

不同滴头流量及灌水定额下红枣树耗水规律

洪明¹, 朱航威², 穆哈西¹, 赵经华¹, 马英杰¹

(1. 新疆农业大学 水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 杭州市闲林水库筹建处, 浙江 杭州 310000)

摘要: 通过大田试验研究了不同滴头流量及灌水定额下红枣树的耗水规律, 结果表明: 各处理红枣树的全生育期耗水规律呈现单峰曲线变化, 峰值出现在 8 月 10 日前后, 各处理红枣树的日均最大耗水量在 4.00~5.74 mm 之间变化, 各处理红枣树花期至成熟落叶期的作物系数在 0.399~1.036 之间变化, 累积耗水量在 287.0~413.5 mm 之间变化; 采用相同滴头流量时, 红枣产量和 WUE 均随灌水定额的增大而增加, 但增加的幅度逐渐减小; 采用相同灌水定额时, 增加滴头流量能够提高红枣产量和 WUE, 但在 $\alpha = 0.05$ 水平下, 未达到显著水平。

关键词: 红枣树; 滴头流量; 灌水定额; 耗水规律

中图分类号: S275.6; S665.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2014)01-0072-06

The water consumption rule of jujube trees under different emitter flow rate and irrigation quota

Hong Ming¹, ZHU Hang-wei², MU Ha-xi¹, ZHAO Jing-hua¹, MA Ying-jie¹

(1. College of Hydraulic and Civil Engineering of Xinjiang Agricultural University, Urumqi, 830052, China;

2. XianLin Reservoir Preparatory Office in HangZhou City, HangZhou, 310000, China)

Abstract: The water consumption rule of jujube trees under different emitter flow rate and irrigation quota was studied through the field experiment. The results have showed that water consumption rule of jujube trees in whole growing period for each treatment appeared a single peak curve, the peak value appeared at 10 August before and after, with the average daily peak water consumption changed at 4.00~5.74 mm. The crop coefficient of jujube trees from flowering period to mature period for each treatment was changed in 0.399~1.036, the cumulated water consumption for each treatment was ranged from 287.0 mm to 413.5 mm. When the same emitter flow rate was adopted, the jujube yield and water use efficiency (WUE) was increased with the increasing irrigation quota, but rise extent was gradually decreased. When the emitter flow rate was increased, the jujube yield and WUE will be added under the condition adopted same irrigation quota, but at the $\alpha = 0.05$ level, can't be reached the significant level.

Keywords: jujube trees; emitter flow rate; irrigation quota; water consumption rule

红枣树是重要的经济林树种,在我国具有悠久的种植历史。由于红枣树适应性强,具有耐干旱、耐涝的特性,对土壤没有严格的要求,土壤含盐量在 0.3% 以下, pH 值在 8.5 范围内的碱性土均能正常生长^[1-2]。新疆环塔里木盆地光热资源非常丰富,气候条件适宜红枣栽培,因此红枣成为近年来该地区大力发展的特色林果之一。截止 2011 年底,环塔里木盆地红枣种植面积已达 3.16×10^5 hm^2 , 占全疆红枣总种植面积的 90.40%^[3]。红枣产业的发展带动了新技术、新设备的不断涌现,但是在品种、栽培、采收、加工等方面还有许多的问题需要解决,在红枣

树的灌溉方面表现为:一方面,灌溉管理粗放,红枣的品质上不去,商品率下降;另外一方面,由于红枣的大面积发展,使耗水量比大田作物增加了 30%,肥料用量增加了 50%,加剧了环塔里木盆地水资源的匮乏矛盾,环境污染风险增大,该地区农业可持续发展面临严峻挑战^[4-5]。近年来,在国家科技支撑计划项目的支持下,对该地区红枣耗水规律、灌溉制度、水肥调控等方面展开了研究,如蒋岑、刘国宏等对不同水分指标下限对红枣生长和产量的影响进行了研究,结果表明采用 75% 田间持水率的灌水下限可以有效提高红枣产量^[6-7]。胡安炎、田盼盼等对

收稿日期:2013-05-14

基金项目:国家科技支撑计划(2011Bad29B05);新疆自治区科技重大专项(201130103-1);新疆水利水电工程重点学科基金资助项目(XJZDXK-2002-10-05)

作者简介:洪明(1980—),男,新疆玛纳斯人,讲师,硕士,主要从事节水灌溉理论与新技术研究。E-mail: hongming1109@163.com.

该地区红枣树的蒸腾耗水规律进行了研究,结果表明晴天红枣树蒸腾速率在 $200 \text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$ 以上,该地区红枣树适宜的灌水定额为 $450 \text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ [8-9]。张计峰、姚鹏亮等[10-11]对滴灌条件下的土壤水分运移进行了研究,并用二维根系吸水的 HYDRAUS 模型对滴灌条件下枣树根区土壤水分动态进行模拟。梁智、张计峰、柴仲平等[12-14]对该地区枣树营养物质的累积特性及合理施肥进行了较多的研究。已有的对滴灌红枣耗水规律的研究多是在同一种滴头流量下开展,然而通过调查发现该地区红枣滴灌采用的滴头流量有以下几种:1.86、2.2.8、3.3.2、3.75 $\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$ 等等,灌水定额也多根据经验确定,因此研究不同滴头流量及灌水定额下红枣树的耗水规律对该地区红枣产业和节水灌溉技术的发展均具有重要的现实意义。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

大田试验于 2012 年 4—10 月在新疆阿克苏市郊区的阿克苏地区农业科技示范园内展开,距离阿克苏市约 11 km,地理坐标为北纬 $41^{\circ}16' \sim 41^{\circ}17'$,东经 $80^{\circ}20' \sim 80^{\circ}21'$,海拔 1 100 m,属于典型的暖温带大陆性气候,光照充足,无霜期较长,多年平均气温 10.7°C ,昼夜温差大, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的年有效积温为 $3\ 902.9^{\circ}\text{C}$ 左右,年日照时数 $2\ 750 \sim 3\ 078 \text{ h}$,多年平均太阳总辐射量 $546 \sim 592 \text{ kJ}\cdot\text{cm}^{-2}$,多年平均降水

量 74.4 mm ,多年平均蒸发量 $1\ 868 \text{ mm}$,全年无霜期约 212 d。试验区土壤为沙壤土, $0 \sim 12 \text{ cm}$ 平均干容重 $1.42 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,田间持水率为 34.2% (体积含水率),土壤 pH 值 7.51、总盐 $0.7 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全氮 $0.446 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全磷 $0.703 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、有机质 $9.548 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效氮 $57.23 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效磷 $4.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效钾 $179 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,地下水埋深大于 6 m,灌溉水源采用地下水。

1.2 供试材料

供试红枣树为灰枣,属于干鲜兼用类品种,2003 年栽植酸枣苗,2004 年春季嫁接,树高 3 m 左右,平均地径 $9 \sim 10 \text{ cm}$,株行距 $2 \text{ m} \times 3 \text{ m}$,树势均匀。

1.3 试验方法

红枣树采用滴灌灌溉,即在树行两侧 50 cm 处各布置一根滴灌管。试验中选择了两种滴头流量的滴灌管:(1) 滴头流量为 $2 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$,内镶迷宫式滴头,壁厚 0.6 mm(新疆泓科节水设备制造有限公司生产);(2) 滴头流量为 $3.75 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$,管上补偿式滴头,壁厚 1.2 mm(北京绿源塑料有限责任公司生产);滴灌管外径均为 16 mm,滴头间距均为 50 cm。采用定周期、变定额的方法进行灌溉试验,共设计了三种灌水定额:15、22.5、30 mm;综合考虑滴头流量及灌水定额两个因素,大田试验共设置了 4 个处理,为减少误差,每个处理均设 3 个重复,大田试验随机布置。具体的试验设置及灌溉制度见表 1。

表 1 试验处理及采用的灌溉制度

Table 1 Experimental treatment and adopted irrigation schedule

处理 Treatments	项目 Items	萌芽期 Forming stage 04 - 02— 05 - 09	花期 Flowering stage 05 - 10— 06 - 30	幼果期 Young fruit period 07 - 01— 07 - 31	果实发育期 Fruit development 08 - 01— 08 - 30	成熟期 Mature period 09 - 01— 10 - 20	休眠期 Rest period 10 - 21— 04 - 01	灌溉定额 Gross irrigation quota /mm	备注 Comments
C1	灌水定额/mm Irrigation water quota	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	—	213	
C2	灌水定额/mm Irrigation water quota	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	—	315	滴头流量 Emitter flow rate $q = 2 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$
C3	灌水定额/mm Irrigation water quota	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	—	420	
C4	灌水定额 Irrigation water quota	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	—	315	滴头流量 Emitter flow rate $q = 3.75 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$
	灌水次数 Number of irrigation water	1	4	3	3	3	—	14	

试验中基肥采用穴施(施肥穴平行于树行,在滴头正下方),其他追肥采用滴施,滴施肥量按照地面灌施肥量中氮磷钾净含量的 70% 施入,追肥次数与地面灌相同。

根据水量平衡原理计算红枣树各生育期的耗水量^[15],可以用下式表示:

$$ET = W_0 - W_t + P_0 + M + K - S \quad (1)$$

式中: ET 为时段 t 内作物的耗水量(mm); W_0 、 W_t 分别为时段初和任一时间 t 的土壤计划湿润层内的储水量(mm); P_0 为土壤计划湿润层内保存的有效水量(mm); M 为时段 t 内的灌水量(mm); K 为时段 t 内的地下水补给量(mm); S 为时段 t 内的深层渗漏量(mm)。

由于地下水位在 6 m 以下,因此不考虑地下水补给(即 $K = 0$)。已有的研究表明^[16-17]: 红枣树 90% 的根系分布在 0~80 cm 深度内,在红枣生育期内计划湿润层取 80 cm,根据埋设在地下的 HYDRAU

水分测定仪(监测间隔 15 cm,监测深度 150 cm)的观测数据显示,在试验地 80 cm 以下,土壤含水量基本没有变化,因此不考虑深层渗漏(即 $S = 0$)。

1.4 参数测定及方法

土壤含水量:沿树行及垂直树行方向,各布置两根 TRIME 管,两根 TRIME 管分别距树 0.5 m、1.0 m,采用管式 TDR 测定土壤水分,每 10 cm 深度测定一次,测定深度 80 cm。

气象数据:利用 Watchdog 自动气象站观测太阳辐射、气温、相对湿度、风速及降雨量等气象数据。

2 结果与分析

2.1 不同灌水处理下土壤水分变化

将各处理每棵树同一深度的四根 TRIMR 管测得的土壤水分数据取均值,然后将同一处理三个重复的同一深度再取均值,整理后得到各灌水处理红枣树根区垂直方向上土壤水分分布如图 1 所示。

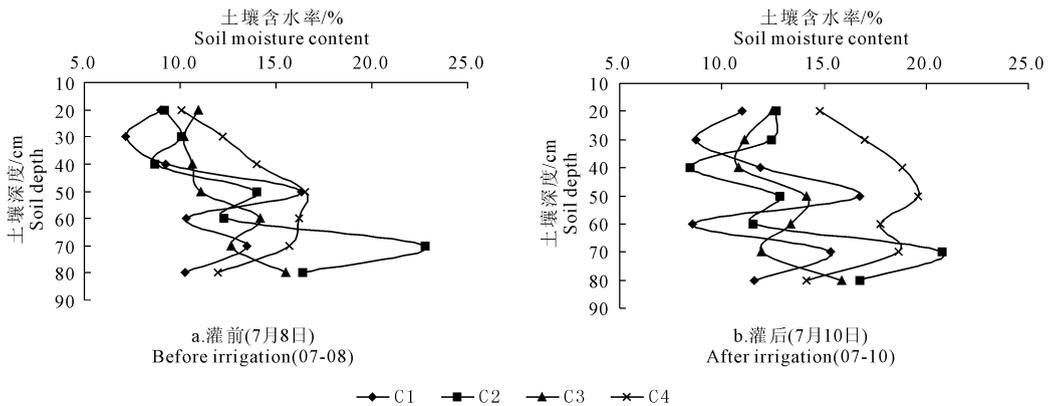


图 1 各灌水处理灌水前后垂直方向土壤水分分布

Fig.1 Soil moisture distribution in vertical direction for each irrigation treatment

从图 1 可以发现,各灌水处理 80 cm 深度的土壤含水量在灌溉前后基本没有发生改变,说明在试验条件下,各处理灌溉后,灌溉水的入渗深度均未超过 80 cm。从图中还可以发现,对于滴头流量 $2 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 的 C1、C2、C3 处理,随灌水定额的增大,灌溉水垂直入渗的影响深度也呈现逐渐增大的趋势。对于相同灌水定额不同滴头流量的 C2、C4 处理,在灌水定额均为 22.5 mm 的条件下,滴头流量 $3.75 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 的 C4 处理入渗深度明显大于滴头流量 $2 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 的 C2 处理,说明土壤质地为沙壤土时,当灌水定额相同时,增加滴头流量可以增加垂直方向的入渗深度。该结论与陈渠昌等^[18]在沙地上的滴灌入渗研究结论一致,但与赵颖娜等^[19]在陕北黄绵土中滴灌入渗结论相反,说明土壤质地对滴灌水分入

渗影响很大。

2.2 不同灌水处理下红枣树日均耗水量

根据试验数据,得到不同灌水处理下红枣树的整个生育期内的平均日耗水规律如图 2 所示。由图 2 知各灌水处理的红枣树日耗水规律呈单峰曲线变化,日均耗水量峰值出现在 8 月 10 日前后,各处理日均耗水量在 4.0~5.74 mm 之间变化。各处理全生育期的日均耗水量呈现一定的波动,结合图 3 中的降雨量和参考作物腾发量的变化容易发现该波动与试验区气象条件的变化密不可分。各灌水处理的红枣树整个生育期总的耗水规律呈现出先增大后减小的趋势。

各处理间红枣树的日均耗水规律也不尽相同, C1 处理红枣树日均耗水量在 1.0~4.0 mm 间变化,

C2 处理红枣树日均耗水量在 1.0 ~ 5.74 mm 间变化,C3 处理红枣树日均耗水量在 1.1 ~ 4.75 mm 间变化,C4 处理红枣树日均耗水量在 1.36 ~ 4.78 mm

间变化。其中 C2 处理红枣树在观测时段内日均耗水的变幅最大,超过 4 mm,其他三个处理的日均耗水量变幅均在 3.0 ~ 3.42 mm 之间变化。

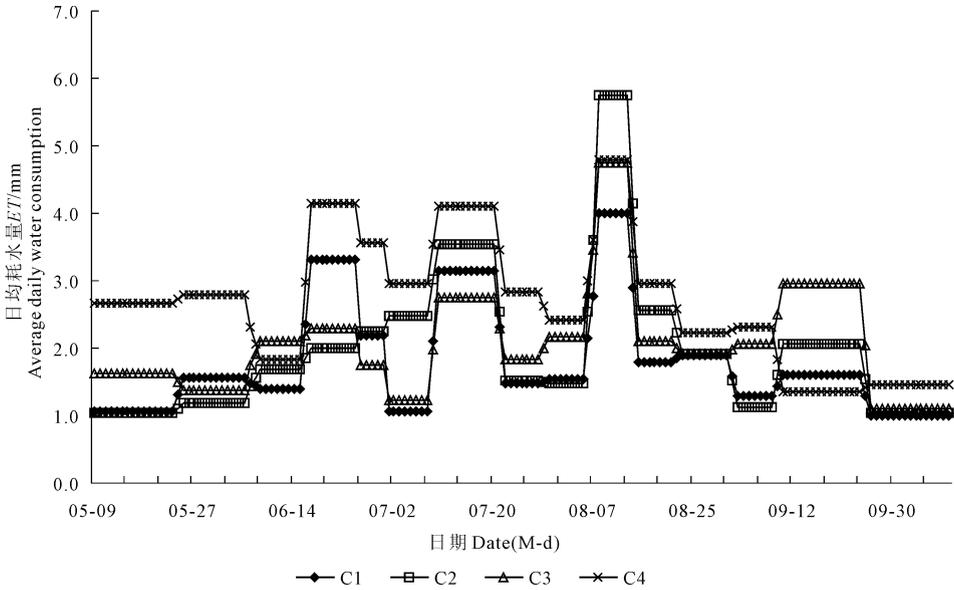


图 2 不同灌水处理下红枣树日均耗水量的变化

Fig.2 Variation of average daily water consumption of Jujube Trees for different irrigation treatment

2.3 不同灌水处理下红枣树各生育期耗水模数及作物系数

计算参考作物腾发量 ET_0 , 观测时段内 2012 年 5 月 1 日至 10 月 22 日降雨量及 ET_0 变化规律如图 3 所示,各生育期参考作物腾发量及降雨量值见表 2。

整理自动气象站的气象参数,利用 Penman 公式

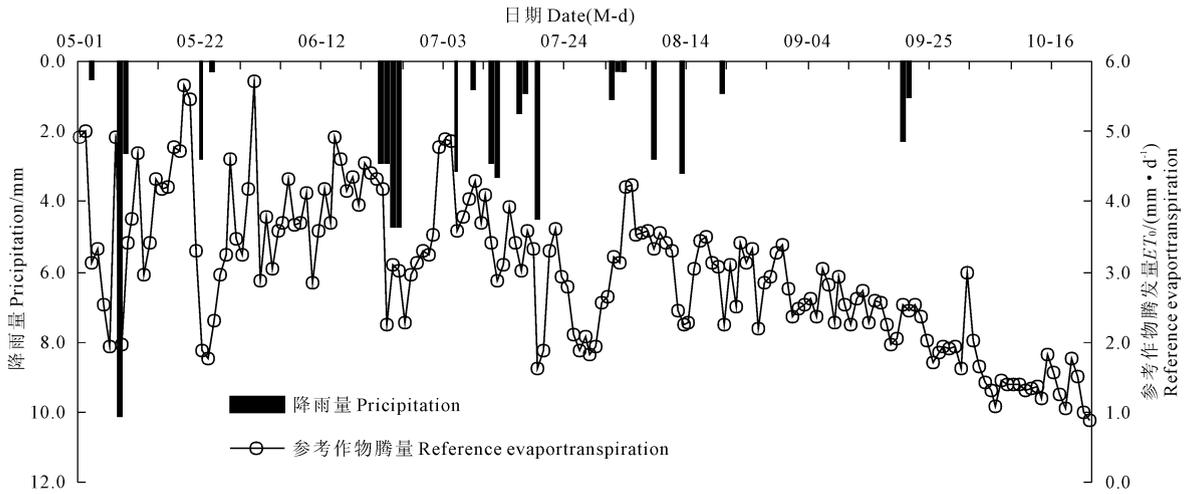


图 3 观测时段内的降雨量及 ET_0

Fig.3 Precipitation and ET_0 during observation period

根据式(1)计算各灌水周期内红枣树的蒸发蒸腾量,并按生育期平均,即得到各生育期及全生育期的累积耗水量,结合表 2 中的参考作物腾发量数据,就可以得到各灌水处理红枣树各生育期的耗水模数及作物系数(如表 3 所示)。

由表 3 可以看出,采用 $2 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ 的滴灌管灌溉的

处理 C1、C2 和 C3,当灌水定额从 15 mm 增加至 22.5 mm,红枣树的耗水量从 287.0 mm 增加至 311.6 mm,灌溉量增加了 50%,然而耗水量增加了 8.5%;当灌水定额量从 22.5 mm 增加至 30 mm,红枣树耗水量几乎没有变化。

表 2 各生育期参考作物腾发量及降雨量累积值

Table 2 Reference crop evapotranspiration and precipitation in different growth period

项目 Items	萌芽期 Forming stage 04-02— 05-09	花期 Flowering stage 05-10— 06-30	幼果期 Young fruit period 07-01— 07-31	果实发育期 Fruit development 08-01— 08-30	成熟期 Mature period 09-01— 10-20	休眠期 Rest period 10-21— 04-01	累积量 Accumulation /mm
参考作物腾发量 ET_0 /mm Reference crop evapotranspiration	—	194.4	99.42	97.24	98.82	—	489.9
降雨量 P /mm Precipitation	0	0	19.5	17.0	8.6	—	45.1

表 3 红枣树各生育期耗水模数及作物系数

Table 3 Water consumption modulus and crop coefficient of jujube trees in different growth period

处理 Treatments	项目 Items	萌芽期 Forming stage 04-02— 05-09	花期 Flowering stage 05-10— 06-30	幼果期 Young fruit period 07-01— 07-31	果实发育期 Fruit development 08-01— 08-30	成熟期 Mature period 09-01— 10-20	休眠期 Rest period 10-21— 04-01	累积量 Accumulation /mm
C1	耗水量/mm Water consumption	—	92.0	58.6	71.0	65.5	—	287.0
	耗水模数/% Water consumption modulus	—	32.1	20.4	24.7	22.8	—	
	作物系数 K_c Crop coefficient	—	0.473	0.589	0.730	0.653	—	
C2	耗水量/mm Water consumption	—	77.5	79.5	89.5	65.1	—	311.6
	耗水模数/% Water consumption modulus	—	24.9	25.5	28.7	20.9	—	
	作物系数 K_c Crop coefficient	—	0.399	0.800	0.920	0.649	—	
C3	耗水量/mm Water consumption	—	92.7	63.4	82.8	65.1	—	304.0
	耗水模数/% Water consumption modulus	—	30.5	20.8	27.2	21.4	—	
	作物系数 K_c Crop coefficient	—	0.477	0.637	0.852	0.649	—	
C4	耗水量/mm Water consumption	—	150.8	103.0	94.5	65.1	—	413.5
	耗水模数/% Water consumption modulus	—	36.5	24.9	22.9	15.8	—	
	作物系数 K_c Crop coefficient	—	0.775	1.036	0.972	0.649	—	
	ET_0 /mm Reference crop evapotranspiration	—	194.4	99.4	97.2	100.3	—	491.4

由表 3 还可以发现,对于处理 C2 和 C4,均采用 22.5 mm 灌溉量,但采用不同滴头流量的滴灌管进行灌溉(C2 采用 $2 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ 的滴头, C4 采用 $3.75 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ 的滴头),由于滴头流量之间存在差异, C4 处理的红枣树耗水量较 C2 处理增加了近 100 mm,即滴头流

量增大了 86.5%,耗水量增加了 32.7%。通过对各生育阶段耗水量的比较可以发现在果实发育期和成熟落叶期 C2、C4 处理的红枣树阶段耗水量分别为 89.5、65.1 mm 和 94.5、65.1 mm,差异并不明显。但花期和幼果期 C2、C4 处理的红枣树阶段耗水量分

别为 77.5、77.9 mm 和 150.8、103 mm, 分别相差 94.5% 和 32.2%。分析认为, 红枣树为喜光、喜温树种, 其生长发育要求较高的温度, 通常较一般果树开始生长晚^[20], 所以前期红枣树园往往覆盖度都很低, 红枣树耗水往往以棵间蒸发为主。滴头流量增大后往往会增大湿润面积^[21], 加之试验田所处的新疆阿克苏地区在 5~6 月平均风速在 1.8~2.0 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 为全年风速最大时期, 此时虽然温度不是最高, 但是晴朗的大风天气仍然造成红枣树耗水量急剧增加, 通过对试验区的参考作物腾发量 ET_0 的计算也说明这一点。随着生育期向前推进, 红枣树冠不断增大, 耗水量逐渐转向以冠层蒸腾为主, 棵间蒸发量逐渐减少, 此时滴头流量对红枣树的耗水影响作用逐渐减弱, 所以出现了两处理之间后期的红枣

树耗水量趋于相同。

各处理红枣树从花期至成熟落叶期的作物系数在 0.399~1.036 之间变化, 均呈现出先增大后减小的趋势, 除处理 C4 在幼果期的作物系数达到最大值, 其余各处理红枣树的作物系数均在果实发育期达到最大值。

2.4 不同灌水处理下红枣树的产量

2.4.1 不同灌水定额下红枣树产量及水分利用效率

待红枣成熟后, 每个处理随机选取三棵树并分别将红枣打下测产, 取平均值得到每个试验小区内单棵红枣树的产量, 进而计算单位面积上的产量, 结合耗水量就可以得到各处理水分生产效率, 三种灌水定额条件下的红枣产量及水分利用效率见表 4。

表 4 不同灌水定额下红枣树的产量及水分利用效率

Table 4 Yield and WUE of jujube trees under different irrigation water quota

处理 Treatment	灌水定额 Irrigation water quota /mm	耗水量 Water consumption /($\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$)	平均产量 Average yield /($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	WUE /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	备注 Comments
C1	15.0	2870	732.8b	0.26b	
C2	22.5	3116	1046.8a	0.34a	$q = 2 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$
C3	30.0	3040	1168.3ab	0.38ab	

注: 不同小写字母表示在 $\alpha = 0.05$ 下差异显著。下同。

Note: Different small letters show significant difference ($\alpha = 0.05$). The same as below.

由表 4 可看出, 在滴头流量 $2 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 条件下, 三种灌水定额的红枣产量在 $732.8 \sim 1168.3 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 变化, 红枣树水分利用效率 (WUE) 在 $0.26 \sim 0.38 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 变化; 且随着灌水定额的增大, 红枣树单产及水分利用效率均逐渐增大, 在灌水定额 30 mm 时, 单产达到最大 $1168.3 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 水分利用效率也到达最大值 $0.38 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。通过 $\alpha = 0.05$ 水平下的差异显著性分析表明, 三种灌水定额灌溉条件下,

红枣单产和水分利用效率均表现为 C1 与 C2 处理之间差异显著, C3 与 C1 及 C2 之间的差异不显著, 说明灌水定额从 15 mm 增加至 22.5 mm 产量及水分利用效率增加显著, 灌水定额从 22.5 mm 增加至 30 mm, 产量及水分利用效率增加并不显著。

2.4.2 不同滴头流量下红枣树产量及水分利用效率

两种滴头流量条件下红枣产量及水分利用效率见表 5。

表 5 不同滴头流量下红枣树的产量及水分利用效率

Table 5 Yield and WUE of jujube trees under different emitter flow rate

处理 Treatment	滴头流量 Emitter flow rate /($\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$)	耗水量 Water consumption /($\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$)	平均产量 Average yield /($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	WUE /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	备注 Comments
C2	2.00	3116	1046.8a	0.34a	灌溉量为 22.5 mm
C4	3.75	4135	1428.8a	0.35a	Irrigation amount is 22.5 mm

从表 5 可看出, 当灌水定额均为 22.5 mm 时, 两种滴头流量下红枣产量别为 $1046.8 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $1428.8 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, WUE 为 $0.34 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $0.35 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 其中滴头流量 $3.75 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 处理的红枣产量及水分利用效率较滴头流量 $2 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 处理的高, 但在 $\alpha = 0.05$ 的水平下差异均未达到显著水平。

3 结论与讨论

1) 在沙壤土条件下, 试验中所用 $2 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 滴头流量的滴灌管, 入渗深度随灌水定额的增大而增大, 相同灌水定额时, 增大滴头流量能够增加入渗深度。

(下转第 109 页)

- transport in the heterogeneous media with sparse grid collocation method[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2009, 21(6):779-789.
- [90] 许小微, 吴晓东, 曹晓磊. 多孔介质中溶质运移的尺度问题[J]. *科技资讯*, 2011, 16:41-43.
- [91] 高川博, 姜 斌, 黄国强, 等. 土壤污染物溶质运移模型研究进展[J]. *环境保护科学*, 2006, 32(5):44-46.
- [92] 刘玉振. 农业生态系统能值分析与模式构建[D]. 开封: 河南大学, 2007.
- [93] 王建林, 胡 单. 农业生态系统能量最优增长单部门模型的建立与影响参数分析[J]. *系统工程理论方法应用*, 2003, 12(4):354-358.
- [94] 王迎春. 华北平原典型农田生态系统氮磷平衡动态模拟研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2009.
- [95] 高如泰. 黄淮海平原农田土壤水氮行为模拟与管理分析[D]. 北京: 北京农业大学, 2005.
- [96] 马玉芳. 基于 DNDC 模型的不同耕作措施下农田土壤碳循环模拟研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2011.
- [97] 高鲁鹏, 梁文举, 姜 勇, 等. 利用 CENTURY 模型研究东北黑土有机碳的动态变化 I. 自然状态下土壤有机碳的积累[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(5):772-776.
- [98] 高海鹰, 黄丽江, 张 奇, 等. 不同降雨强度对农田土壤氮素淋失的影响及 LEACHM 模型验证[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(4):1346-1352.
- [99] 米湘成, 马克平, 邹应斌. 人工神经网络模型及其在农业和生态学研究中的应用[J]. *植物生态学报*, 2005, 29(5):863-870.
- [100] Abrahamsen R, Hansen S. Daisy: an open soil-crop-atmosphere system model[J]. *Environmental Modelling and Software*, 2000, 15(3):313-330.
- [101] 孙 芳, 林而达, 李剑萍, 等. 基于 DSSAT 模型的宁夏马铃薯生产的适应对策[J]. *中国农业气象*, 2008, 29(2):127-129.
- [102] 沈 颖. APSIM 模型的发展与应用[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(8):1027-1032.
- [103] 朱李英, 孙西欢, 马娟娟. 植物根系吸水模型的研究进展[J]. *科技情报开发与经济*, 2006, 16(5):150-152.

(上接第 77 页)

2) 各灌水处理的红枣树全生育期耗水规律呈现单峰曲线变化, 峰值出现在 8 月 10 日前后, 各处理的日均耗水量在 4.0~5.74 mm 之间变化, 各处理红枣树花期至成熟落叶期的作物系数在 0.399~1.036 之间变化, 累积耗水量在 287.0~413.5 mm 之间变化。

3) 采用滴头流量 $2 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ 灌溉的红枣树, 红枣单产和 WUE 均随灌水定额的增大而增大, 但增加幅度呈现减小趋势, 该研究结论与前人提出的报酬递减规律一致, 采用相同的灌水定额时, 增加滴头流量能够提高红枣产量和 WUE, 但在 $a = 0.05$ 水平下, 未达到显著水平。

在大田试验过程中, 试验地块的枣园出现了严重的红蜘蛛危害, 没有得到较好地控制, 致使红枣产量较往年低。由于研究时间较短, 不同滴头流量及灌水定额条件下的红枣树耗水规律还需要进一步研究。

参 考 文 献:

- [1] 祁业凤. 中国枣核心期刊研究文献计量分析[J]. *农业图书情报学报*, 2007, (10):160-162.
- [2] 曲泽洲, 王永惠. 中国果树志枣卷[M]. 北京: 中国林业出版社, 1993.
- [3] 洪 明, 赵经华, 靳开颜, 等. 环塔里木盆地红枣灌溉现状调查研究[J]. *节水灌溉*, 2013(2):34-38.
- [4] 史彦江, 宋锋惠. 红枣在新疆的发展前景及对策[J]. *新疆农业科学*, 2005, 42(6):418-422.
- [5] 漆联全. 新疆红枣产业的现状、要求及其发展趋势[J]. *新疆农业科学*, 2010, 47(S2):8-12.
- [6] 蒋 岑, 刘国宏, 谢香文. 干旱区成龄红枣微灌技术研究[J]. *新疆农业科学*, 2009, 42(2):332-337.
- [7] 刘国宏, 谢香文, 蒋 岑. 干旱区不同水分指标下限对成龄红枣生长和产量的影响[J]. *新疆农业科学*, 2011, 48(1):94-98.
- [8] 胡安焱, 魏光辉, 董新光. 干旱区幼龄红枣滴灌耗水规律研究[J]. *人民黄河*, 2011, 4(2):38-42.
- [9] 田盼盼, 董新光, 刘 峰. 干旱区枣树蒸腾规律及其与气象要素的关系[J]. *水资源与水工程学报*, 2012, 23(2):86-89.
- [10] 张计峰, 朱 敏, 梁 智. 滴灌对枣园土壤水分运移和红枣叶片的影响[J]. *新疆农业科学*, 2010, 47(11):2283-2287.
- [11] 姚鹏亮, 董新光, 郭开政. 滴灌条件下干旱区枣树根区的土壤水分动态模拟[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(10):149-156.
- [12] 梁 智, 张计峰. 两种枣树矿质营养元素累积特性研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(3):688-692.
- [13] 张计峰, 梁 智, 邹耀湘, 等. 施肥对红枣叶片 SPAD 和比叶重的影响研究[J]. *新疆农业科学*, 2011, 48(9):1606-1610.
- [14] 柴仲平, 王雪梅, 孙 霞, 等. 不同氮磷钾配比滴灌对灰枣产量与品质的影响[J]. *果树学报*, 2011, 28(2):229-233.
- [15] 中华人民共和国水利部. L13-1990. 灌溉试验规范[S]. 北京: 水利水电出版社, 1990:1-16.
- [16] W·伯姆. 根系研究方法[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [17] 田盼盼. 干旱区滴灌枣树根系分布特性及吸水模型研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2012.
- [18] 陈渠昌, 吴忠渤, 余国英. 滴灌条件下沙地土壤水分分布与运移规律[J]. *灌溉排水学报*, 1999, 18(1):28-31.
- [19] 赵颖娜. 陕北黄土丘陵枣林地滴灌湿润体研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
- [20] 鲁周民. 红枣优质栽培与贮藏加工技术问答[M]. 杨凌: 西北农林科技大学出版社, 2010.
- [21] 朱德兰, 李昭军, 王 健. 滴灌条件下土壤水分分布特性研究[J]. *水土保持研究*, 2003, 19(3):81-84.