

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.12.026

桃树需水信号及产量和果实品质对水分的响应研究^{*}

周罕觅^{1,2} 张富仓^{1,2} 李志军^{1,2} 龚道枝³ 吴立峰^{1,2}

(1. 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;

2. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100;

3. 中国农业科学院农业部旱作节水农业重点实验室, 北京 100081)

摘要: 于2010和2011年桃树连续生长季,在移动式遮雨棚下进行4a生桃树小区灌溉试验,研究了桃树需水信号(液流速率、净光合速率 P_n 、蒸腾速率 T_r 和气孔导度 G_s)及产量和果实品质对不同灌水量(I_1 : 100% ET_c 、 I_2 : 75% ET_c 、 I_3 : 50% ET_c 、 I_4 : 25% ET_c , ET_c 是作物蒸发蒸腾量)的响应规律。2a试验结果表明:与 I_1 相比, I_2 不会明显降低桃树液流速率、 P_n 和产量并可获得较高的水分利用效率(WUE),2a分别平均提高6.2%、7.7%,而 I_3 和 I_4 虽然有较低的 T_r 和较高的WUE,但其 P_n 和产量显著下降,分别降低9.2%、21.4%和16.9%、42.5%。不同灌水量对口感风味、维生素C、糖酸比、单果质量和产量产生了极显著的影响($P < 0.01$),其中 I_2 较 I_1 2a分别提高了2.2%、4.5%、24.4%、28.8%、-2.3%和5.9%、3.2%、26.5%、9.3%、0.4%。不同灌水量对果实个数、着色度、硬度和可滴定酸产生了显著的影响($P < 0.05$),其中 I_2 较 I_1 2a分别提高了-24.1%、85.7%、22.1%、12.1%和-8.1%、40%、28.8%、-2.7%。不同灌水量对果实含水率影响不大,亏缺灌溉(I_2 、 I_3 、 I_4)均提高了果实品质。由此可见,75% ET_c 亏缺灌溉是桃树在产量、水分利用效率和果实品质上最好的灌溉量。

关键词: 桃树 液流 品质 产量 净光合速率**中图分类号:** S274; S662.1**文献标识码:** A**文章编号:** 1000-1298(2014)12-0171-10

引言

在干旱或半干旱地区,由于常年降水量小,蒸发强度大,造成植被恢复水分的条件很差,所以水分是影响植物生长的关键因子^[1]。水分又是实现对作物品质改善的媒体和介质,在作物某些生育阶段通过控制水分,改善植株代谢,促进光合产物的增加,可以改善果实品质^[2-3]。研究表明,亏水处理有利于果实维生素C和可溶性固形物的提高^[4-8],可明显提高不同品种果实的糖酸比,并使果实的色泽更加红润,明显改善果实的内在品质与外观^[3,5,9-11]。因此,亏水处理不但可以大量节约灌溉用水又可明显改善果实品质,提高水果的商品价值,具有重要的推广价值。

我国水资源有限,在干旱或半干旱地区的水果产区,果园常常全年会受到干旱的胁迫,使得果树自身的生长受到影响,挂果少,产量低,经济效益差,在有限的水资源条件下适当的进行灌溉能大幅度的提高果树产量和经济效益。研究表明,亏缺灌溉不仅

影响桃树果实大小更影响果实个数^[12],但适当亏缺灌溉并不影响其产量^[13-14]。光合作用又是影响果实产量和品质的决定性因素^[15-17]。为探寻半干旱地区桃树灌水量与产量和果实品质的最佳供水机制,本文分析半干旱地区桃树需水信号及产量和果实品质对水分的响应规律以及产量、土壤含水率、光合速率间的相互关系,以期干旱或半干旱地区桃子优质、高产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地基本情况

试验于2010-03-25—2011-10-15在西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室的灌溉试验站移动式防雨棚中进行。试验站地处34°17'N、108°04'E,海拔521m,多年平均气温12.5~13℃,属于半干旱半湿润气候,多年平均降雨量490~520mm,蒸发量1300~1400mm,土壤质地为中壤土,其1m土层内的田间持水率为0.233~0.255g/g,平均干容重为1.44g/cm³,土壤肥力较

收稿日期: 2014-08-22 修回日期: 2014-09-19

* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2011AA100504)和高等学校学科创新引智计划(111计划)资助项目(B12007)

作者简介: 周罕觅, 博士生, 主要从事节水灌溉理论与技术研究, E-mail: zhouhm@163.com

通讯作者: 张富仓, 教授, 博士生导师, 主要从事节水灌溉理论与技术研究, E-mail: zhangfc@nwsuaf.edu.cn

均一, 0~1 m 土壤初始平均含水率为 0.181 g/g。供试果树为 4 a 生桃树(硬质中晚熟桃 FX2000-1)。

1.2 试验方法

试验设 4 个灌水量处理, 1 个为充分灌水, 其灌水指标为 100% $ET_c(I_1)$; 另外 3 个灌水处理为非充分灌水, 其灌水指标分别为 75% $ET_c(I_2)$ 、50% $ET_c(I_3)$ 和 25% $ET_c(I_4)$ 。作物需水量依据当地多年间的参考作物蒸发蒸腾量 ET_0 计算, 每次灌水量的计算采用的 ET_0 为多年间 10~15 d 总和的平均值。 ET_c 计算式为

$$ET_c = K_c ET_0 \quad (1)$$

式中 ET_c ——某时段桃树实际需水量, mm/d

ET_0 ——某时段当地参考作物蒸发蒸腾量, mm/d

K_c ——作物系数

K_c 值参照 FAO(联合国粮农组织)推荐的作物标准作物系数(FAO56, 1998)提供的桃树作物系数 $K_{cini} = 0.55$, $K_{cmid} = 0.9$, $K_{cend} = 0.65$ (无地面覆盖, 无霜冻, 作物最大高度 3 m)。例如 2010 年 5 月 15 日灌水量计算: ET_0 采用多年间每年 05-01~05-15 ET_0 总和的平均值为 45.74 mm, 此时期为桃树发育中期故 $K_c = K_{cmid} = 0.9$, 则

$$ET_c = K_c ET_0 = K_{cmid} ET_0 = 0.9 \times 45.74 \text{ mm} = 41.166 \text{ mm} \quad (2)$$

根据桃树周围隔离带半径(0.8 m)计算灌溉面积, 再根据控制的 ET_c 计算各个灌水处理的实际灌水量。

在桃园选取冠幅大小相近、树干直径相同且周围环境相似的 12 棵桃树为监测样树。在每个样树根部挖 20 cm 宽、1 m 深的防侧渗沟, 埋入 1 m 深的双层防侧渗塑料膜, 同时地表以上预留 20 cm 双层防侧渗塑料膜, 防止样树之间水分侧渗。每个灌水处理设 3 次重复。

1.3 测定项目和方法

1.3.1 液流速率的测定

液流速率采用热扩散法测定。热扩散式探针(Thermal dissipation probe, TDP)由一根线性加热探针和另一根不加热探针组成, 安装在沿树干方向处于同一水分通道上的 2 个钻孔中, 距树干底部 0.35 m, 为防止外界环境的影响, 用锡箔纸将探针进行包裹, 测量两探针的温差 ΔT 。利用英国 Grant 公司生产的 SQ 系列数据采集器对桃树树干液流进行连续定位监测, 每 10 min 采集一个平均值。最后用 Granier 的数学关系式

$$F_d = 1.1899 \times 10^{-4} [(\Delta T_{\max} - \Delta T) / \Delta T]^{1.231} \quad (3)$$

便可以得到树干的液流速率。

1.3.2 光合特性和土壤含水率的测定

选择 2010 和 2011 年 5 月中下旬(桃树坐果—膨大期)的 3~5 个晴天, 采用美国 Li-Cor 公司生产的 Li-6400 光合测定系统测定不同处理桃树中上部(1.5~1.8 m)完整叶片的净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s), 测定时每株选取 5 片叶, 每个叶片每次连续采集 3 个稳定数据。测定时间为每天 08:00~18:00, 每 2 h 测定 1 次, 多天观测取平均值。叶片水分利用效率(WUE, $\mu\text{mol}/\text{mmol}$)计算式为

$$WUE = \frac{P_n}{T_r} \quad (4)$$

土壤含水率的测定采用取土干燥法, 土壤表层以下 0~1 m 分层测定, 每隔 10 cm 取土样一次, 取平均值。

1.3.3 果实产量和品质的测定

桃树成熟期在果园连续多天不间断地采摘不同处理的桃果并实测其产量。采摘时, 在不同处理的桃树树冠东西南北部各选取代表性果实 5 个, 每棵桃树共选取 20 个果实。为了消除采样时人为因素对测定结果的影响, 利用 4 分法进行测定样品的随机选取。采摘后用称量法测定选取的 10 个果实的平均单果质量, 用意大利 FT327 型硬度计测定果实硬度。

采摘后在 8℃ 的冰箱内冷藏, 采用干燥法测定果实含水率(将果实鲜样放入培养皿称质量并记录, 置于干燥箱中 70℃ 干燥后再称质量, 计算出果实含水率)。

着色度与口感风味采用专家打分法(着色度满分为 1 分, 打分标准是: 着色 60% 以上 1.0~0.8 分, 着色 40%~60% 为 0.6~0.8 分, 着色 40%~20% 为 0.4~0.5 分, 着色 20% 以下为 0~0.4 分; 口感风味满分为 10 分, 打分标准是: 口感极好为 9~10 分, 口感好为 7~8 分, 口感一般为 5~6 分, 口感较差为 0~4 分)。

采用钼蓝比色法测定果实维生素 C 含量, 采用 RHBO-90 型手持折射仪测定可溶性固形物, 酸碱滴定法测定果实酸度。

1.4 数据统计分析

应用 SPSS Statistics 18.0 统计软件对数据进行处理及相关性分析; 对不同处理间各指标进行方差分析, 若差异显著, 再用 Duncan 多重比较进行分析。

2 结果与分析

2.1 桃树需水信号对水分的响应

2.1.1 液流速率的变化

图 1 是 2010 年不同灌水处理间桃树全生育期

树干液流速率变化规律的比较结果和 I₁ 灌水量示意图。从图 1 可以看出,桃树树干液流速率存在明显的日变化周期和连日变化规律。液流速率基本在 06:00 左右开始随着温度的升高、蒸腾强度的增加和空气相对湿度的下降而持续上升,又伴随着大气温度、太阳辐射等因子的变化,出现峰值的大小变化,呈现出典型的峰值曲线特征,最大峰值一般出现在 14:00 前后(空气温度最高、太阳辐射最强)。各个灌水处理之间液流速率变化的峰值起升和降落时间无明显差别,在低灌水量条件下,峰值较小;高灌水量条件下,峰值较大,表现为灌水后峰值整体上升,说明一定条件下灌水越多,桃树液流速率越大。

白天不同灌水处理间液流速率存在明显差异,高水处理液流速率较大,低水处理液流速率相对较小;夜间不同灌水处理间也存在差异但不明显,液流速率基本维持在一个较小范围内(0 ~ 4 μg/(m²·s))。全生育期 I₁、I₂、I₃、I₄ 平均液流速率分别为 11.92、10.92、9.47、7.79 μg/(m²·s),表现为 I₁ > I₂ > I₃ > I₄,灌水前后液流速率差异很大,灌水后液流速率明显高于灌水前且不同处理间差异更加显著,说明桃树液流速率与土壤含水率密切相关,即液流速率是土壤水分的一个敏感响应要素,一定条件下灌水越多,土壤含水率越高,液流速率越大,但适当的亏缺灌溉不会明显降低其液流速率,表现为 I₁ 与 I₂ 间差异很小。

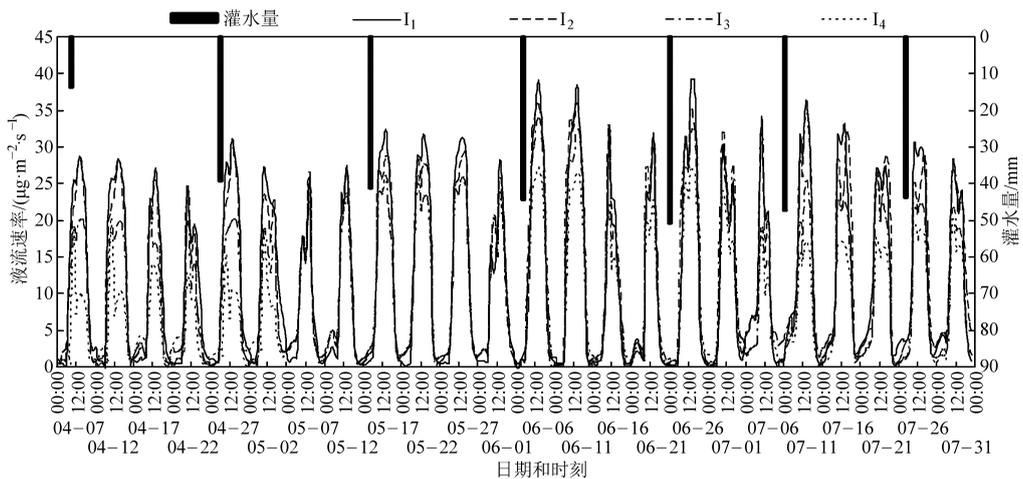


图 1 2010 年桃树全生育期液流速率变化规律和 I₁ 灌水量示意图

Fig. 1 Sap flow velocity of peach tree and irrigation amount of I₁ in 2010

2.1.2 净光合速率的日变化

图 2 表明,不同灌水处理下桃树叶片净光合速率(P_n)具有明显的日变化规律。2010 年坐果-膨大期 P_n呈单峰曲线变化,在早晨 CO₂ 浓度比较高,但其光合速率并不高,从 08:00 开始 I₁、I₂、I₃、I₄ 平均值分别为 17.84、17.71、17.14 和 16.51 μmol/(m²·s)。

随着空气温度(T_a)和光合有效辐射(PAR)的增强,不同灌水处理桃树 P_n都急剧增加,到 10:00 左右达到最大平均值,分别为 19.73、19.24、19.03 和 18.62 μmol/(m²·s)。在 10:00 以后,由于 PAR、T_a 等环境因素的影响诱导叶表气孔关闭,桃树 P_n呈缓慢下降的趋势,到 18:00 P_n达到观测最小值,I₁、I₂、I₃、

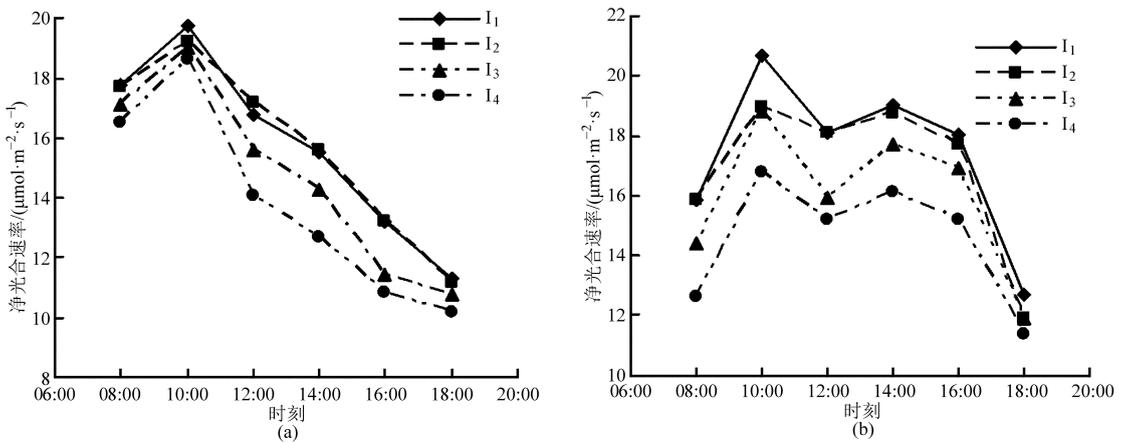


图 2 桃树坐果-膨大期净光合速率的平均日变化

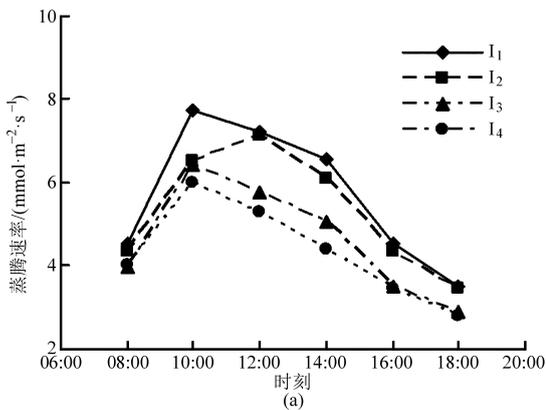
Fig. 2 Average daily variation of net photosynthetic rate in fruiting-fruit expanding period of peach tree

(a) 2010 年 (b) 2011 年

I_4 最小平均值分别为 11.32、11.22、10.83 和 10.24 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

2011 年坐果-膨大期 P_n 则表现为双峰曲线变化,出现了典型的“午休”现象。从上午 08:00 开始 I_1 、 I_2 、 I_3 、 I_4 平均值分别为 15.87、15.89、14.41 和 12.64 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,到 10:00 左右 P_n 上升到全天最大值(第 1 个峰值), I_1 、 I_2 、 I_3 、 I_4 最大平均值分别为 20.66、18.94、18.85 和 16.77 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, P_n 在 12:00 有所下降,出现了“午休”现象,这是由于中午的高温、低湿使叶片暂时过热、过干,水分代谢失调所致,在 14:00 左右达到全天第 2 个峰值, I_1 、 I_2 、 I_3 、 I_4 平均值分别为 19.06、18.74、17.68 和 16.11 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,分别比第 1 个峰值下降了 7.7%、1.1%、6.2%、3.9%, I_2 第 2 个峰值的降幅最小,这说明 I_2 亏缺灌水处理下 P_n 变化最为平缓,水分和光合速率的变化达到了最佳配比,然后缓慢下降,在 16:00 之后由于太阳辐射迅速下降, P_n 也开始迅速下降,全天 I_1 、 I_2 、 I_3 和 I_4 处理间 P_n 差异较 2010 年更大,试验效果更明显,这表明光合速率是水分亏缺的一个敏感响应要素。

2 a 相同时期 P_n 日变化过程中都表现为: I_1 和 I_2 之间差异不明显,但它们与 I_3 、 I_4 间的差异十分明显,表现为 $I_1 \approx I_2 > I_3 > I_4$ 。由此可以说明,不同灌



水量对桃树 P_n 日变化具有很大的影响,一般 P_n 随灌水量的增加而显著升高,且具有明显的日变化特征,但当灌水量较高时, P_n 随灌水量的增加变化不明显。2010 年 P_n 日变化过程为单峰曲线,而 2011 年则为双峰曲线,分析其原因是 2011 年坐果-膨大期中午平均温度过高,由于叶片暂时过热、过干,水分代谢失调,其净光合速率反而下降,这说明桃树 P_n 日变化过程会根据外部环境因素不同而呈现出不同的曲线特征(单峰曲线或双峰曲线)。

2.1.3 蒸腾速率的日变化

图 3 表明,桃树坐果-膨大期蒸腾速率(T_r)平均日变化呈典型的单峰曲线特征,不同灌水量处理桃树 T_r 的日变化差异明显,但变化趋势基本一致。

2010 年坐果-膨大期, I_1 灌水处理桃树 T_r 增长较快,最大值出现在 10:00 左右,为 7.73 $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,比 I_3 、 I_4 最大值分别高出 20.59% 和 29.26%;而 I_2 灌水处理 T_r 增长缓慢,最大值出现在 12:00 左右,为 7.12 $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,比 I_3 、 I_4 最大值分别高出 11.08% 和 19.06%。 I_1 、 I_2 、 I_3 、 I_4 在出现最大值后随着 PAR、 T_a 等气象因素的变化以及气孔的逐渐关闭, T_r 趋于减弱,并开始缓慢下降,之后变化幅度差别不大,但总体表现为 $I_1 > I_2 > I_3 > I_4$ 。

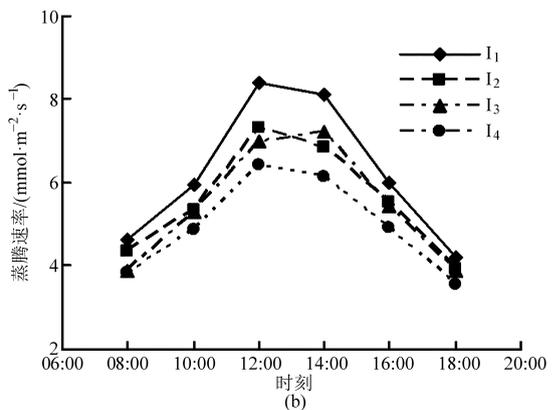


图 3 桃树坐果-膨大期蒸腾速率的平均日变化

Fig. 3 Average daily variation of transpiration rate in fruiting-fruit expanding period of peach tree

(a) 2010 年 (b) 2011 年

2011 年坐果-膨大期,4 个灌水处理也具有明显的日变化且变化趋势相同,也呈先升高后降低的单峰曲线变化趋势,总体也表现为 $I_1 > I_2 > I_3 > I_4$ 。但由于和 2010 年相同时期 PAR、 T_a 等气象因素的不同,全天 T_r 最大值除 I_3 外都出现在 12:00 左右, I_1 、 I_2 和 I_4 的最大值分别为 8.41、7.32 和 6.40 $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, I_3 最大值 7.23 $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 出现在 14:00 左右, I_1 和 I_4 差异最大, I_1 比 I_4 高 31.41%。2011 年坐果-膨大期 T_r 最大值较 2010 年分别高出 8.79%、2.81%、12.79%、7.02%。以上

结果表明,不同灌溉水量对桃树的蒸腾速率有显著的影响,总体表现为 $I_1 > I_2 > I_3 > I_4$,由此也说明在同一条件下,水分亏缺时桃树灌水越多 T_r 越高。

2.1.4 气孔导度的日变化

图 4 表明,桃树气孔导度(G_s)随灌水量的减少呈梯度降低,说明桃树自身可以通过控制气孔开放程度以适应干旱的环境条件,且 G_s 具有比较显著的单峰曲线的日变化特征,一般上午 08:00—10:00, G_s 从一个较高的水平开始上升,10:00 左右达到当天的峰值(最大值),2010 年桃树坐果-膨

大期 I_1 、 I_2 、 I_3 、 I_4 最大平均值分别为 0.30、0.23、0.24 和 0.22 $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 2011 年分别为 0.25、0.26、0.23 和 0.21 $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 此后随时间不断

下降。整个过程中, G_s 随不同灌水处理的差异比较明显, 表现为 $I_1 > I_2 > I_3 > I_4$ 。2 a 相同时期 G_s 变化趋势基本一致。

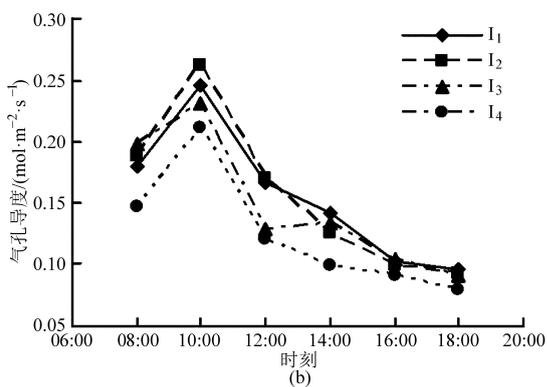
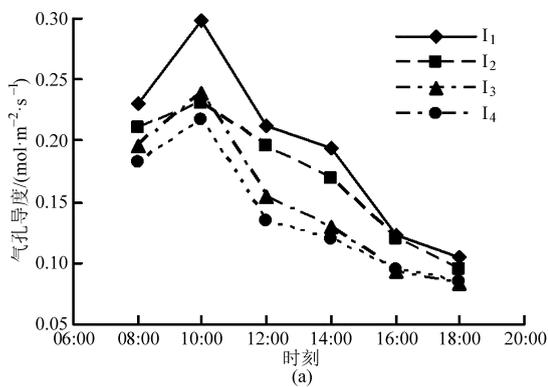


图 4 桃树坐果-膨大期气孔导度的平均日变化

Fig. 4 Average daily variation of stomatal conductance in fruiting-fruit expanding period of peach tree

(a) 2010 年 (b) 2011 年

2.1.5 水分利用效率的日变化

图 5 表明, 2010 和 2011 年桃树坐果-膨大期水分利用效率 (WUE) 平均日变化特征基本相同, 表现为上午时段的 WUE 明显高于下午时段, 最高值出现在 08:00 左右, 在 12:00—14:00 降至低谷, 14:00—16:00 WUE 开始回升, 之后又开始缓慢下降。2010 年整个过程不同灌水处理下 WUE 有明显差异, 整体表现为 $I_3 > I_4 > I_2 > I_1$, 不同灌水处理间 WUE 的平均最大值出现在 I_3 处理, 说明 I_3 处理的水分利用效率达到最佳状态。2011 年整个过程不同灌水处理下 WUE 也有明显差异, 整体表现为 $I_2 > I_3 > I_4 > I_1$, 不同灌水处理间 WUE 的平均最大值出现在 I_2 处理, 说明 I_2 灌水处理下水分利用效率达到了最佳状态, 其中 2010 和 2011 年 I_2 灌水处理 WUE 分别较 I_1 平均提高了 6.2%、7.7%。

不同灌水处理中, I_2 和 I_3 (轻度和中度亏水) 灌水处理水分利用效率相对最高, 虽然在 I_1 处理下灌水量最大, 桃树具有较高的光合速率, 但是其蒸腾速率也是最高的, 致使其水分利用效率较低。

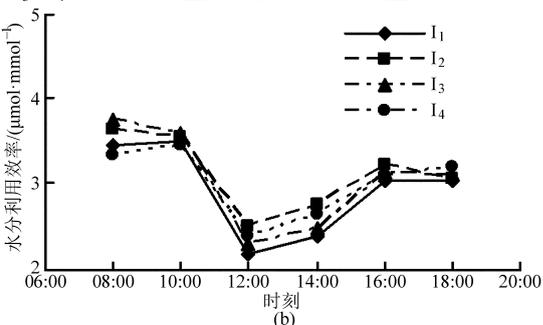
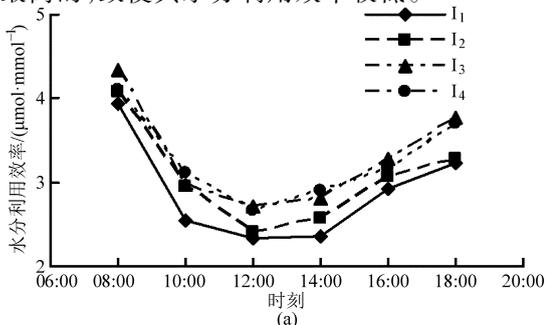


图 5 桃树水分利用效率平均日变化

Fig. 5 Average daily variation of water use efficiency of peach tree

(a) 2010 年 (b) 2011 年

2.2 桃树产量对水分的响应

2.2.1 产量及构成要素

表 1 表明, 2010 年和 2011 年不同灌水量对桃树产量及构成要素都产生了显著影响, 其中果实个数达到了显著水平 ($P < 0.05$), 产量和单果质量则达到了极显著的水平 ($P < 0.01$)。其中 2010 年单果质量表现为 $I_3 > I_2 > I_4 > I_1$, 2011 年则表现为 $I_2 > I_3 > I_1 > I_4$, 说明轻度和中度亏水 (I_2 和 I_3) 处理下单果质量明显高于充分供水 (I_1) 和重度亏水 (I_4) 处理, 原因是充分供水条件下桃树果实密集而相对小一些, 重度亏水则是严重缺水状态下限制了果实的生长。2010 年和 2011 年桃树每公顷的结果个数都表现为 $I_1 > I_2 > I_3 > I_4$, 说明相同条件下充分供水桃树结果个数最多, 亏水时灌水量越多结果个数越多。2010 年和 2011 年桃树每公顷的产量都表现为 $I_1 \approx I_2 > I_3 > I_4$, 其中 I_3 、 I_4 灌水量较 I_1 分别降低了 9.2%、21.4% 和 16.9%、42.5%。说明 I_1 和 I_2 灌水量生产价值最高, I_2 节约了灌水量, 达到了成本低、价值高的最佳模式。

2010 年和 2011 年对比可以看出, 2011 年 I_1 、 I_2 、 I_3 、 I_4 的单果质量、果实个数、产量分别比 2010 年的

I_1 处理高 39.8%、36.0%、90.1%， I_2 处理高 18.6%、64.8%、95.4%， I_3 处理高 8.4%、60.6%、74.1%， I_4 处理高 2.1%、36.1%、38.9%，分析其原因是 2011 年桃树栽培第 5 年达到了盛果期且又加强了管理，故产量及构成要素都明显高于 2010 年，但不同处理间的差异和 2010 年一样显著。

表 1 不同灌水量对桃树产量及构成要素的影响

Tab.1 Effects of different irrigation treatments on yield and yield composition

年份	灌水处理	单果质量/ g	果实个数/ (个·hm ⁻²)	产量/ (kg·hm ⁻²)
2010	I_1	138.29 ^C	142 493.74 ^a	19 705.46 ^A
	I_2	178.12 ^B	108 140.41 ^b	19 261.98 ^A
	I_3	189.30 ^A	94 499.15 ^{bc}	17 888.69 ^B
	I_4	174.71 ^A	88 696.29 ^c	15 496.13 ^C
2011	I_1	193.29 ^B	193 837.49 ^a	37 466.85 ^A
	I_2	211.21 ^A	178 177.53 ^{ab}	37 632.86 ^A
	I_3	205.15 ^A	151 785.16 ^{bc}	31 138.69 ^B
	I_4	178.31 ^C	120 757.51 ^c	21 532.26 ^C
显著性检验 (F 值)				
2010	灌水处理	46.432 ^{**}	6.985 [*]	10.256 ^{**}
2011	灌水处理	59.126 ^{**}	5.695 [*]	64.188 ^{**}

注：* 表示差异显著，** 表示差异极显著；同列数字后不同字母 a、b、c、d 表示 $P=0.05$ 水平下差异显著；A、B、C、D 表示 $P=0.01$ 水平下差异显著，下同。

2.2.2 桃树产量、土壤含水率、叶片日平均净光合速率间的相互关系

叶片是桃树进行光合作用的重要器官，有机物主要由叶片制造，桃树坐果-膨大期叶片的光合作用尤为重要，土壤含水率又直接影响桃树的光合速率，因此将桃树叶片的日平均净光合速率、产量和整个生育期平均土壤质量含水率间的相互关系进行回归分析尤为重要。图 6 分析后得出产量与净光合速率之间呈二次曲线关系，2010 年 $R^2=0.6797$ ，2011 年 $R^2=0.7153$ ；净光合速率与土壤含水率之间呈线性关系，2010 年 $R^2=0.7539$ ，2011 年 $R^2=0.8434$ ；产量与土壤含水率之间也呈二次曲线关系，2010 年 $R^2=0.8296$ ，2011 年 $R^2=0.9315$ 。

由 2010 和 2011 年数据得出：产量与土壤含水率间的相关系数 > 净光合速率与土壤含水率间的相关系数 > 净光合速率与产量间的相关系数，由此可以说明，不同灌水处理后土壤含水率直接影响桃树的光合速率和产量，光合速率也是影响产量的一个重要因素。

2010 和 2011 年数据对比得出：2011 年三者的相关关系均大于 2010 年三者之间的相关关系，这说明第 2 年持续灌水处理下，桃树各项指标均好于前

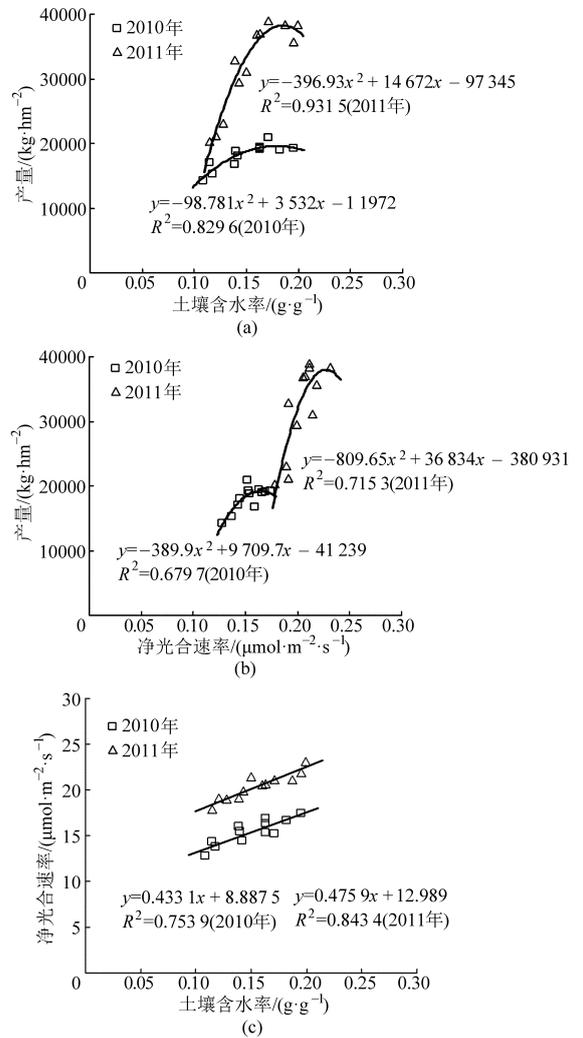


图 6 桃产量、土壤含水率、叶片日平均净光合速率间的相互关系

Fig.6 Relationships between peach yield, soil moisture and P_n

(a) 桃产量与土壤含水率 (b) 桃产量与净光合速率
(c) 净光合速率与土壤含水率

一年，各项指标间的相关关系更加密切。从产量和土壤质量含水率的相互关系图中，2 a 峰值出现的位置基本相同 0.16 ~ 0.18 g/g 之间)，说明土壤质量含水率控制在 0.16 ~ 0.18 g/g (75% ET_c) 有利于桃树的高产；从产量和净光合速率的相关关系图中，2 a 峰值出现的位置不同，说明桃树栽培第 4 和第 5 年(2010 和 2011 年)平均净光合速率分别在 17 和 22 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 左右有利于桃树的高产，分析其原因是桃树在第 5 年各项生长指标均大于前一年，故需要更多的光合才能达到最高的产量。

2.3 桃树果实品质对水分的响应

2.3.1 桃物理品质

表 2 表明，2010 年不同灌水量对桃着色度、口感风味产生极显著的影响， $I_2 \sim I_4$ 各处理桃着色度分别增加了 85.7%、120% 和 22.9%，口感风味分别增

加 2.2%、11.1% 和 18.4%; 不同灌水量对桃硬度产生显著的影响, $I_2 \sim I_4$ 各处理桃的硬度较 I_1 分别增加 22.1%、15.3% 和 3.2%; 2011 年不同灌水量只对桃口感风味产生极显著的影响, 对桃着色度和硬度则产生了显著的影响。2 a 间不同灌水量对桃含水率的影响与 I_1 相比无显著性差异; 着色度都表现为 $I_3 > I_2 > I_4 > I_1$; 口感风味都表现为 $I_4 > I_3 > I_2 > I_1$; 果实硬度表现为 $I_2 > I_3 > I_4 > I_1$ 。由此可以说明亏水灌溉有利于提高桃着色度、口感和果实硬度。

表 2 不同灌水量对桃物理品质的影响

Tab.2 Effects of different irrigation treatments on physical quality of peach

年份	灌水处理	果实含水率/%	硬度/ ($\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$)	着色/ 分	口感风味/ 分
2010	I_1	83.95	4.97 ^c	0.35 ^D	7.29 ^C
	I_2	84.83	6.07 ^a	0.65 ^B	7.45 ^C
	I_3	84.45	5.73 ^{ab}	0.77 ^A	8.10 ^B
	I_4	83.98	5.13 ^{bc}	0.43 ^C	8.63 ^A
2011	I_1	85.03	4.97 ^b	0.45 ^b	7.45 ^C
	I_2	84.17	6.40 ^{ab}	0.63 ^{ab}	7.89 ^{BC}
	I_3	83.83	7.23 ^a	0.74 ^a	8.30 ^{AB}
	I_4	84.07	5.64 ^{ab}	0.51 ^b	8.77 ^A
显著性检验 (F 值)					
2010	灌水处理	0.200	5.156 [*]	129.184 ^{**}	13.010 ^{**}
2011		2.225	3.785 [*]	6.031 [*]	8.897 ^{**}

2.3.2 桃化学品质

表 3 表明, 2010 和 2011 年不同灌水量对桃维生素 C 和糖酸比产生极显著的影响, 维生素 C 和糖酸比同时表现为 $I_1 < I_2 < I_3 < I_4$, 2010 年 $I_2 \sim I_4$ 各处理维生素 C 较 I_1 分别增加 4.5%、9.3% 和 22.4%, 2011 年则分别增加 3.2%、10.1% 和 18.4%; 糖酸比 2 a 分别增加 26.2%、47.6%、85.9% 和 16.9%、52.5%、51.4%。2010 年不同灌水量对桃可溶性固形物、可滴定酸产生显著的影响, $I_2 \sim I_4$ 各处理桃可溶性固形物较 I_1 分别增加 6.1%、10.4% 和 22.7%, 可滴定酸分别减少 16%、26% 和 34%。2011 年不同灌水量则只对桃可滴定酸产生显著的影响, 对可溶性固形物有影响但不显著。由此可以说明亏水灌溉有利于提高桃果实维生素 C、糖酸比和降低可滴定酸。

3 讨论

果树的液流速率除与土壤水分大小有关外, 还与太阳辐射、大气温度、大气相对湿度等有密切的关系^[18]。本研究表明, 全生育期 I_1 、 I_2 、 I_3 、 I_4 平均液流速率表现为 $I_1 > I_2 > I_3 > I_4$ (I_1 和 I_2 差异很小), 灌水前后液流速率差异很大, 灌水后液流速率明显高于

表 3 不同灌水量对桃化学品质的影响

Tab.3 Effects of different irrigation treatments on chemical quality of peach

年份	灌水处理	维生素 C/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	可溶性固形物/%	可滴定酸/%	糖酸比
2010	I_1	90.32 ^D	11.57 ^c	0.50 ^a	23.14 ^c
	I_2	94.72 ^C	12.27 ^{bc}	0.42 ^{ab}	29.21 ^{bc}
	I_3	98.75 ^B	12.77 ^a	0.37 ^{bc}	34.51 ^b
	I_4	110.51 ^A	14.20 ^a	0.33 ^c	43.03 ^a
2011	I_1	94.05 ^C	11.4	0.46 ^a	24.78 ^c
	I_2	97.02 ^{BC}	12.17	0.42 ^{ab}	28.98 ^b
	I_3	103.48 ^B	13.6	0.36 ^b	37.78 ^a
	I_4	111.36 ^A	14.13	0.37 ^b	38.19 ^a
显著性检验 (F 值)					
2010	灌水处理	169.564 ^{**}	5.197 [*]	5.894 [*]	37.135 ^{**}
2011		10.251 ^{**}	3.319	5.739 [*]	10.935 ^{**}

灌水前且不同处理间差异更加显著, 这说明桃树液流速率与土壤含水率密切相关。

光合作用是植物体内极为重要的代谢过程, 光合作用的强弱对植物的生长、产量及其抗逆性都具有十分重要的影响^[19], 植物对环境的适应性沿着有利于光合作用的方向发展^[20-21]。本研究表明, 2010 和 2011 年坐果-膨大期桃树叶平均净光合速率 (P_n) 的日变化与土壤含水率密切相关, 表现为: I_1 和 I_2 灌水处理间差异不明显, 但它们与 I_3 、 I_4 间的差异十分明显, 表现为 $I_1 \approx I_2 > I_3 > I_4$ 。由此可以说明, 不同灌水量对桃树 P_n 日变化具有很大的影响, 一般 P_n 随灌水量的增加而显著升高, 且具有明显的日变化特征, 但当灌水量较高时, P_n 随灌水量的增加变化不明显。

蒸腾作用既受到外界因子的影响, 也受植物体内部结构和生理状况的调节^[22-23], 与土壤水分条件也有着密切关系^[24-25]。本研究表明, 2 a 坐果-膨大期桃树平均蒸腾速率 (T_r) 的日变化呈典型的单峰曲线特征, 4 种灌水处理下桃树 T_r 变化趋势基本一致。不同灌水量下桃树 T_r 的日变化具有显著的差异, 总体表现为 $I_1 > I_2 > I_3 > I_4$ 。

植物对水分胁迫最敏感的一个指标是气孔导度^[26], 水分通过气孔蒸腾是蒸腾作用的主要形式^[27]。本研究表明, 桃树气孔导度 (G_s) 随灌水量的多少呈梯度降低, 说明桃树自身可以通过控制气孔开放程度以适应干旱的环境条件, 且 G_s 具有比较明显的单峰曲线日变化特征。整个过程中, G_s 随不同灌水处理的差异比较明显, 表现为 $I_1 > I_2 > I_3 > I_4$ 。

在同样干旱环境下, 植物的水分利用效率 (WUE) 越大, 则表明植物节水能力越强, 耐旱生产力越高^[28]。本研究表明, 2 a 坐果-膨大期桃树

WUE 日变化特征基本相同,表现为上午时段的水分利用效率明显高于下午时段,最高值出现在 08:00 左右,因为此时光合有效辐射较强,气孔开度较大,净光合速率增加较快,空气相对湿度较高,蒸腾速率处于较低的水平,所以 WUE 最高。

桃的品质主要分为物理感官品质和化学营养品质。本研究表明,桃树亏缺灌溉能够提高果实硬度,这与 Kilili 等、Bussakorn 等、Cuevas 等的结论相似^[29-31],因为水分亏缺可使果肉细胞的扩大和分裂受到一定限制,从而使果肉细胞排列密度增大、栅栏组织厚度明显增加。果实硬度表现为 $I_2 > I_3 > I_4 > I_1$ 。亏缺灌溉有利于果实可溶性固形物的提高^[5-8],这与本研究得到的结论基本一致。有研究发现亏水处理对苹果有机酸无明显影响^[30],可使小柑橘有机酸增加 11%~13%^[32],不同生育期亏缺灌溉对梨枣有机酸含量有一定抑制^[33],本研究表明不同亏缺灌溉可使桃有机酸含量减少,可见因水果品种不同水分亏缺对果实有机酸影响会有较大差异。研究表明亏缺灌溉可明显提高不同品种水果的糖酸比^[3,5,11],本研究也发现不同亏缺灌溉明显提高了糖酸比,主要因为不同亏缺灌溉提高了可溶性固形物,因此可有效调节水果内部的糖酸平衡。

4 结论

(1)液流速率是土壤水分的一个敏感响应要素,一定条件下灌水越多,土壤含水率越高,液流速

率越大,但 75% $ET_c(I_2)$ 亏缺灌溉不能明显降低其液流速率。

(2) I_1 和 I_2 灌水处理最有利于桃树的生长, I_2 和 I_3 灌水处理 WUE 相对较高,75% $ET_c(I_2)$ 灌水处理水分利用达到了最佳状态,2 a 中 I_2 较 I_1 WUE 分别平均提高了 6.2%、7.7%。

(3)不同灌水量对桃树产量及构成要素都产生了显著性的影响,其中果实个数达到显著水平($P < 0.05$),产量和单果质量则达到了极显著的水平($P < 0.01$),2 a 桃树每公顷的产量都表现为 $I_1 \approx I_2 > I_3 > I_4$,75% $ET_c(I_2)$ 节约了灌水量,达到了成本低、价值高的最佳模式。

(4)不同灌水量对桃口感风味、维生素 C、糖酸比、单果质量和产量产生了极显著的影响($P < 0.01$);对果实个数、硬度和可滴定酸产生了显著的影响($P < 0.05$);对着色度 2010 年 $P < 0.01$,2011 年 $P < 0.05$;对可溶性固形物 2010 年 $P < 0.05$;对果实含水率影响不大;亏缺灌溉(I_2 、 I_3 、 I_4)均提高了桃果实品质。

(5)土壤质量含水率控制在 0.16~0.18 g/g (75% ET_c),有利于桃树的高产。75% $ET_c(I_2)$ 亏缺灌溉是桃树在产量、水分利用效率和果实品质上最好的灌溉量,即达到了成本低、价值高、果实品质好的最佳供水机制。75% ET_c 可作为干旱或半干旱地区桃树最佳的灌溉制度。

参 考 文 献

- Clarke J M, Richards R A, Condon A G. Effect of drought stress on residual transpiration and its relationship with water use of wheat[J]. Canadian Journal of Plant Science, 1991, 71(3): 695-702.
- 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)
- Santos T P, Lopes C M, Rodrigues M L, et al. Effects of deficit irrigation strategies on cluster microclimate for improving fruit composition of Moscatel field-grown grapevines[J]. Scientia Horticulturae, 2007, 112(3): 321-330.
- 常莉飞,邹志荣. 调亏灌溉对温室黄瓜生长发育、产量及品质的影响[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(23): 7142-7144. Chang Lifei, Zou Zhirong. Effects of regulated deficit irrigation (RDI) on the growth, yield and quality of greenhouse cucumber[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2007, 35(23): 7142-7144. (in Chinese)
- 刘明池,小岛孝之,田中宗浩,等. 亏缺灌溉对草莓生长和果实品质的影响[J]. 园艺学报, 2001, 28(4): 307-311. Liu Mingchi, Kojima T, Tanaka M, et al. Effect of soil moisture on plant growth and fruit properties of strawberry[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2001, 28(4): 307-311. (in Chinese)
- Peng Y H, Rabe E. Effect of differing irrigation regimes on fruit quality, yield, fruit size and net CO_2 assimilation of Mihowase Satsuma[J]. Horticultural Science and Biotechnology, 1998, 73(2): 229-234.
- Mpelasoka B S, Behboudian M H, Mills T M. Effects of deficit irrigation on fruit maturity and quality of 'Braeburn' apple[J]. Scientia Horticulturae, 2001, 90(3-4): 279-290.
- Leib B G, Caspari H W, Redulla C A, et al. Partial rootzone drying and deficit irrigation of 'Fuji' apples in a semiarid climate[J]. Irrigation Science, 2006, 24(2): 85-99.
- 马福生,康绍忠,王密侠,等. 调亏灌溉对温室梨枣树水分利用效率与枣品质的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 40(1): 37-43. Ma Fusheng, Kang Shaozhong, Wang Mixia, et al. Effect of regulated deficit irrigation on water use efficiency and fruit quality of

- pear-jujube tree in greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 40(1):37-43. (in Chinese)
- 10 Ginestar C, Castar J R. Response of young Clementine citrus trees to water stress during different phenological periods[J]. Horticultural Science, 1996, 71(4):551-559.
- 11 Gelly M, Recasens I, Girona J, et al. Effects of stage II and postharvest deficit irrigation on peach quality during maturation and after cold storage[J]. Science of Food and Agriculture, 2004, 84(6):561-568.
- 12 Juan V, Isabel A, José M Abrisqueta, et al. Effect of deficit irrigation on early-maturing peach tree performance[J]. Irrigation Science, 2013, 31(4):747-757.
- 13 Girona J, Gelly M, Mata M, et al. Peach tree response to single and combined deficit irrigation regimes in deep soils[J]. Agricultural Water Management, 2005, 72(2):97-108.
- 14 Abdi Q, Ian G, Rebecca B, et al. Postharvest deficit irrigation in 'Tatura 204' peach: subsequent productivity and water saving[J]. Agricultural Water Management, 2013, 117:145-152.
- 15 Annandale J G, Jovanovic N Z, Cambell G S, et al. Two-dimensional solar radiation interception model for hedgerow fruit trees[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 121(3-4):207-225.
- 16 Jenkins J P, Richardson A D, Braswell B H, et al. Refining light-use efficiency calculations for a deciduous forest canopy using simultaneous tower based carbon flux and radiometric measurements[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2007, 143(1-2):64-79.
- 17 Hilker T, Coops N C, Wulder M A, et al. The use of remote sensing in light use efficiency based models of gross primary production: a review of current status and future requirements[J]. Science of the Total Environment, 2008, 404(2-3):411-423.
- 18 龚道枝. 苹果园 SPAC 水分传输动力学机制与模拟[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2005.
- Gong Daozhi. Dynamic mechanism of water transport in soil-plant-atmosphere continuum (SPAC) of apple orchard and its simulation[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2005. (in Chinese)
- 19 惠红霞, 许兴, 李前荣. 外源甜菜碱对盐胁迫下枸杞光合功能的改善[J]. 西北植物学报, 2003, 23(12):2137-2142.
- Hui Hongxia, Xu Xing, Li Qianrong. Exogenous betaine improves photosynthesis of *Lycium barbarum* under salt stress[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2003, 23(12):2137-2142. (in Chinese)
- 20 Meianied J, Thomasc H. Nickel toxicity in mycorrhizal birch seedlings infected with *Lactarius rufus* or *Sclerotinia flavidum* I. Effects on growth photosynthesis respiration and transpiration[J]. New Phytologist, 1988, 108(4):451-459.
- 21 Silvia A, Marta C, Monica G, et al. Estimation of Mediterranean forest transpiration and photosynthesis through the use of an ecosystem simulation model driven by remotely sensed data[J]. Global Ecology and Biogeography, 2004, 13(4):371-380.
- 22 Jones H G, Sutherland R A. Stomatal control of xylem embolism[J]. Plant, Cell and Environment, 1991, 14(6):607-612.
- 23 Tyree M T, Sperry J S. Do woody plants operate near the point of catastrophic xylem dysfunction caused by dynamic water stress answers from a model[J]. Plant Physiology, 1988, 88(3):574-580.
- 24 杨娜, 王冬梅, 王百田, 等. 土壤含水量对紫穗槐蒸腾速率与光合速率影响研究[J]. 水土保持应用技术, 2006, 6(3):6-9.
- 25 廖行, 王百田, 武晶, 等. 不同水分条件下核桃蒸腾速率与光合速率的研究[J]. 水土保持研究, 2007, 14(4):30-34.
- Liao Hang, Wang Baitian, Wu Jing, et al. Study on transpiration rate and photosynthesis rate of *Juglans regia* under different soil water contents[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14(4):30-34. (in Chinese)
- 26 王红, 王百田, 王婷, 等. 不同土壤含水量对山杏盆栽幼苗蒸腾速率和光合速率的影响[J]. 北方园艺, 2010(2):1-5.
- Wang Hong, Wang Baitian, Wang Ting, et al. Effects of different water moisture on photosynthesis and transpiration of potted *prunus sibirica* seedlings[J]. Northern Horticulture, 2010(2):1-5. (in Chinese)
- 27 何维明, 马风云. 水分梯度对沙地柏幼苗荧光特征和气体交换的影响[J]. 植物生态学报, 2000, 24(5):630-634.
- He Weiming, Ma Fengyun. Effects of water gradient on fluorescence characteristics and gas exchange in *Sabina vulgaris* seedlings[J]. Acta Phytoecologica Sinica, 2000, 24(5):630-634. (in Chinese)
- 28 张建国, 李吉跃, 沈国舫. 树木耐旱特性及其机理研究[M]. 北京: 中国林业出版社, 2000:1-9.
- 29 Kilibi A W, Behboudian M H, Mills T M. Composition and quality of 'Braeburn' apples under reduced irrigation[J]. Scientia Horticulturae, 1996, 67(1-2):1-11.
- 30 Bussakorn S, Mpelasoka M, Hossein B. Production of aroma volatiles in response to deficit irrigation and to crop load in relation to fruit maturity for 'Braeburn' apple postharvest[J]. Biology and Technology, 2002, 24(1):111-116.
- 31 Cuevas J, Canete M L, Pinillos V, et al. Optimal dates for regulated deficit irrigation in 'Algerie' loquat (*Eriobotrya japonica* Lindl.) cultivated in Southeast Spain[J]. Agricultural Water Management, 2007, 89(1-2):131-136.
- 32 Verreyne J S, Rabe E T, Heron K I. The effect of combined deficit irrigation and summer trunk girdling on the internal fruit quality of 'Marisol' Clementines[J]. Scientia Horticulturae, 2001, 91(1-2):25-37.
- 33 崔宁博, 杜太生, 李忠亭, 等. 不同生育期调亏灌溉对温室梨枣品质的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7):32-38.
- Cui Ningbo, Du Taisheng, Li Zhongting, et al. Effects of regulated deficit irrigation at different growth stages on greenhouse pear-jujube quality[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(7):32-38. (in Chinese)

Response of Water Demand Signal, Yield and Fruit Quality of Peach Tree to Soil Moisture

Zhou Hanmi^{1,2} Zhang Fucang^{1,2} Li Zhijun^{1,2} Gong Daozhi³ Wu Lifeng^{1,2}

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

2. Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

3. Key Laboratory of Water-saving Agriculture in Dryland, CAAS, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to understand the effects of irrigation amount on fruit quality and yield and to investigate the efficient mode of water supply of peach tree in semi-arid area field, two-year experiments were conducted to study the response of water demand signal (sap flow velocity, net photosynthetic rate P_n , transpiration rate T_r , stomatal conductance G_s), yield and fruit quality of four years peach tree to the different irrigation amount treatments (I_1 : 100% ET_c , I_2 : 75% ET_c , I_3 : 50% ET_c , I_4 : 25% ET_c , ET_c is crop evapotranspiration) under mobile rain shelter in two consecutive seasons (2010—2011). The two-year results showed that the number of fruit per hectare were both performance for $I_1 > I_2 > I_3 > I_4$ and the yield per hectare are both characterized by $I_1 \approx I_2 > I_3 > I_4$. Compared with I_1 , I_2 didn't have lower sap flow velocity and had higher water use efficiency (WUE) which was improved by 6.2% and 7.7% without reduction on the P_n and yield significantly, while I_3 and I_4 reduced yield by 9.2%, 21.4% and 16.9%, 42.5% respectively in 2010 and 2011, even if it had the low transpiration rate and high WUE. Meanwhile, irrigation had extremely significant effects ($P < 0.01$) on peach mouthfeel, vitamin C, sugar/acid, single fruit weight and yield so that I_2 was improved by 2.2%, 4.5%, 24.4%, 28.8%, -2.3% and 5.9%, 3.2%, 26.5%, 9.3%, 0.4% respectively compared with I_1 , and significant effects ($P < 0.05$) on fruit number, color, firmness and titratable acid so that I_2 was improved by -24.1%, 85.7%, 22.1%, 12.1% and -8.1%, 40%, 28.8%, -2.7% respectively compared with I_1 . It had little impact on fruit moisture content and deficit irrigation (I_2 , I_3 and I_4) all improved the fruit quality of peach. The research also showed that there were high correlative relationships between peach yield, net photosynthetic rate and soil water content in two-year experiments. Under the condition of experiment, the highest yield, higher water benefit and better fruit quality of peach tree can be obtained with irrigation of 75% ET_c .

Key words: Peach tree Sap flow velocity Quality Yield Net photosynthetic rate