

萌芽开花期梨枣对土壤水势的响应*

韩立新^{1,2} 汪有科^{1,3**} 张琳琳^{1,2}

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所 杨凌 712100; 2. 中国科学院研究生院 北京 100049;
3. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院 杨凌 712100)

摘要 本试验选取4年生梨枣(*Ziziphus jujuba* Mill.)为试验材料,设置-31~-51 kPa、-41~-84 kPa、-59~-132 kPa和-161 kPa(不灌溉)4个土壤水势水平,结合茎直径微变化、营养生长与生殖生长量,分析了梨枣在萌芽开花期对土壤水势的响应。结果表明:1)在梨枣萌芽期,土壤水势在-41~-84 kPa范围波动时,茎直径日最大收缩量最小,营养生长与生殖生长最旺盛,是该时期适宜的土壤水势范围;花芽分化适宜的土壤水势范围为-41~-132 kPa。梨枣萌芽期适当的水分亏缺不影响花芽分化,但减弱了营养生长量,优化了营养生长与生殖生长的比例。2)在梨枣开花期,土壤水势范围为-54~-78 kPa时,茎直径日最大收缩量最小,坐果率较高,为开花期适宜的土壤水势范围;土壤水势为-79~-114 kPa时坐果率最高。开花期轻度的水分亏缺可显著提高坐果率。3)土壤水势过高或过低都抑制梨枣的营养生长、生殖生长和坐果,但水涝能促进茎直径生长,水分亏缺则抑制茎直径生长。4)在平水年,梨枣的萌芽期无需灌水,自然降雨即能满足其萌芽展叶、花芽分化的需要,但开花期,降雨不能满足梨枣高坐果率的需要。

关键词 梨枣(*Ziziphus jujuba* Mill.) 土壤水势 水分亏缺 萌芽开花期 茎直径微变化 营养生长 生殖生长
中图分类号: S665.1; S275 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2012)04-0454-05

Response of pear-jujube to different soil water potentials during budding and flowering stages

HAN Li-Xin^{1,2}, WANG You-Ke^{1,3}, ZHANG Lin-Lin^{1,2}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract Pear-jujube is widely cultivated in the Loess Plateau Region (LPR) of China where it is used to reforest farmlands. Pear-jujube culture was previously constrained by wasteful use of limited water resources that characterized traditional irrigation, restricting local agricultural development. It was therefore vital to study water demand at different growth stages of pear-jujube. This paper discussed the response of 4-year-old pear-jujube trees to different soil water potentials. Both vegetative and reproductive growth processes were studied in commercial pear-jujube orchards in Mengcha Village of Mizhi County, Shaanxi Province. Four levels of soil water potentials [-31~-51 kPa, -41~-84 kPa, -59~-132 kPa and -161 kPa (no irrigation treatment)] were set up to determine suitable soil water potentials at budding and flowering stages of pear-jujube. While soil water potential was measured using the equilibrium tensiometer (EQ15), trunk diameter fluctuation was measured using the linear variable displacement transformers (LVDT). The results showed that in different soil water potentials, trunk diameter fluctuation and vegetative and reproductive growths among treatments were significantly different ($P < 0.05$). During the budding stage, suitable soil water potential was in the range of -41~-84 kPa, in which pear-jujube vegetative and reductive growths were flourished with the least maximum daily shrinkage (MDS) among the treatments. However, the suitable soil water potential for pear-jujube flower bud differentiation was in the range of -41~-132 kPa. Although mild water stress did not adversely affect flower bud differentiation during budding stage, vegetative growth dropped and vegetative-reproductive growth relationship optimized. As at soil water potential range of -54~-78 kPa during flowering stage, MDS dropped to lowest point while fruit setting percent was highest. The most suitable soil water potential at pear-jujube flowering stage was therefore in the range of -54~-78 kPa. Also the most suitable soil water potential

* 西北生态脆弱区经济作物高效用水关键技术研究示范(2011BAD29B04)和节水型旱作红枣修剪技术集成与示范(2011KTCL02-02)资助

** 通讯作者: 汪有科(1956—), 男, 研究员, 主要从事节水灌溉方面的研究。E-mail: gjzwyk@vip.sina.com

韩立新(1988—), 硕士研究生, 主要从事水资源高效利用方面的研究。E-mail: hanlixin119@163.com

收稿日期: 2011-10-01 接受日期: 2011-11-24

for pear-jujube fruit setting was in the range of $-79\sim-114$ kPa, in which fruit setting percent was highest. Hence at flowering stage, mild water stress increased fruit setting. At budding and flowering stages, water-logging and severe water-stress limited vegetative and reproductive growths and reduced fruit setting percent. However, water-logging enhanced trunk growth and severe water-stress retarded trunk growth. Furthermore, no real need of irrigating pear-jujube at budding stage was noted during normal years. This was because precipitation was enough for sprouting, lamina opening and flower bud development. However, precipitation alone was not enough at pear-jujube flowering stage during normal years.

Key words Pear-jujube (*Ziziphus jujuba* Mill.), Soil water potential, Water deficit, Budding and flowering stage, Trunk diameter fluctuation, Vegetative growth, Reproductive growth

(Received Oct. 1, 2011; accepted Nov. 24, 2011)

在退耕还林政策下, 陕北发展了大规模的枣产业。该区域生态环境脆弱, 水资源短缺, 因此合理利用有限的水资源, 是促进陕北农村发展和生态环境建设的必要条件。掌握枣不同物候期的需水信息和该时期降雨资料, 降雨不足时适量补充灌溉是提高枣产量和雨水资源利用效率的前提条件。其中梨枣是陕北枣产业的主要种植品种之一, 梨枣的物候期可分为萌芽开花期、果实生长期和果熟落叶期, 不同时期其主要的生命活动不同, 其中萌芽开花期主要包括萌芽期(主要生命活动为萌芽、抽枝、展叶和花芽分化)和开花期(开花和坐果), 是营养生长与生殖生长并存的时期。此时期主要消耗前一年秋季碳素代谢贮藏下来的营养, 与水分状况也密切相关。梨枣的花芽生长在当年枝上, 具有当年分化、当年开花的特点^[1]。不同植物的花芽分化对水分的需求不同^[2], 不同的土壤水分也会影响到植物营养生长量与生殖生长量以及两者之间的比例^[3]。因此, 探讨梨枣萌芽开花期生长指标对不同土壤水势处理的响应, 以确定适宜的土壤水势范围具有重要意义。

目前诊断作物水分信息的手段多样, 从植物生理学角度讲, 植物器官(茎、叶、果实等)体积短期微变化动态与其体内的水分状态密切相关, 当根系吸水充足时茎膨胀, 水分亏缺时茎收缩, 这就为使用茎直径微变化指导作物的灌溉提供了可能^[4]。大量试验证明茎直径微变化能反映作物的水分状况^[5], 可作为作物精确灌溉或者调亏灌溉的指示指标^[6]。Ortuño等^[7]研究表明, 茎直径日最大收缩量(MDS)对成年柠檬树的水分状况最敏感, 可作为控制灌溉的判断指标。Zhang等^[8]根据MDS确定了梨枣开花坐果期适宜的土壤水势范围。但目前针对梨枣萌芽开花期对土壤水势要求的研究尚少见报道。

本文通过设置4个不同的土壤水势水平, 对梨枣萌芽开花期叶片、枣吊、花芽分化的数量、坐果数量以及茎直径微变化进行统计, 分析了梨枣萌芽开花期茎直径微变化、营养生长与生殖生长对不同土壤水势的响应, 以期得到梨枣萌芽开花期和梨枣花芽分化以及坐果适宜的土壤水势, 为陕北枣园精确灌溉提供理论依据, 以促进陕北枣产业的可持续发展。

1 试验区概况与试验方法

1.1 试验地概况与试验材料

试验于2011年5月12日至6月26日在陕西省米脂县银州镇孟岔村山地微灌枣树示范基地进行。米脂县位于典型的黄土高原丘陵沟壑区, 属于中温带半干旱性气候, 昼夜温差大, 日照充足, 适宜果树的生长。年平均降雨量451.6 mm, 主要集中在7—9月。试验地土质为黄绵土, 容重 $1.29\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 0~100 cm计划湿润层的田间持水量为23%(质量含水量)。

试验小区长、宽、深分别为6 m、1 m、1 m, 采用水泥砌墙与周围土壤相隔并用塑料进行防渗, 使小区土壤环境为封闭系统。为了防止自然降水对试验的影响, 小区上方安装防雨棚。灌溉方式采用滴灌, 为了保证灌溉的均匀性, 每个小区布设2条毛管, 每个毛管上等距安装4个滴头, 滴头流量为 $4\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 。供试材料为4年生梨枣, 株行距为 $1\text{ m}\times 2\text{ m}$ 。试验梨枣树形修剪均一, 长势良好, 平均主干茎直径4.05 cm, 平均树高89.67 cm, 平均冠幅半径45.98 cm。

1.2 试验处理

2010年果实采收后, 各小区一致灌水至 -31 kPa (90%田间持水量), 每棵树分别穴施尿素250 g。2011年5月中旬设置4个灌水水平: T1处理土壤水势保持在 $-31\sim-51\text{ kPa}$ (90%~75%田间持水量); T2处理土壤水势保持在 $-41\sim-84\text{ kPa}$ (80%~60%田间持水量); T3处理土壤水势保持在 $-59\sim-132\text{ kPa}$ (70%~55%田间持水量); T4处理不灌水, 前期的土壤水势为 -161 kPa (50%田间持水量)。每个处理自成1个小区, 每个小区有3棵树, 每棵树视为1次重复。灌水量用控制灌溉配套数据采集器(GP1, 德国Ecomatik公司生产)自动控制。当土壤水势低于设定下限时, 每30 min自动灌水5 min, 当土壤水势大于设定上限停止灌溉。

1.3 观测指标与数据处理

土壤水势: 整个试验期间用平衡式土壤水分张力计(EQ15: equilibrium tensiometer)监测土壤水势, 测量范围为 $-1\ 500\sim 0\text{ kPa}$ 。每小区安装3个土壤水势仪探头, 埋设深度均为30 cm, 1个水势仪探头与GP1相连, 用来控制灌溉。其他探头与DL2e型数据采集器(英国剑桥, Delta Device)相连, 每30 min自动记录1次数据。每天的土壤水势平均值为该天的土壤水势值。

茎秆直径微变化: 茎秆直径微变化采用 DD 型线性差分径向变化仪(简称 LVDT, 德国 Ecomatik 公司生产)连续测定。在每棵树安装 1 个探头, 探头通过不胀钢框架安装在每株样树主干距地面 15 cm 处的北向, 安装前先用木锉轻刮树干的死皮, 以确保 LVDT 框架牢固和探头与主干接触良好, 用隔热铝箔纸将探头包住, 以防止风、气温和降雨等对探头的直接影响。所有探头与 DL2e 型数据采集器(英国剑桥, Delta Device)相连, 每 30 min 自动记录 1 次数据。整个试验期间全天自动测量和记录。

茎直径微变化指标主要有茎直径日最大/最小值($MXTD/MNXT$)、日最大收缩量(MDS)、日生长量(DG)、当日复原所需的时间。茎直径的日变化成“U”型, 通常 $MXTD$ 出现在 8:00 左右, $MNTD$ 出现在 16:00 点^[6,9-10]。 $MXTD$ 与 $MNTD$ 之差是茎直径日最大收缩量(MDS), 连续 2 d 的 $MXTD$ 或者 $MNTD$ 之差是茎直径日生长量(DG)。由于 $MXTD$ 受气象因素的影响比 $MNTD$ 小^[11-12], 因此用 2 d 的 $MXTD$ 之差作为日生长量(DG)。

降雨资料: 距离试验地 10 m 的自动气象站按照国家气象局标准连续采集。

形态指标: 萌芽期结束后(6 月 11 日)人工统计整棵树枣吊数量, 在东南西北各选取 3 个枣吊测量每个枣吊的长度和着生的花芽数量, 计算枣吊的平均长度和整棵树分化的花芽数量; 每棵树在东南西北 4 个方向各选取两片叶子, 使用直尺测量叶片的长宽, 计算叶面积平均值(叶面积=叶长×叶宽×0.67); 花期结束时(6 月 26 日)统计每棵树的坐果数量。

用 SPSS 和 Excel 进行数据分析, 用 Origin Pro 8.0 进行作图

2 结果与分析

2.1 梨枣萌芽开花期土壤水势的动态变化

图 1 是 4 个处理的土壤水势动态变化。从图 1 可以看出, 试验期间 T1、T2 处理的土壤水势均未达到设定的土壤水势下限, 和 T4 处理一样均呈现下降趋势, 没有灌水; T3 处理于 6 月 11 日灌水 1 次。T1 处理土壤水势变化平缓, 萌芽期土壤水势从 -31 kPa 下降到 -41 kPa, 开花期下降到 -51 kPa; T2 处理在萌芽期土壤水势变化范围为 -41~-53 kPa, 花期的变化范围为 -54~-78 kPa; T3 处理萌芽期土壤水势波动范围为 -59~-132 kPa, 花期灌水至 -59 kPa, 试验结束时土壤水势降低到 -114 kPa; T4 处理土壤水势萌芽期从 -161 kPa 下降到 -293 kPa, 开花期下降至 -461 kPa。

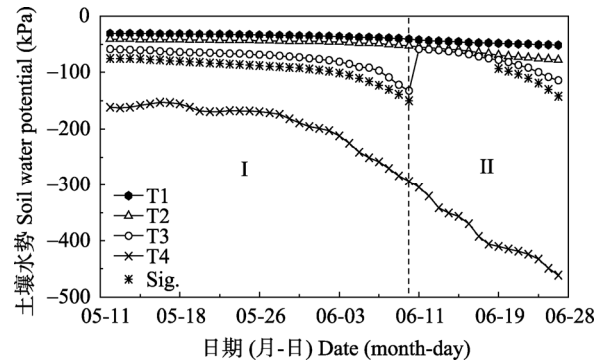


图 1 梨枣萌芽开花期不同处理土壤水势的动态变化 [I : 萌芽期; II : 开花期; Sig.(*)表示 T2、T3 处理差异显著 ($P<0.05$); 下同]

Fig. 1 Dynamic variation of soil water potential under different treatments in budding and flowering period of pear-jujube [I : shoot stage; II : flowering stage; Sig. (*) stands for significant differences between T2 and T3 ($P<0.05$) in soil water potential; The same below]

T1: 土壤水势保持在 -31~-51 kPa(90%~75%田间持水量); T2: 土壤水势保持在 -41~-84 kPa(80%~60%田间持水量); T3: 土壤水势保持在 -59~-132 kPa(70%~55%田间持水量); T4: 不灌水, 前期的土壤水势为 -161 kPa(50%田间持水量)。下同。T1 stands for the treatment of soil water potential in the range of -31~-51 kPa (90%~75% field moisture capacity); T2 stands for the treatment of soil water potential in the range of -41~-84 kPa (80%~60% field moisture capacity); T3 stands for the treatment of soil water potential in the range of -59~-132 kPa (70%~55% field moisture capacity); T4 is the treatment of non-irrigation and the initial soil water potential is -161 kPa (50% field moisture capacity). The same below.

2.2 梨枣萌芽开花期茎直径日变化指标的动态变化

枣树的茎直径具有运输水分和储存水分的能力, 蒸腾开始时提供给叶片的水来自茎中存储的水分。茎中水分的抽出引起茎直径的收缩, 下午蒸腾作用逐渐减弱, 根系吸水大于蒸腾耗水时茎损失的水分得到补充, 引起茎的膨胀、茎复原或伴有生长。若土壤中水分不足, 茎秆不能复原, 将出现茎萎缩现象^[6,10]。

从图 2a 可以看出, 4 个不同水势处理的 $MXTD$ 均随时间呈增加趋势, 没有出现茎萎缩现象。说明在 4 个处理的土壤水势条件下, 茎秆均能复原并伴随生长。但 4 个处理 $MXTD$ 的变化曲线明显不同。T1 处理 $MXTD$ 曲线明显高于其他处理; 其他处理在萌芽前期 $MXTD$ 没有表现出差异 ($P>0.05$), 但 5 月底后表现出显著差异 ($P<0.05$), $T2>T4>T3$ 。T3 处理灌水以后与 T4 处理差异性不显著 ($P>0.05$), 说明此时期灌水后, 茎直径生长具有一定的补偿效应。在萌芽期(5 月 11 日—6 月 11 日)4 个处理茎直径的生长量分别为 2 828.39 μm 、1 967.62 μm 、989.46 μm 和 1 401.50 μm , 开花期(6 月 11 日—6 月 28 日)分别增长 1 840.92 μm 、1 389.38 μm 、1 268.67 μm 和 965.93 μm 。整个萌芽开花期 4 个处理茎直径分别生长 4 669.31 μm 、3 357.00 μm 、2 257.73 μm 和 2 367.43 μm 。

图 2b 是不同处理 MDS 的动态变化。5 月中下旬 4 个处理的 MDS 较小, 5 月下旬以后 MDS 变大, 可能与梨枣进入展叶期消耗的水分增多有关^[9]。5 月中

下旬, T2、T3 处理 *MDS* 明显小于 T1、T4 处理, T2 与 T3 处理差异不显著($P>0.05$)。5 月 30 日(T3 处理的土壤水势为-72 kPa, T2 处理的土壤水势为-55 kPa)以后, T2、T3 处理之间差异显著($P<0.05$)。6 月 11 日 T3 处理灌水后与 T2 处理差异不显著($P>0.05$), 随着土壤水势的降低, 6 月 20 日(T3 处理的土壤水势

为-78 kPa, T2 处理的土壤水势为-70 kPa), 两个处理之间差异性显著($P<0.05$)。整个试验期间 *MDS* 依次为 T1>T4>T3>T2。本文还对 *DG/MDS* 进了分析(表 1), 结果表明, 在萌芽期和开花期 4 个不同水势处理的 *DG/MDS* 从大到小依次为 T2>T1>T3>T4。

2.3 梨枣树萌芽开花期的生长指标

从表 2 可以看出, T2 处理叶面积和枣吊长度最

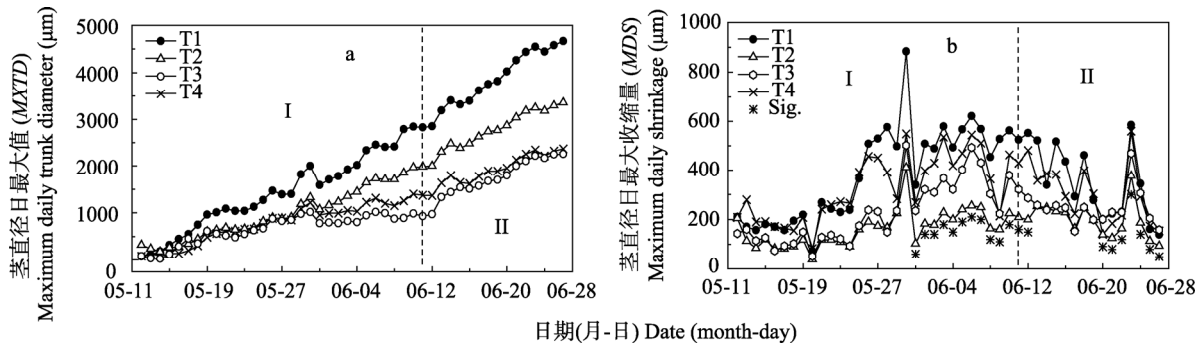


图 2 梨枣萌芽开花期不同土壤水势处理的茎直径日最大值(a)和茎直径日最大收缩量(b)的动态变化

Fig. 2 Dynamic variation of maximum daily trunk diameter (a) and maximum daily shrinkage (b) under different water potential treatments in budding and flowering period of pear-jujube

表 1 不同土壤水势处理对梨枣萌芽开花期茎直径生长指标的影响

Table 1 Effects of different soil water potential treatments on growth indexes of trunk diameter of pear-jujube in budding and flowering period

| 生长期 Growth stage | 指标 Index | T1 | T2 | T3 | T4 |
|---------------------|---------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 萌芽期 Budding stage | <i>MXTD</i> | 2 828.39a | 1 967.62b | 989.46c | 1 401.50d |
| 开花期 Flowering stage | <i>DG/MDS</i> | 35.27a | 47.26b | 22.91c | 20.670d |
| | <i>MXTD</i> | 1 840.92a | 1 389.38b | 1 268.67b | 965.93c |
| | <i>DG/MDS</i> | 38.36a | 51.43b | 26.48c | 24.88d |

MXTD: 茎直径日最大值; *DG*: 茎直径日生长量; *MDS*: 茎直径日最大收缩量; 同行不同字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。 *MXTD* is maximum daily trunk diameter, *DG* is trunk daily growth, and *MDS* is maximum daily shrinkage. Different small letters in the same line represent significant difference among treatments ($P < 0.05$).

表 2 不同土壤水势处理对梨枣树萌芽开花期形态指标的影响

Table 2 Effects of different soil water potential treatments on morphology indexes of pear-jujube in budding and flowering period

| 处理 Treatment | 营养生长量 Vegetative growth | | | 生殖生长量 Reproductive growth | | |
|--------------|----------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|---------------------------|----------------------|-------------------------------|
| | 叶面积 Leaf area (cm ²) | 枣吊长度 Bearing branchlet length (cm) | 枣吊数量 Number of bearing branchlet | 花芽总数 Number of flower bud | 坐果数量 Number of fruit | 坐果率 Fruit setting percent (%) |
| T1 | 9.79a | 9.78a | 246.50a | 6 443a | 234ab | 3.63 |
| T2 | 10.89b | 13.10b | 250.00a | 7 981b | 360b | 4.52 |
| T3 | 9.70a | 7.97c | 251.67a | 7 706b | 604c | 7.83 |
| T4 | 9.18a | 10.85a | 193.00b | 4 837c | 176a | 3.63 |

同列不同字母表示处理之间差异显著 ($P < 0.05$)。 Different letters in the same column represent significant difference among treatments ($P < 0.05$).

大, 显著大于 T1、T3、T4 处理; T4 处理枣吊的数量最少, 显著低于其他处理; T2 和 T3 处理整棵树的花芽数量明显大于 T1、T4 处理。从以上分析可以得出, T2 处理营养生长和生殖生长都比较旺盛, T3 处理生殖生长比较旺盛, 营养生长相对较弱; T1 处理营养生长和生殖生长都相对较弱; T4 处理营养生长和生殖生长都很弱, 枣吊和花芽数量显著小于其他处理。从坐果数量上看, T3 处理坐果数量和坐果率明显大于其他处理, T1 与 T2 和 T4 处理不存在显著性差异, 但 T2 处理明显大于 T4 处理。

3 讨论与结论

大量研究结果表明作物受到水分胁迫会引起 *MDS* 增大^[7,13], 作物在适宜的土壤水分条件下 *MDS* 最小^[14]; Zhang 等^[8]的研究结果表明水涝和水分亏缺都会引起梨枣树 *MDS* 变大。本试验期间 T2 处理的 *MDS* 最小, 日生长量占日收缩量的比值最大, 且营养生长与生殖生长都比较旺盛, 所以 T2 处理的土壤水势比较适宜。在萌芽期 T3 处理土壤水势小于-72 kPa 时, *MDS* 与 T2 处理存在显著性差异 ($P<0.05$), 所

以 $-41\sim-72$ kPa 为萌芽期适应的土壤水势范围; 开花期 T3 处理土壤水势小于 -78 kPa 时, MDS 与 T2 处理之间差异性显著($P<0.05$), 所以梨枣开花期适宜的土壤水势范围为 $-54\sim-78$ kPa。因此, 萌芽期 T1 处理受到水涝胁迫, T3、T4 处理受到水分亏缺胁迫; 开花期 T1 处理受到水涝胁迫, T3、T4 处理受到水分亏缺胁迫。

在萌芽期 T3 处理受到水分胁迫, 花芽分化的数量没有减少。Intrigliolo 等^[15]对日本李的研究结果表明, 调亏灌溉没有影响花的密度, 本文的研究结果与此基本一致。作物受到水分胁迫可优化营养生长与生殖生长的比例^[16], 所以适宜花芽分化的土壤水势为 $-41\sim-132$ kPa。在开花期 T3 处理的坐果数量和坐果率最高, 说明开花期适当控制灌溉也能提高坐果水平。所以开花期土壤水势 $-79\sim-114$ kPa 有利于坐果(T3 处理此时期耗水 37.09 mm), 过高或过低土壤水势都会降低坐果率。

梨枣树萌芽期米脂县降水量为 44.52 mm, 根据 1997—2005 年该县的降雨资料可以得出此时期的降雨为平水年。若 T4 处理(不灌水处理)接受这些降水, 通过土壤水分特征曲线可以推算出其土壤水势的最小值将由 -293 kPa 上升为 -97 kPa, 那么 T4 处理的土壤水势将在花芽分化的适宜范围。即平水年不灌溉情况下, 花芽分化基本不受影响, 所以平水年萌芽期无需灌水。若萌芽期结束时的土壤水势视为 -97 kPa, 在开花期降水量为 6.86 mm, 此时期的降雨量不能满足树体的消耗(37.09 mm), 土壤水势将由 -97 kPa 下降到 -135 kPa, 略超出本文确定的坐果适宜的土壤水势范围。但本试验试验年限较短, 涉及的土壤水势范围还比较少, 适宜坐果的土壤水势范围上下限还没有明确确定, 所以平水年陕北梨枣树花期是否需要灌水还需要进一步的试验。而且本试验是封闭的小区试验, 其土壤水分动态变化和枣树根系的分布都与自然条件下的有一定差异, 所以本试验应该延长试验年限才能更有效地指导当地梨枣生产。

参考文献

[1] 陈贻金. 枣树花芽的开花规律的观察[J]. 河南农林科技,

1983, 12(12): 20-22

- [2] 王忠. 植物生理学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 387-388
- [3] Costa J M, Ortuño M F, Chaves M M. Deficit irrigation as a strategy to save water: Physiology and potential application to horticulture[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2007, 49(10): 1421-1434
- [4] 孟兆江, 段爱旺, 刘祖贵, 等. 根据植株茎直径变化诊断作物水分状况研究进展[J]. 农业工程学报, 2005, 21(2): 30-33
- [5] 张寄阳, 段爱旺, 孟兆江, 等. 不同水分状况下棉花茎直径变化规律研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(5): 7-11
- [6] Goldhamer D A, Fereres E. Irrigation scheduling of almond trees with trunk diameter sensors[J]. Irrigation Science, 2004, 23(1): 11-19
- [7] Ortuño M F, García-Orellana Y, Conejero W, et al. Stem and leaf water potentials, gas exchange, sap flow, and trunk diameter fluctuations for detecting water stress in lemon trees[J]. Trees, 2006, 20(1): 1-8
- [8] Zhang P, Wang Y K, Zhan J W, et al. Scheduling irrigation for jujube (*Ziziphus jujuba* Mill.)[J]. African Journal of Biotechnology, 2010, 9(35): 5694-5703
- [9] 李秧秧, 石辉, 张安邦, 等. 黄土丘陵区几种林木茎干径向生长的日变化及其对环境因素的响应[J]. 水土保持学报, 2007, 21(6): 170-173, 196
- [10] 湛景武, 汪有科, 张陆军, 等. 桃树茎直径微变化与土壤水势及气象因子的关系[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(3): 489-494
- [11] Moriana A, Fereres E. Plant indicators for scheduling irrigation of young olive trees[J]. Irrigation Science, 2002, 21(2): 83-90
- [12] 湛景武, 汪星, 汪有科, 等. 桃树茎直径变化及其与气象因子关系[J]. 生态经济, 2009, 25(5): 28-32, 36
- [13] Conejero W, Alarcón J J, García-Orellana Y, et al. Evaluation of sap flow and trunk diameter sensors for irrigation scheduling in early maturing peach trees[J]. Tree Physiology, 2007, 27(12): 1753-1759
- [14] 张平, 汪有科, 湛景武, 等. 红枣开花坐果期水分信息诊断指标适宜性分析[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(3): 94-97
- [15] Intrigliolo D S, Castel J R. Response of plum trees to deficit irrigation under two crop levels: Tree growth, yield and fruit quality[J]. Irrigation Science, 2010, 28(6): 525-534
- [16] 孙宏勇, 张喜英, 邵立威. 调亏灌溉在果树上应用的研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2009(6): 1288-1291