

# 基于茎直径微变化的梨枣灌溉指标的初步研究

韩立新<sup>1,2</sup>, 汪有科<sup>1,3,\*</sup>, 李晓彬<sup>1,2</sup>

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

**摘要:** 研究了 4 年生酸枣砧梨枣 (*Ziziphus jujuba* Mill.) 植株主干茎直径微变化指标对土壤水势 (SWP) 变化的响应规律, 以及与气象要素的关系。结果表明: 土壤水势降低引起茎直径日最大收缩量 (MDS) 增大, 日生长量 (DG)、生长速率 (TGR) 和日最大值 (MXTD) 降低。在水分亏缺发展阶段和水分亏缺维持阶段, MDS 和 TGR 的噪声信号 (变异系数) 较小, 信号强度与噪声信号的比值较大, 表明其对土壤水势变化反映敏感。此外, MDS、TGR 与潜在蒸散量 ( $ET_0$ )、正午水汽压亏缺 ( $VPD_{md}$ ) 等气象因子的相关性显著, 均能反映大气的干旱程度, 因此 TGR 和 MDS 可作为梨枣水分亏缺的诊断指标。

**关键词:** 梨枣; 茎直径微变化; 土壤水势; 信号强度; 水分亏缺

**中图分类号:** S 665.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0513-353X (2012) 03-0552-09

## Rational Indicators for Irrigation Scheduling of Pear-jujube Based on Microchanges of Stem Diameter

HAN Li-xin<sup>1,2</sup>, WANG You-ke<sup>1,3,\*</sup>, and LI Xiao-bin<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>Soil and Water Conservation and Ecological Environment Research Center, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China; <sup>2</sup>Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China; <sup>3</sup>College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** We used four-year old pear-jujube (*Ziziphus jujuba* Mill.) trees grafted on wild jujube [*Ziziphus jujuba* Mill. var. *spinosa* (Bunge) Hu ex H. F. Chow] to study the response of parameters derived from trunk diameter fluctuations (TDF) to soil water potential (SWP). The relationship among these parameters and meteorological factors were also studied to identify suitable indicators for precise irrigation scheduling of pear-jujube. The maximum daily shrinkage (MDS) increased, whereas the daily growth (DG), trunk growth rate (TGR), and maximum daily trunk diameter (MXTD) decreased, as the SWP decreased. The responses of the four indicators to SWP change were significantly ( $P < 0.05$ ) different. MDS and TGR noise was lower during the stages of water stress development and water stress maintenance, whereas the ratios of signal intensity to noise were higher. MDS and TGR also had significant relationships with potential evapotranspiration ( $ET_0$ ) and noon vapor pressure deficit ( $VPD_{md}$ ), which could indicate atmospheric drought conditions. Therefore, MDS and TGR may provide appropriate indicators for diagnose pear-jujube water content.

收稿日期: 2011-12-05; 修回日期: 2012-02-21

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2011BAD29B04); 陕西省科技统筹创新工程项目 (2011KTCL02-02)

\* 通信作者 Author for correspondence (E-mail: gjzwyk@vip.sina.com; hanlixin119@163.com)

**Key words:** pear-jujube; trunk diameter fluctuation; soil water potential; signal intensity; water stress

现代园艺技术依靠肥水的投入大大提高了作物的产量, 大量的农业耗水与现代节水农业的中心思想(山仑等, 2000)不符。近几年来, 研究者提出适度控制土壤水分, 给作物一个适中的干旱环境(调亏灌溉), 以此来提高作物的产量和品质(山仑等, 2006)。但是, 国内外的调亏灌溉试验主要是通过控制土壤含水量来实现(刘明池等, 2001; 张振文等, 2002; Egea et al., 2010), 而对于作物体内水分信息状况并不明确。植物自身的水分信息直接与气象因素、土壤水分状况和作物产量关联, 因此比一些非生物水分信息指标更可靠(Huck, 1977)。

植物茎直径微变化作为植物水分亏缺敏感指标已经被广泛证明可以表征植物自身水分状况, 具有监测简单易行, 对植株不具破坏性, 可连续自动记录的优点(Kozłowski & Winget, 1964; Huck, 1977)。Simonneau等(1993)对桃树的研究结果表明, 茎直径的日变化与土壤水分状况密切相关。Goldhamer等(1999)、Remorini和Massai(2003)的研究结果表明, 作物茎直径微变化指标对其受到水分胁迫反应最敏感。

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(RT)和生长速率(TGR)。茎直径的日变化成“U”型, 通常茎直径日最大值(MXTD)出现在上午8时左右, 茎直径日最小值(MNTD)出现在下午4时(Goldhamer et al., 2004)。MXTD与MNTD之差是茎直径日最大收缩量(MDS), 连续两天的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(Moriana & Fereres, 2002; 湛景武等, 2009), 因此用两天的MXTD之差作为每天的生长量(DG)。茎直径生长速率(TGR)为前5 d DG的平均值(Intrigliolo & Costel, 2004)。目前已有试验研究结果表明MDS(Goldhamer et al., 2004; Ortuño et al., 2005; 孟兆江等, 2006)、MXTD/MNTD(Goldhamer et al., 2001)、TGR(Moriana et al. 2002; Intrigliolo & Castel, 2004)和DG(张寄阳等, 2005; 湛景武等, 2009)等生长指标能反映植物体内的水分状况。

在中国黄土高原区域, 由于受到水资源短缺和不合理利用的限制, 大规模的红枣生态经济林的生产潜力未能充分发挥(吴普特等, 2008)。本研究中通过设置不同的水分处理, 观测4年生‘梨枣’(Ziziphus jujuba Mill.) MDS、MXTD、DG和TGR等茎直径微变化指标对土壤水势(SWP)变化的响应, 并分析这些指标与气象要素的关系, 确定梨枣的水分亏缺诊断指标和指导灌溉的适宜指标, 为节水丰产的灌溉方案提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况及试验材料

试验于2010年7月8日至9月4日在陕西省榆林市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。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 $1.31 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 0~100 cm土壤层的田间持水量(FWC)为23.8% (质量含水量)。

试验小区规格为长6 m×宽1 m×深1 m, 采用水泥砌墙与周围土壤相隔并用塑料进行防渗, 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条灌溉毛管, 每个灌溉毛管上等距安装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 m×2 m。试验梨枣树形修剪均一, 长势良好, 平均主干茎

直径 3.18 cm, 平均树高 89.44 cm, 平均冠幅半径 36.94 cm。

## 1.2 试验处理

结合梨枣对于水分需求的特性和 1 m 土层内的田间持水量, 试验土壤水势设置 T0 和 T1 两个水平。T0 (充分灌溉): 土壤水势维持在  $-51 \sim -41$  kPa (75% ~ 80% FWC) 范围内, 前期覆膜减少土壤水分蒸发, 第一次达到设定的土壤水势 ( $-51$  kPa) 下限后, 揭掉薄膜。T1 (控制灌溉): 地面不设置任何处理, 土壤水势维持在  $-84 \sim -68$  kPa (60% ~ 65% FWC) 范围内。

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, 当土壤水势低于设置的土壤水势下限时会每 30 min 自动灌水 5 min, 当土壤水势大于土壤水势上限停止灌溉。每个处理自成一个小区, 每个小区有 3 株树, 即每个处理 3 个重复。

## 1.3 观测指标与数据处理

用平衡式土壤水分张力计 (EQ15: Equilibrium Tensiometer) 监测土壤水势, 测量范围  $-1\ 500 \sim 0$  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。3 个探头的平均值为该小区的土壤水势值。

茎直径微变化采用 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。在每株样树主干距地面 15 cm 处安装一个探头, 安装前先用木锉轻刮树干的死皮, 以确保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。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。3 株树的平均值作为每个处理茎直径微变化的值。

距试验地 10 m 远的自动气象站按照国家气象局标准连续采集气象要素数据。利用 Penman-Monteith 公式 (Allen et al., 1998) 计算参考潜在蒸散量 ( $ET_0$ ) 和正午水汽压亏缺 ( $VPD_{md}$ )。

利用 SPSS17.0 进行数据分析, 用 Origin8.0 和 Excel 进行作图。

# 2 结果与分析

## 2.1 土壤水势的动态变化

从图 1 可以看出, 试验初期两个处理的土壤水势都在  $-35$  kPa 水平上。随着试验的进行, T1 (控制灌溉) 处理土壤水势下降速度明显的大于 T0 (充分灌溉) 处理, 因为 T0 此时期有覆膜, 能有效地降低土壤水分的蒸发。

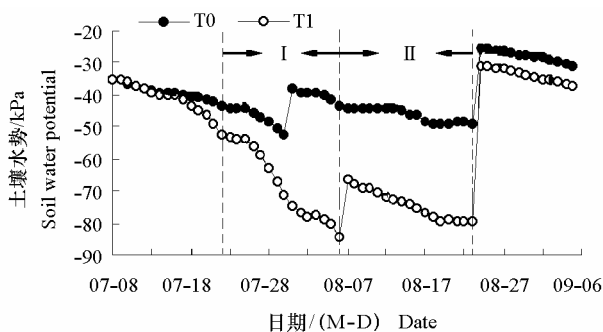


图 1 土壤水势的动态变化

Fig. 1 Dynamic trends of soil water potential

在整个试验期间, T0 处理在 7 月 30 日进行一次灌溉, T1 处理在 8 月 6 日进行一次灌溉, 8 月 24 日两个处理同时灌水至 80% FWC 以上。两个处理在 7 月 22 日至 8 月 24 日之间土壤水势存在显著性差异 ( $P < 0.05$ ), 称为控制灌溉时期, 8 月 24 日复水后两个处理的土壤水势差异不显著 ( $P > 0.05$ )。

控制灌溉期间可以分为两个阶段: 水分胁迫发展阶段(阶段 I), 土壤水势表现出显著性差异开始(7 月 22 日)至 T1 处理第一次灌水(8 月 6 日); 水分胁迫维持阶段(阶段 II), 8 月 7 日起到 T1 处理复水(8 月 24 日)。

## 2.2 茎直径微变化指标的动态变化

茎直径日最大收缩量(MDS)的波动范围为 0.1~0.6 mm(图 2, a)。可以看出, 随着土壤水势的降低, MDS 变大, 控制灌溉(T1)3 d(7 月 25 日)后与 T0 处理产生显著差异, 此后两个处理之间 MDS 一直存在显著性差异, 直到复水 3 d(8 月 27 日)后显著性差异消失。

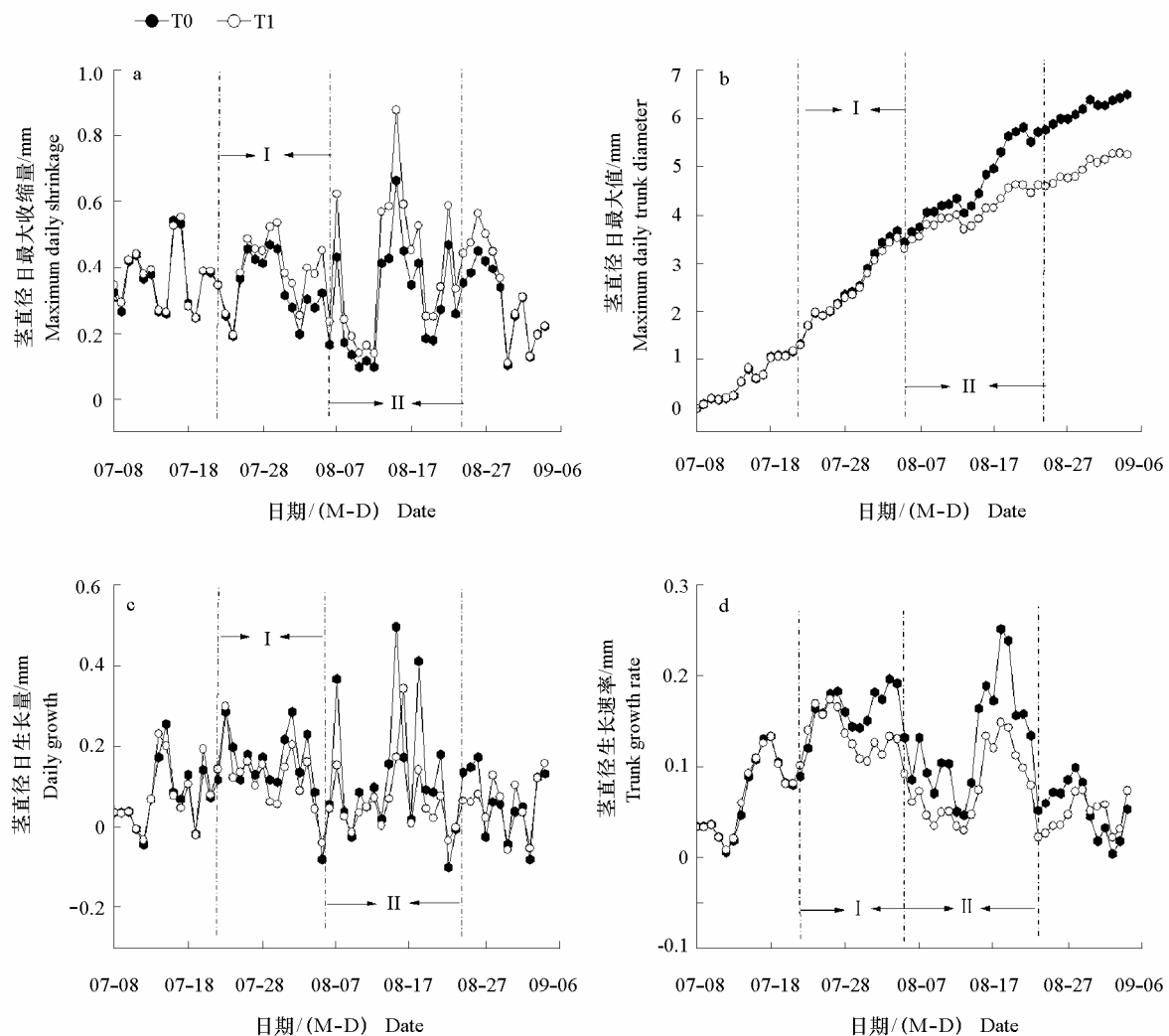


图 2 茎直径微变化指标动态变化

Fig. 2 Dynamic trends of parameters derived from TDF

T1 和 T0 两个处理的茎直径日最大值 (MXTD) 均持续增长 (图 2, b); T1 处理土壤水势的降低引起 MXTD 增长变慢, 控制灌水 9 d (7 月 31 日) 后直到试验结束, 均与 T0 处理存在显著差异。

茎直径日生长量 (DG) 波动范围主要为  $-0.1 \sim 0.3$  mm (图 2, c)。控制灌溉后的第 3 天 (7 月 24 日) T1 与 T0 处理 DG 表现出显著性差异 ( $P < 0.05$ ), 但是差异不稳定, 复水 2 d (8 月 26 日) 后 DG 的显著性差异 ( $P < 0.05$ ) 消失, 在第 5 天 (8 月 29 日) 又出现显著性差异 ( $P < 0.05$ ), 然后直到试验的结束 DG 没有表现出显著性差异 ( $P < 0.05$ )。DG 反应敏感, 但是差异性不稳定, 这可能是受气象因素的影响, 阴雨天 DG 大幅度升高, 转晴后, DG 大幅度下降 (湛景武 等, 2009)。

茎生长速率 (TGR) 主要在  $0 \sim 0.2$  mm 之间波动, 波动范围小于 DG (图 2, d)。随着土壤水势的降低, TGR 变小, 控制灌溉 4 d (7 月 26 日) 后表现出显著性差异 ( $P < 0.05$ ), 而且差异性一直存在直到恢复灌溉 5 d (8 月 29 日) 后 T1 处理 TGR 变大, 与 T0 处理之间的显著性差异消失。随后 2 d (8 月 31 日和 9 月 1 日) T1 处理 TGR 显著地大于 T0 处理 ( $P < 0.05$ ), 这主要是由 T1 处理复水后的补偿效应造成的, 但是此时期茎直径的日生长量 (DG) 较小 (图 2, c), 补偿效应小, 不能弥补前期试验的影响 (图 2, b)。

### 2.3 茎直径微变化对土壤水势变化的响应

植物自身的水分指标受土壤水分和气象要素的综合影响。为了排除气象要素的影响, Goldhamer 和 Fereres (2004) 提出 MDS 信号强度的概念, 即 MDS 标准值, 用 MDS 实际值与无水分亏缺条件下 MDS 值之比来表示。本试验中将 MDS、MXTD、DG 和 TGR 指标均标准化, 标准值称为信号强度, 指标在样树间变异系数称为噪声信号。

从图 3, a 可以看出在控制灌溉以前 MDS、MXTD 和 TGR 指标信号强度都围绕着 1 有微小的波动。在阶段 I, 各个指标的信号强度值均有不同程度的增加: TGR 升高最快, MDS 其次, 再次是 MXTD。在阶段 II, TGR 信号表现出较大的波动; MDS 信号值变小, 然后围绕着 1.3 有微小的波动; MXTD 信号持续小幅增加, 对 8 月 6 日的灌水没有明显反应。8 月 24 日复水后, 3 个指标均的信号都有不同程度的降低: MDS 降低最快, 到 8 月 27 日接近于 1, 与 T0 处理不存在显著性差异; 其次是 TGR, 在 8 月 29 日恢复到 1 水平后, 又小于 1, 表现出一定的补偿效应; 而 MXTD 信号强度只是从 1.26 降低了到了 1.23 水平。这说明 MDS 和 TGR 对土壤水势变化反应敏感, 且 MDS 的信号强度较稳定; MXTD 对土壤水势反应不敏感。

从图 3, b 可以看出, 控制灌溉以前 DG 信号值是围绕着 1 有微小的波动。控制灌溉后信号值增加, 在阶段 I, DG 信号增加, 但是不平稳, 在阶段 II, DG 信号波动性更大, 复水后信号强度迅速降低, 后期围绕着 1 波动。DG 对土壤水势变化反应敏感, 信号强度不稳定。

当土壤水分发生变化时, 短期内信号强度与噪声信号的比值越大, 说明该指标越适合诊断植物的水分状况 (Ortuño et al., 2005)。

为了进一步分析梨枣水分状况的诊断指标, 选取控制灌水期间两阶段 (水分胁迫发展阶段: 7 月 25 日到 8 月 6 日; 水分胁迫维持阶段: 8 月 7 日到 8 月 23 日), 应用 SPSS 统计软件对两个阶段内各个指标的信号强度和噪声强度进行分析。

由表 1 可得, 在两个阶段信号强度与噪声信号的比值从大到小依次均为 MDS、TGR、MXTD 和 DG。

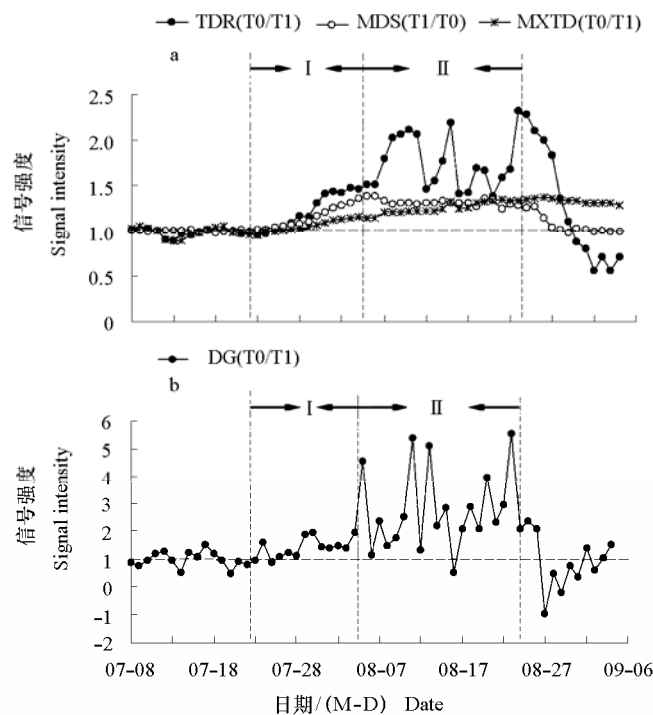


图 3 茎直径微变化信号强度的动态变化  
Fig. 3 Dynamic trends of TDF signal intensities

表 1 在水分胁迫发展阶段（Ⅰ）和维持阶段（Ⅱ）梨枣茎直径微变化指标的信号强度  
Table 1 The responses of parameters deprived from TDF in stage of water stress development (Ⅰ) and stage of water stress maintenance (Ⅱ)

诊断指标 Diagnostic indicators	Ⅰ			Ⅱ		
	信号强度 (S) Signal intensity	噪声信号 (N) Noise	S/N	信号强度 (S) Signal intensity	噪声信号 (N) Noise	S/N
TGR	1.25 c	0.071 a	17.61	1.77 c	0.097 b	18.24
MDS	1.17 b	0.065 a	18.00	1.31 b	0.069 a	18.99
MXTD	1.07 a	0.095 b	11.26	1.27 a	0.094 b	13.51
DG	1.57 d	0.158 c	9.49	2.78 d	0.217 c	12.81

$P < 0.05$ .

2.4 梨枣茎直径微变化与气象要素的关系

植物的水分运移途径是土壤—植物—大气连续体，因此植物的水分状况不仅与土壤水分有关，而且还受气象要素的影响。气候干旱直接或间接地促使作物干旱（张杰 等，2008）。因此有必要检测这些指标与气象要素的相关关系。本文中选取了反应大气蒸发力强弱的两个气象指标：潜在蒸散量（ $ET_0$ ）和正午水汽压亏缺（ $VPD_{md}$ ）来进行相关分析。

从图 4 中可以看出，茎直径日最大收缩量（MDS）、茎直径生长速率（TGR）与潜在蒸散量（ $ET_0$ ）和正午水汽压亏缺（ $VPD_{md}$ ）的相关性较好，MDS 与  $ET_0$  和  $VPD_{md}$  的相关系数分别为 0.762 和 0.635（图 4，a、b），TGR 与  $ET_0$  和  $VPD_{md}$  的相关系数分别为 0.550 和 0.583（图 4，c、d），都达到显著水平。茎直径日最大值（MXTD）是一个累加值，不仅受土壤水势和气象因子的影响，还受累积效应的影响，虽然回归分析得出 MXTD 与  $ET_0$  和  $VPD_{md}$  线性关系显著（图 4，e、f），但是没有太大的实际意义。茎直径日生长量（DG）与  $ET_0$  和  $VPD_{md}$  的相关性不显著（图 4，g、h）。所以，只有

MDS 和 TGR 才能反映大气的干旱情况。本结果与对柠檬的研究结果 (Ortuño et al., 2006) 一致。

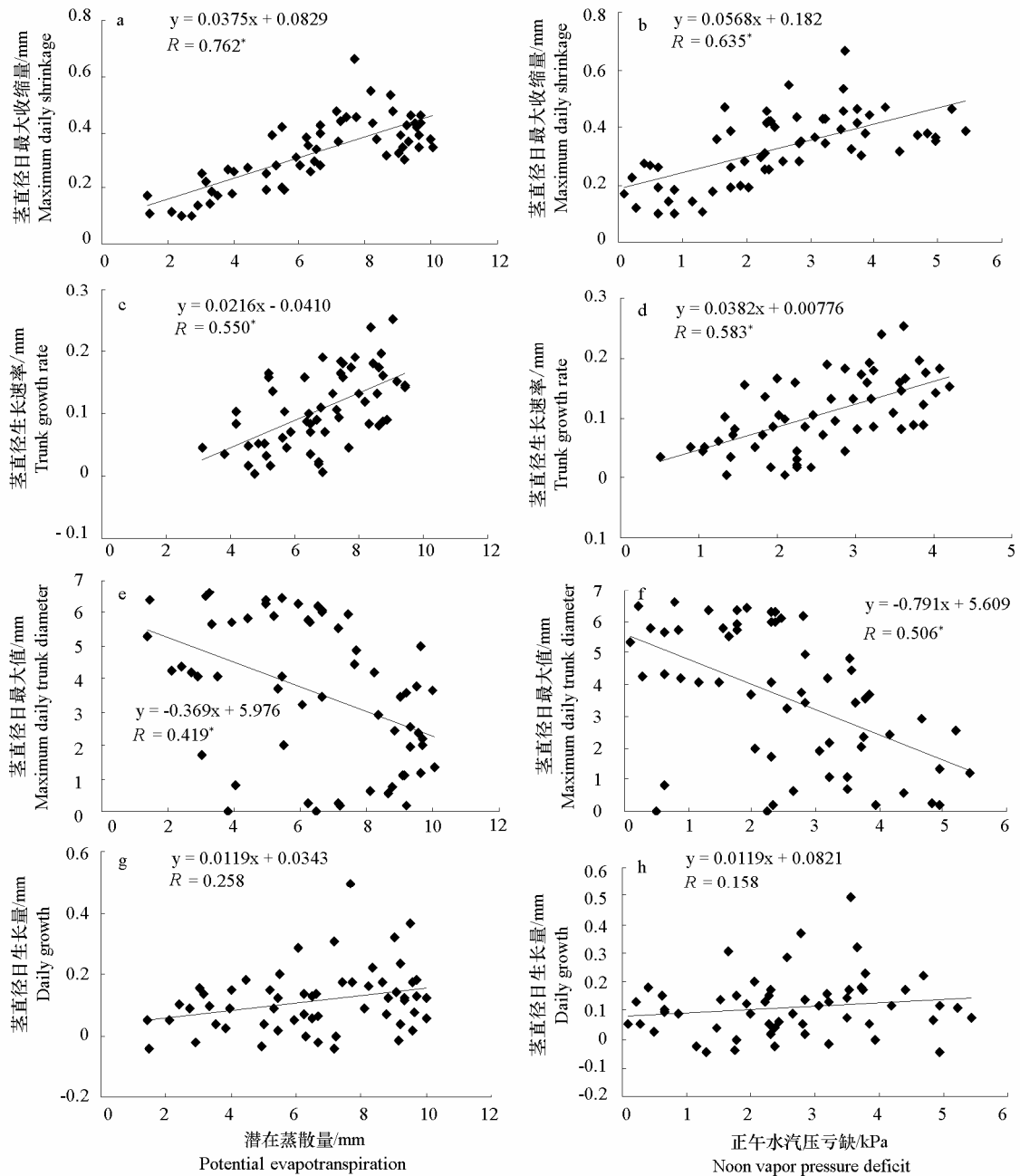


图4 茎直径微变化指标与  $ET_0$  和  $VPD_{md}$  的线性相关关系

c 和 d 图中的  $ET_0$  和  $VPD_{md}$  为相对应 TGR 的 5 d 的平均值。

Fig. 4 The relationship between TDF deprived parameters and meteorological factors

The values of  $ET_0$  and  $VPD_{md}$  were averages of five days corresponding to TGR in figure c and d.

### 3 讨论

从植物生理学角度讲, 植物器官 (茎、叶、果实等) 体积短期微变化与其体内的水分状态密切

相关, 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 (孟兆江 等, 2005)。本研究结果表明梨枣受到水分胁迫时, DG 没有出现连续的负值。这与湛景武等 (2009) 对桃树的研究结果不一致, 原因可能是: 一, 梨枣与桃树品种不同, 不同植物对水分亏缺有着不同的相应变化和适应方式 (李秧秧 等, 2007); 二, 控制水分亏缺的强度不同。控制灌溉期间 DG 噪声信号大, 信号不稳定, 不能反应大气的干旱情况, 因此 DG 不能作为梨枣的水分亏缺诊断指标。

MXTD 信号波动性小, 比较稳定, 但是对土壤水分状况反应不灵敏。而且, MXTD 不能反应大气的干旱程度, 所以 MXTD 也不是 4 年生梨枣诊断水分亏缺的理想指标。Goldhamer 和 Fereres (2001) 提出幼龄桃树受茎秆生长的影响, MXTD 或者 MNTD 适合做控制灌溉的指标。文研究于其不符的原因可能是树种和树龄的不同。选择作物水分诊断指标时, 应考虑品种和树龄对茎直径日变化指标的影响 (Ortuño et al., 2010)。

试验期间 MDS 信号稳定, 对土壤水分信息反应敏感, 信号强度与噪声信号的比值最大。此外, MDS 能反映大气干旱情况, 因此 MDS 是梨枣较适宜的水分亏缺诊断指标。Ortuño 等 (2005) 对不同水分控制下的柠檬树的茎水势、叶水势、气孔导度、液流、以及茎直径的动态变化进行观测, 结果表明 MDS 反应最为敏感, 能反应柠檬的水分信息。孟兆江等 (2006) 对温室茄子的研究结果表明 MDS 能灵敏、实时、准确地反映植株体内的水分状况。单一的 MDS 指示作物水分状况容易造成偏差, 应结合茎直径的生长 (Intrigliolo & Castel, 2004)。

在控制灌溉时期的两个阶段, TGR 的信号强度均大于 MDS, 信号强度与噪声信号比值略小于 MDS, 因此 TGR 能反应梨枣受到的土壤水分胁迫。且 TGR 能反应大气的干旱程度, 所以 TGR 也可以作梨枣水分亏缺的诊断指标。这与李 (Intrigliolo & Castel, 2004) 和橄榄幼树 (Moriani & Fereres, 2002) 的研究一致。综上可知, MDS 和 TGR 都可以作为梨枣水分亏缺诊断指标。但是在水分胁迫维持阶段, MDS 信号强度比 TGR 稳定 (图 3, a), 围绕 1.30 有微小的波动, 可以指示梨枣受到的水分胁迫强度 (Goldhamer & Fereres, 2004)。

研究只确定了梨枣的水分亏缺诊断指标和精确灌溉的适宜指标, 但是对于梨枣的适宜的土壤水势范围和适宜的土壤水势调亏范围还不明确。而且不同生育期内生命活动不同, 对土壤水分的要求不同, 确定梨枣不同生育期内水分诊断指标及适宜的土壤水势范围将是以后研究的重点。

## References

- Allen R G, Pereira L S, Raes D, Smith M. 1998. Crop evapotranspiration - guidelines for computing crop water requirements-FAO irrigation and drainage paper 56. Rome: FAO, 300: 1 - 15.
- Egea G, Nortes P A, Gonzalez-Real M M, Baille A, Domingo R. 2010. Agronomic response and water productivity of almond trees under contrasted deficit irrigation regimes. *Agricultural Water Management*, 97 (1): 171 - 181.
- Goldhamer D A, Fereres E. 2004. Irrigation scheduling of almond trees with trunk diameter sensors. *Irrigation Science*, 23 (1): 11 - 19.
- Goldhamer D A, Fereres E. 2001. Irrigation scheduling protocols using continuously recorded trunk diameter measurements. *Irrigation Science*, 20 (3): 115 - 125.
- Goldhamer D A, Fereres E, Mata M, Girona J, Cohen M. 1999. Sensitivity of continuous and discrete plant and soil water status monitoring in peach trees subjected to deficit irrigation. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 124 (4): 437 - 444.
- Huck M G K. 1977. Water relations of cotton. II. Continuous estimates of plant water potential from stem diameter measurements 1. *Agronomy Journal*, 69 (4): 593 - 597.
- Intrigliolo D S, Castel J R. 2004. Continuous measurement of plant and soil water status for irrigation scheduling in plum. *Irrigation Science*, 23 (2): 93 - 102.
- Li Yang-yang, Shi Hui, Zhang An-bang, Tan Hong-chao. 2007. Daily changes in radial growth of several tree stems and their response to environmental factors in loess hilly region. *Journal of Soil and Water Conservation*, 21 (6): 170 - 173, 196. (in Chinese)



- 李秧秧, 石 辉, 张安邦, 谭红朝. 2007. 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. 水土保持学报, 21 (6): 170 - 173, 196.
- Liu Ming-chi, Kojima Takayuki, Munehiro Tanaka, Chen Hang. 2001. Effect of soil moisture on plant growth and fruit properties of strawberry. *Acta Horticulturae Sinica*, 28 (4): 307 - 311. (in Chinese)
- 刘明池, 小岛孝之, 田中宗浩, 陈 杭. 2001. 亏缺灌溉对草莓生长和果实品质的影响. 园艺学报, 28 (4): 307 - 311.
- Kozłowski T T, Winget C H. 1964. Diurnal and seasonal variation in radii of tree stems. *Ecology*, 45: 149 - 155.
- Meng Zhao-jiang, Duan Ai-wang, Liu Zu-gui, Zhang Ji-yang. 2005. Advances on diagnosis of crop moisture content from changes in stem diameters of plants. *Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering*, 21 (2): 30 - 33. (in Chinese)
- 孟兆江, 段爱旺, 刘祖贵, 张寄阳. 2005. 根据植株茎直径变化诊断作物水分状况研究进展. 农业工程学报, 21 (2): 30 - 33.
- Meng Zhao-jiang, Duan Ai-wang, Liu Zu-gui, Zhang Ji-yang, Bian Xin-min. 2006. The relationship between the change of stem diameter and plant water content of eggplants: An experimental study. *Acta Ecologica*, 26 (8): 2516 - 2522. (in Chinese)
- 孟兆江, 段爱旺, 刘祖贵, 张寄阳, 卞新民. 2006. 温室茄子茎直径微变化与作物水分状况的关系. 生态学报, 26 (8): 2516 - 2522.
- Moriana A, Fereres E. 2002. Plant indicators for scheduling irrigation of young olive trees. *Irrigation Science*, 21 (2): 83 - 90.
- Ortuño M F, García-Orellana Y, Conejero W, Ruiz-Sánchez M C, Alarcón J J, Torrecillas A. 2005. Stem and leaf water potentials, gas exchange, sap flow, and trunk diameter fluctuations for detecting water stress in lemon trees. *Trees*, 20 (1): 1 - 8.
- Ortuño M F, García-Orellana Y, Conejero W, Ruiz-Sánchez M C, Mounzer O, Alarcón J, Torrecillas A. 2006. Relationships between climatic variables and sap flow, stem water potential and maximum daily trunk shrinkage in lemon trees. *Plant and Soil*, 279 (1): 229 - 242.
- Ortuño M F, Conejero W, Moreno F, Moriana A, Intrigliolo D, Biel C, Mellisho C, Pérez-Pastor A, Domingo R, Ruiz-Sánchez M. 2010. Could trunk diameter sensors be used in woody crops for irrigation scheduling? A review of current knowledge and future perspectives. *Agricultural Water Management*, 97 (1): 1 - 11.
- Remorini D, Massai R. 2003. Comparison of water status indicators for young peach trees. *Irrigation Science*, 22: 39 - 46.
- Shan Lun, Deng Xi-ping, Zhang Sui-qi. 2006. Advances in biological water-saving research: Challenge and perspectives. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 20 (2): 66 - 71. (in Chinese)
- 山 仑, 邓西平, 张岁岐. 2006. 生物节水研究现状及展望. 中国科学基金, 20 (2): 66 - 71.
- Shan Lun, Huang Zhan-bin, Zhang Sui-qi. 2000. *Water-saving Agriculture*. Guangzhou: Jinan University Press. (in Chinese)
- 山 仑, 黄占斌, 张岁岐. 2000. 节水农业. 广州: 暨南大学出版社.
- Simonneau T, Habib R, Goutouly J P, Hyguet J G. 1993. Diurnal changes in stem diameter depend upon variations in water content direct evidence in peach trees. *Journal of Experimental Botany*, 44 (260): 615 - 621.
- Wu Pu-te, Wang You-ke, Xin Xiao-gui, Zhu De-lan. 2008. Integration and demonstration of the date micro-irrigation technology in the hilly of Shaanbei. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 25 (4): 1 - 6, 12. (in Chinese)
- 吴普特, 汪有科, 辛小桂, 朱德兰. 2008. 陕北山地红枣集雨灌溉技术集成与示范. 干旱地区农业研究, 25 (4): 1 - 6, 12.
- Zhan Jing-wu, Wang Xing, Wang You-ke, He Jun-qi, Zhang Ping. 2009. Variations of peach tree stem diameter and its relation to meteorological factors. *Ecological Economy*, 25 (5): 28 - 32, 36. (in Chinese)
- 湛景武, 汪 星, 汪有科, 贺军奇, 张 平. 2009. 桃树茎直径变化及其与气象因子关系. 生态经济, 25 (5): 28 - 32, 36.
- Zhan Jing-wu, Wang You-ke, Zhang Lu-jun, Zhang Ping, He Jun-qi. 2009. Micro-variation in peach stem diameter and its relationship with soil water potential and meteorological factors. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 17 (3): 489 - 494. (in Chinese)
- 湛景武, 汪有科, 张陆军, 张 平, 贺军奇. 2009. 桃树茎直径微变化与土壤水势及气象因子的关系. 中国生态农业学报, 17 (3): 489 - 494.
- Zhang Ji-yang, Meng Zhao-jiang, Duan Ai-wang, Liu Zu-gui, Chen Jin-ping, Liu Zhan-dong. 2005. Research on diagnosis of soil water deficit of cotton based on variation of stem diameter. *Journal of Irrigation and Drainage*, 25 (2): 35 - 38. (in Chinese)
- 张寄阳, 孟兆江, 段爱旺, 刘祖贵, 陈金平, 刘占东. 2005. 茎直径变化诊断棉花水分亏缺程度的试验研究. 灌溉排水学报, 25 (2): 35 - 38.
- Zhang Jie, Zhang Qiang, Zhao Jian-hua, Wang Sheng, Zhao Hong, Wang Jing. 2008. The response of three crop drought indices to spring wheat water stress over semi-arid region in northwest China. *Acta Ecologica Sinica*, 28 (4): 1646 - 1654. (in Chinese)
- 张 杰, 张 强, 赵建华, 王 胜, 赵 宏, 王 静. 2008. 作物干旱指标对西北半干旱区春小麦缺水特征的反映. 生态学报, 28 (4): 1646 - 1654.
- Zhang Zhen-wen, Li Hua, Song Chang-bing. 2002. Effects of irrigation on grape and wine. *Acta Horticulturae Sinica*, 29 (6): 515 - 518. (in Chinese)
- 张振文, 李 华, 宋长冰. 2002. 节水灌溉对葡萄及葡萄酒质量的影响. 园艺学报, 29 (6): 515 - 518.