

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.05.033

基于土壤水分下限的灵武长枣微孔渗灌灌溉制度研究

焦炳忠¹ 孙兆军^{1,2} El-SAWY S M³ 韩磊^{2,4} 何俊^{2,4} 曾玉霞¹

(1. 宁夏大学土木与水利工程学院, 银川 750021; 2. 宁夏大学环境工程研究院, 银川 750021;

3. 国家研究中心农业生物部蔬菜研究所, 开罗 11435; 4. 教育部中阿旱区特色资源与环境治理国际合作联合实验室, 银川 750021)

摘要: 为探明土壤水分下限对灵武长枣微孔渗灌的影响及确定各生育时期的最佳灌水量, 以6年生灵武长枣为研究对象, 采用GC-003物联网控制和土壤水分传感器监测系统, 对枣树4个生育时期分别设置不同的土壤水分下限, 共6个处理, 研究枣树光合特性、形态指标的变化, 产量、水分利用效率与耗水规律、灌水量之间的关系。结果表明, 开花座果期和果实膨大期, 土壤水分下限的提高有利于枣树光合作用; 萌芽展叶期降低土壤水分下限和开花座果期提高土壤水分下限有利于提高枣树形态指标; T6处理(土壤水分下限萌芽展叶期为65% θ_f (θ_f 为田间持水率)、开花座果期为75% θ_f 、果实膨大期为75% θ_f 、果实成熟期为65% θ_f)在各生育时期土壤水分下限较高, 与其他处理的光合特性和形态指标均有显著性差异($P < 0.05$)。随着土壤水分下限的增加, 枣树耗水量、产量随之增加; T6处理耗水量、产量最高, T3处理(土壤水分下限萌芽展叶期为55% θ_f 、开花座果期为75% θ_f 、果实膨大期为65% θ_f 、果实成熟期为65% θ_f)的水分利用效率最佳; T3与T6处理的产量无显著差异($P > 0.05$), T6处理产量仅比T3处理高5.68% (2018年)、0.90% (2019年), T3处理较T6处理灌水量分别降低了22.57% (2018年)、13.59% (2019年)。因此, 枣树各生育时期最适宜的土壤水分下限分别为: 萌芽展叶期55% θ_f 、开花座果期75% θ_f 、果实膨大期65% θ_f 、果实成熟期65% θ_f , 上限均为90% θ_f 。本研究结果可为微孔渗灌种植宁夏灵武长枣和水分管理提供科学依据。

关键词: 灵武长枣; 土壤水分下限; 微孔渗灌; 灌溉制度

中图分类号: S275.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)05-0305-10

OSID:



Irrigation Schedule of Microporous Infiltration Irrigation for Lingwu Jujube Based on Lower Limit of Soil Moisture

JIAO Bingzhong¹ SUN Zhaojun^{1,2} El-SAWY S M³ HAN Lei^{2,4} HE Jun^{2,4} ZENG Yuxia¹

(1. College of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

2. Institute of Environmental Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

3. Vegetable Research Department, Agricultural and Biological Division, National Research Centre, Cairo 11435, Egypt

4. China-Arab Joint International Research Laboratory for Featured Resources and Environmental Governance in Arid Region, Ministry of Education, Yinchuan 750021, China)

Abstract: In order to find out the effect of lower limit of soil moisture control on microporous infiltration irrigation of Lingwuchangzao (*Ziziphus jujuba* Mill. cv. 'Lingwuchangzao') and the optimal irrigation amount in each growth period, the six-year-old Lingwuchangzao was used as the research object. Adopting the GC-003 Internet of Things control system and soil moisture sensor monitoring, six different treatments for different lower limits of soil moisture were set for the four growth periods of jujube trees. The relationship between the change of photosynthetic characteristics, and morphological indicators, water use efficiency, yield, water consumption law and irrigation water amount of jujube trees was studied. The results showed that the increase of lower soil water limit during flowering and fruiting bearing periods and during fruit expansion was beneficial to the photosynthesis of jujube trees; the decrease of

收稿日期: 2020-01-09 修回日期: 2020-02-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(31760236)、宁夏回族自治区重点研发计划项目(2018BFG02016)、宁夏重点研发计划(农业科技园区)项目和发展中国家科技援助项目(KY201904010)

作者简介: 焦炳忠(1986—),男,博士生,主要从事节水灌溉理论与技术研究, E-mail: 272275314@qq.com

通信作者: 孙兆军(1963—),男,研究员,博士生导师,主要从事盐碱地改良和节水灌溉技术研究, E-mail: sunzhaojunyx@126.com

lower water limit during sprouting and leaf spreading period and the increase of lower water limit during flowering and fruit bearing period were favorable for the growth of morphological indicators of jujube trees. T6 treatment, that was, the lower limits of soil moisture during sprouting and leaf spreading period was $65\% \theta_f$ (θ_f was field water holding capacity), and during flowering and fruiting bearing period was $75\% \theta_f$, during fruit expansion was $75\% \theta_f$, and during fruit maturation was $65\% \theta_f$, the lower limit was higher in each growth period, which had significantly different photosynthetic characteristics and morphological indicators from other treatments ($P < 0.05$). With the increase of the lower water limit, the water consumption and yield of jujube trees were increased. The water consumption and yield of T6 treatment were the highest, but the water use efficiency of T3 treatment (the lower limits of soil moisture during sprouting and leaf spreading period was $55\% \theta_f$, during flowering and fruiting period was $75\% \theta_f$, during fruit expansion was $65\% \theta_f$, and during fruit maturation was $65\% \theta_f$) was the best, and there was no significant difference with the yield of T6 treatment ($P > 0.05$). The yield of T6 treatment was only 5.68% (2018) and 0.90% (2019) higher than that of T3 treatment. Compared with T6 treatment, T3 treatment decreased the irrigation water volume by 22.57% (2018) and 13.59% (2019). The most suitable lower limit of irrigation water during the four growth periods of jujube were: during sprouting and leaf spreading period was $55\% \theta_f$, during flowering and fruiting bearing period was $75\% \theta_f$, during fruit expansion was $65\% \theta_f$, and during fruit maturation was $65\% \theta_f$, and all the upper limit were $90\% \theta_f$. The study results can provide scientific basis for planting Ningxia Lingwuchangzao with microporous infiltration irrigation and water management.

Key words: Lingwu jujube; lower limit of soil moisture; microporous infiltration irrigation; irrigation schedule

0 引言

灵武长枣 (*Ziziphus jujuba* Mill. cv. 'Lingwuchangzao') 为鼠李科枣属落叶乔木, 是宁夏优势特色作物之一。近年来, 随着种植规模的扩大, 水分供需矛盾日渐突出, 特别是土壤次生盐渍化加剧, 造成枣树产量和品质的下降。地下微孔渗灌是高效节水的地下灌溉方法之一, 可有效减少蒸发, 且水分直达作物根系, 可有效提高水资源利用率^[1]。目前, 关于地下灌溉技术的研究主要集中在灌水器适宜布置方式^[2-3]、湿润体分布范围^[4], 以及灌水定额的组合^[5]对作物的生长、产量、水分利用效率等影响方面。关于微孔渗灌在枣树的应用方面, 韩懂懂等^[6]采用微孔渗灌, 并与滴灌、管灌进行对比研究, 发现微孔渗灌更有利于提高产量和水分利用效率。但对于微孔渗灌环形布设与土壤水分下限控制的灌溉制度却鲜有报道。

在作物各生育时期, 设置适宜的土壤水分下限进行精准灌溉, 是当前节水灌溉领域的热点问题^[7-9]。如罗双龙等^[10]通过两种耕作方式设置4个水分下限, 确定垄作小麦适宜的土壤水分下限为 $70\% \theta_f$ (θ_f 为田间持水率); 徐利岗等^[7]以枸杞4个控水关键生育期进行水分下限试验研究, 确定了滴灌条件下枸杞最佳土壤水分下限: 春梢生长期为 $50\% \theta_f$ 、始花期和盛花期为 $65\% \theta_f$ 、盛果期为 $65\% \theta_f$ 、秋果期为 $55\% \theta_f$; 也有学者通过试验确定, 玉米在生长关键时期土壤水分下限为 $75\% \theta_f$ ^[11]。不同

生育时期水分下限对作物各形态指标和产量的影响不同, 合理控制灌水下限是实现精准灌溉的有效手段。有研究表明, 在作物营养生长期, 设置较低的土壤水分下限可提高作物抗旱能力。谢美玲^[8]采用滴灌条件下水分下限控制的方式对新疆红枣灌溉制度进行了研究, 确定最适宜的灌水定额为 $450 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 土壤水分下限为 $55.3\% \theta_f$ 。付优等^[12]采用桶栽方式对枣树坐果初期进行控水试验, 得出土壤水分最大亏缺为 $48.89\% \theta_f$, 达到最高水分利用效率和光合特性时, 土壤水分下限在 $53.36\% \theta_f \sim 60.34\% \theta_f$ 之间, 但未对不同生育时期土壤水分下限影响的灌溉制度进行研究。本文以6年生灵武长枣为研究对象, 采用GC-003物联网控制系统和微孔渗灌环形铺设技术, 在枣树4个生育时期设置不同的土壤水分控制下限, 研究枣树光合特性、形态指标、产量及水分利用效率的变化规律, 确定最适宜的土壤水分下限阈值和枣树微孔渗灌灌溉制度, 为微孔渗灌种植枣树和精准灌溉提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于2018年4—10月和2019年4—10月在宁夏回族自治区银川市永宁县胜利乡和顺新村试验地 ($36^{\circ}51'55.37''\text{N}$, $105^{\circ}59'22.87''\text{E}$) 开展, 该地区蒸发强烈, 气候干燥, 年平均降水量仅为200 mm, 距离样地5 m空旷处安装自动气象站 (AR5型, Avalon Ltd., 美国), 长期监测研究区降

雨量、温度、风速、太阳辐射等气象资料, 试验地 2 年枣树全生育期内气候变化见图 1。采用激光粒度仪 (Mastersizer 3000 型, Malvern Ltd., 英国) 测定土样的颗粒组成, 粒径分为 3 级 (0 ~ 0.002 mm (砂粒)、0.002 ~ 0.02 mm (粉粒)、0.02 ~ 2 mm (黏粒)), 各层土壤颗粒组成见表 1, 土壤质地为砂土

(国际制), 入渗能力较强。处理前 0 ~ 100 cm 土壤基本理化性状为: 土壤容重均值为 1.54 g/cm³, 田间持水率为 17.33% (质量含水率), 土壤有机质质量比为 12.91 mg/kg, 全盐质量比为 0.91 g/kg, 全氮质量比为 0.42 g/kg, 全磷质量比为 0.61 g/kg, 全钾质量比为 14.07 g/kg。

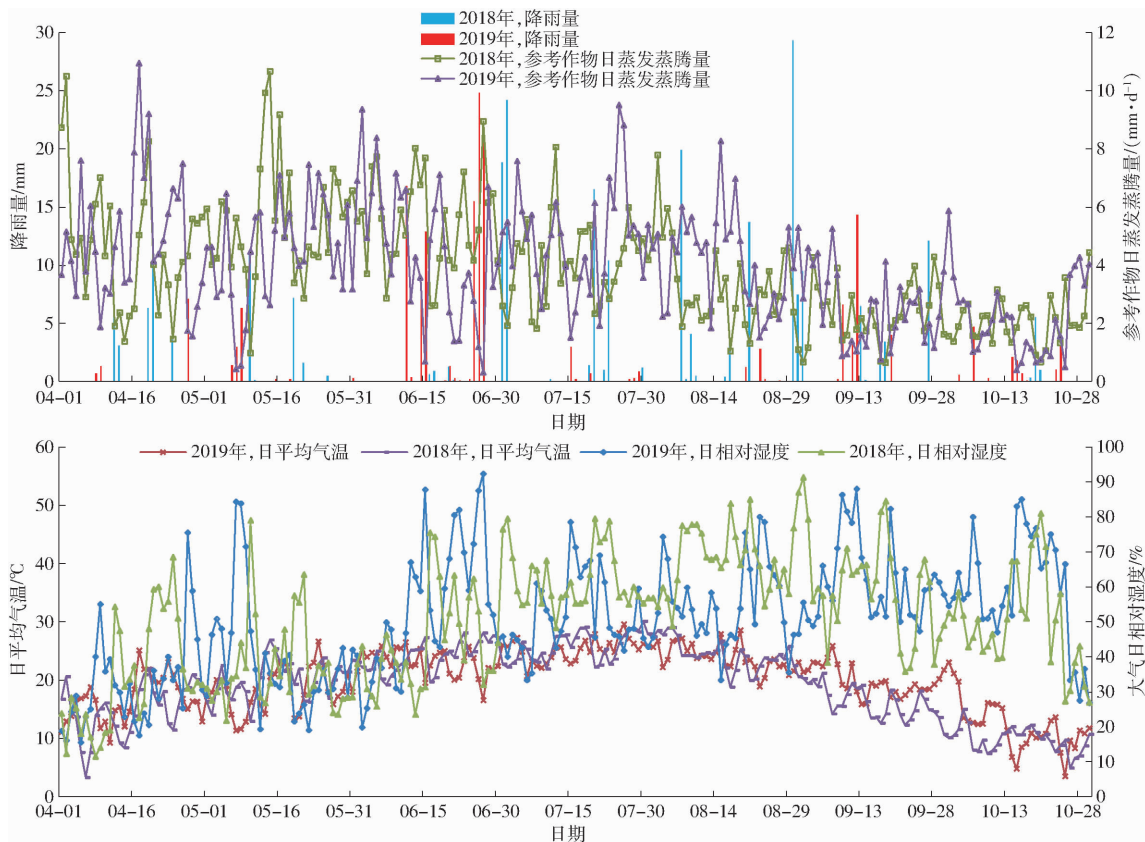


图 1 试验地枣树全生育期气候变化情况

Fig. 1 Climate changes during whole growing periods of jujube trees in experimental site

表 1 试验地各层土壤颗粒组成

Tab. 1 Soil particle composition of each layer in test site

深度/cm	体积分数/%		
	砂粒	粉粒	黏粒
0 ~ 10	91.40	8.45	0.15
10 ~ 20	89.29	8.48	2.23
20 ~ 30	87.71	8.64	3.65
30 ~ 40	89.13	7.59	3.28
40 ~ 50	87.78	9.22	3.00

试验地供试作物为 6 年生灵武长枣, 于 2012 年移栽定植幼苗 (育苗 2 年), 种植时下方铺设农家肥和秸秆, 采用沟灌, 2015 年改为滴灌。行株距为 300 cm × 400 cm, 胸径 5.20 ~ 6.30 cm; 平均树高为 280 ~ 330 cm; 平均冠幅为 170 cm (南北) × 180 cm (东西)。试验前, 通过对枣树根系分布范围进行采挖观测, 试验区枣树主根根系分布 (距树干) 范围在 0 ~ 60 cm, 水平范围在 0 ~ 100 cm。试验地地下水埋深在 20 m 以下。

1.2 试验设计

1.2.1 水分传感器下限设定

根据当地枣树每年灌溉量、实际生产经验和前人对枣树各生育时期的土壤水分下限的研究^[13-14]以及各生育时期对水分敏感程度 (由大到小依次为开花座果期、果实膨大期、萌芽展叶期、果实成熟期^[15]), 本试验分别在萌芽展叶期、果实成熟期设置 2 个灌溉梯度下限 55% θ_f 、65% θ_f 和 1 个灌溉梯度 65% θ_f ; 开花座果期、果实膨大期设置 2 个灌溉梯度下限 65% θ_f 、75% θ_f , 共计 6 个处理, 所有处理上限均为 90% θ_f , 即对应的水分传感器设置上限值为 24.00% (体积含水率), 每个处理 3 次重复。换算后设置为土壤水分传感器下限值 (体积含水率), 换算公式为

$$\theta = \rho_1 \omega / \rho_2 \quad (1)$$

式中 θ ——体积含水率, %

ρ_1 ——土壤干容重, g/cm³

ρ_2 ——水容重,取 1.0 g/cm^3

ω ——质量含水率, %

不同处理各生育时期土壤水分传感器对应的值如表 2 所示。

表 2 试验设计

Tab. 2 Experimental design

处理	设计田间土壤水分控制下限值(占田间持水率的百分率)				土壤水分传感器设置下限值(体积含水率)/%			
	萌芽展叶期	开花座果期	果实膨大期	果实成熟期	萌芽展叶期	开花座果期	果实膨大期	果实成熟期
T1	55% θ_f	65% θ_f	65% θ_f	65% θ_f	14.70	17.35	17.35	17.35
T2	55% θ_f	65% θ_f	75% θ_f	65% θ_f	14.70	17.35	20.00	17.35
T3	55% θ_f	75% θ_f	65% θ_f	65% θ_f	14.70	20.00	17.35	17.35
T4	55% θ_f	75% θ_f	75% θ_f	65% θ_f	14.70	20.00	20.00	17.35
T5	65% θ_f	65% θ_f	65% θ_f	65% θ_f	17.35	17.35	17.35	17.35
T6	65% θ_f	75% θ_f	75% θ_f	65% θ_f	17.35	20.00	20.00	17.35

1.2.2 田间试验布置

采用本研究团队改进加工生产的微孔渗灌管^[16],出水量为 $300 \sim 400 \text{ mL}/(\text{m} \cdot \text{min})$,微孔渗灌水器环形水平铺设,以树干为圆心,铺设半径 50 cm ,埋设深度 20 cm ,如图 2 所示;利用风光互补发电提水技术为试验提供灌溉用水,各支管道压力维持在 0.2 MPa ,水源采用地下水,地下水位 16 m ,主管道 $\text{PE}\phi 63$,各支管 $\text{PE}\phi 32$,用 $\text{PE}\phi 20$ 旁通阀连接微孔渗灌水器,每个处理枣树单独用一条支管和一个旁通阀控制,便于试验过程的操作。

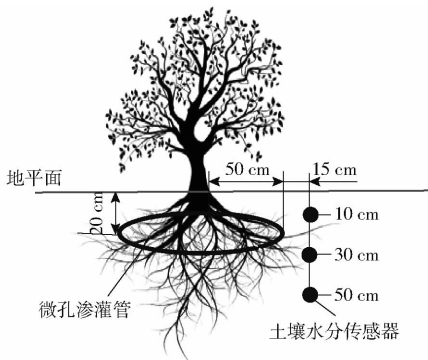


图 2 田间试验布置示意图

Fig. 2 Field test layout sketch

为准确控制土壤水分上下限、灌溉时间和水量,采用上海艾美克有限公司 GC-003 控制系统以及土壤水分传感器、流量计、压力计进行监测,用手机 APP 远程操作和监控,灌水时每 5 min 刷新并记录灌水时间、灌水量及土壤水分变化情况,停止灌水时每 30 min 刷新并记录数据,物联网控制系统流程如图 3 所示。根据试验地枣树根系的分布,每个处理布设 3 个传感器,埋深分别为 10 、 30 、 50 cm (土壤含水率取均值),如图 2 所示。

1.3 观测项目

1.3.1 光合特性

在开花座果期和果实膨大期有效降雨和灌水后 $1 \sim 3 \text{ d}$,选择天气晴朗的一天 ($08:00 \sim 18:00$) 每隔

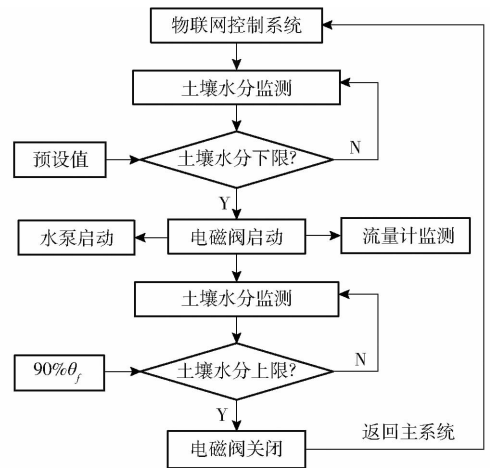


图 3 微孔渗灌智能灌溉控制系统流程图

Fig. 3 Flow chart of intelligent irrigation control system for microporous infiltration irrigation

2 h 采用便携式光合测定仪 (Li-6400 型, Lincoln, 美国) 测定各处理叶片光合指标: 净光合速率 P_n ($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)、蒸腾速率 T_r ($\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)、气孔导度 G_s ($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)、胞间 CO_2 浓度 C_i ($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$); 采用便携式 SPAD-502 型叶绿素仪测定叶片叶绿素相对含量 (SPAD)。每个处理选取东、西、南、北 4 个枝条,并在每个枝条上选取相应位置的叶片测定。测定前对叶片做好标记,下同。

1.3.2 土壤含水率

采用 Trime-IPH 管式 (200 cm) TDR 土壤水分测量系统 (IMKO, Ettlingen, 德国),于 2018—2019 年枣树生育期 4—10 月监测 $0 \sim 200 \text{ cm}$ 土层土壤含水率,每隔 20 cm 测定一次,测定时间为灌水前后和降雨后,主要用于计算枣树耗水量。

1.3.3 枣树耗水量

利用水量平衡法计算枣树耗水量,计算公式为

$$ET = R + I + K - D - F + \Delta W \quad (2)$$

式中 ET ——作物耗水量, mm

R ——土壤计划湿润层内的有效降雨量, mm

I ——全生育期内实际灌水量, mm

K ——时间段 t 内的地下水补给量, mm

D ——深层渗漏量, mm

F ——径流量, mm

ΔW ——土壤计划湿润层内阶段初与阶段末土壤贮水量的变化量, mm

因试验区地下水位在 20 m 以下, 每次灌水量和单次降雨量均较少, 并且土壤质地 90% 以上为砂质土壤, 实测生育期内 1 ~ 1.5 m 土层土壤含水率变化不大, 计算公式中 K 、 F 、 D 均可忽略不计。式(2)可简化为

$$ET = R + I + \Delta W \quad (3)$$

1.3.4 产量及产量构成因素

从萌芽展叶期开始到果实成熟期结束, 在每个小区选取固定枣树, 分别在果树树冠东、西、南、北 4 个方向选一枝当年新生枝条, 用卷尺测定新梢长度, 用游标卡尺测量新梢直径; 于开花座果期测量枣吊的开花数 N_1 , 采收时统计标记枣吊的果实数量 N_2 , 座果率计算式为 $N_2/N_1 \times 100\%$; 在果实成熟期, 分别在树冠东、西、南、北及内部各位置随机取样, 测定

单果质量, 计算产量。

1.3.5 水分利用效率

水分利用效率的计算公式为

$$WUE = Y/ET \quad (4)$$

式中 WUE ——水分利用效率, kg/m^3

Y ——产量, kg/hm^2

1.4 数据处理方法

采用 Excel 2010 进行数据处理和制图; 方差分析采用 SPSS 22.0 统计分析(LSD 法, 显著性水平设定为 $P=0.01$)。

2 结果与分析

2.1 不同土壤水分下限对枣树光合特性的影响

不同土壤水分下限控制的灌水量下枣树开花座果期和果实膨大期的光合作用特性如表 3 所示, 可以看出, 各处理 2 年的果实膨大期内光合特性比开花座果期内高, 各处理间 P_n 、 T_r 、 G_s 、 C_i 、SPAD 都存在显著性差异 ($P < 0.05$)。2018 年开花座果期内, T6 处理的 P_n 、 T_r 、 G_s 、 C_i 、SPAD 最高,

表 3 不同土壤水分下限下枣树的光合特性

Tab. 3 Photosynthetic characteristics of jujube trees under different soil moisture limits

年份	处理	开花座果期					果实膨大期				
		$P_n/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	$T_r/(\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	$G_s/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	$C_i/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	SPAD	$P_n/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	$T_r/(\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	$G_s/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	$C_i/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	SPAD
2018	T1	(5.18 ± 0.14) ^d	(2.60 ± 0.14) ^e	(0.21 ± 0.01) ^d	(362.16 ± 13.23) ^d	(34.22 ± 0.05) ^e	(7.97 ± 0.10) ^d	(2.33 ± 0.02) ^f	(0.25 ± 0.01) ^e	(396.08 ± 6.31) ^e	(40.62 ± 0.09) ^e
	T2	(7.40 ± 0.28) ^b	(2.54 ± 0.04) ^e	(0.35 ± 0.02) ^b	(390.61 ± 9.27) ^c	(42.81 ± 0.11) ^d	(8.78 ± 0.07) ^b	(3.49 ± 0.07) ^c	(0.34 ± 0.02) ^b	(415.01 ± 8.37) ^b	(48.54 ± 0.08) ^d
	T3	(7.66 ± 0.09) ^b	(3.10 ± 0.08) ^c	(0.26 ± 0.05) ^{cd}	(403.65 ± 15.85) ^{bc}	(51.52 ± 0.09) ^b	(8.36 ± 0.14) ^c	(3.20 ± 0.05) ^d	(0.33 ± 0.03) ^b	(403.07 ± 11.84) ^{bc}	(56.57 ± 0.05) ^b
	T4	(8.03 ± 0.11) ^a	(3.27 ± 0.10) ^b	(0.38 ± 0.03) ^{ab}	(419.74 ± 7.78) ^{ab}	(50.35 ± 0.05) ^b	(8.99 ± 0.09) ^a	(4.93 ± 0.07) ^b	(0.41 ± 0.01) ^a	(411.98 ± 3.81) ^b	(52.72 ± 0.03) ^c
	T5	(6.18 ± 0.16) ^c	(2.93 ± 0.04) ^d	(0.27 ± 0.02) ^c	(393.40 ± 7.92) ^c	(45.86 ± 0.04) ^c	(8.10 ± 0.08) ^d	(2.84 ± 0.09) ^c	(0.22 ± 0.01) ^c	(363.08 ± 3.02) ^d	(48.94 ± 0.11) ^d
	T6	(8.14 ± 0.12) ^a	(3.76 ± 0.08) ^a	(0.41 ± 0.02) ^a	(434.29 ± 7.15) ^a	(53.89 ± 0.08) ^a	(9.07 ± 0.15) ^a	(5.26 ± 0.08) ^a	(0.39 ± 0.04) ^a	(436.04 ± 5.85) ^a	(60.07 ± 0.09) ^a
2019	T1	(6.04 ± 0.05) ^e	(2.96 ± 0.06) ^d	(0.19 ± 0.01) ^e	(384.34 ± 5.66) ^c	(33.87 ± 0.02) ^e	(6.98 ± 0.13) ^d	(2.81 ± 0.11) ^e	(0.28 ± 0.04) ^d	(385.86 ± 10.20) ^c	(39.01 ± 0.01) ^e
	T2	(7.37 ± 0.12) ^c	(3.34 ± 0.06) ^c	(0.26 ± 0.01) ^d	(394.13 ± 4.11) ^c	(43.70 ± 0.05) ^d	(7.94 ± 0.07) ^b	(3.33 ± 0.03) ^c	(0.38 ± 0.03) ^c	(414.14 ± 5.01) ^b	(47.88 ± 0.09) ^d
	T3	(8.01 ± 0.11) ^b	(3.34 ± 0.03) ^c	(0.34 ± 0.02) ^c	(408.37 ± 9.24) ^b	(51.88 ± 0.14) ^b	(7.90 ± 0.09) ^b	(3.32 ± 0.05) ^c	(0.36 ± 0.01) ^c	(409.74 ± 8.72) ^b	(56.14 ± 0.02) ^b
	T4	(8.20 ± 0.15) ^b	(3.99 ± 0.14) ^{ab}	(0.41 ± 0.03) ^b	(455.77 ± 8.24) ^a	(51.02 ± 0.03) ^b	(8.84 ± 0.17) ^a	(4.23 ± 0.07) ^b	(0.49 ± 0.02) ^{ab}	(411.35 ± 2.40) ^b	(53.44 ± 0.08) ^c
	T5	(6.35 ± 0.13) ^d	(3.94 ± 0.08) ^b	(0.35 ± 0.01) ^c	(412.62 ± 8.12) ^b	(46.34 ± 0.05) ^c	(7.44 ± 0.15) ^c	(3.00 ± 0.10) ^d	(0.46 ± 0.02) ^b	(412.98 ± 6.03) ^b	(50.23 ± 0.02) ^d
	T6	(8.42 ± 0.08) ^a	(4.14 ± 0.08) ^a	(0.46 ± 0.02) ^a	(456.70 ± 9.96) ^a	(53.81 ± 0.18) ^a	(9.03 ± 0.08) ^a	(4.94 ± 0.09) ^a	(0.52 ± 0.01) ^a	(430.70 ± 6.53) ^a	(61.45 ± 0.02) ^a

注: 同列不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

分别为 $8.14 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $3.76 \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $0.41 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $434.29 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 53.89 ，T1 处理的 P_n 、 G_s 、 C_i 最低，分别为 5.18 、 0.21 、 $362.16 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ，T2 处理 T_r 最低，为 $2.54 \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ，水分下限设置高的 T6、T4、T3 处理的 P_n 、 T_r 、 G_s 、 C_i 、SPAD 比水分下限低的 T5、T2、T1 高，存在显著性差异 ($P < 0.05$)。在果实膨大期，T6 处理的 P_n 、 T_r 、 C_i 、SPAD 均最高，T3 处理 G_s 最高，净光合速率和气孔导度 T6 与 T4 之间无显著差异，与其他处理均存在显著差异 ($P < 0.05$)，水分下限设置高的 T6、T4、T2 处理的 P_n 、 T_r 、 G_s 、 C_i 、SPAD 比水分下限低的 T5、T3、T1 高，T2 与 T3 处理之间无明显差异。总体上 2019 年各处理的 P_n 、 T_r 、 G_s 、 C_i 均比 2018 年高，主要是 2019 年降雨量比 2018 年少，灌水量较 2018 年多；各处理变化规律与 2018 年较相似，均表现为 T6 处理 P_n 、 T_r 、 G_s 、 C_i 、SPAD 最高，水分设置下限高的处理比水分设置下限低的处理光合特性强。

2.2 不同土壤水分下限对枣树形态指标的影响

枣树枣吊长度、每吊开花数、座果数和座果率都是构成枣树产量的主要因素，从图 4a、4b (图中不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)) 可看出，2018 年和 2019 年各处理枣树枣吊长度、每吊开花数、每吊座果数、座果率 2 年变化不大，枣吊长

度、每吊开花数、每吊座果数、座果率均表现为 T6 处理最高，与 T3、T2、T1 处理的枣吊长度、每吊座果数都存在显著差异 ($P < 0.05$)，与 T5 处理的每吊座果数存在显著差异 ($P < 0.05$)。枣树枣吊长度主要在萌芽展叶期和开花座果期 2 个生育期生长，2018 年 T6 处理与其他处理之间均存在显著差异 ($P < 0.05$)，并且 T6 处理较 T1 处理增加了 32.18% ；2019 年 T6、T4、T5 处理相互之间均未达到显著差异 ($P > 0.05$)，分别与 T2、T3、T1 处理存在显著差异 ($P < 0.05$)，并且 T6 处理较 T1 处理增加了 27.73% 。开花座果期 T6、T4、T3 处理水分下限最高，2 年枣树的每吊开花数、座果数均表现为 T6 处理比 T1 处理增加了 76.79% 、 32.71% (2018 年) 和 79.66% 、 31.88% (2019 年)，T6 处理的座果数与其他处理均存在显著差异 ($P < 0.05$)。2018 年的枣树座果率 T4 处理和 T2 处理最高，分别为 57.7% 和 57.5% ，T6 次之，为 55.6% ；2019 年 T6 处理最高，为 58.24% ，T4、T3、T2 均超过 50% 。枣树各生育时期适宜土壤水分下限有利于枣树枣吊长度、每吊开花数、每吊座果数、座果率的增加。

由图 4c、4d 可以看出，枣树新梢增长量和新梢茎粗增量变化在开花座果期增幅最大，依次为果实膨大期、萌芽展叶期；各生育时期水分下限较高的增幅较大，T6 处理各生育时期水分下限均设为最高，枣树新梢增长量和新梢茎粗增量变化均最大，分别

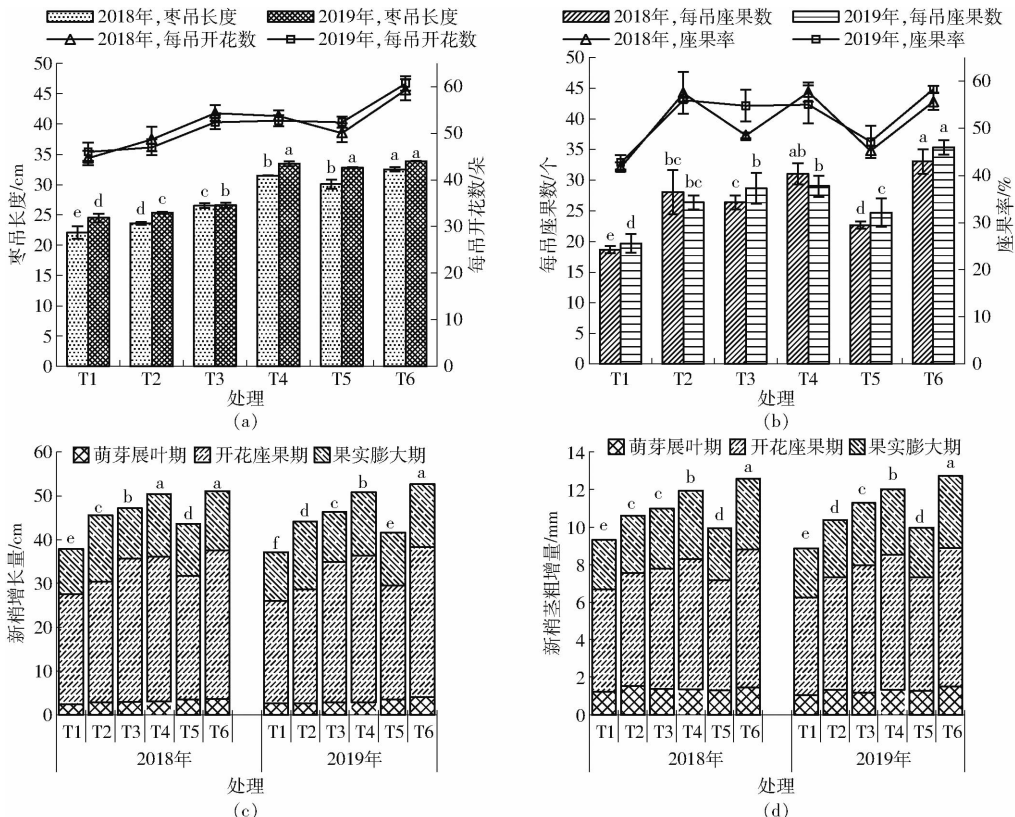


图 4 2018 年和 2019 年不同处理枣树形态指标

Fig. 4 Morphological indicators of jujube trees under different treatments in 2018 and 2019

为 51.1(2018 年)、52.7 cm(2019 年)和 12.6(2018 年)、12.7 mm(2019 年)。2 年的数据显示, T6 处理的新梢茎粗增量与其他处理都存在显著差异($P < 0.05$), 与 T1、T2、T3、T5 处理的新梢增长量存在显著差异($P < 0.05$)。

2.3 不同土壤水分下限对枣树耗水量、产量及水分利用效率的影响

不同土壤水分下限控制的灌水量对枣树耗水量、产量和水分利用效率的影响如表 4 所示, 2 年枣树单果质量均表现为 T6 和 T3 处理最大, 分别为 19.61、19.30 g(2018 年)和 19.33、19.12 g(2019 年), 与其他处理均存在显著差异($P < 0.05$); 单株结果数 T4 处理最多, 分别为 393 个(2018 年)和 392 个(2019 年), 2018 年与其他处

理存在显著差异($P < 0.05$), 2019 年与 T6、T3 之间无显著差异, 与 T5、T2、T1 之间存在显著差异($P < 0.05$)。水分下限设置整体高的 T6、T4、T3 处理, 灌水量和耗水量均高于水分下限设置低的 T5、T2、T1 处理, 并存在一定的显著性($P < 0.05$)。2018 年和 2019 年, T6 处理的枣树产量最高, 分别为 5 874.90、6 022.37 kg/hm², 比 T1 处理最低产量分别增加了 130.67% 和 108.41%, 并且 T6 处理与 T3 处理无显著差异, 与其他处理存在显著差异($P < 0.05$)。2 年水分利用效率均表现为 T3 处理最高, 分别为 3.86、3.83 kg/m³, 比最低的水分利用效率 T1 处理分别提高了 93.97%、80.66%, 2 年 T3 处理的水分利用效率与其他处理均存在显著差异($P < 0.05$)。

表 4 不同土壤水分下限下的枣树耗水量、产量及水分利用效率

Tab. 4 ET, Y and WUE of jujube trees under different soil moisture lower limits

年份	处理	单果质量/ g	单株结果数/ 个	全生育期内总 灌水量/mm	全生育期 降雨量/mm	耗水量/ mm	产量/ (kg·hm ⁻²)	水分利用效率/ (kg·m ⁻³)
2018	T1	(12.01 ± 0.131) ^d	(257 ± 11.14) ^e	286	246.2	(128.26 ± 82.08) ^e	(2 546.91 ± 105.76) ^d	(1.99 ± 0.054) ^e
	T2	(17.54 ± 0.415) ^b	(314 ± 8.39) ^d	341	246.2	(153.30 ± 29.98) ^b	(4 548.00 ± 173.82) ^c	(2.97 ± 0.092) ^d
	T3	(19.30 ± 0.307) ^a	(365 ± 12.90) ^{bc}	326	246.2	(150.32 ± 49.54) ^b	(5 806.72 ± 273.19) ^a	(3.86 ± 0.085) ^a
	T4	(17.01 ± 0.066) ^b	(393 ± 7.81) ^a	377	246.2	(150.88 ± 21.47) ^b	(5 515.12 ± 256.59) ^b	(3.66 ± 0.025) ^b
	T5	(14.41 ± 0.195) ^c	(357 ± 10.15) ^c	303	246.2	(134.93 ± 40.93) ^c	(4 244.51 ± 150.69) ^c	(3.15 ± 0.019) ^c
	T6	(19.61 ± 0.309) ^a	(371 ± 3.21) ^b	392	246.2	(162.71 ± 22.89) ^a	(5 874.90 ± 44.11) ^a	(3.61 ± 0.078) ^b
2019	T1	(11.44 ± 0.274) ^d	(306 ± 11.14) ^e	351	174.0	(136.56 ± 22.39) ^e	(2 889.68 ± 172.78) ^d	(2.12 ± 0.093) ^e
	T2	(18.13 ± 0.191) ^b	(341 ± 7.23) ^b	394	174.0	(159.06 ± 24.68) ^c	(5 106.16 ± 161.01) ^b	(3.21 ± 0.056) ^d
	T3	(19.12 ± 0.213) ^a	(378 ± 12.50) ^a	387	174.0	(155.99 ± 34.38) ^c	(5 968.24 ± 225.51) ^a	(3.83 ± 0.077) ^a
	T4	(18.33 ± 0.150) ^b	(392 ± 14.05) ^a	426	174.0	(166.42 ± 28.95) ^b	(5 932.62 ± 245.55) ^a	(3.56 ± 0.136) ^b
	T5	(14.08 ± 0.135) ^c	(340 ± 7.21) ^b	365	174.0	(143.38 ± 30.02) ^d	(3 950.89 ± 120.58) ^c	(2.76 ± 0.064) ^c
	T6	(19.33 ± 0.174) ^a	(378 ± 10.60) ^a	458	174.0	(176.19 ± 28.08) ^a	(6 022.37 ± 207.79) ^a	(3.42 ± 0.078) ^b

2.4 枣树耗水量和灌水量 + 降雨量对产量和水分利用效率的影响

通过 2 年的耗水量和灌水量 + 降雨量对产量和水分利用效率的影响, 分别以产量 Y 和水分利用效率 WUE 为因变量, 耗水量 ET 和灌水量 + 降雨量 ($W + R$) 为自变量, 拟合出二次多项式的回归曲线方程。由图 5 可以看出, 随着耗水量的增加产量和水分利用效率先增大后减小, 增大幅度大于减小幅度, 但耗水量达到一定值时, 产量和水分利用效率均降低。当枣树全生育期耗水量为 173.33 mm 时, 枣树产量达到最大值 6 026.56 kg/hm², 此时水分利用效率为 3.48 kg/m³; 当枣树全生育期耗水量为 161.33 mm 时, 枣树的水分利用效率达到最大值 3.61 kg/m³, 此时枣树产量为 5 770.16 kg/hm²。随着水量的增加产量和水分利用效率先增大后减小, 增大幅度大于减小幅度, 但灌水量达到一定值时, 产量和水分利用效率并未持续增加。当枣树全生育期灌水量 + 降雨量为 616.16 mm 时, 产量最大为

6 026.97 kg/hm², 此时水分利用效率为 3.64 kg/m³; 当枣树全生育期灌水量 + 降雨量为 601.01 mm 时, 水分利用效率为 3.70 kg/m³; 此时枣树产量为 5 977.68 kg/hm²。

3 讨论

对枣树各生育期设置不同的土壤水分下限进行光合特性、形态指标、产量及水分利用效率对比分析, 发现枣树叶片的 P_n 、 T_r 、 G_s 、 C_i 、SPAD 随土壤水分下限的提高而增加, 不同处理之间光合特性存在显著性差异^[7,17-19]。枣树果实膨大期比开花座果期光合特性高, 果实膨大期主要在 7—9 月, 属于枣树生长和果实膨大旺盛时期, 进行光合作用积累有机质的关键期。作物通过光合作用积累有机质直接在植株形态指标、干物质和果实的变化上反映^[20]。枣树形态指标在各生育时期受水分的影响, 萌芽展叶期枣树地上部分新梢增长量、新梢直径生长较缓慢, 主要是地下部分根系快速生长。本研究表明, 萌

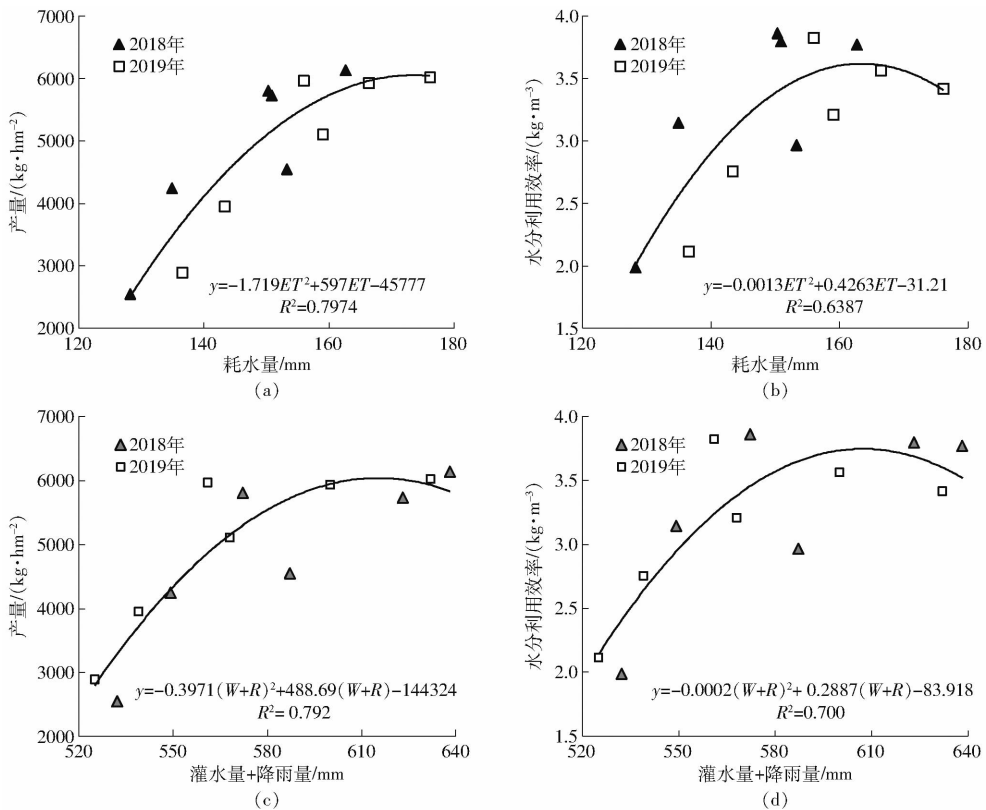


图5 枣树耗水量和灌水量+降雨量与产量和水分利用效率的关系

Fig. 5 Relationships between jujube tree ET , irrigation water volume amount + rainfall, yield and WUE

芽展叶期适当地降低土壤水分下限后,在开花座果期进行充分灌溉有利于地上部分枣树生长,开花座果期土壤水分下限越高越有利于开花数和座果数增多,但单果质量较低,单吊座果数较多不利于果实膨大,并且单位空间的容纳度有限;果实膨大期土壤含水率下限越高越有利于单果增重,产量相应增加^[21-22]。

灌水量是影响作物耗水量的一个主要因素,随着灌水量增加耗水量也相应增大,枣树生育期内的耗水量随着土壤水分下限的升高而增大,全生育期内的灌溉水量也相应增多^[23]。耗水量和灌水量+降雨量增大到一定程度,相应的产量和水分利用效率会出现最大值,然后随着耗水量和灌水量+降雨量增大而降低,最佳的灌水量+降雨量在601.01~616.16 mm之间,产量和水分利用效率最高。从土壤水分变化情况看,试验地土壤87%以上为沙质土壤,水分下渗严重,各生育时期适宜的水分下限有利于枣树形态指标的生长,提高产量。水分下限值降低并不总是降低作物产量,不同生育时期有限水分胁迫有助于作物增产和提高水分利用效率^[24]。T6和T4处理的灌水总量超过了其他处理,产量与T3处理无显著性差异,并且T3处理的水分利用效率最高;但全生育时期土壤水分下限较低时,水分利用效率没有明显提高,产量的降低比灌溉水量和耗水量

减少更显著^[25]。

适宜的灌水量在不降低产量的条件下^[26-27],可以有效提高水分利用效率。本研究不同处理枣树生育时期光合、形态、产量及水分利用效率等综合指标的评价,可以看出T6、T4处理光合特性、形态指标最优,T6处理产量最高,T3、T4次之;T3处理产量与T6处理无显著差异,与T4处理在2019年无显著差异($P > 0.05$),2018年存在显著差异;并且T3处理灌水量分别为326 mm和387 mm,较T6、T4处理分别减少了22.57%、29.20%(2018年)和13.59%、24.74%(2019年),但T3处理的水分利用效率最大,比T6、T4处理分别高2.40%、1.58%(2018年)和12.00%、7.58%(2019年),T3处理在减产不明显情况下,提高了水分利用效率,减少了水资源浪费。此外,开花座果期轻度水分处理和果实膨大期中度水分处理有利于提高水分利用效率,这与马福生等^[28]研究结果一致。综上,T3处理各生育时期的土壤水分下限可作为灵武长枣微孔渗灌灌溉制度,如表5所示。

4 结论

(1)枣树不同生育时期土壤水分下限的提高有利于作物光合作用,T6处理的 P_n 、 T_r 、 G_s 、 C_i 、SPAD最高,与其他处理存在显著性差异($P < 0.05$)。开

表5 微孔渗灌控制土壤水分下限的灵武长枣灌溉制度

Tab.5 Lingwu jujube irrigation scheme based on GC-003 controlling upper and lower water limits

生育时期	起止日期	土壤水分下限	灌水次数	灌水量/mm
萌芽展叶期	4月28日—5月21日	55% θ_f	3~4	50~60
开花座果期	5月22日—7月8日	75% θ_f	10~12	160~180
果实膨大期	7月9日—9月22日	65% θ_f	8~11	145~165
果实成熟期	9月23日—10月10日	65% θ_f	2~3	20~40
越冬期(冬灌)	10月11日—11月20日		1	30

花座果期土壤水分下限越高,越有利于增加开花数和座果数,对单果质量增加影响较低;果实膨大期土壤水分下限提高有利于单果增重,产量相应增加。

(2)枣树各生育时期土壤水分下限的提高,增加了耗水量和灌水量,提高了产量,但水分利用效率反而有所降低。通过二次多项式的回归分析,随着耗水量和灌水量+降雨量逐渐增加,枣树产量和水分利用效率先增大、后降低。

(3)T3处理与T6处理(最大)产量无显著差异($P>0.05$),与其他处理(除2019年T4处理)均存在显著差异($P<0.05$),但T3处理的水分利用效率最佳,分别为3.86、3.83 kg/m³,灌水量分别为326 mm和387 mm,较T6处理低。

(4)灵武长枣4个生育时期适宜的土壤水分下限分别为:萌芽展叶期55% θ_f ,开花座果期75% θ_f ,果实膨大期65% θ_f ,果实成熟期65% θ_f 。

参 考 文 献

- [1] DU Shaoqing, KANG Shaozhong, LI Fusheng, et al. Water use efficiency is improved by alternate partial root-zone irrigation of apple in arid Northwest China[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 179:184-192.
- [2] 牛文全,吕望,古君,等. 微润管埋深与间距对日光温室番茄土壤水盐运移的影响[J]. *农业工程学报*,2017,33(19):131-140. NIU Wenquan, LÜ Wang, GU Jun, et al. Effects of moistube depth and spacing on soil water and salt transports of tomato in solar greenhouse[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(19): 131-140. (in Chinese)
- [3] 刘小刚,朱益飞,余小弟,等. 不同水头和土壤容重下微润灌湿润体内水盐分布特性[J/OL]. *农业机械学报*,2017, 48(7):189-197. LIU Xiaogang, ZHU Yifei, YU Xiaodi, et al. Water-salinity distribution characteristics in wetted soil of moistube irrigation under different pressure heads and soil bulk densities[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(7): 189-197. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170724&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.024. (in Chinese)
- [4] 白丹,孙淑贞,任培琦,等. 地下灌竖管灌水器湿润体时空变化规律[J]. *农业工程学报*,2018,34(7):107-113. BAI Dan, SUN Shuzhen, REN Peiqi, et al. Temporal and spatial variation of wetting volume under sub-irrigation with vertical emitter[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(7): 107-113. (in Chinese)
- [5] 张陆军,汪有科,辛小桂,等. 山地梨枣树涌泉根灌适宜布置方式与灌水量研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*,2010,38(3):211-217. ZHANG Lujun, WANG Youke, XIN Xiaogui, et al. Appropriate surge spring root irrigation layout and irrigation norm of jujube on mountain land[J]. *Journal of Northwest A&F University (Nat. Sci. Ed.)*, 2010, 38(3):211-217. (in Chinese)
- [6] 韩懂懂,孙兆军,焦炳忠,等. 地下渗灌对枣树生长、产量和水分利用效率的影响[J]. *节水灌溉*,2019(10):31-34. HAN Dongdong, SUN Zhaojun, JIAO Bingzhong, et al. Effects of subsurface infiltrate irrigation on growth, yield and water use efficiency of jujube[J]. *Water Saving Irrigation*, 2019(10): 31-34. (in Chinese)
- [7] 徐利岗,王怀博,鲍子云,等. 基于土壤水分下限的宁夏枸杞滴灌灌溉制度试验研究[J]. *排灌机械工程学报*,2020, 38(5):523-529. XU Ligang, WANG Huaibo, BAO Ziyun, et al. Experimental study on soil moisture lower limit-based drip irrigation schedule for *Lycium barbarum* in Ningxia arid area[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2020, 38(5):523-529. (in Chinese)
- [8] 谢美玲. 基于土壤水分下限滴灌红枣灌溉制度研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2012. XIE Meiling. Study on irrigation schedule of jujube under drip irrigation based on lower soil-moisture limit[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- [9] 孙俊环,龚时宏,李光永,等. 地下滴灌不同土壤水分下限对番茄生长发育及产量的影响[J]. *灌溉排水学报*,2006, 25(3):17-20. SUN Junhuan, GONG Shihong, LI Guangyong, et al. Effect of soil moisture on growth, yield and root of tomato under subsurface drip irrigation[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2006, 25(3): 17-20. (in Chinese)
- [10] 罗双龙,马忠明,李玉斌,等. 土壤水分下限对固定道垄作小麦生长及产量的影响[J]. *麦类作物学报*,2017,37(10): 1364-1370. LUO Shuanglong, MA Zhongming, LI Yubin, et al. Influence of lower limit of soil moisture on growth and yield of wheat under permanent raised bed tillage[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2017,37(10):1364-1370. (in Chinese)

- [11] 胡燕哲,吴明泽,李涛龙. 玉米生长指标的土壤水分上下限调控机理[J]. 干旱地区农业研究,2017,35(1):165-170.
HU Yanzhe, WU Mingze, LI Taolong. Growth indicators of summer corn under irrigation soil moisture upper and lower limit [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017, 35(1): 165-170. (in Chinese)
- [12] 付优,马英杰. 不同土壤水分对枣树幼果期光合特性的影响研究[J]. 节水灌溉,2019(8):54-58,63.
FU You, MA Yingjie. Effects of different soil moisture on photosynthetic characteristics of jujube at young fruit stage [J]. Water Saving Irrigation, 2019(8):54-58, 63. (in Chinese)
- [13] 刘倩,张国壮,李海超,等. 土壤水分有效性对梨枣叶片光合参数和抗旱性的影响[J]. 干旱地区农业研究,2015,33(1):1-6.
LIU Qian, ZHANG Guozhuang, LI Haichao, et al. Effects of soil water availability on leaf photosynthetic and drought-tolerant parameters of pear-jujube tree [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(1):1-6. (in Chinese)
- [14] 刘国宏,谢香文,蒋岑. 干旱区不同水分指标下限对成熟红枣生长和产量的影响[J]. 新疆农业科学,2011,48(1):94-98.
LIU Guohong, XIE Xiangwen, JIANG Cen. Influence of different water index lower limit on the mature growth and yield of jujube in the arid areas [J]. Xinjiang Agricultural Science, 2011, 48(1):94-98. (in Chinese)
- [15] 胡永翔. 陕北黄土高原区坡地枣树灌溉制度及作物系数研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2010.
HU Yongxiang. Optimized regulated deficit irrigation mode and crop coefficient of drip irrigation jujube in Loess Plateau [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2010. (in Chinese)
- [16] 孙兆军,何俊,韩磊,等. 一种出水与不出水间隔渗灌管道加工系统:201821088522.1 [P]. 2019-07-12.
- [17] MARYAM D, ALI R S. Response of saffron (*Crocus sativus* L.) to irrigation water salinity, irrigation regime and planting method: physiological growth and gas exchange [J]. Scientia Horticulturae, 2019,257:108714.
- [18] 张效星,樊毅,崔宁博,等. 不同灌水量对滴灌猕猴桃光合、产量与水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报,2019,38(1):1-7.
ZHANG Xiaoxing, FAN Yi, CUI Ningbo, et al. The effects of drip-irrigation amount on photosynthesis, yield and water use efficiency of kiwifruit [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(1):1-7. (in Chinese)
- [19] 马富举,杨程,张德奇,等. 灌水模式对冬小麦光合特性、水分利用效率和产量的影响[J]. 应用生态学报,2018,29(4):1233-1239.
MA Fujun, YANG Cheng, ZHANG Deqi, et al. Effects of irrigation regimes on photosynthesis, water use efficiency and grain yield in winter wheat [J]. Journal of Applied Ecology, 2018, 29(4): 1233-1239. (in Chinese)
- [20] 邹志荣,李清明,贺忠群. 不同灌溉上限对温室黄瓜结瓜期生长动态、产量及品质的影响[J]. 农业工程学报,2005,21(增刊2):77-81.
ZOU Zhirong, LI Qingming, HE Zhongqun. Effects of different irrigation maximums on growth dynamics, yield and quality of cucumber during fruit-bearing stage in greenhouse [J]. Transactions of the CSAE, 2005,21(Supp.2): 77-81. (in Chinese)
- [21] 王娟,马英杰,洪明,等. 调亏灌溉对滴灌红枣生长与品质的影响[J]. 灌溉排水学报,2014,33(3):126-129.
WANG Juan, MA Yingjie, HONG Ming, et al. The effects of regulated deficit irrigation on drip irrigation red jujube growth and quality [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2014, 33(3): 126-129. (in Chinese)
- [22] 白麟,李援农,曹瑞芳. 亏水灌溉对开花坐果期梨枣树生长的影响[J]. 干旱地区农业研究,2012,30(2):84-87.
BAI Lin, LI Yuannong, CAO Ruifang. Effects of deficit irrigation on growth of pear-jujube tree in flowering to fruit-setting stage [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30(2): 84-87. (in Chinese)
- [23] 郑国保,张源沛,朱金霞,等. 灌水频率对枸杞品质、产量和耗水特性的影响[J]. 中国农学通报,2013,29(31):206-210.
ZHENG Guobao, ZHANG Yuanpei, ZHU Jinxia, et al. Research on the quality, yield and water consumption characteristic of *Lycium barbarum* by irrigation frequency [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(31):206-210. (in Chinese)
- [24] 董宝娣,刘会灵,王亚凯,等. 作物高用水生理生态调控机制研究[J]. 中国生态农业学报,2018,26(10):46-56.
DONG Baodi, LIU Huiling, WANG Yakai, et al. Physio-ecological regulating mechanisms for highly efficient water use of crops [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(10):46-56. (in Chinese)
- [25] 李毅杰,原保忠,别之龙,等. 不同土壤水分下限对大棚滴灌甜瓜产量和品质的影响[J]. 农业工程学报,2012,28(6):132-138.
LI Yijie, YUAN Baozhong, BIE Zhilong, et al. Effects of drip irrigation threshold on yield and quality of muskmelon in plastic greenhouse [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(6): 132-138. (in Chinese)
- [26] SENSOY S, ERTEK A, GEDIK I, et al. Irrigation frequency and amount affect yield and quality of field-grown melon (*Cucumis melo* L.) [J]. Agricultural Water Management, 2006, 88(1):269-274.
- [27] 王峰,杜太生,邱建建,等. 亏缺灌溉对温室番茄产量与水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报,2010,26(9):46-52.
WANG Feng, DU Taisheng, QIU Rangjian, et al. Effects of deficit irrigation on yield and water use efficiency of tomato in solar greenhouse [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(9): 46-52. (in Chinese)
- [28] 马福生,康绍忠,王密侠,等. 调亏灌溉对温室梨枣树水分利用效率与枣品质的影响[J]. 农业工程学报,2006,22(1):37-43.
MA Fusheng, KANG Shaozhong, WANG Mixia, et al. Effect of regulated deficit irrigation on water use efficiency and fruit quality of pear-jujube tree in greenhouse [J]. Transactions of the CSAE, 2006,22(1):37-43. (in Chinese)