

应用时域反射仪测定作物需水量和作物系数^①

龚元石^② 李子忠 李春友
(土壤和水科学系)

摘要 介绍了应用时域反射仪(TDR)测定作物需水量(ET_c)的原理和方法。根据冬小麦生育期内实测的 ET_c 以及用气象资料计算的参考作物蒸散量(ET_o),求得了冬小麦的作物系数(K_c)。最后还用水面蒸发量(E_{pan})和实测 ET_c 计算了需水系数(α),并给出了 $K_c \sim t$ 、 $\alpha \sim t$ 的关系图,探讨了用 α 值估算作物需水量的可能性。

关键词 时域反射仪; 作物需水量; 作物系数

中图分类号 S152.7

Measurement of Crop Water Requirements and Crop Coefficients Using Time Domain Reflectometry

Gong Yuanshi Li Zizhong Li Chunyou
(Dept. of Soil and Water Sciences)

Abstract The principles and methodology of measurement of crop water requirements (ET_c) by time domain reflectometry (TDR) technique were presented in this paper. The crop coefficients (K_c) of winter wheat were obtained, based on the measured ET_c by TDR in the field and calculated reference crop evapotranspiration (ET_o) with meteorological data. The adjustment factors (α) were calculated with pan evaporation (E_{pan}) and ET_c . Finally, the validity of estimation of crop water requirements by α value were discussed.

Key words time domain reflectometry; crop water requirement; crop coefficient

作物需水量(ET_c)是指作物在适宜的土壤水分和肥力水平下,经过正常生长发育,获得高产时的作物蒸腾量与棵间蒸发量之和。精确测定作物需水量对于深入研究作物的需水规律和指导农田灌溉及施肥决策具有重要意义。

已有研究结果表明^[1],田间测定作物需水量的精度较低主要有两个原因,一是农田土壤水分(尤指根系层贮水量)的测定精度不高;二是使作物一直保持在适宜的土壤水分条件难以满足。在已有的一些土壤水分测定技术中,如称重法、中子仪法、石膏电阻块法和张力计法等,由于各自存在的一些缺陷,都难于对土壤水分进行精确、定量和连续测定,从而大大降低了作物需水量的测定精度。时域反射仪(Time Domain Reflectometry,简称TDR)的出现,使

收稿日期: 1996-11-06

①国家自然科学基金“八五”重大项目的部分研究内容,项目批准号:49391600

②龚元石,北京圆明园西路2号中国农业大学(西校区),100094

精确测定农田土壤水分成为可能^[2,3]。本文利用这一测水技术,通过春后近100天的田间试验,求得了冬小麦在此期间的需水量,进而获得了不同生育期的作物系数和需水系数。

1 原理和方法

1.1 TDR 测定作物需水量

人们已经知道,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℃),它要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 测定土壤含水量的原理简述如下,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(图 1),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:

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

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(1980)^[4]及 Topp 和 Davis(1985)^[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。这一成果对应用 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,可由一个简单的三次多项式的经验公式来求得 θ :

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

当 $K_a \rightarrow 1$ 或 $K_a \rightarrow 80.36$ (20℃) 时,公式(2)不能对这种极限条件进行准确描述,但很实用,特别适用于砂性土壤。

根据实际应用,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。

根据农田土壤水分平衡原理,作物需水量(ET_c)可由下式计算:

$$ET_c = P + I - \Delta\theta - S \quad (3)$$

其中, P 为降水量, I 为灌溉量, $\Delta\theta$ 为计划层土体贮水量的变化量, 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(3)式可看出, ET_c 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,当计划层足够深且地下水位也较深时,土体下边界净通量 S 可假设为零。因此, ET_c 值的计算精度主要决定于 $\Delta\theta$ 的测定精度。

1.2 作物系数

作物系数(K_c)是计算作物需水量的重要参数,它反映了作物本身的生物学特性、产量

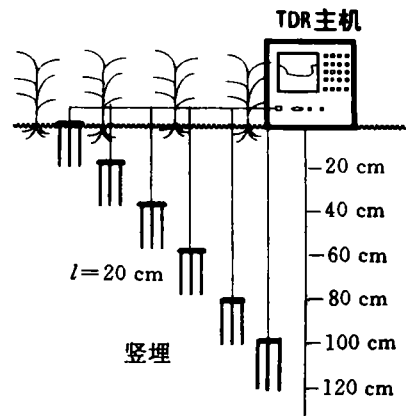


图 1 TDR 测定作物需水量示意图

水平及土壤肥力和耕作条件对作物需水量的影响。其计算式可用实测的作物需水量(ET_c)与同一时段内参考作物蒸散量(ET_o)的比值表示^[6]:

$$K_c = ET_c / ET_o \quad (4)$$

其中 ET_o 是利用测站或当地的气象资料(如温度、相对湿度、辐射、风速等)用世界粮农组织(FAO)最新公布的 Penman-Monteith 公式计算而得。由(4)式可知, ET_c 值的测定精度也直接影响到 K_c 值的计算结果。 ET_o 的计算公式如下^[7]:

$$ET_o = \frac{0.408\Delta R_n + \lambda \frac{900}{T+273} U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (5)$$

其中 R_n 为地表净辐射通量($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), T 为日平均温度($^{\circ}\text{C}$), e_a 和 e_d 分别为饱和水汽压和实际水汽压(kPa), U_2 为 2 m 高度处的风速(m s^{-1}), Δ 为饱和水汽压与温度关系曲线斜率($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$), γ 为干湿表常数($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$), λ 为蒸发潜热(MJ kg^{-1})。

1.3 需水系数

大量灌溉试验结果表明,作物需水量和水面蒸发量之间存在一定的关系^[1],并常用下式表示:

$$ET_c = \alpha E_{pan} \quad (6)$$

其中 α 称为需水系数, E_{pan} 一般用 E601 型或 80 cm 口径蒸发皿的测定值。用水面蒸发量估算作物需水量在本世纪初就已开始研究,由于参考作物蒸散量与水面蒸发量都受到气象因素的综合影响,且都是水汽扩散,故用水面蒸发量确定作物需水量比较合理^[1]。本项试验的目的之一是通过实测 ET_c 和 E_{pan} , 来确定需水系数 α 。

2 田间试验设计

试验地位于中国农业大学西校区科学园内,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,东经 116.3 度,北纬 39.95 度,年平均气温 11.5 $^{\circ}\text{C}$,年平均降水量为 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。试验区内 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。科学园内设有气象观测站。

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 1995-12-05。1996-04-29 小区内施尿素 1.0 kg。试验小区面积为 7.5 m \times 7.5 m,小区内垂直埋设有 TDR 探针(竖埋式),每个探针长度为 20 cm,埋设于土壤的不同深度处,用于测定 1.2 m 土层以上的土壤含水量,每层深度为 20 cm(图 1)。探针用导线与 TDR 主机相连,在主机屏幕上直接读取土壤体积含水量。

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。测定后计算土层贮水量(拔节前为 50 cm 土层,拔节后为 1 m 土层),判断土壤水分是否在适宜范围内,如低于灌水下限(70%田间持水量)则灌溉。已有研究结果表明^[8],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,通过 TDR 监测土壤水分,使计划层贮水量始终保持在田间持水量的 70%~90%,满足了测定 ET_o 所

需的适宜土壤水分条件。

3 结果与讨论

3.1 充分供水条件下土壤水分变化特征

在充分供水条件下,随着土层深度的增加,土壤水分变化幅度逐渐减小。土壤水分的变化主要发生在 0~60 cm 土层(图 2a~2c),0~20 cm 土层的土壤含水量变化最剧烈,受灌水、降水、根系吸水和近地面空气层的影响也最大。20~40 cm、40~60 cm 土层的土壤含水量实测结果表明,这两个土层的含水量也不同程度地受灌水和根系吸水的影响。60~80 cm 土层可以作为一个过渡层,该土层从返青前(3月初)至乳熟(5月中旬)的土壤含水量基本不

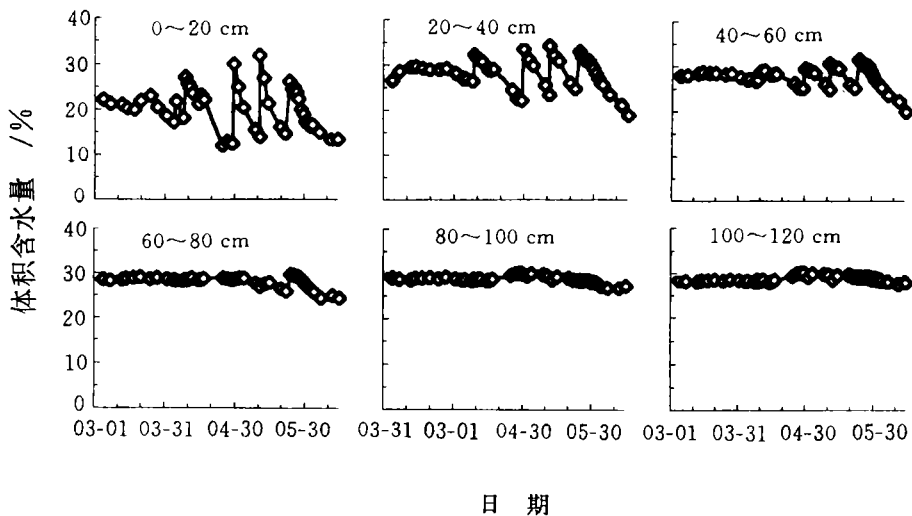


图 2 各层土壤水分随时间变化

变,但从 5 月下旬开始呈下降趋势(图 2d),说明在充分供水的条件下,冬小麦生长后期的作物耗水层已到达 60~80 cm 土层。80~100 cm 及 100~120 cm 从返青前至收获期土壤含水量基本不变(图 2e~2f),这表明在地下水位较深时,即没有地下水位补给的情况下,可以将测定的 1 m 土层土壤含水量的变化计算作物需水量,而不需测定 1 m 以下土层的含水量。

另外,从图 2 还可以看出,由于用 TDR 连续监测农田各层的土壤含水量,得到了农田土壤水分十分详细的动态变化过程,为精确确定作物需水量奠定了基础。

3.2 计划层土壤水分的调控

作物需水量的测定要求作物一直在水分充分满足的条件下生长,这就使得对计划层内水分的调控十分重要,本项试验应用 TDR 对各土层水分的监测,通过灌溉来实现对土壤水分的调控。用 TDR 测定土壤水分过程中,冬小麦拔节期前的 04-15 测得的 0~50 cm 土体贮水量已达到灌水下限,拔节后的 04-28、05-10 和 05-21 测得的 0~100 cm 土体贮水量已接近或达到灌水下限(图 3),根据测定结果及时采取了灌水措施,确保了测定作物需水量时应

满足的水分条件,进一步提高了作物需水量的测定精度。

3.3 各生育期内作物需水量(ET_c)和作物系数(K_c)

根据农田土壤水分平衡公式(3)计算了冬小麦各生育以及日平均 ET_c (表 1)。结果表明,冬小麦需水量最大值出现在开花—乳熟期,其次是起身—拔节期。但是,从日平均 ET_c 来看,最大值出现在抽穗—开花期,其次是孕穗—抽穗以及开花—乳熟期,表明从孕穗—乳熟是冬小麦生长的需水高峰期,该时期需水量占返青—成熟生育期的 62%。另外,日平均 ET_c 返青—开花期从 $1.0 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 上升至 $8.1 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$,开花期后又逐渐呈下降趋势。返青—成熟生育期的 ET_c 为 373.4 mm ,日平均 ET_c 为 3.9 mm 。

由式(5)计算的 ET_c (表 1),结果表明,冬小麦生育期内 ET_c 的变化规律与 ET_0 变化规律相似,但日平均 ET_c 的变化与 ET_0 有明显的差异, ET_c 的大小主要受天气条件变化的影响,日平均值 ET_c 最大值出现在抽穗—开花及乳熟—成熟期。由式(4)计算的作物系数 K_c 见表 1 的最后一列。从返青至孕穗期 K_c 值不断增大,但一直小于 1.0,此段内 $ET_c < ET_0$,从孕穗至乳熟期, K_c 值大于 1.0,此时段内冬小麦作物需水量大于参考作物蒸散量,即 $ET_c > ET_0$,乳熟—成熟期 K_c 值急剧下降至 0.41,返青—成熟生育期内的平均作物系数为 0.88。

表 1 冬小麦作物需水量(ET_c)、参考作物需水量(ET_0)和作物系数(K_c)

生育阶段	起止日期	t/d	ET_c /mm	日平均 ET_c / $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$	ET_0 /mm	日平均 ET_0 / $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$	K_c (-)
返青—起身	03-12~03-26	15	14.9	1.0	35.4	2.4	0.42
起身—拔节	03-27~04-21	26	73.8	2.8	102.1	3.9	0.72
拔节—孕穗	04-22~05-01	10	38.8	3.9	49.5	5.0	0.78
孕穗—抽穗	05-02~05-10	9	53.8	6.0	47.7	5.3	1.13
抽穗—开花	05-11~05-15	5	40.5	8.1	29.7	5.9	1.36
开花—乳熟	05-16~06-08	24	136.9	5.7	122.1	5.1	1.12
乳熟—成熟	06-09~06-14	6	14.7	2.5	35.9	6.0	0.41
返青—成熟 (春后生育期)	03-12~06-14	95	373.4	3.9	422.4	4.4	0.88

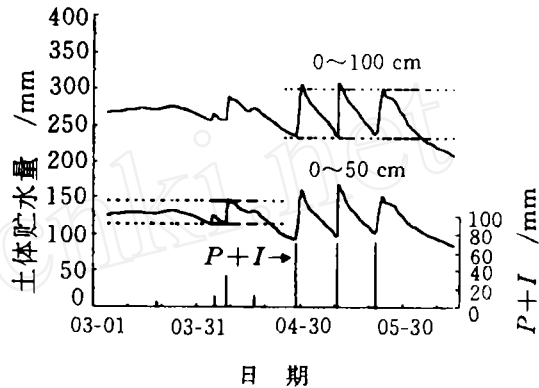


图 3 土体贮水量随时间变化

3.4 用水面蒸发量(E_{pan})和实测作物需水量(ET_c)确定需水系数(α)

计算结果表明了需水系数 α 值与作物系数 K_c 值的变化规律相似,其数值略有不同,两者的差值变化在 0.0~0.23 之间,且越是作物生长旺盛时差异越大。表 2 还说明了当缺乏气象观测资料时,可直接用 E601 蒸发皿观测值和 α 值直接确定作物需水量,当缺少作物系数

K_c 资料时,也可用 α 值乘参考作物需水量 ET_0 来确定作物需水量 ET_c ,特别在估算冬小麦春后生育期的需水量时,由于需水系数 α 值($=0.91$)与作物系数 K_c 值($=0.88$)差异很小,因此,用 α 值代替 K_c 计算的春后生育期作物需水量仍具有较高的精度。

表2 冬小麦作物需水量 ET_c 、水面蒸发量 E_{pan} (E601 实测)和需水系数 α

生育阶段	起止日期	t/d	ET_c /mm	E_{pan} /mm	α (-)
返青—起身	03-12~03-26	15	14.9	32.2	0.46
起身—拔节	03-27~04-21	26	73.8	112.6	0.66
拔节—孕穗	04-22~05-01	10	38.8	43.9	0.88
孕穗—抽穗	05-02~05-10	9	53.8	51.6	1.04
抽穗—开花	05-11~05-15	5	40.5	25.5	1.59
开花—乳熟	05-16~06-08	24	136.9	107.7	1.27
乳熟—成熟	06-09~06-14	6	14.7	35.8	0.41
返青—成熟 (春后生育期)	03-12~06-14	95	373.4	409.3	0.91

3.5 作物系数(K_c)和需水系数(α)的动态变化特征

由于 TDR 可以定点、原位、连续测定土壤水分,且一般可以得到逐日气象资料。因此,可以获得逐日或者更短时段内作物需水量和需水系数的动态变化特征。这对于研究诸如降

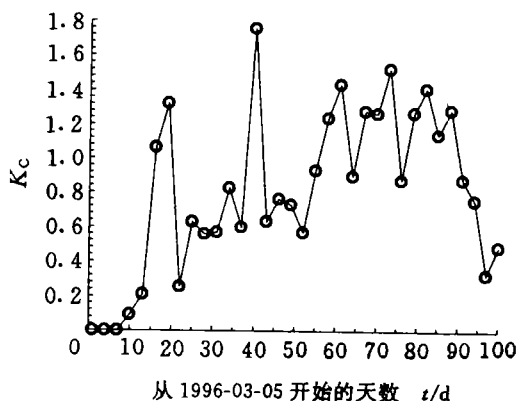


图4 K_c 随时间变化特征

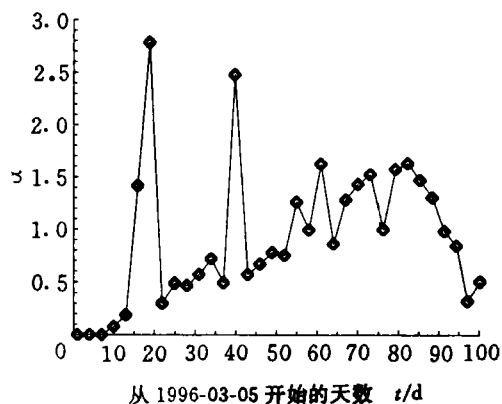


图5 α 随时间变化特征

水和灌溉对作物系数的影响具有重要价值。本项试验根据 3 d 一次的 TDR 观测值求得的作物系数和需水系数动态变化特征见图 4,5。图中充分表明了作物系数和需水系数在冬小麦春后生育期内的变化趋势和短时段范围内的不稳定性。

4 结 论

①应用 TDR 测定作物需水量和作物系数,其主要优点是提高了土壤水分的测定精度。由于 TDR 定点原位、连续测定,能够对土壤水分进行实时调控,达到测定作物需水量时应满足作物在适宜水分条件下的要求,从而充分提高了作物需水量和作物系数的测定精度。本文所获结果可作为华北平原类似条件下冬小麦作物需水量和作物系数的重要依据。

②在地下水位较深情况下,测定冬小麦作物需水量时,土壤水分测定深度应至 60~100 cm。由于作物一直保持在充分供水条件下,根系吸水主要发生在 60 cm 土层以上。因此就农田土壤水分平衡计算而言,可用 1 m 土层贮水量的变化来确定作物需水量具有较高的精度,无需测定更深土层的含水量,这样可减少田间测定的工作量。测定时,TDR 探针用竖埋式还是用其他埋式方式更合适有待进一步研究。

③在本试验条件下,冬小麦从返青—成熟期实测的作物需水量为 373.4 mm,全期平均作物系数为 0.88。日平均需水量最大值出现在抽穗—开花期,该时期的作物系数也达最大,其值为 1.36。作物需水量和作物系数的实测值表明了它们随生育期有明显的变化规律。但在短时段内仍具有明显的波动性。

④需水系数 α 和水面蒸发量 E_{pan} 也可用来估算作物需水量,本试验通过实测作物需水量和水面蒸发量,求得了冬小麦各生育期内的 α 值。结果表明, α 值的变化规律与 K_c 值变化规律相似,且其值差异不大。在仅有水面蒸发资料的情况下,可用 α 值代替 K_c 值估算作物需水量,特别是估算全生育内的作物需水量时,仍具有相当高的精度。

参 考 文 献

- 1 陈玉民等编著. 中国主要作物需水量与灌溉. 北京:水利电力出版社,1995,45~65
- 2 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
- 3 Topp G C, Zegelin S J, White I. Monitoring soil water content using TDR: An overview of progress. Symposium on TDR in Environmental, Infrastructure and Mining Applications. SP 19~94, 1994, 67~80
- 4 Topp G C, Davis J L, 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 康绍忠,刘晓明,熊运章著. 土壤—植物—大气连续体水分传输理论及其应用. 北京:水利电力出版社,1994,122~131
- 7 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年,21(1):68~75
- 8 朱自玺,张家诚等. 作物水分胁迫与干旱研究. 河南科学技术出版社,1991,33~50