

水分亏缺对滴灌柑橘光合和产量及水分利用效率的影响

张效星¹, 樊毅², 贾悦³, 崔宁博^{1,4*}, 赵璐¹, 胡笑涛⁵, 龚道枝⁶

(1. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室水利水电学院, 成都 610065; 2. 四川省水利科学研究所, 成都 610072; 3. 河北水利电力学院, 沧州 061001; 4. 南方丘陵区节水农业研究四川省重点实验室, 成都 610066; 5. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 杨凌 712100; 6. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所作物高效用水与抗灾减损国家工程实验室, 北京 100081)

摘要: 为揭示滴灌水分亏缺对柑橘叶片光合特性、产量与水分利用效率的调控效应, 以 7 a 生“不知火”柑橘为试材, 在果实膨大期 (III)、果实成熟期 (IV) 各设置 4 个亏水处理, 即轻度亏水 (LD)、中度亏水 (MD₁)、偏重度亏水 (MD₂) 和重度亏水 (SD) 处理, 并设置 1 个对照处理 (CK), 分析柑橘叶片光合特性、产量及水分利用效率对滴灌水分亏缺的响应规律。结果表明: 与 CK 相比, III-LD 处理叶片气孔导度显著降低 ($P < 0.05$), 羧化速率、净光合速率均无显著差异 ($P > 0.05$), IV-LD 处理蒸腾速率显著降低 ($P < 0.05$) 且叶片瞬时水分利用效率提高 36.61% ($P < 0.05$); 与 CK 相比, III 期、IV 期叶片气孔限制值随亏水度加剧增大; 与 CK 相比, III 期、IV 期各亏水处理的耗水量随亏水度加剧降低。III-LD、IV-LD 处理的产量与 CK 无显著差异 ($P > 0.05$), 但水分利用效率提高 13%、9.5%, WUE_i 提高 11% 和 6.87% ($P < 0.05$)。因此, 滴灌柑橘 III 期、IV 期轻度亏水处理在保证产量条件下, 可节约灌溉用水且提高水分利用效率, 是柑橘适宜的滴灌水分亏缺模式。

关键词: 光合特性; 灌溉; 叶片; 水分亏缺; 滴灌; 柑橘; 水分利用效率; 气孔与非气孔限制

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.03.019

中图分类号: S275.6

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2018)-03-0143-08

张效星, 樊毅, 贾悦, 崔宁博, 赵璐, 胡笑涛, 龚道枝. 水分亏缺对滴灌柑橘光合和产量及水分利用效率的影响[J].

农业工程学报, 2018, 34(3): 143-150. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.03.019 http://www.tcsae.org

Zhang Xiaoxing, Fan Yi, Jia Yue, Cui Ningbo, Zhao Lu, Hu Xiaotao, Gong Daozhi. Effect of water deficit on photosynthetic characteristics, yield and water use efficiency in *Shiranui citrus* under drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(3): 143-150. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.03.019 http://www.tcsae.org

0 引言

柑橘 (*Citrus reticulata* Blanco) 是中国最主要的水果之一。截止 2016 年, 中国柑橘种植面积 228.8 万 hm^2 、总产量达到 2 944.04 万 t, 均排名世界第一; 四川省是中国柑橘生产大省, 柑橘栽培面积 25.32 万 hm^2 , 年产量达 292.9 万 t。但近年来频发的季节干旱与粗放式水肥管理导致其品质较低、产量不稳定。滴灌是一种有效的节水灌溉方式, 灌溉水的有效利用率可达 90%, 已有大量研究证明滴灌是果树较适宜的灌溉方式, 具有显著的节水增产、提质增效的良好效果^[1-2]。

亏缺灌溉是基于根冠通信理论^[3]、生长冗余理论^[4]、生长补偿效应^[5]、气孔调节理论^[6]和作物有限水量最优分配理论^[7]发展起来的生理节水技术。研究表明, 亏水会导致作物叶片气孔关闭、光合速率 (P_n) 下降, 引起作物体

内的激素、可溶性物质含量的变化, 进而使其生长受到抑制^[3]; 当亏水度加剧时, 作物叶水势与叶面积均呈减小趋势, 并抑制新生梢生长, 且亏水时间越长影响越显著^[8]。Thomas 等^[9]表明, 亏水会促进苹果树根部脱落酸 (abscisic acid, ABA) 合成, Panigrahi 等^[10]发现, 轻度亏水处理下柑橘叶片 P_n 较对照仅降低 $0.03 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 叶片瞬时水分利用效率 (instantaneous water use efficiency of leaf, WUE_i) 提高 16%, P_n 的提高和蒸腾速率的降低是 WUE_i 提高的主要原因。Chang 等^[11]报道, 亏水处理 2 周后, 盆栽金钱橘光合指标均显著降低, 主要原因是水分亏缺造成叶片气孔开度降低。Gasque 等^[12]在 Navelina 橘的亏水试验中发现, 轻度亏水处理在节水 12%~27% 的同时并没有降低产量, 并指出当茎水势 (Ψ_{st}) 低于 -2.0 MPa 时亏水将对产量、品质带来不利影响。Rocuzzo 等^[13]发现在全生育期进行亏水处理可使柑橘 WUE_i 提高 13%~15%。Tejero 等^[14]发现节水超过 $1\ 000 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ (约 $3 \text{ m}^3/\text{棵}$) 时, 亏水处理会降低柑橘产量、影响果实品质。

作物受到水分胁迫时叶片光合速率减小, 通常认为光合能力降低的原因包括气孔限制与非气孔限制^[15]。光合气孔分析理论认为气孔限制的一个重要判据是胞间 CO_2 浓度 (C_i) 的降低方向, 并非 C_i 降低幅度^[16]。徐俊增等^[17]在水稻试验中发现亏水后叶片气孔限制值与非气

收稿日期: 2017-08-04 修订日期: 2017-12-10

基金项目: 国家科技支撑计划 (2015BAD24B01); 国家自然科学基金面上项目 (51779161); 中央高校基本科研业务费 (XSHZ201604); 2016 年四川省级财政项目 (平坝丘陵区经济作物高效节水灌溉技术集成研究与示范)

作者简介: 张效星, 研究方向为节水灌溉理论与新技术。

Email: 13281090829@163.com

*通信作者: 崔宁博, 副教授, 研究方向为节水灌溉理论与新技术。

Email: cuiningbo@126.com

孔限制值呈相反的变化规律。杨泽粟等^[18]将春小麦光午休现象的主要原因归因于气孔限制。然而,影响作物光合的主要因素是气孔限制还是非气孔限制不仅与作物基因型^[19]有关,还与土壤含水率、所在生育期^[20]、水分胁迫持续时长^[21]等密切相关,不同品种的同一种作物对水分胁迫的响应不同,气孔与非气孔限制之间的亏水度转变阈值也不同。目前国内关于柑橘光合的气孔与非气孔限制的研究少见报道。

本文目的是研究滴灌水分亏缺对柑橘叶片光合特性、产量及水分利用效率的调控效应,揭示滴灌水分亏缺对柑橘叶片光合特性的影响机制,为深入理解滴灌水分调控下柑橘叶片气孔响应规律与水分高效利用机制提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于2016年4月—2017年1月在四川省成都市蒲江县长林农场(海拔544 m, 30.32°N、103.43°E)进行,试验地土壤类型为黄壤土,平均容重为1.45 g/cm³,田间持水量为26.13%,土壤全氮质量分数为0.69 g/kg,有机质质量分数为9.32 g/kg,有效磷质量分数为4.6 mg/kg,速效钾质量分数为130 mg/kg。试验区位于成都平原腹地,属亚热带湿润季风气候区,年平均气温16.3 °C,平均相对湿度87.84%,年平均风速1.67 m/s,年平均降水量1 196.2 mm。

1.2 试验设计及过程

试验以7 a生“不知火”柑橘为试材,株高约2.8~3.0 m,径粗约10 cm,株行距为2.5 m×3.0 m,主要生育期划分为抽梢开花期(4月上旬—下旬, I期)、幼果期(5月上旬—6月下旬, II期)、果实膨大期(7月上旬—11月上旬, III期)和果实成熟期(11月中旬—次年1月下旬, IV期)。

按照土壤含水率的下限来控制灌水量可以达到较为准确的精度,但在指导实际的山丘区果树种植灌溉时,农户缺乏相应的仪器设备,而试验地土壤质地比较均一、土壤空间变异性较低,考虑到实际应用,本文通过控制灌水量来进行调亏灌溉。试验分别在III期、IV期设置轻度亏水、中度亏水、偏重度亏水和重度亏水处理,灌水量分别为对照(CK)的85%(LD)、70%(MD₁)、55%(MD₂)和40%(SD),设置1个对照处理(CK),灌水周期约为7~10 d,对照处理灌水量为100%,相当于90%的田间持水量。4个生育期各处理灌水量见表1。试验用肥均按照安杰农业有限公司的水溶肥配方施加,每次施肥均采用总干管进口处的水肥一体化设备操作。抽梢开花期N、P、K肥各施42.75 kg/hm²,幼果期分别施N、P、K肥19.50、55.50、19.50 kg/hm²,果实膨大期分别施N、P、K肥250.95、259.35、395.55 kg/hm²,果实成熟期分别施N、P、K肥84.00、203.70、235.50 kg/hm²。

试验采用低压滴灌水肥一体化系统,滴灌采用以色列进口Dripnet PC压力补偿式滴灌管,沿地面布设,滴灌管环形布置,每条滴灌管等间距内嵌20个迷宫式压力

补偿滴头,流量为1.6 L/h,试验每2棵树1个处理小区,每个处理2条毛管,支管进口设置阀门,且毛管流量为32.0 L/h;干管垂直支管布置,并在试验区进口设置精密水表。进行亏水处理试验组的试验时进行时间控制,当灌水时间乘以灌水流量等于灌水量时,关闭该处理的阀门,直至所有处理灌水结束。试验各小区用埋深1 m的硬塑料薄膜相隔,防止处理间侧向水分运移的影响,以3.6 m高透光薄膜电动防雨棚作为避雨设施,试验区地下水埋深12 m,地下水对试验无影响。其他田间管理措施均相同。

表1 滴灌试验各处理灌水量

Table 1 Irrigation amount for treatments during drip experiment m³·hm⁻²

| 处理 Treatments | 抽梢开花期 Heading and flowering stage | 幼果期 Young fruit stage | 果实膨大期 Fruit expansion stage | 果实成熟期 Fruit maturity stage | 总计 Total | |
|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------------|----------------------------|----------|--------|
| 无 None | CK | 127.50 | 165.00 | 273.00 | 210.00 | 775.50 |
| 果实膨大期 (III) Fruit expansion stage | 重度 SD | 127.50 | 165.00 | 109.50 | 210.00 | 612.00 |
| | 偏重度 (MD ₂) | 127.50 | 165.00 | 150.00 | 210.00 | 652.50 |
| | 中度 (MD ₁) | 127.50 | 165.00 | 190.50 | 210.00 | 693.00 |
| | 轻度 (LD) | 127.50 | 165.00 | 232.50 | 210.00 | 735.00 |
| 果实成熟期 (IV) Fruit maturity stage | 重度 SD | 127.50 | 165.00 | 273.00 | 84.00 | 649.50 |
| | 偏重度 (MD ₂) | 127.50 | 165.00 | 273.00 | 115.50 | 681.00 |
| | 中度 (MD ₁) | 127.50 | 165.00 | 273.00 | 147.00 | 712.50 |
| | 轻度 (LD) | 127.50 | 165.00 | 273.00 | 178.50 | 744.00 |

1.3 指标测定

分别在III、IV期亏水第6、7天(8月12日、11月15日,天气晴朗)08:00—18:00使用全自动便携式光合仪(LCPro-SD,英国ADC)测定叶片光合日变化、水汽压差(Δe)、光合有效辐射(photosynthetically active radiation, PAR)。通过试验基地小型自动气象站BO8-HOBO测定大气温度(T_a)和相对湿度(relative humidity, RH)。

叶片光合特性的测定方法:各处理选择具有代表性的4片叶子,测定其光合特性,包含胞间CO₂浓度(C_i)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(g_s)及净光合速率(P_n)。由于 g_s 降低,进入气孔的CO₂减少,不能满足光合作用的要求,用气孔限制值(L_s)来表示光合作用的气孔限制($L_s=1-C_i/C_a$, C_a 表示大气CO₂浓度);由于叶片温度增高,叶绿体活性与Rubisco活性降低、RuBP羧化酶再生能力降低,导致叶片光合作用能力降低,非气孔限制值用 C_i/g_s 来计算^[17]。

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 分别为时段初和时段末的土壤储水量, mm; 因为试验在避雨棚内进行,因此无降雨和径流量产生,忽略地下水补给和深层

渗漏, 故 $P_r=0$, $R_f=0$, $U=0$, $D=0$ 。因此, 式 (1) 可以简化为:

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

叶片瞬时水分利用效率计算公式为:

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

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, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$; T_r 为蒸腾速率, $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。

羧化速率计算公式为:

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

式中 CE 为羧化速率, $\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$; C_i 为胞间 CO_2 浓度, 10^{-6} 。

灌溉水利用效率 (WUE_i) 为产量与灌水量的比值, kg/m^3 ; 作物水分利用效率 (WUE_{ET}) 为产量与耗水量的比值, kg/m^3 。

各处理平均值之间的差异显著性采用 SPSS19.0 软件进行单因素方差 (analysis of variance, ANOVA) 分析, 文中图表在 Microsoft Excel2007 绘制。

2 结果与分析

2.1 环境因子日变化

2 个生育期柑橘主要环境因子日变化如图 1 所示。由图 1 可知, III、IV 期日 T_a 呈单峰状, 峰值出现在 12:00, 日均 T_a 分别为 32、16 °C; III、IV 期日均 Δe 分别为 $4.30 \times 10^2 \text{ Pa}$ 、 $3.21 \times 10^2 \text{ Pa}$; PAR 呈单峰型日变化趋势, III、IV 期日均值分别为 751.2 、 $247.12 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$; RH 均呈下凹状变化趋势, III、IV 期日均值分别为 80.12%、88.33%。

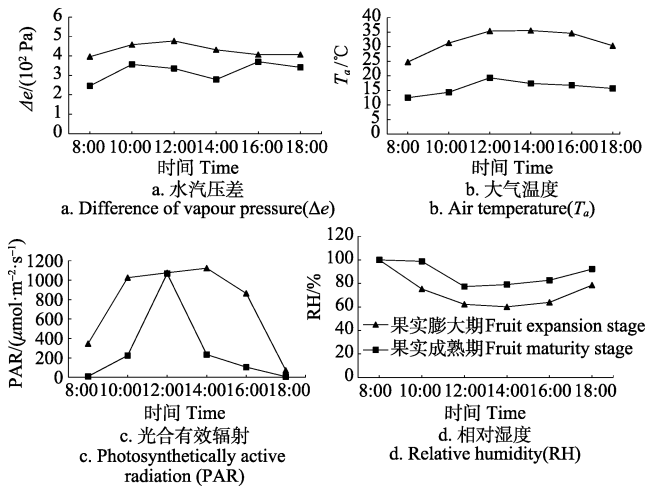


图 1 主要环境因子日变化

Fig.1 Diurnal variation of main environmental factors

2.2 滴灌水分亏缺光合特性日变化

图 2a 和图 2b 为果实膨大期和果实成熟期不同水分亏缺处理柑橘叶片净光合速率 (P_n) 日变化。 P_n 日变化呈双峰状, 12:00 出现“午休”现象, 不同处理 P_n 随亏水度的加剧而降低。III、IV 期 CK 的日均 P_n 分别达 3.94、2.85 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, III-MD₁、III-LD、IV-MD₁ 和 IV-LD 处理日均 P_n 与 CK 无显著差异 ($P>0.05$), 但 III-MD₂、III-SD、IV-MD₂、IV-SD 处理日均 P_n 下降 18.6%~31.4% ($P<0.05$), III 期较 IV 期 P_n 显著提高 26.28%~43.50% ($P<0.05$), 变化趋势与水分胁迫下梭梭^[15]、怪柳^[22]的研究结果一致。

图 2c 和图 2d 为果实膨大期和果实成熟期滴灌不同水分亏缺处理柑橘叶片蒸腾速率 (T_r) 日变化。 T_r 日变化呈单峰状, III、IV 期 CK 日均 T_r 分别为 1.75、2.42 $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。III-MD₁、III-LD、IV-MD₂、IV-MD₁、IV-LD 处理 T_r 与 CK 无显著差异 ($P>0.05$), III-SD、IV-SD 处理 T_r 比 CK 处理分别降低 20.9%、23.7% ($P<0.05$)。

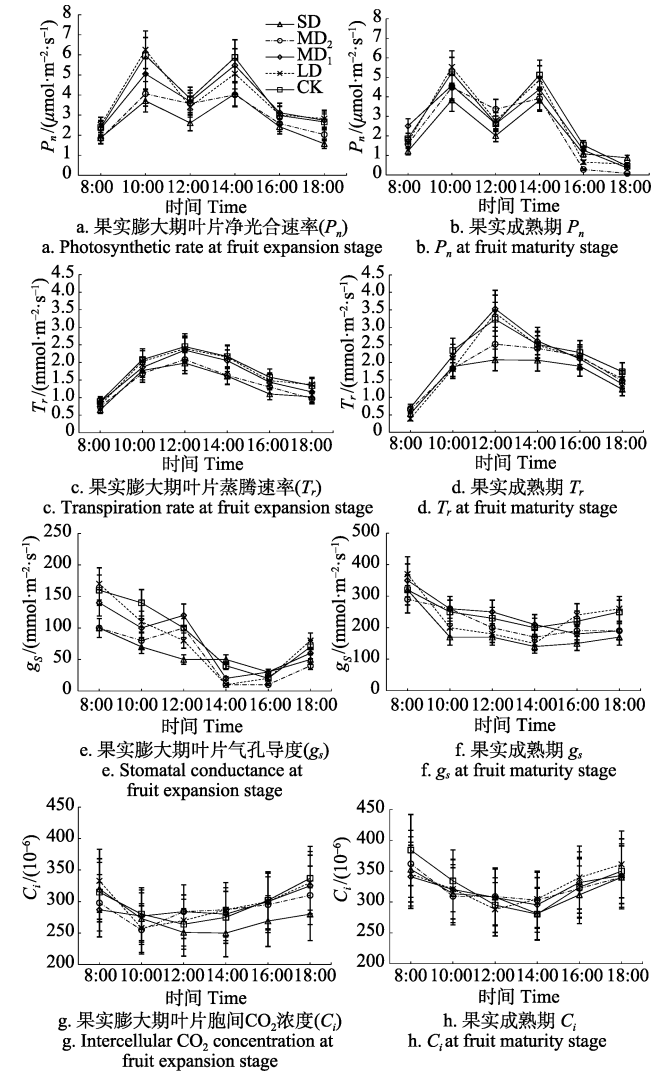


图 2 不同处理柑橘叶片光合参数日变化

Fig.2 Diurnal variation of citrus leaf photosynthetic parameters for different treatments

图 2e 和图 2f 为果实膨大期和果实成熟期滴灌不同水分亏缺处理柑橘叶片气孔导度 (g_s) 日变化。 g_s 日变化呈下凹状, 不同亏水处理 g_s 在 10:00—12:00、14:00—16:00 变化趋势存在明显差异, 与 10:00 相比, 12:00 时 III-SD、III-LD、CK 处理 g_s 减小 27.27%~28.57%, 而 III-MD₁、III-MD₂ 处理 g_s 分别增加 25.00%、20.00% ($P<0.05$); 与 14:00 相比, 16:00 时除 IV-MD₁ 处理 g_s 减小 14.29% 外, 其余处理均增大。III、IV 期 g_s 最大值分别为 150、350 $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 主要是由于 III 期气温较高, 叶片通过减小 g_s 避免过多的水分流失。

图 2g 和图 2h 为果实膨大期和果实成熟期滴灌不同水分亏缺处理柑橘叶片胞间 CO_2 浓度 (C_i) 日变化。 C_i 日变化呈“V”型, 日变化范围在 250×10^{-6} ~ 340×10^{-6} ,

当日 C_a 变化范围为 $350 \times 10^{-6} \sim 480 \times 10^{-6}$, C_a 始终高于 C_i , C_i 的日变化规律与武阳等^[19]试验结果一致。然而, 各亏水处理间 C_i 变化趋势存在明显差异: 与 10:00 相比, 12:00 时 III-MD₂、III-MD₁、III-LD 处理 C_i 增大 2.53%~11.37%, III-SD、CK 分别下降 8.06%、5.71%, 除 III-MD₂ 外其余处理差异均达显著水平 ($P < 0.05$), IV-LD、CK 分别下降 10.18%、11.77%, IV-SD、IV-MD₂、IV-MD₁ 无显著差异

($P > 0.05$)。

表 2 为滴灌水分亏缺处理对柑橘果实膨大期、果实成熟期叶片光合特征值的影响。由表可知, III、IV 期 P_n 、 g_s 和 T_r 总体上均随亏水度加剧而减小, 与 CK 相比, III-LD、IV-LD 处理的 P_n 和 CE 均无显著差异 ($P > 0.05$), IV-LD 处理的 WUE_i 提高 36.61% ($P < 0.05$)。可见, 适度的滴灌水分亏缺 (IV-LD) 有利于提高柑橘叶片 WUE_i 。

表 2 滴灌水分亏缺处理对柑橘果实膨大期和成熟期光合特性的影响

Table 2 Effect of water deficit on citrus's photosynthesis during fruit expansion stage and fruit maturity stage under drip irrigation

| 处理 Treatments | 果实膨大期 Fruit expansion stage | | | | | |
|---------------------|---|---|---|-----------------|--|---|
| | $P_n/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$ | $T_r/(\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$ | $g_s/(\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$ | $C_i/(10^{-6})$ | $WUE_i/(\mu\text{mol}\cdot\text{mmol}^{-1})$ | $CE/(\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$ |
| III-SD | 3.71±0.18 cd | 1.77±0.07 b | 70.50±3.01 c | 273.4±1.05 ab | 2.09±0.24 c | 0.014±0.002 c |
| III-MD ₂ | 4.06±0.23 c | 1.69±0.13 b | 80.33±5.22 c | 255.5±3.94 b | 2.40±0.05 b | 0.016±0.006 bc |
| III-MD ₁ | 5.05±0.26 b | 1.86±0.14 ab | 100.67±4.00 bc | 277.2±4.15 a | 2.72±0.36 ab | 0.018±0.009 b |
| III-LD | 6.25±0.30 a | 2.03±0.09 ab | 110.33±3.27 b | 258.7±1.90 b | 3.08±0.30 a | 0.024±0.001 a |
| CK | 5.97±0.20 ab | 2.08±0.14 a | 140.33±7.67 a | 280.4±7.13 a | 2.87±0.23 ab | 0.021±0.001 ab |
| 处理 Treatments | 果实成熟期 Fruit maturity stage | | | | | |
| | $P_n/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$ | $T_r/(\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$ | $g_s/(\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$ | $C_i/(10^{-6})$ | $WUE_i/(\mu\text{mol}\cdot\text{mmol}^{-1})$ | $CE/(\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$ |
| IV-SD | 3.84±0.06 c | 1.88±0.30 b | 170.33±6.04 c | 313.67±9.22 b | 2.04±0.42 cd | 0.012±0.0001 bc |
| IV-MD ₂ | 4.49±0.19 b | 1.82±0.06 b | 260.33±7.00 a | 309.33±8.30 c | 2.47±0.19 b | 0.015±0.0005 b |
| IV-MD ₁ | 4.59±0.14 b | 2.19±0.04 ab | 260.67±8.05 a | 320.33±8.23 ab | 2.10±0.05 c | 0.014±0.0012 b |
| IV-LD | 5.53±0.21 a | 1.81±0.08 b | 200.33±7.01 b | 321.00±7.86 ab | 3.06±0.25 a | 0.017±0.0013 a |
| CK | 5.24±0.22 ab | 2.32±0.05 a | 250.67±9.25 ab | 334.33±10.88 a | 2.24±0.17 bc | 0.016±0.0001 a |

注: WUE_i 为叶片瞬时水分利用效率; CE 为羧化速率; 不同小写字母表示同列差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Note: WUE_i is instantaneous water use efficiency of leaf; CE is carboxylation rate; Different letters indicate significant difference among same column ($P < 0.05$). Same as below.

2.3 滴灌水分亏缺水孔限制值与净光合速率、蒸腾速率和瞬时水分利用效率的关系

图 3 为不同生育期滴灌水分亏缺处理柑橘叶片气孔限制值 (L_s) 和非气孔限制值 (C_i/g_s) 日变化。由图 3a、3c 可知, III 期各亏水处理后 L_s 呈 08:00—10:00 逐渐增大、10:00—12:00 缓慢减小、14:00—18:00 持续增大的变化趋势, C_i/g_s 呈 08:00—12:00 保持较低水平、12:00 后迅速升高的变化趋势, 二者基本呈相反的变化规律, 与 CK 相比, 各亏水处理后 L_s 和 C_i/g_s 随亏水度的加剧分别增大 1.24%~20.11%、2.17%~27.47%。结合图 2 分析可得, 08:00—10:00 间, 各亏水处理的光合指标均表现为 P_n 增大, g_s 减小, C_i 降低, L_s 增大, C_i/g_s 保持较低水平, 说明气孔限制是该时段影响柑橘叶片 P_n 的主要因素; 10:00—12:00 P_n 出现“光午休”现象, 各亏水处理的光合指标变化存在明显差异, 其中 III-MD₂、III-MD₁、III-LD 处理的 g_s 、 P_n 、 L_s 均降低, C_i 增大, 说明气孔限制是“光午休”现象的主要影响因素, III-SD 处理的 C_i 、 L_s 、 P_n 均减小, g_s 、 C_i/g_s 均增大, 说明非气孔限制是 III-SD 处理出现“光午休”现象的主要影响因素; 与 12:00 相比, 14:00 时 III-MD₂、III-MD₁、III-LD 处理 C_i/g_s 为 12:00 的 2.13~3.94 倍 ($P < 0.05$), 非气孔因素占主导地位; 同理可知, 14:00 以后非气孔限制是各亏水处理下影响 P_n 的主要因素。综上所述, III 期各亏水处理不同时段影响 P_n 的主要因素是: 08:00—10:00 各处理 P_n 的主要影响因素均为气孔限制,

10:00—12:00 III-LD、III-MD₁、III-MD₂ 处理 P_n 减小的主要原因是气孔限制, III-SD 处理 P_n 降低的主要原因是非气孔限制, 12:00—18:00 各处理 P_n 的主要影响因素为非气孔限制。

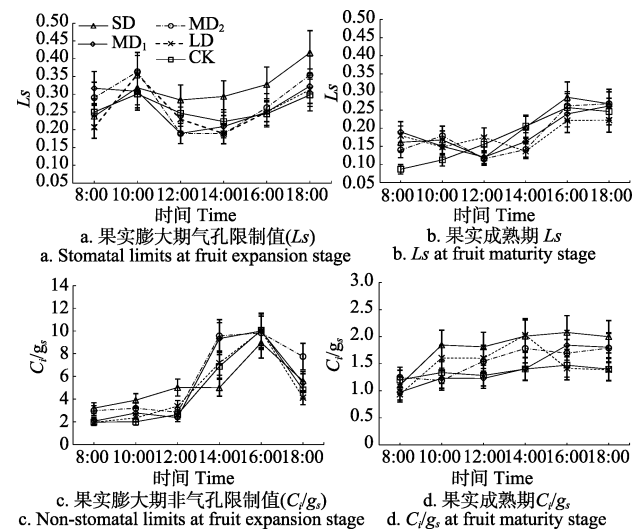


图 3 不同处理柑橘叶片气孔限制值与非气孔限制值日变化
Fig.3 Diurnal variation of stomatal and non-stomatal limits of citrus leaf for different treatments

图 3b、d 显示, IV 期亏水处理后 L_s 日变化呈 08:00

—14:00 保持较低水平、14:00 后逐渐升高、16:00 达到最大的变化趋势, C_i/g_s 大致呈“M”型。与 CK 相比, IV-SD 处理日均 L_s 、 C_i/g_s 分别提高 13.07%、33.99% ($P < 0.05$), IV-MD₁、IV-LD 处理无显著变化 ($P > 0.05$)。IV 期各亏水处理影响 P_n 的主要因素为: 08:00—10:00 各亏水处理均为气孔限制, 10:00—12:00 间 IV-LD、IV-MD₁ 处理为气孔限制, IV-MD₂、IV-SD 处理为非气孔限制, 12:00—14:00 各亏水处理均为气孔限制, 14:00—18:00 均为非气孔限制。

图 4 为不同生育期滴灌水分亏缺处理下柑橘 L_s 与 P_n 、 T_r 、 WUE_i 的日变化。由图可知, L_s 与 P_n 并无直接的线性关系, 但 T_r 随 L_s 的增加而降低, 说明气孔限制对于 T_r 的影响更加显著。从 L_s 对 WUE_i 的影响来看, III 期 WUE_i 随 L_s 的增加而增大, 当 III 期 $L_s > 0.4$ 、IV 期 $L_s > 0.22$ 时, P_n 较低, 导致 WUE_i 大幅降低, III 期 $L_s = 0.4$ 大于 IV 期 $L_s = 0.22$ 的原因可能是随着叶龄的增大, 叶片酶活性下降。

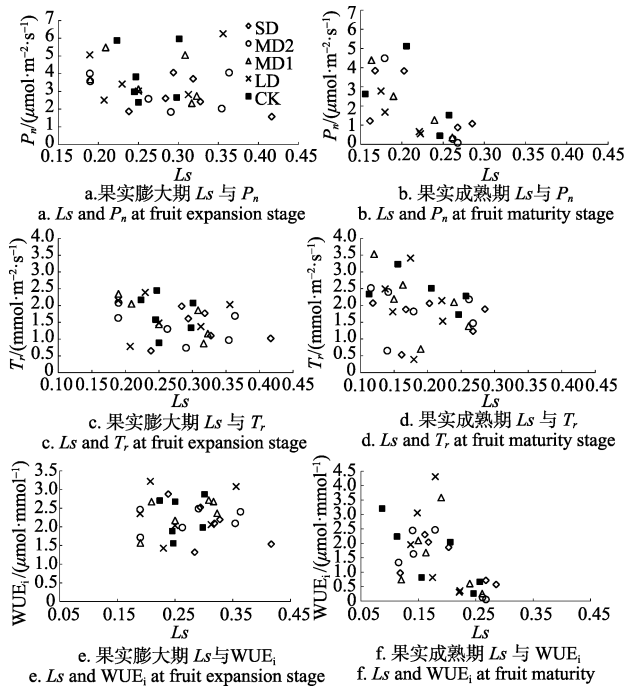


图 4 柑橘 L_s 与 P_n 、 T_r 、 WUE_i 的关系

Fig. 4 Relationship between L_s and P_n , T_r , WUE_i of citrus

2.4 滴灌水分亏缺产量及水分利用效率

表 3 为不同生育期滴灌水分亏缺处理对柑橘耗水量、产量及水分利用效率的影响。由表 3 可知, CK 的耗水量达 852.60 mm, 灌水量为 880.95 mm, 产量达 38 539.20 kg/hm², 与 CK 相比, III 期各亏水处理的耗水量降低 10.7%~36.3%, 灌水量降低 33.5%~8.4%, 其中 III-SD、III-MD₂ 处理的产量分别降低 38.1%、11.8% ($P < 0.05$), 而 III-LD、III-MD₁ 处理的产量无显著差异 ($P > 0.05$), 同时 III-LD、III-MD₁ 处理的 WUE_{ET} 分别提高 13%、26%, WUE_i 分别提高 11%、22% ($P < 0.05$); IV 期各亏水处理的耗水量降低 12.2%~6.7%, 灌水量降低 17.2%~4.3%, 其中 IV-SD、IV-MD₂、IV-MD₁ 处理产量分别降低 42.7%、32.2%和

23.0% ($P < 0.05$), 而 IV-LD 处理产量无显著差异 ($P > 0.05$), 同时 IV-LD 处理的 WUE_{ET} 、 WUE_i 分别提高 9.5%、6.87% ($P < 0.05$)。因此, 在柑橘果实膨大期和果实成熟期适度的水分亏缺 (III-LD、III-MD₁、IV-LD) 可在保证柑橘产量不显著变化的条件下, 节约灌溉用水 6.87%~22% 的同时, 有效提高 WUE_{ET} 9.5%~26%。

表 3 水分亏缺对柑橘产量、耗水量及水分利用效率的影响

Table 3 Effect of water deficit on fruit yield, evapotranspiration and water use efficiency of citrus

| 处理 Treatments | 耗水量 Evapotranspiration/mm | 灌水量 Irrigation amount/mm | 产量 Yield (kg·hm ⁻²) | WUE_{ET} (kg·m ⁻³) | WUE_i (kg·m ⁻³) |
|---------------------|------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| III-SD | 542.71 | 586.11 | 23 831.10 c | 4.39 e | 4.07 d |
| III-MD ₂ | 612.23 | 659.82 | 34 392.60 b | 5.62 b | 5.21 a |
| III-MD ₁ | 683.73 | 733.53 | 38 992.80 a | 5.70 a | 5.32 a |
| III-LD | 761.52 | 807.24 | 39 179.55 a | 5.14 c | 4.85 b |
| CK | 852.60 | 880.95 | 38 539.20 a | 4.52 d | 4.37 c |
| IV-SD | 688.65 | 729.75 | 22 095.45 c | 3.21 d | 3.03 c |
| IV-MD ₂ | 736.89 | 767.55 | 32 116.50 b | 4.36 c | 4.18 c |
| IV-MD ₁ | 764.39 | 805.35 | 35 691.90 b | 4.67 c | 4.43 b |
| IV-LD | 795.12 | 843.15 | 39 375.60 a | 4.95 a | 4.67 a |
| CK | 852.60 | 880.95 | 38 539.20 a | 4.52 b | 4.37 b |

3 讨论

本研究发现在滴灌条件下在柑橘 III 期和 IV 期进行轻度亏水处理均有利于提高叶片 WUE_i 。与 CK 相比, IV-LD 处理 WUE_i 显著提高 ($P < 0.05$)。研究表明, 作物遭受重度亏水后, 叶片出现叶绿体膨胀、排列紊乱, 基质片层模糊, 基粒间连接松弛, 类囊体片层肿胀或解体, 光合器官的超微结构遭到破坏^[23], 导致从质体醌的电子转移池到 PSI 终端受体的电子转移受损、气孔关闭、最大羧化速率减慢、RuBP 酶的再生能力减弱, 电子传递速率的减小也使卡尔文循环中 ATP 或 NADPH 的供应量减少, 进而又影响 RuBP 酶的再生能力^[19], 因此重度水分亏缺会显著降低叶片 P_n , 甚至破坏光合系统, 不利于有机物的形成。然而, Cui 等^[24]在冬小麦拔节期和分蘖期进行轻度亏水处理后 (叶水势为 (-1.40 MPa, -1.20 MPa), 土壤含水率为田间持水量的 60%~65%) 发现, 叶片光系统 II 的最大光化学效率、实际光化学效率、最大羧化速率、光合电子传递速率均增加, 非光化学猝灭降低, P_n 均表现为增大。Zhang 等^[25-27]发现, 胡瓜轻度亏水初期光合关键酶 *rbcl* 和 *rbcs* 的相关 mRNA 表达呈上升趋势, 且 Rubisco 酶活性提高, 其 P_n 的提高较 CK 差异不显著。 WUE_i 的提高得益于 P_n 降幅小于 T_r 降幅, 当土壤含水率越低, 棵间蒸发强度就越低, 土壤毛管传导度相应减小, 从而降低了根系吸水速率, 引起叶片含水率降低、保卫细胞因失水而收缩、叶片气孔开度减小以及气孔水分扩散阻力增加, 最终导致叶面蒸腾强度降低^[28]。叶片蒸腾强度的显著降低致使 WUE_i 得到提高。Xia 等^[29]也得到了

相似结论, 研究发现怪柳在亏水处理后(相对土壤含水量为60%~75%) P_n 、 WUE_i 比对照(相对土壤含水量为85%~93%) 分别提高49%、41.94%。Rocuzzo等^[13]也发现柑橘各生育期适度亏水使 WUE_i 提高13%~15%。

本研究发现滴灌水分亏缺后柑橘叶片 P_n 的主要影响因素由气孔限制向非气孔限制的转变与亏水度和生育期均密切相关。III期亏水度由MD₂ 加剧为SD、IV期亏水度由MD₁ 加剧为MD₂ 时, 影响柑橘光合作用的主要因素由气孔因素转为非气孔因素。研究表明, 亏水初期气孔阻力增大, 叶片水分散失减小, 但CO₂ 供应的减少又使细胞内O₂ 成为电子传递的受体使活性氧自由基的产生加剧, 因此, 光合的气孔限制阻碍了水分胁迫的加剧, 但同时也诱发了由自由基引发的非气孔限制^[23]。显然, III期气孔到非气孔的土壤含水率变化阈值低于IV期, 说明IV期更容易由气孔限制转化为非气孔限制, 可能由于III期果实细胞分裂加速, 细胞膨大, 果实体积的增加对水分需求迫切, 柑橘叶片在III期对水分胁迫环境做出相应的适应。

本研究发发现滴灌条件下在柑橘果实膨大期和果实成熟期进行轻度水分亏缺, 对柑橘产量不会产生不利影响, 并显著提高 WUE_{ET} 和 WUE_i 。诸多研究得到了相似的结论, 如Panigrahi等^[10]发现, (相比对照)75%灌水量、75%施肥量的灌溉模式能使柑橘获得最大产量(16.39 t/ha)、最大水分利用效率(3.9 kg/m³)和最大肥料利用效率(87.3 kg/kg); Gasque等^[12]在滴灌条件下对Navelina橘7月中旬—9月上旬进行亏水处理, 经过连续5a的重复试验发现, 在亏水期结束恢复全额灌溉时, 果实出现明显加速生长的现象, 最终柑橘增产4.5%~68%, 节水12%~27%, 并指出当 $\Psi_{st} > -2.0$ MPa 时亏水将对产量、品质带来不利影响; 武阳等^[18]发现, 在果实缓慢膨大期中度水分亏缺后, 香梨产量提高14.0%~18.0%, 节水11.3%~13.2%; Tejero等^[14]发现节水超过1 000 m³/hm² (约3 m³/棵) 时, 亏水处理会降低柑橘产量、影响果实品质。

4 结 论

1) 在柑橘果实膨大期(III)、果实成熟期(IV) 亏水处理后, 气孔导度(g_s)、光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r) 均随亏水度的加剧而降低, 轻度亏水处理可以提高叶片瞬时水分利用效率(WUE_i)。与CK 相比, IV-LD 处理 WUE_i 提高36.61% ($P < 0.05$)。

2) 影响光合速率的主要因素由气孔限制与非气孔限制之间的转化与亏水度和生育期均密切相关, 气孔限制值与非气孔限制值有互补的变化规律。处理间差异分析显示, 随亏水度的加剧, 影响光合作用的主要因素由气孔限制逐步转向非气孔限制, 叶片气孔限制值与非气孔限制值分别增大1.24%~20.11%、2.17%~33.99%。III期亏水度由MD₂ 加剧为SD、IV期亏水度由MD₁ 加剧为MD₂ 时, 影响柑橘光合作用的主要因素由气孔因素转为非气孔因素。

3) 在柑橘III期、IV期亏水处理后, 各处理的耗水量

随亏水度的加剧而减小, 轻度亏水处理后产量较CK 差异不显著。与CK 相比, III-LD 和IV-LD 处理的产量差异未达显著水平 ($P > 0.05$), WUE_{ET} 显著提高13%和9.5%, WUE_i 分别显著提高11%和6.87% ($P < 0.05$)。因此, 柑橘III、IV期适度的亏水处理可保证柑橘产量, 节约灌溉用水, 有效提高 WUE_{ET} 和 WUE_i , 是柑橘适宜的滴灌水分亏缺模式。

[参 考 文 献]

- [1] 韩启彪, 冯绍元, 曹林来, 等. 滴灌技术与装备进一步发展的思考[J]. 排灌机械工程学报, 2015, 33(11): 1001—1005.
Han Qibiao, Feng Shaoyuan, Cao Linlai, et al. Thinking about further development of drip irrigation technology and equipment[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering. 2015, 33(11): 1001—1005. (in Chinese with English abstract)
- [2] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(11): 150—158. (in Chinese with English abstract)
- [3] Davies W J, Zhang J. Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil [J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 2003, 42(1): 55—76.
- [4] Reynolds M P, Acevedo E, Sayre KD, Fischer RA. Yield potential in modern wheat varieties: its association with a less competitive ideotype[J]. Field Crops Research, 1994, 37(3): 149—160.
- [5] 郝树荣, 郭相平, 张展羽. 作物干旱胁迫及复水的补偿效应研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(1): 81—84.
Hao Shurong, Guo Xiangping, Zhang Zhanyu, et al. Research progress on compensatory effects of crops in drought stress and rehydration[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(1): 81—84. (in Chinese with English abstract)
- [6] Chaves M M, Pereira J S, Maroco J, et al. How plants cope with water stress in the field? Photosynthesis and Growth[J]. Photosynthesis and growth. Annual Botany, 2002, 89(7): 907—916.
- [7] 康绍忠, 杜太生, 孙景生, 等. 基于生命需水信息的作物高效节水调控理论与技术[J]. 水利学报, 2007, 38(6): 661—667.
Kang Shaozhong, Du Taisheng, Sun Jingsheng, et al. Theory and technology of improving irrigation water use efficiency based on crop growing water demand information[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(6): 661—667. (in Chinese with English abstract)

- [8] Hsiao T C. Plant responses to water stress[J]. *Ann, Rev Plant Physiol*, 1973, 24: 519—570.
- [9] Thomas F R, Ronald L P, James A F. Drought response of young apple tree on three root stock II Gas exchange, chlorophyll fluorescence, water relations and leaf abscisic acid[J]. *Amer Soc Hort Sci*, 1997, 122(6): 841—848.
- [10] Panigrahi P, Srivastava A K. Effective management of irrigation water in citrus orchards under a water scarce hot sub-humid region[J]. *Scientia Horticulturae*, 2016, 210: 6—13.
- [11] Chang Y C, Chang Y S, Lin L H. Response of shoot growth, photosynthetic capacity, flowering, and fruiting of potted 'Nagami' kumquat to different regulated deficit irrigation[J]. *Horticulture, Environment and Biotechnology*, 2015, 56(4): 444—454.
- [12] Gasque María, Martí Pau, Granero Beatriz, et al. Effects of long-term summer deficit irrigation on 'Navelina' citrus trees[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 169: 140—147.
- [13] Rocuzzo Giancarlo, Francisco J Villalobos, et al. Effects of water deficits on whole tree water use efficiency of orange[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 140: 61—68.
- [14] Tejero I Garcí'a, Vicente R Romero, Jimenez-Bocanegra J A, et al. Response of citrus trees to deficit irrigation during different phenological periods in relation to yield, fruit quality, and water productivity[J]. *Agricultural Water Management*. 2010, 97: 689—699.
- [15] 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. (in Chinese with English abstract)
- [16] 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 limitation analysis of photosynthesis[J]. *Plant Physiology Communications*, 1997, 33(4): 241—244. (in Chinese with English abstract)
- [17] 徐俊增, 彭世彰, 魏征, 等. 节水灌溉水稻叶片胞间 CO₂ 浓度及气孔与非气孔限制[J]. *农业工程学报*. 2010, 26(7): 76—80. Xu Junzeng, Peng Shizhang, Wei Zheng, et al. Intercellular CO₂ concentration and stomatal or non-stomatal limitation of rice under water saving irrigation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2010, 26(7): 76—80. (in Chinese with English abstract)
- [18] 杨泽粟, 张强, 郝小翠. 自然条件下半干旱雨养春小麦生育后期旗叶光合的气孔和非气孔限制[J]. *中国生态农业学报*, 2015(2): 174—182. Yang Zesu, Zhang Qiang, Hao Xiaocui. Stomatal or non-stomatal limitation of photosynthesis of spring wheat flag leaf at late growth stages under natural conditions in semiarid rainfed regions[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015(2): 174—182. (in Chinese with English abstract)
- [19] 武阳, 王伟, 雷廷武, 等. 调亏灌溉对滴灌成龄香梨果树生长及果实产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(11): 118—124. Wu Yang, Wang Wei, Lei Tingwu, et al. Impact of regulated deficit irrigation on growth and fruit yield of mature fragrant pear trees under trickle irrigation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2012, 28(11): 118—124. (in Chinese with English abstract)
- [20] Campos H, Trejo C, Peña—Valdivia CB, et al. Stomatal and non-stomatal limitations of bell pepper (*Capsicum annuum* L.) plants under water stress and re-watering: Delayed restoration of photosynthesis during recovery[J]. *Environmental & Experimental Botany*, 2014, 98 (1): 56—64.
- [21] 杨楠. 滴灌设备技术及其应用现状[J]. *民营科技*, 2016 (2): 18—18.
- [22] Crafts-Brandner SJ. Inhibition and acclimation photosynthesis to heat stress in closely correlated with activation of rubulose—1,5 bisphosphate carboxylase/oxygenase[J]. *Plant Physiology*, 1999, 120(1): 173—181.
- [23] Liu F, Andersen MN, Jacobsen SE, et al. Stomatal control and water use efficiency of soybean (*Glycine max* L. Merr.) during progressive soil drying[J]. *Environmental & Experimental Botany*, 2005, 54 (1): 33—40.
- [24] Cui Yakun, Tian Zhongwei, Zhang Xu, et al. Effect of water deficit during vegetative growth periods on post-anthesis photosynthetic capacity and grain yield in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Acta Physiol Plant*, 2015, 37(10): 1—10.
- [25] Zhang Lidong, Zhang Liuxia, Sun Jianlei, et al. Rubisco gene expression and photosynthetic characteristics of cucumber seedlings in response to water deficit[J]. *Scientia Horticulturae*. 2013, 161: 81—87.
- [26] de Souza TC, Magalhães PC, de Castro EM, et al. ABA application to maize hybrids contrasting for drought tolerance: changes in water parameters and in antioxidant enzyme activity[J]. *Plant Growth Regulation*, 2014, 73(3): 205—217.
- [27] 裴冬, 孙振山, 陈四龙, 等. 水分调亏对冬小麦生理生态的影响[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(8): 68—72. Pei Dong, Sun Zhenshan, Chen Silong, et al. Effects of water stress on physiological and agronomic features of winter wheat[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2006, 22(8): 68—72. (in Chinese with English abstract)
- [28] Doorenbos J, Pruitt W. *Crop Water Requirement*[M]. 2nd ed. Rome: FAO, 1977.
- [29] Xia J, Zhang S, Guo J, et al. Critical effects of gas exchange parameters in *Tamarix chinensis* Lour on soil water and its relevant environmental factors on a shell ridge island in China's Yellow River Delta[J]. *Ecological Engineering*, 2015, 76: 36—46.

Effect of water deficit on photosynthetic characteristics, yield and water use efficiency in *Shiranui citrus* under drip irrigation

Zhang Xiaoxing¹, Fan Yi², Jia Yue³, Cui Ningbo^{1,4*}, Zhao Lu¹, Hu Xiaotao⁵, Gong Daozhi⁶

(1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering & College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Sichuan Provincial Water Conservancy Research Institute, Chengdu 610072, China; 3. Hebei University of Water Resources and Electric Engineering, Cangzhou 061001, China; 4. Provincial Key Laboratory of Water-Saving Agriculture in Hill Areas of Southern China, Chengdu 610066, China; 5. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University/Institute of Water Saving Agriculture in Arid Areas of China, Yangling 712100, China; 6. State Engineering Laboratory for Efficient Water Use and Disaster Loss Reduction of Crops, Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agriculture Science, Beijing 100081, China)

Abstract: Citrus is one of main fruits in China and its yield is unstable due to seasonal drought in recent years. It is important to understand the mechanisms behind the citrus tree growth under the drought stress. In this study, we investigated the effect of water deficit on photosynthetic characteristics, fruit yield and water use efficiency under drip irrigation. The orchard was located in Chendu, Sichuan. The tree was 7-year-old Shiranui citrus. The average tree height was about 2.8-3.0 m and the diameter of the tree was about 10 cm. A total of 4 water deficit treatments were designed in 2 growing stages of citrus (fruit expansion stage (III) and fruit maturity stage (IV)). Meanwhile, the treatment without water deficit was considered as the control with 100% irrigation amount. The 4 water deficit treatments included 85% of irrigation amount (slight water deficit, LD), 70% of irrigation amount (moderate water deficit, MD₁), 55% of irrigation amount (mild water deficit, MD₂), and 40% of irrigation amount (severe water deficit, SD). The response of photosynthetic characteristics of citrus leaf to water deficit were observed by measuring variation of transpiration rate, photosynthetic rate, stomatal conductance, intercellular CO₂ concentration, stomatal limits, non-stomatal limits and instantaneous leaf water use efficiency. The fruit yield and water use efficiency based on irrigation and evapotranspiration were also determined. The results showed that the photosynthetic rate varied in a dual-peak curve during the day. The photosynthetic rate of mild and severe deficit was significantly lower than the CK but that of slight deficit treatment was not significantly different from the CK. The transpiration rate was increased then decreased during the day for all the treatments and it was only significantly lower for the severe and relative mild deficit treatments compared to CK. The intercellular CO₂ concentration was not significantly different for the LD and CK treatments. The carboxylation rate was also similar for the LD and CK. The instantaneous leaf water use efficiency of IV-LD was significantly higher than the CK and increased by 36.61% ($P < 0.05$). With decreasing the irrigation amount the stomatal limits increased by 1.24%-20.11% and the non-stomatal limits increased by 2.17%-33.99%. When the treatment changed from MD₂ to SD and from MD₁ to MD₂, the influential factor of citrus photosynthesis changed from stomatal factors to non-stomatal factors. The evapotranspiration decreased with increasing degree of water deficit. The evapotranspiration of water deficit treatments at fruit expansion stage and at fruit maturity stage decreased by 10.7%-36.3% and 6.7%-12.2%, respectively. The yield of LD treatments was not significantly different from that of CK. However, compared to CK, the water use efficiency based on evapotranspiration of III-LD and IV-LD treatments was increased by 13% and 9.5%, respectively; the water use efficiency based on irrigation amount of III-LD and IV-LD treatments was increased by 11% and 6.87%, respectively. Thus, the slight water deficit could not only keep fruit yield but also increase water use efficiency, which was a suitable water deficit model for citrus. The study provides valuable information for understanding citrus tree growth in drought stress.

Keywords: photosynthesis; irrigation; leaf; water deficit; drip irrigation; citrus; water use efficiency; stomatal and non-stomatal limitation