

# 称重式蒸渗仪系统改进及在农田蒸散研究中的应用

姜峻<sup>1,2</sup>, 都全胜<sup>3</sup>, 赵军<sup>2</sup>, 陈云明<sup>1,2</sup>

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 富县气象局, 陕西 富县 727500)

**摘要:** 水分是制约黄土丘陵区农作物正常生长和农业生产的关键因子。该区年平均降水量少且季节多变, 研究农田土壤水分平衡对该区旱地农业生产具有重要意义。土壤蒸渗仪(Lysimeter)可测量总蒸散量、渗漏量等有关水量平衡的各个分量, 具有其它装置和方法不可比拟的优越性。它为田间蒸散和降水入渗实验研究提供了一种较先进的量测方法和技术手段。它对推动我国实验水文学的发展具有重要作用, 并为相关领域的科学研究提供了一种较先进的技术设备和实验环境。中国科学院安塞试验站对原建造的用于测定农田蒸腾蒸发转化的称重式蒸渗仪在 2005 年对称重感应系统、电源进行改造, 主要对主机、采集软件进行了重新更新, 使其可直接在 Windows 界面下工作, 数据采集更加方便, 将测量出来的模拟量信号转换为数字信号, 经处理显示并记录在数据采集器内。改进后蒸渗仪主要有以下特点: (1) 土柱重 19~26 t, 蒸渗仪精度为 152 g(0.05 mm), 可测量蒸腾蒸发量和地下水对土壤水的补给量与入渗量; (2) 蒸渗仪面积 3 m<sup>2</sup>(1.5 m ×2 m), 深度 3 m, 可充分允许农作物根系发育与吸水, 土壤水和地下水转化, 地下水位变化等过程进行, 蒸渗仪的供排水系统能够在蒸渗仪内模拟实际地下水位变化, 可较好代表大田实际情形, 并对作物生长过程中水分利用动态变化进行深入研究。

**关键词:** 蒸渗仪; 蒸腾蒸发; 降雨量; 黄土丘陵区

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1000—288X(2008)06—0067—06

**中图分类号:** P335, S152.7

## Improvement of Weighting Lysimeter and Its Application in Farmland Evapo-transpiration Research

JIANG Jun<sup>1</sup>, DU Quan-sheng<sup>2</sup>, ZHAO Jun<sup>1</sup>, CHEN Yun-ming<sup>1</sup>

(1. College of Resource and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Shaanxi 712100, China;

3. Fuxian Meteorologic Bureau of Shaanxi Province, Fuxian, Shaanxi 727500, China)

**Abstract:** Water is the primary limiting factor for plant growth and crop production in the loess hilly-gully area of the Loess Plateau. Because the annual precipitation is relatively low and its seasonal distribution is variable in the area, it is extremely important to study the soil water balance such as storage water and adjusting plant water requirement. Lysimeter is an excellent and classical instrument for measuring each component of field water balance equation such as evapo-transpiration and drainage. It is widely used in field evapo-transpiration, rainfall infiltration experiment, and experimental hydrology. In 2005, the weighting sensor system and power source were improved and host computer and data collecting software of Lysimeter were updated, which were installed in the Ansai Research Station of CAS for studying filed water evaporation and transpiration transformation. After improvement, the instrument can work under Windows interface and the data collecting is more convenient. The modified Lysimeter shows some of the new characteristics, which are: the weight of the contained soil column is 19~26 t, the weighting precision is 152 g (0.05 mm) and can measure evapo-transpiration and groundwater replenishment and leakage; the measured area and soil depth are 3 m<sup>2</sup> (1.5 m ×2 m) and 3.0 m, respectively, which may fully display water transformation in the crop rooting system such as root system development, water consumption, soil water and groundwater transformation, and groundwater level dynamic; the supply and drainage system can simulate the change of groundwater level, which can reflect the actual conditions and allow researches on soil water dynamic during crop growth.

**Keywords:** Lysimeter; evaporation and transpiration; rainfall; loess hilly-gully area

收稿日期: 2008-07-20

修回日期: 2008-10-10

资助项目: 中国科学院知识创新项目(KZCX2—XB2—05); 国家科技支撑项目(2006BAD09B07)资助

作者简介: 姜峻(1968—), 男(汉族), 四川省井研县人, 在职硕士。研究方向为牧草引种和草地生态研究。E-mail: jiangj@cern.ac.cn。

通信作者: 陈云明(1967—), 男(汉族), 陕西省澄城县人, 研究员, 主要研究方向为植被生态与水文。E-mail: ymchen@ms.iswc.ac.cn。

在农田水量转化各分量中,蒸散与潜水蒸发是最难测定的,在地下水浅埋地区,地下水通过毛管上升而补给,土壤水的作用十分明显,对作物生长意义重大<sup>[1]</sup>。蒸渗仪(Lysimeter,曾译作腾发器、蒸渗器等)是一种设在田间反映田间的自然环境或温室内(人工模拟自然环境)装满土壤的大型仪器,仪器中的土壤表面或者裸露,或者种植各种作物,用来测量裸土蒸发量或作物的腾发量、潜在腾发量以及深层渗漏量<sup>[2-3]</sup>。蒸渗仪早在 19 世纪后期就已经用于研究植物水的利用,现在蒸渗仪已成为农田测定蒸腾蒸发的标准仪器<sup>[3-5]</sup>。蒸渗仪可分为称重式和非称重式两种。非称重式蒸渗仪通过控制地下水位,测定补偿水量,国外也称谓排水型蒸渗仪其安装操作简单,造价低,在我国被广泛应用。称重式蒸渗仪可分为液压式、机械式、电子称重式等,能测定短时段的腾发量,精度高,造价也高。蒸渗仪在农田水文中的应用大致可分为 3 个方面:(1)测定蒸腾蒸发量,或蒸发量和腾发量,研究农作物的耗水规律。(2)和其它仪器一起测定土壤水中各种化学成分的含量,研究化肥和农药等对土壤水和地下水的作用与影响。(3)测定土壤水向下的渗漏量,研究土壤水量平衡和地下水补给。大型蒸渗仪应用于测量蒸腾蒸发量(ET)的精度受多种因素影响<sup>[7]</sup>。

世界气象组织(WMO)表明蒸渗仪尺寸是最重要的因素,这是由于蒸渗仪对土柱环面积与地表面积之比敏感,并且需要一种真正有代表性的作物进行试验,故推荐蒸渗仪最小直径 2 m,深度 1.5 m。蒸渗仪尽管是一种有很长历史的仪器,但通过各种改进(如建造大尺寸蒸渗仪),以及与现代化的测量及数据处理仪器结合使用(如使用各种传感器、电子设备、计算机),使其测量结果更精确,应用范围更加广泛。特别是随着电子学、机械工程学、土壤物理学、计算机等学科的发展,使得对蒸渗仪的研究和应用,以及对其结构、精度和功能等方面都有较大的改进和提高<sup>[7-14]</sup>。蒸渗仪已不仅仅用于农田水文,在环境工程等更广泛的领域得到新的应用。国内蒸渗仪的使用与世界同步或处于领先水平。目前已经拥有处于世界领先水平的大型蒸渗仪,自行设计安装的综合试验场。蒸渗仪已作为标准仪器被大量使用。但研究使用的普及性及与新技术的结合还略显不足,蒸渗仪的研究与应用还需要更多的投入。

蒸渗仪精度 0.05 mm,可测量小时蒸腾蒸发量;蒸渗仪面积 3 m<sup>2</sup>,深度 3 m,可以较好地代表大田的情形;蒸渗仪为农田水分过程研究提供了一种更系统更综合的测量工具,在无人值守的情况下,可以连续测定土体内土壤水分的变化情况。采用蒸渗仪对作物生长期进行了观测,通过与裸地的对比,可以算出

作物在生育期内土壤水分的变化与作物产量的关系。但在实际使用中需要不断改进的。

本研究蒸渗仪布设于中国科学院安塞水土保持综合试验站,地理位置为北纬 36°43′—36°46′,东经 109°14′—109°16′属暖温带半干旱区,植被区划分为暖温带森林草原区,海拔 1 013~1 431 m。土壤为黄绵土,年平均气温 9.11℃,年日照时数为 2 375.5 h,日照百分率达 54%,无霜期 159 d,年平均降雨量 503.99 mm,干燥度 1.46。年均蒸发量 800~1 100 mm。土壤侵蚀剧烈,年侵蚀模数 > 10 000 t/km<sup>2</sup>。

## 1 蒸渗仪系统

### 1.1 蒸渗仪系统改进组成

蒸渗仪系统是一种装有土壤,置于田地间地下,以模拟大田生长环境(表面裸露或覆盖植物),用来确定生长的作物或参照植物的蒸发蒸腾量或裸土蒸发量的大型容器,是在限定三维边界条件下测定水体转化的装置。可将测量出来的模拟量信号转换为数字信号,经处理显示并记录在数据采集器内。并可将数据下载到 PC 机中,供使用者分析和研究<sup>[15]</sup>。

该系统可分为 3 部分。测量部分、数据传输部分和终端显示部分(图 1)。(1)测量部分。由土壤、钢筒、称重系统平台、称重系统、称重传感器、位移传感器组成。(2)数据传输部分。由前端放大器和数据转换模块组成。(3)终端显示部分。由蒸渗仪主机、备用电源,计算机及配套软件组成。

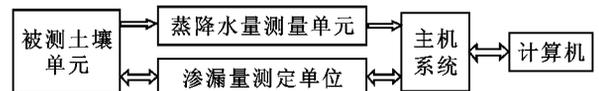


图 1 蒸渗仪系统示意图

1.1.1 蒸渗仪的基本工作原理 如何高精度地测量土壤含水量的变化量,这是蒸渗仪设计、加工的关键所在,它与蒸渗仪土体的尺寸直接相关。一般来说,土体越大,代表性越好,测得的蒸散发量值与大田的差别越小;但土体越大,技术越复杂,造价就越高。我们使用的蒸渗仪土体面积是 3 m<sup>2</sup>(1.5 m × 2 m),装土深度为 3 m(另有 0.2 m 的反滤层)。土体加上钢筒容器、底盘自重、称架重、杠杆等,整个称重系统达 18~26 t。在称重方式上,选用了机电结合式,采用非平衡测定原理及零偏置电路,代替机械配量,从而达到高灵敏度和良好的稳定性,即利用机械杠杆平衡掉“死荷载”,通过杠杆交换,用位移传感器量测“活动荷载”(增量部分)引起的位移变化量,根据率定公式再换算成重量变化,即为蒸散、降雨量,从而实现高精度测量的目的<sup>[16]</sup>。

对于蒸渗仪中被分离的土柱,其水量平衡方程为

$$S = P + I + Q - R - E_T \quad (1)$$

式中:  $S$ ——土壤蓄存水量的变化量;  $P$ ——降水量;  $I$ ——灌溉量;  $Q$ ——地下水水流;  $R$ ——净地表径流量;  $E_T$ ——蒸腾蒸发量。

对于蒸渗仪,  $R$  一般可忽略, 方程(1)可改写为

$$E_T = P + I + Q - S \quad (2)$$

安塞站蒸渗仪安装在山地, 灌溉量( $I$ ) = 0, 所以可以不考虑方程(2)中的灌溉量( $I$ )

$$E_T = P + Q - S \quad (3)$$

降水量( $P$ )很容易由雨量计直接测得。土壤蓄存水量的变化量( $S$ )代表降水或灌溉后水分的增加, 或蒸腾蒸发作用导致水分的损失, 较难测量。我们设计了一台高精度的称重系统来测定  $S$ 。地下水流量  $Q$  代表由蒸渗仪供排水系统供进和排出土柱的水量。在地下水水位不发生变化时, 加入到土柱的水量为地下水对土壤水的补给量( $E_g$ ),  $E_g = Q$ , 由土柱排出的水量为地下水补给量( $R_g$ ),  $R_g = Q$ 。在我们站的山地大田中由于黄土层较厚, 实际地下水并未发生过渗漏现象, 即  $Q = 0$ 。

可以不加考虑方程(3)中的土壤渗透量, 公式可改写为

$$E_T = P - S \quad (4)$$

最后简化为( $S$ )与降雨量  $P$  之间的关系就可计算出土壤蒸散量( $E_T$ )之间的相互关系。

### 1.1.2 称重系统的原理

(1) 称重系统。蒸渗仪钢筒与土柱重 18~21 t, 当土壤含水量增大时, 重量也随之增大, 在安塞站新改进的设计中, 蒸渗仪的分辨率是按 0.05 mm 设计的。称重机原理(图 2)由两块方钢夹在钢丝绳中部与两块斜铁及平衡臂产生工作状态。在平衡臂水平时, 钢丝绳产生垂直错位(为基准零点)。当土体重量发生变化时, 平衡臂上下摆动形成摆角变化, 通过刚性连杆机构将摆角的变化转化为线位移, 再利用高分辨率的位移传感器测出变化量, 从而实现土箱重量变化的测量。

### 1.2 数据采集系统的改进

改进后的称重系统的数据可由人工或自动采集系统获得。自动采集系统由信号放大器和数据采集器组成。通过一组位移传感器, 信号放大器能够探测位移的变化, 然后通过电路放大, 再将这些数字信号通过 RS485 方式传输到数据采集器, 数据采集器用单片机作为 CPU 控制板, 改进后的数据采集系统采用 Flash ROM 作为数据记录介质, 可以连续纪录 32 000 组数据连续存储大约 400 d 的测定数据, 每组由位移量、称重量温度补偿量及对应时间构成, 并进行断电保存。上位机可通过 RS-232 从数据采集器中以实时或历史两种方式获得数据, 并由上位机软件

进行计算, 将位移的距离数值通过内部设定计算转换为整个土体的增加量(降雨 mm)或减少量(土壤蒸散量 mm), 然后整理成标准格式的数据、曲线、图表以供分析、存档。系统运行过程中有良好的透明度, 具有友好的人机界面, 实验人员易学、易操作, 并可通过屏幕直观地监视测量动态运行过程及被测土体的水分剖面变化规律。数据文件格式规范化, 有利于进一步的实验、分析研究。改进后的软件系统分为上位机和下位机两大类, 完成系统管理、各种参数的初始化设定及修改, 各种动态信息显示, 数据处理, 在线存盘和输出打印等功能。

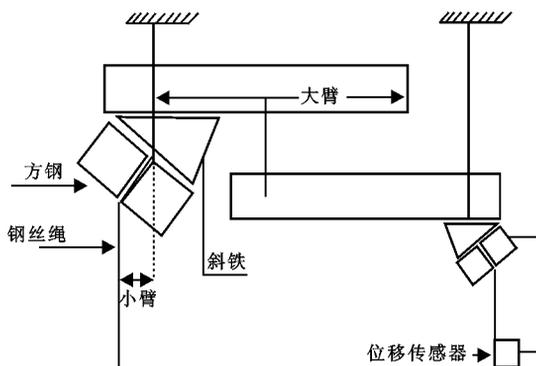


图 2 称重机构原理示意图

(1) 上位机使用。打开计算机上的蒸渗仪测量系统软件, 进入软件控制界面, “系统”中, 232 参数是指蒸渗仪和计算机通讯接口的数据参数, 一般使用软件默认的设置, 无须改动。如果用户计算机无 RS232 口, 可使用 USB-RS232 转换线, 此时应选用 COM3, COM4 等。

(2) 下位机操作。将 PC 机用串口和下位机连接好, 就可在 PC 机上对下位机进行操作。

历史数据接收。下载下位机所存数据。

实时数据接收。逐条实时下载数据。蒸渗仪默认采样间隔固定为 10 min。

参数标定。初次使用时要根据实地情况对各个测量仪器计算参数进行标定, 标定完成后, 可反复使用该数据。进入标定界面后先输入站点名称和实验土体的截面积等, 点开始键, 在重量栏中可多次输入不同的重量值, 然后点采样, 位移传感器标定图上会出现输入不同重量时的曲线, 并自动计算出  $a, b$  的标定值,  $c, d$  值及皮重需由人工计算输入, 标定完毕后按保存, 结束并保存标定。

查询。输入要查询的起始日期和终止日期, 按查询键, 历史数据就会以曲线和数字的方式显示出来。在曲线状态下, 按方向键可以左右移动数据曲线, 按 Ctrl + 方向键可压缩或释放数据曲线, 如要查询某一时段的蒸散量变化, 可在曲线图上点鼠标右

键, 曲线图上会出现一条红色和兰色的竖线, 移动两条竖线到要查询的时段, 两条竖线之间的时段数据会以数字量直观地显示在右上角。

导入文件。指从指定文件目录中将数据载入到上位机软件中并显示。

导出文件。指将实验数据存放到指定的文件目录中。

打印。可将实验数据和曲线直接打印出来, 打印时, 数据曲线部分只打印该屏显示的部分, 数据部分可打印所选择的起止日期内的全部数据。

## 2 蒸渗仪的调试与试验

### 2.1 改进后蒸渗仪的校验

蒸渗仪建造完成后我们对蒸渗仪的稳定性、敏感性进行了测试和校验。在测试前, 用土钻法测定 0—250 cm 土体内的土壤含水量。经过测定得出, 土体重量为 26.254 t, 当时水体重量为 3.59 t, 以此时的状态为“零点”, 测定以后土体重量的增减量来计算土体内土壤水分的变化, 在此基础上再采用依次加载已

知重量的砝码 (3 ~ 1 000 kg), 3 kg 质量相当于 0.1 mm 降雨量, 1 000 kg 质量相当于 30 mm 的降雨量。然后再依次减载的方法, 测试数据表现出良好的线性关系。  $Y = 75.34x + 1E - 06 (R^2 = 0.9993)$ 。自动数据采集系统由信号放大器和数据采集器组成。通过一组位移传感器测得位移变化量, 再用标定所得系数计算出对应土箱重量的变化量即贮水量变化量。在土箱的排水口, 安装渗漏量传感器, 测得渗漏量变化量。蒸散量由贮水量和渗漏量计算得到。本系统中, 贮水量变化量减去渗漏量变化量即为蒸散量。由方程 (2) 可以看出, 实际本系统的蒸散量包含了降雨量和灌溉量。

### 2.2 试验结果与讨论

2.2.1 不同生育期的蒸散量 2006 年蒸渗仪内种植的作物为晋豆 20 号 (表 1), 播种量 52.5 kg/hm<sup>2</sup>, 测定产量为 3 758 kg/hm<sup>2</sup>, 播种期到收获期共 160 d。黄豆生育期内共降雨 487.3 mm。从蒸渗仪在该作物整个的生育期监测中可以明显的看出, 结荚期平均蒸散量及作物的消耗量最大为 6.6 mm/d。

表 1 蒸渗仪内黄豆生育期与耗水量

生育期	前 1 d 土层 储水量/mm	当日土层 储水量/mm	时段降雨量/ mm	日蒸散量/ (mm · d <sup>-1</sup> )	生育期 时间/d
播种期 0422	—	334.89	—	—	—
出苗期 0512	334.89	362.27	46.90	0.98	20
开花期 0711	362.27	390.32	186.70	2.64	60
结荚期 0722	390.32	360.11	49.00	6.60	12
鼓粒期 0808	360.11	339.87	20.30	2.38	17
成熟期 0920	339.87	360.34	154.00	3.18	42
收获期 0928	360.34	364.32	41.40	4.16	9

注: 观测土层厚度为 200 cm。

裸地土壤蒸发量的计算是以安塞山地气象站内实测的中子水分数据推算而来的, 中子水分观测频率 5 d/次, 为全年观测, 通过中子读数、土壤容重、中子仪水中标准读数、土壤水分特征曲线等指标的演算, 就可以算出该土层中的土壤体积含水量。

土壤体积含水量计算公式为

$$W_1 = (D_s / W_0) \times 58.324 + 3.28 \quad (5)$$

式中:  $W_1$  ——土壤体积含水量 (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>);  $D_s$  ——中子读数;  $W_0$  ——中子仪水中标准读数。校准公式的斜率 58.324; 公式的截距为 3.28。

$$W = W_1 \times h \quad (6)$$

式中:  $W$  ——土层储水量 (mm);  $h$  ——土层深度 (cm)。

从蒸渗仪实际观测的结果来看, 也比较符合作物生长过程地上生物量的变化 (表 2), 通过蒸渗仪内蒸散量与裸地土壤蒸发量的计算可以算出黄豆在不同

生育期中作物对水分的利用情况, 植物每日净耗水量也以结荚期为最高 1.09 mm/d。

2.2.2 蒸渗仪内作物水分利用效率与土壤水分变化 水分利用效率 (WUE) 为单位面积消耗单位水量生产出的干物质的量。计算公式为

$$WUE = NAPP / W_c$$

式中:  $WUE$  ——水分利用效率 [kg · hm<sup>2</sup> · mm], t / (hm<sup>2</sup> · mm) 或 g / (m<sup>2</sup> · mm);  $NAPP$  ——净地上初级生产量 (kg/hm<sup>2</sup>), t/hm<sup>2</sup>, g/m<sup>2</sup>;  $W_c$  ——总耗水量 (mm)。表 3 为整个生育期的水分利用和产量情况。

从水分利用效率 (表 3) 来看, 黄豆在生育期内水分利用效率依次为: 鼓粒期 > 开花期 > 结荚期 > 成熟期 > 苗期, 与生物地上生物量成正比。表明该作物在生长过程中, 开花期、结荚期、鼓粒期为干物质积累的关键时期, 对作物产量有着重要的影响。

表 2 蒸渗仪与裸地阶段蒸发量比较

生育期	株高/cm	地上部总鲜重/ (g · m <sup>-2</sup> )	蒸渗仪日蒸散量/ (mm · d <sup>-1</sup> )	裸地土壤蒸发量/ (mm · d <sup>-1</sup> )	植物每日消耗量/ (mm · d <sup>-1</sup> )
播种期	—	—	0.98	0.65	0.33
苗期	13.7	39.64	2.64	2.49	0.16
开花期	40.7	733.98	6.60	5.79	0.81
结荚期	61.1	1 249.60	2.38	1.30	1.09
鼓粒期	84.2	2 486.85	3.18	3.09	0.09
成熟期	69.4	1 243.09	4.16	4.07	0.09

表 3 黄豆的生物量与水分利用率

生育期	地上部总鲜重/ (g · m <sup>-2</sup> )	总耗水量/ mm	水分利用效率/ (g · m <sup>-2</sup> · mm <sup>-1</sup> )
播种期	—	6.60	—
苗期	39.64	16.20	2.34
开花期	733.98	25.92	28.32
结荚期	1 249.60	44.45	28.11
鼓粒期	2 486.85	48.23	51.56
成熟期	1 243.09	49.04	25.34

在作物整个的生育期中,蒸渗仪内的土壤水分变化规律在整个土壤水剖面中(0—200 cm)含水量大部分为 8%~21%(体积含水量),基本可满足于作物生长的水分需求。在黄豆生长季初、末(图 3)土壤含水量平均在 8%~19%,占田间持水量的 18%~50%,土壤无明显水分亏缺现象。0—200 cm 之间,各层耗水较为均匀,含水量变化不大。在黄豆开花期、结荚期、鼓粒期,土壤含水量低于春季(平均在 12%~14%)占田间持水量的 20%~40%,尤以结荚期表现明显,有水分亏缺现象。

在整个生长季中,水分变化集中在 0—120 cm 土层中,土壤水分变化比较活跃,120—200 cm 土壤含水量变化不大。由于当年降雨量为 542 mm,生育期集中降雨 498.3 mm,占到降雨量的 92%。降雨的补充已可以满足农作物生长的需求,土壤中含水量较高。如 1997 年安塞地区为特大旱年(降雨 264 mm),在作物收获后经测定 0—200 cm 间含水量普遍下降,最高 9.6%,最低仅为 4.5%,对农作物生长影响很大,产量明显下降,土层 40—140 cm 之间出现严重缺水,影响深度 200 cm。

相对比而言,裸地(图 4)在当年生育期中水分无显著变化,0—50 cm 范围内,在生长初期的裸地中土壤含水量略低于后期,但 100—200 cm 以下变化很小,基本占到田间持水量的 50%~65%。随着降雨的入渗,到 9 月 28 日从实际所观测到的数据表明,土体中的土壤水分含量趋于相同,接近田间持水量的 60%,在收获期裸地的土壤含水量为 18%~21%几乎 0—200 cm 土体中水分变化不大。

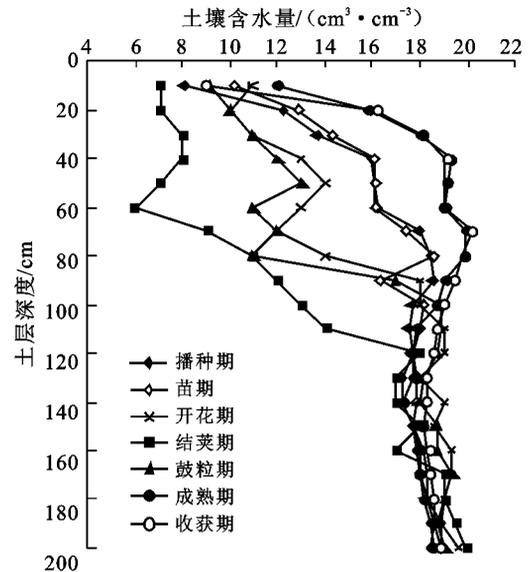


图 3 蒸渗仪内不同生育期土壤水分变化

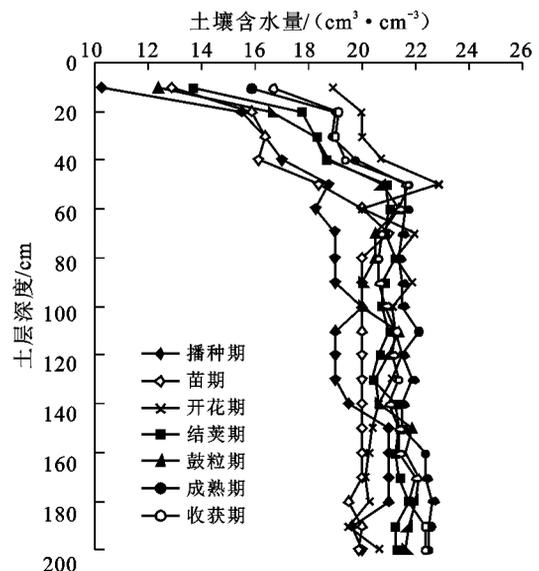


图 4 不同生育期裸地土壤水分变化

### 3 结论

(1) 经过改进的称重式蒸渗仪系统,可以较好地代表大田的情形,为农用水分过程研究提供了一种更系统更综合的测量工具,在无人值守的情况下,可以连续测定土体内土壤水分的变化情况。

(2) 经过 2005 年对蒸渗仪的称重感应系统电源

的系统改造,尤其对主机,采集软件的重新更新,可以直接在 Windows 界面下工作,满足了以每小时测量蒸散量的工作要求,使数据采集更加便捷,数据采集更加稳定,达到了对作物生长过程中对土壤水分动态变化研究的工作要求。

#### [参 考 文 献]

- [1] 陈建耀,刘昌明,吴凯. 利用大型蒸渗仪模拟土壤—植物—大气连续体水分蒸散[J]. 应用生态学报,1999,10(1):45—48.
- [2] 张增圻,徐振辞. 近年来国外蒸渗器的发展情况[J]. 灌溉排水,1987(1):1—8.
- [3] Howell T A, Schneider A D, Jensen M E. History of lysimeter design and use for evapotranspiration measurements [C]// Proceedings of the International Symposium on Lysimeters for Evapotranspiration and Environmental Measurements ASAE, 1991:1—9.
- [4] Young M H, Wierenga P J, Mancino C F. Monitoring near-surface soil water storage in Turfgrass using time domain reflectometry and weighing lysimetry [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1997, 61:1138—1146.
- [5] Prueger J H, Hatfield J L, Aase J K, et al. Bowen-ratio comparisons with lysimeter evapotranspiration [J]. Agron. J., 1997, 89:730—736.
- [6] 杨建锋,李宝庆,李运生,等. 浅地下水埋深区潜水对 SPAC 系统作用的初步研究[J]. 水利学报,1999(7):27—32.
- [7] 熊运章,林性粹,董家伦,等. 法在土壤水分动态中的应用及改进[J]. 西北农学院学报,1981(1):23—34.
- [8] 土壤水分测定方法编写组. 土壤水分测定方法[M]. 北京:水利水电出版社,1986:41—120.
- [9] 沈晋,王文焰,沈冰,等. 动力水文实验研究[M]. 西安:陕西科技出版社,1991:25—113.
- [10] 中国科学院原子能研究所编. 放射性同位素应用知识[M]. 北京:科学出版社,1961:11—79.
- [11] 王文焰,张建丰. 田间土壤入渗试验装置的研究[J]. 水土保持学报,1991,5(4):38—44.
- [12] 唐登银,杨立福,程维新,等. 原状土自动称重蒸发器[M]. 农田水分与能量试验研究. 北京:科学出版社,1990:67—74.
- [13] Khan B R, ainuddin M M, et al. Design, construction and testing of a lysimeter for a study of evapotranspiration of different crops[J]. Agricultural Water Management, 1993(23):183—197.
- [14] Vellidis G, Smajstrla A G, Zazueta F S. Soil water redistribution and extraction patterns of drip-irrigated tomatoes above a shallow water table [J]. Transof the ASAE, 1990, 33:1525—1530.
- [15] 杨新民,沈冰,张建丰,等. 大型高精度土壤蒸渗仪的计算机测控[J]. 农业工程学报,1996,12(3):72—76.
- [16] 刘士平,杨建锋,李宝庆,等. 新型蒸渗仪及其在农田水文过程研究中的应用[J]. 水利学报,2000(3):29—36.
- [5] Qiu Y, Fu B J, Wang J, et al. Soil moisture variation in relation to topography and land use in a hillslope catchment of the Loess Plateau, China [J]. Journal of Hydrology, 2001, 240(3/4): 243—263.
- [6] 邱扬,傅伯杰,王军,等. 黄土丘陵小流域土壤物理性质的空间变异[J]. 地理学报,2002, 57(5):578—594.
- [7] 傅伯杰,陈利顶,邱扬,等. 黄土丘陵沟壑区土地利用结构与生态过程[M]. 北京:商务出版社,2002:1—12.
- [8] 徐宪立,马克明,傅伯杰,等. 植被与水土流失关系研究进展[J]. 生态学报,2006,26(9):3138—3143.
- [9] 孟庆华,傅伯杰,邱扬. 黄土丘陵沟壑区不同土地利用方式的径流及磷流失研究[J]. 自然科学进展,2002,12(4):393—397.
- [10] 周佩华,刘炳武,王占礼,等. 黄土高原土壤侵蚀特点与植被对土壤侵蚀影响的研究[J]. 水土保持通报,1991, 11(5):26—31.
- [11] Fullen M A. Effects of grass ley set aside on runoff, erosion and soil organic matter levels in sandy soils in east Shropshire, UK [J]. Soil & Tillage Research, 1998, 46(1/2): 41—49.
- [12] Imenson A C, Prinsen H A M. Vegetation patterns as biological indicators for identifying runoff and sediment source and sink areas for semi-arid landscapes in Spain [J]. Agriculture Ecosystem & Environment, 2004, 104(2): 333—340.
- [13] 彭文英,张科利,江忠善,等. 黄土高原坡耕地退耕还草的水沙变化特征[J]. 地理科学,2002,22(4):379—402.
- [14] 黄志霖,陈利顶,傅伯杰. 半干旱黄土丘陵沟壑区不同植被类型减蚀效应及其时间变化[J]. 中国水利,2004, 20:38—40.
- [15] 李鹏,李占斌,郑良勇. 黄土坡面径流侵蚀产沙动力过程模拟与研究[J]. 水科学进展,2006,17(4):38—40.

(上接第 52 页)