

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.05.030

调亏灌溉和灌溉方式对香梨树吸收根系重分布的影响

武阳¹ 赵智² 王伟³ 黄兴法¹ 马英杰⁴

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 中国水利水电出版社, 北京 100038;
3. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 4. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052)

摘要: 于2009—2010年开展了田间试验,研究了调亏灌溉对成熟库尔勒香梨树吸收根系重分布的影响。灌溉方式为地表滴灌与漫灌,滴灌试验包括轻度与重度水分胁迫处理(在新梢及果实生长缓慢期分别按蒸发量的60%与40%灌溉,在其他生育期按蒸发量的80%灌溉),对照处理为充分灌溉,在整个生育期按蒸发量的80%灌溉。每年4—8月份,漫灌每月灌溉1次,灌水定额为300 mm。所有处理在2009年之前均为漫灌。研究结果表明,成熟库尔勒香梨树的吸收根系主要分布于地表以下20~60 cm。梨树需要2 a时间调整吸收根系的分布以适应灌溉方式由漫灌转为滴灌。土壤水分胁迫减小了梨树吸收根系的根长,抑制了梨树的营养生长,其后恢复充分灌溉可促进根系的生长。梨树新梢及果实生长缓慢期的土壤水分胁迫对根系生长的抑制效果超过了对新梢生长的抑制;但吸收根系的生长与果实产量之间并无显著的相关性。

关键词: 库尔勒香梨; 根长密度; 果树生长; 果实产量

中图分类号: S275.6; S152.7⁺5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)05-0244-07

Effect of Regulated Deficit Irrigation and Irrigation Mode on Fine Roots Redistribution of Fragrant Pear Trees

WU Yang¹ ZHAO Zhi² WANG Wei³ HUANG Xingfa¹ MA Yingjie⁴

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

2. China Water and Power Press, Beijing 100038, China

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

4. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: Field experiment was conducted to evaluate the effects of regulated deficit irrigation on the fine roots redistribution of mature Korla fragrant pear trees planted in the oasis in 2009 and 2010. The experiment consisted of drip and flood irrigation plots. The drip irrigation plots included two water deficit treatments; applying 60% (moderate) and 40% (severe) of pan evaporation during the slow growth stage of both shoot and fruit (stage 2), and 80% (full irrigation) of pan evaporation in the two other stages, and the control treatment; applying 80% of pan evaporation during the whole growth season. The flood irrigation plots were irrigated with amount of 300 mm per month from April to August. All the experimental plots were flood irrigated before 2009. The results showed that fine roots of mature Korla fragrant pear trees mainly distributed in 20~60 cm soil layers. The previously flood irrigated Korla fragrant pear trees spent two years on adapting to the irrigation mode transformation from flood irrigation to drip irrigation through redistributing their fine roots. Water stresses decreased fine roots length and inhibited the vegetative growth of fragrant pear trees, while the resumption of full irrigation boosted their growth. The water deficit inhibited fine roots development more effectively than shoots, owing to the near cessation of shoot growth in stage 2. However, no remarkable correlations between fine roots length and fruit yield were observed. The results provided the theoretical basics for regulated deficit irrigation application to the mature fruit trees planted in the extremely arid regions.

Key words: Korla fragrant pear; root length density; fruit tree growth; fruit yield

收稿日期: 2016-09-16 修回日期: 2016-11-14

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目(2007BAD38B00)和国家自然科学基金项目(50879087)

作者简介: 武阳(1983—),男,助理研究员,博士,主要从事水肥一体化理论及技术研究, E-mail: aboluo1983331@163.com

通信作者: 王伟(1971—),男,副教授,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(RDI)技术在果实缓慢生长期施加一定程度的水分胁迫,限制营养生长,在果实快速膨大期恢复充分供水从而提高果实的产量或品质^[1-3]。已有研究表明,调亏灌溉可减小桃、梨和苹果树的叶水势并抑制营养生长^[1,4-5];提高枇杷、葡萄和柑橘树的灌溉水利用效率,改善果实品质,提高果实的经济价值^[6-8]。

灌溉方式影响根区土壤水分分布,进而影响植物的根系生长。STEVENS等^[9]研究表明,滴灌使葡萄根系集中分布于滴灌管附近,而微喷的根系则在种植区域内分布较均匀。LEVIN等^[10]和RUIZ-SÁNCHEZ等^[11]对苹果树和杏树的研究也表明距灌水器越近根系数量越多。水资源短缺已逐渐成为制约干旱半干旱地区农业可持续发展的一个重要因素,越来越多的果园开始采用微灌节水技术。因此,评价灌溉方式转变对果树根系分布的影响具有重要意义。

灌溉制度影响土壤剖面的水分分布,从而影响根系密度及根系生长深度^[12],通常土壤水分亏缺会限制根系生长^[13-14]。已有研究表明,土壤水分胁迫会降低马铃薯与冬小麦根系密度^[15-16];与地下部分的营养生长相比,土壤水分胁迫可更有效地抑制枝条生长,导致作物在土壤水分胁迫期间具有较大的根/枝比^[13,17-18]。目前,在果树新梢生长缓慢甚至停滞期,水分胁迫对果树根系生长的影响规律尚不明确,相关的研究报道也较少。

梨树生长可分为3个生育期,即细胞分裂期、果实缓慢膨大期与果实快速膨大期^[19]。调亏灌溉对梨树生长影响的研究结果表明,果实缓慢膨大期施加水分胁迫能有效限制梨树营养生长,增加或保持果实产量^[2,4,20-24]。武阳等^[25]的研究表明,库尔勒香梨树新梢生长在细胞分裂期结束时基本停止。然而,调亏灌溉对梨树根系生长的影响及其对枝条生长和果实产量的影响报道较少。

土壤水分是影响果树生长的关键因素^[11],探索根系的吸水规律对提高水分利用效率具有重要意义^[26-32]。本文通过田间试验研究枝条和果实生长缓慢期施加水分胁迫、果实快速膨大期恢复充分灌溉以及灌溉方式的转变对成龄库尔勒香梨根系重新分布的影响,以及根系分布对梨树生长及果实产量的影响。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2009—2010年在新疆库尔勒市(41°43'N、

86°06'E)进行。试验区属极度干旱地区,多年平均降水量为50 mm,多年平均蒸发量为1 600 mm。试验期间,2009、2010年的蒸发量分别为800、773 mm(美国A级蒸发皿测量),降水量分别为21.2、24 mm。试验果园的土壤为砂质壤土,其中粉粒质量分数为50.36%,黏粒质量分数为5.55%,砂粒质量分数为44.09%;平均土壤容重(0~1.5 m)为1.5 g/cm³,田间持水率为36.7%(体积含水率)。试材为24 a生成龄香梨树,株行距为5 m×6 m。

1.2 试验设计

试验包括1个漫灌处理和3个滴灌处理。滴灌处理包括轻度与重度水分胁迫处理,分别在果实缓慢膨大期(5月中旬—7月初)按蒸发量的60%与40%进行灌溉,在细胞分裂期(4月中旬—5月中旬)及果实快速膨大期(7月初—果实收获)按蒸发量的80%进行灌溉;以及充分灌溉处理(对照),全生育期按蒸发量的80%进行灌溉。漫灌处理与滴灌处理之间由8行滴灌梨树隔离。漫灌处理根据当地农民灌水经验进行灌溉,即4—8月份每月进行一次漫灌,灌水定额为300 mm。2009年以前,滴灌处理的梨树采用漫灌模式灌溉,灌溉制度与漫灌处理相同;2009年试验开始后采用地表滴灌,每行树布置2条滴灌管,分别位于树行两侧距离树行1 m处。滴头间距50 cm、流量2.8 L/h。每7 d灌溉1次。试验采用完全随机重复布置,每个处理重复3次。

1.3 观测项目与方法

1.3.1 土壤水分与蒸发量

采用便携式土壤水分监测仪(Diviner2000型, Sentek Pty Ltd., 澳大利亚)观测土壤含水率。每个重复安装2个测管,分别位于滴灌管正下方及距树行2 m处,安装深度为1.5 m,每次灌溉前测量土壤剖面含水率。采用压力膜(1500型, Soil Moisture Equipment Corp.)测量果园土壤水分特征曲线,利用土壤水分特征曲线将体积含水率转换为土壤水势。采用美国A级蒸发皿测量蒸发量,每天20:00观测1次。

1.3.2 树体

每个重复选取1棵树(各处理3棵)进行吸收根系(直径小于1 mm)测量^[27,30,33]。滴灌根系取样分别于每年的7月初(水分胁迫结束后)及9月中旬(果实收获后)各进行1次。每棵树选取2个取样点,分别位于滴灌管正下方(滴灌湿润区内)及距树行2 m(非湿润区内)处(图1)。根系取样器内径为100 mm,取样深度达90 cm,分为3层:0~20 cm、20~60 cm及60~90 cm。漫灌处理于2010年9月中旬取样,取样位置和取样深度与滴灌处理相同。

根系取出后清除土壤及杂草,利用根系扫描仪(WinRHIZO)测量吸收根系长度,根长密度由根系总长除以对应土壤体积计算。

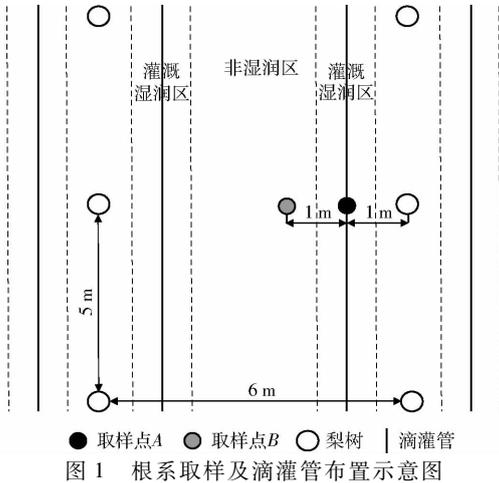


图1 根系取样及滴灌管布置示意图

Fig. 1 Sketch of root sampling and driplines layout

每个处理选取 60 个枝条,每 7 d 测量 1 次长度。所有处理每年夏天进行 1 次剪枝,分别测量和

记录剪枝鲜质量。9月中旬收获果实,每个处理选取 6 棵梨树,人工测量产量。

1.4 统计分析

采用 SPSS 16.0 对数据进行方差分析,均值差异采用 Tukey 检验,显著性检验水平为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 土壤水分

由于高灌水定额与低灌溉频率,漫灌处理的土壤水势波动幅度较大(图 2)。对于滴灌处理而言,水分胁迫期间,水分胁迫处理土壤水势持续下降,并于果实缓慢膨大期末达到最低值。对照处理的土壤水势一直维持在 -50 kPa 左右,表明梨树未受土壤水分胁迫。水分胁迫处理恢复充分灌水后,30 cm 深度的土壤水势逐渐恢复到 -50 kPa 左右(图 2)。非湿润区连续 2 a 未灌溉,土壤水势持续下降,各滴灌处理之间并无显著差异(图 3)。

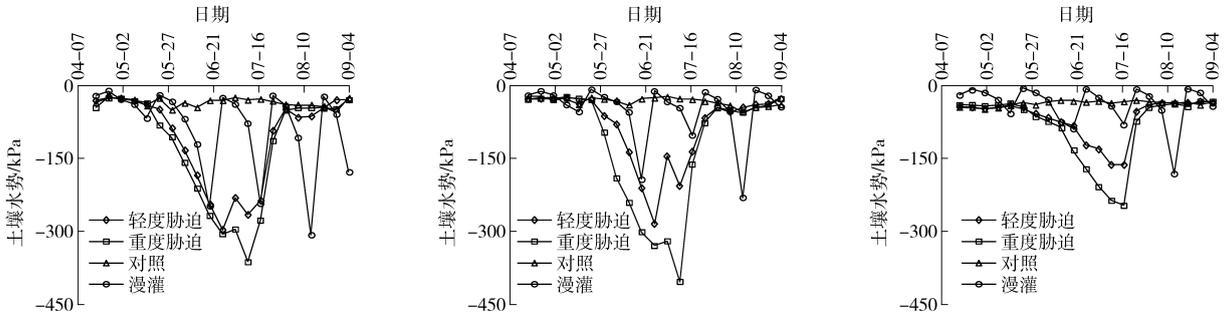


图2 2010年湿润区灌水前土壤水势变化

Fig. 2 Changes of soil water potential measured immediately before each irrigation event in irrigated zone in 2010

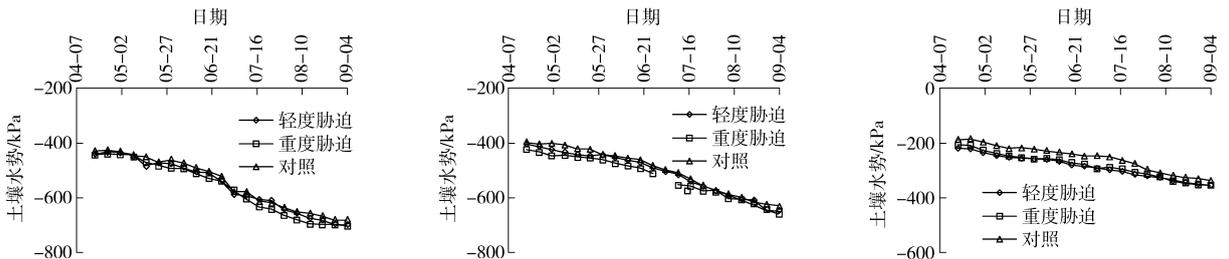


图3 2010年非湿润区灌水前土壤水势变化

Fig. 3 Changes of soil water potential measured immediately before each irrigation event in non-irrigated zone in 2010

2.2 漫灌与对照处理的吸收根系分布

漫灌处理的根长密度峰值出现在 20 ~ 60 cm 土层(表 1、2),且显著高于其他 2 层的根长密度 ($P < 0.05$),取样点 B 各土层的根长密度略高于取样点 A,但二者之间并无显著性差异。

与漫灌处理相比,2009 年对照处理滴灌湿润区根系显著增加(表 1),非湿润区内除 60 ~ 90 cm 土层的根系增加显著外,其他 2 层根长密度差异不显著(表 1)。2010 年对照处理滴灌湿润区内根长密度较 2009 年有所降低,但各土层内的根系与漫灌处

理之间并无显著性差异(0 ~ 20 cm 土层除外);在非湿润区内,土壤水分亏缺持续增加,对照处理的根长密度显著低于对应湿润区以及漫灌处理的根长密度(60 ~ 90 cm 土层除外)。

2.3 调亏灌溉处理梨树吸收根系分布

湿润区内,2009 年 7 月初,土壤水分胁迫结束后,水分胁迫处理 20 ~ 90 cm 的根长密度均低于对照处理,且重度水分胁迫处理与对照之间差异显著(表 2);果实收获(9月中旬)后,水分胁迫处理 20 ~ 90 cm 的根长密度显著提高($P < 0.05$),但与对照处

表1 取样点A(湿润区)与取样点B(非湿润区)漫灌处理(2010年)与对照处理(2009、2010年)

9月份吸收根系分布

Tab.1 Fine roots distribution of flood irrigated(2010) and control plots (2009 and 2010) in middle September in sample points A (irrigated zone) and B (non-irrigated zone)

根区	取样深度 /cm	吸收根系根长密度/(mm·cm ⁻³)		
		漫灌	对照	对照
		(2010年)	(2009年)	(2010年)
湿润区	0~20	2.1 ^b	3.38 ^a	3.12 ^a
	20~60	4.1 ^b	8.79 ^a	4.80 ^b
	60~90	2.3 ^b	5.42 ^a	2.52 ^b
非湿润区	0~20	2.2 ^a	3.26 ^a	0.58 ^b
	20~60	4.3 ^a	3.60 ^{ab}	3.19 ^b
	60~90	2.7 ^b	4.03 ^a	2.23 ^b

注:不同字母表示处理间存在显著性差异($P < 0.05$),下同。

表2 2009年与2010年滴灌处理湿润区内吸收根系根长密度

Tab.2 Fine roots length density in irrigated zone of drip irrigated plots in 2009 and 2010

年份	取样深度 /cm	取样时间	吸收根系根长密度/(mm·cm ⁻³)		
			轻度水分 胁迫处理	重度水分 胁迫处理	对照
2009	0~20	7月初	3.15 ^a	2.97 ^a	3.20 ^a
		9月中旬	3.78 ^a	3.59 ^a	3.38 ^a
	20~60	7月初	7.71 ^{ab}	6.90 ^b	8.66 ^a
		9月中旬	8.39 ^a	8.69 ^a	8.79 ^a
	60~90	7月初	3.76 ^b	3.72 ^b	5.13 ^a
		9月中旬	4.96 ^a	5.46 ^a	5.42 ^a
2010	0~20	7月初	2.96 ^a	2.93 ^a	3.07 ^a
		9月中旬	4.10 ^a	4.02 ^a	3.12 ^b
	20~60	7月初	4.21 ^{ab}	3.71 ^b	4.83 ^a
		9月中旬	8.10 ^a	8.24 ^a	4.80 ^b
	60~90	7月初	1.88 ^{ab}	1.49 ^b	2.18 ^a
		9月中旬	2.55 ^a	2.57 ^a	2.52 ^a

注:7月初为第1次取样,即土壤水分胁迫结束后;9月中旬为第2次取样,即果实收获后,下同。

理并无显著差异。2010年,水分胁迫处理在湿润区内根长密度的变化趋势与2009年相似,土壤水分胁迫使根长密度减小;但果实收获后,水分胁迫处理20~60cm的根长密度比对照提高了70%左右,轻度与重度水分胁迫处理的根长密度分别达到8.10、8.24mm/cm³。

非湿润区内,2009年除重度水分胁迫处理表层的根长密度在7月份急剧减小外(表3),各滴灌处理的根长密度并无显著差异。漫灌改为地表滴灌的第2年(2010年),各处理的根长密度在7月份和9月份均有所减小,以0~20cm土层最为明显,而20~60cm土层的根长密度则高于其他2层;与7月

份相比,各处理9月份的根长密度均有显著增加($P < 0.05$)。

表3 2009年与2010年滴灌处理非湿润区内吸收根系根长密度

Tab.3 Fine roots length density in non-irrigated zone of drip irrigated plots in 2009 and 2010

年份	取样深度 /cm	取样时间	吸收根系根长密度/(mm·cm ⁻³)		
			轻度水分 胁迫处理	重度水分 胁迫处理	对照
2009	0~20	7月初	3.08 ^a	1.49 ^b	2.81 ^a
		9月中旬	3.67 ^a	3.92 ^a	3.26 ^a
	20~60	7月初	3.26 ^a	3.46 ^a	2.87 ^a
		9月中旬	3.79 ^a	4.12 ^a	3.60 ^a
	60~90	7月初	4.75 ^a	4.57 ^a	4.04 ^a
		9月中旬	4.70 ^a	5.00 ^a	4.03 ^a
2010	0~20	7月初	0.31 ^a	0.31 ^a	0.41 ^a
		9月中旬	0.56 ^a	0.47 ^a	0.58 ^a
	20~60	7月初	1.81 ^b	2.01 ^b	2.96 ^a
		9月中旬	2.91 ^a	2.92 ^a	3.19 ^a
	60~90	7月初	0.99 ^b	0.86 ^b	1.45 ^a
		9月中旬	1.37 ^b	1.59 ^b	2.23 ^a

2.4 枝条生长、果实产量及其与根长密度的关系

与漫灌处理相比,滴灌处理的新梢长度与夏剪量明显减小(表4)。5月中旬前,梨树新梢生长较快,之后逐渐减缓直至停止生长。因此,试验处理的水分胁迫对梨树新梢最终长度的影响较小,仅2009年的重度水分胁迫处理与对照存在显著性差异,新梢最终长度与9月份吸收根系根长密度之间无显著相关关系(表5)。除2010年轻度水分胁迫处理外,其他水分胁迫处理的剪枝量则显著低于对照处理,这可能是由于徒长枝在5月中旬后仍有较大的生长量。7月份土壤水分胁迫结束时,吸收根系根长密度与新梢最终长度之间具有显著的相关关系,说明水分胁迫能同时抑制梨树地上及地下部分的营养生长(表5)。与其他处理相比,轻度土壤水分胁迫显著提高了果实产量,但其他处理之间差异不显著,果实产量与7月份及9月份根长密度之间的相关关系均不显著。

3 讨论

3.1 灌溉方式转变对吸收根系分布的影响

TANASESEU等^[34]和SOKALSKA等^[27]认为果树根系主要分布在地表土层,且随着深度的增加而逐渐减少。本研究结果表明梨树的吸收根系主要分布在20~60cm土层,这与ABRISQUETA等^[14]的结论相似。

试验梨园一直为漫灌,2009年试验开始后采用

表 4 各处理产量、新梢长度及剪枝量

Tab. 4 Yield, final shoot extension length and fresh weight of pruning

年份	处理	果实产量/ (t·hm ⁻²)	新梢最终 长度/cm	夏剪量/ (kg·株 ⁻¹)
2009	漫灌	18.5 ^b	36.8 ^a	8.5 ^a
	轻度胁迫	21.3 ^a	30.9 ^{bc}	5.7 ^c
	重度胁迫	17.0 ^b	30.1 ^c	4.9 ^d
	对照	18.6 ^b	32.4 ^b	6.3 ^b
2010	漫灌	19.3 ^b	35.4 ^a	8.8 ^a
	轻度胁迫	23.4 ^a	30.5 ^b	5.1 ^{bc}
	重度胁迫	19.2 ^b	30.0 ^b	4.8 ^c
	对照	19.8 ^b	31.3 ^b	5.5 ^b

表 5 吸收根系与地上部分生长参数间相关系数

Tab. 5 Spearman's correlation coefficient between aboveground growth parameters and root length density in 0 ~ 90 cm soil layer in irrigated zones of drip irrigated plots

年份	生长参数	湿润区根长密度	
		7 月份	9 月份
2009	产量	0.343 ^{ns}	-0.117 ^{ns}
	新梢最终长度	0.879 ^{**}	-0.033 ^{ns}
	夏剪量	0.753 [*]	-0.017 ^{ns}
2010	产量	0.250 ^{ns}	-0.100 ^{ns}
	新梢最终长度	0.917 ^{**}	-0.717 [*]
	夏剪量	0.817 ^{**}	-0.750 [*]

注: *、**分别表示水平在 $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 水平差异显著, ns 表示差异不显著。

地表滴灌。FERNÁNDEZ 等^[35]与 RUIZ-SÁNCHEZ 等^[11]的研究认为滴灌能促使果树根系向灌溉湿润区内集中。本研究结果表明,2009 年对照处理非湿润区内根长密度并未显著减小;在滴灌湿润区内,20~60 cm 与 60~90 cm 土层的根长密度分别较漫灌增加了 109% 与 136%。2010 年对照处理湿润区内根长密度较 2009 年有所降低,但与漫灌处理相比差异不显著。在非湿润区,2010 年对照处理 20~90 cm 的根长密度与漫灌处理相近,由于灌溉方式的转变,土壤非湿润区连续 2 a 未进行灌溉,表层 0~20 cm 处的根系显著减少。这表明成龄库尔勒香梨树由漫灌转为地表滴灌的第 1 年,通过增加吸收根系密度来适应灌溉方式的转变;而在第 2 年,滴灌湿润区内的根长密度则恢复到漫灌的水平。

3.2 水分胁迫及恢复充分灌溉对梨树吸收根系的影响

5 月中旬—7 月初为土壤水分胁迫时期,与对照相比,水分胁迫显著降低了灌溉湿润区内的根长密度。ABRISQUETA 等^[14,36]对桃树的研究也得出相似的结论。如表 2 所示,7 月初土壤水分胁迫结束

时,湿润区内 60~90 cm 土层根长密度与对照相比的减少量高于其他 2 层;BENJAMIN 等^[37]对豌豆的研究表明水分胁迫促进了深层根系(0.23 cm 以下)的生长,邵光成等^[38]和杨再强等^[39]对辣椒和番茄的研究也得出相似结论。成龄梨树的根系深度远大于 1 a 生的大田作物,土壤深层的透气性较差可能加重了土壤水分胁迫对深层根系生长的抑制。虽然轻度水分胁迫处理的根长密度在灌溉湿润区较重度水分胁迫处理大,但在水分胁迫期间,2 种水分胁迫处理的根长密度在湿润区及非湿润区均未表现出显著差异。

7 月中旬开始,各水分胁迫处理恢复充分灌溉直至果实收获。水分胁迫后的充分灌溉能促进果树根系的生长^[40]。对杏树的研究表明,调亏灌溉增加了滴头下方根系的干物质,尤其在地表下 40~60 cm 深度,根系干物质质量增加了 1 倍^[41]。MCCULLY^[42]对小麦、梨果仙人掌及黑麦草等作物的研究表明,干旱能导致亲本根顶端分生组织死亡或萎缩,通常也会诱发吸收根系根原基的发育,这些根原基具有一定的抗旱能力,重新灌水后,能迅速发育成根系,吸收水分和养分。本研究中,恢复充分灌溉能迅速促进水分胁迫处理湿润区内根系的生长,尤其是 20~60 cm 土层,2010 年 9 月份的根长密度较 7 月份提高了约 100%。这表明调亏灌溉能够像调节果树地上部分营养生长一样用来调节果树根系的生长。

3.3 梨树根系重分布对新梢生长及果实产量的影响

土壤水分胁迫能有效抑制果树地上及地下部分的营养生长,且能更加有效地抑制新梢的生长。承受水分胁迫的植物会首先保证根系生长^[43],具有更高的根/枝比^[17,41,44]。在本研究中,轻度与重度水分胁迫处理灌溉湿润区内根长密度较对照分别减小了 12.8% 与 21.1% (2009 年与 2010 年平均值),而新梢最终长度较对照仅分别减小了 3.7% 与 5.6% (2009 年与 2010 年平均值)。该结果表明在新梢生长的缓慢期施加土壤水分胁迫能更加有效地抑制梨树吸收根系的生长。果实缓慢膨大期,新梢生长基本停止,果实也处于缓慢生长期,该生育期的土壤水分胁迫不会对果实生长造成负面影响。

试验期间,虽然灌溉方式的转变使对照处理的梨树吸收根系分布经历了较大的转变,但对照处理与漫灌处理的果实产量并无显著差异(表 5)。相对对照而言,轻度水分胁迫灌溉显著地提高了果实产量,这与雷廷武等^[22]和 CHARMERS 等^[4]的研究结果一致。以往的研究表明,吸收根系的分布受土壤水分的影响,同时又影响果树的果实产量^[34];更多

数量的吸收根系会得到更高的果实产量^[22]。TANASESCU 等^[32]的研究也表明苹果树最终的产量与活性根系横截面面积呈线性关系。在本研究中,虽然水分胁迫处理在恢复充分灌溉后根长密度显著增加(表2),但根长密度与最终产量之间并无显著的相关关系(表5)。2010年果实收获后,水分胁迫处理在湿润区内的根长密度显著高于其在7月份及对照处理的根长密度,而仅有轻度水分胁迫处理的产量显著高于其他处理。这表明轻度水分胁迫对梨树根系生长的抑制及其后恢复充分供水对根系生长的促进能有效保证果实的生长,而重度的水分胁迫则不具备此效应。经受水分胁迫的梨树复水后,吸收根系快速生长,从而吸收水分及养分以保证地上部分的生长;而遭受重度水分胁迫的植物可能在复水后短期内无法完全恢复根系的吸收能力^[17,45];这可能对果实生长造成一定的负面影响。汪妮娜等^[46]对水稻的研究也表明,水分胁迫后恢

复供水虽然能促进根系发育,但并不能保证产量的提高。

4 结论

(1) 成龄库尔勒香梨树的吸收根系主要分布在距地表 20~60 cm 深度土层内,且易受灌溉方式及灌溉制度的影响。灌溉方式由漫灌改为地表滴灌以后,滴灌湿润区内的梨树吸收根系有所增加。成龄香梨树需要 2 a 时间调整吸收根系的分布状况来适应灌溉方式的转变。

(2) 果实缓慢膨大期梨树新梢生长缓慢,与新梢相比,该阶段的土壤水分胁迫能更为有效地抑制吸收根系的生长,其后恢复充分灌水能有效促进吸收根系生长。梨树果实产量与吸收根系的长度并没有显著的相关性。水分胁迫及其后的复水能有效促进根系生长,但重度的水分胁迫仍会对果实生长产生不利影响。

参 考 文 献

- 1 CHALMERS D J, MITCHELL P D, VAN HECK L. Control of peach tree growth and productivity by regulated water supply, tree density, and summer pruning [J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 1981, 106(3):307-312.
- 2 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.
- 3 TOGNETTI R, D'ANDRIA R, MORELLI G, et al. The effect of deficit irrigation on seasonal variations of plant water use in *Olea europaea* L. [J]. *Plant and Soil*, 2005, 273(1-2): 139-155.
- 4 CHALMERS D J, BURGER 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.
- 5 MILLS T M, BEHBOUNDIAN 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.
- 6 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.
- 7 HUESO J J, CUEVAS J. Ten consecutive years of regulated deficit irrigation probe the sustainability and profitability of this water saving strategy in loquat[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(5): 645-650.
- 8 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.
- 9 STEVENS R M, DOUGLAS T. Distribution of grapevine roots and salt under drip and full-ground cover microjet irrigation systems [J]. *Irrigation Science*, 1994, 15(4):147-152.
- 10 LEVIN I, ASSAF R, BRAVDO B. Soil moisture and root distribution and an apple orchard irrigated by tricklers [J]. *Plant and Soil*, 1979, 52(1): 31-40.
- 11 RUIZ-SÁNCHEZ M C, PLANA V, ORTUÑO M F, et al. Spatial root distribution of apricot trees in different soil tillage practices [J]. *Plant and Soil*, 2005, 272(1-2): 211-221.
- 12 TRIPATHI R P, MISHRA R K. Wheat root growth and seasonal water use as affected by irrigation under shallow water table conditions [J]. *Plant and Soil*, 1986, 92(2): 181-188.
- 13 STEINBERG S L, MILLER J C, MCFARLAND M J. Dry matter partitioning and vegetative growth of young peach trees under water stress [J]. *Australian Journal of Plant Physiology*, 1990, 17(1): 23-36.
- 14 ABRISQUETA J M, MOUNZER O, ÁLVAREZ S, et al. Root dynamics of peach trees submitted to partial rootzone drying and continuous deficit irrigation [J]. *Agricultural Water Management*, 2008, 95(8): 959-967.
- 15 LI F, LIU X, LI S. Effects of early soil water distribution on the dry matter partition between roots and shoots of winter wheat [J]. *Agricultural Water Management*, 2001, 49(3): 163-171.
- 16 AHMADI S H, PLAUBORG F, ANDERSEN M N, et al. Effects of irrigation strategies and soils on field grown potatoes: root distribution [J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 98(8): 1280-1290.

- 17 KRAMER P J, BOYER J S. Water relations of plants and soils [M]. San Diego: Academic Press, 1995: 145 - 147.
- 18 KULKARNI M, PHALKE S. Evaluating variability of root size system and its constitutive traits in hot pepper (*Capsicum annuum* L.) under water stress [J]. *Scientia Horticulturae*, 2009, 120(2): 159 - 166.
- 19 JACKSON J E. Biology of apples and pears [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003: 307.
- 20 BEHBOUNDIAN M H, LAWES G S, GRIFFITHS K M. The influence of water deficit on water relations, photosynthesis and fruit growth in Asian pear (*Pyrus serotina* Rehd.) [J]. *Scientia Horticulturae*, 1994, 60(1-2): 89 - 99.
- 21 CASPARI H W, BEHBOUNDIAN 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, 19(3): 383 - 388.
- 22 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 CSAE*, 1991, 7(5): 63 - 69. (in Chinese)
- 23 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 CSAE*, 2006, 22(1): 37 - 43. (in Chinese)
- 24 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)
- 25 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 CSAE*, 2012, 28(11): 118 - 124. (in Chinese)
- 26 GONG D, KANG S, ZHANG L, et al. A two-dimensional model of root water uptake for single apple tree and its verification with sap flow and soil water content measurements [J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 83(1-2): 119 - 129.
- 27 SOKALSKA D I, HAMAN D Z, SZEWEZUK A, et al. Spatial root distribution of mature apple trees under drip irrigation system [J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(6): 917 - 924.
- 28 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. 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. (in Chinese)
- 29 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)
- 30 孙三民, 安巧霞, 杨培岭, 等. 间接地下滴灌灌溉深度对枣树根系和水分的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(8): 81 - 90. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160812&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.08.012. SUN Sanmin, AN Qiaoxia, YANG Peiling, et al. Effect of irrigation depth on root distribution and water use efficiency of jujube under indirect subsurface drip irrigation[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(8): 81 - 90. (in Chinese)
- 31 卫新东, 汪星, 汪有科, 等. 黄土丘陵区红枣经济林根系分布与土壤水分关系研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(4): 88 - 97. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150414&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.04.014. WEI Xindong, WANG Xing, WANG Youke, et al. Root distribution and soil water dynamics of jujube plantations in loss hilly regions[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(4): 88 - 97. (in Chinese)
- 32 PERSSON H, FIRCKS Y V, MAJDI H, et al. Root distribution in a Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) stand subjected to drought and ammonium-sulphate application [J]. *Plant and Soil*, 1995, 169(1): 161 - 165.
- 33 WONISCH A, TAUSZ M, MÜLLER M, et al. Treatment of young spruce shoots with SO₂ and H₂S: effects on fine root chromosomes in relation to changes in the thiol content and redox state [J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 1999, 116(1-2): 423 - 428.
- 34 TANASESEU N, PALTINEANU C. Root distribution of apple tree under various irrigation systems within the hilly region of Romania [J]. *International Agrophysics*, 2004, 18(2): 175 - 180.
- 35 FERNÁNDEZ J E, MORENO F, CABRERA F, et al. Drip irrigation, soil characteristics and the root distribution and root activity of olive trees [J]. *Plant and Soil*, 1991, 133(2): 239 - 251.
- 36 ABRISQUETA J M, HEMNANSAEZ A, FRANCO J A. Root dynamics of young almond tree under different drip irrigation rates [J]. *Journal of Horticultural Science*, 1994, 69(2): 237 - 242.
- 37 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.

- 16 李英玉, 赵坚, 吕辉, 等. 河岸带潜流层温度示踪流速计算方法[J]. 水科学进展, 2016, 27(3): 423-429.
LI Yingyu, ZHAO Jian, LÜ Hui, et al. Investigation on temperature tracer method calculated flow rate of hyporheic layer in riparian zone[J]. *Advances in Water Science*, 2016, 27(3): 423-429. (in Chinese)
- 17 吴志伟, 宋汉周. 地下水温度示踪理论与方法研究进展[J]. 水科学进展, 2011, 22(5): 733-740.
WU Zhiwei, SONG Hanzhou. Temperature as a groundwater tracer; advances in theory and methodology[J]. *Advances in Water Science*, 2011, 22(5): 733-740. (in Chinese)
- 18 林晶晶, 马瑞, 孙自永, 等. 河水与地下水作用带内井中流对温度示踪结果影响的实验研究[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(5): 14-21.
LIN Jingjing, MA Rui, SUN Ziyong, et al. Laboratory investigation on the effect of the intraborehole flow in fully-screened well on the temperature change during tracing river and groundwater interaction[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2015, 42(5): 14-21. (in Chinese)
- 19 KIPP K L. HST3D: a computer code for simulation of heat and solute transport in three-dimensional ground water systems[R]. USGS Water Resources Investigations Report 86-4095, 1987.
- 20 CONSTANTZ J, COX M H, SU G W. Comparison of heat and bromide as ground water tracers near streams[J]. *Ground Water*, 2003, 41(5): 647-656.
- 21 NISWONGER R, RUPP J L. Monte Carlo analysis of streambed seepage rates[C]//Proceedings of the American Water Resources Association, International Conference on Riparian Ecology and Management in Multi-land Use Watersheds, 2000: 161-166.
- 22 CONSTANTZ J. Heat as a tracer to determine streambed water exchanges[J]. *Water Resources Research*, 2008, 44(4): 117-128.
- 23 COX M H, SU G W, CONSTANTZ J. Heat, chloride, and specific conductance as ground water tracers near streams[J]. *Ground Water*, 2007, 45(2): 187-195.
-

(上接第 250 页)

- 38 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)
- 39 杨再强, 邱译莹, 刘朝霞, 等. 土壤水分胁迫对设施番茄根系及地上部生长的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(3): 748-757.
YANG Zaiqiang, QIU Yixuan, LIU Zhaoxia, et al. The effects of soil moisture stress on the growth of root and above-ground parts of greenhouse tomato crops [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(3): 748-757. (in Chinese)
- 40 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)
- 41 ROMERO P, BOTIA P, GARCIA F. Effects of regulated deficit irrigation under subsurface drip irrigation conditions on vegetative development and yield of mature almond trees [J]. *Plant and Soil*, 2004, 260(1-2): 169-181.
- 42 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.
- 43 HUANG B, FRY J D. Root anatomical, physiological and morphological responses to drought stress for tall Fescue cultivars [J]. *Crop Science*, 1998, 38(4): 1017-1022.
- 44 聂伟燕, 赵尊练, 夏云飞, 等. 水分胁迫对线辣椒根系生长及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(4): 30-32.
NIE Weiyan, ZHAO Zunlian, XIA Yunfei, et al. Effects of water stress on root growth and yield of line pepper [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014, 32(4): 30-32. (in Chinese)
- 45 MORENO F, FERNÁNDEZ J E, CLOTHIER B E, et al. Transpiration and root water uptake by olive trees [J]. *Plant and Soil*, 1996, 184(1): 85-96.
- 46 汪妮娜, 黄敏, 陈德威, 等. 不同生育期水分胁迫对水稻根系生长及产量的影响[J]. 热带作物学报, 2013, 34(9): 1650-1656.
WANG Ni'na, HUANG Min, CHEN Dewei, et al. Effects of water stress on root and yield of rice at different growth stages[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2013, 34(9): 1650-1656. (in Chinese)