

网络出版日期:2018-05-09

网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1220.S.20180509.1604.026.html

水肥耦合对南疆沙区滴灌红枣光合特性及产量的影响

扁青永¹,王振华^{1,2},胡家帅¹,何新林^{1,2},李朝阳¹

(1.石河子大学水利建筑工程学院,新疆石河子 832000;2.现代节水灌溉兵团重点实验室,新疆石河子 832000)

摘要 为探究南疆沙区常年漫灌改滴灌后红枣适宜的水肥灌溉制度,以当地 8 a 成龄‘骏枣’树为供试材料,结合大田试验,在滴灌条件下进行水肥二因素三水平完全处理小区试验。结果表明:灌水对红枣叶片光合特性、生长及灌溉水利用效率(iWUE)的影响达显著性水平($P < 0.05$)或极显著水平($P < 0.01$),施肥对肥料偏生产力(PFP)的影响达到显著性水平($P < 0.05$),水肥耦合效应对红枣叶片光合特性、生长、灌溉水利用效率(iWUE)和肥料偏生产力(PFP)均达到显著性水平($P < 0.05$)或极显著水平($P < 0.01$)。新梢前期,通过提高水肥使用量促进红枣生长,从新梢中期开始,中水中肥处理(W2F2)为红枣生长提供最适宜的水分和养分;中水低肥(W2F1)的叶片净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)和胞间 CO_2 浓度(C_i)和产量最高,同时,在产量最优基础上其 iWUE 和 PFP 值也达到较高水平。W2F1 处理红枣叶片 P_n 、 T_r 、 G_s 、 C_i 比漫灌(CK)分别提高 12.61%、17.32%、8.89%、10.66%;产量、iWUE 和 PFP 相对于 CK 分别提高 6.77%、29.89%、193.41%。综上,研究认为灌溉定额 820 mm(W2)、施肥量 200-100-150 $kg \cdot hm^{-2}$ (F1)为南疆沙区滴灌红枣适宜的灌溉制度,对南疆沙区改善传统农业水肥管理方式将具有积极的作用。

关键词 水肥耦合;南疆沙区;红枣;光合特性;产量

中图分类号 S27

文献标志码 A

文章编号 1004-1389(2018)05-0707-09

红枣是南疆沙区发展节水型林果业的重要经济作物,但南疆地区水资源极度匮乏,枣园缺少合理的科学灌溉施肥技术,传统的漫灌和大量施肥现象普遍存在,其直接影响红枣的生长、产量和生产效益,同时也影响着生态环境;实现滴灌条件下水肥的合理利用是提高作物生长、产量和水肥利用率的关键因素^[1-2]。

目前,一些学者开展了滴灌条件下灌溉和施肥对红枣生长、产量、品质和水肥利用效率等指标的影响研究,张亚鸽等^[3]通过田间施肥调控使红枣叶片的净光合速率、气孔导度、水分利用效率及产量分别提高 50%、100.5%、48.8%和 53.3%。柴仲平等^[4-5]通过研究得出增施氮素有利于提高枣树叶片的净光合速率和增产。此外,众多学者通过水肥耦合试验得出红枣最佳水肥量^[6-8]。以上研究主要局限于单方面灌溉定额、施肥量对红枣各项指标的影响或是水肥耦合对红枣生长、产量等少量指标的影响,而关于灌溉定额与施肥量配

比红枣生长、产量和水肥利用效率等综合指标的研究较少。本试验研究集中在水肥耦合对滴灌红枣光合特性、生长、产量及水肥利用效率的综合影响,旨在提出综合红枣光合特性、生长、产量及水肥利用效率最优的水肥灌溉模式,以期以南疆沙区红枣优质高效生产的水肥综合管理提供可借鉴的技术与方法。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2016 年 5—11 月在新疆生产建设兵团第一师阿拉尔农业灌溉试验站进行。该区地处亚欧大陆腹地的塔里木河畔,受塔克拉玛干沙漠的影响,属典型的大陆性极端干旱荒漠气候类型。年均日照时数达 2 865 h,年均气温 10.7 $^{\circ}C$,大于等于 10 $^{\circ}C$ 积温为 4 113 $^{\circ}C$,无霜期达 220 d,多年平均降水量为 67 mm,平均蒸发量 2 110 mm。试验地下水埋深大于 3.5 m,试验站设有小型气

收稿日期:2017-02-21 修回日期:2017-04-20

基金项目:国家科技支撑计划(2014BAC14B01);国家自然科学基金(51669032)。

第一作者:扁青永,男,硕士研究生,从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail:985954632@qq.com

通信作者:王振华,男,博士生导师,主要从事干旱区节水灌溉理论与技术研究。E-mail:wzh2002027@163.com

象站,可自动记录大气压力、地面温度、有效辐射、最小相对湿度及太阳辐射等。土壤基本理化性质:土壤质地以粉砂质粘壤土和粘壤土为主,田间持水量为19.43%~24.13%(灌后24 h测定),体积质量 $1.41 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

滴灌施肥是由水肥一体化设备控制,设备主要由水源、水泵、旋翼式水表、比例施肥泵和输配水管道系统等组成。滴灌带为内镶贴片式滴灌带,内径12 mm,滴头间距300 mm,滴头流量 $2 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$,滴灌工作压力0.05~0.12 MPa。

研究对象为南疆‘骏枣’8 a 成龄枣树,2008年种植,2009年嫁接,常年连续漫灌,2016-05-15开始进行漫灌改滴灌条件下水肥耦合试验。

1.2 试验设计

根据文献[9]及当地农艺管理,设定灌溉定额

和施肥量2个因素,灌溉定额分别为低水620 mm(W1),中水820 mm(W2),高水1 020 mm(W3)3个水平。施肥量采用 $\text{N} : \text{P}_2\text{O}_5 : \text{K}_2\text{O} = 2 : 1 : 1.5$ 的比例(质量比),设定3个水平(低肥,中肥,高肥),即施 $\text{N}, \text{P}_2\text{O}_5, \text{K}_2\text{O}$ 分别为 $200\text{-}100\text{-}150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (F1), $400\text{-}200\text{-}300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (F2), $600\text{-}300\text{-}450 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (F3),另设置一个漫灌灌溉定额(1 020 mm)和施肥量(550-275-412 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)为对照处理(CK),根据红枣的需肥规律,采取少量多次的原则,萌芽新梢期施入1次,花期施肥2次,幼果膨大期施肥2次,白熟期施肥2次,完熟期不施肥,将肥料完全溶解于肥料罐中,通过水肥一体化装置施入,施肥前半小时滴水,停水前半小时结束施肥。试验设计见表1。

表1 试验设计

Table 1 Experimental design

生育阶段 Growth stage	日期 Date	水处理/mm Water treatments			肥处理/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) Fertilization treatments			CK(漫灌) Flooding		灌水次数 Irrigation times	施肥次数 Fertilization times
		W1	W2	W3	F1	F2	F3	W	F		
萌芽新梢期 Germination-shoot stage	04-30-06-20	70	110	150	90	180	270	150	270	1	1
花期 Flower stage	06-21-07-20	160	200	240	120	240	360	240	360	2	2
幼果膨大期 Young fruit expands stage	07-21-08-17	160	200	240	120	240	360	240	360	2	2
白熟期 White-mature stage	08-18-09-18	160	200	240	120	240	360	240	360	2	2
完熟期 Full ripening stage	09-19-10-30	70	110	150				150		1	

1.3 测定项目及方法

1.3.1 生长指标 在新梢萌芽期、花期进行新梢长度和梢径(主梢)的测定,每处理重复3次,每重复取样5棵红枣树,每个生育期7~10 d测量1次,取平均值。新梢长度用卷尺测定,从新梢(侧枝)与主干枝交界处测量;梢径使用游标卡尺进行测量,测量部位始终为新梢基部。

1.3.2 光合指标 于2016-07-30 10:00-18:00进行光合指标的测定(验证试验光合指标测定于2016-09-15 10:00-18:00),采用Li-6400便携式光合测定仪(Li-CorInc, USA)测定净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)和蒸腾速率(T_r)。为降低环境变化带来的误差,采取“Z”字形测量法,即一次重复的每一个处理测定一个数据即进入下一处理,全部处理都测完后进入下一次循环,如此依次测完。

1.3.3 红枣产量指标 红枣成熟后按小区采摘,每个处理随机取5棵,取平均值,再折合每公顷产

量。计算灌溉水分利用效率($i\text{WUE}, \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)即用每个处理的总产量比总灌溉量^[10-11],肥料偏生产力(PFP, $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)为每个处理的总产量比总施肥量^[12]。

1.4 数据分析

用Microsoft Excel 2010进行数据计算;用SPSS 17.0统计软件进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 水肥耦合对滴灌红枣光合特性的影响

由表2可以看出,灌水对红枣叶片 P_n 、 T_r 、 G_s 、 C_i 均达到极显著水平($P < 0.01$);施肥对红枣叶片 P_n 、 T_r 、 G_s 、 C_i 的影响不显著($P > 0.05$);水肥交互作用对红枣叶片 P_n 、 T_r 、 G_s 达到极显著水平($P < 0.01$),对 C_i 的影响显著($P < 0.05$)。因此,灌水因素和水肥耦合效应对红枣光合特性的影响明显大于养分。

还可以看出,不同施肥水平下,红枣叶片 P_n 、

T_r 随灌溉量的增加表现为 $W2 > W3 > CK > W1$ (平均值,下同),且 $W2$ 和 $W3$ 灌溉水平 P_n 值较 CK 分别提高 8.07%、3.40%, T_r 值较 CK 分别提高 14.59%、1.00%;而 G_s 和 C_i 表现为 $W2 > CK > W3 > W1$, $W2$ 水平 G_s 和 C_i 值较 CK 分别提高 4.44%、7.26%。在不同灌水量条件下,增加施肥量, P_n 、 T_r 、 G_s 、 C_i 值之间差异较小。不同水肥处理红枣叶片 P_n 、 T_r 、 G_s 、 C_i 最大值一般出

现在 $W2F1$ 处理, P_n 、 T_r 、 G_s 最小值出现在 $W1F1$ 处理,而 C_i 最小值在 $W1F3$ 处理,各处理 P_n 、 T_r 、 G_s 和 C_i 最大值比最小值分别提高 23.00%、22.54%、58.06% 和 58.08%,比 CK 分别提高 12.61%、17.32%、8.89%、10.66%。这也说明红枣 P_n 、 T_r 、 G_s 、 C_i 之间密切相关。当红枣 P_n 、 T_r 过高或过低时,可以通过控制红枣叶片的气孔开放程度的大小来适应外界环境,其归因于气孔限制因素。

表 2 不同水肥处理对红枣叶片光合特性的影响

Table 2 Effects of different water and fertilizer treatments on photosynthetic characteristics of jujube leaves

处理	Treatment	$P_n/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	$T_r/(\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	$G_s/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	$C_i/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$
W1F1		7.26±0.07 f	3.15±0.055 b	0.31±0.011 c	447.50±2.78 f
W1F2		7.82±0.12 e	3.17±0.015 b	0.33±0.015 c	519.89±3.38 e
W1F3		7.73±0.04 e	3.19±0.045 b	0.35±0.10 c	365.07±5.11 g
W2F1		8.93±0.03 a	3.86±0.010 a	0.49±0.015 a	707.41±4.48 a
W2F2		8.34±0.08 cd	3.68±0.021 a	0.47±0.037 ab	639.25±3.45 b
W2F3		8.43±0.03 c	3.76±0.020 a	0.45±0.015 b	710.42±2.79 a
W3F1		8.24±0.05 d	3.27±0.057 b	0.35±0.015 c	631.01±2.52 b
W3F2		8.67±0.13 b	3.40±0.059 b	0.36±0.016 c	592.06±2.04 c
W3F3		8.41±0.09 cd	3.28±0.049 b	0.44±0.032 b	536.53±1.44 d
CK		7.93±0.15 e	3.29±0.035 b	0.45±0.269 b	639.26±2.56 b
		显著性检验(F值) Test of significance (F value)			
W		10.346*	63.199**	13.897**	13.434**
F		0.39	0.1	0.152	0.165
W * F		77.549**	10.517**	10.597**	1 251.19*

注:数值为“平均值±标准差”,字母 a,b,c 等表示同一列在 $P=0.05$ 水平差异显著,如不同小写字母表示处理之间差异显著($P<0.05$),相同小写字母表示差异不显著($P>0.05$)。* 表示 $P<0.05$ 水平差异显著,** 表示在 $P<0.01$ 水平差异极显著。无 * 表示在 $P>0.05$ 水平差异无显著。下表同。

Note: Data is “mean±standard error”; the different letters marked as a,b,c, etc shows the difference between treatments in each column at 0.05 significant level and 0.01 level respectively. No * indicates no significant, the same as following.

2.2 水肥耦合对滴灌红枣生长指标的影响

表 3 为不同水肥处理对红枣新梢生长指标的影响。如表所示,灌水对红枣生长的影响达到显著($P<0.05$)或极显著水平($P<0.01$),施肥对红枣生长的作用不显著($P>0.05$),水肥交互作用对红枣生长的影响均表现为极显著水平($P<0.01$),说明灌水因素和水肥耦合效应对红枣生长的影响显著高于施肥因素。

2.2.1 水肥耦合对红枣梢径的影响 从表 3 可以看出,各水肥处理的红枣梢径随着生育期持续增加,新梢前期最低,花后期最高。在新梢前期,不同施肥水平下,梢径伴随着灌水量增加表现为 $CK > W3 > W2 > W1$,低水、中水和高水分别比对

照低 22.12%、17.55%、3.70%,在不同灌水水平下,增加施肥量梢径表现为 $CK > F3 > F2 > F1$,低肥、中肥、高肥处理比对照降低 16.15%、14.85%、10.37%;从新梢中期开始, $W2F2$ 处理生长势增强,其梢径均高于其他处理,同时 $W2F2$ 梢径增加量为 6.07 mm,高于其他水肥处理及 CK 增加量(4.84 mm)。由此表明,新梢前期可以通过增加水肥用量来增加梢径;从新梢中期开始, $W2F2$ 处理能够为红枣树充分输送所需的养分和水分。

2.2.2 水肥耦合对红枣梢长的影响 水肥处理梢长随着生育期的延长而增加,变化趋势基本与梢径一致(表 3)。CK 梢长整体高于试验设置的

水肥处理,说明传统漫灌方式有利于红枣梢长的生长。新梢前期,W3F1处理梢长为45 cm,表现最好,与W3F3和CK处理之间无显著性差异($P>0.05$);进入新梢中期,W2F2处理生长势增强,始终表现为最佳,W1F1、W1F2、W1F3、W2F1、W2F2、W2F3、W3F1、W3F2、W3F3、CK处理的梢长增加量分别为51 cm、51 cm、42 cm、

57 cm、64 cm、56 cm、48 cm、58 cm、55 cm、59 cm,W2F2处理梢长增加量明显高于其他处理。由此表明:在新梢前期,增加灌水施肥量对梢长增长有明显的作;到新梢中期,通过W2F2水肥处理为植株输送充足的营养物质及水分,结论与梢径相同。

表3 不同水肥处理对红枣新梢生长量的影响

Table 3 Effects of different water and fertilizer treatments on plant growth of jujube

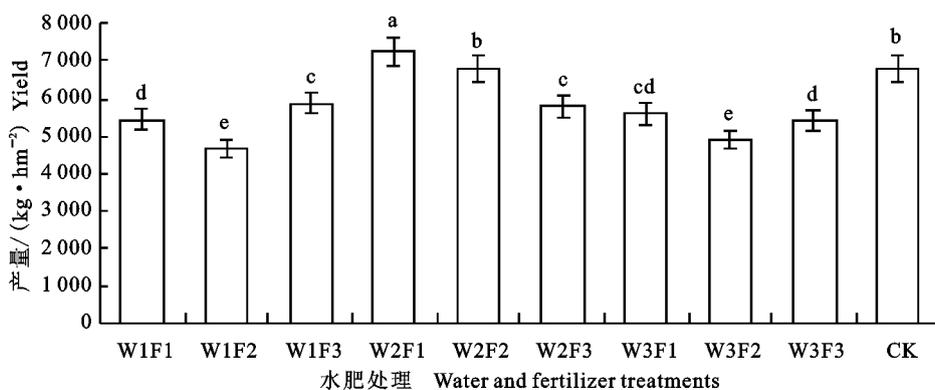
处理 Treatment	新梢前期 Early stage of new shoot		新梢中期 Mid-stage of new shoot		新梢后期 Later stage of new shoot	
	梢径/mm Shoot diameter	梢长/cm Shoot length	梢径/mm Shoot diameter	梢长/cm Shoot length	梢径/mm Shoot diameter	梢长/cm Shoot length
W1F1	4.89±0.321 d	30±1.323 c	6.90±1.054 e	44±3.123 a	7.91±0.652 e	56±2.821 c
W1F2	5.21±0.201 cd	32±1.298 c	7.15±0.110 de	48±2.784 a	7.61±0.192 e	57±1.964 c
W1F3	5.35±0.108 c	40±3.464 b	7.49±0.147 d	49±1.732 a	8.24±0.284 d	58±1.732 c
W2F1	5.48±0.111 c	38±1.223 bc	8.45±0.295 c	59±2.000 a	9.16±0.101 c	68±1.589 ab
W2F2	5.25±0.095 c	37±2.645 bc	9.50±0.312 a	62±1.501 a	10.64±0.171 a	73±1.895 a
W2F3	6.05±0.087 b	37±1.412 bc	8.75±0.271 c	61±3.904 a	9.85±0.600 b	68±1.802 ab
W3F1	5.89±0.140 b	45±1.500 a	8.71±0.141 c	59±1.256 a	9.68±0.584 b	69±2.624 ab
W3F2	6.86±0.180 a	38±2.156 bc	9.23±0.346 ab	57±2.645 a	10.16±0.105 ab	65±1.458 b
W3F3	6.83±0.056 a	44±1.000 ab	9.21±0.601 ab	62±2.291 a	10.25±0.128 a	71±3.605 a
CK	6.78±0.190 a	44±2.179 ab	9.15±0.458 b	64±1.732 a	10.58±0.399 a	72±2.905 a
显著性检验(F 值分析) Significance test(F value analysis)						
W	8.394*	6.778*	20.807**	32.617**	16.844**	51.571**
F	3.84	0.624	0.269	0.145	0.191	0.025
W*F	60.108**	18.954**	18.448**	24.342**	25.716**	12.498**
处理 Treatment	花前期 Early stage of flowering		花中期 Mid-stage of flowering		花后期 Later stage of flowering	
	梢径/mm Shoot diameter	梢长/cm Shoot length	梢径/mm Shoot diameter	梢长/cm Shoot length	梢径/mm Shoot diameter	梢长/cm Shoot length
W1F1	8.21±0.831 d	66±2.822 c	8.95±0.832 c	74±2.291 c	9.51±0.360 d	81±2.179 c
W1F2	8.00±0.430 d	65±2.969 c	8.69±0.430 c	76±1.803 c	9.38±0.340 d	83±3.278 c
W1F3	8.75±0.238 c	67±1.732 c	9.14±0.238 c	76±4.582 c	9.71±0.171 d	82±2.758 c
W2F1	8.59±0.149 c	77±1.804 b	10.22±0.149 b	89±3.968 ab	10.45±0.695 c	95±2.489 bc
W2F2	10.60±0.175 a	80±1.952 a	11.19±0.175 a	91±1.802 a	11.56±0.451 a	101±1.948 a
W2F3	10.10±0.320 b	76±1.658 b	10.45±0.320 b	84±2.291 b	10.89±0.721 b	93±4.092 bc
W3F1	9.70±0.567 b	75±2.646 b	10.82±0.567 a	81±2.783 b	10.99±0.871 b	93±1.802 bc
W3F2	10.10±0.265 ab	73±1.452 b	10.75±0.265 a	85±1.866 b	11.14±0.120 ab	96±3.123 b
W3F3	10.60±0.157 a	78±2.605 b	11.09±0.157 a	89±2.291 ab	11.54±0.377 a	99±1.562 b
CK	10.80±0.156 a	81±2.905 a	11.20±0.095 a	92±3.122 a	11.62±0.332 a	103±3.968 a
显著性检验(F 值分析) Significance test(F value analysis)						
W	5.706*	29.4**	29.898**	13.000**	11.735**	22.037**
F	0.688	0.024	0.04	0.104	0.162	0.139
W*F	18.967**	11.467**	18.621**	17.264**	12.947**	22.736**

2.3 水肥耦合对滴灌红枣产量的影响

图 1 为不同水肥处理对红枣产量的影响。其中灌水和施肥对红枣产量的影响均不显著($P > 0.05$),水肥交互作用对红枣产量的影响达到极显著水平($P < 0.01$)。说明水肥耦合效应对红枣产量的影响大于单因素水分或施肥对其的影响。因此水肥耦合模式的优化选择对提高红枣产量有重要意义。

同时可以看出,不同水肥处理下红枣产量在 4 661(W1F2)~7 256 kg·hm⁻²(W2F1)区间;CK 产量 6 796 kg·hm⁻² 仅仅低于 W2F1(7 256 kg·hm⁻²)和 W2F2 处理(6 803 kg·hm⁻²),W2F1 处理产量较 CK 增产 6.77%。不同灌水水平对红枣产量均有不同响应,其在 W1 和 W3 灌

溉定额条件下,施肥量 F2 水平的产量显著低于 F1 和 F3 水平,F2 施肥量的产量比 F1、F3 分别降低 1.48%、26.13%(W1),12.65%、10.63%(W3);在 W2 灌溉定额水平下,红枣产量表现为 F1>F2>F3,F1 产量比 F2、F3 分别提高 6.66%、25.13%;在相同施肥量条件下,红枣产量随灌水量整体上表现为 W2 高于其他灌溉水平,W2 水平红枣产量比 W1、W3 分别提高 33.14%、29.50%(F1),45.94%、39.01%(F2)。需指出的是,在 F3 施肥量水平下,W1 与 W2 之间差异很小,W2 比 W3 提高 7.11%。以上结果表明,提高施肥量对红枣产量会产生不利影响,同时,过高或过低的灌水均不利于提高红枣产量,W2F1 处理的红枣增产效果最明显。



字母 a、b、c 等表示同一列在 0.05 水平差异显著,如不同小写字母表示处理之间差异显著($P < 0.05$),相同小写字母表示差异不显著($P > 0.05$),下图同 The letters a, b, c and said the same column significantly different at 0.05 level, such as different lowercase letters mean significant difference between treatments ($P < 0.05$), the same lowercase letters indicate no significant difference ($P > 0.05$), the same below

图 1 不同水肥处理对产量的影响

Fig. 1 Effects of different water and fertilizer treatments on yield

2.4 水肥耦合对滴灌红枣灌溉水利用效率和肥料偏生产力的影响

不同水肥处理对红枣灌溉水利用效率(iWUE)和肥料偏生产力(PFP)的影响见图 2。灌水对红枣 iWUE 的影响达到极显著水平($P < 0.01$),而对 PFP 无显著差异($P > 0.05$);施肥对红枣 iWUE 的影响无显著性水平($P > 0.05$),对 PFP 达到极显著水平($P < 0.01$);水肥耦合效应对红枣 iWUE 和 PFP 均达到显著性水平。这说明单一水分或施肥因素对红枣 iWUE 和 PFP 具有局限性,水分只对 iWUE 具有显著作用,而施肥对 PFP 有明显影响;但水肥交互作用对 iWUE 和 PFP 均有显著影响,进一步说明水肥耦合效应对红枣影响大于单因素水分或施肥对其的影响。

另外, iWUE 与 PFP 值分别介于 4.53 kg·m⁻³(W3F2)~8.17 kg·m⁻³(W1F3)、4.38 kg·kg⁻¹(W3F3)~16.12 kg·kg⁻¹(W2F1), iWUE 和 PFP 最大值较 CK 分别提高 29.89%、193.41%;不同施肥水平下, iWUE 伴随着灌水量增加表现为 W1>W2>CK>W3,低水和中水处理比对照分别提高 17.65%、17.64%,PFP 则表现为 W2>W3>W1>CK,中水、高水和低水比对照分别提高 35.88%、75.41%、37.34%;不同灌水水平下增加施肥量 iWUE 和 PFP 分别表现为 F1>F3>CK>F2、F1>F2>CK>F3,低肥和高肥处理 iWUE 值比 CK 分别提高 9.38%、3.18%,同时,低肥和中肥处理 PFP 值比 CK 分别提高 146.99%、17.85%。由此可知,中水和低

肥处理在红枣产量最高的基础上, *i*WUE 和 PFP 也达到较高水平。

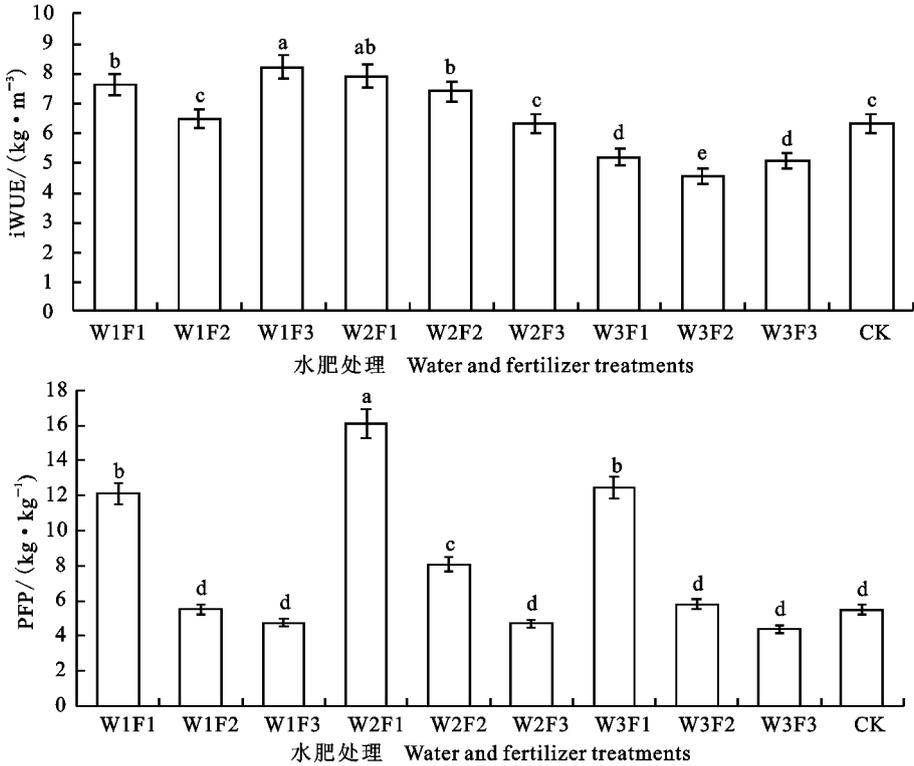


图 2 不同水肥处理对灌溉水利用效率和肥料偏生产力的影响

Fig. 2 Effects of different water and fertilizer treatments on irrigation water use efficiency and partial factor productivity

3 讨论

水肥因素是红枣生长和发育的重要保障,也是影响作物光合生理特性的主要因素^[13]。李明等^[14]研究认为,灌水和水肥交互作用对光合的影响大于施肥因素,这与本试验研究结果一致。植物的光合作用及蒸腾作用直接受到气孔导度的影响,植物能够通减小或部分关闭气孔导度,进而降低蒸腾作用减少水分散失,同时叶片气孔关闭也会影响植物叶片内部的气体与外界的交换,进而降低植物叶片光合作用^[15-16]。本试验研究表明,红枣 P_n 、 T_r 、 G_s 、 C_i 之间密切相关,红枣叶片通过控制气孔开放大小来适应外界环境,其归因于气孔限制因素,其结果与周罕觅等^[17]研究结果一致。本研究还发现,过高或者过低灌水不利提高红枣叶片进行光合作用;杨丽等^[18]发现,作物的 P_n 、 T_r 、 G_s 随施肥水平的提高而提高,这与本结果不一致,可能由于本试验是在滴灌改漫灌条件下进行,往年长期漫灌的红枣对养分需求较多,因此本试验设定的施肥水平较高,提高施肥可能

不会提高光合作用。

对红枣生长、产量及水肥利用效率指标进行分析表明,新梢前期,可以通过 W3F3 处理提高红枣生长;从新梢中期开始, W2F2 处理植株物质积累量最大,出现明显“徒长”现象^[19]。何进宇等^[20]认为水肥交互作用显著,高水高肥处理对作物增产效果显著。本试验研究表明,单一灌水或施肥因素对红枣产量的影响均达到显著性水平,水肥交互作用对红枣增产效果明显;另外,水肥耦合对红枣 *i*WUE 和 PFP 的影响显著。杨小振等^[19]研究表明,过高的灌水量和施肥量并未显著提高产量、灌溉水利用效率及肥料偏生产力,中水处理 *i*WUE 反而提高。还有一些学者认为增大灌水量和减少施肥量能够使作物肥料偏生产力增大^[21]。本研究表明,中水低肥处理(W2F1)下在红枣产量最高的基础上,灌溉水利用效率和肥料偏生产力也达到较高水平。

4 结论

4.1 在南疆沙区漫灌改滴灌条件下,水肥耦合对

红枣光合特性、生长、产量、灌溉水利用效率和肥料偏生产力的效应均达到显著水平;同时灌水因素对红枣光合特性、生长、灌溉水利用效率的影响显著,施肥对肥料偏生产力的影响显著。

4.2 红枣叶片 P_n 、 T_r 、 G_s 和 C_i 值一般在中水低肥处理(W2F1)最大;新梢前期,高水高肥处理(W3F3)适宜红枣生长,从新梢中期开始,中水中肥处理(W2F2)能显著提高红枣生长;W2F1 处理下红枣产量最高,同时 $iWUE$ 和 PFP 值较优。W2F1 处理的红枣叶片 P_n 、 T_r 、 G_s 、 C_i 比 CK 分别提高 12.61%、17.32%、8.89%、10.66%;产量、 $iWUE$ 和 PFP 较 CK 分别提高 6.77%、29.89%、193.41%。

4.3 全面综合考虑水肥协同效应、光合特性、生长、产量及水肥利用效率等多种红枣指标,在南疆沙区漫灌改滴灌条件下红枣的灌溉定额和施肥量宜控制在 820 mm(W2)、200-100-150 kg·hm⁻²(F1)左右时比较适宜,该水肥组合为南疆沙区滴灌条件下红枣高效生产提供依据,同时对改善南疆传统农业方式有很大的积极作用。该研究只在南疆沙区进行了 1 a 的试验,结果可靠性有待长期试验进行验证。

参考文献 Reference:

- [1] SASSENATH-COLE G F. Dependence of canopy light distribution on leaf and canopy structure for two cotton (*Gossypium*) species[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1995, 77(1/2): 55-72.
- [2] LAFARGE T A, HAMMER G L. Predicting plant leaf area production; shoot assimilate cumulation and partitioning, and leaf area ratio, are stable for a wide range of sorghum population densities [J]. *Field Crops Research*, 2002, 77(2): 137-151.
- [3] 张亚鸽, 吴正保, 史彦江, 等. 不同施肥处理对‘骏枣’光合特性及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(6): 83-87.
- ZHANG Y G, WU ZH B, SHI Y J, *et al.* Effects of different fertilization treatments on photosynthetic characteristics and yield of Jun jujube[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, 33(6): 83-87.
- [4] 柴仲平, 王雪梅, 孙 霞, 等. 氮、磷、钾施肥对比对红枣光合特性与水分利用效率的影响研究[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(2): 144-150.
- CHAI ZH P, WANG X M, SUN X, *et al.* Photosynthetic and water use efficiency of *Zizyphus jujube* under different treatments of N, P, K[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2011, 25(2): 144-150.
- [5] 柴仲平, 王雪梅, 孙 霞, 等. 氮、磷、钾施肥对比对红枣光合特性与产量的影响[J]. 农业系统科学与综合研究, 2011, 27(2): 203-208.
- CHAI ZH P, WANG X M, SUN X, *et al.* Influence on photosynthetic characteristics and yield of *Zizyphus jujube* under different treatments of N, P, K[J]. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture*, 2011, 27(2): 203-208.
- [6] 万素梅, 胡守林, 晁先民, 等. 干旱胁迫对塔里木盆地红枣光合特性及水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(3): 171-175.
- WAN S M, HU SH L, GAO X M, *et al.* The influence of water stress on photosynthesis characteristics and water use efficiency in jujube in Tarim basin[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2012, 30(3): 171-175.
- [7] 胡安焱, 董新光, 魏光辉, 等. 滴灌条件下水肥耦合对干旱区红枣产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(6): 60-63.
- HU A Y, DONG X G, WEI G H, *et al.* Coupling effects of water and fertilizer on yield of Chinese jujube under drip irrigation in the arid area[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2010, 29(6): 60-63.
- [8] 谢美玲, 董新光, 马英杰, 等. 干旱区枣树膜下滴灌条件下水肥耦合效应初探[J]. 甘肃农业大学学报, 2011, 46(5): 70-76.
- XIE M L, DONG X G, MA Y J, *et al.* Preliminary research for coupling effects of water-fertilizer on drip irrigation under plastic mulch for jujube in arid region[J]. *Journal of Gansu Agricultural university*, 2011, 46(5): 70-76.
- [9] 胡家帅, 王振华, 郑旭荣. 灌水对滴灌红枣产量、品质及水分利用的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2016, 34(12): 1086-1092.
- HU J SH, WANG ZH H, ZHENG X R. Effects of different irrigation treatments on drip irrigation red jujube's yield, quality and water use efficiency[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering (JDIME)*, 2016, 34(12): 1086-1092.
- [10] 刘虎成, 徐 坤, 张永征, 等. 滴灌施肥技术对生姜产量及水肥利用率的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(增刊 1): 106-111.
- LIU H CH, XU K, ZHANG Y ZH, *et al.* Effect of drip fertigation on yield, water and utilization in ginger[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(Supp. 1): 106-111.
- [11] 张 辉, 张玉龙, 虞 娜, 等. 温室膜下滴灌灌水控制下限与番茄产量、水分利用效率的关系[J]. 中国农业科学, 2006, 39(2): 425-432.
- ZHANG H, ZHANG Y L, YU N, *et al.* Relationship between low irrigation limit and yield, water use efficiency of tomato in under-mulching-drip irrigation in greenhouse [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(2): 425-432.
- [12] IERNA A, LOMBARDO G P, MAUROMICAL G. Tuber yield, water and fertilizer productivity in early potato as affected by a combination of irrigation and fertilization[J].

Agricultural Water Management, 2001, 101(1): 35-41.

[13] 赵永平. 灌溉和施氮对甜叶菊光合特性和产量品质的调控 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2014.
ZHAO Y P. The regulation of the photosynthetic properties of stevia and the quality of production of stevia and nitrogen [D]. Lanzhou, Gansu Agricultural University, 2014.

[14] 李建明, 潘铜华, 王玲慧, 等. 水肥耦合对番茄光合、产量及水分利用效率的影响 [J]. 农业工程学报, 2014, 30(10): 82-90.
LI J M, PAN T H, WANG L H, *et al.* Effects of water-fertilizer coupling on tomato photosynthesis, yield and water use efficiency [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(10): 82-90.

[15] 李树朋, 吴仁焯, 朱艳菲, 等. 盐分胁迫下杠柳叶片光合特性的光响应研究 [J]. 西北植物学报, 2013, 33(12): 2507-2512.
LI SH P, WU R Y, ZHU Y F, *et al.* Light response of *periploca sepium bunge* leaves physiological parameters under salt stress [J]. *Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica*, 2013, 33(12): 2507-2512.

[16] FARQUHAR G D, SHARKEY T D. Stomatal conductance and photosynthesis [J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1982, 33(3): 317-345.

[17] 周罕觅, 张富仓, Kjelgren R, 等. 苹果幼树生理特性和水分生产率对水肥的响应研究 [J]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 77-87.
ZHOU H M, ZHANG F C, KJELREN R, *et al.* Response of physiological properties and crop water productivity of young apple tree to water and fertilizer [J]. *Journal of Agricultural Machinery*, 2015, 46(4): 77-87.

[18] 杨 丽, 贾志宽, 韩清芳, 等. 水肥条件对冬小麦旗叶光合

特性及生物量的影响 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2015, 43(12): 83-90, 98.

YANG L, JIA ZH K, HAN Q F, *et al.* Effects of water-fertilizer coupling on biomass and photosynthetic characteristics of flag leaf of winter wheat [J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2015, 43(12): 83-90, 98.

[19] 杨小振, 张 显, 马建祥, 等. 滴灌施肥对大棚西瓜生长、产量及品质的影响 [J]. 农业工程学报, 2014, 30(7): 109-118.
YANG X ZH, ZHANG X, MA J X, *et al.* Effects of drip fertigation on growth, yield and quality of watermelon in plastic greenhouse [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(7): 109-118.

[20] 何进宇, 田军仓. 膜下滴灌旱作水稻水肥耦合模型及组合方案优化 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(13): 77-82.
HE J Y, TIAN J C. Model of coupling water with fertilizer and optimum combination scheme of rice cultivated in aerobic soil with drip irrigation under plastic film [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(13): 77-82.

[21] 邢英英, 张富仓, 吴立峰, 等. 基于番茄产量品质水肥利用效率确定适宜滴灌灌水施肥量 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(增刊 1): 110-121.
XING Y Y, ZHANG F C, WU L F, *et al.* Determination of optimal amount of irrigation and fertilizer under drip fertigated system based on tomato yield, quality, water and fertilizer use efficiency [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(Supp. 1): 110-121.

Effects of Water and Fertilizer Coupling on Photosynthetic Characteristics, Growth and Yield of Red Jujube under Drip Irrigation Condition

BIAN Qingyong¹, WANG Zhenhua^{1,2}, HU Jiashuai¹,
HE Xinlin^{1,2} and LI Chaoyang¹

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi Xinjiang 832000, China;
2. Key Laboratory of Modern Water-saving Irrigation Corp, Shihezi University, Shihezi Xinjiang 832000, China)

Abstract In order to explore the suitable irrigation system of water and fertilizer under the condition of changing flood irrigation into drip irrigation for jujube in the southern Xinjiang sandy area, used local ‘Jun-jujube’ of the 8 years as test materials, and a complete experiment of water and nitrogen with three levels each under drip irrigation was conducted in field. The results showed that irrigation had significant effect at 0.05 or 0.01 level on photosynthetic characteristics, growth and irrigation application use efficiency (iWUE) of jujube leaves, effect of fertilization on fertilizer partial productivity (PFP) reached significance level ($P < 0.05$), and coupling effects of water and fertilizer on photosynthetic characteristics, growth, irrigation application use efficiency (iWUE) and fertilizer partial productivity (PFP) had reached significance level ($P < 0.05$) or extremely significance level ($P < 0.01$). At

the early growth stage of the new tip, adding water and fertilizer promoted the growth of jujube, and middle-water and middle-fertilization treatment (W2F2) provided the optimum quantity of water and nutrients at the middle growth stage. Net leaf photosynthetic rate (P_n), transpiration rate (T_r), stomatal conductance (G_s) and intercellular CO_2 concentration (C_i) and yield of W2F1 treatment were at the maximum. The value of iWUE and PFP also reached higher level on the basis of the optimum. Compared to CK, the P_n , T_r , G_s , C_i were increased 12.61%, 17.32%, 8.89% and 10.66% respectively under W2F1 treatment, and the yield, iWUE and PFP were increased 6.77%, 29.89% and 193.41% respectively. To sum up, the research suggested that the feasible irrigation quota and fertilizer quantity were 820 mm(W2) and 200-100-150 kg · hm⁻² (F1) for irrigation system, and it would have a positive effect to improve the traditional agricultural methods in the southern Xinjiang sandy area.

Key words Water and fertilizer coupling; Southern Xinjiang sandy area; Jujube; Photosynthetic characteristics; Yield

Received 2017-02-21 **Returned** 2017-04-20

Foundation item The National Science and Technology Support Project(No. 2014BAC14B01); the National Natural Science Foundation of China(No. 51669032).

First author BIAN Qingyong, male, master student. Research area: theoretical and technical research on water-saving irrigation in arid areas. E-mail: 985954632@qq.com

Corresponding author WANG Zhenhua, male, doctoral supervisor. Research area: theoretical and technical research on water-saving irrigation in arid areas. E-mail: wzh2002027@163.com

(责任编辑:潘学燕 **Responsible editor: PAN Xueyan**)

SI 词头

因数	英文名称	中文名称	符号
10^{24}	yotta	尧[它]	Y
10^{21}	zetta	泽[它]	Z
10^{18}	eza	艾[可萨]	E
10^{15}	peta	拍[它]	P
10^{12}	tera	太[拉]	T
10^9	giga	吉[伽]	G
10^6	mega	兆	M
10^3	kilo	千	k
10^2	hecto	百	h
10^1	deca	十	da
10^{-1}	deci	分	d
10^{-2}	centi	厘	c
10^{-3}	milli	毫	m
10^{-6}	micro	微	μ
10^{-9}	nano	纳[诺]	n
10^{-12}	pico	皮[可]	p
10^{-15}	femto	飞[母托]	f
10^{-18}	atto	阿[托]	a
10^{-21}	zepto	仄[普托]	z
10^{-24}	yocto	幺[科托]	y