schematic diagram of soil water parameters

2 γ 透射法用于室内土壤水分运动的实验研究

在室内进行土壤水分运动的实验研究中, 即时测量土壤含水量在时空上的动态变化过程是极为重要的。近年来作者根据实验研究工作的需要, 以 γ 透射法为重要的测量手段, 研发了一维与二维土壤水分运动的实验装置并在国内一些有关科研单位及高校推广应用, 效果良好。

2.1 一维土壤水分运动实验装置

主要用于室内一维土柱的降雨或积水入渗试验及蒸发试验^[11], 其构成由图 3 框图所示。

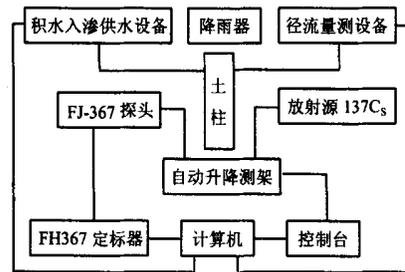


图 3 一维土壤水运动实验装置框图

Fig. 3 Equipment chart of one-dimensional soil water movement measuring

实验装置的主要特点是: 除在积水入渗实验过程中可将马氏瓶提供的累积入渗量, 或在降雨入渗试验过程中的径流量直接由计算机实时采集外, 通过 γ 透射法可沿土柱上下做 2.5 cm 或 5 cm 间距的土壤含水量巡回检测, 也可对测点做定点或随机测量, 全部数据均由计算机采集与处理。

2.2 二维土壤水分运动实验装置

γ 透射法用于二维土壤水分运动的实验装置主要有: 室内坡地降雨入渗实验装置及多土柱一维土壤水分运动实验装置两种类型。但二者共同的特点是要求 γ 透射法能够在两个坐标方向 (x, z) 进行定点测量土壤含水量。

2.2.1 室内坡地降雨入渗实验装置

上世纪 90 年代初为西安理工大学研制的旨在研究坡面降雨入渗及产流的实验装置中(图 4 所示), γ 透射法测量系统为适应 5.5 m × 0.3 m × 0.6 m 的实验土槽能够在 0~ 23.5% 坡度范围内变动并进行土壤水分的量测, 整个传动系统设在底梁上, 可使放射源与探头在测桥上沿土槽长度方向做 9 个定点测量(其测点间距可根据实验要求自行设定), 同时测桥又可上下以 5 cm 间距进行移动, 从而保证在实验过程中, 一次最多可检测到 9 个垂直土壤剖面 72 个测点的水分变化情况^[12]。

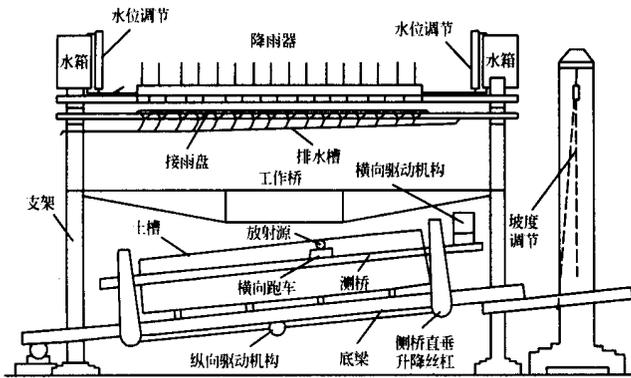


图 4 坡地降雨入渗及产流实验装置结构示意图

Fig. 4 Measuring equipment schematic diagram of precipitation, infiltration and runoff for sloping field

整个系统采用 BCM-80 单板机对土壤水分的动态变化过程进行实时检测和数据处理, 并根据所测数据利用模糊控制原理控制机械传动装置, 在计算机系统控制下, 土壤水分可分别以手动、人机交互、巡回检测、横向巡回纵向优选及全剖面优选检测 5 种方式。

2001 年为三峡大学研制的旨在研究降雨入渗库区滑坡体的实验装置中(见图 5 所示), 由于装土的试验玻璃钢槽高大, 尺寸为 8 m × 0.8 m × 4 m (长 × 宽 × 高), 且要求槽体能够调整坡度, 因此为适应这一要求, 载有放射源及探头同步水平运行的测桥是悬设在高 5.5 m、



图 5 降雨入渗库区滑坡实验装置

Fig. 5 Coasting measuring equipment with precipitation and infiltration in reservoir district

宽 3.3 m 的门架上, 且测桥可沿门架上下运行, 门架又是固定在钢槽底板上, 从而构成了一个整体。当需要调整槽体坡度时, 钢槽底板下的液压系统可使整个钢槽及门架绕中轴转动, 其最大转角为 20°。同时为便于 γ 透射法对试验槽内的滑坡体进行全断面的土壤水分检测, 在测桥及门架上分别以间距为 10 cm 与 5 cm 设有测点触头, 在每次试验前根据滑坡体的体形及检测土壤水分的要求, 可在水平向测架上及垂向门架上各选取 30 个测点进行土壤水分动态的实时测量。整个实验装置的运行及土壤水分的数据采集均通过自行研制开发的硬、软件由计算机进行控制与处理。

2.2.2 多土柱一维土壤水分运动实验装置

在土壤水分运动实验研究中, 经常需要对同一处理方案做重复实验, 或要求同时对不同处理方案做平行实验, 因此在一维土柱的土壤水分运动实验装置基础上, 曾先后研制了多土柱一维土壤水分运动实验装置, 其规模大小不等, 而以中科院水土保持研究所的最大(见图 6)。该套实验装置可同时进行 16 个土柱入渗或蒸发试验, 土柱最高达 3 m, 其 γ 射线测量与控制系统基本与前述相同。

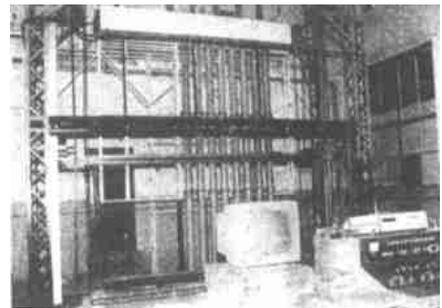


图 6 多土柱一维土壤水分运动实验装置

Fig. 6 Soil water measuring equipment for one-dimensional multicolumn

2002 年为太原理工大学研制的该实验装置, 在保证 6 根高 2 m 土柱同时能够进行入渗或蒸发试验的水分测量基础上, 根据要求还需利用 γ 透射法对水力学试验中的泥沙含量进行测量, 因此整个试验装置设计为移动式, 放射源与探头除在 x 、 z 平面内可进行多点测量外, 还可使放射源与探头在 y 方向的距离做 20~ 80 cm 范围的调整, 以适应水力学试验的不同要求。

3 γ 透射法用于大型称重式蒸渗仪

蒸渗仪是用于大田进行作物蒸散与田间水分循环研究的一种大型实验设备^[13, 14]。目前国内外已建成的蒸渗仪种类繁多, 但其共同特点是依靠称重法量测土箱在不同时段内的水分总量, 并采用张力计法或中子仪来测量土壤水分在剖面上的分布及变化。1995 年在为中科院安塞生态试验站研制的大型称重式蒸渗仪首次将 γ 透射法用于土壤水分剖面的动态检测。如图 7 所示。

蒸渗仪土箱面积为 3 m² (1.5 m × 2 m), 深 3 m。为了能够准确测量每一时段土壤剖面的水分变化量, 便于利用水量平衡原理与称重法进行对比与校正, 故 γ 透射

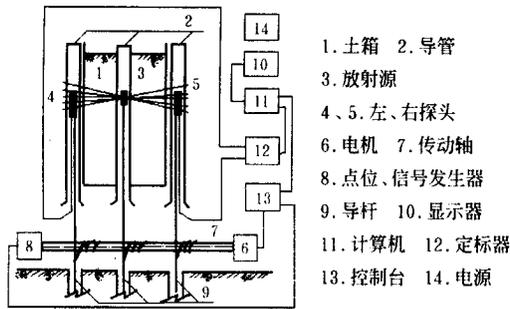


图7 蒸渗仪 γ 透射法测量系统示意图

Fig 7 Schematic diagram of measuring system for γ ray in lysimeter

法采用了单源双探头的测量系统,以尽可能减小采样数据的随机误差。在3 m 土层范围内,每间隔10 cm 设为一层,共设有30个测点。量测方式为全扫描测量与随机补测两种运行模型,整个测量系统的运行与数据采集及处理,全部由计算机控制完成。根据该蒸渗仪在1997年4月18日用 γ 透射法与烘干称重法所进行的对比测定,表明各测点含水量的精度达到了2%^[14]。

4 结 论

研究表明,采用 γ 透射法进行非破损定点测量土壤含水量的动态变化是非常有效的。它所具有的高测量精度与层间分辨等优点,为其在土壤水分运动研究中的应用创造了条件。我国近十多年在这方面实际应用所取得的成果,说明这一方法在土壤水分运动及其它相关领域的研究中仍具有较大的发展与应用前景。

尽管 γ 透射法具有以上优点,但与中子法相比尚存一些不足,主要在大田实际应用中,由于目前仍未研制出具有一体化的 γ 水分仪,因此射线的安全防护、操作过程的简化与规范化,以及严格保证两个观测管的相互平行等问题,都有待进一步研究与改进。

[参 考 文 献]

- [1] 熊运章,林性粹,董家伦 γ 透射法在土壤水动态研究中的应用及改进[J]. 西北农学院学报, 1981, (1): 23- 34
- [2] 雷廷武,赵 军,袁建平,等. 利用 γ 透射法测量径流含沙量及算法[J]. 农业工程学报, 2002, 18(1): 18- 21.
- [3] 沈 晋,王文焰,沈冰,等. 动力水文实验研究[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1991.
- [4] 王文焰,张建丰,汪志荣 μ 值对 γ 透射法测定土壤含水量精度的影响[J]. 西北农业大学学报, 1991, 19(1): 27- 32
- [5] 王文焰,张建丰,汪志荣 γ 透射法在土壤水量测中的精度控制[J]. 地下水, 1989, 11(3): 161- 164
- [6] 王文焰,张建丰,汪志荣,等. 黄土中砂层对入渗特性的影响[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(5): 33- 41.
- [7] 王文焰,王全九,张建丰,等. 甘肃秦王川地区土壤水分运动参数及相关性[J]. 水土保持学报, 2002, 16(3): 110- 113
- [8] 王文焰,张建丰. 在一个水平土柱上同时测定非饱和土壤水各运动参数的试验研究[J]. 水利学报, 1990, 7: 26- 30
- [9] 张建丰,王文焰. 利用野外一维垂直入渗试验确定土壤水分运动参数[J]. 水土保持学报, 1994, 8(1): 69- 72
- [10] 雷志栋,杨诗秀,谢传森. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988
- [11] 王文焰,张建丰. 室内一维土柱入渗实验装置系统的研制及应用[J]. 土壤学报, 1991, 28(4): 447- 451.
- [12] 王文焰,沈冰,张建丰. 室内坡地降雨入渗及产流实验系统的研制与应用[J]. 实验技术与管理, 1991, 8(5): 16- 21.
- [13] 张增圻,徐振辞. 近年来国外蒸渗器的发展情况[J]. 国外农学—灌溉排水, 1987, (15): 1- 8
- [14] 杨新民,张建丰,王文焰,等. γ 透射法在大型称重式蒸渗仪中的应用[J]. 土壤学报, 1999, 36(1): 132- 136
- [15] T. J. Schumugge, 等. 土壤湿度测定法综述[J]. 杨诗秀, 等译. 地下水, 1983 4
- [16] Mudahar G S, Sahota H S. A new method for simultaneous measurement of soil bulk density and water content [J]. Appl Radiat Isot, 1986, 37(7): 563- 565

Application of gamma-ray in research of soil water movement

Wang Wengyan, Zhang Jianfeng, Wang Zhirong

(The Institute of Water Resources, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Based on previous discussions on the accuracy of measured soil water contents and the spatial resolutions by the gamma-ray approach, this paper focused on the applications of the approach in the soil water movement studies. The basic principle and the methodology for measuring the unsaturated soil hydraulic parameters with one dimensional experiment setup both in the lab and fields are given first. Then several systems which have been developed in the past decade for the study of one and two-dimensional soil water movement in the lab were described briefly in conjunction with their practical applications. Moreover, the application of the approach in detecting the soil moisture variation by a large scale lysimeter with a weighing system was introduced. All the applications given here were implemented with computerized systems in data acquisition, control and processing. It was shown that in measuring the soil water content, under the condition that the ray strength rate through the soil sample was more than 104, the gamma-ray approach was able to present good results with an error of less than $\pm 2\%$ in the lab and $3\% \sim 5\%$ in the field respectively, where the measurement point separation was 2.5 cm in the lab and 5.0 cm in the field correspondingly.

Key words: gamma-ray; soil water movement; soil water content; measurement