

# 调亏灌溉对滴灌成龄香梨果树生长及果实产量的影响

武阳<sup>1</sup>, 王伟<sup>2\*</sup>, 雷廷武<sup>1,3</sup>, 黄兴法<sup>1</sup>, 赵智<sup>1</sup>, 马英杰<sup>4</sup>

(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. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100; 4. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆乌鲁木齐 830052)

**摘要:** 调亏灌溉对果树节水、提高果实产量和品质具有一定效果。2009—2010 年, 在新疆库尔勒巴州农业科学研究所进行试验, 研究滴灌调亏时间及土壤水分亏缺程度对树龄 24 a 的成龄库尔勒香梨果树生长及产量的影响。果实细胞分裂期、果实缓慢膨大期、果实细胞分裂期至缓慢膨大期, 分别进行中度土壤水分亏缺与重度土壤水分亏缺灌溉。中度土壤水分亏缺的灌水量为美国 A 级蒸发皿蒸发量 ( $E_p$ ) 的 60%, 重度土壤水分亏缺的灌水量为  $E_p$  的 40%。其它时段灌水量与对照相同, 为  $E_p$  的 80%; 对照处理整个生育期灌水量均为  $E_p$  的 80%。灌溉周期为 7 d。结果表明, 前 2 个生长阶段的调亏灌溉均抑制了香梨树的营养生长, 提高了香梨果实产量和灌溉水利用效率。各调亏处理的夏季修剪量比对照减小了 8.4%~43.2%。2 a 内, 细胞分裂期重度调亏处理, 产量分别比对照增加了 15.5%和 19.2%, 较对照节水 9.7%和 8.1%; 果实缓慢膨大期中度调亏处理, 产量分别比对照增加了 14.0%和 18.0%, 较对照节水 13.2%和 11.3%; 果实细胞分裂期及果实缓慢膨大期的重度调亏处理, 产量分别比对照减少了 15.4%和 13.2%, 较对照节水 34.7%和 28.4%。调亏灌溉对香梨果实品质无显著影响。结果对成龄库尔勒香梨灌溉管理具有指导意义。

**关键词:** 灌溉, 土壤水分, 品质控制, 调亏, 水分利用效率, 营养生长, 果实生长

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.11.020

中图分类号: S274.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-11-0118-07

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)

## 0 引言

水资源短缺是干旱与半干旱区工农业发展的主要制约因素。水资源对南疆绿洲农业区的可持续发展具有决定性作用<sup>[1]</sup>, 过度开发水资源将直接导致绿洲生态恶化。库尔勒香梨是新疆特有品种, 品质好, 经济价值高, 种植库尔勒香梨已经成为南疆果农的主要收入来源。近年来, 库尔勒香梨种植面积以平均每年  $5.6 \times 10^3 \text{ hm}^2$  速度发展<sup>[2]</sup>。目前, 库尔勒香梨的主要灌溉方式为漫灌, 灌溉水利用效率很低。采用高效的节水灌溉技术, 制定合理的灌溉制度是新疆农业生产应对水资源短缺的必然选择。

调亏灌溉 (RDI, Regulated deficit irrigation) 是 Chalmers 与 Van Den Ende<sup>[3]</sup>于 20 世纪 70 年代提出的一种高效节水灌溉制度, 已在很多种类的果树上成功应用。RDI 在特定生长阶段施加水分胁迫, 抑制果树的营养生长, 但对此阶段果实生长的影响较小, 以调节光合产物

在果树不同器官的分配比例, 且实施 RDI 的果树恢复正常灌溉后可促进生殖生长, 从而增产, 提高果实品质与水分利用效率<sup>[4-5]</sup>。研究表明, 土壤水分亏缺可有效地抑制梨树的营养生长, 促进果实生长<sup>[6]</sup>; RDI 使梨树开花增多, 且产量显著增加<sup>[7]</sup>。Marsal 等<sup>[8]</sup>研究表明, RDI 使梨树坐果量增加, 并且产量增加。对其他品种果树的研究表明, RDI 对枇杷的产量影响不显著, 但能提高水分利用效率<sup>[9]</sup>; RDI 对芒果与杏的产量没有长期负面影响, 并可大幅度地提高水分利用效率<sup>[10-11]</sup>。雷廷武等<sup>[12]</sup>对桃树, 黄兴法等<sup>[5]</sup>苹果树的研究表明, RDI 显著地抑制果树的营养生长, 提高水分利用效率, 增加或保持了果实产量。RDI 在不影响产量的条件下, 可提高柑橘的果实品质<sup>[13]</sup>。研究表明, RDI 可提高葡萄的果实品质<sup>[14]</sup>。

目前, 对稀有品种果树的 RDI 研究仍然较少<sup>[15]</sup>。库尔勒香梨为中国的特有品种。目前, 微灌条件下库尔勒香梨 RDI 研究尚未见公开报道。

本研究通过田间试验, 研究调亏时间及土壤水分亏缺程度对库尔勒香梨营养生长及果实生长的影响, 旨在优化库尔勒香梨的灌溉制度, 提高产量与水分利用效率。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验于 2009 年 3 月至 2010 年 12 月在新疆库尔勒市巴州农业科学研究所香梨园 ( $41^\circ 43' \text{ N}$ ,  $86^\circ 6' \text{ E}$ ) 内进行。

收稿日期: 2012-04-09 修订日期: 2012-05-25

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2007BAD38B00); 国家自然科学基金项目 (50879087)。

作者简介: 武阳 (1983—), 男, 博士生, 主要从事农业水土工程及节水灌溉方面的研究。北京 中国农业大学水利与土木工程学院, 100083。

※通信作者: 王伟 (1971—), 男, 博士, 讲师, 主要从事农业水土工程方面的研究。北京 中国农业大学工学院, 100083。

Email: Weiwang@cau.edu.cn

试验区年平均降雨量为 50~56 mm, 年平均蒸发量为 1 600 mm, 属典型的极端干旱气候。年平均气温为 11.4℃, 最低-28℃, 最高 40℃。2009 年与 2010 年, 试验期内的降雨量分别为 21.2 与 24 mm, 同期美国 A 级蒸发皿的蒸发量分别为 800 与 773 mm。试验果园 0~60 cm 的土壤均为粉砂质壤土(砂粒质量分数为 44.09%, 粉粒质量分数为 50.36%, 黏粒质量分数为 5.55%), 平均土壤体积质量为 1.5 g/cm<sup>3</sup>, 田间持水率为 36.7% (体积含水率)。

试验香梨树树龄为 24 a, 长势均匀, 株行距为 5 m×6 m (333 棵/hm<sup>2</sup>)。灌溉系统为地表滴灌, 在香梨树行两侧各布置 1 条滴灌管, 均距树行 1 m。滴灌毛管外径为 16 mm, 灌水器间距为 0.5 m, 流量为 2.8 L/h。

## 1.2 试验设计

根据 2008 年田间试验观测数据及何天明等<sup>[16]</sup>的研究结果, 库尔勒香梨树生育期可划分为 3 个生长阶段, 即果实细胞分裂期(P1, 4 月中旬至 5 月中旬)、果实缓慢膨大期(P2, 5 月中旬至 7 月上旬)与果实快速膨大期(P3, 7 月上旬至收获)。试验设置 7 个处理(见表 1)。调亏时间分别为果实细胞分裂期、果实缓慢膨大期、果实细胞分裂期至缓慢膨大期。灌水量设置 3 个水平, 分别为中度土壤水分亏缺(M), 灌水量为同期美国 A 级蒸发皿蒸发量( $E_p$ )的 60%; 重度土壤水分亏缺(S), 灌水量为  $E_p$  的 40%; 对照处理(Control)在整个生育期内的灌水量均为  $E_p$  的 80%。灌水周期为 7 d。每个处理重复 3 次, 随机布置在试验区内。试验香梨树的施肥与日常管理均按当地常规方式进行。

表 1 试验设计  
Table 1 Experiment design

处理	各生长阶段设计灌水量		
	细胞分裂期 (P1)	果实缓慢膨大期 (P2)	果实快速膨大期 (P3)
M-P1	60% $E_p$	80% $E_p$	80% $E_p$
S-P1	40% $E_p$	80% $E_p$	80% $E_p$
M-P2	80% $E_p$	60% $E_p$	80% $E_p$
S-P2	80% $E_p$	40% $E_p$	80% $E_p$
M-P1+2	60% $E_p$	60% $E_p$	80% $E_p$
S-P1+2	40% $E_p$	40% $E_p$	80% $E_p$
对照	80% $E_p$	80% $E_p$	80% $E_p$

注: 表中  $E_p$  为同期美国 A 级蒸发皿的蒸发量, mm。M 与 S 分别代表中度与重度土壤水分亏缺。P1、P2 与 P1+2 分别代表果实细胞分裂期、果实缓慢膨大期与果实细胞分裂期至缓慢膨大期。下同。

## 1.3 观测项目与方法

蒸发量采用美国 A 级蒸发皿进行观测, 每天观测 1 次。用自动气象站(Vantage Pro2, Davis Instruments Corp.)观测降雨量。

土壤含水量采用便携式土壤水分测量仪(Diviner 2000 型, Sentek Pty Ltd)观测。每个重复在滴灌管正下方安装 2 根测管, 测管的安装深度为 1.5 m。每次灌溉前观测 1 次剖面土壤含水量。土壤体积含水量由土壤水分特征曲线转换为土壤水势。土壤水分特征曲线用压力膜仪测量(1500 型, Soilmoisture Equipment Corp.)。

叶水势采用压力室水势仪测量(ZLZ-5 型, 宁波江南仪器厂), 每个处理每次观测 6 片树叶, 分别在香梨的各生长阶段测量 1 次, 测量时间为黎明前 1 h。

枝条与果实生长观测。在树的同一方向, 选择树冠外围生长势强的新梢(不含徒长枝), 每棵树选取 10 个初始长度基本一致的枝条<sup>[17]</sup>, 每个处理 60 个枝条, 对选定枝条编号标记, 每周用直尺测量 1 次枝条长度。7 月上旬, 每个处理选取 6 棵树, 统计夏季修剪量。每棵树选取初始大小基本一致的 10 个果实<sup>[17]</sup>, 每个处理 60 个果实, 对选定果实编号标记, 每周用游标卡尺测量 1 次果实横径。2008 年, 每 2 周随机摘取 20 个香梨果实, 用排水法测量果实体积( $V$ , mm<sup>3</sup>), 并用游标卡尺测量果实横径( $D$ , mm), 拟合得  $V=0.218\pi D^3$ , ( $R^2=0.929$ ), 用该式计算 2009 年与 2010 年的果实体积。

产量与果实品质测量。每个处理选取 6 棵树, 分别统计每棵树的果实数量与产量。每个处理选取 10 个果实, 用于测量果实品质, 包括可溶性固形物、可溶性糖与可滴定酸含量, 分别采用折光仪(WYT-1, 泉州中友光学仪器有限公司)、弗林试剂滴定法与氢氧化钠溶液和酚酞指示剂滴定法测定。

采用统计软件 SPSS 16.0 进行方差分析, 均值的差异采用 Tukey 检验, 显著性水平为  $P<0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤水分与叶水势

4 月中旬开始灌溉, 9 月初结束。各生长阶段的蒸发量、降雨量及各试验处理的灌水量见表 2。由表中数据可以看出, 与对照比较, 调亏灌溉处理 M-P1、S-P1、M-P2、S-P2、M-P1+2 与 S-P1+2 的灌水量, 2009 年分别减少了 5.0%、9.7%、13.2%、25.0%、18.1%与 34.7%, 2010 年分别减少了 3.9%、8.1%、11.3%、20.1%、15.4%与 28.4%。

由图 1 中可以看出, 整个生育期内, 对照处理灌水前土壤水势一直维持在很高的水平, 均保持在 -50 kPa 左右, 这表明对照处理的果树基本不受水分胁迫<sup>[17]</sup>, 也表明用 80%的  $E_p$  作为对照(充分灌溉)是合理的。各调亏灌处理在非调亏期间的灌前土壤水势也基本保持在 -50 kPa 左右, 即香梨树未受到土壤水分亏缺的影响。

表 2 生长季蒸发量、降雨量与灌水量

Table 2 Evaporation, precipitation and irrigation during growth period

生长阶段		蒸发量	降雨量	各处理灌水量						
				M-P1	S-P1	M-P2	S-P2	M-P1+2	S-P1+2	对照
2009 年	细胞分裂期 (4 月 14 日至 5 月 9 日)	171.5	2.4	94	58	119	121	94	59	122
	果实缓慢膨大期 (5 月 10 日至 7 月 10 日)	364.8	9.2	306	308	225	147	222	144	310
	果实快速膨大期 (7 月 11 日至 9 月 2 日)	264.0	9.6	226	229	228	226	224	227	227
	合计	800.3	21.2	626	595	572	494	540	430	659

续表

生长阶段	蒸发量	降雨量	各处理灌水量						
			M-P1	S-P1	M-P2	S-P2	M-P1+2	S-P1+2	对照
2010年 细胞分裂期(4月17日至5月15日)	136.5	9.2	74	44	99	98	73	44	97
果实缓慢膨大期(5月16日至7月10日)	319.3	12.6	261	261	189	131	187	135	260
果实快速膨大期(7月11日至9月4日)	317.5	2.2	271	275	272	275	274	273	274
合计	773.3	24.0	606	580	560	504	534	452	631

注: M与S分别代表中度与重度土壤水分亏缺; P1、P2与P1+2分别代表果实细胞分裂期、果实缓慢膨大期与果实细胞分裂期至缓慢膨大期,下同。

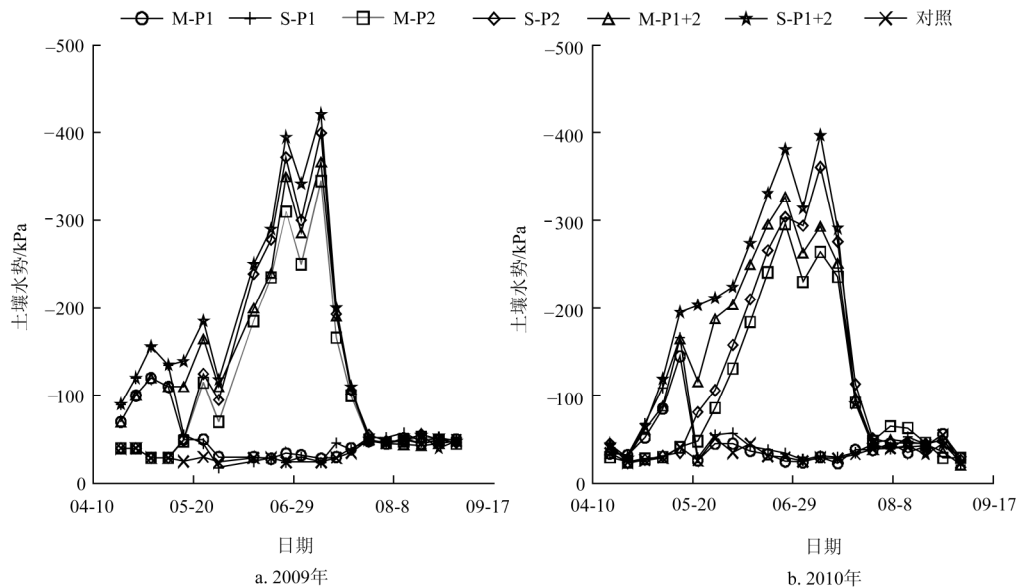


图1 各处理湿润体内30 cm深度灌前土壤水势  
Fig.1 Soil water potential at 30 cm layer in wetted volume

土壤水分亏缺期间,各调亏处理的灌前土壤水势持续下降(图1)。2010年,果实细胞分裂期末(5月15日),处理M-P1的土壤水势为-145 kPa, S-P1则达到了-166 Pa;果实缓慢膨大期末(7月10日),调亏灌溉处理M-P2与S-P2的土壤水势分别为-264与-361 Pa;前2个生长阶段内均进行调亏灌溉的处理M-P1+2与S-P1+2,果实缓慢膨大期末(7月10日)的土壤水势则分别达到了-293与-397 kPa。各处理2009年的土壤水势变化规律与2010年基本相同。

土壤水分亏缺对香梨树黎明前叶水势有显著影响(表3)。与对照相比,水分胁迫处理的香梨树,黎明前的叶水势显著地降低,降幅随着调亏度加重即土壤

水势的降低而增加。果实细胞分裂期末,处理M-P1与M-P1+2的平均叶水势为-0.20 Pa,处理S-P1与S-P1+2的平均叶水势为-0.255 Pa;果实缓慢膨大期末,处理M-P2与S-P2的叶水势为-0.44和-0.61 Pa,处理M-P1+2与S-P1+2的叶水势为-0.60和-0.70 Pa。对照处理的叶水势各阶段均大于等于-0.11 Pa,各RDI处理在调亏结束恢复充分灌溉后的叶水势均大于等于-0.12 Pa。上述叶水势的变化幅度和规律与其他学者的研究结果基本相同<sup>[6,14,18]</sup>。在果实快速膨大期,所有处理均恢复与对照相同灌水,各调亏灌溉处理的叶水势恢复到与对照相似的水平。这与Girona等<sup>[19]</sup>对桃树,Cuevas等<sup>[9]</sup>对枇杷树的研究结论类似。

表3 2010年各试验处理黎明前叶水势  
Table 3 Predawn leaf water potential for different irrigation treatments in 2010

日期	处理						
	M-P1	S-P1	M-P2	S-P2	M-P1+2	S-P1+2	对照
果实细胞分裂期末(5月14日)	-0.19b	-0.25a	-0.08c	-0.10c	-0.21b	-0.26a	-0.09c
果实缓慢膨大期末(7月8日)	-0.09d	-0.10d	-0.44c	-0.61b	-0.60b	-0.70a	-0.11d
恢复充分灌后(8月13日)	-0.10ab	-0.09ab	-0.09b	-0.10ab	-0.11ab	-0.12a	-0.10ab

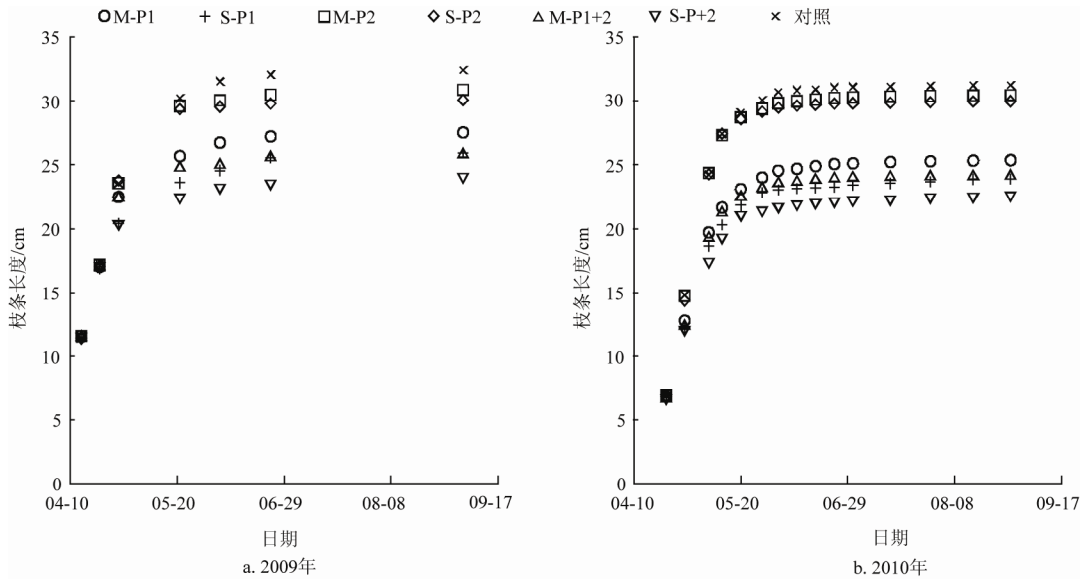
注:同行由不完全相同小写字母表示 $P < 0.05$ 的显著性差异。M注: M与S分别代表中度与重度土壤水分亏缺; P1、P2与P1+2分别代表果实细胞分裂期、果实缓慢膨大期与果实细胞分裂期至缓慢膨大期。

## 2.2 营养生长

从图2中可以看出,香梨枝条在果实细胞分裂期生长速度最快。果实细胞分裂期末,对照处理2009年与2010

年的枝条长度分别为29.6与27.7 cm,分别为其最终枝条长度的91.2%与88.5%。进入果实缓慢膨大期,枝条生长速度逐渐减慢;在此期间,对照处理2009年与2010年

的枝条生长量分别为其最终长度的 7.9%与 11.1%。果实 快速膨大期，枝条生长基本停止。

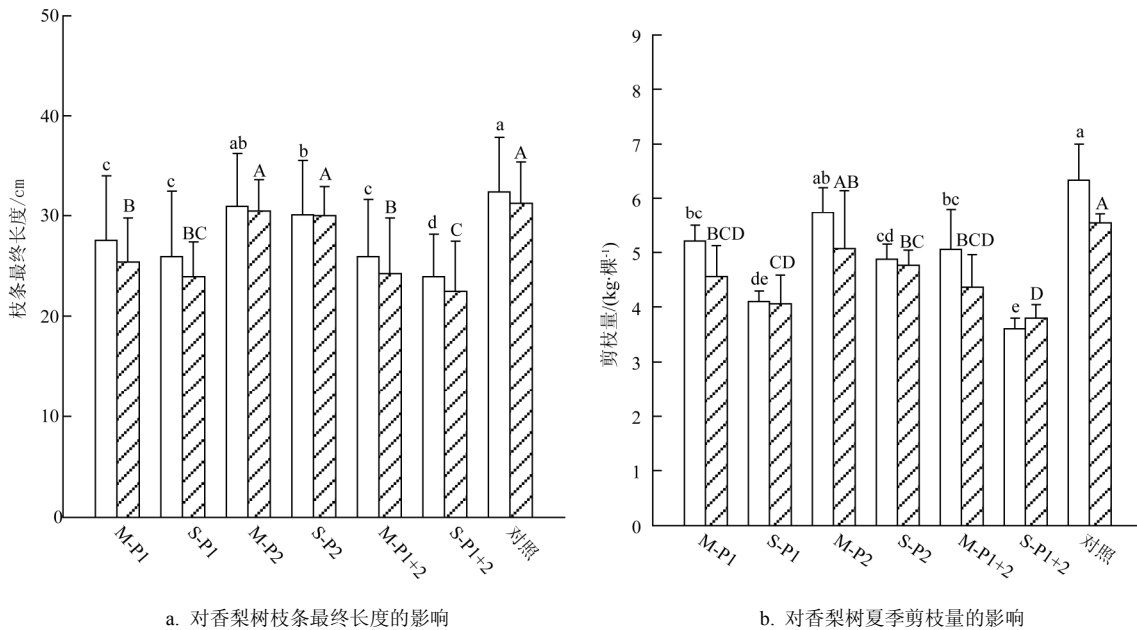


注：M 与 S 分别代表中度与重度土壤水分亏缺；P1、P2 与 P1+2 分别代表果实细胞分裂期、果实缓慢膨大期与果实细胞分裂期至缓慢膨大期。  
图 2 调亏灌溉对香梨树枝条生长的影响

Fig.2 Effects of RDI on Shoot growth of fragrant pear tree

各生长阶段土壤水分亏缺均能有效抑制枝条生长、减少夏季修剪量。由图 3 可以看出，果实细胞分裂期的土壤水分亏缺对香梨枝条生长抑制效率最大，与对照相比，处理 M-P1 和 S-P1 的最终枝条长度分别减少了 15.1%和 20.0%（2009）、18.8%和 23.5%（2010），夏季修剪量比对照减小了 17.9%和 35.3%（2009）、17.5%

和 26.7%（2010）。土壤水分亏缺对夏季修剪量的影响规律与对枝条生长的影响规律基本吻合，即对枝条生长抑制明显的处理，夏季修剪量也较小。本研究中，土壤水分亏缺对库尔勒香梨树细胞分裂期的营养生长具有明显的抑制作用；这一结果与 Chalmers 等<sup>[6]</sup>在巴特利特梨树上的得出研究结论相同。



注：不同小(大)写字母代表 2009 年(2010 年)各处理  $P < 0.05$  的显著性差异，误差线表示均值标准误差，下同。

图 3 调亏灌溉对香梨树枝条最终长度和夏季剪枝量的影响

Fig.3 Effects of RDI on Final shoot extension and summer pruning weight of fragrant pear tree

### 2.3 果实生长

图 4 为调亏灌溉对库尔勒香梨果实生长的影响（2009 年与 2010 年的果实生长规律相似，这里只列出 2010 年果实生长数据）。由图中可以看出，调亏灌溉处理的果实生长规律与对照基本相同。前 2 个生

长阶段，香梨果实体积增长缓慢；细胞分裂期与果实缓慢膨大期，对照处理的果实生长量分别为其最终体积的 1.7%与 20.3%。进入果实快速膨大期，香梨果实体积快速增长，大约最终体积的 80%在该生长阶段生长完成。

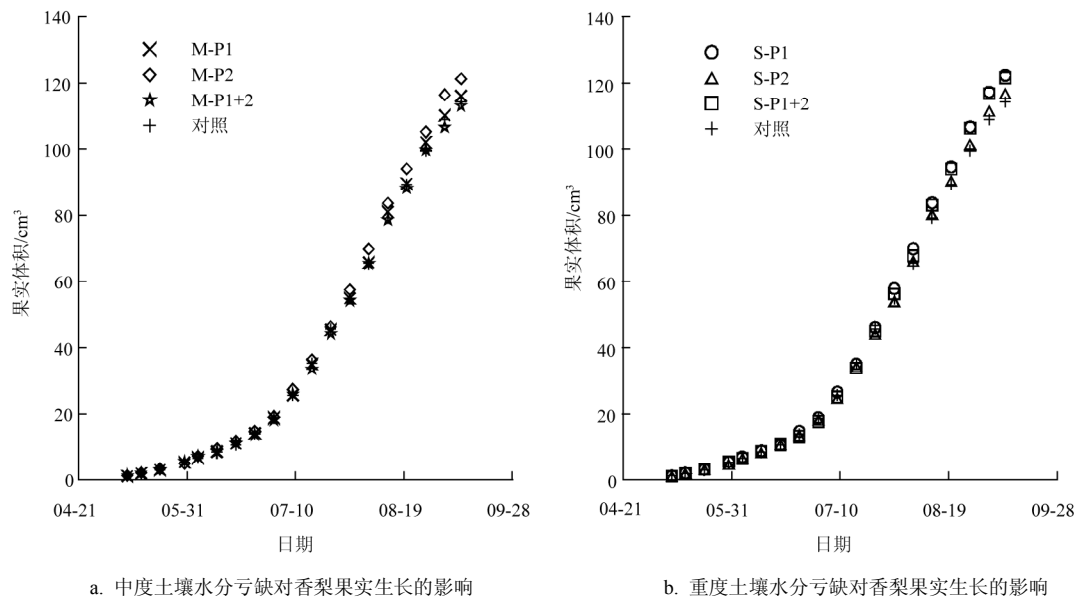


图4 2010年调亏灌溉对香梨果实生长的影响  
Fig.4 Effects of RDI on fruit growth of fragrant pear tree in 2010

调亏时间与土壤水分亏缺程度对库尔勒香梨收获时果实体积均无显著影响(表4)。这与Caspari等<sup>[20]</sup>对梨的研究结果相同。目前,对于调亏灌溉对梨树果实体积的影响,研究结论并不完全一致。Chalmers等<sup>[6]</sup>, Mitchell等<sup>[21]</sup>对梨树的研究表明,水分胁迫期间,果实体积没有减小,

恢复充分灌水后,水分胁迫处理的果实体积与充分灌相比显著地增加。Marsal等<sup>[18]</sup>的研究则表明,调亏处理的梨树果实体积,在水分胁迫期间与恢复充分灌溉以后,均小于充分灌处理。各试验处理2009年的果实体积均小于2010年,这可能与2009年香梨树的坐果量较大有关。

表4 调亏灌溉对香梨产量与果实品质的影响  
Table 4 Effects of RDI on yield and fruit quality of fragrant pear

年份	处理	产量/t·hm <sup>-2</sup>	果实体积/cm <sup>3</sup>	可溶性固形物质量分数/%	糖分质量分数/%	可滴定酸/mmol·100g <sup>-1</sup>
2009	M-P1	18.88abc	94a	12.3bc	8.14b	0.88cd
	S-P1	21.52a	100a	12.5b	8.82a	0.94bc
	M-P2	21.25ab	99a	12.0c	7.62c	1.03a
	S-P2	17.01cdg	90a	12.0c	7.88bc	1.00ab
	M-P1+2	18.07cef	103a	12.0c	7.97b	0.96ab
	S-P1+2	15.77fg	96a	13.1a	8.61a	0.94bc
	对照	18.63bde	98a	11.5d	6.93d	0.83d
2010	M-P1	21.22ab	116a	12.8c	8.08a	2.02a
	S-P1	23.58a	123a	13.8b	8.05a	1.25d
	M-P2	23.35a	121a	13.6b	7.72ab	1.00d
	S-P2	19.18bc	117a	14.6a	7.97ab	1.56c
	M-P1+2	20.60b	113a	13.6b	7.71ab	1.20d
	S-P1+2	17.17c	122a	13.9b	7.99ab	1.63bc
	对照	19.78b	114a	13.6b	7.63b	1.81ab

注: 同列由不完全相同小写字母表示该年内  $P < 0.05$  显著性差异。

## 2.4 产量与果实品质

调亏时间及土壤水分亏缺程度对库尔勒香梨产量均有显著影响(见表4)。果实细胞分裂期的调亏灌溉处理, M-P1与S-P1,产量均大于对照,并且产量随着土壤水分亏缺程度的增加而增加;与对照比较, S-P1的产量,2个试验年分别增加了15.5%与19.2%,并且均为所有处理中的最大值。第1个生长阶段,香梨枝条生长迅速,果实体积增长缓慢,在此期间的土壤水分亏缺最大程度地抑制营养生长,其对生殖生长的影响则很小,为后期果实的快速生长奠定了基础。上述结果可能与香梨果实生

长在细胞分裂期对水分胁迫不敏感有关<sup>[22]</sup>,而水分胁迫对枝条生长的抑制则较为明显。Li等<sup>[23]</sup>对桃树的研究结果表明,在果实生长的第1个生长阶段,调亏灌溉减少落果量,增大果实体积,产量增加。Giulivo与Xiloyannis<sup>[24]</sup>也认为枝条生长限制了果实发育,对枝条生长的抑制可能会促进果实生长。

第2个生长阶段,中度调亏处理M-P2的产量比对照增加了14.0%(2009)与18.0%(2010),而重度调亏处理S-P2的产量比对照减小了8.7%(2009)与3.1%(2010)。上述结果是因为,第2个生长阶段,香梨枝条与果实生

长速度均较慢; 在此期间, 枝条的生长量仅为最终长度的 10%, 中度土壤水分亏缺抑制枝条生长, 对果实产量仍有促进作用; 而重度土壤水分亏缺由于其对果实生长的抑制作用也较大, 其产量与对照差异不显著。这与 Caspari 等<sup>[20]</sup>的研究结论相同, 梨树果实膨大前期的水分胁迫不影响产量。雷廷武等<sup>[12]</sup>对桃树的研究也表明, 在果实生长缓慢时期的水分胁迫增大了果实体积与单位树干横截面积的果实负载量, 产量显著地提高。

连续 2 年, 前 2 个生长阶段均进行中度调亏的处理 M-P1+2 产量与对照的差异均不显著。Li 等<sup>[23]</sup>的研究也得出了类似的结论。重度调亏处理, S-P1+2 的产量则比对照显著地减少了 15.4% (2009) 与 13.2% (2010)。上述结果可能是因为, 处理 M-P1+2 的水分胁迫, 在第 2 个生长阶段对果实生长产生的负面影响, 抵消了其在第 1 生长阶段对产量的促进作用, 最终产量与对照持平; 而处理 S-P1+2 第二阶段对果实生长的负面影响则超过在第一生长阶段对产量的促进作用, 其产量明显的低于对照。

由表 4 可以看出, 与对照相比, 2009 年, 调亏灌溉处理显著地提高了库尔勒香梨果实可溶性固形物、糖分与可滴定酸含量。2010 年, 除个别处理外, 各处理果实可溶性固形物与糖分的差异不显著; 除了 M-P1 与 S-P1+2 外, 其它调亏处理的果实可滴定酸均显著地低于对照, 这与 2009 年的规律不同, 原因有待进一步研究。Marsal<sup>[18]</sup>等对盆栽梨树的研究表明, 调亏灌溉使梨树果实含糖量明显降低。对苹果的研究则表明, 水分胁迫能提高果实的可溶性固形物含量, 对可滴定酸含量的影响则不显著<sup>[25]</sup>。李绍华等<sup>[22]</sup>认为只有在桃树果实快速膨大期施加水分胁迫才能提高果实的可溶性固形物含量。综合分析两年的果实品质数据, 调亏灌溉没有明显降低库尔勒香梨的果实品质。

### 3 结论与讨论

1) 细胞分裂期的土壤水分亏缺可有效地抑制库尔勒香梨树的营养生长。细胞分裂期的调亏处理, 枝条最终长度比对照减少了 15.1%~23.5%, 夏季修剪量比对照减小了 17.5%~35.3%。

2) 香梨实施适时、适量的调亏灌溉可以增加产, 提高灌溉水利用效率。2009 年与 2010 年, 细胞分裂期的重度调亏处理, 分别增产 15.5% 和 19.2%, 节水 9.7% 和 8.1%。果实缓慢膨大期的中度调亏, 分别增产 14.0% 和 18.0%, 节水 13.2% 和 11.3%。果实细胞分裂期及果实缓慢膨大期灌水量为蒸发量 40% 的调亏处理, 节水 34.7% 和 28.4%, 但产量减少了 15.4% 和 13.2%。

3) 调亏灌溉对库尔勒香梨的果实品质与收获果实体积均无显著影响。

库尔勒香梨收获后的灌溉制度, 以及长期调亏灌溉对库尔勒香梨生长的影响还有待进一步研究。

#### [参 考 文 献]

[1] Liu B, Zhao W, Chang X, et al. Water requirements and stability of oasis ecosystem in arid region, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2010, 59(6): 1235—1244.

[2] 马琼, 李英. 巴州库尔勒香梨产业化发展现状·问题·对策探讨[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(19): 10314—10315, 10337. Ma Qiong, Li Ying. Industrialization development of Korla fragrant pear in Bayingolin Mongo Autonomous Prefecture[J]. Journal of Anhui Agricultural Science, 2010, 38(19): 10314—10315, 10337. (in Chinese with English abstract)

[3] Chalmers D J, Van Den Ende B. Productivity of peach trees factors affecting dry weight distribution during tree growth[J]. Annals of Botany, 1975, 39(3): 423—432.

[4] Peter D. Mitchell, Ian Goodwin. Micro-irrigation of vines and fruit trees[M]. AGMEDIA Press, Victoria, Australia. 1996, 198.

[5] 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 (Transactions of the CSAE), 2001, 17(5): 43—47. (in Chinese with English abstract)

[6] 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.

[7] Mitchell P D, Chalmers D J, Jerie P H, et al. The use of initial withholding of irrigation and tree spacing to enhance the effect of regulated deficit irrigation on pear trees[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 1986, 111(5): 858—861.

[8] 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—122.

[9] Cuevas J, Cañete 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.

[10] Spreer W, Ongprasert S, Hegele M, et al. Yield and fruit development in mango (*Mangifera indica* L. cv. Chok Anan) under different irrigation regimes[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(4): 574—584.

[11] Romero P, Botia P, Garcia F. Effects of regulated deficit irrigation under subsurface drip irrigation conditions on water relations of mature almond trees[J]. Plant and Soil, 2004, 260(1—2): 155—168.

[12] 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 (Transactions of the CSAE), 1991, 7(5): 63—69. (in Chinese with English abstract)

[13] García-Tejero I, Jiménez-Bocanegra J A, Martínez G, et al. Positive impact of regulated deficit irrigation on yield and fruit quality in a commercial citrus orchard [*Citrus sinensis* (L.) Osbeck, cv. salustiano] [J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(5): 614—622.

[14] Acevedo-Opazo C, Ortega-Farias S, Fuentes S. Effects of grapevine (*Vitis vinifera* L.) water status on water consumption,

- vegetative growth and grape quality: An irrigation scheduling application to achieve regulated deficit irrigation[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(7): 956—964.
- [15] 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, 22(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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2006, 22(1): 37—43. (in Chinese with English abstract)
- [16] 何天明, 张琦, 邹以强. 香梨果实早期发育的解剖研究[J]. *新疆农业科学*, 2001, 38(5): 247—248. He Tianming, Zhang Qi, Zou Yiqiang. Anatomical studied of fragrant pear fruit in early growth stage[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2001, 38(5): 247—248. (in Chinese with English abstract)
- [17] 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.
- [18] Marsal J, Rapoport H F, Manrique T, et al. Pear fruit growth under regulated deficit irrigation in container-grown trees[J]. *Scientia Horticulture*, 2000, 85(4): 243—259.
- [19] Girona J, Mata M, Goldhamer D A, et al. Patterns of soil and tree water status and leaf functioning during regulated deficit irrigation scheduling in peach[J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 1993, 118(5): 580—586.
- [20] Caspari H W, Behboudian M H, Chalmers D J. Water use, growth, and fruit yield of 'Hosui' Asian pears under deficit irrigation[J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 1994, 119(3): 383—388.
- [21] Mitchell P D, Jerie P H, Chalmers D J. The effects of regulated water deficits on pear tree growth, flowering, fruit growth, and yield[J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 1984, 109(5): 604—606.
- [22] 李绍华. 果树生长发育、产量和果实品质对水分胁迫反应的敏感期及节水灌溉[J]. *植物生理学通讯*, 1993, 29(1): 10—16. Li Shaohua. The response of sensitive periods of fruit tree growth, yield and quality to water stress and water saving irrigation[J]. *Plant Physiology Communications*, 1993, 29(1): 10—16. (in Chinese with English abstract)
- [23] Li S H, Huguet J G, Schoch P G, et al. Response of peach tree growth and cropping to soil water deficit at various phenological stages of fruit development[J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 1989, 64(5): 541—552.
- [24] Giulivo C, Xiloyannis C. *Irrigazione in Ortofrutticoltura*. Banca Popolare, Verona, Italy. 1988.
- [25] Mpelasoka B S, Behboudian M H, Green S R. Water use, yield and fruit quality of lysimeter-grown apple trees: responses to deficit irrigation and to crop load[J]. *Irrigation Science*, 2001, 20(3): 107—113.

## Impact of regulated deficit irrigation on growth and fruit yield of mature fragrant pear trees under trickle irrigation

Wu Yang<sup>1</sup>, Wang Wei<sup>2\*</sup>, Lei Tingwu<sup>1,3</sup>, Huang Xingfa<sup>1</sup>, Zhao Zhi<sup>1</sup>, Ma Yingjie<sup>4</sup>

(1. College of Hydraulic and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China; 4. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

**Abstract:** Regulated Deficit Irrigation (RDI) is known to have higher water use efficiency, and higher fruit yield with better quality. Field experiments were conducted during 2009 and 2010 in Korla city, Xinjiang autonomous region, to investigate the effects of RDI applied in different growth stages and with different levels of water deficit on vegetative, fruit growth and yield of mature fragrant pear trees of 24 years old. The experimental treatments involved moderate and severe water deficit, in either the cell division period or in the slow fruit growth period or in both periods. Trickle irrigation, with 2 driplines, one on each side of the trees was adopted. The moderate RDI used 60% and the severe used 40% replacement of US Class A pan evaporation, respectively. Irrigation amount during non-deficit stages was the same as in the control treatment. The control treatment was irrigated at 80% of pan evaporation during the whole growth season and all treatments were irrigated weekly. The results showed that the water deficit applied during both cell division and/or slow fruit enlargement stage inhibited the vegetative growth. Compared with the control, the summer pruning of the RDI treatments was reduced by 8.4%-43.2%. In both years, as compared with the control, the severe water deficit irrigation during cell division stage significantly increased yield by 15.5%-19.2%, and reduced the irrigation water by 9.7%-8.1%. The yield of moderated water deficit irrigation in slow fruit enlargement stage was increased by 14.0%-18.0%, and the irrigation water was reduced by 13.2%-11.3%. The yield of severe water deficit irrigation during both cell division and slow fruit enlargement stages was decreased by 15.4%-13.2%, and the irrigation water reduced by 34.7%-28.4%. Fruit quality had no significant differences among the treatments. The results are meaningful to guide the irrigation management of mature Korla fragrant pear trees.

**Key words:** irrigation, soil moisture, quality control, regulated deficit, water use efficiency, vegetative growth, fruit growth