

利用时域反射仪测定的土壤水分估算农田蒸散量*

龚元石 李子忠 李春友

(中国农业大学农业水管理研究所, 北京 100094)

提 要

简要介绍了时域反射仪(TDR)测定土壤含水量的原理和方法, 根据 TDR 实测的土壤水分和农田水量平衡原理, 估算了冬小麦生育期内不同供水条件下的农田蒸散量, 探讨了 TDR 探针不同埋设方式对测定土体贮水量以及对估算的农田蒸散量的影响, 根据充分供水区测定的最大可能蒸散量、非充分供水区的实际蒸散量, 以及用气象资料计算的参考作物蒸散量, 分别计算了冬小麦生育期内的作物系数 K_c 和土壤水分胁迫系数 K_s .

关键词: 时域反射仪 土壤水分 农田蒸散量

引 言

农田蒸散量是指一定时段内作物蒸腾量与土壤裸间蒸发量之和, 它与气象条件(太阳辐射、风速、温度、湿度等)、土壤湿度、作物种类和品种等因素有关, 准确估算农田蒸散量及有关的参数, 对于深入研究农田水分循环规律和指导灌溉等具有重要意义.

由于蒸散过程的复杂性, 农田蒸散量很难直接测定, 一般测定土壤含水量(或贮水量)后利用水量平衡原理来估算, 即使是高精度的称重式蒸渗仪也是如此^[1, 2]. 长期以来, 农田土壤水分的测定主要用土钻法, 也可用石膏电阻块、张力计和中子仪等. 80年代初加拿大、美国等开始应用 TDR 技术测定土壤水分, 由于它具有快速、准确、连续测定等优点, 目前它已成为测定土壤含水量的常规方法之一. 这项测定技术在我国农业气象、土壤等方面的应用则刚开始^[3], 随着农田蒸散研究的不断深入, 越来越需要快速、方便和准确地监测土壤水分.

与农田蒸散有关的作物系数受作物本身生物学特性、栽培条件、土壤条件等多种因素的影响, 它是用于估算农田最大可能蒸散量或农田耗水量的主要参数. 土壤水分胁迫系数的确定对于研究农田水分循环和水量平衡、土壤-作物-大气连续体, 以及农田灌溉决策和产量预报等方面具有重要的应用价值. 本文旨在用 TDR 技术测定土壤水分, 利用水量平衡原理估算农田蒸散量, 并计算冬小麦生育期内的作物系数和土壤水分胁迫系数.

* 属国家自然科学基金“八五”重大项目.
1996-07-12 收到, 1996-09-19 收到修改稿.

1 TDR 测定土壤水分的原理和方法

土壤水分对土壤介电特性的影响很大. 自然水的介电常数为 80.36(20℃), 比空气或土壤的介电常数大得多, 空气的介电常数为 1, 干燥土壤的介电常数介于 3~7. 这种巨大的差异表明, 可通过测量土壤介电特性来推测土壤含水量.

TDR 测定土壤含水量原理是用一个电压的阶梯状脉冲波沿在土壤中放置或垂直插入的探针(长度为 L)发射, 电压的阶梯状脉冲波沿探针金属棒传播, 由于电阻抗的突变, 部分能量在金属棒末端被反射回来, 形成 TDR 反射信号. 土壤含水量由延迟的时间决定, 土壤的介电常数(K_a)可用下式计算^[4]:

$$K_a = (ct/2L)^2 \quad (1)$$

c 为真空中的光速, 假设相当于沿探针的脉冲波速率, t 为传播时间. Topp 等^{[4][5]}用 TDR 测定了脉冲波的传播时间, 并得出该传播时间在大部分土壤中与土壤含水量(θ)成比例, 这一结果对应用 TDR 测定土壤含水量极为重要. 对绝大部分的土壤, 当 $\theta \leq 0.6$ 时, 可用一个简单 3 次多项式的经验公式来求得 θ ^[4]:

$$\theta = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2}K_a - 5.5 \times 10^{-4}K_a^2 + 4.3 \times 10^{-6}K_a^3 \quad (2)$$

当 $K_a \rightarrow 1$ 或 $K_a \rightarrow 80.36(20^\circ\text{C})$ 时, 式(2)不能对这种极限条件进行准确描述, 但该经验公式很实用, 特别是适用于砂性土壤.

在实际应用中, TDR 探针在土壤中可垂直插入、水平插入或任意放置. 不同的 TDR 产品可能有不同形式的探针, 但各种放置形式都可以测出探针长度的平均体积含水量. 本项试验中使用的是美国土壤湿度设备公司生产的 Trase-TDR 系统. Trase-TDR 测定土壤水分的范围为 0~100%, 测定精度小于满刻度的 $\pm 2\%$, 环境温度 0~45℃.

2 农田蒸散量的估算

根据农田土壤水分平衡方程, 农田蒸散量可由下式计算^[6]:

$$ET = P + I - \Delta W - S \quad (3)$$

其中, ET 为农田蒸散量, P 为降水量, I 为灌溉量, ΔW 为计划层土体贮水量的变化, S 为土体下边界净通量(向下为正, 向上为负), 所有变量的单位以 mm 计. 由式(3)可看出, ET 值的计算精度决定于其它几项的测定精度. 一般情况下, P 、 I 可精确测定, 当计划层足够深时, 土体下边界净通量 S 可假设为零. 因此, ET 值的计算精度主要决定于 ΔW 的测定精度.

根据联合国粮农组织(FAO)对作物系数(K_c)的定义, K_c 可用下式表示^[7]:

$$K_c = ET_m/ET_r \quad (4)$$

式中 ET_m 为大田作物在水分条件充分满足时的最大可能蒸散量(也称作物需水量), 在本试验条件下, 即为充分供水区的农田蒸散量. ET_r 为参考作物蒸散量, 根据实测气象资料用 FAO 最新公布的 Penman-Monteith 公式计算而得^[8].

在缺水条件下, 由于某些阶段的土壤含水量低于灌水下限, 使作物生长受到不同程

度土壤水分胁迫的影响,并使实际蒸散量(ET_a ,即非充分供水区的测定值)小于最大可能蒸散量(ET_m),土壤水分胁迫系数 K_s (也称土壤湿度修正系数)可用下式表示^[9]:

$$K_s = ET_a / ET_m \quad (5)$$

3 田间试验设计

(1) 试验地概况

试验地位于北京中国农业大学西校区科学园内(116.3°E, 39.95°N),属华北平原北部山前冲积平原,为暖温带半湿润大陆季风气候区,年平均气温 11.5℃,年平均降水量 630 mm,降水主要集中于夏季(6~8月),约占年降水量的 70%~80%。土壤类型为草甸褐土,地下水埋深 14 m,1 m 土层土壤质地为轻壤土至粘壤土,科学园内设有自动气象观测站。

供试作物为冬小麦,品种为农大 95,前茬作物是夏玉米。冬小麦播种日期为 1995 年 10 月 12 日。年前冬灌水量为 30 mm,灌水日期为 1995 年 12 月 5 日。

(2) 田间试验处理

田间试验分为充分供水区和非充分供水区,小区面积为 7.5 m×7.5 m(图 1),试验小区 0~50 cm 土层田间持水量为 163 mm,1 m 土层田间持水量为 333 mm。小区内埋设有 TDR 探针,探针长度为 20 cm,埋设于土壤的不同深度处,用于测定 1 m 土层以上的土壤含水量(每层 20 cm)。在小区中间埋设有中子管,用于测定 1 m 以下土壤含水量的变化。探针用导线与 TDR 主机相连,在主机屏幕上直接读取土壤含水量,埋设方式分为竖埋式和横埋式(图 2),用于比较不同埋设方式对测定的农田蒸散量的影响。不论何种埋设方式,在把土壤含水量换算成土体贮水量时,每层土层深度都按 20 cm 计。

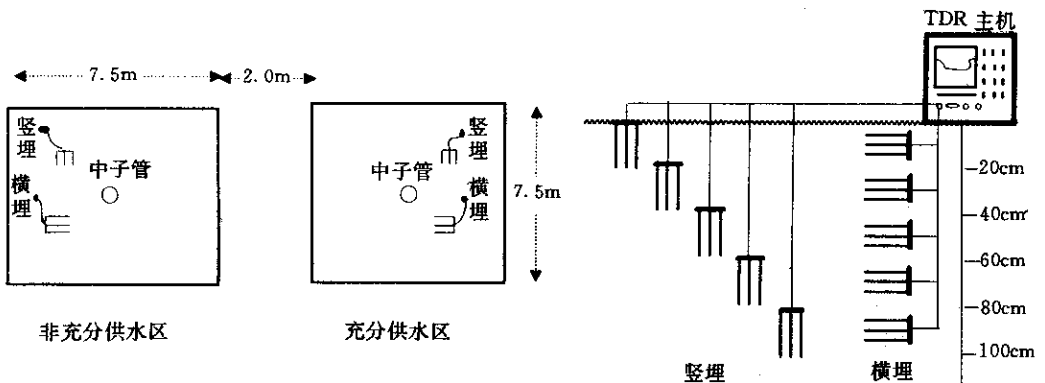


图 1 小区试验仪器埋设位置

图 2 TDR 探针的两种埋设方式

(左:竖埋;右:横埋)

小区内灌溉采用塑料软管进行,以水表计灌水量。一周两次测定土壤各层含水量,灌水或降水后加测。测定后计算计划层土壤贮水量(拔节前计划层为 50 cm,拔节后计划

层为 1 m), 判断土壤水分是否在适宜范围内, 如低于灌水下限则灌溉. 已有研究结果表明^[10], 冬小麦生长最适宜的土壤水分条件约为田间持水量的 80%. 本项试验中, 充分供水小区的土壤水分始终保持在田间持水量的 70%~90%, 低于下限值(即 70%田间持水量)则灌水至上限. 非充分供水区的灌溉视情况而定, 原则上使作物生长受到一定程度的土壤水分胁迫. 实际灌水方案见表 1.

表 1 充分供水区和非充分供水区的灌水方案(1996年)

	灌溉日期(日/月)									
	19/3	5/4	8/4	16/4	29/4	3/5	11/5	15/5	22/5	
充分供水区灌溉量(mm)	5	10	35	10	75	—	75	—	75	
非充分供水区灌溉量(mm)	—	—	—	42	—	10	—	21	—	

4 试验结果与讨论

(1) 不同供水条件下土壤水分和农田蒸散量的测定结果

用 TDR 测定的各层含水量(竖埋式)后计算的 1 m 土体贮水量结果表明, 不同供水条件下的土壤水分变化特征差异明显(图 3). 尤其在多次灌溉的充分供水区, 应用 TDR 可监测较短时间范围内土壤水分变化的详细过程, 这不仅可及时、准确地计算出土体的贮水量和农田蒸散量, 而且可根据实时监测农田土壤贮水量是否下降至灌水的下限指标, 精确确定灌溉水量, 控制农田的土壤水分上限和下限范围, 提高实验数据的准确性, 具有重要的意义, 这也是常规土钻法监测农田土壤水分时难以做到的.

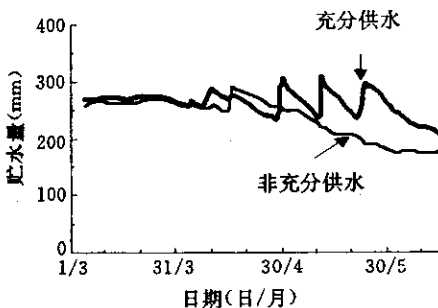


图 3 1 m 土体贮水量随时间变化

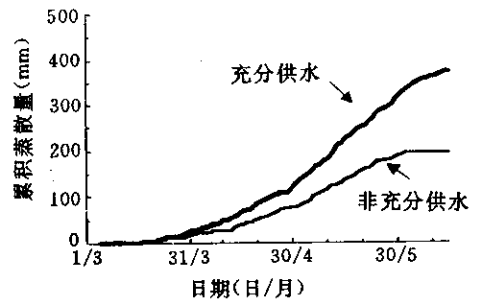


图 4 农田蒸散量随时间变化

不同供水条件下农田蒸散量变化特征差异也十分显著(图 4). 在充分供水区, 由于冬小麦生长期 1 m 土体贮水量控制在 70%~90%田间持水量范围内, 作物生长没有受到水分胁迫的影响, 累计农田蒸散量呈上升趋势. 在非充分供水区, 由于冬小麦生长受到较大程度的水分胁迫, 蒸散量较小, 特别从 5 月下旬开始, 由于 1 m 土体贮水量降至田间持水量的 50%以下, 农田蒸散量几乎为零, 这也迫使冬小麦提前成熟, 造成减产. 测产结果表明, 充分供水区的产量为 6480 kg/hm², 非充分供水区的产量仅为 4875 kg/hm², 减产 25%.

(2) 下边界净通量假定为零的依据及误差分析

在本项研究中,以 1 m 土层深度处作为下边界,并将净通量 S 假设为零. 由于冬小麦生长在旱季,如一次灌水量或降水量小于 75 mm 时,土壤水一般很难渗入至 1 m 以下. 但由于作物根系吸水和土壤棵间蒸发,使得 1 m 以下的水向上补给,并使 1~2 m 土层内土壤含水量降低. 显然,将 S 值假设为零,有可能使估算的 ET 值偏小.

另一方面,冬小麦根系有可能下扎至 1 m 土层以下,也即由于根系象导管一样直接从 1 m 以下土体吸收水分,使 1 m 以下土体(如 1~2 m 内)含水量降低. 根据中子仪在 120 cm, 160 cm, 200 cm 深度处测定的土壤含水量后计算的 1~2 m 土层土壤贮水量变化特征(图 5),充分供水条件下 100~200 cm 土体贮水量从返青前的 376 mm 下降至成熟期的 357 mm,非充分供水条件下从 369 mm 下降至 354 mm,分别下降了 19 mm 和 15 mm,它与估算的农田蒸散量相比,误差分别为 5% 和 7%. 因此,可以认为以 1 m 深度处作为计算农田水量平衡的下边界,并将 S 假定为零是可取的.

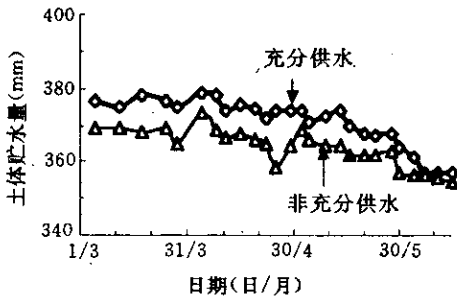


图 5 1~2 m 土体贮水量随时间变化

表 2 TDR 探针不同埋设方式下估算的 ET (非充分供水区)

生育期	ET (探针埋设方式)	
	ET (探针竖埋式) (mm)	ET (探针横埋式) (mm)
返青一起身	9.0	12.2
起身一拔节	44.6	57.1
拔节一孕穗	25.3	22.6
孕穗一抽穗	37.2	33.8
抽穗一开花	17.8	12.3
开花一乳熟	59.5	54.6
乳熟一成熟	1.2	0.9
全 期	196.1	195.9

(3) TDR 探针不同埋设方式对估算的农田蒸散量的影响

TDR 探针不同埋设方式下测定的土壤范围不一样,有可能使计算的土体贮水量各异,造成估算的农田蒸散量也有差异. 计算土体贮水量时,每层深度为 20 cm, TDR 探针长度正好为 20 cm,因此用竖埋式测定的土壤贮水量应更符合实际. 而横埋式测定的深度约 7 cm(探针间距 2.5 cm),因此,并没有测得全部土层深度范围的含水量(每层 20 cm). 从另一个角度来看,竖埋式虽然探头埋于原状土中,但探头以上的土壤是经扰动的(否则无法埋设),横埋式却保证探针及其上下的土壤是非扰动. 所以,横埋式探针周围的土壤水分运动更接近田间实际情况. 根据非充分供水区的测定结果, TDR 探头两种埋设方式下估算的农田蒸散量见表 2. 结果表明,两种埋设方式估算的农田蒸散量略有差异,但从返青至成熟期的总蒸散量却非常接近.

(4) 冬小麦各生育期内蒸散量、作物系数和水分胁迫系数的测定结果

根据 Penman-Monteith 公式计算的 ET_0 以及用 TDR 实测非充分供水区的农田土壤水分后估算的 ET_s 及充分供水区的 ET_m , 求得了冬小麦生长发育期内的土壤水分胁迫系数 K_s (表 3).

表3 冬小麦各生育期内 ET_0 、 ET_m 、 ET_a 、 K_c 和 K_s

生育期	ET_0 (mm)	ET_m (mm)	ET_a (mm)	K_c (-)	K_s (-)
返青一起身	35.4	14.9	9.0	0.42	0.60
起身一拔节	102.1	73.8	44.6	0.72	0.60
拔节—孕穗	49.5	38.8	25.3	0.78	0.65
孕穗—抽穗	47.7	53.8	37.2	1.13	0.69
抽穗—开花	29.7	40.5	17.8	1.36	0.44
开花—乳熟	122.1	136.9	59.5	1.12	0.43
乳熟—成熟	35.9	14.7	1.2	0.41	0.08

5 结 论

(1) 利用 TDR 测定土壤水分, 然后用农田水量平衡原理估算农田蒸散量, 主要优点在于提高了土壤水分的测定精度. TDR 是定点原位、连续测定, 克服了土钻法田间操作的一些缺陷.

(2) 在本试验条件下, 可把 1 m 深度处作为农田水量平衡计算的下边界, 当下边界净通量假设为零时, 其估计的蒸散量误差为 5%~7% 左右. TDR 探针不同埋设方式测定含水量各有优缺点, 对估算的农田蒸散量有一定的影响, 但对作物全生育期内的蒸散量估算值几乎没有差异.

(3) 根据田间实测最大可能蒸散量、实际蒸散量和利用气象资料计算的参考作物蒸散量, 还得到了作物系数 K_c 和土壤水分胁迫系数 K_s , 这些结果对研究蒸散和农田灌溉决策等具有重要的应用价值.

参 考 文 献

- 1 谢贤群. 测定农田蒸发的试验研究. 见: 谢贤群等主编, 农田蒸发——测定与计算. 北京: 气象出版社, 1991. 90~97.
- 2 裴步祥. 蒸发和蒸散的测定与计算. 北京: 气象出版社, 1989. 82~87.
- 3 龚元石, 廖超子. 测定土壤含水量的新技术——时域反射仪. 见: 石元春等主编, 节水农业应用基础研究进展. 北京: 中国农业出版社, 1995. 48~55.
- 4 Topp G C, Davis J, Annan A P. Electromagnetic determination of soil water content: Measurement in coaxial transmission lines. *Water Resour. Res.*, 1980, 16: 574~582.
- 5 Topp G C, Davis J L. Measurement of soil water content using time domain reflectometry: A field evaluation. *Soil Sci. Am. J.*, 1985, 49: 19~24.
- 6 龚元石. 冬小麦和夏玉米农田土壤分层水分平衡模型. 北京农业大学学报, 1995, 21(1): 61~67.
- 7 Smith M. Report on the expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements. FAO Rome, 1991, 1~30.
- 8 龚元石. Penman-Monteith 公式与 FAO-PPP-17 Penman 修正式计算参考作物蒸散量的比较. 北京农业大学学报, 1995, 21(1): 68~75.
- 9 Martin D L, Gilley J R, Skaggs R W. Soil water balance and management. In: Follett R. F. (eds.), *Managing Nitrogen for Groundwater Quality and Farm Profitability*. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA. 1991. 199~205.

10 朱自玺, 张家诚等. 作物水分胁迫与干旱研究. 郑州: 河南科学技术出版社, 1991. 33~50.

ESTIMATING FIELD EVAPOTRANSPIRATION USING SOIL WATER DETERMINED WITH TIME DOMAIN REFLECTOMETRY

Gong Yuanshi Li Zizhong Li Chunyou

(*Institute of Agricultural Water Management, China Agricultural University, Beijing 100094*)

Abstract

The principles and methodology for measuring soil water content by time domain reflectometry (TDR) are described. Based on the determined soil moisture of different irrigation plots, the evapotranspiration (ET) of winter wheat is calculated with a field soil water budget model. The impact of the different insertion ways of TDR probes on measuring soil water storage and estimating ET is also discussed. According to the maximum possible ET values obtained in the fully-wetted root zone, actual ET under water stress root zone and ET of reference crop from meteorological data, the crop coefficient K_c and soil moisture stress factor K_s for various growth stages of winter wheat are calculated, respectively.

Key words: Time domain reflectometry Soil water Field evapotranspiration