

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.09.016

# 亏缺灌溉对成龄库尔勒香梨产量与根系生长的影响\*

武阳<sup>1</sup> 王伟<sup>2</sup> 黄兴法<sup>1</sup> 任德新<sup>3</sup> 苏柳芸<sup>4</sup> 刘正华<sup>3</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. 巴音郭楞蒙古自治州农业科学研究所, 库尔勒 841000; 4. 巴音郭楞蒙古自治州林业技术推广中心, 库尔勒 841000)

**【摘要】** 研究了亏缺灌溉对成龄库尔勒香梨树营养生长、果实生长与吸收根系分布的影响。香梨的生育中期, 设计了4种土壤水分亏缺(灌前土壤水势下限): 轻度胁迫(-100 kPa)、中度胁迫(-200 kPa)、重度胁迫(-300 kPa)和对照(-50 kPa)。灌溉系统为地表滴灌。试验结果表明, 亏缺灌溉显著地减少了夏季剪枝量, 提高了果实产量。充分灌溉条件下, 香梨树根长密度从树行由内向外呈递减趋势, 滴灌促进了湿润体内的吸收根系的发育; 距树行0.5 m, 根长密度随着深度的增加而减少; 距树行1 m至1.5 m, 根长密度随着深度的增加而增加; 距树行2 m的非灌溉区, 根长密度在垂直方向上变化不显著。为适应滴灌湿润体内水分胁迫, 香梨树在湿润体内及非灌溉区的吸收根系的分布均发生了显著的调整。适度水分胁迫下的根长密度增加对香梨产量有促进作用。

**关键词:** 亏缺灌溉 滴灌 水分胁迫 果实生长 根长密度

中图分类号: S275.6; S152.7<sup>+</sup>5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)09-0078-07

## Yield and Root Growth of Mature Korla Fragrant Pear Tree under Deficit Irrigation

Wu Yang<sup>1</sup> Wang Wei<sup>2</sup> Huang Xingfa<sup>1</sup> Ren Dexin<sup>3</sup> Su Liuyun<sup>4</sup> Liu Zhenghua<sup>3</sup>

(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. Institute of Agricultural Sciences of Bayingolin Mongol Autonomous Prefecture, Korla 841000, China

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

### Abstract

The experiment included four levels of the soil water deficit (threshold of soil water potential before irrigation) applied in the middle period of fragrant pear growth: slight (-100 kPa), moderate (-200 kPa), severe (-300 kPa) water stress and the control (-50 kPa). The irrigation system was surface drip irrigation. The results indicated that the water stress irrigation significantly reduced the summer pruning weight, improved the yield. Under full irrigation, the root length density (RLD) decreased with the increment of distance from the tree row, and root development in the wetted zone of drip irrigated pear tree was enhanced. The RLD at 0.5 m from the tree row decreased with the depth; however, the RLD in the range from 1 m to 1.5 m from the tree row increased with the depth; in the non-irrigated zone at 2 m from the tree row, the differences of RLD among the depths were not obvious. The RLD in the wetted and non-irrigated zone adjusted significantly due to the water stress in the wetted zone, as compared to the control. Increase of RLD due to the moderate soil water deficit showed some positive effects to the yield improvement.

**Key words** Deficit irrigation, Drip irrigation, Water stress, Fruit growth, Root length density

收稿日期: 2012-03-27 修回日期: 2012-04-13

\* 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

亏缺灌溉是一种节水灌溉制度。对梨树、苹果树和桃树的亏缺灌溉研究表明,水分亏缺抑制果树枝条生长,促进果实生长,提高了产量与水分利用效率<sup>[1-4]</sup>。

根系是果树吸收养分、合成营养物质的重要器官,也是吸收水分完成蒸腾作用的主要器官<sup>[5]</sup>。研究表明,植物吸收根系对土壤水分变化较为敏感<sup>[6]</sup>,当土壤水分亏缺,发生水分胁迫时,首先,根系将土壤水分变化的信号传递到植物地上部分,使植物对水分胁迫作出必要的调整<sup>[7]</sup>;其次,为适应水分胁迫对植物所造成的影响,根系本身也要作出相对的调整,以适应这种变化。因此,研究果树根系的时空分布特征以及环境变化对果树根系分布的影响,是计算根系吸水量的重要手段,对深入研究根系的吸水特性及其影响机制,发展节水农业具有重要意义<sup>[8-10]</sup>。

对玉米根系的研究表明,土壤水势下限为 $-0.1$  MPa的亏缺灌溉,复水以后,根系总量较充分灌溉处理明显增加<sup>[11]</sup>。水分胁迫对柏木幼苗根系生长有明显的抑制作用,复水后,除重度干旱外,其余处理的根系都能恢复到对照的水平<sup>[12]</sup>。Benjamin等<sup>[13]</sup>的研究表明,水分胁迫能使鹰嘴豆和红豌豆的根系向深层土壤发展。目前,对水分胁迫条件下果树根系分布的研究相对较少,对一些稀有品种果树的研究更少。

库尔勒香梨的主产区(环塔里木盆地)水资源短缺、气候极端干旱。以库尔勒产区为例,多年平均蒸发量约为 $1\ 600$  mm,而多年平均降水量则不足 $60$  mm。水资源短缺严重制约了新疆林果业的发展,发展节水灌溉是新疆农业可持续发展的必然趋势。

因此,本文研究在香梨生育中期的不同土壤水分亏缺对成龄库尔勒香梨树营养生长、果实生长与根系分布的影响,旨在揭示水分胁迫下香梨树地上部分与根系的反应,以及根系的变化对果实产量可能产生的影响。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验材料

试验于2008年4月至9月进行,地点位于新疆维吾尔自治区巴州农业科学研究所成龄香梨园内。生育期内,试验区的累积降水量为 $48.6$  mm,蒸发量为 $816.9$  mm。试验香梨树树龄为20年,树高 $3\sim 4$  m,株距为 $4$  m,行距为 $5$  m。试验区土壤类型为粉砂质壤土,其中砂粒质量分数为 $44.09\%$ ,粉粒质量

分数为 $50.36\%$ ,粘粒质量分数为 $5.55\%$ 。 $0\sim 60$  cm土层的土壤平均容重为 $1.5\text{ g/cm}^3$ 。

### 1.2 试验设计

试验灌溉系统为地表滴灌,每行树两条滴灌管,布置在树行的两侧,分别距树行 $1$  m。滴灌管的外径为 $16$  mm。灌水器流量为 $3.3\text{ L/h}$ ,间距为 $0.5$  m。

试验因素为土壤水势(距离树行 $1$  m处,滴灌管正下方 $30$  cm深度的土壤水势)下限,共4个水平:处理1为轻度水分胁迫,土壤水势下限为 $-100$  kPa;处理2为中度水分胁迫,土壤水势下限为 $-200$  kPa;处理3为重度水分胁迫,土壤水势下限为 $-300$  kPa;对照处理为充分灌溉,土壤水势下限为 $-50$  kPa<sup>[14]</sup>。试验设计见表1。试验采用完全随机布置,每个处理有2个重复,分别布置在两个独立的灌水小区中。每个重复包括6棵树,四周设有隔离行(株)。距树行一侧 $1$  m(滴灌管正下方)处布设土壤水分监测点,监测土壤水势变化;当该处 $30$  cm深度的土壤水势达到设定值时,进行灌溉;每次灌溉至 $30$  cm深度的土壤含水率达到田间持水率。2007年,试验果园遭遇冬季低温,为减轻可能的冻害,当地果园于2008年4月中旬进行了一次漫灌。5月中旬,各处理的土壤水势相继达到试验设计值,试验灌溉开始(约花后4周)。亏缺灌溉时间为5月中旬至8月8日。生育期内的其余时间均实施充分灌溉。各试验处理灌水量见表1。

表1 试验设计

Tab.1 Experimental design

处理序号	土壤水势下限/kPa		灌水量 /mm
	5月15日至8月8日	8月9日至果实收获	
1	-100	-50	340.2
2	-200	-50	322.0
3	-300	-50	302.7
CK(对照)	-50	-50	357.1

### 1.3 试验参数测量

#### 1.3.1 土壤水势和叶片水势监测

距离树行 $1$  m,滴灌管正下方 $30$  cm深处,布设负压计与石膏块监测土壤水势。每个重复布设两处监测点,每 $2$  d观测一次土壤水势。

试验于7月6日观测香梨树的叶片水势,测量仪器为压力室水势测量仪(ZLZ-5型,宁波江南仪器厂)。每个重复选取3片叶片(每个处理6片),进行叶水势的测量。

#### 1.3.2 香梨树营养生长和果实生长测量

试验于7月初测量香梨树的剪枝量。每个重复选取3棵树,每个处理6棵树,称重并记录剪枝量。

5月初开始每周测量果实的纵径与横径。每个处理选取6棵树,每棵树随机选取10个果实,对选定果实编号标记。从5月开始每两周摘取20个果实,测量纵径( $D_z$ , mm)与横径( $D_H$ , mm),用排水法测量果实体积( $V$ ,  $\text{cm}^3$ ),拟合得  $V = 0.002D_z^{1.864} D_H^{0.803}$ ,  $R^2 = 0.958$ 。

### 1.3.3 果实产量与品质测量

9月初,人工收获香梨果实。每个重复随机选取3棵树,每个处理6棵树,测量香梨产量。收获每棵树上的所有果实,用电子秤称取质量并单独记录。每个处理随机选取10个果实,用折光仪(WYT-1型,泉州中友光学仪器有限公司)测量果实的可溶性固形物质量分数。

### 1.3.4 根系取样方法和测定指标

试验于9月中旬(香梨果实采收后)开始根系取样,利用直径10 cm的取土器,在选定位置分层取出根样;每个重复选取1棵树,每个处理2棵树。考虑取样的工作量与实际情况,取样点垂直于树行,正对树干,距树干分别为0.5、1、1.5与2 m(图1)。取样深度设定为0~20 cm、20~40 cm与40~70 cm。由于试验期间农户在地表进行过旋耕(除草和松土),因此0~20 cm根层内的根系已不具代表性,在下文中将不作分析与讨论。在清除土壤以及杂质后,利用根系扫描仪扫描根系样品,通过根系分析系统(WinRHIZO)分析计算,得出吸水根(根直径小于等于1 mm定义为吸水根<sup>[7,15]</sup>)根系长度,然后计算根长密度(单位体积土体内吸水根系的总长度)。

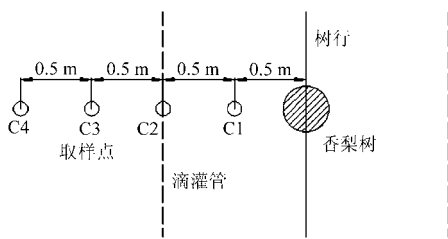


图1 根系取样示意图

Fig.1 Layout of root sampling

## 1.4 试验数据处理

采用统计分析软件(SPSS 16.0)对试验数据进行方差分析,均值的差异采用Tukey检验,显著性差异的检验水平为  $P < 0.05$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤水势和叶水势

图2为各处理滴灌湿润体中部30 cm深度的灌前土壤水势变化。水分亏缺期间,各处理灌前土壤水势基本保持在设定值;亏缺灌溉结束后的充分灌溉期间,各处理灌前土壤水势基本保持在-50 kPa以上。

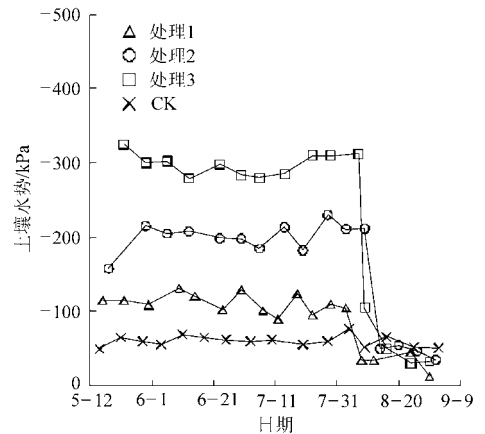


图2 湿润体中部30 cm深度灌前土壤水势

Fig.2 Soil water potential in the middle of wetted volume at 30 cm depth

从7:00至15:00,各处理的叶水势逐渐降低;相对于15:00,各处理18:00的叶水势均明显上升(表2)。叶水势与土壤水分亏缺程度表现出较明显的相关性,即叶水势随着水分亏缺程度的增加而降低。这与Caspari等<sup>[16]</sup>对梨树以及Mills等<sup>[17]</sup>对苹果的研究结论相吻合。

表2 不同亏缺灌溉条件下的香梨叶水势

Tab.2 Leaf water potential of fragrant pear trees under different water deficit irrigations MPa

处理序号	时刻			
	7:00	9:00	15:00	18:00
1	-0.19 <sup>a</sup>	-0.59 <sup>a</sup>	-1.08 <sup>a</sup>	-0.31 <sup>a</sup>
2	-0.24 <sup>b</sup>	-0.70 <sup>b</sup>	-1.24 <sup>b</sup>	-0.56 <sup>b</sup>
3	-0.30 <sup>c</sup>	-0.91 <sup>c</sup>	-1.42 <sup>c</sup>	-0.61 <sup>b</sup>
CK(对照)	-0.13 <sup>d</sup>	-0.51 <sup>a</sup>	-1.03 <sup>a</sup>	-0.23 <sup>c</sup>

注:同列中不同小写字母表示处理间存在显著性差异( $P < 0.05$ )。

### 2.2 水分亏缺对营养生长、果实生长与产量的影响

水分亏缺对库尔勒香梨的营养生长影响显著(表3),与对照相比,处理1、处理2与处理3的夏季剪枝量分别减少了39%、64%与74%,且各处理之间的差异随着水分亏缺程度的增大而减小。

表3 各处理剪枝量、产量、果实品质与总根长密度

Tab.3 Pruning weight, yield, fruit quality and total root length density of each treatment

处理序号	剪枝量/ $\text{kg} \cdot \text{棵}^{-1}$	产量/ $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$	果实 体积/ $\text{cm}^3$	可溶性固 形物质量 分数/%	总根长 密度/ $\text{mm} \cdot \text{cm}^{-3}$
2	1.98 <sup>b</sup>	17.54 <sup>b</sup>	143 <sup>a</sup>	13.56 <sup>a</sup>	3.04 <sup>b</sup>
3	1.44 <sup>c</sup>	13.59 <sup>a</sup>	133 <sup>a</sup>	13.59 <sup>a</sup>	3.57 <sup>c</sup>
CK(对照)	5.44 <sup>d</sup>	13.78 <sup>a</sup>	135 <sup>a</sup>	13.85 <sup>a</sup>	2.65 <sup>a</sup>

注:同列中不同小写字母表示处理间存在显著性差异( $P < 0.05$ )。

图3为各水分亏缺处理对香梨果实生长的影响。由图3可以看出,各处理的果实生长趋势基本相同,生育中期的土壤水分亏缺对香梨果实的生长影响较小。各处理收获时的果实体积差异均不显著(表3)。处理2的果实体积比对照增大了5.8%,处理1和处理3分别比对照减小了4.7%与1.8%。生育中期的水分胁迫对香梨收获时的果实体积没有显著影响,这与Caspari等<sup>[16]</sup>对梨树研究得出的结果相同。Mitchell等<sup>[1]</sup>也认为水分亏缺不会对梨树的果实生长产生负面影响。

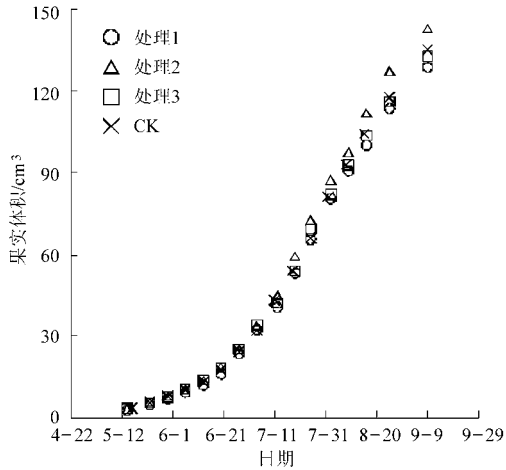


图3 土壤水分亏缺对库尔勒香梨果实生长的影响

Fig.3 Effects of soil water deficit on fruit growth of fragrant pear tree

各处理的香梨果实产量见表3。与对照相比,处理2的产量显著增加;其他处理与对照的差异不显著。这与水分亏缺对果实体积的影响规律基本一致(虽然水分胁迫对最终果实大小影响不显著)。雷廷武等<sup>[3]</sup>的研究表明,水分亏缺增加了桃树的果实承载量,并且果实体积增大,产量提高。水分亏缺抑制了香梨树的营养生长,对后期果实的生长有促进作用,从而达到节水增产的目的。Giulivo等<sup>[18]</sup>的研究也有同样的结论。处理1、处理3与对照的产量差异不明显。这可能是由于处理1的水分亏缺对营养生长抑制不足,而处理3的水分亏缺期间对果实生长的负面影响与其后的促进作用相抵消,从而果实产量的变化不显著。

水分亏缺对香梨果实的可溶性固形物质量分数影响不显著(表3)。Li等<sup>[19]</sup>对桃树的研究得出了相同的结论。但其他的研究结论则不尽相同,Marsal等<sup>[20]</sup>对梨的研究表明,水分亏缺降低了果实的可溶性糖质量分数,Mills等<sup>[17]</sup>则认为水分亏缺显著性提高了苹果果实的可溶性固形物质量分数。

### 2.3 亏缺灌溉对香梨树根系分布的影响

#### 2.3.1 滴灌香梨根系分布

滴灌成年库尔勒香梨的根系分布见表4。充分滴灌(CK)条件下,在水平方向,C2点位于滴灌湿润体正中,C1与C3点靠近湿润体边缘;C4点则位于

表4 水分胁迫对滴灌成年库尔勒香梨根系分布的影响

Tab.4 Fine root distribution of fragrant pear tree affected by soil water deficit

取样点	取样深度/cm	根长密度/mm·cm <sup>-3</sup>			
		处理1	处理2	处理3	CK(对照)
C1	20~40	4.83 <sup>a</sup>	5.68 <sup>ab</sup>	6.00 <sup>b</sup>	4.96 <sup>aA</sup>
	40~70	2.93 <sup>a</sup>	3.12 <sup>a</sup>	3.42 <sup>a</sup>	3.00 <sup>ab</sup>
	20~70	3.69 <sup>a</sup>	4.15 <sup>ab</sup>	4.46 <sup>b</sup>	3.79 <sup>ab</sup>
	20~40 cm与40~70 cm根长密度比	1.65 <sup>a</sup>	1.84 <sup>a</sup>	1.76 <sup>a</sup>	1.66 <sup>a</sup>
C2	20~40	2.61 <sup>ab</sup>	2.85 <sup>ab</sup>	3.17 <sup>a</sup>	2.55 <sup>bA</sup>
	40~70	2.98 <sup>a</sup>	3.60 <sup>b</sup>	3.64 <sup>b</sup>	2.92 <sup>ab</sup>
	20~70	2.83 <sup>a</sup>	3.30 <sup>b</sup>	3.45 <sup>b</sup>	2.77 <sup>a</sup>
	20~40 cm与40~70 cm根长密度比	0.88 <sup>a</sup>	0.79 <sup>a</sup>	0.88 <sup>a</sup>	0.87 <sup>a</sup>
C3	20~40	1.26 <sup>a</sup>	1.58 <sup>ab</sup>	2.23 <sup>b</sup>	1.14 <sup>aA</sup>
	40~70	2.73 <sup>ab</sup>	2.74 <sup>ab</sup>	3.23 <sup>a</sup>	2.64 <sup>bB</sup>
	20~70	2.14 <sup>a</sup>	2.28 <sup>a</sup>	2.83 <sup>b</sup>	2.04 <sup>a</sup>
	20~40 cm与40~70 cm根长密度比	0.47 <sup>ab</sup>	0.58 <sup>ab</sup>	0.69 <sup>a</sup>	0.43 <sup>b</sup>
C4	20~40	1.97 <sup>a</sup>	2.05 <sup>a</sup>	3.91 <sup>b</sup>	2.03 <sup>aA</sup>
	40~70	2.50 <sup>a</sup>	2.68 <sup>ab</sup>	3.29 <sup>b</sup>	2.01 <sup>aA</sup>
	20~70	2.28 <sup>a</sup>	2.43 <sup>a</sup>	3.54 <sup>b</sup>	2.01 <sup>a</sup>
	20~40 cm与40~70 cm根长密度比	0.79 <sup>a</sup>	0.77 <sup>a</sup>	1.19 <sup>b</sup>	1.01 <sup>ab</sup>

注:同行中不同小写字母表示处理间存在显著性差异(P<0.05);同列中不同大写字母表示同一处理不同深度间存在显著性差异(P<0.05)。

滴灌湿润体之外,在整个灌溉期内,该点均未得到灌溉。由表4中的数据可以看出,20~40 cm根层,湿润区内,根长密度从树行由内向外呈递减趋势,介于1.14~4.96 mm/cm<sup>3</sup>之间;干区的根长密度(C4点)与C2点接近,为2.03 mm/cm<sup>3</sup>。40~70 cm根层内,根长密度也呈现从树行由内向外的递减趋势,介于2.01~3.00 mm/cm<sup>3</sup>之间。上述规律表明,20~70 cm根层内,香梨的根长密度在距树行1.5 m(滴灌湿润区)内,从树行由内向外递减;距树行1.5 m以外的非灌溉区,根长密度变化不大。C3点(位于湿润区边缘,靠近非灌溉区)的根长密度较C1点减小了47%。

充分滴灌(CK)条件下,20~70 cm根层内,湿润区各取样点的根长密度均大于非湿润区,湿润区内3个取样点的平均根长密度(2.87 mm/cm<sup>3</sup>)也显著地高于非湿润区的根长密度( $p < 0.05$ )。而漫灌条件下,距树行1~2 m范围内,香梨根系由内向外呈递增趋势,C4点的根长密度比C2点增加了21.4%<sup>[21]</sup>。这说明滴灌促进了湿润体内的香梨树根系发育。这与Fernandez等<sup>[22]</sup>和Sokalska等<sup>[23]</sup>的研究结论相同。

湿润体内,C1点的根长密度随着深度的增加而显著减小,40~70 cm的根长密度较20~40 cm减小了40%。C2与C3点的根长密度随着深度的增加而显著增加,40~70 cm的根长密度较20~40 cm分别增加了15%和132%。位于非滴灌区的C4点,根系在20~70 cm内垂直分布较均匀。上述香梨根系的垂直分布规律与漫灌条件下基本相同<sup>[21]</sup>。

### 2.3.2 水分胁迫对根系分布的影响

表4为各水分胁迫处理在C1、C2、C3与C4点的根系分布。在湿润区内,处理1与对照相比,根长密度没有显著性差异,而处理2和3的根长密度大于对照,并且根长密度随着水分亏缺程度的增大而增加。20~70 cm根层,在C1、C2与C3点,处理3的根长密度较对照分别增加了18%、24%与39%,处理1与对照的根长密度差异不显著,处理2的根长密度介于处理1和处理3之间,且在C2点的根长密度显著高于处理1与对照。

植物根系承受一定程度的水分胁迫后,恢复充分灌溉将刺激根系快速生长,促进根系恢复吸收土壤中的水分和养分<sup>[24]</sup>。郝树荣等<sup>[25]</sup>的研究表明,水稻分蘖期的水分胁迫会抑制根系的生长,但复水后,中度水分胁迫的根系干物质增长速率远大于轻度水分胁迫与对照。本文中,8月初各水分亏缺处理的香梨树均恢复充分灌溉,促进根系加速生长,根长密度超过了对照。

在非湿润体内,各水分亏缺处理的根长密度也超过了对照,且增加的程度随着滴灌湿润体内水分亏缺的增加而增加。这说明为了适应湿润体内的土壤水分亏缺,香梨树滴灌湿润体与非湿润体内的根系均发生了正向调整(根长密度增加)。由于非湿润体(滴灌的非灌溉区)内的根系将持续承受水分胁迫,因此,其根系后续的变化规律,还有待进一步研究。

与对照比较,水分胁迫对根系的垂直分布影响较小。在C1点,各处理20~40 cm的根长密度均超过40~70 cm的根长密度,二者的比值约为1.7,各处理间的差异不显著;C2与C3点,各处理20~40 cm的根长密度均小于40~70 cm的根长密度,二者的比值分别约为0.8与0.5,除处理3外,其余各处理间无显著性差异。非湿润体内(C4点),各水分亏缺处理20~40 cm与40~70 cm的根长密度比虽然趋势并不一致,但与对照相比均无显著性差异。水分胁迫没有改变香梨树根系在湿润区与非湿润区内的纵向分布规律。一些研究结果表明,水分胁迫能够使根系向深层发展,从而吸收更多的水分<sup>[12,26]</sup>。本文在湿润体和非湿润体内,20~70 cm根层的平均根长密度在垂直方向上并没有表现出根系向深层发展的趋势,对70 cm以下的根系分布情况还有待于进一步研究。

### 2.4 根系分布对香梨产量的影响

与对照相比,处理2的香梨果实产量显著增加(表3),处理1和处理3的果实产量与对照相比差异不显著。处理1的总根长密度(各取样点的总根长与取样总体积的比值)与对照无显著差异;处理2的总根长密度则显著地超过了对照,这表明果树根系的数量在一定程度上与产量有正相关关系。根系作为植物从土壤中吸收水分和养分的器官直接影响着植物的生长。Sokalska等<sup>[23]</sup>对苹果树的研究表明,吸收根系越多的苹果树产量也越高。处理3的总根长密度也显著地高于对照,但产量与对照的差异并不显著。Kramer等<sup>[27]</sup>认为,长时间的重度土壤水分亏缺可能导致果树根系的吸水能力降低,在恢复充分灌溉后,根系的吸收能力已经不能完全恢复,从而影响产量。在本文中,根系的吸收能力下降也可能是导致恢复充分灌溉后根系加速生长的原因之一。

## 3 结论

(1)亏缺灌溉减少了灌溉用水量;抑制了果树的营养生长,与对照相比,重度水分胁迫下,夏季修剪量减少了74%;提高了果实产量,中度水分胁迫的产量比对照增加了27%;但对果实体积与可溶性

固形物含量没有产生显著性影响。

(2) 充分灌溉条件下, 滴灌库尔勒香梨树的根系从树行由内到外呈递减趋势, 滴灌促进了湿润体内吸收根系的发育。在垂直方向, 距树行较近的位置(0.5 m), 根长密度随着深度的增加而呈递减趋势; 距树行 1 ~ 1.5 m 范围内, 根长密度随着深度的增加而呈递增趋势; 距树行 2 m 的非滴灌区, 根系在

垂直方向上分布较均匀。

(3) 水分胁迫对香梨根系有显著的影响。在香梨生育中期施加的水分胁迫及其后恢复充分灌溉, 促进滴灌湿润区与非湿润区内香梨吸收根系的发育。水分胁迫对香梨根系的垂直分布影响较小。

(4) 适度水分胁迫下的香梨根长密度增加对产量有促进作用。

#### 参 考 文 献

- 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.
- 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.
- 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. 充分灌溉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)
- 魏钦平, 王丽琴, 曲桂敏. 苹果优质丰产新技术[M]. 北京: 农业出版社, 1992, 47: 51 ~ 60.
- Abrisqueta J M, Mounzer O, Álvarez S, et al. Root dynamics of peach trees submitted to partial root zone drying and continuous deficit irrigation [J]. *Agricultural Water Management*, 2008, 95(8): 959 ~ 967.
- 傅友. 果树根修剪控根技术研究[J]. *园艺学报*, 1993, 20(4): 346 ~ 352.  
Fu You. Studies on root pruning on fruit free size control—a literature review [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 1993, 20(4): 346 ~ 352. (in Chinese)
- 张劲松, 孟平, 尹昌君. 果农复合系统中果树根系空间分布特征[J]. *林业科学*, 2002, 38(4): 30 ~ 33.  
Zhang Jinsong, Meng Ping, Yin Changjun. Spatial distribution characteristics of apple tree roots in the apple-wheat intercropping [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2002, 38(4): 30 ~ 33. (in Chinese)
- 马秀玲, 陆光明, 徐祝龄, 等. 农林复合系统中林带和作物的根系分布特征[J]. *中国农业大学学报*, 1997, 2(1): 109 ~ 116.  
Ma Xiuling, Lu Guangming, Xu Zhuling, et al. Distribution characteristic of the root system of forest belt and crop within the composite system of agriculture and forestry [J]. *Journal of China Agricultural University*, 1997, 2(1): 109 ~ 116. (in Chinese)
- 周青云, 王仰仁, 孙书洪. 根系分区交替滴灌条件下葡萄根系分布特征及生长动态[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(9): 59 ~ 63, 58.  
Zhou Qingyun, Wang Yangren, Sun Shuhong. Distribution characteristic and growing dynamic of grape vine roots under alternate partial root zone drip irrigation [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(9): 59 ~ 63, 58. (in Chinese)
- 胡笑涛, 梁宗锁, 康绍忠, 等. 模拟调亏灌溉对玉米根系生长及水分利用效率的影响[J]. *灌溉排水*, 1998, 17(2): 11 ~ 15.  
Hu Xiaotao, Liang Zongsuo, Kang Shaozhong, et al. Effect of simulated regulated deficit irrigation on root growth and water use efficiency in maize [J]. *Irrigation and Drainage*, 1998, 17(2): 11 ~ 15. (in Chinese)
- 刘锦春, 钟章成. 水分胁迫和复水对石灰岩地区柏木幼苗根系生长的影响[J]. *生态学报*, 2009, 29(12): 6 439 ~ 6 445.  
Liu Jinchun, Zhong Zhangcheng. Influence of water stress and re-watering on the root growth of *Cupressus funebris* Endl seedlings in the limestone area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(12): 6 439 ~ 6 445. (in Chinese)
- Benjamin J G, Nielsen D C. Water deficit effects on root distribution of soybean, field pea and chickpea [J]. *Field Crops Research*, 2006, 97(2 ~ 3): 248 ~ 253.
- 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.

- 15 Mulia R, Dupraz C. Unusual fine root distributions of two deciduous tree species in Southern France: what consequences for modeling of tree root dynamics [J]. *Plant and Soil*, 2006, 281(1~2): 71~85.
- 16 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.
- 17 Mills T M, Behboudian M H. Water relations, growth, and the composition of 'Braeburn' apple fruit under deficit irrigation [J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 1996, 121(2): 286~291.
- 18 Giulivo C, Xiloyannis C. *L'irrigazione in ortofruitticoltura* [M]. Verona: Banca Popolare, 1988.
- 19 Li S H, Huguot 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.
- 20 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.
- 21 晏清洪, 王伟, 任德新, 等. 滴灌湿润比对成龄库尔勒香梨树根系分布的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2011, 30(2): 63~67.  
Yan Qinghong, Wang Wei, Ren Dexin, et al. Effects of wetted percentage on the root redistribution of mature Korla fragrant pear trees under drip irrigation [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2011, 30(2): 63~67. (in Chinese)
- 22 Fernandez J E, Moreno F, Cabrera F, et al. Drip irrigation, soil characteristics and the root distribution and root activity of oil trees [J]. *Plant and Soil*, 1991, 133(2): 239~251.
- 23 Sokalska D I, Haman D Z, Szewczuk A, et al. Spatial root distribution of mature apple trees under drip irrigation system [J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(6): 917~924.
- 24 McCully M. Roots in soil: unearthing the complexities of roots and their rhizospheres [J]. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1999, 50: 695~718.
- 25 郝树荣, 郭相平, 王为木, 等. 水稻分蘖期水分胁迫及复水对根系生长的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2007, 25(1): 149~152.  
Hao Shurong, Guo Xiangping, Wang Weimu, et al. Effects of water stress in tillering stage and re-watering on rice root growth [J]. *Agricultural Research in Arid Areas*, 2007, 25(1): 149~152. (in Chinese)
- 26 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)
- 27 Kramer P J, Boyer J S. *Water relations of plants and soils* [M]. San Diego, California: Academic Press, 1995: 145~147.

---

(上接第 119 页)

- 8 赵东, 孙艳玲, 赵小津. 植物秸秆杯型容器成型过程的计算机模拟[J]. *北京林业大学学报*, 2002, 24(5~6): 208~210.  
Zhao D, Sun Y L, Zhao X J. Computer-aided simulation of plant stalk die compaction processes in cup-shaped mold [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2002, 24(5~6): 208~210. (in Chinese)
- 9 景全荣, 董峰, 高德. 秸秆包装容器成型过程影响因素分析[J]. *包装工程*, 2009, 30(1): 41~44.  
Jing Q R, Dong F, Gao D. Analysis on influencing factors in dry-molding process of straw packaging container [J]. *Packaging Engineering*, 2009, 30(1): 41~44. (in Chinese)
- 10 任露泉. *实验优化设计与分析* [M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2003.