

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.11.015

调亏灌溉对香梨叶片光合速率及水分利用效率的影响*

武阳¹ 王伟² 赵智¹ 黄兴法¹ 范云涛³ 苏柳芸⁴

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 3. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083; 4. 巴音郭楞蒙古自治州林业技术推广中心, 库尔勒 841000)

【摘要】 试验研究了调亏灌溉对成龄库尔勒香梨树叶片生理指标的影响。在果实快速膨大前期分别施加了2种水分胁迫:轻度水分胁迫,灌水量为蒸发量的60%;重度水分胁迫,灌水量为蒸发量的40%。在果实快速膨大期,灌水量为蒸发量的80%。对照处理为香梨的整个生育期灌水量均为蒸发量的80%。结果表明,调亏灌溉期间,水分胁迫显著地降低了香梨树的叶片光合速率、蒸腾速率与气孔开度;果实快速膨大期,调亏处理恢复充分灌后,叶片光合速率、蒸腾速率及气孔开度均在一定程度上恢复,轻度调亏处理恢复到与对照相同的水平,而重度的水分胁迫处理却始终低于对照。叶片蒸腾速率比光合速率对土壤水分变化更敏感,水分胁迫可提高香梨树的叶片水分利用效率。

关键词: 库尔勒香梨 调亏灌溉 光合速率 蒸腾速率 气孔开度 水分利用效率

中图分类号: S275.6; S152.7+5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)11-0080-07

Photosynthesis Rate and Leaf Water Use Efficiency of Korla Fragrant Pear Tree under Regulated Deficit Irrigation

Wu Yang¹ Wang Wei² Zhao Zhi¹ Huang Xingfa¹ Fan Yuntao³ Su Liyun⁴

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

3. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China

4. Forestry Technology Promotion Center of Bayingolin Mongol Autonomous Prefecture, Korla 841000, China)

Abstract

The experiment was conducted to study the effects of regulated deficit irrigation on these parameters of the Korla fragrant pear tree. The water deficit applied before the fruit enlargement stage included: slight water deficit, the trees were irrigated with 60% of US Class A pan evaporation (E_p); severe water deficit, the trees were irrigated with 40% of E_p . During the fruit enlargement stage, both water deficit treatments were irrigated with 80% of E_p . The control was irrigated with 80% of E_p during the whole growth season. The results indicated that the leaf photosynthesis rate, transpiration rate and stomatal conductance were significantly reduced by the soil water deficit. After full irrigation resumed, the leaf photosynthesis rate, transpiration rate and stomatal conductance restored rapidly to some extent, the physiological parameters of slight water deficit reached the control level in the middle August, however, those of the severe water deficit were always lower than the control. As compared with the photosynthesis, the transpiration was more sensitive to the soil water deficit, resulting in the improvement of the leaf water use efficiency.

Key words Korla fragrant pear, Regulated deficit irrigation, Photosynthesis rate, Transpiration rate, Stomatal conductance, Water use efficiency

收稿日期: 2012-04-24 修回日期: 2012-05-22

*“十一五”国家科技支撑计划资助项目(2007BAD38B00)和国家自然科学基金资助项目(50879087)

作者简介: 武阳, 博士生, 主要从事农业水土工程及节水灌溉研究, E-mail: aboluo1983331@163.com

通讯作者: 王伟, 讲师, 博士, 主要从事农业水土工程研究, E-mail: weiwang@cau.edu.cn

引言

调亏灌溉 (regulated deficit irrigation, 简称 RDI) 是在作物生长发育的某些阶段,通过适时适度地对作物施加水分胁迫,促使作物光合产物的分配向人们需要的组织器官倾斜,从而达到提高作物产量与水分利用效率目的的节水灌溉技术。国内外学者对此已进行了大量研究^[1-4]。

光合速率、蒸腾速率和气孔开度是影响作物生长的重要生理指标,尤其是叶片光合作用,是合成作物生长所需有机物质的重要生理过程。上述生理指标对植物水分状况比较敏感。对橄榄树的研究表明,叶片蒸腾速率受土壤含水率的控制,当土壤含水率下降时,叶片蒸腾速率随之下降^[5-6]。柔毛栎树承受水分胁迫时,叶片气孔开度急剧减小,从而导致光合速率和蒸腾速率的减小^[7]。梨树受水分胁迫时,叶片气孔开度和光合速率比充分灌溉分别降低了 20% 与 19%^[8]。相对于叶片的光合速率,蒸腾速率与气孔开度对水分胁迫更为敏感,水分胁迫可提高叶片的水分利用效率^[9]。柑橘与梨树水分胁迫后恢复充分灌溉,光合速率、蒸腾速率和气孔开度可恢复甚至超过对照的水平^[10-11]。

库尔勒香梨是新疆特有的品种。目前,库尔勒香梨主要为漫灌,灌溉水利用效率很低。地下水超采严重,水位呈现逐年下降的趋势。南疆水资源已无法满足林果业和生态环境可持续发展的需求,因

此,发展高效的节水灌溉技术成为必然趋势。

本文对库尔勒香梨果实快速膨大前期进行调亏灌溉,研究水分胁迫及其后恢复充分灌溉对香梨树叶片生理指标的影响,分析调亏灌溉影响香梨树叶片水分利用效率及产量的机理。

1 材料和方法

1.1 试验材料

2009 年 3 月至 2010 年 12 月,试验在新疆维吾尔自治区库尔勒市巴州农业科学研究所香梨果园内实施。试验区地处塔克拉玛干沙漠边缘,属暖温带大陆性干旱气候,多年平均蒸发量约为 1 600 mm,降水量约为 55 mm。试验期内降水量与蒸发量见表 1。试验库尔勒香梨树,树龄为 24 年,株距为 5 m,行距为 6 m。试验果园 0~60 cm 的土壤为粉砂质壤土(粉粒质量分数为 50.36%,砂粒质量分数为 44.09%,粘粒质量分数为 5.55%)。试验香梨园采用滴灌系统灌溉,分别于树行两侧,距树行 1 m 处,各布置 1 根滴灌管。滴灌管外径为 16 mm,壁厚 0.8 mm。滴头间距为 50 cm,滴头流量为 2.8 L/h。

1.2 试验设计

根据 2008 年试验观测数据^[12],将库尔勒香梨生育期划分为果实快速膨大前期(4 月中旬至 7 月上旬)与果实快速膨大期(7 月上旬至收获)。试验设置 3 个处理,试验设计见表 1。每个处理重复 3 次。试验灌水周期为 7 d。

表 1 降水量、蒸发量及试验设计

Tab. 1 Precipitation, evaporation and experimental design

年份	生育期	蒸发量/mm	降水量/mm	设计灌水量		
				处理 1	处理 2	CK(对照)
2009	果实快速膨大前期	536.3	11.6	0.6E _p	0.4E _p	0.8E _p
	果实快速膨大期	264.0	9.6	0.8E _p	0.8E _p	0.8E _p
2010	果实快速膨大前期	455.8	21.8	0.6E _p	0.4E _p	0.8E _p
	果实快速膨大期	317.5	2.2	0.8E _p	0.8E _p	0.8E _p

注:表中 E_p 表示同期美国 A 级蒸发皿的蒸发量,单位为 mm。

1.3 参数与测量方法

采用 Diviner 2000 (Sentek Pty Ltd) 监测土壤体积含水率。每个试验重复,在树行两侧的滴灌管正下方,安装 2 根土壤水分测管,深度为 1.5 m。每次灌溉前,观测土壤体积含水率。土壤水分特征曲线采用压力膜仪 (1500 型, Soilmoisture Equipment Corp.) 测定。利用土壤水分特征曲线将土壤体积含水率转换为土壤水势。

香梨树的叶片生理指标(光合速率、蒸腾速率与气孔开度)采用便携式光合作用仪 (CB-1102

型,北京雅欣理仪科技有限公司)测量。观测时间为 10:00~11:30。每个重复选取 2 棵树,在正对太阳的方向,高度为 1.5 m 处,每棵树选取 1 片叶子,重复测量 2 次。

2010 年 7 月初和 8 月中旬测量黎明前的叶片水势,仪器为 ZLZ-5 型压力室水势仪(宁波江南仪器厂),每个处理随机选取并观测 6 片树叶。

果实收获期,每个处理选取 6 棵果树,测量并统计每棵树的所有果实产量。

1.4 数据处理

采用统计分析软件 SPSS 16.0 进行试验数据的方差分析,均值差异采用 Tukey 检验,显著性差异的检验水平选为 $P = 0.05$ 。

2 结果分析与讨论

2.1 不同灌溉处理的土壤水势与叶水势

土壤水势随着灌水量的减小及调亏灌溉时间的增加持续下降。2009 年与 2010 年,调亏灌溉末期,处理 1 湿润体中部 30 cm 深度的灌前土壤水势分别达到 -367 kPa 和 -327 kPa,处理 2 则分别达到 -421 kPa 和 -397 kPa;而同期对照处理的灌前土壤水势则基本为 -50 kPa 左右,这说明对照处理基本不受水分胁迫,为充分灌溉^[13]。7 月中旬以后,2 个调亏灌溉处理均恢复为充分灌溉,灌前土壤水势也逐渐上升并维持在 -50 kPa 左右。

调亏灌溉末期,各处理的黎明前叶水势之间存在显著差异,处理 1 与处理 2 的叶水势分别达到了 -0.6 MPa 与 -0.7 MPa(表 2)。果实快速膨大期,

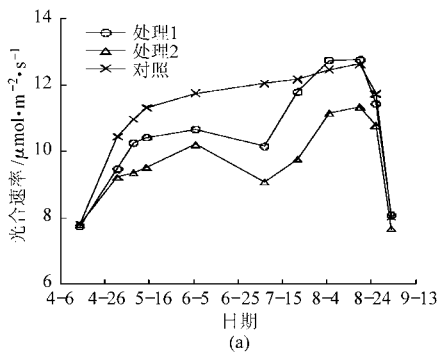


图 1 调亏灌溉对香梨树叶片光合速率的影响

Fig. 1 Leaf photosynthesis rate variation of fragrant pear tree affected by RDI

(a) 2009 年 (b) 2010 年

土壤水分亏缺对香梨叶片的光合速率有显著的影响(图 1)。水分胁迫显著地降低了叶片光合速率,并且降低的程度随着水分亏缺程度的增加而增加;与对照相比,7 月初,处理 1 与处理 2 的光合速率分别减小了 18% 与 28% (2010 年)。这说明调亏灌溉期间,持续下降的土壤水势已显著抑制了叶片的光合作用。调亏灌溉末期,2 个调亏灌溉处理的叶片光合速率均较之前有所下降(即光合速率的变化出现拐点)。

果实快速膨大期,2 个调亏处理均恢复充分灌溉,光合速率快速上升。3 周后,处理 1 的光合速率已恢复到对照水平,并且一直保持至收获。处理 2 的光合速率却一直未恢复到对照的水平(2010 年,至 8 月中旬,仍比对照低 7%),这可能与其前期所受的水分胁迫程度过大有关。

水分胁迫处理均恢复充分灌溉,叶片水势逐渐恢复;8 月中旬,各处理之间的差异不显著。

表 2 调亏灌溉对香梨叶水势的影响

Tab. 2 Predawn leaf water potential affected by RDI MPa

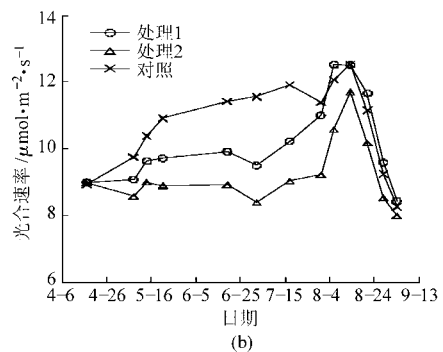
日期	叶水势		
	处理 1	处理 2	CK(对照)
07-08	-0.60 ^a	-0.70 ^b	-0.11 ^c
08-18	-0.12 ^a	-0.12 ^a	-0.11 ^a

注:同行中不同字母表示处理间存在显著性差异($P < 0.05$)。

2.2 调亏灌溉对香梨树叶片生理指标的影响

2.2.1 叶片光合速率

光合速率是影响植物生长的重要参数,对土壤的水分状况较为敏感。4 月中旬到 6 月初,气温逐渐上升,香梨树营养生长旺盛,对照处理的光合速率呈逐渐上升的趋势。6 月中旬到 8 月中旬,对照处理的光合速率保持在一个较稳定水平。8 月下旬,香梨果实进入成熟阶段,叶片光合速率逐渐降低(图 1)。



土壤水分胁迫显著地降低了香梨的叶片光合速率,这与 Marsal 等^[8]对梨树, Romero 等^[14]对杏树, Cui 等^[9]对梨枣树的研究结论相同。调亏灌溉末期,2 个调亏灌溉处理的叶片光合速率变化均出现拐点,这可能与水分胁迫(调亏灌溉)时间过长有关。从减小水分胁迫对光合作用抑制的角度出发,调亏灌溉结束的时间应提前 2 周,即调亏灌溉结束时间应调整为 6 月底。

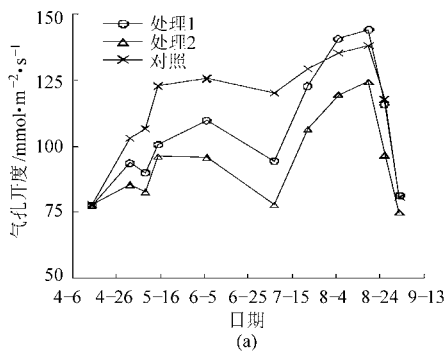
恢复充分灌溉后,调亏灌溉处理的香梨树叶片光合速率快速恢复,并且恢复的程度与前期所受水分胁迫的程度有关。Mengistu^[15]对谷物的研究表明,恢复充分灌水以后,水分胁迫处理的叶片光合速率恢复到充分灌溉的水平,Cui 等^[9]对梨枣树的研究也得出了同样结论。Pérez-Pérez 等^[10]的研究则表明,水分胁迫导致柑橘大量落叶,恢复充分灌溉

后,整棵果树光合产物的供给来源减少,导致单片树叶光合速率的提高。本研究没有发现香梨树在水分胁迫期间有明显的落叶,叶片光合速率也仅恢复到对照的水平。灌溉恢复后,重度水分胁迫处理的光合速率恢复较慢,并且始终低于对照。这可能是由于长时间的重度水分胁迫导致香梨树叶片光合系统的损伤^[9],也有可能叶片气孔开度恢复较慢,且始终低于对照,处于较低的水平有关。

2.2.2 叶片气孔开度

香梨树叶片气孔开度变化趋势与光合速率基本相同(图2)。水分胁迫显著减小了叶片气孔开度,且减小的程度随着水分胁迫程度的增加而增加;调亏灌溉末期,气孔开度也出现类似光合作用的变化拐点(2010年规律不明显,可能与该年同期干旱程度较低有关)。7月初,处理1与处理2的气孔开度分别比对照显著减小了22%与34%(2010年)。

7月中旬,调亏处理均恢复充分灌溉,气孔开度快速恢复。8月中旬,处理1的气孔开度恢复到对照的水平,并且短期内(充分灌后第4周)超过



了对照;处理2恢复较慢,至8月底仍然低于对照处理。

上述结果表明,与光合作用相比,香梨树叶片气孔开度对水分胁迫较敏感。果树承受水分胁迫时,自身将采取某种机制来控制叶片水分流失^[14,16],其中包括减小气孔开度^[17-21]。调亏灌溉末期,香梨的叶片气孔开度也出现变化拐点,这说明气孔开度的变化除了与土壤水分亏缺程度有关外,水分胁迫时间也可能是其重要影响因素。恢复充分灌溉后,香梨树的气孔开度快速恢复。Pérez-Pérez等^[10]对柑橘的研究也表明,恢复充分灌溉后,水分胁迫处理的气孔开度有所恢复,甚至超过了充分灌溉。Fernández等^[22]的研究表明,水分胁迫期间,橄榄树根系水力传导系数减小10%,恢复充分灌水后,叶片的气孔开度可迅速恢复。重度的水分胁迫处理,恢复充分灌溉后,香梨的叶片气孔开度恢复较慢,并始终低于对照;Ramos等^[20]对橄榄树, Fereres等^[23]对柑橘树的研究也得到相同的结论。这可能与植物为了防止恢复充分灌水后细胞快速膨大而采取的一种自我保护机制有关^[24]。

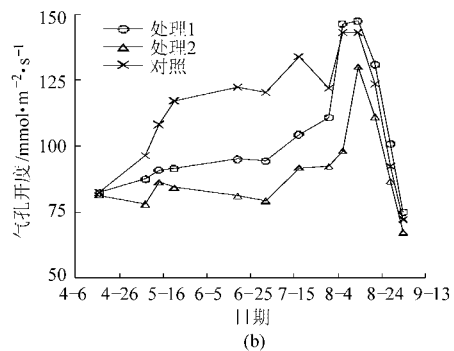


图2 调亏灌溉对香梨树叶片气孔开度的影响

Fig. 2 Leaf stomatal conductance variation of fragrant pear tree affected by RDI

(a) 2009年 (b) 2010年

2.2.3 叶片蒸腾速率

调亏灌溉期间,香梨树的叶片蒸腾速率表现出与气孔开度和光合速率对水分胁迫不同的响应态势;水分胁迫显著地降低了香梨树叶片蒸腾速率,蒸腾速率随着土壤水势的下降及水分胁迫时间而持续降低,并且没有出现类似光合速率与气孔开度的变化拐点(图3)。调亏灌溉末期,处理1与处理2的蒸腾速率分别比对照降低了28%与40%(2010年)。充分灌溉后,水分胁迫处理的蒸腾速率快速恢复。与叶片气孔开度相同,8月中旬,处理1达到了对照的水平;但处理2始终低于对照。

Marsal等^[8]对梨树与Du^[25]等对玉米的研究也表明水分胁迫降低了叶片蒸腾速率。调亏灌溉期间,香梨叶片蒸腾速率随着土壤水势的下降而持续

下降,没有出现变化拐点。这说明,调亏期间蒸腾速率的减小主要是由土壤水势下降(土壤至叶片的水势梯度减小)造成,而水力传导系数并未发生显著的改变。Mengistu等^[15]对谷物与Pérez-Pérez等^[10]对柑橘的研究表明,恢复充分灌水后,叶片蒸腾速率均恢复甚至超过了充分灌水平。重度水分胁迫处理的香梨叶片蒸腾速率恢复较慢,在果实膨大期仍低于对照处理。这可能是由于前期水分胁迫的时间与程度显著地影响了叶片的气孔开度,使其在果实快速膨大期一直处于较低的水平,成为蒸腾速率与光合速率的关键控制因素。

2.3 调亏灌溉对香梨树叶片水分利用效率的影响

香梨叶片光合速率与蒸腾速率均随着气孔开度的增大而增大;蒸腾速率与气孔开度呈线性关系

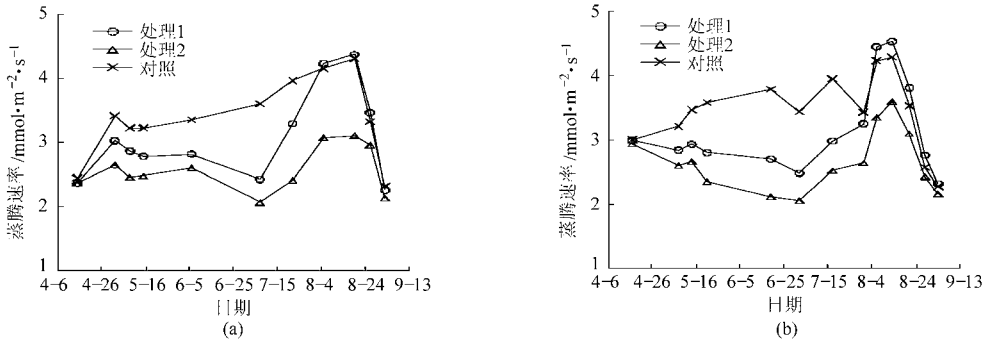


图3 调亏灌溉对香梨树叶片蒸腾速率的影响

Fig. 3 Leaf transpiration rate variation of fragrant pear tree affected by RDI

(a) 2009年 (b) 2010年

(图4),而光合速率的增加率则随着气孔开度的增加逐渐变缓(图5),这表明叶片气孔开度增加到一定程度后,光合速率的增加速率将小于蒸腾速率的增加速率。Romero等^[14]对杏树的研究也表明叶片光合速率、蒸腾速率与气孔开度有类似关系。

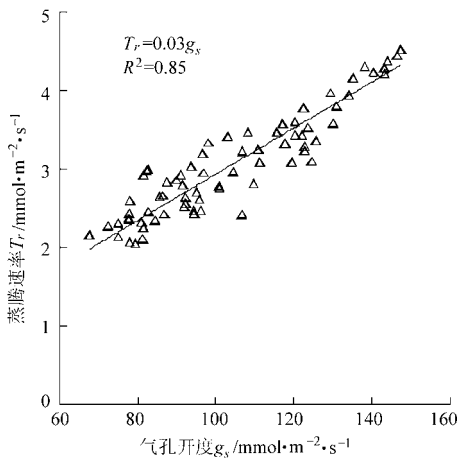


图4 叶片蒸腾速率与气孔开度的关系

Fig. 4 Relationship between leaf transpiration rate and stomatal conductance

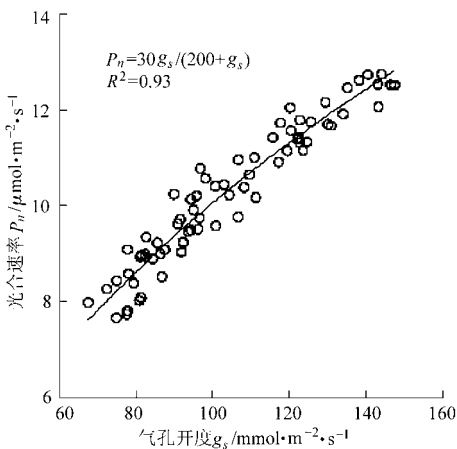


图5 叶片光合速率与气孔开度的关系

Fig. 5 Relationship between leaf photosynthesis rate and stomatal conductance

叶片水分利用效率计算公式为

$$E_L = \frac{P_n}{T_r} = \frac{1000}{200 + g_s} \quad (1)$$

对叶片气孔开度求一阶导数,得

$$\frac{dE_L}{dg_s} = -\frac{1000}{(200 + g_s)^2} \quad (2)$$

该式恒小于零,说明式(1)为减函数。植物承受水分胁迫,叶片气孔开度减小时,叶片的水分利用效率将增大。图6中的数据也表明,叶片水分利用效率与气孔开度呈递减关系。Ahmed等^[26]的研究结果也表明,水分胁迫降低了橄榄树的光合速率与蒸腾速率,但蒸腾速率降低的幅度更大,因此,叶片水分利用效率提高。

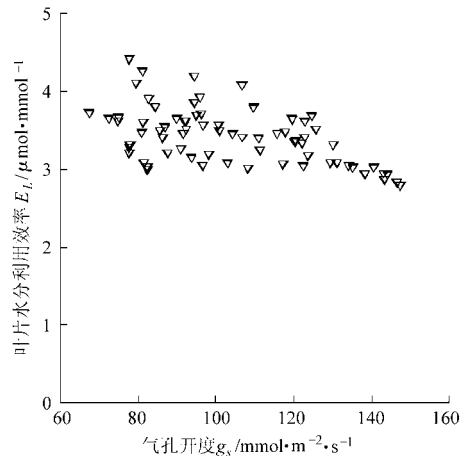


图6 叶片水分利用效率与气孔开度的关系

Fig. 6 Relationship between leaf water use efficiency and stomatal conductance

香梨果实快速膨大前期的水分胁迫,抑制了光合速率,提高了叶片水分利用效率。在此期间香梨果实生长较慢,因此,适度的水分胁迫可提高水分利用效率,但对产量影响较小。果实快速膨大期,恢复充分灌溉,光合速率恢复到较高水平将有利于果实产量增加;处理1产量与对照无显著差异(表3),2009年与2010年分别节水18.1%与15.4%。

表 3 调亏灌溉对果实产量的影响
Tab.3 Fruit yield affected by RDI t/hm²

年份	产量		
	处理 1	处理 2	对照
2009	18.07 ^a	15.77 ^b	18.63 ^a
2010	20.60 ^a	17.17 ^b	19.78 ^a

注:同行中不同字母表示处理间存在显著性差异($P < 0.05$)。

香梨树叶片的相对光合速率(实测光合速率与其最大值的比值)随着气孔开度的增大而增大,相对水分利用效率(叶片水分利用效率与其最大值的比值)与气孔开度则呈现出相反的趋势(图 7)。当气孔开度约为 $100 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,两条曲线相交。当气孔开度大于该点时,植物叶片将合成更多的光合产物,但叶片水分利用效率降低;气孔开度小于该点时,情况则相反。

3 结论

(1) 调亏灌溉期间的土壤水分亏缺显著地降低了库尔勒香梨树的叶片光合速率、蒸腾速率与气孔开度,且减低的程度随着水分胁迫程度的增加而增加。过长时间的土壤水分胁迫将导致光合速率出现变化拐点,不利于充分灌后光合作用的恢复,调亏灌溉结束时间应调整为 6 月底。

(2) 果实快速膨大期,恢复充分灌溉后,香梨树的叶片生理指标均在一定程度上得到快速恢复;轻

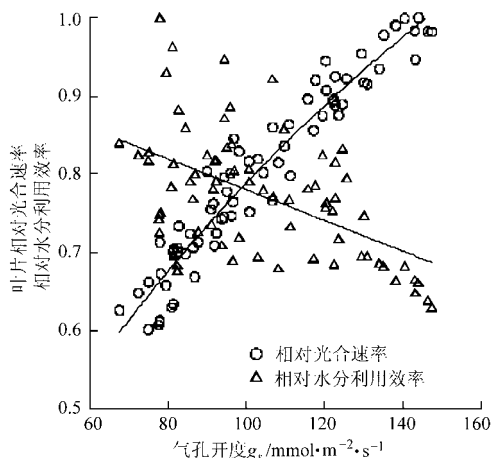


图 7 叶片相对光合速率、相对水分利用效率与气孔开度的关系

Fig.7 Relationship between relative leaf photosynthesis rate, water use efficiency and stomatal conductance

度调亏处理恢复到与对照相同的水平,而重度调亏处理仍始终低于对照。

(3) 相对于叶片的光合作用,蒸腾作用对土壤水分亏缺更敏感,水分胁迫将提高叶片水分利用效率。

(4) 在香梨果实快速膨大前期,实施适度的土壤水分胁迫,可以合理地调控香梨树叶片的的光合速率、蒸腾速率与气孔开度,提高水分利用效率;在果实快速膨大期,恢复充分灌溉,叶片光合速率恢复到较高的水平,有利于果实产量的增加。

参 考 文 献

- 雷廷武,曾德超,王小伟,等. 调控亏水度灌溉对成龄桃树生长和产量的影响[J]. 农业工程学报,1991,7(5): 63~69. Lei Tingwu, Zeng Dechao, Wang Xiaowei, et al. Experimental investigation on the influence of RDI on peach tree and fruit growth[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1991, 7(5): 63~69. (in Chinese)
- 黄兴法,李光永,王小伟,等. 充分灌与调亏灌溉条件下苹果树微喷灌的耗水量研究[J]. 农业工程学报,2001,17(5): 43~47. Huang Xingfa, Li Guangyong, Wang Xiaowei, et al. Water use of micro-sprinkler irrigated apple trees under full irrigation and regulated deficit irrigation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2001, 17(5): 43~47. (in Chinese)
- Chalmers D J, Burge G, Jerie P H, et al. The mechanism of regulation of 'Bartlett' pear fruit and vegetative growth by irrigation withholding and regulated deficit irrigation [J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 1986, 111(6): 904~907.
- 邵光成,刘娜,陈磊. 温室辣椒时空亏缺灌溉需水特性与产量的试验[J]. 农业机械学报,2008,39(4): 117~121. Shao Guangcheng, Liu Na, Chen Lei. Character of water demand and yield of space-time deficit irrigation for hot pepper in greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(4): 117~121. (in Chinese)
- Giorio P, Sorrentino G, d'Andria R. Stomatal behaviour, leaf water status and photosynthetic response in field grown olive trees under water deficit[J]. Environmental and Experimental Botany, 1999, 42(2): 95~104.
- Tognetti R, d'Andria R, Morelli G, et al. Irrigation effects on daily and seasonal variations of trunk sap flow and leaf water relations in olive trees[J]. Plant and Soil, 2004, 263(1): 249~264.
- Tognetti R, Longobucco A, Miglietta F, et al. Water relations, stomatal response and transpiration of *Quercus pubescens* trees during summer in a Mediterranean carbon dioxide spring[J]. Tree Physiology, 1999, 19(4~5): 261~270.
- Marsal J, Rapoport H F, Manrique T, et al. Pear fruit growth under regulated deficit irrigation in container grown trees[J].

- Scientia Horticulturae, 2000, 85(4): 243 ~ 259.
- 9 Cui N, Du T, Li F, et al. Response of vegetative growth and fruit development to regulated deficit irrigation at different growth stages of pear-jujube tree[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(8): 1 237 ~ 1 246.
- 10 Pérez-Pérez J G, Romero P, Navarro J M, et al. Response of sweet orange cv 'Lane Late' to deficit irrigation in two rootstocks. I: water relations, leaf gas exchange and vegetative growth[J]. Irrigation Science, 2008, 26(5): 415 ~ 425.
- 11 Marsal J, Mata M, Arbonés A, et al. Regulated deficit irrigation and rectification of irrigation scheduling in young pear trees: an evaluation based on vegetative and productive response[J]. European Journal of Agronomy, 2002, 17(2): 111 ~ 112.
- 12 晏清洪, 王伟, 任德新, 等. 滴灌湿润比对成龄库尔勒香梨生长及耗水规律的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(1): 7 ~ 13.
- Yan Qinghong, Wang Wei, Ren Dexin, et al. Effects of wetted soil percentage on the growth and water use of mature Korla fragrant pear trees under drip irrigation [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29(1): 7 ~ 13. (in Chinese)
- 13 曾德超, 因·古德温, 黄兴法, 等. 果园现代高科技节水高效灌溉[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001: 31 ~ 33.
- 14 Romero P, Botía P. Daily and seasonal patterns of leaf water relations and gas exchange of regulated deficit-irrigated almond trees under semiarid conditions[J]. Environmental and Experimental Botany, 2006, 56(2): 158 ~ 173.
- 15 Mengistu D K. The influence of soil water deficit imposed during various developmental phases on physiological processes of tef (*Eragrostis tef*) [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2009, 132(3 ~ 4): 283 ~ 289.
- 16 Fereres E, Aldrich T M, Schulbach H, et al. Responses of young almond trees to late-season drought[J]. California Agriculture, 1981, 35(7 ~ 8): 11 ~ 12.
- 17 Chaves M M, Pereira J S, Maroco J, et al. How plants cope with water stress in the field? Photosynthesis and growth[J]. Annals of Botany, 2002, 89(7): 907 ~ 916.
- 18 Lawlor D W. Limitation to photosynthesis in water-stressed leaves: stamata vs. metabolism and the role of ATP[J]. Annals of Botany, 2002, 89(7): 871 ~ 885.
- 19 Cifre J, Bota J, Escalona J M, et al. Physiological tools for irrigation scheduling in grapevine (*Vitis vinifera* L.): an open gate to improve water-use efficiency[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2005, 106(2 ~ 3): 159 ~ 170.
- 20 Ramos A F, Santos F L. Yield and olive oil characteristics of a low-density orchard (cv. Cordovil) subjected to different irrigation regimes[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(2): 363 ~ 373.
- 21 燕辉, 胡笑涛, 姚付启. 限量灌溉对冬小麦光合与叶绿素荧光的影响[J]. 农业机械学报, 2011, 42(11): 49 ~ 54.
- Yan Hui, Hu Xiaotao, Yao Fuqi. Effects of limited irrigation on photosynthesis and fluorescence of winter wheat [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(11): 49 ~ 54. (in Chinese)
- 22 Fernández J E, Moreno F, Girón I F, et al. Stomatal control of water use in olive tree leaves[J]. Plant and Soil, 1997, 190(2): 179 ~ 192.
- 23 Fereres E, Cruz-Romero G, Hoffman G J, et al. Recovery of orange trees following severe water stress[J]. Journal of Applied Ecology, 1979, 16(3): 833 ~ 842.
- 24 Mansfield T A, Davies W J. Stomata and stomatal mechanisms [M] // Paleg L G, Aspinall D. The physiology and biochemistry of drought resistance in plants. Sydney: Academic Press, 1981: 315 ~ 346.
- 25 Du T, Kang T, Sun J, et al. An improved water use efficiency of cereals under temporal and spatial deficit irrigation in north China[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(1): 66 ~ 74.
- 26 Ahmed C B, Rouina B B, Boukhris M. Effect of water deficit on olive trees cv. Chemlali under field conditions in arid region in Tunisia[J]. Scientia Horticulturae, 2007, 113(3): 267 ~ 277.
- 27 郑健, 蔡焕杰, 王健, 等. 温室小型西瓜调亏灌溉综合效益评价模型[J]. 农业机械学报, 2011, 42(7): 124 ~ 129.
- Zheng Jian, Cai Huanjie, Wang Jian, et al. Fuzzy evaluation to integration benefit of regulated deficit irrigation of mini-watermelon based on information entropy[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7): 124 ~ 129. (in Chinese)