

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.11.016

# 黄土高原区滴灌枣树作物系数和需水规律试验\*

胡永翔<sup>1</sup> 李援农<sup>1</sup> 张莹<sup>2</sup>

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 河北科技大学外国语学院, 石家庄 050018)

**【摘要】** 根据2009年陕西省米脂县孟岔试验站观测的气象资料,使用FAO Penman-Monteith公式计算了作物生育期内参考作物蒸发蒸腾量,通过实测取得了充分供水条件下枣树各生育阶段作物需水量。其中,萌芽展叶期、开花坐果期、果实膨大期、果实成熟期的作物需水量分别为68.1、117.4、224.4、66.2 mm;计算了黄土高原地区枣树各生育阶段的作物系数,分别为萌芽展叶期0.496、开花坐果期0.681、果实膨大期1.262、果实成熟期0.944。建立了作物系数与叶面积指数的函数关系,结果表明,两者之间存在二次曲线关系。

**关键词:** 滴灌 枣树 需水量 作物系数

中图分类号: S274.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)11-0087-05

## Experiment on Crop Coefficient and Water Requirement of Drip-irrigation Jujube in Loess Plateau of China

Hu Yongxiang<sup>1</sup> Li Yuannong<sup>1</sup> Zhang Ying<sup>2</sup>

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. School of Foreign Language, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China)

### Abstract

The experimental area located in Mizhi experimental station in loess plateau of China. According to the meteorological data observed by automatic weather station of Mizhi experimental station and using FAO Penman-Monteith equation, the crop reference evapotranspiration was calculated consequently in jujube's growth period. Additionally, combined with crop evapotranspiration of jujubes under sufficient irrigation, the crop coefficient of drip-irrigation jujubes was studied. The water requirements and crop coefficient was determined in each growing period of jujube. Water requirements (crop evapotranspiration) in sprout-leaf development period, flowering and fruit-setting period, fruit development period and fruit development period was 68.1 mm, 117.4 mm, 224.4 mm and 66.2 mm, respectively. Crop coefficient in each growth period was as follows; 0.496 in sprout-leaf development period, 0.681 in flowering and fruit-setting period, 1.262 in fruit development period, and 0.944 in fruit mature period. A function relationship was established between crop coefficient and leaf area index, and the results demonstrated that there was a quadratic curve relationship between crop coefficient and leaf area index.

**Key words** Drip-irrigation, Jujube, Water requirement, Crop coefficient

### 引言

大力发展节水灌溉,是提高黄土高原地区枣树

经济效益的必要手段<sup>[1-2]</sup>。滴灌作为一种成熟的节水灌溉方式,可以有效地减少深层渗漏,从而达到枣树综合节水增产的效果<sup>[3]</sup>。作物需水量是指作物

收稿日期: 2012-03-19 修回日期: 2012-06-04

\*“十一五”国家科技支撑计划资助项目(2007BAD88B05)和国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(SQ2010AA1000690006)

作者简介: 胡永翔, 博士生, 主要从事节水灌溉理论与技术研究, E-mail: doctorhu110@163.com

通讯作者: 李援农, 教授, 博士生导师, 主要从事节水工程技术及3S技术应用研究, E-mail: liyuannong@163.com

在充分供水和适宜的肥力水平下,维持作物正常生长发育、并获得高产时的作物蒸发蒸腾量。作物蒸发蒸腾量和作物系数是确定科学合理的灌溉制度与最优灌溉模式的依据,也是提高水分利用效率的基础<sup>[4]</sup>。作物蒸发蒸腾量受土壤条件、灌溉方式、作物品种及气象因素的影响,且在作物生育期内随作物发育状况有很大的变化,而作物系数是使用参考作物蒸发蒸腾量间接估算作物蒸发蒸腾量的重要参数,可用来描述作物本身生物学特性、产量水平以及土壤耕作条件对作物需水量的影响。得到特定地区地貌、气候条件下各主要农作物的作物系数分布规律,已成为灌溉及农作物相关研究的重要任务<sup>[5-7]</sup>。黄土高原区坡地滴灌枣树的作物系数因黄土高原特殊的气候条件、作物栽培条件、作物生长发育时期和灌溉方式而不同,且该数值与国际粮农组织(FAO)提供的作物系数值存在差异。因此,有必要根据当地的具体气候条件和试验数据计算出当地实际的枣树作物系数。本文对滴灌条件下枣树各生育阶段的作物系数和需水量变化规律进行研究,以期为此类地区枣树种植中的相关问题研究提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于2009年4月至9月(一个完整生育期)在陕西省米脂县孟岔试验站内进行。地理位置为东经 $109^{\circ}49'$ ~ $110^{\circ}29'$ ,北纬 $37^{\circ}39'$ ~ $38^{\circ}5'$ ,东西最大距离59 km,南北长47 km,总面积 $1\ 212\text{ km}^2$ 。米脂县属半干旱大陆性季风气候,降水较少,蒸发强烈,自然灾害频繁。年平均气温 $8.5^{\circ}\text{C}$ ,极端最高气温 $39.2^{\circ}\text{C}$ ,极端最低气温 $-25.5^{\circ}\text{C}$ ,无霜期162 d。多年平均降水量 $451.6\text{ mm}$ ,降水由西北向东南递增,且全年降水分布极为不均,主要集中在七、八、九3个月,约占全年降水量的50%~60%。多年平均水面蒸发量 $1\ 574\text{ mm}$ ,干旱指数为3.8,是典型黄土高原灌区。试验区以黄绵土为主,容重 $1.30\text{ g/cm}^3$ ,0~100 cm计划湿润层的田间持水率为23.2%(质量分数)。经测定试验园土壤有效N、P、K含量(质量比)分别为34.73、2.90、101.9 mg/kg,有机质质量分数为0.21%,pH值为8.6。

### 1.2 试验处理设计

供试作物为7~8年生的矮化密植梨枣,枣树的株距和行距分别为2 m和3 m,供试枣树所在坡地的坡度为 $25^{\circ}$ ,灌水方式为滴灌。本试验设1个处理,该处理把计划湿润层(0~100 cm)的土壤含水率下限设为田间持水量的65%(即土壤含水率15%),在枣树计划湿润层含水率达到所设下限时进行灌

水,灌水定额为30 mm,即试验期间保持计划湿润层的土壤含水率在田间持水率的65%以上,为充分灌水条件。处理设置3个重复,共3个小区,每个小区均有3棵枣树。每个重复中均有1棵枣树,用长2 m、宽2 m、高1.6 m的PVC材料板箱圈起,形成隔离体,隔离体地下部分深度为1.5 m。滴灌带的布设方式为一根毛管灌溉一行枣树,枣树主干的左、右两侧30 cm处各设置一个滴头,滴头流量为4 L/h,均为补偿式滴头。各处理修剪、施肥和病虫害防治措施相同,均统一按时令进行。

### 1.3 观测项目和方法

本试验对气象因子、土壤水分以及生理指标进行测定,其中包括:用Diviner仪测定枣树根系层0~100 cm土壤含水率,每5 d测定一次且在灌水前后加测,并使用取土干燥法进行校核;作物需水量采用水量平衡方程计算,据实测相邻两次根系层土壤含水率以及其间的灌水量和降水量资料,计算出作物在各生育阶段的需水量,即

$$E_{Tc} = I + 10 \sum \gamma_i H_i (\theta_{i1} - \theta_{i2}) + P + G - D \quad (1)$$

式中  $E_{Tc}$ ——作物需水量,mm

$P$ ——时段内降水量,mm

$I$ ——时段内灌水量,mm

$G$ ——时段内地下水补给量,mm

$D$ ——时段内深层渗漏量,mm

$\gamma_i$ ——第*i*层的土壤干密度, $\text{g/cm}^3$

$H_i$ ——第*i*层的土壤厚度,cm

$\theta_{i1}$ 、 $\theta_{i2}$ ——第*i*层土壤计算时段始、末的土壤含水率

因试验区属于典型黄土高原区,地下水埋藏较深,故无地下水补给, $G=0$ ;试验采用定额灌水,深层渗漏量可以忽略,即 $D=0$ 。

新梢长用直尺测量,每棵树选取长势均匀有代表性的3根新梢供测试;叶面积用长×宽×系数的方法求得,每10~15 d测量一次,并使用直接测定法计算叶面积指数。风速、气温、湿度、太阳辐射等气象因子用智能化自动气象工作站现场采集。

### 1.4 参考作物蒸发蒸腾量和作物系数的确定方法

FAO-56(FAO Irrigation and Drainage Paper NO.56)推荐的单作物系数法将各因素综合量化成参考作物蒸发蒸腾量、实际作物蒸发蒸腾量和作物系数3个相对独立的因素<sup>[8]</sup>。

根据气象观测资料,采用FAO-56推荐的Penman-Monteith公式计算生长期参考作物蒸发蒸腾量,即

$$E_{70} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (2)$$

式中  $E_{T_0}$ ——参考作物蒸发蒸腾量, mm/d  
 $\Delta$ ——饱和水汽压随温度变化的斜率, kPa/K  
 $R_n$ ——作物表面的净辐射量, MJ/(m<sup>2</sup>·d)  
 $G$ ——土壤热通量, MJ/(m<sup>2</sup>·d)  
 $T$ ——2 m 高处日平均温度, K  
 $u_2$ ——2 m 高处日平均风速, m/s  
 $e_s$ ——饱和水汽压, kPa  
 $e_a$ ——实际水汽压, kPa  
 $\gamma$ ——湿度计算常数, kPa/K

根据 FAO 单因素作物系数法, 水分胁迫系数  $K_s$  被整合入作物系数中, 在充分灌溉的条件下,  $K_s = 1$ , 则

$$E'_{T_c} = K_c E_{T_0} \quad (3)$$

式中  $E'_{T_c}$ ——作物日需水量, mm/d  
 $K_c$ ——作物系数

## 2 结果分析

### 2.1 枣树生育期内参考作物蒸发蒸腾量的变化

根据自动气象站采集的气象资料, 使用 FAO Penman - Monteith 公式逐日计算出枣树全生育期内的参考作物蒸发蒸腾量, 所得计算结果如图 1 所示。参考作物蒸发蒸腾量在枣树生育期内呈中间高两头低的特性, 并且峰值部分的位置比较靠前, 这是由于试验地区在 4~5 月间多有大风天气, 造成参考作物蒸发蒸腾量的数值较高。具体来看, 4 月份的月平均参考作物蒸发蒸腾量只有 3.49 mm/d, 只有在月底才出现的几个较高值, 此时温度较低, 日照时数少。5 月份的温度依然较低, 但是随着日照时数的上升和多发的大风天气的影响, 月平均参考作物蒸发蒸腾量为一个较高的水平 (4.6 mm/d)。6 月到 7

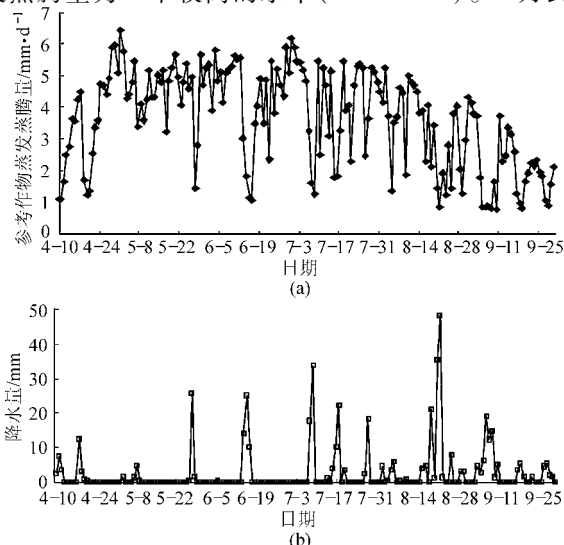


图 1 枣树生育期内参考作物蒸发蒸腾量及降水量

Fig. 1 Crop reference evapotranspiration and rain during growth period

(a) 参考作物蒸发蒸腾量 (b) 降水量

月间的温度提高很快, 参考作物蒸发蒸腾量依旧保持在一个较高值, 并出现了单天最高值 6.4 mm/d, 这不仅是由于日照时数, 辐射强度进一步加大, 而且还在于这个时期的黄土高原地区降雨较少。8 月以后, 虽然日照时数相比 7 月变化不大, 但是降雨增多, 太阳辐射强度降低, 参考作物蒸发蒸腾量的均值降低到 3.2 mm/d 左右。9 月份的日平均参考作物蒸发蒸腾量为 1.59 mm/d 并出现了若干极小值, 则是受到月初持续 10 d 左右的降雨影响。枣树生育期内的参考作物蒸发蒸腾量及其构成见表 1。

表 1 枣树生育期内的参考作物蒸发蒸腾量及其构成

Tab. 1 Composition of crop reference evapotranspiration during growth period of jujube mm/d

参数	时间					
	4 月份	5 月份	6 月份	7 月份	8 月份	9 月份
$E_{T_0}$	3.492	4.601	4.407	4.121	3.204	1.593
$E_{T_{rad}}$	1.849	2.747	3.403	3.468	2.786	0.999
$E_{T_{aero}}$	1.643	1.854	1.004	0.653	0.418	0.594

根据 FAO 对 Penman - Monteith 方程的解释, 参考作物蒸发蒸腾量的数值是由  $E_{T_{rad}}$  (辐射项) 和  $E_{T_{aero}}$  (空气动力学项) 两部分组成的, 分别表示太阳辐射和蒸发表面上方大气的对流、紊流和干燥程度对参考作物蒸发蒸腾量的影响, 二者的比例受当地地理和气候的影响, 随着时间的变化呈现为动态的过程<sup>[9]</sup>。如表 1 所示, 由于黄土高原地区的实际气候状况, 即降水较少、风沙较大、日照强烈, 在参考作物蒸发蒸腾量计算的数据中就表现为: 试验期内绝大部分时间  $E_{T_{rad}}$  占参考作物蒸发蒸腾量的百分比在 60% 以上, 并且在 5 月到 8 月间所占的比例有逐月上升的趋势。在 4~8 月间,  $E_{T_{rad}}$  部分所占的比例由 4 月最低 58% 逐月上升至 8 月最高 89.1%, 期间逐月所占百分比分别为 58%、60.5%、79%、85.1%、89.1%。相对看,  $E_{T_{aero}}$  所占的比例逐月下降。4 月和 5 月  $E_{T_{aero}}$  所占的百分比相对较大, 这也如实反映了当地 4~5 月间常有大风的特殊气候。

### 2.2 枣树生育期内的需水规律

根据 FAO - 56 的要求, 把枣树的主要生育阶段划分为: 萌芽展叶期 (4 - 30 ~ 5 - 30)、开花坐果期 (5 - 31 ~ 7 - 10)、果实膨大期 (7 - 11 ~ 8 - 28) 和果实成熟期 (8 - 29 ~ 9 - 30), 各生育期实际情况如图 2 所示。

作物需水量 (作物蒸发蒸腾量) 直接反映了作物生长发育对水分的消耗, 根据实测的土壤含水率、灌水量及降水资料, 采用水量平衡方程计算出滴灌

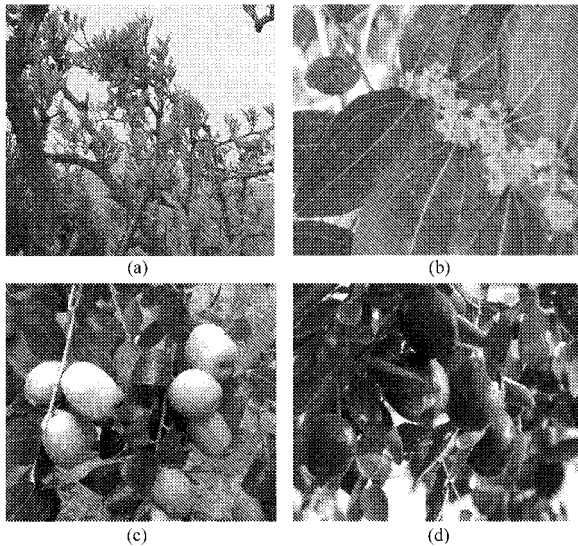


图2 枣树的4个生育阶段

Fig. 2 Four growth periods of jujube

(a) 萌芽展叶期 (b) 开花坐果期  
(c) 果实膨大期 (d) 果实成熟期

充分供水处理下枣树在不同生育阶段的作物需水量,并按照生育期计算日耗水强度(图3)。

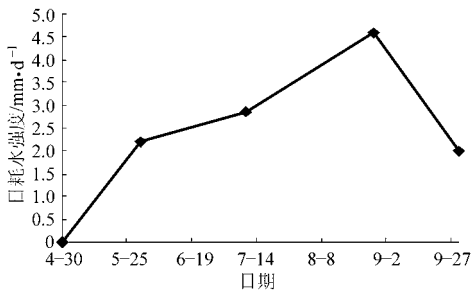


图3 各生育阶段日耗水强度

Fig. 3 Water consumption rates during growth period

从图3所示,陕北黄土高原地区坡地枣树的物候期相对关中地区滞后约20 d,开始于4月30日,全生育期生长天数共154 d。为了保证充分灌水,在整个生育期内供试枣树的土壤含水率基本上保持在田间持水量的65%以上。在当地独有的气候条件、土壤条件和栽培条件下,滴灌充分供水处理枣树的全生育期作物需水量为476.1 mm,平均日耗水强度为3.092 mm/d。4个生育阶段对应的作物需水量分别为68.1、117.4、224.4、66.2 mm,日耗水强度分别为2.197、2.863、4.680、2.006 mm/d。在4个物候期中,最小的作物需水量出现在果实成熟期,次小的作物需水量出现在萌芽展叶期,整个生育期呈现出中间大、两头小、峰值相对靠后。枣树在萌芽展叶期时,气候多为大风扬沙和干旱无雨的较恶劣气候,且在该生育期内枣树叶片较幼小,叶面积指数处于较低水平,所以作物需水量为第二小的68.1 mm,阶段耗水模数为14.30%。作物需水量变化较大的阶段,大体处于5月到8月间,这个时间段正处于枣树

的开花坐果期和果实膨大期。在开花坐果期内,气温逐渐增高,叶面积不断增大,叶面蒸发量也随之增大,枣树花开始绽放,有着较剧烈的生理活动,作物的需水量不断增长,日耗水强度达到2.863 mm/d,阶段耗水模数为24.66%。枣树在果实膨大期的营养生长和生殖生长都进入了全生育期的最活跃阶段,温度与叶面积指数均达到了峰值,相对应的作物需水量达到了最高的224.4 mm,平均日耗水强度为4.580 mm/d,阶段耗水模数47.13%。进入果实成熟期后,该时期为试验地区的多雨季节,温度下降较快,叶片停止生长,叶面积指数也开始回落,枣树果实的物理生长也基本完成,所以作物需水量为最小的66.2 mm,日耗水强度为2.006 mm/d,阶段耗水模数仅为13.91%。除此之外,值得注意的是,虽然萌芽展叶期和果实成熟期的作物需水量均较小,但是原因却截然不同。萌芽展叶期时枣树的叶片微小,作物蒸腾作用消耗的水量不大,但是由于大风气候与黄土高原坡地上较强的日照,造成该时期枣树的需水量主要由株间蒸发耗水组成。而果实成熟期则恰恰相反,该生育期恰逢连续10 d左右的阴雨气候,造成气温快速下降,该时期枣树的需水量主要由作物蒸腾耗水构成。

### 2.3 充分灌水条件下滴灌枣树的生长发育变化

枣树的生长发育状况主要体现在新梢长度和叶面积指数两个常用指标上,从表2中可知:在试验期间,新梢长度与叶面积指数具有较明显的相关性。由于5月份的大风气候和干旱少雨,使枣树的萌芽展叶前期受到一些影响,生长发育放缓,叶面积指数与新梢长度的数值都较低。随着温度的逐渐增高,枣树在萌芽展叶后期与开花坐果期进入加速增长时期,两项指标增长较快。在果实膨大前期前后,新梢进入停长期,增速放缓,叶面积指数增长也进入相对缓慢期,两个指数的增长率都处于较低水平。其后新梢开始2次生长,叶面积指数也进入了相对增速较快的二次发展时期。在果实成熟期前后,新梢生长速度与叶面积指数均进入稳定期,其数值也基本达到峰值,此后一直到落叶期前两种指数均维持在较高水平。可以预见,随着枣树采摘工作和落叶的开始,9月份以后的叶面积指数将随之下降。

表2 枣树的叶面积指数与新梢长度

Tab. 2 New branch's length and leaf area index of jujube

参数	4月份	5月份	6月份	7月份	8月份	9月份
叶面积指数	0.021	0.327	0.707	1.012	1.645	2.014
新梢长度/cm	0	9.9	16.2	21.9	25.7	25.8

### 2.4 枣树生育期内的作物系数

根据计算得出的作物需水量与参考作物蒸发蒸

腾量,求出黄土高原区枣树的作物系数,如表 3 所示。

表 3 枣树生育期内的作物系数

Tab. 3 Crop coefficient of jujube during growth period

参数	萌芽展	开花	果实	果实	全生
	叶期	坐果期	膨大期	成熟期	
生长天数/d	31	41	49	33	154
参考作物蒸发蒸腾累积量/mm	137.41	177.59	177.76	70.13	562.89
作物需水量/mm	68.1	117.4	224.4	66.2	476.1
作物系数	0.496	0.681	1.262	0.944	0.846

黄土高原区坡地滴灌枣树全生育期作物系数均值为 0.846,最小值出现在萌芽展叶期为 0.496,这是因为该时期黄土高原地区气候较为恶劣,出现多次大风扬沙(7 级风 2 次,6 级风 1 次,5 级风 7 次),造成参考作物蒸发蒸腾量的数值相对较大,故而作物系数相对较低。开花坐果期的作物系数上升为 0.681,这个时期的参考作物蒸发蒸腾量与果实膨大期的相当,但是此时期的温度相对较低,枣树叶面积相对较小,枣树的需水量还处于发展阶段,所以该阶段的作物系数为第二小值。果实膨大期的作物系数为最大的 1.262,此时期的参考作物蒸发蒸腾量和作物需水量双双达到各自发展的顶峰,枣树进入快速生长时期,作物系数出现了全生育期唯一的一次大于 1。进入到果实成熟期后作物系数回落为 0.944,参考作物蒸发蒸腾量和作物需水量的值都有较大的回落,但是因为回落的比例比较相近,所以此时作物系数还相对较高,但趋势已经转为下降。

作物系数在生育期内存在一个动态的变化过程,一般认为作物系数与叶面积指数存在相关关系<sup>[10-11]</sup>。在枣树萌芽以后,需水量的增加很重要一部分是由于叶面积的增加所致。图 4 建立了作物系数与叶面积指数的二次曲线关系,图中的数据为平均值。从图 4 可以看出,作物系数随着叶面积指

数的增加而增加,当叶面积指数达到最大值时,作物系数也达到较大值。在这之后,两个因素的趋势出现了一些分歧。由于参考作物蒸发蒸腾量仅受气象条件的影响,而枣树需水量除受气象条件影响之外,还要受作物因素及作物与气象因素相互作用的影响<sup>[12]</sup>。因此,后期时段的趋势线出现了一定的误差,拟合相关系数相对显著( $R^2=0.8018$ )。利用该关系式,可以通过测量枣树的叶面积指数来估算作物系数,为实际的枣树灌溉提供参考。

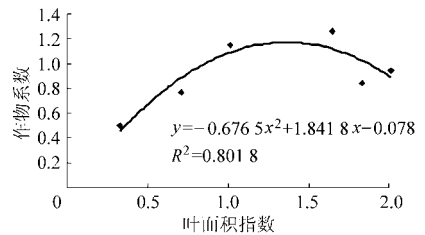


图 4 枣树作物系数与叶面积指数的关系

Fig. 4 Relationship between crop coefficient and leaf area index of jujube

### 3 结论

(1) 在整个生育期内滴灌枣树的作物系数均值为 0.846,具体到 4 个生育阶段分别为:萌芽展叶期 0.496,开花坐果期 0.681,果实膨大期 1.262,果实成熟期 0.944。

(2) 在整个生育期滴灌枣树的总需水量为 476.1 mm,平均日耗水强度为 3.092 mm/d。枣树萌芽展叶期的需水量和日耗水强度分别为 68.1 mm 和 2.197 mm/d;开花坐果期的相应值为 117.4 mm 和 2.863 mm/d;果实膨大期的相应值为 224.4 mm 和 4.680 mm/d;果实成熟期的相应值为 66.2 mm 和 2.006 mm/d。开花坐果期与果实膨大期为需水高峰期。

(3) 充分灌水条件下滴灌枣树作物系数和叶面积指数之间存在相对显著的二次曲线关系。

### 参 考 文 献

- 1 吴普特,高建恩. 黄土高原水土保持新论[M]. 郑州:黄河水利出版社,2006.
- 2 李援农. 保护地节水灌溉技术[M]. 北京:中国农业出版社,1995.
- 3 山仑,黄占斌,张步岐. 节水农业[M]. 广州:暨南大学出版社,2000.
- 4 Wright J L. New evapotranspiration crop coefficients[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1982, 108(2): 57~74.
- 5 Sumner D M, Jacobs J M. Utility of Penman-Monteith, Priestley-Taylor, reference evapotranspiration, and pan evaporation methods to estimate pasture evapotranspiration[J]. Journal of Hydrology, 2005, 308(1~4): 81~104.
- 6 刘艳伟,朱仲元,吴云,等. 浑善达克沙地天然植被蒸散量两种计算方法的比较[J]. 农业机械学报,2010,41(11):84~88. Liu Yanwei, Zhu Zhongyuan, Wu Yun, et al. Comparison of evapotranspiration of the natural vegetation in the otindag sandy area using two calculation methods[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(11): 84~88. (in Chinese)

- N, N-trimethylaminoethyl methacrylate methyl sulfate[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 1974, 18(7): 2 205 ~ 2 209.
- 3 Levy G J, Levin J, Ben-Hur M. Polymers effects on infiltration and soil erosion during consecutive simulated sprinkle irrigations[J]. *Soil Science Society of America Journals*, 1992, 56(3): 902 ~ 907.
- 4 黄占斌, 张国桢, 李秧秧, 等. 保水剂特性测定及其在农业中的应用[J]. *农业工程学报*, 2002, 18(1): 22 ~ 26.  
Huang Zhanbin, Zhang Guozhen, Li Yangyang, et al. Characteristics of aquasorb and its application in crop production[J]. *Transactions of the CSAE*, 2002, 18(1): 22 ~ 26. (in Chinese)
- 5 李云开, 杨培岭, 刘洪禄. 保水剂农业应用及其效应研究进展[J]. *农业工程学报*, 2002, 18(2): 182 ~ 187.  
Li Yunkai, Yang Peiling, Liu Honglu. Review on superabsorbent polymer application in agriculture and its effect [J]. *Transactions of the CSAE*, 2002, 18(2): 182 ~ 187. (in Chinese)
- 6 庄文化, 冯浩, 吴普特. 高分子保水剂农业应用研究进展[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(6): 265 ~ 270.  
Zhuang Wenhua, Feng Hao, Wu Pute. Development of super absorbent polymer and its application in agriculture [J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(6): 265 ~ 270. (in Chinese)
- 7 岳征文, 王百田, 王红柳, 等. 复合营养长效保肥保水剂应用及其缓释节肥效果[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(8): 56 ~ 62.  
Yue Zhengwen, Wang Baitian, Wang Hongliu, et al. Application of nutrient and super absorbent polymer compound and effect of fertilizer slow-release [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(8): 56 ~ 62. (in Chinese)
- 8 董英, 郭绍辉, 詹亚力. 聚丙烯酰胺的土壤改良效应[J]. *高分子通报*, 2004(5): 83 ~ 87.  
Dong Ying, Guo Shaohui, Zhan Yali. Polyacrylamide effects on soil amendments [J]. *Polymer Bulletin*, 2004(5): 83 ~ 87. (in Chinese)
- 9 Glasbey C A, Horgan G W, Darbyshire J F. Image analysis and three-dimensional modelling of pores in soil aggregates[J]. *European Journal of Soil Science*, 1991, 42(3): 479 ~ 486.
- 10 李海燕, 张芮, 王福霞. 保水剂对注水播种玉米土壤水分运移及水分生产效率的影响[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(3): 37 ~ 42.  
Li Haiyan, Zhang Rui, Wang Fuxia. Effects of water-retaining agent on soil water moverment and water use efficiency of maize sowed with absolved water-storing irrigation [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(3): 37 ~ 42. (in Chinese)
- 11 杨永辉, 吴普特, 武继承, 等. 复水前后冬小麦光合生理特征对保水剂用量的响应[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(7): 116 ~ 123.  
Yang Yonghui, Wu Pute, Wu Jicheng, et al. Response of photosynthetic parameters of winter wheat before and after re-watering to different rates of water-retaining agent [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(7): 116 ~ 123. (in Chinese)
- 12 汪亚峰, 李茂松, 宋吉青, 等. 保水剂对土壤体积膨胀率及土壤团聚体影响研究[J]. *土壤通报*, 2009, 40(5): 1 022 ~ 1 025.  
Wang Yafeng, Li Maosong, Song Jiqing, et al. Study on effect of absorbent on soil aggregates and ratio of soil bulks expanding [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40(5): 1 022 ~ 1 025. (in Chinese)

(上接第 91 页)

- 7 肖娟, 雷廷武, 李光永, 等. 西瓜和蜜瓜咸水滴灌的作物系数和耗水规律[J]. *水利学报*, 2004(6): 119 ~ 123.  
Xiao Juan, Lei Tingwu, Li Guangyong, et al. Crop coefficients and water use of watermelons and honeydew melons in saline water drop irrigation [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004(6): 119 ~ 123. (in Chinese)
- 8 彭世彰, 索丽生. 节水灌溉条件下作物系数和土壤水分修正系数试验研究[J]. *水利学报*, 2004(1): 17 ~ 21.  
Peng Shizhang, Suo Lisheng. Water requirement model for crop under the condition of water-saving irrigation [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004(1): 17 ~ 21. (in Chinese)
- 9 张振华, 蔡焕杰, 杨润亚, 等. 沙漠绿洲灌区膜下滴灌作物需水量及作物系数研究[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(5): 97 ~ 100.  
Zhang Zhenhua, Cai Huanjie, Yang Runya, et al. Water requirements and crop coefficients of drip-irrigated crop under mulch in Minqin County Oasis [J]. *Transactions of the CSAE*, 2004, 20(5): 97 ~ 100. (in Chinese)
- 10 齐述华, 李子忠, 龚元石. 应用农田水量平衡原理计算三种蔬菜的需水量和作物系数[J]. *中国农业大学学报*, 2002, 7(1): 71 ~ 76.  
Qi Shuhua, Li Zizhong, Gong Yuanshi. Evaluating crop water requirements and crop coefficients for three vegetables based on Field water budget [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2002, 7(1): 71 ~ 76. (in Chinese)
- 11 Kang S Z, Gu B J, Du T S, et al. Crop coefficient and ratio of transpiration to evapotranspiration of winter wheat and maize in a semi-humid region [J]. *Agricultural Water Management*, 2003, 59(3): 239 ~ 254.
- 12 Singh K B, Gajri P R, Arora V K. Modeling the effects of soil and water management practices on the water balance and performance of rice [J]. *Agricultural Water Management*, 2001, 49(2): 77 ~ 95.