

文章编号: 100226819(2001)0320015209

地下水位较高条件下不同根区湿润方式对梨树根与茎液流及其水分平衡的影响

康绍忠¹, 胡笑涛¹, Ian Goodwin², Peter Jerie²

(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, 杨凌 712100; 2. 澳大利亚持续灌溉农业研究所)

摘要: 为了探讨地下水位较高条件下根区湿润方式对梨树根和茎液流及水分平衡的影响, 开展了较系统的试验研究。试验共设三种处理, 即传统畦灌(CFI), 部分根干燥灌溉(PRD)和分根区交替灌溉(ARDI), 分别使用土壤水分监测系统(EnviroSCAN)和热脉冲探针监测土壤水分动态和梨树根和茎液流。结果表明在 PRD 和 ARDI 情况下湿润根区的根液流不仅大于干燥根区, 而且也大于 CFI 情况下的相同区域。复水后, ARDI 干燥区的根液流比 PRD 的恢复和提高快得多, 并且比 CFI 的大; ARDI 的茎液流比 CFI 的小, 但比 PRD 保持一侧根干燥时的大。在只有一侧根区灌溉时, ARDI 和 PRD 的日耗水量比 CFI 的小。ARDI 和 PRD 中湿润侧的根系具有水分吸收补偿效应, 当干燥根区复水后能够提高水分的吸收能力, 其程度与根区持续干燥的时间长短有关。逐日根液流与参考作物蒸发蒸腾量关系密切, 但随着表面灌溉方式和湿润根区的不同这些关系明显的不一样。逐日茎液流与参考作物蒸发蒸腾量有关, 而且在不同的表面灌溉方式下, 土壤含水率相同时茎液流和参考作物蒸发蒸腾量的比率不同。与 CFI 相比, ARDI 和 PRD 大约少用 50% 的灌溉水量, 但是梨树的水分消耗量和茎液流并没减少相同的比例。表面湿润方式对水量平衡和液流的作用明显受到地下水水位的影响。在 ARDI 和 PRD 条件下的地下水利用量比 CFI 条件下有明显增加。

关键词: 液流; 水量平衡; 地下水位; 部分根干燥; 梨树

中图分类号: S275.3; S365 **文献标识码:** A

充足的水分和养分供给是保证农业生产的基本条件。近年来水资源紧缺正逐渐成为一个严重的世界性问题, 所以提高水分利用效率变得非常重要。许多研究表明: 调亏灌溉(RDI)、分根区交替灌溉(ARDI)和部分根干燥(PRD)等新的灌水技术可以明显提高作物和果树的水分利用效率^[1~8]。PRD 是作物在生长期一半根区保持充分灌溉, 而另一半根区保持干燥较长一段时间; ARDI 是作物生长期根区两侧交替灌溉。与传统灌溉方式相比, 这些技术可以大量减少灌溉水量, 降低蒸腾而作物产量却没有降低。很多研究结论表明 ARDI 和 PRD 可以提高大部分作物和果树的水分利用效率^[3, 4, 7, 9~12]。但是这方面的研究主要集中在作物产量、水分消耗和水分利用率上, 对于在该条件下的水分平衡、根液流和茎液流及根系的水分吸收能力的研究还少有报道。

关于部分根干燥(或部分根湿润, 固定根区灌

溉)时根液流和水分吸收已有一些研究成果^[13~15]。Tan 和 Buttery(1982)^[16]发现仅在一侧根区供水时可以充分满足梨树的水分需求; Ponj 等(1992)^[17]对苹果、葡萄、桃树、梨树用分根试验也得到类似的结论。但是这些结果只是在滴灌的条件下固定根区湿润或干燥时所得到的, 没有考虑地下水的影响, 而且在不同的气候、土壤、地下水位、果树种类和灌溉制度条件下, 这些结论不能直接应用于其它地区。特别是在分根交替干燥和湿润时, 与固定根区干燥情况下相比根系吸水能力的补偿效应明显提高。地面灌溉和滴灌相比土壤水分运动不同, 地下水位和根区毛细管吸水的作用也会影响土壤水分的分布和平衡、根系吸水能力及茎液流。

为提高灌溉水利用率, 针对地下水位较高条件下, 不同地表湿润方式对根液流(不同侧的根区)和茎液流、水分平衡的影响进行研究是有必要的。

为探索在地下水位较高的条件下, 不同的表面湿润方式对梨树的液流、根系水分吸收能力、土壤水分动态和根区水分平衡的作用而开展了本试验。试图通过研究在地下水位较高条件下 PRD、ARDI 和

收稿日期: 2000212226

基金项目: 国家自然科学基金(49725102, 39870478)和 G1999011708 项目, 澳大利亚 ACIRA 项目

康绍忠, 教授, 博士生导师, 院长, 杨凌 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 712100

传统的整个根区灌溉方式下根液流、茎液流、根系水分吸收、耗水量和水分平衡的变化状况,为有效的灌溉管理提供可靠的基础。

1 材料和方法

1999 年 11 月~2000 年 4 月,试验在澳大利亚维多利亚州 Tatura 附近 Nethersole 的 Packham 梨园(东径 145°16', 南纬 40°26') 进行。该地区属半干旱气候,年降水量 487 mm,地下水埋深 1.5~1.8 m,土质为粘壤土,中等透水性,有机质含量中等,土壤剖面上层 110 cm 的平均田间持水率 0.415 cm^3/cm^3 ,容重约 1.5 g/cm^3 。

所有试验小区耕作、施肥、病虫害防治处理均相同。试验小区随机分布,设 4 个重复。梨树株距 3.1 m,行距 5.8 m。试验采用地面灌溉,设计了三种湿润方式,即传统畦灌(CFI)、部分根区干燥灌溉(PRD)、分根区交替灌溉(ARDI)。果树生长期内灌水 5 次,分别安排在 1999 年 11 月 27 日、12 月 6 日和 2000 年 1 月 7 日、1 月 30 日、3 月 20 日。灌溉水量由每次灌溉前后测得的土壤含水率确定。果树耗水量由水量平衡方程估算,地下水补给量用定位通量法计算。每个处理中,在树体大小相近的一块区域中选取三棵树,树龄约 40 年,树冠高约 5 m、宽 3 m。开始试验前,靠近茎干底部距树约 0.3 m、与树干成对称分布挖两个小洞,露出 0.15 m 深处的一条表层根(根和树干的直径如表 1 所示),用于安装监测液流的热脉冲探针。这些探针用绝热箔纸包裹,防止由于温度变化所产生的影响。然后将土回填在探针周围,以最大限度减少对根系的伤害。

表 1 三种处理监测液流的梨树根和茎的直径

Table 1 Average trunk and root diameters of the pear trees monitoring sap flow in three surface wetting patterns

处理	茎直径/mm	根直径/mm	
		西侧	东侧
CFI	299.21	88.10	88.90
ARDI	284.89	100.44	64.29
PRD	313.54	74.74	80.34

茎液流和根液流使用补偿式脉冲技术测量^[18,19]。液流速率是根据运动的液流传送的一种短暂热脉冲确定的速度来测得。每套热脉冲探针由一个热脉冲发射探针和两个传感探针组成,传感探针直径 1.8~2.0 mm,安装在沿树干方向的两个平行钻孔中,一个传感探针(上行流探针)置于热脉冲发

射探针以下 5 mm 处,另一个(下行流探针)置于其上 10 mm 处。短脉冲周期性地由热脉冲发射探针发出,传感探针则不断地监测每一个和液流一起流动的脉冲速度。在距地表约 0.4 m 的树干上沿径向的两个平行的钻孔中安装两个热脉冲探针(SF100)。根据仪器生产厂家提供的使用手册的计算程序,可以计算出液流速度。使用同样的程序和仪器可以测量出根液流速率。分别在干燥和湿润根区的两个根上安装热脉冲探针,每 30 min 记录一次热脉冲值。在同一地区,根据测量的树的直径、树皮厚度、木质部尺寸,校正根液流、茎液流数据,用来比较在不同地面湿润方式下的相对差异。

在 ARDI、PRD 和 CFI 三种处理小区分别安装了土壤水分监测系统(EnviroSCAN),用于连续记录土壤水分动态。EnviroSCAN 通过测量土壤的介电常数来确定土壤含水率。EnviroSCAN 从地表至 100 cm 深每隔 20 cm 安置有一个传感器,在每个处理距中心线东西 50 cm 和 150 cm 处安装 4 个测管。

气象数据由位于试验区大约 12 km 的 Tatura 的一个标准气象站提供,测量参数包括:气温、空气湿度、2 m 高处风速、降水和辐射、A 级蒸发皿的蒸发量。

果实收获前,在每个小区的土壤水分测量仪器附近选取八棵树作为样本测产,记录果实大小、平均单果重、每棵树的果实数量和总产量。

2 结果与分析

2.1 土壤水分特征

气象记录表明该地区冬季和早春有 206.9 mm 的降水,梨树在这个时期的耗水量不大,所以在开始试验时根区土壤含水量较高,0~100 cm 土壤平均初始含水率约为 0.38~0.40 cm^3/cm^3 (图 1 所示)。经过 4 周水分消耗,表层土壤含水率降至约 0.28 cm^3/cm^3 。在试验开始后的前 26 d 里,所在的处理中梨树不同根区观测得到水分吸收速率相近。第一次灌溉时,CFI 处理的小区梨树两侧都灌水,PRD 处理的仅灌西侧根区,ARDI 处理的灌区东侧的根区。三种湿润方式灌水后产生了不同的土壤水分分布状况,PRD 和 ARDI 处理与 CFI 中有明显的不同。结果表明在 ARDI 和 PRD 中根区两侧的土壤水分到下一次灌溉一直保持差异,在灌水的一侧具有较高的土壤含水率。梨树根区的土壤水分分布特征允许另一半根系一直生长在干燥土壤中。CFI 处理中整

个根区的平均土壤含水率明显高于ARD I和PRD, CFI处理。在PRD 处理中干燥一侧复水时土壤含水率很接近

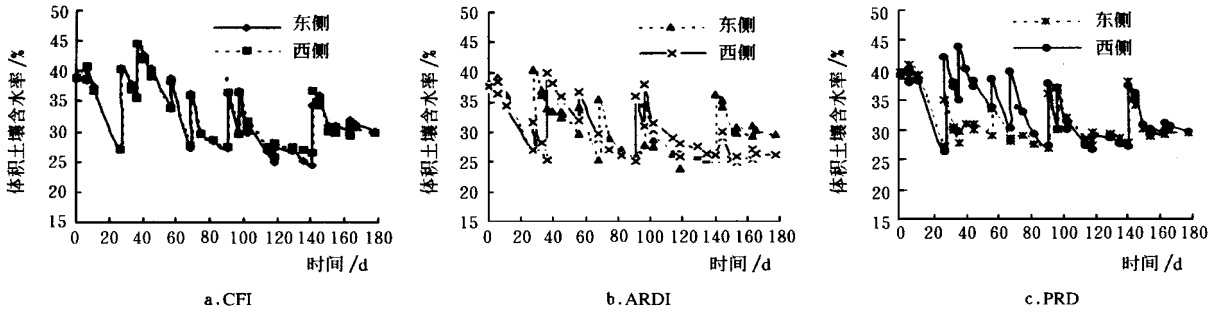


图 1 三种处理土壤含水率随时间(试验开始后天数)的变化

Fig 1 Rainfall and pan evaporation of Class A variation during pear fruit growing season

果树生育期土壤剖面平均含水率曲线如图 2 所示。对于传统的畦灌(CFI), 在 60 cm 深处有明显的下渗锋面, 锋面以上土壤含水率达到最大值。对于ARD I处理, 土壤水分分布接近线性分布, 每次灌水前后上层土壤含水率比深层要小, 在根区存在一个自下而上逐渐增大的土壤含水率梯度, 这说明在梨树生长季节, 土壤中 110 cm 以下深处的根区有向上的水分运动。在PRD 处理中当保持根区一侧干燥期间, 有类似于ARD I处理中的土壤水分分布剖面。这些结果表明ARD I和PRD 比CFI在根区保持灌溉水和减少深层渗漏方面效果更好, 而且也提高了灌溉水利用率。

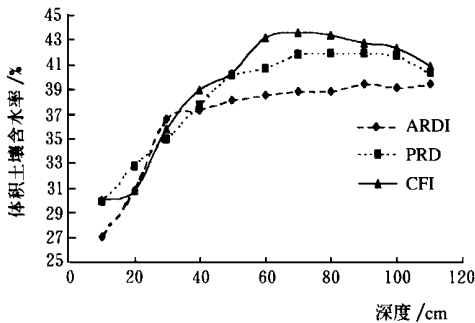


图 2 不同处理土壤剖面平均含水率曲线

Fig 2 Variation of volumetric soil water content of different sides in rootzone for different surface wetting patterns

2.2 水分吸收和耗水量

表 2 列出了不同处理用EnviorSCAN 测出的根区东侧和西侧的水分吸收率。在试验开始的前 26 d (第一阶段), 三种处理根区两侧的水分吸收无明显

不同, 因为两侧土壤含水量无明显差异。在PRD 处理中, 试验开始后的 27~ 89 d, 干燥一侧吸收水分占湿润一侧吸收水分的平均比例为 50.6%。ARD I处理中, 每次灌溉期间干燥一侧吸收的水分占湿润一侧的平均比例为 55.8%, 但在整个试验过程中东侧、西侧总的吸收水量分别为 801.2 mm 和 815.1 mm。在CFI中, 由于两侧同时灌水, 所以从两侧吸收的水量无明显不同。在PRD 中, 为防止梨树生长季节中出现水分胁迫, 试验开始 90 d 后东侧也象西侧一样灌溉, 但是, 由于东侧在早期经过了长期的(63 d)干旱, 其水分吸收速率仅是西侧的 69.5%, 可能是因为干燥期间根系吸水能力下降, 复水后仅有部分根恢复了吸水能力而造成的。

与CFI相比, PRD 和ARD I中干燥一侧根系吸收水分速率大大降低, 但湿润一侧则大大增加。在PRD 和ARD I中, 湿润一侧明显出现根系吸水的补偿效应, 吸收水分速率与CFI同侧相比分别增加了 18% 和 22%, 而干燥侧平均水分吸收降低 40.0% 和 34.7%。ARD I中整个根区的水分吸收比CFI少, 在 90 d 后即使东侧复水, ARDI和PRD 之间的水分吸收无明显不同。这表明ARD I处理比PRD 处理中根系存在更大的补偿效应。

果树耗水量早期较小, 中后期大, 收获时再次减小。水分吸收的高峰期在试验开始后的第 90~ 99 d, 即 1 月 29 日至 2 月 6 日, 在此期间CFI、PRD 和ARD I的日平均耗水量分别为 7.53, 7.92 和 7.33 mm/d。梨树生长季节的这种耗水规律与气候因素、树的需水量、根区土壤含水率及根区湿润方式有关。PRD 在前 3 次灌溉中因为只有西侧灌溉, 所以平均

日耗水量比CFI要小,但由于第4次东侧也进行了灌溉所以比CFI大。一般来说ARDI比CFI耗水量要小,只是在有降雨的特殊阶段(如第100~139 d)稍大一些。这些结果也说明在PRD和ARDI中干燥部分的根区在经过长期水分胁迫复水后,其耗水量大于CFI处理,可能是因为产生了补偿效应,使根系吸水能力提高了。

表2 三种处理的不同根区水分消耗实测值

Table 2 Root water flow and trunk water flow of pear trees in an orchard under three irrigation methods

处理	试验开始 后天数 α d	梨树需水量 \bar{Q}_{mm}		梨园耗水量 \bar{Q}_{mm}		
		西侧	东侧	西侧	东侧	每天平均
CFI	0~26	55.1 ^a	55.1 ^a	123.7	114.2	4.58
	27~35	96.8	96.8	52.6	48.9	5.64
	36~66	98.6	98.6	202.6	415.8	6.75
	67~89	78.4	78.4	169.1	164.5	7.25
	90~99	90.7	90.7	71.6	79.1	7.53
	100~139	68.8 ^a	68.8 ^a	128.4	126.5	3.19
	140~178	99.6	99.6	97.2	101.3	2.54
	0~178	464.1 ^b	464.1 ^b	845.2	850.3	4.76
PRD	0~26	55.1 ^a	55.1 ^a	122.4	117.9	4.62
	27~35	100.4	0	57.9	26.3	4.68
	36~66	99.3	0	253.2	128.4	6.16
	67~89	96.7	0	189.4	98.8	6.27
	90~99	89.1	102.2	87.6	70.7	7.92
	100~139	68.8 ^a	68.8 ^a	144.8	119.5	3.30
	140~178	94.3	101.4	102.7	104.2	2.65
	0~178	479.8 ^b	203.6 ^b	958.0	665.8	4.56
ARDI	0~26	55.1 ^a	55.1 ^a	120.6	118.5	4.60
	27~35	0	105.9	30.9	60.4	5.07
	36~66	106.1	0	248.2	135.5	6.19
	67~89	0	96.3	116.9	191.3	6.70
	90~99	101.2	0	96.4	50.1	7.33
	100~139	68.8 ^a	68.8 ^a	120.8	137.2	3.23
	140~178	0	112.4	67.4	122.1	2.43
	0~178	207.3 ^b	314.6 ^b	801.2	815.1	4.54

注:灌溉日期分别是1999年10月27日、11月6日,2000年1月7日、1月30日、3月20日;标注a表示降雨量,该时期没有灌溉;标注b表示灌溉水的利用量,不包括利用的降雨量。

上述结果可能是由于在PRD和ARDI中根系水力传导度和生长变化引起的。康绍忠等(1997,1999)^[6,11]发现经过干燥锻炼的根系复水后水力传导度大幅度提高。Liang等(1996)^[20]也提出干燥根系复水后会刺激次生根的生长。Green等(1995,1997)^[13,14]通过局部灌溉试验,也发现果树根系在局部湿润区内的吸水能力要比传统的整个根区灌溉

的大得多。根系能够迅速地改变吸水方式,使其在那些可以获得水分的区域更好地吸收。而在整个根区充分供水时,先前干燥土壤中活动较弱的根系很快恢复它们的能力。新生根系旺盛生长的活力可能是引起这一现象的原因所在。

2.3 根液流

三种根区湿润方式下两侧根区的根液流如表3所示。CFI处理中两侧平均根液流很相近。在PRD和ARDI中湿润侧的根液流远大于干燥侧。PRD处理中一侧干燥时,湿润侧根液流是干燥侧的190.19%,是CFI同侧的121.29%,而干燥侧根液流仅是CFI同侧的63.64%。PRD东侧的根液流一直比西侧小,也比CFI东侧小,但是东侧复水50 d后(第140~178 d)比CFI同侧大。在ARDI中,湿润侧根液流量是干侧的175.32%,是CFI同侧的114.52%,而干侧液流是CFI同侧的65.31%。这些比例与EnviroSCAN测到的湿润区根系水分吸收增加的速率是一致的。在ARDI中,干侧根系经历较短时间的干旱处理复水后,根液流能够迅速恢复和提高,而PRD中干燥侧必须复水相当长一段时间以后,根系吸水能力才能恢复和提高。

果树生长季节根液流的变化规律与耗水量相似,而且其峰值也出现在试验后第90~99 d。图3是第140~152 d期间,三种湿润方式下根区两侧根液流的日变化,第141 d进行了灌溉,PRD、CFI两侧均灌,ARDI仅灌东侧。此次灌溉之前在第91 d时进行过灌溉,PRD与CFI灌两侧,但ARDI仅灌西侧。西侧的液流如图4a所示。从图4a可以看出灌前ARDI西侧液流稍小一些,这是因为灌溉水量小,土壤含水率低,本次没有灌溉,所以其值也比PRD和CFI同侧低。第148 d降雨以后,ARDI的液流接近其它处理。ARDI东侧液流在141 d比PRD和CFI小,但灌后的液流迅速增加,也比CFI和PRD同侧(灌溉侧)明显大得多,这种现象持续了10多天,这是因为根系吸水的补偿效应而造成的。ARDI东侧(灌溉侧)的液流比西侧大。PRD在原干燥区东侧复水两次后液流恢复到与CFI接近的水平,但仍比该处理西侧的小。根液流的峰值和随时间的变化有很大的差异,这与气象因素的变化有关。第148 d较低的峰值是由于降雨引起的。

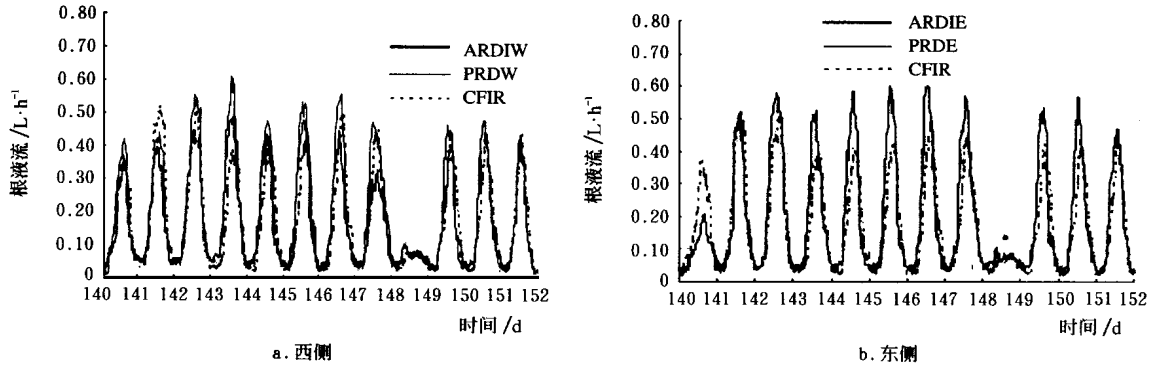


图 3 第 140~ 152 d 期间, 三种湿润方式下根区两侧根液流的日变化

Fig 3 The daily variations of root sap flow in different sides of rootzone for three surface wetting patterns

表 3 三种处理不同时间的根、茎液流实测值

Table 3 Root sap flow and trunk sap flow under three surface wetting patterns in a pear orchard

处理	试验开始后 天数/d	根液流				茎液流		
		总量 $\bar{\alpha}$		平均值 $\bar{\alpha} \cdot d^{-1}$		总量 $\bar{\alpha}$	平均值	
		西侧	东侧	西侧	东侧		$\bar{\alpha} \cdot d^{-1}$	$\bar{\alpha}_{mm} \cdot d^{-1}$
CFI	0~ 26	160.68	151.32	6.18	5.82	1704.82	65.57	3.65
	27~ 35	59.40	56.97	6.60	6.33	607.32	67.48	3.76
	36~ 66	211.11	218.55	6.81	7.05	2880.83	92.93	5.17
	67~ 89	164.34	159.27	7.14	6.93	2314.93	100.65	5.60
	90~ 99	81.42	78.93	8.13	7.89	1144.78	114.48	6.37
	100~ 139	236.25	228.99	5.91	5.73	2578.81	64.47	3.59
	140~ 178	202.41	197.73	5.19	5.07	1582.62	40.58	2.26
	0~ 178	1115.61	1091.76	6.27	6.12	12814.11	71.99	4.01
PRD	0~ 26	154.92	151.38	5.97	5.82	1581.06	60.81	3.39
	27~ 35	62.23	34.29	7.47	3.81	485.73	53.97	3.01
	36~ 66	269.70	129.27	8.70	4.17	2319.11	74.81	4.17
	67~ 89	190.50	113.16	8.28	4.92	1952.84	84.91	4.73
	90~ 99	88.86	75.90	8.88	7.59	1074.62	107.46	5.98
	100~ 139	247.23	210.33	6.18	5.25	2761.20	69.03	3.84
	140~ 178	204.75	211.77	5.25	5.43	1729.85	44.36	2.47
	0~ 178	1223.19	926.10	6.93	5.19	11904.41	66.88	3.72
ARDI	0~ 26	152.58	154.68	6.33	6.18	1598.48	61.48	3.42
	27~ 35	33.48	63.72	6.37	7.08	477.66	53.07	2.96
	36~ 66	226.77	136.59	7.32	4.41	2480.62	80.02	4.46
	67~ 89	126.96	200.79	5.52	8.73	2263.64	98.41	5.48
	90~ 99	85.80	58.53	8.58	5.85	935.37	93.54	5.21
	100~ 139	251.91	158.43	6.30	3.96	2179.26	54.48	3.03
	140~ 178	105.93	232.02	2.73	5.94	1264.86	32.43	1.81
	0~ 178	983.13	1004.76	5.52	5.64	11199.89	62.92	3.50

此结果表明地面灌溉条件下在 PRD 和 ARDI 处理中, 当一侧干燥时湿润侧根系吸水存在补偿效应, 其吸水速率远远大于 CFI 的处理, 干燥侧复水后其吸水能力也能够恢复, 而且 ARDI 比 PRD 恢复更快, 这与根系经历干燥时间长短有关。长期置于干燥土壤中的根系, 会发生诸如表皮层的栓化、脱落, 次生根的老化、死亡等变化^[21], 这些变化使干土中的根系变成了“空管”, 失去了活力。交替灌溉可以

改善这种状况。根液流实测值的变化与先前已发表的结果很相近^[13~ 15, 22, 23]。但是, 这些根液流值比以前发表的葡萄^[13, 24, 25]和苹果树^[25]的值大一些, 这可能是由于冠层结构、树体的尺寸、树龄及根系直径的不同引起的。在此项研究中每棵树树龄约为 40 年, 树冠大, 根系发达, 地下水位较浅可能也是一个影响因素。另外, Green 等(1997)^[14]提出湿润侧根液流比对照(两侧湿润)增加 50%, 但该研究中 PRD 和

ARDI 分别仅增加了 10% 和 21%，这些不同可能是由于地下水埋深浅、地下水毛细上升补充干燥区土壤水分所用引起的，也可能与持续干燥时间和地面灌溉方式有关。

逐日根液流和用 Penman Monteith 公式推算的参考作物需水量之间的关系曲线表明：PRD 根区两侧根液流的差异比 ARDI 的大，在 CFI 中两侧根液流则无明显差别。另外，这种差异明显与气象因素有关。当 ET_0 小时，这种差异也小，而 ET_0 大时，这种差异也大。

2.4 茎液流

从表 3 可以看出，第 27~ 89 d，PRD 的茎液流比 CFI 和 ARDI 的小，在第 90~ 99 d 当干燥侧复水后其值恢复到与 CFI 中接近的值，然后就比 CFI 的值大。ARDI 的茎液流比 CFI 的小，也比 PRD 干燥侧复水一段时间后的茎液流小，此结果与根液流情况相似。茎液流的最大值出现在第 67~ 99 d，即 1 月 6 日到 2 月 6 日，此时期 ARDI、PRD 和 CFI 的茎液流的值从 5.48 mm öd 到 6.37 mm öd，峰值出现时间与耗水规律相似，但从表 2 可以看出，茎液流峰值明显比耗水量小。产生这个现象的原因可能是液流测量值只包括蒸腾量，但用 EnviroSCAN 测得的耗水量包括蒸发、蒸腾两部分；另一个原因是由热脉冲原

理测量的液流值比实际的蒸腾量小得多。Smith 等 (1996)^[26]发现采用热脉冲方法测量的液流流速远远低于实际值，强调了使用它来衡量蒸腾之前验证该方法精确度的重要性。实际的液流流速与采用热脉冲技术得到的测量值之间是线性关系，校正系数是 1.62。当把茎液流测量值看作蒸腾量用于水量平衡计算时必须进行校正。不过，在这里把其测量值作为一个相对指标时，用于比较不同表面灌溉湿润方式下茎液流速度的差异。

图 4 是不同表面灌溉方式下茎液流的日变化图。在第 67~ 76 d 期间三种表面湿润方式下的茎液流是不同的，ARDI 的值略小于 CFI 的 (图 4a)；PRD 的值比 CFI 小得多，因为在 PRD 处理中只有一侧灌溉而另一侧经历了长时间的干旱。CFI、ARDI 和 PRD 的茎液流峰值分别为 12.0, 11.4 和 9.0 L öh。PRD 干燥侧复水后 49 d，其茎液流超过了 CFI 和 ARDI (图 4b)，并且第 67~ 76 d 期间的值比第 140~ 152 d 期间的值大得多，这是由于第 67~ 76 d 是梨树生长的关键期，耗水量非常大。此外，该期间的气象条件是温度高，太阳辐射强烈，而在第 140~ 152 d 时水果收获，气候不再炎热。茎液流的日变化规律与根液流非常相似，但茎液流速度却很大。

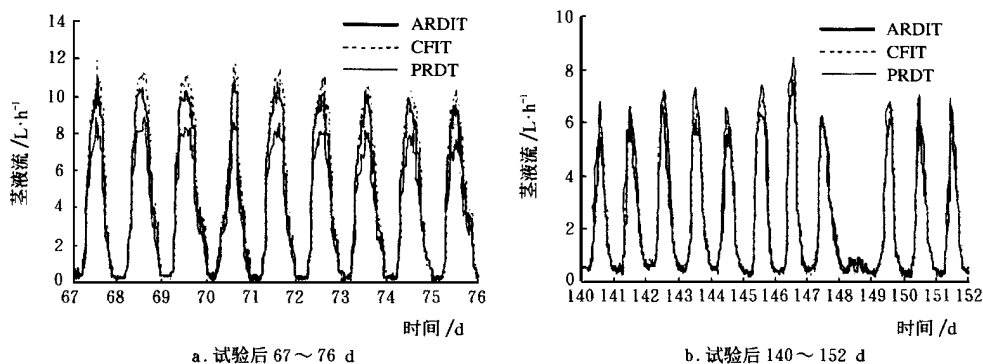


图 4 逐日根液流和用 Penman Monteith 公式推算的参考作物需水量之间的关系曲线

Fig 4 Relationship between daily root sap flow of different sides in rootzone and reference evapotranspiration

与前面提到的根液流类似，梨树茎液流观测值的变化与过去已发表的结果相似^[13~ 15, 22, 23]，但是根液流和茎液流值比以前报导的葡萄^[3, 24, 25]和苹果树^[23]的值大得多，这也可能是由于冠层结构、树体尺寸、树龄、根系直径不同造成的。本研究中，三种处理的最高蒸腾速率用校正后的茎液流速率来表示，大约为 5.48~ 6.37 mm öd，这个值与当地果树的耗

水量^[27]是一致的。茎液流与 ET_0 之间的关系曲线表明，表面灌溉方式不同茎液流与 ET_0 的关系曲线差异明显，当 ET_0 较小时这种差别也小， ET_0 大时差别也大。茎液流与 ET_0 的比率与整个根区的平均土壤含水率之间的相关关系曲线显示：该相关关系比茎液流与 ET_0 的相关关系好得多。当根区的平均土壤含水率相同时，不同表面湿润方式的茎液流与 ET_0

的比率有明显差异, 不同处理中平均土壤含水率相同时ARDI和PRD中的值比CFI的大。该结果说明当根区土壤含水率相同时,ARDI和PRD处理的根系吸水能力比CFI强。

2.5 根区水量平衡

根区水量平衡计算结果如表4所示。从计算结果可以看出三种处理在试验阶段总的蒸发蒸腾量是808.3~847.9mm。PRD处理中, 不仅在一侧干燥期间总蒸发蒸腾量比CFI明显减少, 而且在整个生长季节内的总蒸发蒸腾量也比CFI中小。PRD在一侧干旱时蒸发蒸腾量减少12.67%,ARDI在整个生长季节降低4.67%。在整个生长季节土壤储水量的变化,ARDI明显比PRD和CFI大, 因为在ARDI中灌水量大大减少了。该结果说明在ARDI中整个生长季节消耗了更多的土壤水分, 缺少的水将由降雨及地下潜水通过毛细管作用补给。另外, 与CFI相比,PRD和ARDI的排水量明显减少, 这是因为

ARDI中仅有一侧湿润, 在生育期中相当长的一段时间内,PRD中也仅一侧湿润, 其水分的侧渗增加了水分的水平运动, 减小了深层渗漏。在ARDI和PRD中由毛细管上升的地下水作用明显增加。ARDI、PRD和CFI中的地下水利用量分别为226.2、200.9和153.8mm,ARDI在整个生长季节中地下水日均补给量为1.25mm/d。这说明使用部分根干燥技术(一侧根干燥期间)及分根区交替灌溉技术将减少大约50%的灌溉水量, 但在地下水位较高条件下梨树整个生长季节的蒸发蒸腾量并未减少, 因为地下水补给量大大增加了。这个结果与一些文章中无地下水影响时的结果大不相同, 主要是因为本项研究在地下水位较高位情况下, 由于地下水补给, 干燥一侧的根区没有充分干燥, 因此没有象以前的研究报告所述的产生根信号引起调节气孔开度变小, 达到减少蒸腾水量的目的。

表4 不同处理0~100cm根区水分平衡计算结果

Table 4 Water balance components in 0~100 cm rootzone of pear trees under three surface wetting patterns

处理	试验开始后天数d	降水 \bar{a} mm	灌溉用水量 \bar{a} mm	ET \bar{a} mm	土壤水分变化 \bar{a} mm	排水量 \bar{a} mm	地下水补给量 \bar{a} mm
CFI	0~26	55.1	0		-64.6	0.7	0
	27~35	3.6	96.8	119.0	-10.7	60.3	0
	36~66	55.8	98.6	50.8	-7.4	0	47.4
	67~89	0.2	78.4	209.2	-12.8	0	75.4
	90~99	0	90.7	166.8	+38.9	0	23.5
	100~139	68.8	0	75.3	-51.2	0	7.5
	140~178	42.0	99.6	127.5	+34.5	7.8	0
	0~178	225.5	464.1	99.3	-73.3	68.8	153.8
PRD	0~26	55.1	0	120.2	-61.9	0	3.2
	27~35	3.6	50.2	42.1	-12.5	24.2	0
	36~66	55.8	49.7	190.8	-10.4	0	74.9
	67~89	0.2	48.4	144.1	-14.6	0	80.9
	90~99	0	95.7	79.2	+40.3	0	23.8
	100~139	68.8	0	132.2	-47.1	0	16.3
	140~178	42.0	97.9	103.5	+38.2	0	1.8
	0~178	225.5	341.9	812.1	-68.0	24.2	200.9
ARDI	0~26	55.1	0	119.6	-73.7	9.2	0
	27~35	3.6	53.0	45.7	-11.4	22.3	0
	36~66	55.8	53.1	191.9	-9.7	0	73.4
	67~89	0.2	48.2	154.1	-55.1	0	50.6
	90~99	0	50.6	73.2	+2.7	0	25.3
	100~139	68.8	0	129.0	-22.7	0	37.5
	140~178	42.0	56.2	94.8	+42.8	0	39.4
	0~178	225.5	261.1	808.3	-127.1	31.5	226.2

注: 灌溉日期分别是1999年11月27日(DAB27)、12月6日(DAB36)、2000年1月7日(DAB68)、1月30日(DAB141); a正值表示该时段土壤含水量增加, 负值表示该时段土壤含水量降低。

3 结论

ARDI和PRD处理的湿润侧水分吸收远大于干燥侧, 湿润侧的值也明显大于CFI中相同侧的

值。ARDI和PRD中湿润侧根系存在强烈的吸水补偿效应。PRD仅在西侧灌水时平均日耗水量小于CFI中的, 在干燥侧复水后其值比CFI中的大。ARDI的日耗水量小于CFI的, 根系一侧经过水分

胁迫过程后复水,根系吸水能力将增强。

ARDI 两侧的平均根液流比 PRD 的大,但比 CFI 的小。一侧干燥时 PRD 的液流比 CFI 小,但干燥侧复水一段时间后大于 CFI 的。ARDI 的干燥侧经历短期干旱处理,复水后根液流能够很快恢复并迅速增加。

当根区一侧长期干旱时 PRD 的茎液流比 CFI 小,干燥侧复水一段时间后,比 CFI 大。ARDI 的茎液流比 CFI 小。茎液流与 ET_0 的比率与整个根区的平均土壤含水率之间的相关关系比茎液流与 ET_0 的相关关系好。当根区土壤平均含水率相同时,不同的表面湿润方式下茎液流与 ET_0 的比率明显不同;在不同处理中土壤平均含水率相同时,ARDI 和 PRD 中的比率值比 CFI 中的大,这说明当根区土壤平均含水率相同时,ARDI 和 PRD 处理的根系比 CFI 有较强的吸水能力。

尽管 ARDI 和 PRD 一侧干燥期间比 CFI 的灌溉水量大约减少 10%,但是梨树耗水量和茎液流并未按相同的比例下降。水量平衡和根系水分吸收明显受到地下水位较高的影响,与 CFI 相比,ARDI 和 PRD 中的地下水利用量大大增加。

[参 考 文 献]

- [1] Goodwin I, Jerie P. Regulated deficit irrigation: from concept to practice [J]. The Australian and New Zealand Wine Industry Journal, 1992, 5, 131~ 133
- [2] Boland A M, Mitchell P D, Jerie P H, et al Effect of regulated deficit irrigation on tree water use and growth of peach [J]. J of Hort Sci, 1993, 68, 261~ 274
- [3] Loveys B R, Grant J, Dry P R, et al Progress in the development of partial rootzone drying [Z]. The Australian Grape Grower and Winemaker, 1997, No. 404, 18~ 20
- [4] Dry P R, Loveys, B R. Factors influencing grapevine vigour and the potential for control with partial rootzone drying [J]. Australian Journal of Grape and Wine Research, 1998, 4, 140~ 148
- [5] 康绍忠, 张建华, 梁宗锁等. 控制性交替灌水——一种新的农田节水调控思路 [J]. 干旱地区农业研究, 1997, 15(1): 1~ 6
- [6] 康绍忠, 张建华. 不同土壤水分和温度条件下土根系统中水分传导的变化及其相对重要性 [J]. 农业工程学报, 1997, 13(2): 76~ 81.
- [7] Kang S Z, Liang Z, Hu W, et al Water use efficiency of controlled alternate irrigation on root-divided maize plants [J]. Agricultural Water Management, 1998, 38: 69~ 76
- [8] Kang S Z, Liang Z, Pan Y, et al Alternate furrow irrigation for maize production in arid area [J]. Agricultural Water Management, 2000, 45: 267 ~ 274
- [9] Bielorai H. The effect of partial wetting of the root zone on yield and water use efficiency in a drip and sprinkler-irrigated mature grapefruit grove [J]. Irrigation Science, 1982, 3, 89~ 100
- [10] Moreshet S, Cohen Y, Fuchs M. Response of mature 'Shanouti' orange trees to irrigation of different soil volumes and similar levels of available water [J]. Irrigation Science, 1983, 3, 223~ 236
- [11] 康绍忠, 张建华, 梁建生. 土壤水分和温度共同作用对植物根系水分传导的效应 [J]. 植物生态学报, 1999, 23(3): 211~ 219.
- [12] 梁宗锁, 康绍忠等. 控制性分根交替灌水的节水效应 [J]. 农业工程学报, 1998, 13(4): 58~ 63
- [13] Green S R, Clothier B E. Root water uptake by kiwifruit vines following partial wetting of the root zone [J]. Plant and Soil, 1995, 173, 317~ 328
- [14] Green S R, Clothier B E, McLeod D J. The response of sap flow in apple roots to localised irrigation [J]. Agricultural Water Management, 1997, 33, 63~ 78
- [15] Green S R, Clothier B E. The root zone dynamics of water uptake by a mature apple tree. Plant and Soil, 1999, 206, 61~ 77.
- [16] Tan C S, BATTERY B R. The effect of soil moisture stress to various fractions of the root system on transpiration, photosynthesis, and internal water relations of peach seedlings [J]. J Am Soc Hortic Sci, 1982, 107, 845~ 849.
- [17] Poni S, Tagliavini M, Neri D, et al Influence of root pruning and water stress on growth and physiological factors of potted apple, grape, peach and pear trees [J]. Sci Hortic, 1992, 52, 223~ 236
- [18] Zimmernann M H. Xylem structure and the ascent of sap [M]. Springer-Verlag, Berlin, 1983
- [19] Green S R, Clothier B E. Water use of kiwifruit vines and apple trees by the heat-pulse technique [J]. Journal of Exp Bot, 1988, 39: 115~ 123
- [20] Liang J, Zhang J, Wong M H. Effects of air-filled soil porosity and aeration on the initiation and growth of secondary roots of maize (Zea mays) [J].

- Plant and Soil, 1996, 186, 245~ 254
- [21] North G B, Nobel P S. Changes in hydraulic conductivity and anatomy caused by drying and rewetting roots of *Agave deserti* (Agavaceae) [J]. American Journal of Botany, 1991, 78, 906~ 915
- [22] Granier A, Biron P, Lemoine D. Water balance, transpiration and canopy conductance in two beech stands [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 100, 291~ 308
- [23] Senock R S, Leuschner C. Axial water flux dynamics in small diameter roots of a fast growing tropical tree [J]. Plant and Soil, 1999, 208, 57~ 71
- [24] McAneney K J, Judd M J. Observations of kiwifruit (*Actinidia chinensis* Planch.) root exploration, root pressure, hydraulic conductivity, and water uptake [J]. N Z J Agric Res, 1983, 26, 507~ 510
- [25] Green S R, McNaughton K J, Clothier B E. Observations of nighttime water use in kiwifruit vines and apples [J]. Agric For Meteorol, 1989, 48, 251~ 261.
- [26] Smith D M, Allen S J. Measurement of sap flow in plant stems [J]. Journal of Experimental Botany, 1996, 47, 1833~ 1844
- [27] Mitchell P D, Boland A M, Irvine J L, et al. Growth and water use of young, closely planted peach trees [J]. Scientia Horticulturae, 1991, 47, 283~ 293

Effects of Partial Rootzone Drying on Sap Flow and Water Balance of Pear Trees Under a Shallow Ground Water Table Condition

Kang Shaozhong¹, Hu Xiaotao¹, Ian Goodwin², Peter Jerie²

(1. Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100;

2. Institute of Sustainable Irrigated Agriculture)

Abstract: The experiments were conducted to test sap flow and water balance of pear trees response to partial rootzone drying under a shallow water table condition. Three treatments, i.e. conventional flood irrigation (CFI), fixed 100% partial rootzone drying and the other 100% part irrigated (PRD), and alternate 100% partial rootzone drying and irrigating (ARDI), were designed. The EnviroSCAN probes and heat pulse sensors were used to monitor soil water dynamics and sap flow respectively. The results show that the root sap flow of wet side was much larger than that of dry side in PRD and ARDI, also larger than that of the same side in CFI. The root sap flow of dry side in ARDI was restored and improved more quickly than in PRD after rewetting. The trunk sap flow in PRD was smaller than in CFI when one side was drying, and it was larger than in CFI after the dry side rewetting. The trunk sap flow in ARDI was smaller than in CFI, but larger than in PRD during one side drying. The daily water consumption in ARDI and PRD was smaller than that in CFI during the period of only one side irrigated. The compensatory effect for water uptake existed in the roots of wet side for ARDI and PRD, and the ability of root water uptake was enhanced when the dry side rewetting, and it related the duration of root drying. Daily root sap flow was significantly related to reference evapotranspiration, but these relations were markedly different for different surface wetting patterns and different sides. The daily trunk sap flow was also related to reference evapotranspiration, and the ratio of trunk sap flow and reference evapotranspiration was not same for the same soil water content under different surface wetting patterns. Irrigation water use was approximately reduced 100% in ARDI and in the drying periods of PRD compared with CFI, but water consumption of trees and trunk sap flow were not reduced the same percentage. The effects of partial rootzone drying on water balance and sap flow were significantly influenced by the shallow ground water table. The capillary contribution from ground water table was significantly increased in ARDI and PRD compared with CFI.

Key words: sap flow; water balance; ground water table; partial rootzone drying; pear tree