

不同微灌方式下水分调控对猕猴桃光合特性及产量的影响

甘雨康¹, 施浩然¹, 崔宁博^{2,3*}, 康佳辉¹

(1.西华大学 能源与动力工程学院, 成都 610039; 2.四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都 610065; 3.南方丘陵山区节水农业研究四川省重点实验室, 成都 610066)

摘要:【目的】为了研究不同微灌方式下水分调控对猕猴桃叶片光合特性及产量的影响,以“翠玉”猕猴桃为研究试材。【方法】采用小管出流(X)、微喷灌(P)和滴灌(D)3种灌溉方式在猕猴桃全生育期实施85%灌水量的轻度亏水(LD)、70%灌水量的中度亏水(MD1)、55%灌水量的偏重度亏水(MD2)和40%灌水量的重度亏水(SD)处理,并设置100%灌水量的对照组(CK),研究了猕猴桃叶片胞间CO₂摩尔分数(C_i)、净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)、羧化速率(CE)、瞬时水分利用效率(WUE_i)、产量及产量水分利用效率(WUE_{ET})在不同水分亏缺下的变化。【结果】与CK相比,D-MD1处理的日均WUE_i及CE分别提高了8.5%和2.7%。P-MD1处理的日均P_n与CE较CK分别提高了10.7%和10.4%,X-MD1处理的日均C_i、P_n、CE较CK分别提高了10.9%、12.2%和11.4%。D、P和X三个处理的WUE_{ET}均较CK有不同程度的提高,但D、P和X的产量随着水分的亏缺程度的加大而下降,而滴灌各处理间无显著性差异。与CK相比D-MD1、P-MD1、X-MD1处理的产量分别提高了1.4%、1.6%、2.3%,重度亏水处理的产量显著低于其余水分处理,且其他各处理间无显著性差异。MD1处理在不降低产量的情况下,可以节约灌水同时提高WUE_{ET},重度亏水与偏中度亏水间在WUE_{ET}无显著性差异,同时X-MD1的产量均高于其他处理。【结论】X-MD1处理是“翠玉”猕猴桃较为合适的灌溉水分亏缺模式。

关键词:灌溉方式; 亏水处理; 猕猴桃; 光合特性; 生理指标

中图分类号: S275.6

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.gggs.20190223

甘雨康, 施浩然, 崔宁博, 等. 不同灌溉方式下水分调控对猕猴桃光合特性及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(4): 17-25.

GAN Yuwei, SHI Haoran, CUI Ningbo, et al. Effects of Water Regulation on Photosynthetic Characteristics and Yield of Kiwifruit Leaves under Different Micro-irrigation Methods [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(4): 17-25.

0 引言

中国是猕猴桃种植面积最大的国家,种植面积为14.8万hm²,年产量105.8万t^[1]。中国已形成4大猕猴桃产区,四川龙门山一带则被证实为猕猴桃的最佳产区,且尤以蒲江最为典型,形成了以绿色生态为优势的“佳沃”猕猴桃种植基地。但不科学的灌水方式,不仅浪费水资源而且导致果树产量与果实品质的下滑,严重制约了猕猴桃产业的发展。因此,寻找合适的灌溉模式提高猕猴桃品质与产量变得尤为重要。研

究表明^[2]微灌是果树较适宜的灌溉方式,具有显著的提质增效的效果。任玉忠等^[3]研究,结果表明,滴灌和微灌较地面灌节水49%,同时也显著的提高了果树的产量与品质。

调亏灌溉主要是根据作物的遗传、生理生态及需水特征,在不影响作物正常生长情况下,人为主动对作物施加适量水分亏缺,从而达到增产与节水的目的^[4]。杨文新等^[5]的研究表明在保证水稻高产的同时控制灌水量,提高灌溉水分利用效率。谭娟等^[6]的研究得出,灌溉能有效提高甘蔗叶片净光合速率。马守臣等^[7]的研究结果表明时空亏缺灌溉模式均显著提高了小麦灌溉水利用效率和水分利用效率。向东等^[8]的研究结果表明地下滴灌的节水效果显著高于沟灌和滴灌,而在地下滴灌试验的比较中,当每次注射水量0.75L时,西红柿的产量最高。冯泽洋等^[9]认为适度的水分亏缺会对植株的生长有促进作用,但重度水分亏缺处理对植株的生长有抑制作用。李光永等^[10]研究

收稿日期: 2019-05-13

基金项目: “十三五”国家重点研发计划课题(2016YFC0400206); 国家自然科学基金项目(51779161); “十二五”国家科技支撑计划课题(2015BAD24B01); 中央高校基本科研业务费专项资金(2018CDPZH-10、2016CDDY-S04-SCU, 2017CDLZ-N22); 流体及动力机械教育部重点实验室学术培育项目

作者简介: 甘雨康(1995-), 主要研究方向为节水灌溉理论与新技术。E-mail: 1148446088@qq.com

通信作者: 崔宁博(1981-), 教授, 主要研究方向为节水灌溉理论与新技术。E-mail: cuiningbo@126.com

发现与充分灌溉相比,调亏灌溉对产量没有显著影响,但灌水量减少了 32%,并有效的抑制了枝条的生长。

虽然国内外学者对不同的微灌方式和不同的水量亏缺均有研究,但是对不同的微灌方式及不同的亏缺形式研究较少,所以本文针对猕猴桃在不同微灌方式及不同水量亏缺下猕猴桃叶片的光合特性和产量,揭示不同的灌溉方式下不同的水量亏缺猕猴桃叶片光合特性的影响机制,为成都蒲江地区猕猴桃种植提供一定理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验在四川省成都市蒲江县复兴乡联想控股佳沃农业集团战略合作基地开展,试验园区土壤类型主要为红壤土和黄壤土,平均土壤体积质量为 1.27 g/cm^3 ,田间持水率约为 23.18%,饱和持水率为 40.53%,有效持水率为 18.75%。试验区属亚热带湿润季风气候区,年平均气温 16.3°C ,年平均降雨量 $1\,196.8 \text{ mm}$ 。

1.2 试验设计

试验以翠玉猕猴桃为研究材料,生育期为每年 3 月下旬—10 月上旬,根据其主要生育特征,将其划分为 4 个生育期,萌芽期(3 月下旬—4 月上旬),花期坐果期(4 月上旬—5 月上旬),果实膨大期(5 月上旬—6 月下旬),成熟期(6 月上旬—10 月上旬)。试验区果树等间距布置,株距为 $4.4\sim 4.5 \text{ m}$,列距为 $4.9\sim 5.2 \text{ m}$,株高 $180\sim 478 \text{ cm}$,株径 $6\sim 10 \text{ cm}$;果树沿列分 2 枝杆生长,一般为 $2.9\sim 3.0 \text{ m}$,列间方向伸展为 $3.3\sim 3.5 \text{ m}$ 。

本试验采用 3 种微灌方式(小管出流、滴灌、微喷灌)4 种亏水处理(85%灌水的轻度亏水(LD)、70%灌水的中度亏(MD1)、55%灌水的偏重度亏水(MD2)和 40%灌水的重度亏水(SD))及 100%灌水的对照组(CK),灌水施肥采用水肥一体化且每个处理施肥量相同。试验中的猕猴桃施肥量均按安杰农业有限公司的水溶肥配方,每次施肥均在干管进口采用水肥一体化设备施加。灌水时在各株树间使用精确水量表进行调控。耗水量采用水量平衡法计算:

$$ET=I-P_r+U-R_f-D+W_0-W_f, \quad (1)$$

式中: ET 为果树耗水量 (mm); I 为灌水量 (mm); P_r 为有效降雨量 (mm); U 为地下水补给量 (mm); R_f 为地表径流量 (mm); D 为深层渗漏量 (mm); W_0 和 W_f 分别为初始时段和最后时段的土壤储水量 (mm)。试验在避雨棚内进行,且地下水超过深度 4 m 所以忽略地下水补给和深层渗漏及试验前后土壤含水率的变化,故 $P_r=0$, $R_f=0$, $U=0$, $D=0$ 。因此,式(1)可以简化为:

$$ET=I+W_0-W_f, \quad (2)$$

即灌水量约等于耗水量。猕猴桃灌水量如表 1 所示。

表 1 猕猴桃灌水量

Table 1	Lekiwi irrigation amount			mm
亏缺程度 Deficiency degree	微喷灌 Micro spray irrigation	小管出流/ Tubules flow	滴灌 Drip irrigation	CK
轻度亏水 (LM)				
Mild water deficit	660	660	660	776
中度亏水				
(MD1)Moderate	543	543	543	
water deficit				
偏重度亏水				
(MD2)Excess water	426	426	426	
重度亏水(SD)				
Severe water deficit	310	310	310	

叶片瞬时水分利用效率计算式为:

$$WUE_i=P_n/T_r, \quad (3)$$

式中: WUE_i 为瞬时水分利用效率 ($\mu\text{mol}/\text{mmol}$); P_n 为净光合速率 ($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{ s})$); T_r 为蒸腾速率 ($\text{mmol}/(\text{m}^2 \text{ s})$)。

羧化速率计算式为:

$$CE=P_n/C_i, \quad (4)$$

式中: CE 为羧化速率 ($\text{mol}/(\text{m}^2 \text{ s})$); C_i 为胞间 CO_2 摩尔分数 ($\mu\text{mol}/\text{mol}$)。

1.3 指标测定

第 4 生育期的中期 8 月 25 日(天气晴朗云层很薄,适合测量猕猴桃叶片的光合特性)用全自动便携式光合仪(LCPro-SD,英国 ADC)从 08:00—18:00 测定了叶片的光合特性。叶片光合特性测定方法:各处理中选择具有代表性的 6 片叶子,每片叶子测量 2 次。测定光合特性主要包括胞间 CO_2 摩尔分数(C_i)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)及净光合速率(P_n)。产量测量通过电子天平称取。采用 IBM SPSS Statistics 19 程序比较均值中的单因素变量法进行数据分析,多重比较采用 Duncan 法。

2 结果与分析

2.1 滴灌的光合特性

图 1(a)—图 1(f)为滴灌不同水分亏缺处理“翠玉”猕猴桃叶片光合特性日变化图。如图 1(a)所示,滴灌叶片净光合速率(P_n)日变化呈双峰状,日变化范围在 $1\sim 5 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{ s})$,轻度亏缺(LD)处理的日均净光合均高于其他处理。滴灌日均量 P_n 在不同的水分亏缺下表现为 MD2 处理>CK>MD1 处理>SD 处理>LD 处理。如图 2(b)所示,胞间 CO_2 摩尔分数(C_i)日变化呈“V”形,日变化范围在

250~380 $\mu\text{mol}/\text{mol}$ ，滴灌日均量 G_s 在不同的水分亏缺下表现为 MD2 处理>CK>MD1 处理>SD 处理>LD 处理。由图 1 (c) 可知，滴灌“翠玉”猕猴桃叶片气孔导度 (G_s) 日均呈“V”曲线变化日变化范围在 0.15~0.33 $\text{mmol}/(\text{m}^2 \text{s})$ 。 G_s 在不同的水分亏缺下表现为 CK>MD2 处理>MD1 处理>LD 处理>SD 处理。则适当的水量亏缺会对 G_s 有促进作用，而随着水量亏缺的增大会对叶片的气孔导度有抑制作用，滴灌日均量 G_s 在不同的水分亏缺下表现为 CK>MD2 处理>LD 处理>MD1 处理>SD 处理。由图 1 (d) 可知，叶片蒸腾速率 (T_r) 日均呈单峰形式，曲线变化日变化范围在 1.3~3.5 $\text{mmol}/(\text{m}^2 \text{s})$ 。在不同的水分亏缺

下表现为 CK>MD2 处理>SD 处理>MD1 处理>LD 处理。由图 1 (e) 可知， WUE_i 呈“V”形，曲线变化日变化范围在 0.5~2.5 $\mu\text{mol}/\text{mmol}$ 。滴灌日均 WUE_i 在不同的水分亏缺下表现为 MD1 处理>MD2 处理>SD 处理>LD 处理>CK。由图 1 (f) 可知，滴灌羧化速率 (CE) 呈“M”形式，曲线变化日变化范围在 0.002~0.016 $\text{mol}/(\text{m}^2 \text{s})$ 。羧化速率先增大，达到第 1 个小高峰随后光强和温度增加导致叶片开度降低羧化反应也随之小幅降低。滴灌日均 CE 在不同的水分亏缺下表现为 MD1 处理>MD2 处理>SD 处理>CK>LD 处理。

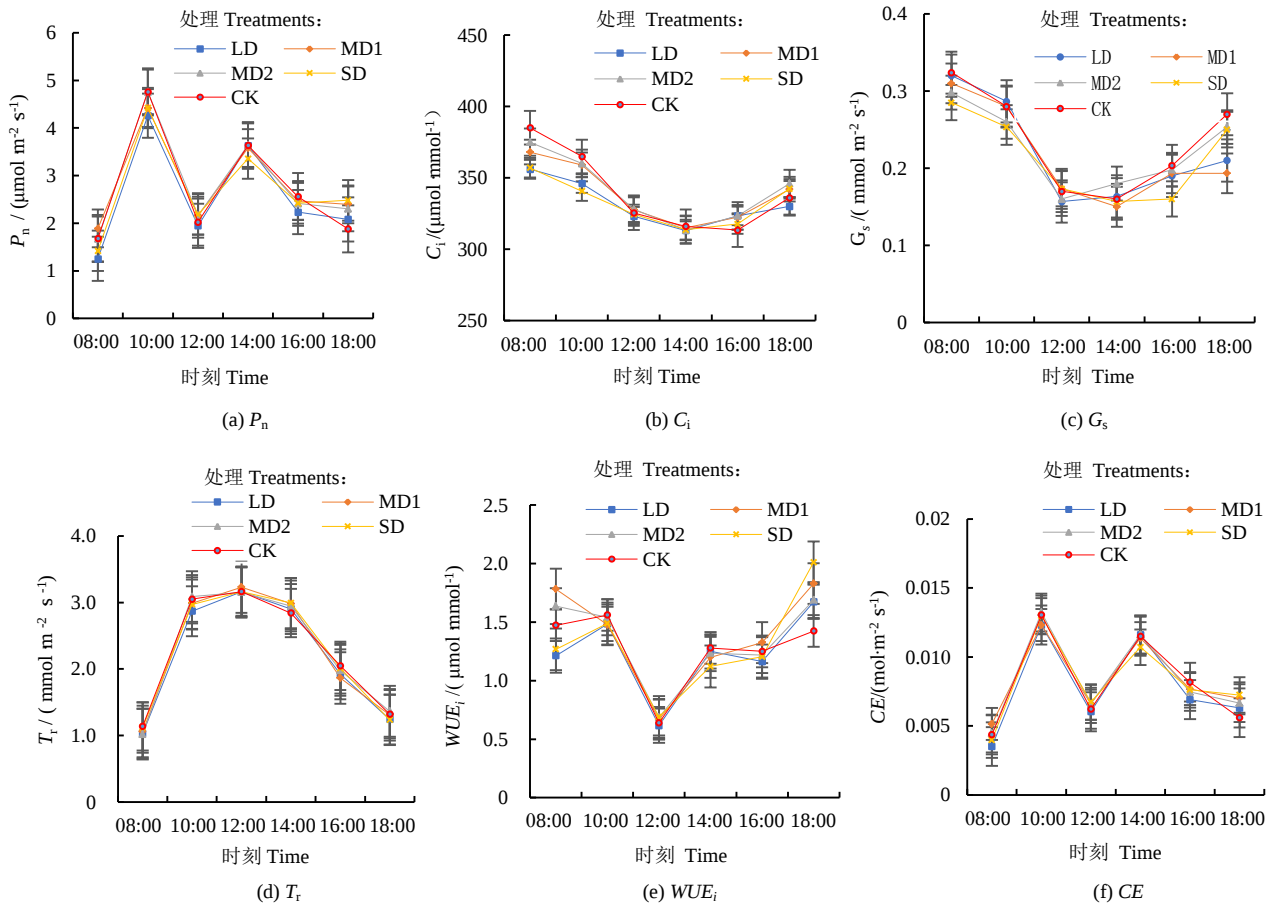


图 1 滴灌光合特性

Fig.1 Photosynthetic characteristics of drip irrigation

2.2 微喷灌光合特性

图 2 (a) 可知，微喷灌日均 P_n 不同的水分亏缺下表现为 MD1 处理>LD 处理>MD2 处理>CK>SD 处理。如图 2 (b) 所示，微喷灌日均 C_i 在不同的水分亏缺下表现为 CK>MD1 处理>SD 处理>MD1 处理>LD 处理。由图 2 (c) 可知，微喷灌日均 G_s 不同的水分亏缺下表现为 MD1 处理>LD 处理>MD2 处理>CK>SD 处理。由图 2 (d) 可知，微喷灌 T_r 在不

同的水分亏缺下表现为 MD2 处理>CK>MD1 处理>LD 处理>SD 处理。由图 2 (e) 可知，微喷灌日均瞬时水分利用效率 (WUE_i) 不同水分亏缺下表现为 LD 处理>MD2 处理>SD 处理>MD1 处理>CK。由图 2 (f) 可知，微喷灌羧化速率 (CE) 日均不同水分亏缺下表现为 MD1 处理>LD 处理>MD2 处理>CK>SD 处理。

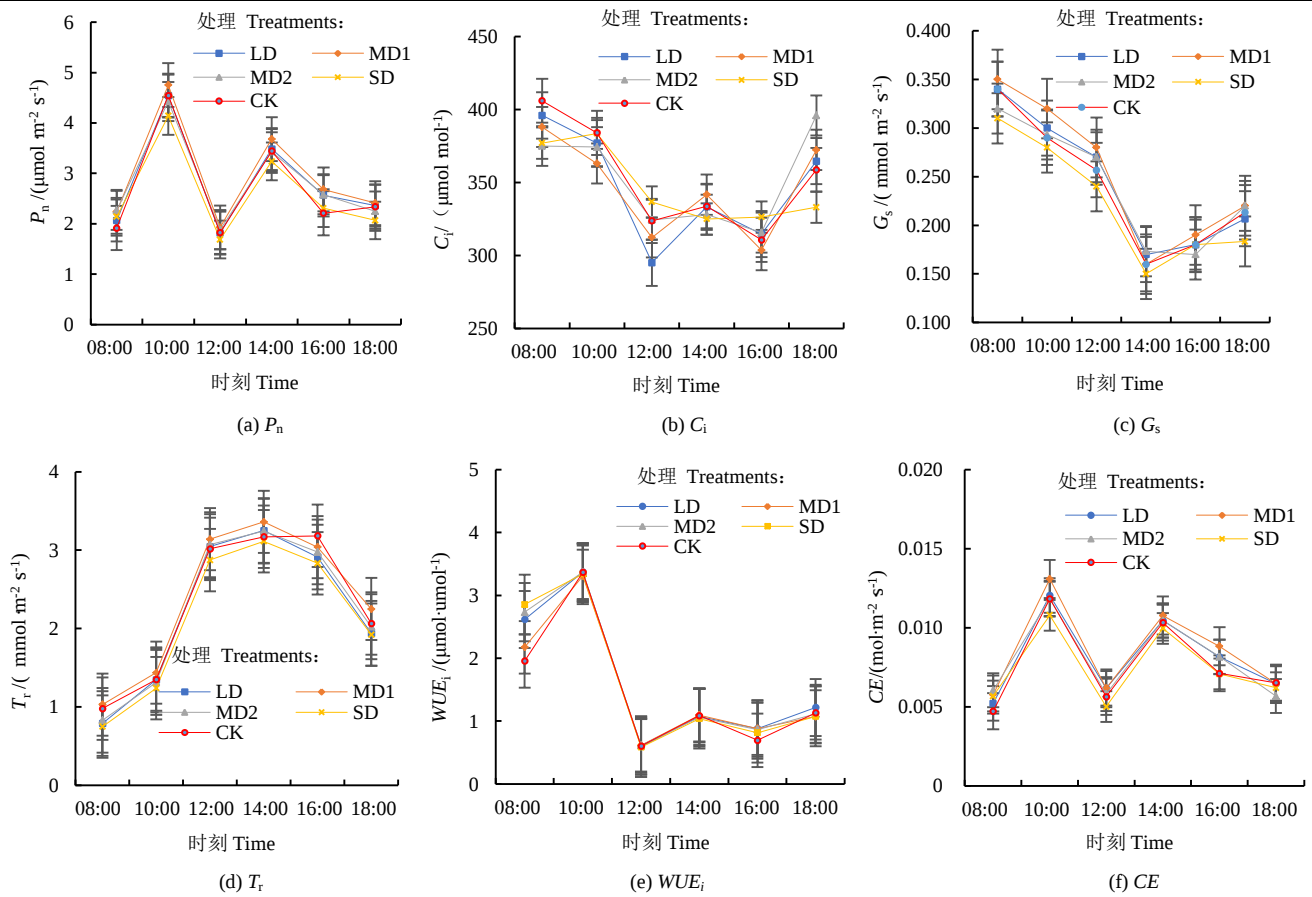


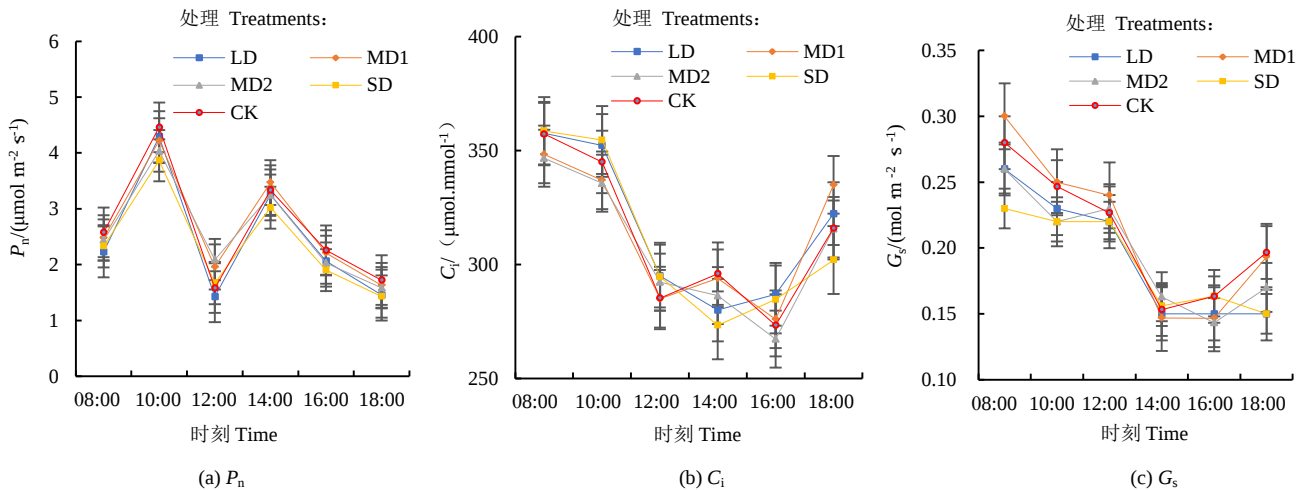
图2 微喷灌光合特性

Fig. 2 Photosynthetic characteristics of micro-sprinkler irrigation

2.3 小管出流光合特性

如图3(a)可知,小管出流日均 P_n 不同的水分亏缺下表现为MD1处理>CK>MD2处理>LD处理>SD处理。如图3(b)所示,小管出流日均 C_i 在不同的水分亏缺下表现为MD1处理>LD处理>CK>MD2处理>SD处理。由图3(c)可知,小管出流日均 G_s 不同的水分亏缺下表现为CK>MD1处理>MD2处理>LD处理>SD处理。由图3(d)可知,小管出流

T_r 在不同的水分亏缺下表现为CK>MD1处理>LD处理>MD2处理>SD处理。由图3(e)可知,小管出流日均瞬时水分利用效率(WUE_i)不同水分亏缺下表现为MD2处理>MD1处理>LD处理>CK>SD处理。由图3(f)可知,小管出流羧化速率(CE)日均不同水分亏缺下表现为MD1处理>CK>MD2处理>LD处理>SD处理。



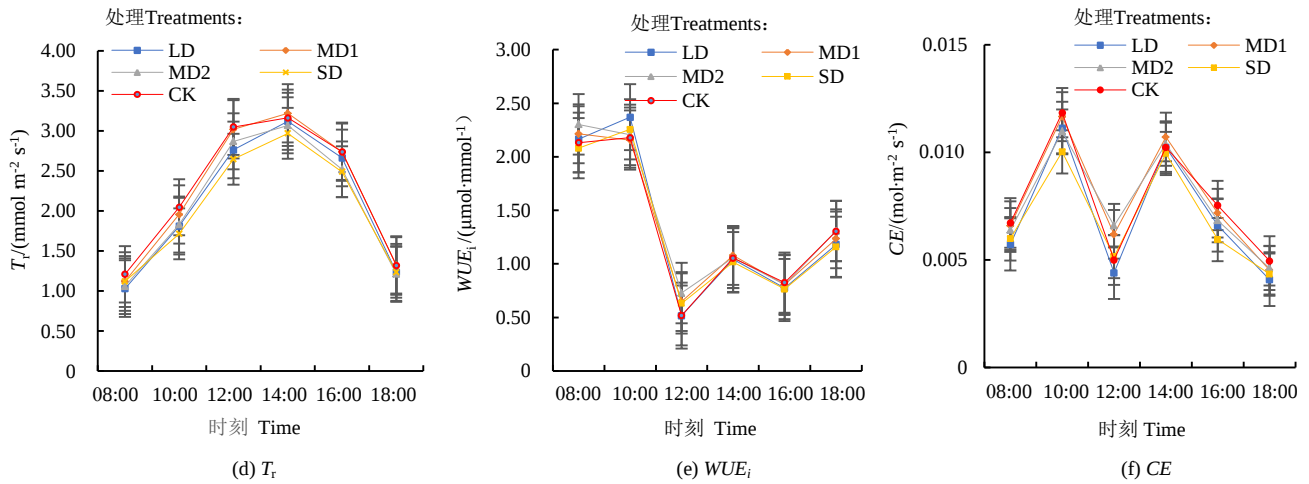


图3 小管出流光合特性

Fig.3 Characteristics of the discharge discharge of tubules

表 2 为不同微灌形式不同水分亏缺处理对翠玉猕猴桃光合特性的影响。由表 2 可知，与 CK 相比 X-SD 处理日均净光合速率(P_n)、日均气孔导度(G_s)、日均蒸腾速率(T_r)及羧化速率(CE)分别降低了 11.0%、10.0%、10.2%、10.6%。与 CK 相比 P-MD1 处理日均 P_n 、 G_s 、 CE 分别提高了 8.9%、5.4%、10.8%。滴灌日均光合特性的各处理与 CK 均无显著性差异。

表 2 滴灌水分亏缺处理翠玉猕猴桃光合特性

Table 2 Effects of water deficit treatment by drip irrigation on photosynthetic characteristics of kiwifruit

灌溉方式 Irrigation method	处理 Treatments	$C_i/(\mu\text{mol mol}^{-1})$	$P_n/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{ s}^{-1})$	$G_s/(\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1})$	$T_r/(\text{mmol m}^{-2}\text{ s}^{-1})$	$WUE_i/(\mu\text{mol}\cdot\text{mmol}^{-1})$	$CE/(\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1})$
滴管 Drip irrigation	X-LD	348.00±14.1a	2.45±0.0456ab	0.193±0.00201b	2.10±0.355ab	1.34±0.0308ab	0.00703±0.0012b
	X-MD1	341.00±11.5ab	2.66±0.0613a	0.212±0.00250a	2.23±0.365a	1.36±0.0275ab	0.00781±0.0011a
	X-MD2	337.00±13.7b	2.57±0.0702a	0.198±0.00186ab	2.09±0.349ab	1.40±0.0282a	0.00763±0.0010a
	X-SD	342.00±14.8ab	2.37±0.0766b	0.190±0.00151b	2.03±0.318b	1.32±0.0280b	0.00690±0.0010c
	CK	342.00±13.8ab	2.66±0.0436a	0.211±0.00201a	2.26±0.351a	1.34±0.0280ab	0.00771±0.0011ab
微喷灌 Micro-sprinkler irrigation	P-LD	347.00±15.8b	2.81±0.208b	0.244±0.0028b	2.21±0.206bc	1.63±0.0451a	0.00809±0.00012ab
	P-MD1	347.00±13.7b	2.95±0.218a	0.253±0.0031a	2.38±0.198a	1.52±0.0418b	0.00852±0.00012a
	P-MD2	352.00±13.7a	2.81±0.194b	0.241±0.0026b	2.24±0.208b	1.63±0.0464a	0.00800±0.00011b
	P-SD	347.00±10.7b	2.60±0.165c	0.224±0.0026c	2.12±0.199c	1.62±0.0477ab	0.00745±0.0001c
	CK	353.00±15.1a	2.71±0.218ab	0.24±0.0027b	2.29±0.168ab	1.47±0.0426b	0.00769±0.00011bc
小管出流 Tubular-outflow	D-LD	332.00±6.57b	2.57±0.232c	0.221±0.0027b	2.19±0.187b	1.23±0.00146b	0.00778±0.00017c
	D-MD1	339.00±8.63ab	2.82±0.198a	0.217±0.0026bc	2.24±0.194ab	1.38±0.00175a	0.00835±0.00014a
	D-MD2	341.00±9.64a	2.83±0.235a	0.225±0.0022ab	2.26±0.191a	1.33±0.00153ab	0.00834±0.00017ab
	D-SD	333.00±6.84ab	2.71±0.213b	0.213±0.0023c	2.25±0.189ab	1.30±0.00178ab	0.00821±0.00016ab
	CK	340.00±11.79ab	2.76±0.246ab	0.235±0.0027a	2.26±0.181a	1.27±0.00135ab	0.00815±0.00017b

注 不同小写字母表示同列差异显著 ($P<0.05$)。

Note different lowercase letters indicate significant difference in the same column ($P<0.05$)。

2.4 不同灌水方式水分亏缺产量及水分利用效率

由表 3、表 4 可知，不同的水量亏缺对猕猴桃产量影响较大，当水分亏缺较严重时会使猕猴桃大幅度

减产，但随着亏水度加大猕猴桃水分利用效率会有一定程度提高。微喷灌轻度缺水(LD)、中度缺水(MD1)、偏中度缺水(MD2)、重度缺水(SD)处理产量比 CK

分别提高了 1.5%、0.73%、5.46%、23.63%，滴灌 LD、MD1、MD2、SD 处理较 CK 分别提高了 0.1%、-3%、3.8%、15.7%。亏水程度较轻微灌产量差别小，亏水程度较大时不同微灌下产量相差较大。表明适量水分亏缺对猕猴桃的产量影响较小，过度水分亏缺对猕猴桃的产量有抑制作用。D-MD1 处理产量分别较 D-LD、D-MD2、D-SD、CK 提高了 2.4%、11.9%、35.3%、1.3%，X-MD1 处理产量分别较 X-LD、X-MD2、X-SD、CK 提高了 -0.4%、8.3%、56%、1.3%，P-MD₁ 处理产量分别较 P-LD、P-MD2、P-SD、CK 提高了 0.4%、4.2%、28.4%、2.8%。在微灌中不同的水分亏缺水利用效率 (WUE_{ET}) 呈现先增大再较小的趋势，可见随着耗水量的增加 WUE_{ET} 更加敏感，先于产量达到最大值。表 4 重度亏水与其他亏水处理存在显著性差异，但是其他处理间无显著性差异。 WUE_{ET} 中重度亏水与偏中度亏水间无显著性差异，其他各处理间存在显著性差异。

表 3 不同的微灌方式产量及水分利用效率

Table 3 Yield and water use efficiency of different micro-irrigation methods

处理 Treatments	耗水量 Water Consumption/mm	产量 Yield/ (kg hm ⁻²)	$WUE_{ET}/$ (kg m ⁻³)
D-LD	652.4	12 515.1	1.334
D-MD1	524.0	12 833.25	1.633
D-MD2	422.2	11 472.9	1.812
D-SD	308.4	9 488.1	2.051
X-LD	644.2	12 819.45	1.327
X-MD1	519.6	12 864.75	1.651
X-MD2	411.9	11 839.8	1.916
X-SD	296.7	8 198.1	1.842
P-LD	636.9	13 010.85	1.362
P-MD1	534.9	12 958.2	1.615
P-MD2	412.4	12 486.45	2.019
P-SD	308.1	10 136.7	2.193
CK	731.8	12 657.9	1.153

表 4 不同水量亏缺处理产量与水分利用效率

Table 4 Yield and WUE_{ET} under different water deficit

处理 Treatments	产量 Yield/ (kg hm ⁻²)	$WUE_{ET}/$ (kg m ⁻³)
LD	12 781.8 ± 249.9a	1.291 ± 0.0254c
MD1	12 885.45 ± 64.95a	1.574 ± 0.0155b
MD2	11 932.95 ± 376.5a	1.866 ± 0.0809a
SD	9 282.9 ± 986.7b	1.992 ± 0.212a
CK	12 657.9 ± 0.000a	1.086 ± 0.000d

3 讨论

3.1 不同微灌溉方式下不同的水量亏缺复水前后猕猴桃光合特性的影响

通过试验分析了微喷灌、小管出流和滴灌 C_i 均有显著性差异 ($P < 0.05$)。小管出流与微喷灌在日均 C_i 相对于滴灌有不同程度提高。滴灌、小管出流和微喷灌日均 C_i 随着水分亏缺程度的加大而不断的降低。净光合作用是植物进行物质储存的唯一通道，净光合作用的大小直接关系到植物果实产量与品质^[27]。气孔是植物叶片与外界气体进行交换的主要通道，通过气孔开闭可以达到控制光合作用过程中 CO_2 吸收和蒸腾作用中水分的散失，所以气孔导度的大小对果树产量与品质有直接关系^[28]。在小管出流、滴灌和微喷灌中日均气孔导度 (G_s) 中 MD1 处理的值均大于其他处理，则适当的水量亏缺会对 G_s 有促进作用，而随着水量亏缺的增大会对叶片的气孔导度有抑制作用。蒸腾速率是表征植物水分散失的主要参数，而水是参与光合作用的必要条件，所以蒸腾速率将直接影响光合强度从而影响有机物的积累。本试验通过在不同的微灌溉模式及不同的水量亏缺程度对比试验得出微喷灌较小管出流及滴灌分别有不同程度的提高。MD1 处理在小管出流和微喷灌中都对蒸腾作用有促进作用使蒸腾速率增大。植物叶片羧化速率通常指植物单位时间内单位面积叶片能够固定的 CO_2 摩尔分数，它决定了植物的最大净光合速率，随外界环境条件变化而变化^[29-30]。试验结果表明，微灌 MD1 羧化速率在微灌中均高于其他亏水处理。 WUE_i 是光合速率 P_n 与蒸腾速率 T_r 的比值，则 WUE_i 的增大表示植物的水分利用效率的提高。

3.2 不同的灌水方式下不同的水量亏缺对猕猴桃产量及水分利用效率的影响

本试验研究表明当在水分亏缺程度较低时灌溉方式对猕猴桃的产量影响较小，但过量的水分亏缺下 (SD) 处理小管出流较微喷灌及滴灌分别降低了 23.6%、15.7%。不同的水分亏缺中，MD1 处理产量较高， WUE_{ET} 也处于各处理的前列。

武阳等^[31]对香梨进行研究表明实施适时、适量调亏灌溉可以增产，提高灌溉水利用效率。这和本研究所得出的结论相似（在微喷灌以及在小管出流中 LD 处理的产量以及品质均高于 CK 以及 LD 处理。在水分亏缺中轻度缺水及中度缺水明显高于偏中度缺水以及重度缺水，且和 CK 相差较小。则当水分亏缺程度适量的时候水量的亏缺对猕猴桃的产量影响较小，但是 WUE_{ET} 较 CK 有较大的提高。

4 结 论

1) 滴灌下瞬时水分利用效率 (WUE_i) 及羧化速率 (CE) MD1 处理均大于其他处理, 则在滴灌下适量的水分亏缺对水分利用效率及羧化速率提高。

2) 微喷灌下净光合速率与羧化速率下 MD1 处理在各处理上均是最大的, 则在微喷灌下适量的水分对净光合速率及羧化速率有提高。

3) 小管出流 MD1 处理在胞间 CO_2 摩尔分数、净光合速率及羧化速率均大于其他处理, 则小管出流 MD1 处理对 C_i 、 P_n 及 CE 有较大提高。

4) 在产量与水分利用效率下, 产量最高的是微喷灌轻度亏水, 水分利用效率最高的是微喷灌重度亏水处理。

参考文献:

- [1] 翟金良. 我国猕猴桃产业存在的问题及发展对策[J]. 科技促进发展, 2015(4): 521-529.
ZHAI Jinliang. Problems and countermeasures of kiwifruit industry development in China[J]. Science & Technology for Development, 2015(4): 521-529.
- [2] 杨文莉, 李冰彬, 高彬, 等. 不同节水灌溉方式对‘美乐’果实品质及产量的影响[J]. 中外葡萄与葡萄酒, 2019(1): 1-5.
YANG Wenli, LI Bingbin, GAO Bin, et al. Effect of different water-saving irrigation methods on berry quality and yield of ‘Merlot’ grapevine[J]. Sino-Overseas Grapevine & Wine, 2019(1): 1-5.
- [3] 任玉忠, 王水献, 谢蕾, 等. 干旱区不同灌溉方式对枣树水分利用效率和果实品质的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 95-102.
REN Yuzhong, WANG Shuixian, XIE Lei, et al. Effects of irrigation methods on water use efficiency and fruit quality of jujube in arid area[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(22): 95-102.
- [4] 魏水霞, 马瑛瑛, 刘慧, 等. 调亏灌溉下滴灌玉米植株与土壤水分及节水增产效应[J]. 农业机械学报, 2018, 49(3): 252-260.
WEI Yongxia, MA Yingying, LIU Hui, et al. Effects of soil water, plant, water saving and yield increasing of maize under regulated deficit drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 252-260.
- [5] 杨文新, 王文君. 不同灌溉模式下水稻水分利用效率分析[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(S2): 40-44.
YANG Wenxin, WANG Wenjun. Analysis of water use efficiency under different irrigation and drainage modes[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(S2): 40-44.
- [6] 谭娟, 郭晋川, 吴建强, 等. 不同灌溉方式下甘蔗光合特性[J]. 农业工程学报, 2016, 32(11): 150-158.
TAN Juan, GUO Jinchuan, WU Jianqiang, et al. Photosynthetic characteristics of sugarcane under different irrigation modes[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(11): 150-158.
- [7] 马守臣, 张伟强, 段爱旺. 不同亏缺灌溉方式对冬小麦产量及水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(8): 9-14.
MA Shouchen, ZHANG Weiqiang, DUAN Aiwang. Effects of different deficit irrigation modes on grain yield and water use efficiency of winter wheat[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(8): 9-14.
- [8] 向东, 潘晓勇, 刘兆民, 等. 不同灌溉方式对大棚西红柿产量和品质的影响[J]. 中国农村水利水电, 2006(5): 30-33.
XIANG Dong, PAN Xiaoyong, LIU Zhaomin, et al. Influences of different irrigation methods on the production and quality of green house tomato[J]. China Rural Water and Hydropower, 2006(5): 30-33.
- [9] 冯泽洋, 李国龙, 李智, 等. 调亏灌溉对滴灌甜菜生长和产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(11): 7-12.
FENG Zeyang, LI Guolong, LI Zhi, et al. Effects of regulated deficit drip irrigation on growth and yield of sugar beet[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(11): 7-12.
- [10] 李光永, 王小伟, 黄兴法, 等. 充分灌与调亏灌溉条件下桃树滴灌的耗水量研究[J]. 水利学报, 2001, 32(9): 55-58, 63.
LI Guangyong, WANG Xiaowei, HUANG Xingfa, et al. Study on water use of drip irrigated peach tree under the conditions of fully irrigated and regulated deficit irrigation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 32(9): 55-58, 63.
- [11] 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.
- [12] 王唯道, 刘小军, 田永超, 等. 不同土壤水分处理对水稻光合特性及产量的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(22): 7 053-7 060.
WANG Weixiao, LIU Xiaojun, TIAN Yongchao, et al. Effects of different soil water treatments on photosynthetic characteristics and grain yield in rice[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(22): 7 053-7 060.
- [13] 翁晓燕, 陆庆, 蒋德安. 水稻 Rubisco 活化酶在调节 Rubisco 活性和光合日变化中的作用[J]. 中国水稻科学, 2001, 15(1): 35-40.
WENG Xiaoyan, LU Qing, JIANG De'an. Rubisco activase and its regulation on diurnal changes of photosynthetic rate and the activity of ribulose 1, 5 biphosphate carboxyase/oxygenase(rubisco)[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2001, 15(1): 35-40.
- [14] 李天来, 李森. 短期昼间亚高温胁迫对番茄光合作用的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9): 220-225.
LI Tianlai, LI Miao. Effect of short-term daytime sub-high temperature stress on photosynthesis of tomato leaves[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(9): 220-225.
- [15] 李发永, 劳东青, 孙三民, 等. 滴灌对间作枣棉光合特性与水分利用的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 119-129.
LI Fayong, LAO Dongqing, SUN Sanmin, et al. Effects of drip irrigation on photosynthetic characteristics and water use efficiency of

- jujube-cotton intercropping system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12): 119-129.
- [16] 吴立峰, 杨秀霞, 燕辉. 水分亏缺对苗期玉米生理特性的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2017, 35(12): 1 069-1 074.
- WU Lifeng, YANG Xiuxia, YAN Hui. Effects of water deficit on physiological characteristics at seedling stage of maize[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2017, 35(12): 1069-1074.
- [17] RAFI Z N, KAZEMI F, TEHRANIFAR A. Effects of various irrigation regimes on water use efficiency and visual quality of some ornamental herbaceous plants in the field[J]. Agricultural Water Management, 2019, 212: 78-87.
- [18] 张彦敏, 周广胜. 植物叶片最大羧化速率及其对环境因子响应的研究进展[J]. 生态学报, 2012, 32(18): 5 907-5 917.
- ZHANG Yanmin, ZHOU Guangsheng. Advances in leaf maximum carboxylation rate and its response to environmental factors[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(18): 5 907-5 917.
- [19] LI H, YANG X Z, CHEN H J, et al. Water requirement characteristics and the optimal irrigation schedule for the growth, yield, and fruit quality of watermelon under plastic film mulching[J]. Scientia Horticulturae, 2018, 241: 74-82.
- [20] 房全孝, 陈雨海, 李全起, 等. 灌溉对冬小麦水分利用效率的影响研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(4): 34-39.
- FANG Quanzhao, CHEN Yuhai, LI Quanyi, et al. Effect of irrigation on water use efficiency of winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004, 20(4): 34-39.
- [21] 江天然, 张立新, 毕玉蓉, 等. 水分胁迫对梭梭叶片气体交换特征的影响[J]. 兰州大学学报, 2001, 37(6): 57-62.
- JIANG Tianran, ZHANG Lixin, BI Yurong, et al. Effects of water stress on gas exchange characteristics of haloxylon ammodendron leaves[J]. Journal of Lanzhou University, 2001, 37(6): 57-62.
- [22] 许大全. 光合作用气孔限制分析中的一些问题[J]. 植物生理学通讯, 1997, 33(4): 241-244.
- XU Daquan. some problems in stomatal restriction analysis of photosynthesis [J]. Plant physiology communication, 1997(4): 241- 244.
- [23] 傅伟, 王天铎. 一个气孔对环境因子响应的机理性教学模型[J]. 植物生理学报, 1994, 20(3): 277-284.
- FU Wei, WANG Tianduo. A mechanistic model of stomatal responses to environmental factors[J]. Acta Phytophysiological Sinica, 1994, 20(3): 277-284.
- [24] 徐文婷, 苏德荣, 刘自学, 等. 地下滴灌条件下水钾耦合对紫花苜蓿的影响[J]. 中国草地学报, 2014, 36(3): 52-56.
- XU Wenting, SU Derong, LIU Zixue, et al. Effect of potassium coupled with water on alfalfa under drip irrigation[J]. Chinese Journal of Grassland, 2014, 36(3): 52-56.
- [25] 李新乐, 侯向阳, 穆怀彬. 不同降水年型灌溉模式对苜蓿草产量及土壤水分动态的影响[J]. 中国草地学报, 2013, 35(5): 46-52.
- LI Xinle, HOU Xiangyang, MU Huaibin. Effect of irrigation under different annual precipitation patterns modes on alfalfa yield and dynamic changes of soil moisture[J]. Chinese Journal of Grassland, 2013, 35(5): 46-52.
- [26] 陈凯利, 李建明, 贺会强, 等. 水分对番茄不同叶龄叶片光合作用的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(16): 4 919-4 929.
- CHEN Kaili, LI Jianming, HE Huiqiang, et al. Effects of water on photosynthesis in different age of tomato leaves[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(16): 4 919-4 929.
- [27] 朱慧森, 杜利霞, 韩兆胜, 等. 偏关苜蓿初花期光合特性及其与环境因子的关系[J]. 中国草地学报, 2015, 37(3): 43-47.
- ZHU Huisen, DU Lixia, HAN Zhaosheng, et al. Relationships between environmental factors and the photosynthetic characteristics of medicago sativa cv.Pianguan at early blooming stage[J]. Chinese Journal of Grassland, 2015, 37(3): 43-47.
- [28] GAO Z J, XU B C, WANG J, et al. Diurnal and seasonal variations in photosynthetic characteristics of switchgrass in semiarid region on the Loess Plateau of China[J]. Photosynthetica, 2015, 53(4): 489-498.
- [29] FARQUHAR G D, VON CAEMMERER S, BERRY J A. A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C3 species[J]. Planta, 1980, 149(1): 78-90.
- [30] WULLSCHLEGER S D. Biochemical limitations to carbon assimilation in C3Plants—a retrospective analysis of the A/CiCurves from 109 species[J]. Journal of Experimental Botany, 1993, 44(5): 907-920.
- [31] 武阳, 孙明德, 刘军, 等. 施氮深度对‘黄金梨’树氮素吸收、分配及利用效率的影响[J]. 园艺学报, 2017, 44(11): 2 171-2 178.
- WU Yang, SUN Mingde, LIU Jun, et al. The influences of different fertilization depth on the nitrogen absorption, distribution and utilization of ‘hwangkumbae’ pear trees[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2017, 44(11): 2 171-2 178.

Effects of Water Regulation on Photosynthetic Characteristics and Yield of Kiwifruit Leaves under Different Micro-irrigation Methods

GAN Yukang¹, SHI Haoran¹, CUI Ningbo^{2, 3*}, KANG Jiahui¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xihua University, Chengdu 630039, China;

2. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Development and Protection, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

3. Key Laboratory of Water-saving Agriculture in Southern Hilly Region, Chengdu 610066, China)

Abstract: **【Objective】** The purpose of this study is to investigate the different ways of micro-irrigation under the influence of moisture regulation of kiwi fruit leaf photosynthetic characteristics and yield. **【Method】** With “jade” kiwi fruit as the research material, using small pipe flow (X), micro sprinkler irrigation (P) and drip irrigation (D) three irrigation methods in kiwi 85% implementation of irrigation water in the whole stages of mild water deficit (LD), 70% of moderate water deficit irrigation water (MD1), 55% of irrigation water on the degree of water deficit (MD2) and 40% of severe water deficit irrigation water (SD), and set up the 100% of irrigation water control (CK), the changes of intercellular CO_2 concentration (C_i), net photosynthetic rate (P_n), stomatal conductance (G_s), transpiration rate (T_r), carboxylation rate (CE), instantaneous water use efficiency (WUE_i), yield and water use efficiency (WUE_{ET}) of kiwifruit leaves under different water deficit were studied. **【Result】** Compared with CK, the average daily WUE_i and CE of d-md1 improved by 8.5% and 2.7%, respectively. The average daily P_n and CE of P-DM1 increased by 10.7% and 10.4%, respectively, compared with CK. The average daily C_i , P_n and CE of X-MD1 increased by 10.9%, 12.2% and 11.4%, respectively, compared with CK. WUE_{ET} of D, P and X3 treatments all improved to different degrees compared with CK, but the yield of D, P and X decreased with the increase of water deficit, while there was no significant difference among drip irrigation treatments. Compared with CK, the yield of D-MD1, P-MD1 and X-MD1 increased by 1.4%, 1.6% and 2.3%, respectively. The yield of severely deficient water treatment was significantly lower than that of other water treatments, and there was no significant difference among other treatments. **【Conclusion】** MD1 can save irrigation water and increase WUE_{ET} without reducing the yield. There is no significant difference between severe and moderate water deficit in WUE_{ET} , and the yield of X-MD1 is higher than that of other treatments. Therefore, X-MD1 is a more suitable irrigation water deficit model for kiwifruit of “jade”.

Key words: irrigation mode; water deficit treatment; kiwi fruit. photosynthetic characteristics; physiological indexes

责任编辑：白芳芳