

滴灌水钾一体化对猕猴桃光合特性的影响

唐 凡¹, 崔宁博^{1,2}, 赵 璐¹, 郑顺生¹, 龚道枝³, 胡笑涛², 冯 禹¹

(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, 四川 成都 610065;

2. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

3. 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:为探明不同滴灌水钾一体化管理对猕猴桃光合特性的影响,以 8 a 生金艳猕猴桃为试材,设置对照处理 CK(在果实膨大期即 III 期、果实成熟期即 IV 期灌水量分别为 31.2 、 $26.4 \text{ m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$,施钾量分别为 6.0 、 $7.8 \text{ kg} \cdot 667\text{m}^{-2}$),在 III、IV 期分别设置 3 个亏水水平(即轻度、中度、重度水分亏缺,记为 LD、MD、SD,灌水量分别为 CK 的 80%、60%、40%)和 2 个施钾水平(即低钾、高钾,记为 LK、HK,施钾量分别为 CK 的 60%和 80%)。结果表明:果实膨大期、果实成熟期不同滴灌水钾一体化处理的光合指标日变化趋势相似;LD 处理下叶片净光合速率(P_n)、蒸腾速率(Tr)、气孔导度(G_s)、瞬时水分利用效率(WUE_i)、羧化速率(CE)均随施钾量增加而增大,果实膨大期 LDHK 处理的 P_n 、 CE 较 LDLK 处理分别高 15.71%、16.80%,果实成熟期 LDHK 处理的 P_n 、 G_s 较 LDLK 处理分别高 6.07%、12.76%,差异达显著水平($P < 0.05$);SD 处理下,除胞间 CO_2 浓度(C_i)外各光合指标均较 CK 显著下降($P < 0.05$);MD 处理下,除 C_i 、 WUE_i 外各光合指标均较 CK 显著下降($P < 0.05$);施钾量一定时,除 C_i 、 WUE_i 外各指标均随灌水量增加而显著增大($P < 0.05$),增幅为 11.42%~64.40%;与 CK 处理相比,果实膨大期 LDHK 处理 P_n 提高 11.38%($P < 0.05$), WUE_i 提高 3.06%, CE 提高 10.83%;IV-LDHK 处理 P_n 提高 0.96%, WUE_i 提高 2.00%。综合比较采用果实膨大期 LDHK 处理及果实成熟期 LDHK 处理,可在相应生育期节水节肥 20%,日光合能力较强,是猕猴桃较适宜的滴灌水钾一体化管理模式。

关键词:猕猴桃;光合日变化;水钾一体化;滴灌;施钾量

中图分类号:S275.6;S663.4 **文献标志码:**A

The effect of water-potassium integration in drip irrigation on the photosynthetic characteristics of kiwifruit

TANG Fan¹, CUI Ningbo^{1,2}, ZHAO Lu¹, ZHENG Shunsheng¹,
GONG Daozhi³, HU Xiaotao², FENG Yu¹

(1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China;

2. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3. 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: In order to find out the effect of different water-potassium (K) integrated management on kiwifruit photosynthesis, the Jinyan kiwifruit for 8 years was selected as the test material. There was a control treatment with irrigation amount of $31.2 \text{ m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$ and $26.4 \text{ m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$ and K application of $6.0 \text{ kg} \cdot 667\text{m}^{-2}$ and $7.8 \text{ kg} \cdot 667\text{m}^{-2}$ (CK) at fruit expansion stage (III) and fruit maturity stage (IV), and 3 irrigation deficit levels including severe water deficit (SD), medium water deficit (MD), and light water deficit (LD) with irrigation amount was 40%, 60%, and 80% of CK, respectively, and 2 K fertilizer application levels (low K and high K of 60% and 80% of CK, respectively) were set at III and IV stages. The results showed that the diurnal variation trends of pho-

收稿日期:2020-04-12

修回日期:2020-04-28

基金项目:国家优秀青年科学基金(51922072);国家自然科学基金(51779161,51009101);四川省重点研发项目(2017NZ0022);中央高校基本科研业务费专项资金(2018CDPZH-10,2016CDDY-S04-SCU,2017CDLZ-N22)

作者简介:唐凡(1995-),男,四川成都人,硕士研究生,主要从事节水灌溉理论与新技术研究。E-mail:721221023@qq.com

通信作者:崔宁博(1981-),男,陕西凤翔人,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与新技术研究。E-mail:cuningbo@126.com

tosynthetic index were similar in the two growth stages under different water and K integrated drip irrigation treatments. Under the LD treatment, the net photosynthetic rate (P_n), transpiration rate (Tr), stomatal conductance (G_s), instantaneous water use efficiency (WUE_i) and carboxylation rate (CE) of leaves increased with increasing the application amount of K. P_n and CE of III-LDHK are 15.71% and 16.80% higher than that of III-LDLK, P_n and G_s of IV-LDHK were 6.07% and 12.76% higher than that of IV-LDLK, and the difference was significant ($P < 0.05$). Under the SD treatment, except intercellular CO_2 concentration (C_i), all photosynthetic indexes decreased significantly compared with CK ($P < 0.05$). Under the MD treatment, except C_i and WUE_i , all photosynthetic indexes decreased significantly compared with CK ($P < 0.05$). Under the same K application rate, except C_i and WUE_i , the photosynthetic indexes increased significantly with increasing water irrigation ($P < 0.05$), and the increase rate was 11.42%~64.40%. Compared with CK and P_n of III-LDHK treatment increased by 11.38% ($P < 0.05$), WUE_i increased by 3.06%; P_n of IV-LDHK increased by 0.96%, WUE_i increased by 2.00%. In summary, under III-LDHK and IV-LDHK treatments, the photosynthetic capacity of kiwifruit was stronger, and saved the water irrigation and K fertilizer application by 20% at the corresponding growth stage, which was a more suitable integrated management mode of water and K for drip irrigation.

Keywords: kiwifruit; diurnal variation of photosynthesis; integration of water and potassium; drip irrigation; K fertilizer application

光合作用是作物生长的重要生理过程,是作物产量和品质形成的生物学基础,是生物固碳的主要途径^[1],对实现作物的营养积累、维持碳-氧平衡具有重要意义^[2]。光合作用的大小可以反映果树的生理状态并直接影响果实产量和品质的形成。水分是植物进行光合作用最重要的原料之一,水分的供给量会直接影响到植物光合作用的进行。一方面水分供应不足会抑制根系的发育和叶绿体光合作用相关酶活性,进而影响果树叶片光合作用;另一方面水分供应过量会抑制根系呼吸,打破生殖生长和营养生长的平衡,不利于果树光合作用;适量的灌水量既可以保证果树光合作用的需要,也可节约用水^[3]。关于水分亏缺对果树光合特性的影响研究较多,对猕猴桃、葡萄、厚皮甜瓜^[3-5]等的研究发现,水分亏缺会降低气孔导度(G_s),进而导致净光合速率(P_n)、蒸腾速率(Tr)降低,但是会提高瞬时水分利用效率(WUE_i)。对葡萄^[6]、梨枣^[7]的研究表明,适当减少灌水量能够促进植株生长,增加叶片 P_n ,减小 Tr 、 C_i ,提高 WUE_i 。马军勇等^[8]认为降低灌水下限会降低枣树叶片 P_n 、 Tr 、 G_s ,但会提高 WUE_i ,灌水下限设置为田间持水率的 55%,枣树的叶片 WUE_i 显著提高,同时获得较好的红枣产量和品质。钟海霞等^[9]的研究表明,灌水量在 $220\text{ m}^3 \cdot 667\text{ m}^{-2}$ 时赤霞珠葡萄叶片 P_n 较对照(灌水量为 $330\text{ m}^3 \cdot 667\text{ m}^{-2}$)高 1.47%、 Tr 较对照低 8.5%、 WUE_i 较对照高 8.8%。

钾是植物体内重要的矿质营养元素,钾对果树叶片净光合速率、气孔导度和叶绿素含量具有调控作用,可促进叶片的光合作用,钾也是植物体内多种酶的活化剂,可促进光合作用产物的运输,与作

物的品质密切相关^[10]。大量研究表明水钾一体化可对果树光合作用产生不同影响,进而影响果实产量和品质^[11-15]。徐新翔等^[11]研究发现,钾素供应过低或过高均抑制苹果幼苗叶片光合作用,而适宜的钾素供应水平($6\text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)可以提高 P_n ;朱祖雷等^[12]认为施钾(K_2O) $153\text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 时,骏枣叶片 P_n 、 Tr 、 G_s 均大于其他处理,有助于提高 WUE_i ;周敏等^[13]研究表明,施钾量为 $270\text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 时较有利于刺葡萄光合作用;王英珍等^[14]研究发现,随着水培液钾浓度的增加,梨树根系生长和光合强度呈先增大后减小的趋势;王小娟等^[15]的研究表明,施钾能增加厚皮甜瓜叶绿素含量及净光合速率。

猕猴桃美味营养,尤其以富含维生素 C 而闻名,被誉为“水果之王”^[4]。我国猕猴桃种植面积和产量均居世界第一,四川是我国猕猴桃主产区和优势产区之一,种植面积已达 4 万 hm^2 ,且以金艳猕猴桃为主^[16],目前关于灌溉和施肥对猕猴桃光合作用的影响已有相关研究。张效星等^[4]的研究表明,适度减少灌水降低了猕猴桃叶片 P_n 、 Tr ,但能提高 WUE_i 。贺浩浩^[17]认为,三种水肥一体化处理均能提高猕猴桃叶片叶绿素含量和果实产量,以有机全营养液水肥一体化提升幅度最大,达 30%和 15.2%;高晶波^[18]研究表明,水肥一体化处理下,水分利用效率显著提高 37%,产量也略有上升。

目前关于不同生育期滴灌水钾一体化对猕猴桃光合特性的影响研究较少。本文拟通过试验研究水钾一体化对猕猴桃叶片光合特性的影响,以期对滴灌水钾一体化技术在猕猴桃生产中的应用提供指导。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况及试验设计

试验于 2019 年 3 月 1 日至 10 月 15 日在四川省成都市蒲江县复兴乡佳沃猕猴桃产业示范基地进行, 试验地区地形属浅丘地形, 年均气温为 16.3℃, 年均降雨量为 1 228 mm, 干燥度为 0.68, 温光条件较好。土壤类型以黄壤土为主, 平均容重 1.27 g · cm⁻³, 田间质量持水率为 30.18%, 土壤全氮质量分数为 0.69 g · kg⁻¹, 有机质量为 9.32 g · kg⁻¹, 有效磷量为 4.6 mg · kg⁻¹, 速效钾量为 130 mg · kg⁻¹。场地均搭设钢架覆盖防雨大棚, 大棚两侧高 7.5 m, 中部拱高 10 m, 四周开敞, 大棚顶部薄膜材料为白色厚度 0.12 mm 的 PEP 利得膜, 透光率 91%。

试验选 8 a 生金艳猕猴桃为试材, 主要生育期为 3 月上旬—10 月上旬, 根据其生育特征, 将其生育期划分为: 抽梢开花期(I 期, 3 月 1 日—4 月 5 日)、坐果期(II 期, 4 月 5 日—4 月 30 日)、果实膨大期(III 期, 5 月 1 日—6 月 30 日)和果实成熟期(IV 期, 7 月 1 日—10 月 10 日)。试验小区长 6.0 m、宽 4.5 m、面积 27.0 m², 种植密度为 48 棵 · 667m⁻², 试验每个处理设置 3 个重复, 每个试验小区间采用 60 cm 隔水板做防渗隔离, 试验区地下水埋深 12 m, 对试验影响可忽略。灌溉施肥采用低压滴灌水肥一体化系统, 选用滴头流量稳定均匀的压力补偿式滴灌带, 进而控制不同处理的灌水时间以实现亏水处理。小区采用两条滴灌带控制 1 个试验小区, 滴灌带水平距离树干 60 cm, 布设在猕猴桃树两旁, 长度均为 6 m, 滴灌带滴头间距 30 cm, 每个滴头流量 3.2 L · h⁻¹。

试验设置 1 个对照组(CK)。每年试验处理前施入等量的基肥(安杰农业有机肥), 试验处理氮肥采用尿素(总氮 ≥46%), 磷肥采用过磷酸钙(有效

P₂O₅ ≥16.0%), 钾肥采用氯化钾(K₂O ≥60%)。CK 处理抽梢开花期施 N、P、K 肥各 3.0 kg · 667m⁻², 幼果期分别施 N、P、K 肥 2.0、5.7、2.0 kg · 667m⁻², 果实膨大期分别施 N、P、K 肥 2.6、3.6、6.0 kg · 667m⁻², 果实成熟期分别施 N、P、K 肥 3.6、3.4、7.8 kg · 667m⁻²。在 III、IV 期各设置 3 个水平的亏水处理和 2 个水平的施钾处理, 亏缺处理的灌水量分别为 CK 的 80%(LD)、60%(MD)、40%(SD), 灌水周期为 8~12 d, 灌水定额、周期根据佳沃(成都)现代农业有限公司及当地农户生产经验得出, 钾肥处理水平分别为 CK 的 80%(HK)、60%(LK), 钾肥施用量根据佳沃(成都)现代农业有限公司以及当地农户生产经验得到的施肥方案换算调整而得。具体试验方案见表 1。

1.2 测定指标与测定方法

采用全自动便携式光合仪(LCPro-SD, 英国 ADC), 在 2019 年 5 月 25 日和 8 月 15 日 8:00—18:00 每 2 h 测定一次叶片光合指标, 重复 3 次取均值; 分别测其净光合速率(*P_n*)、气孔导度(*G_s*)、蒸腾速率(*T_r*)和胞间 CO₂ 浓度(*C_i*)等指标对水分、钾素的响应; 叶片净光合速率(*P_n*)与蒸腾速率(*T_r*)之比为叶片瞬时水分利用效率(*WUE_i*), 叶片净光合速率(*P_n*)与胞间 CO₂ 浓度(*C_i*)之比为叶片羧化速率(*CE*)。

1.3 数据处理与分析

试验数据及图表均以 Microsoft Excel 2010 处理绘制, 以 SPSS 20.0 进行单因素方差及多因素方差分析。

2 结果与分析

2.1 水钾一体化对猕猴桃果实膨大期叶片光合特性的影响

图 1(a) 为猕猴桃果实膨大期滴灌水钾一体化管理下 *P_n* 的日变化, 可见 2019 年 5 月 25 日, III 期水钾一体化处理下, *P_n* 呈“双峰”曲线, 上午的 *P_n* 整

表 1 猕猴桃滴灌水钾一体化试验各处理灌水定额、施钾量

处理 Treatment	抽梢开花期(I) Heading and flowering stage		坐果期(II) Fruiting stage		果实膨大期(III) Fruit expansion stage		果实成熟期(IV) Fruit maturity stage	
	W/(m ³ · 667m ⁻²)	K/(kg · 667m ⁻²)	W/(m ³ · 667m ⁻²)	K/(kg · 667m ⁻²)	W/(m ³ · 667m ⁻²)	K/(kg · 667m ⁻²)	W/(m ³ · 667m ⁻²)	K/(kg · 667m ⁻²)
III-SDLK	15.3	3.0	21.8	2.0	12.5	3.6	26.4	7.8
III-SDHK	15.3	3.0	21.8	2.0	12.5	4.8	26.4	7.8
III-MDLK	15.3	3.0	21.8	2.0	18.7	3.6	26.4	7.8
III-MDHK	15.3	3.0	21.8	2.0	18.7	4.8	26.4	7.8
III-LDLK	15.3	3.0	21.8	2.0	25.0	3.6	26.4	7.8
III-LDHK	15.3	3.0	21.8	2.0	25.0	4.8	26.4	7.8
IV-SDLK	15.3	3.0	21.8	2.0	31.2	6.0	10.6	4.7
IV-SDHK	15.3	3.0	21.8	2.0	31.2	6.0	10.6	6.2
IV-MDLK	15.3	3.0	21.8	2.0	31.2	6.0	15.8	4.7
IV-MDHK	15.3	3.0	21.8	2.0	31.2	6.0	15.8	6.2
IV-LDLK	15.3	3.0	21.8	2.0	31.2	6.0	21.1	4.7
IV-LDHK	15.3	3.0	21.8	2.0	31.2	6.0	21.1	6.2
CK	15.3	3.0	21.8	2.0	31.2	6.0	26.4	7.8

注 Note: W—灌水量 Irrigation amount; K—施钾量 K fertilizer rate.

体上明显高于下午,LDHK 处理 P_n 整体上最大。8:00—10:00 期间各处理 P_n 迅速上升至峰值,这是由于经过夜间的富集作用, C_i 较高,随着气温的升高和光合有效辐射的上升, P_n 升高,此时 LDHK 处理最大,为 $8.97 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,较 CK 高 7.99%,其余处理均低于 CK;10:00 后各处理 P_n 下降,14:00 降至低谷,此时各处理出现“午休”现象,这是由于夏季正午光照强度过大,植物为了防止失水过多,关闭部分气孔,减少了 CO_2 的吸收量,因此也降低了光合强度;14:00—16:00 期间 P_n 缓慢上升,各处理在 16:00 出现第二个峰值,此时 LDHK 比 CK 高 16.67%。表 2 为 III 期水钾耦合猕猴桃光合特性日均值。III 期相同施钾量下 P_n 随灌水量增加而显著增大 ($P < 0.05$);SD、MD 处理下 P_n 随施钾量增加而降低,LD 处理下 P_n 随施钾量增加而显著增大 ($P < 0.05$),LDHK 处理的 P_n 最大,为 $5.31 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,较 CK 提高 11.38% ($P < 0.05$),其余处理较 CK 低 3.74%~41.59%。

图 1(b)为猕猴桃果实膨大期滴灌水钾一体化管理下叶片 T_r 的日变化。III 期水钾一体化处理下,各处理猕猴桃叶片 T_r 变化趋势均呈“双峰”曲线,LDHK 处理 T_r 整体上最大。12:00 时,各处理 T_r 到达峰值,此时 LDHK 处理最大,为 $4.38 \text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,较 CK 高 4.19%,其余处理较 CK 低 5.58%~27.33%。 T_r 受光照强度、温度影响很大,8:00—12:00 光强增大,温度升高,叶片内外蒸气压差增大,蒸腾速率加快。14:00 时,气温过高,叶片过度失水,气孔关闭,蒸腾减弱至低谷。由表 2 可以看出,III 期相同施钾量下, T_r 随灌水量增加而显著增大 ($P < 0.05$);SD、MD 处理下 T_r 随施钾量增加而降低,MD 处理下差异达显著性水平 ($P < 0.05$),LD 处理下 T_r 随施钾量增加而显著增大 ($P < 0.05$)。LDHK 的 T_r 最大,为 $2.85 \text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,较 CK 高 8.08%,其余处理较 CK 低 3.87%~33.41%。这说明,灌水量较低时,增加施钾量可明显降低 T_r ,影响植株生长发育。研究发现,土壤中过多的钾离子对氮、钙、镁等其他养分的吸收会产生拮抗作用^[19-20],而重度缺水使钾离子浓度升高加剧了这种拮抗作用。

图 1(c)为猕猴桃果实膨大期滴灌水钾一体化管理下叶片 G_s 的日变化。III 期水钾一体化处理下,各处理 G_s 日变化呈“双峰”曲线,CK 处理 G_s 整体上最大,10:00 与 16:00 到达峰值,峰值分别为 $0.71 \text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $0.36 \text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。表 2 表明,III 期相同施钾量下, G_s 随灌水量增加而显著增大 ($P < 0.05$);相同灌水量下, G_s 随施钾量增加而增

大,SD 处理下差异达显著性水平 ($P < 0.05$)。CK 的 G_s 最大,为 $0.34 \text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,各处理较 CK 低 4.39%~56.37%。 G_s 对土壤湿度、温度、水势的响应敏感,充足的水分有利于增加土壤湿度、降低空气温度和相对湿度、改善植物体内水势,促进叶片气孔开放,进而促进叶片光合作用。

图 1(d)为猕猴桃果实膨大期滴灌水钾一体化管理下叶片 C_i 的日变化。III 期水钾一体化处理下,III 期各处理 C_i 日变化呈凹型,各处理在 08:00 值最大,为 $329 \sim 400 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 、12:00 最小,为 $227 \sim 318 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$; C_i 值与 P_n 、 G_s 密切相关,夜间叶片几乎不进行光合作用,经过晚间的积累,猕猴桃叶片 C_i 在 08:00 时最大,随着光照强度的增强, G_s 提高、 P_n 增强、 CO_2 消耗量增加, C_i 开始下降,10:00—12:00 光照、温度均处于较高水平, G_s 降低, P_n 开始减弱,所以 CO_2 同化减慢,直至 12:00 C_i 达到最小值,而下午的光合强度明显低于上午, C_i 逐渐回升。表 2 表明,III 期相同施钾量下, C_i 随灌水量的增加而显著减小 ($P < 0.05$);相同灌水量下, C_i 随施钾量变化无明显规律。CK 的 C_i 最小,值为 $270.54 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$,其余处理较 CK 高 1%~25.82%。

图 1(e)为猕猴桃果实膨大期滴灌水钾一体化管理下叶片 WUE_i 的日变化。III 期水钾一体化处理下,III 期各处理 WUE_i 在 10:00、12:00 分别达到最大和最小值。8:00—10:00 P_n 增幅明显大于 T_r 的增幅,因此 WUE_i 迅速上升,随着 P_n 下降, T_r 增加, WUE_i 回落,直至 12:00 达到最小值;12:00—14:00 P_n 的降幅明显小于 T_r ,因此 WUE_i 回升并趋于稳定。表 2 表明,III 期相同施钾量下 WUE_i 随灌水量增加而增大,SD 处理 WUE_i 显著降低 ($P < 0.05$);SD 处理下, WUE_i 随施钾量增加而降低,MD、LD 处理下 WUE_i 随施钾量增加而增大。LDHK 处理的 WUE_i 最大,为 $1.86 \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$,较 CK 高 3.06%,其余处理较 CK 低 2.41%~12.27%。

图 1(f)为猕猴桃果实膨大期滴灌水钾一体化管理下叶片 CE 的日变化。III 期水钾一体化处理下,猕猴桃叶片 CE 变化趋势和 P_n 相似,呈“双峰”曲线,LDHK 处理 CE 整体上最大。表 2 表明,III 期相同施钾量下, CE 随灌水量增加而显著增大 ($P < 0.05$);SD、MD 处理下 CE 随施钾量增加而减小,LD 处理下 CE 随施钾量增加而显著增大 ($P < 0.05$)。LDHK 处理 CE 最大,为 $0.0174 \text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,较 CK 高 10.83%,其余处理较 CK 低 6.16%~48.75%。 CE 受光照、温度、水分、 CO_2 浓度、植株生物等因素影

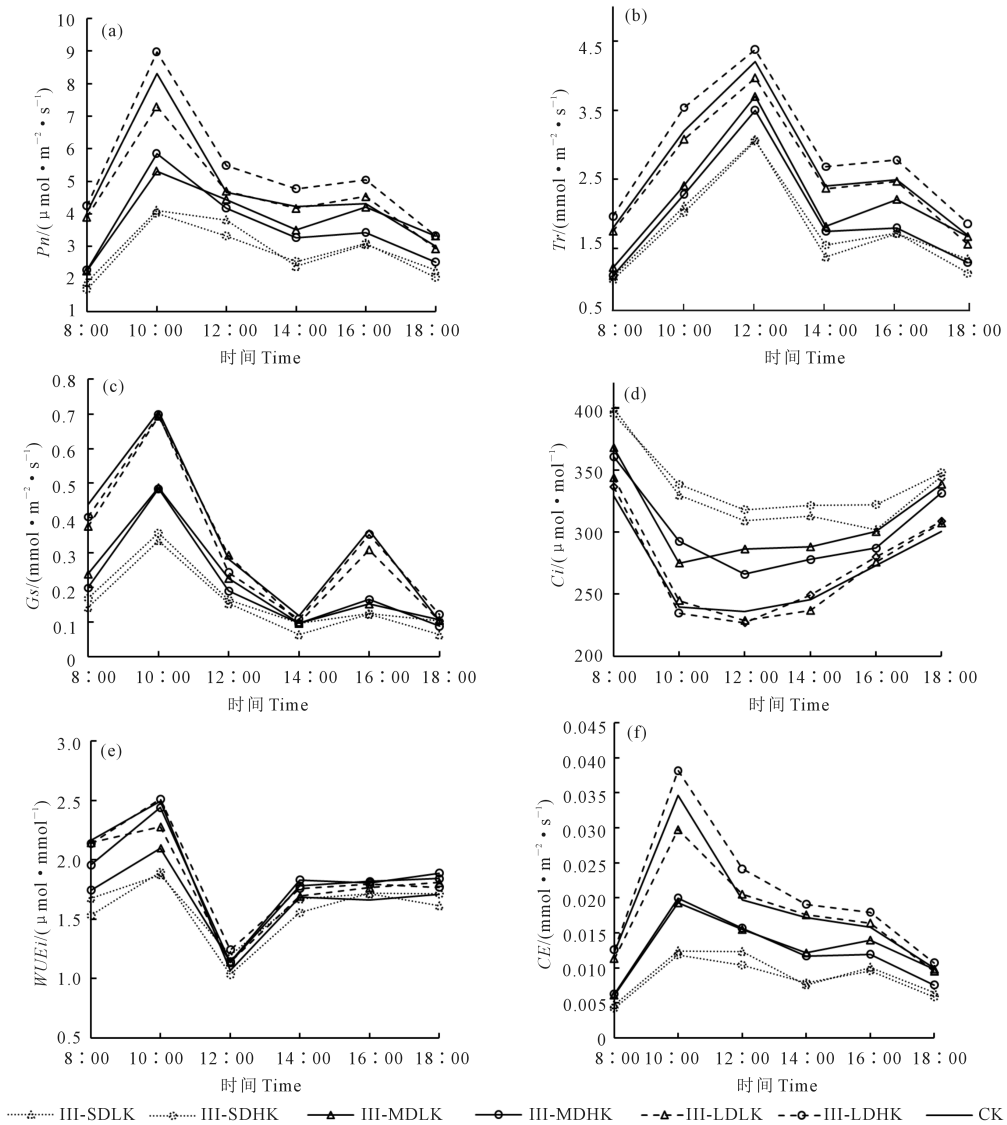


图 1 滴灌水钾一体化处理下猕猴桃果实膨大期叶片光合日变化

Fig.1 Diurnal changes of photosynthesis of kiwifruit leaves during fruit expansion stage under the drip irrigation with water-potassium integration

表 2 滴灌水钾一体化对猕猴桃果实膨大期叶片光合参数的影响 (5 月 23 日)

Table 2 Effects of drip irrigation with water-potassium integration on photosynthesis parameters of kiwifruit leaves during fruit expansion stage (on May 25)

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 ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	C_i ($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)	WUE_i ($\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$)	CE ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
III-SDLK	2.93±0.13d	1.79±0.02f	0.15±0.011e	333.05±3.05a	1.64±0.05bc	0.0087±0.0006d
III-SDHK	2.78±0.03d	1.76±0.01f	0.17±0.003d	340.40±3.02a	1.59±0.02c	0.0081±0.0002d
III-MDLK	3.84±0.29c	2.17±0.03d	0.21±0.004c	309.34±6.08b	1.76±0.11ab	0.0120±0.0018c
III-MDHK	3.58±0.00c	1.96±0.05e	0.23±0.016c	302.75±3.99b	1.83±0.04a	0.0107±0.0001c
III-LDLK	4.59±0.10b	2.53±0.04c	0.31±0.006b	272.92±5.24c	1.81±0.07a	0.0148±0.0001b
III-LDHK	5.31±0.23a	2.85±0.04a	0.32±0.003ab	272.77±3.82c	1.86±0.01a	0.0174±0.0007a
CK	4.77±0.22b	2.64±0.01b	0.34±0.006a	270.54±7.00c	1.81±0.08a	0.0157±0.0006ab

显著性检验 P 值 Significance test P value

灌水量 Irrigation amount	<0.01 **	<0.01 **	<0.01 **	<0.01 **	<0.01 **	<0.01 **
施钾量 Potassium amount	0.280	0.237	0.944	0.011	0.545	0.552
灌水量×施钾量 Irrigation amount× potassium amount	<0.01 **	<0.01 **	0.194	0.550	0.404	0.021 *

注:不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$); * 表示差异显著($P<0.05$); ** 表示差异极显著($P<0.01$)。下同。

Note: Different letters indicate significant difference in different treatment ($P<0.05$); * $P<0.05$; ** $P<0.01$. The same below.

响,充足的水分下增加施钾量有助于叶片气孔开放,提高 CO_2 浓度,进而提高 CE 。

表2也表明,灌水量对各光合指标影响均达极显著水平($P<0.01$), P_n 、 Tr 受水钾一体化作用影响达极显著水平($P<0.01$), G_s 受施钾量影响达显著水平($P<0.05$), CE 受水钾一体化作用影响达显著水平($P<0.05$)。

2.2 水钾一体化对果实成熟期叶片光合特性的影响

图2(a)为猕猴桃果实成熟期滴灌水钾一体化管理下叶片 P_n 的日变化。2019年8月15日,Ⅳ期水钾一体化处理下, P_n 变化呈“双峰”曲线,CK 的 P_n 在上午时段最高,LDHK 处理的 P_n 在下午时段最高,表明 LDHK 处理能较快地从“午休”状态恢复。表3表明,Ⅳ期相同施钾量下, P_n 随灌水量增加而显著增大($P<0.05$);SD、LD 处理下 P_n 随施钾量增加而增大,其中 LD 处理下差异达显著性水平($P<0.05$)。LDHK 处理的 P_n 最大,为 $6.24 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,较 CK 高 0.96%,其余处理较 CK 低 4.82%~50.11%。

图2(b)为猕猴桃果实成熟期滴灌水钾一体化管理下叶片 Tr 的日变化。Ⅳ期水钾一体化处理下, Tr 日变化趋势与Ⅲ期相同。表3表明,Ⅳ期相同施钾量下, Tr 随灌水量增加而显著增大($P<0.05$),SD 处理下 Tr 随施钾量增加而减小,MD、LD 处理下 Tr 随施钾量增加而增大,差异达显著性水平($P<0.05$)。CK 的 Tr 最大,为 $2.88 \text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,其余处理较 CK 低 1%~43.86%。

图2(c)为猕猴桃果实成熟期滴灌水钾一体化管理下叶片 G_s 的日变化。Ⅳ期水钾一体化处理下, G_s 日变化趋势与Ⅲ期相同,LDHK 处理 G_s 整体上最大。表3表明,Ⅳ期相同施钾量下, G_s 随灌水量增加而显著增大($P<0.05$);相同灌水量下, G_s 随施钾量增加而增大,LD 处理下差异达显著性水平($P<0.05$)。LDHK 处理的 G_s 最大,为 $0.37 \text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,较 CK 高 5.88%,其余处理较 CK 低 6.10%~44.79%。钾可以通过调节气孔形状和功能来影响气孔导度,缺钾胁迫会降低气孔的长、宽和孔径面积,也会影响叶片保卫细胞对 K^+ 以及其他无机和有机离子的快速吸收,进而影响气孔的开放和关闭过程^[10]。

图2(d)为猕猴桃果实成熟期滴灌水钾一体化管理下叶片 C_i 的日变化。Ⅳ期水钾一体化处理下 C_i 日变化呈“凹”型,LDLK 处理 C_i 整体上较低。表3表明,Ⅳ期相同施钾量下, C_i 随灌水量增加而显著

减小($P<0.05$);相同灌水量下, C_i 随施钾量变化无明显规律。

图2(e)为猕猴桃果实成熟期滴灌水钾一体化管理下叶片 WUE_i 的日变化。Ⅳ期水钾一体化处理下, WUE_i 日变化趋势与Ⅲ期相同。表3表明,LK 处理下 WUE_i 随灌水量增加呈先增大后减小的趋势,HK 处理下 WUE_i 随灌水量增加呈先减小后增大的趋势;SD、LD 处理下 WUE_i 随施钾量增加而增大,MD 处理下 WUE_i 随施钾量增加而显著减小($P<0.05$)。LDHK 处理的 WUE_i 最大,为 $2.18 \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$,较 CK 高 2%,差异未达显著性水平($P>0.05$)。Ⅳ期的 WUE_i 较Ⅲ期高,这是因为8月25日气温高,光照强度大,导致 Tr 较低,但 P_n 水平较高。

图2(f)为猕猴桃果实成熟期滴灌水钾一体化管理下叶片 CE 的日变化。Ⅳ期水钾一体化处理下, CE 日变化与Ⅲ期类似呈“双峰”曲线。表3表明,Ⅳ期相同施钾量下, CE 随灌水量增加而显著增大($P<0.05$);SD、MD 处理下 CE 随施钾量增加而减少,LD 处理下, CE 随施钾量增加而增大,差异均未达显著性水平($P>0.05$)。LDHK 处理的 CE 最大,为 $0.0209 \text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,较 CK 高 0.3%,其余处理较 CK 低 3.67%~55.14%。Ⅳ期叶片 CE 整体高于Ⅲ期,Ⅳ期是猕猴桃果实营养、糖分等快速积累的时期,营养物质从叶片向果实加速转移,进一步加快了同化速率,使 CE 保持较高水平。

表3也表明,灌水量对各光合指标影响均达极显著水平($P<0.01$);施钾量对 Tr 、 C_i 影响显著($P<0.05$);水钾一体化对 P_n 、 Tr 、 WUE_i 影响显著($P<0.05$)。

3 讨论

本研究发现,灌水量是影响猕猴桃叶片光合特性的主要因素,除 C_i 、 WUE_i 外各光合指标均随灌水量的增加而显著增大($P<0.05$),Chartzoulakis^[21] 得到相同结论。光合作用是植物生命活动最基本的物质和能量来源,水分亏缺会减小叶片 G_s ,限制 CO_2 进入细胞中,影响植物叶片光合作用,也会影响 Rubisco 的基因表达,抑制 Rubisco 的合成,从而降低 CE ^[22]。本研究发现,LD 处理有利于提高猕猴桃叶片 P_n 、 Tr 、 G_s 、 WUE_i 及 CE 。水分是影响果树营养生长和光合作用的最为敏感的因素,作物的光合作用依赖于土壤中的水分变化,当水分过量或亏缺时,会影响果树根系呼吸、矿物质元素的吸收、光合

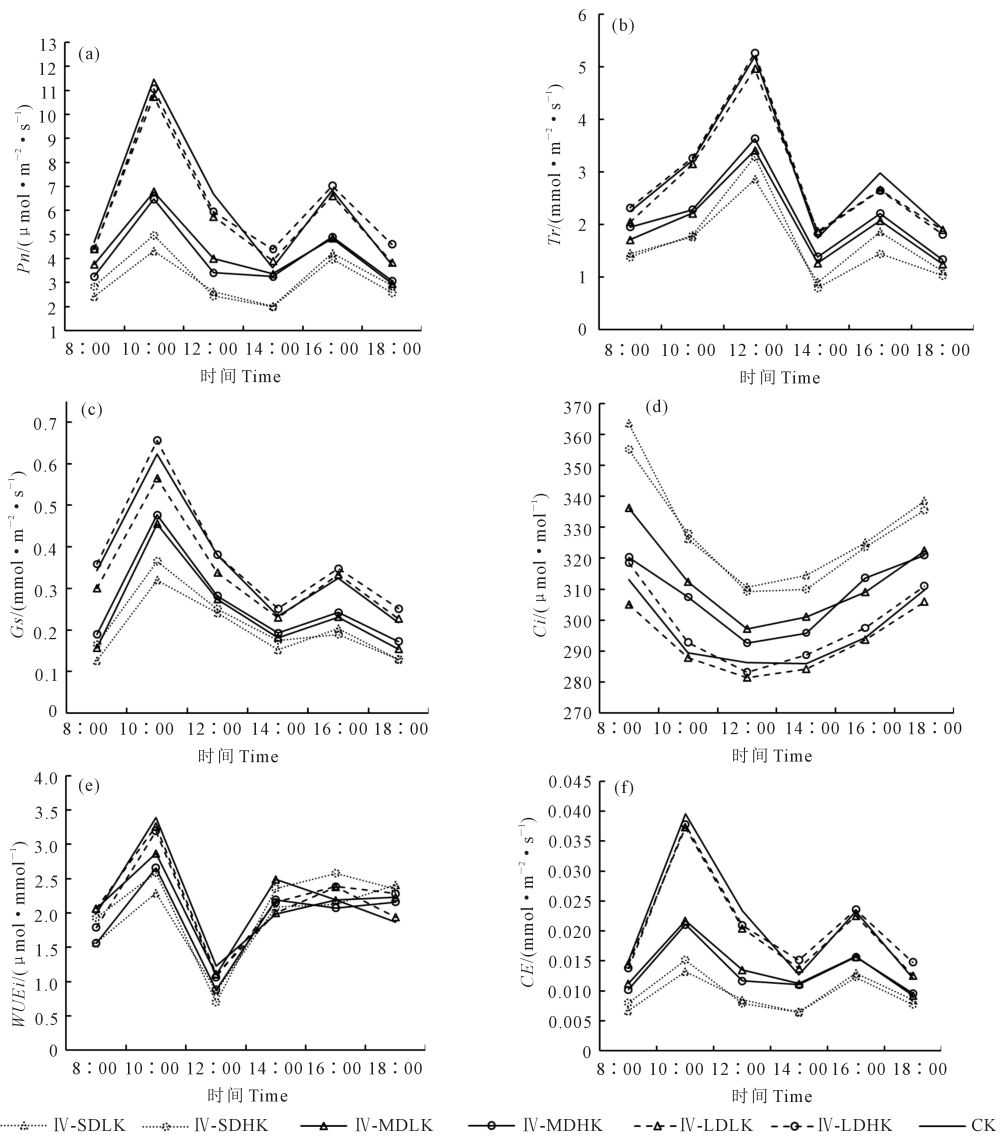


图 2 水钾一体化处理下猕猴桃果实成熟期叶片光合日变化

Fig.2 Diurnal changes of photosynthesis of kiwifruit leaves during fruit maturity stage under the drip irrigation with water-potassium integration

表 3 水钾一体化对猕猴桃果实成熟期叶片光合参数的影响 (8 月 15 日)

Table 3 Effects of drip irrigation with water-potassium integration on photosynthesis parameters of kiwifruit leaves during fruit maturity stage (on August 15)

处理 Treatment	P_n $/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	Tr $/(\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	G_s $/(\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	C_i $/(\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1})$	WUE_i $/(\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1})$	CE $/(\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$
IV-SDLK	3.08±0.01d	1.66±0.04e	0.20±0.02e	327.39±3.32a	1.86±0.03b	0.0096±0.0000c
IV-SDHK	3.13±0.04d	1.62±0.00e	0.21±0.01de	325.21±2.37a	1.94±0.05b	0.0093±0.0001c
IV-MDLK	4.29±0.14c	1.98±0.04d	0.24±0.02cd	311.02±2.84b	2.16±0.12a	0.0137±0.0007b
IV-MDHK	4.07±0.04c	2.13±0.02c	0.26±0.02c	311.03±3.65b	1.91±0.00b	0.0132±0.0004b
IV-LDLK	5.88±0.02b	2.76±0.14b	0.33±0.01b	293.29±0.46c	2.13±0.12a	0.0201±0.0004a
IV-LDHK	6.24±0.14a	2.85±0.01a	0.37±0.02a	298.02±0.83c	2.18±0.04a	0.0209±0.0010a
CK	6.18±0.15a	2.88±0.01a	0.35±0.01ab	295.39±1.55c	2.14±0.06a	0.0208±0.0007a
显著性检验 P 值 Significance test P value						
灌水量 Irrigation amount	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
施钾量 Potassium amount	0.305	0.017	0.563	0.037	0.296	0.611
灌水量×施钾量 Irrigation amount× potassium amount	0.012	0.022	0.192	0.509	0.011	0.329

作用、抗病能力及地上生长量等^[23]。但适度水分亏缺有利于提高叶片光合速率和瞬时水分利用效率。Zhong 等^[24]研究发现,黄土高原苹果树水分亏缺处理的最佳时期为Ⅱ期,在此期间产量和 WUE_i 最高;Hebbar 等^[25]研究表明,水分亏缺导致可可叶片胞间 CO_2 浓度增加,进而提高了 P_n ,导致生物量的高积累,提高了 WUE_i 。

本研究发现,各水分处理下增加施钾量均能对猕猴桃叶片光合特性产生影响,LD 处理下,施钾量的增加能显著增大 P_n 、 Tr 、 G_s 、 CE ($P < 0.05$) 而 SD 处理下结果相反。钾是加速果树光合机构运转的重要驱动力,对果实生长发育和品质的形成具有重要意义^[26]。研究表明,钾可以在许多方面影响光合作用进程,如促进气孔开放,提高叶片中叶绿素含量,提高光合作用中酶的活性和有效性,提高叶肉细胞的渗透势,提高质子流跨膜运输效率以及合成光合作用所需要的 ATP 等^[27]。另一方面,过量的钾会带来负面影响,水肥对果树的耦合效应可产生 3 种不同的结果或现象,即协同效应、顺序加和效应和拮抗效应^[28]。大量研究表明水肥耦合在一定范围内,对果树光合作用和水分利用效率具有促进作用,合理的水肥组合可以提高两者的效率并产生协同作用^[29-32]。彭有亮等^[33]认为,水肥处理对芒果叶片 P_n 呈现协同效应,而在膨大期亏水 50% 处理下对 WUE_i 呈现拮抗效应;张兴国等^[34]的研究表明,在充分灌水下,葡萄产量和 WUE_i 随施肥量增加呈先增大后减小的趋势;陈昱辛等^[35]对柑橘的研究表明,仅在轻度亏水处理下,增加施肥量有利于提高 P_n 、有效降低 Tr ,进而提高 WUE_i ;刘小刚等^[36]的研究表明灌水量为 75%ET 处理下,增加施肥量能有效提高芒果叶片 P_n 、 G_s 和 WUE_i ,而在灌水为 100%ET 处理下结果相反。孙骞等^[27]的研究表明充分灌溉时,提升供钾水平可提高猕猴桃叶片的 P_n 、 G_s 、 WUE_i ,降低 C_i 、 Tr ,本研究得到了相似的结论;而王英珍等^[14]的研究表明,高钾浓度的水培下,梨树新梢、根系生长受到抑制、叶面积显著减小 ($P < 0.05$),且叶绿体结构受到破坏,导致光合能力显著下降。孙骞等^[27]也发现,随着施钾量增加,猕猴桃叶片 P_n 、 G_s 、 WUE_i 和叶绿素含量呈先增大后减小的趋势。因此,本试验还将在相同亏水程度下增加施钾水平,并结合叶片叶绿素含量进一步研究水钾一体化对猕猴桃光合特性的影响。

4 结 论

1) 水钾一体化处理对猕猴桃光合特性影响显

著。Ⅲ期相同施钾量下,叶片 P_n 、 Tr 、 G_s 和 CE 均随灌水量增加而显著增大 ($P < 0.05$); LD 处理下叶片 P_n 、 Tr 、 G_s 、 WUE_i 和 CE 均随施钾量增加而增大,Ⅲ-LDHK 较 Ⅲ-LDLK 的 P_n 、 Tr 和 CE 显著增大 ($P < 0.05$),与 CK 相比 Ⅲ-LDHK 处理 P_n 显著提高 11.38% ($P < 0.05$), WUE_i 提高 3.06%, CE 提高 10.83%;SD 处理下叶片 P_n 、 Tr 、 WUE_i 和 CE 随施钾量增加而下降,与 CK 相比,SD 处理下,除 C_i 外各光合指标均显著降低 ($P < 0.05$);MD 处理下, P_n 、 Tr 、 C_i 和 CE 随施钾量增加而下降, G_s 、 WUE_i 随施钾量增加而增大,与 CK 相比,MD 处理下除 WUE_i 未呈现显著性差异 ($P > 0.05$) 外,其余光合指标显著下降 ($P < 0.05$)。

2) Ⅳ期相同施钾量时, P_n 、 Tr 、 G_s 和 CE 均随灌水量增加而显著增大 ($P < 0.05$); LD 处理下叶片 P_n 、 Tr 、 G_s 、 WUE_i 、 CE 均随施钾量增加而增大,Ⅳ-LDHK 较 Ⅳ-LDLK 的 P_n 和 G_s 显著增大 ($P < 0.05$),与 CK 相比 Ⅳ-LDHK 处理 P_n 提高 0.96%, WUE_i 提高 2.00%,但差异未达显著性水平 ($P > 0.05$)。SD、MD 处理下,随施钾量变化,叶片光合指标变化不明显;与 CK 相比,SD 处理下,除 C_i 外各光合指标均显著降低 ($P < 0.05$),MD 处理下,除 MDLK 处理下 WUE_i 未呈现显著性差异 ($P > 0.05$) 外,其余各光合指标显著性下降 ($P < 0.05$)。

3) 灌水量对猕猴桃叶片光合指标的影响大于施钾量的影响。Ⅲ、Ⅳ期灌水量对各光合指标影响均达极显著水平 ($P < 0.01$),施钾量对Ⅲ期 G_s 与Ⅳ期 Tr 、 G_s 影响显著 ($P < 0.05$)。Ⅲ期比Ⅳ期表现出更高的水钾敏感度,水钾一体化对Ⅲ期 P_n 、 Tr 影响极显著 ($P < 0.01$),对 CE 影响显著 ($P < 0.05$),对Ⅳ期 P_n 、 Tr 、 WUE_i 影响显著 ($P < 0.05$)。

综合来看,与 CK 处理相比,在果实膨大期和果实成熟期,轻度水分亏缺和较高的钾肥配比 (Ⅲ-LDHK 与 Ⅳ-LDHK 处理) 可节水节肥 20%,且有利于改善猕猴桃叶片光合作用,是猕猴桃较适宜的滴灌水钾一体化管理模式。

参 考 文 献:

- [1] 王景燕,龚伟,包秀兰,等.水肥耦合对汉源花椒幼苗叶片光合作用的影响[J].生态学报,2016,36(5):1321-1330.
- [2] 舒永红,崔宁博,张效星,等.滴灌水肥一体化对柑橘生育早期光合特性的影响[J].中国农村水利水电,2018,(10):118-124.
- [3] 杜天生,康绍忠,夏桂敏,等.滴灌条件下不同根区交替湿润对葡萄生长和水分利用的影响[J].农业工程学报,2005,21(11):51-56.
- [4] 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.

- [5] 刘素强.钾素水平、塑料薄膜种类、调亏灌溉对厚皮甜瓜生长及品质的影响[D].泰安:山东农业大学,2019.
- [6] 张正红,成自勇,张国强,等.调亏灌溉对设施延后栽培葡萄光合速率与蒸腾速率的影响[J].灌溉排水学报,2014,33(2):130-133.
- [7] 王颖.不同灌水量对梨枣生理特性及产量品质的影响研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2011.
- [8] 马军勇,郑国玉,周建伟,等.不同灌水下限对枣树光合特性、产量及品质的影响[J].灌溉排水学报,2020,39(1):31-36.
- [9] 钟海霞,张付春,潘明启,等.不同灌水量对赤霞珠葡萄光合作用的影响[J].新疆农业科学,2020,57(3):492-497.
- [10] 陆志峰,鲁剑巍,潘勇辉,等.钾素调控植物光合作用的生理机制[J].植物生理学报,2016,52(12):1773-1784.
- [11] 徐新翔,侯昕,贾志航,等.供钾水平对苹果砧木 M9T337 幼苗生长、光合特性与¹⁵N、¹³C 吸收利用的影响[J].应用生态学报,2019,30(6):1861-1868.
- [12] 朱祖雷,黄华梨,张露荷,等.不同施钾量对骏枣产量、品质及光合特性的影响[J].果树学报,2019,36(12):1693-1703.
- [13] 周敏,曾蓓,赵玉华,等.钾对刺葡萄光合作用的影响[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2017,43(2):156-160.
- [14] 王英珍,张虎平,黄小三,等.钾在梨树内的分配及对梨树生长和叶片光合能力的影响[J].南京农业大学学报,2017,40(1):60-67.
- [15] 王小娟,陈健晓,李雪娇,等.钾对厚皮甜瓜生长发育及光合特性的影响[J].热带作物学报,2017,38(9):1628-1632.
- [16] 徐蓉,黄昌学,唐合均,等.四川省猕猴桃生产现状及对策[J].现代农业科技,2018,(19):131-132.
- [17] 贺浩浩.猕猴桃园水肥一体化应用效果研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2015.
- [18] 高晶波.秦岭北麓猕猴桃园土壤硝态氮累积及水肥调控研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2016.
- [19] Zhou M, Zhou S S, Zheng B, et al. Effects of foliar spraying of magnesium-potassium sulfate fertilizer on absorption of magnesium, potassium and calcium in different position tobacco leaves[J]. Agricultural Science & Technology, 2014, 15(10):1714-1718.
- [20] 郑圣先,罗成秀,戴平安,等.钾、镁营养水平对油菜产量和养分吸收的影响[J].土壤通报,1991,22(2):87-89,92.
- [21] Chartzoulakis K, Noitsakis B, Therios I. Photosynthesis, plant growth and dry matter distribution in kiwifruit as influenced by water deficits[J]. Irrigation Science, 1993, 14:1-5.
- [22] 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):5907-5917.
- [23] 阎腾飞,赵师成,张广波,等.不同土壤水分条件下信阳五月鲜桃光响应过程及其模拟[J].节水灌溉,2020,(2):51-56.
- [24] Zhong Y, Fei L J, Li Y B, et al. Response of fruit yield, fruit quality, and water use efficiency to water deficits for apple trees under surge-root irrigation in the Loess Plateau of China[J]. Agricultural Water Management, 2019, 222:221-230.
- [25] Hebbar K B, Apsara E, Chandran K P, et al. Effect of elevated CO₂, high temperature, and water deficit on growth, photosynthesis, and whole plant water use efficiency of cocoa (*Theobroma cacao* L.) [J]. International Journal of Biometeorology, 2020, 64:47-57.
- [26] 李白云.不同钾肥处理对猕猴桃果实质量的影响[D].杨凌:西北农林科技大学,2008.
- [27] 孙骞,杨军,张绍阳,等.钾营养对中华猕猴桃叶片光合作用及叶绿素荧光的影响[J].安徽农业大学学报,2007,34(2):256-261.
- [28] 闫春娟,韩晓增,王文斌,等.水钾一体化对大豆光合特性及其产物积累运转的影响[J].中国油料作物学报,2012,34(1):48-55.
- [29] Du Y D, Cao H X, Liu S Q, et al. Response of yield, quality, water and nitrogen use efficiency of tomato to different levels of water and nitrogen under drip irrigation in Northwestern China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2017, 16(5):1153-1161.
- [30] Kiyamaz S, Ertek A. Yield and quality of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) at different water and nitrogen levels under the climatic conditions of Kirsehir, Turkey[J]. Agricultural Water Management, 2015, 158:156-165.
- [31] Abd El-Mageed T A, Semida W M, Taha R, et al. Effect of summer-fall deficit irrigation on morpho-physiological, anatomical responses, fruit yield and water use efficiency of cucumber under salt affected soil[J]. Scientia Horticulturae, 2018, 237:148-155.
- [32] Wang H, Wu L F, Cheng M H, et al. Coupling effects of water and fertilizer on yield, water and fertilizer use efficiency of drip-fertigated cotton in northern Xinjiang, China[J]. Field Crops Research, 2018, 219:169-179.
- [33] 彭有亮,刘小刚,张岩,等.微润灌溉施肥对干热区芒果光合特性、产量和水肥利用的影响[J].水土保持学报,2020,34(1):350-357,364.
- [34] 张兴国,胡笑涛,冉辉,等.水肥耦合对温室葡萄产量和水肥利用的影响[J].中国农村水利水电,2019,(1):1-5.
- [35] 陈昱辛,贾悦,崔宁博,等.滴灌水肥一体化对柑橘叶片光合、产量及水分利用效率的影响[J].灌溉排水学报,2018,37(S2):50-58.
- [36] 刘小刚,孙光照,彭有亮,等.水肥耦合对芒果光合特性和产量及水肥利用的影响[J].农业工程学报,2019,35(16):125-133.