

doi: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.06.019

黄土丘陵区枣林土壤水分动态及其对蒸腾的影响*

魏新光¹ 聂真义^{2,3} 刘守阳⁴ 余檀^{1,2} 马建鹏^{2,5} 汪有科^{1,5}

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 国家节水灌溉杨凌工程技术研究中心, 陕西杨凌 712100;
3. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; 4. 法国国家农业科学研究院地中海气候与
农业水利系统模拟实验室, 阿维尼翁 84914; 5. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为了探明黄土高原半干旱区山地枣林蒸腾和土壤水分间的关系, 对山地枣林的土壤水分和枣树茎液流动态进行了连续3年的定位监测, 结果表明: 土壤含水率时空变异性显著, 垂直方向上随着土层深度的增加, 变异系数(C_v)逐渐降低。其自上而下可划分为土壤水分变化层(0~2.6 m)、土壤水分干层(2.6~6.0 m)和土壤水分恢复层(6.0~10.0 m)。枣树液流监测的参数在生育期和休眠期间具有显著性差异, 根据这一特征可以对枣树生育期进行较为准确的界定。基于液流参数特征确定的生育期与观察树体萌芽、落叶确定的生育期时长基本一致, 均约为160 d, 但基于液流参数确定的生育期较后者约提前5 d。土壤水分的增加会使枣树液流(瞬时蒸腾)的谷值出现时间提前, 峰值出现时间推后, “午休”时间缩短, 旺盛蒸腾时间延长, 反之亦然。枣树生育前期蒸腾均呈逐日增加趋势, 而生育中后期蒸腾和土壤水分呈极显著的正相关关系。

关键词: 土壤水分 蒸腾 土壤干层 液流特征 黄土丘陵区

中图分类号: S274.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2015)06-0130-11

Soil Moisture Characteristics and Its Influence on Jujube Tree Transpiration in Loess Hilly Region

Wei Xinguang¹ Nie Zhenyi^{2,3} Liu Shouyang⁴ She Tan^{1,2} Ma Jianpeng^{2,5} Wang Youke^{1,5}

(1. College of Water Resources and Architecture Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. National Engineering Research Center for Water Saving Irrigation at Yangling, Yangling, Shaanxi 712100, China
3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
4. Laboratory of Modeling Agricultural and Hydrological Systems in the Mediterranean Environment,
French National Institute of Agronomic Research, Avignon 84914, France
5. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of
Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to explore the relationships between jujube tree transpiration and soil moisture in semi-arid loess hilly area, soil moisture and jujube tree sap flow were monitored for three consecutive years. Results showed that temporal and spatial variability of soil moisture were significant. Soil moisture increased with the increase of soil depth but its coefficient of variation decreased gradually in the vertical direction. According to the variation of soil moisture, soil depth was divided into three layers from top to bottom: soil moisture changing layer (0~2.6 m), dried soil layer (2.6~6.0 m) and soil moisture recovery layer (6.0~10.0 m). Parameters of jujube tree sap flow were significantly different between growth period and dormant period, therefore, the growth period of jujube tree could be demarcated more

收稿日期: 2015-03-13 修回日期: 2015-04-20

* “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD29B04、2013BAD20B03)、林业公益性行业科研专项资助项目(20140470)和陕西省科技
统筹创新工程计划资助项目(2013KTZB02-03-02)

作者简介: 魏新光, 博士生, 主要从事经济林高效用水研究, E-mail: weixg_wi@163.com

通讯作者: 汪有科, 研究员, 博士生导师, 主要从事作物高效用水和水土保持研究, E-mail: gjzwyk@vip.sina.com

accurately. The growth period divided based on sap flow characteristics lasted about 160 d, which was similar to that determined by sprout and defoliation observation method, but it started and ended nearly 5 d in advance. The increase of soil moisture led to forward of minimum values and delay of maximum values of jujube tree sap flow, the "lunch break" time was shortened, but the transpiration time was strongly prolonged, and vice versa. Jujube tree sap flow increased at the early growth stage, and the positive correlation between transpiration and soil moisture were significant at the middle and late growth stages.

Key words: Soil moisture Transpiration Dried soil layer Sap flow characteristics Loess hilly region

引言

黄土高原地区干旱少雨、生态脆弱。长期以来过度的农业扩张,加剧了当地的水土流失和生态环境退化^[1]。自1999年国家实施退耕还林政策以来,在陕北地区以枣树为代表的经济生态林种植规模逐年扩大到2014年底已突破 $2.0 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ^[2]。随着林地种植规模和枣树树龄的增加,单株耗水量和林地总耗水量逐年增加,水分供需矛盾日益突出^[3-4]。林木对土壤水分的过度消耗导致了深层土壤干燥化,甚至出现永久性土壤水分干层^[5]。这些干层一旦出现,便很难消除,最终会导致生态的进一步恶化和生态经济林的不可持续发展^[6]。

枣树是陕北的传统经济树种,经济生态效益十分显著,但是对其耗水规律与耗水特征的研究还比较薄弱^[7]。对于水资源严重匮乏的陕北地区,干旱一直是制约当地林枣业健康发展的瓶颈。枣树通过根系吸收土壤水分来满足其蒸腾需要是林地土壤水分消耗的主要途径^[7],因此枣树蒸腾会显著地影响土壤水分的变化。陕北地区干旱少雨,年际、月际降雨分布不均,不同土层深度的土壤水分变化各异,时空变异程度较高^[8-9],较为准确地掌握林地土壤水分的时空变异规律十分重要。传统测定林地树木蒸腾的方法主要通过取样测定土壤含水率结合水量平衡原理间接测算确定。由于树木根系发达,其吸水深度和范围都难以准确界定^[10],传统土壤水分测定时取样深度较浅,大都在3 m以内,而且不能定点原位取样,使得测定结果误差较大。深层取样通常仅在生育期内进行1~2次,缺乏长期定位的观测数据^[11]。本文采用中子水分测定仪,对0~10.0 m土层土壤水分状况进行长期定位观测,对水分变化较为剧烈的0~1.0 m土层采用TDT水分探针进行自动监测。同时,采用TDP液流监测系统^[12],对枣树的液流(瞬时蒸腾)动态进行测定^[13-14]。通过对所采集的土壤水分和液流数据的深入分析,其研究结果对于制定科学合理的果园管理制度和改进节水策略都具有重要的指导意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验在陕西省榆林市米脂县西北农林科技大学山地红枣节水试验基地进行。该试验地地处黄土高原腹地(109°28'E、37°12'N),海拔高度960 m。沟壑纵横,水土流失严重,是典型的黄土高原丘陵沟壑区地貌,气候属于中温带半干旱型气候区,气候干燥,蒸发强烈。年均日照时数2761 h,日照百分率为62%,年总辐射量581 kJ/cm²,年平均气温8.4℃。年均降水量452 mm,其中7—8月降水占全年降水量的49%。试验基地土壤为黄土母质上发育的黄土土,0~1.0 m土层容重为1.29~1.31 g/cm³^[15]。

1.2 试验布设与指标测定

1.2.1 试验布设

试验布设在红枣试验基地东南坡的水平台地上(图1),在阶地上选取3株长势一致,树体基干顺直的梨枣树(*Ziziphus jujube* Mill.)作为被试树种。梨枣树于2000年栽植,采用矮化密植型修剪栽培模式,栽植密度为1666株/hm²,株行距为2 m×3 m,树体平均高度(2±0.1) m,冠幅直径(1.8±0.3) m,产量 $1.65 \times 10^4 \text{ kg/hm}^2$ 。

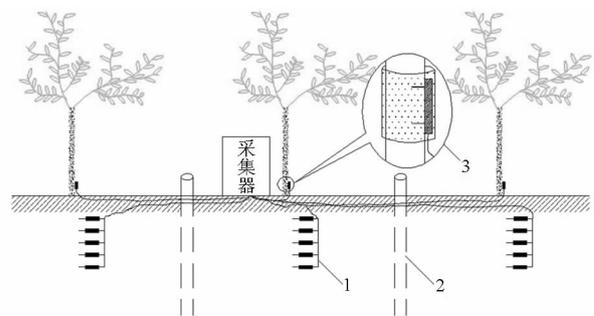


图1 试验布设图

Fig.1 Layout of experiment

1. 土壤水分传感器 2. 中子水分测管 3. TDP探针

1.2.2 液流测定

采用树干液流监测系统(RR-2010, Rainroot Co., CN),探针型号TDP-20(Thermal diffuse probe-20)^[16]对枣树液流状况进行动态监测,液流观测时间为

2012-05-01—2014-10-20。为消除安装方位、高度等引起的监测误差,将 TDP 探针统一安装在离地 10 cm 的树干北侧,为防止环境温度对 TDP 测温探针的影响,用防晒膜对探针进行包裹,如图 1 所示。使用 CR1000 型数据采集器(Campbell Scientific Inc., USA)进行数据采集,采集频率为 10 min/次。采用 Granier 经验公式^[17]计算枣树瞬时液流速率,即

$$v_i = 1.19 \times 10^{-4} (\Delta T_{\max} - \Delta T) / \Delta T^{1.231} \quad (1)$$

式中 v_i ——瞬时液流, $\mu\text{m/s}$

i ——测定时序

ΔT ——TDP 传感器两测温探针监测的实时温差, $^{\circ}\text{C}$

ΔT_{\max} ——在监测时间段内两测温探针监测温差的极大值, $^{\circ}\text{C}$

1.2.3 土壤含水率测定

采用 TDT 水分传感器(SDI-42 型,Acclima Inc., USA)和 CNC100 型中子水分仪(中宇仪器,中国)^[18]对枣林地土壤水分进行动态监测,测量精度 0.2%。中子水分测管布设在两棵枣树中间(图 1)。由于枣树根系较深,为了更加准确地监测枣树根系吸水状况以及根系吸水对深层土壤水分状况的影响,中子水分仪测定的最大深度为 10.0 m,垂向测定步长为 20 cm。监测频率为生育期内 7~10 d/次,休眠期 15~20 d/次。为克服中子仪测定时间间隔较长的不足,对土壤含水率变化剧烈的 0~1.0 m 土层利用 TDT 水分传感器进行动态监测,监测频率为 30 min/次。探头布设深度为 20、40、60、80、100 cm,具体布设位置如图 1 所示。

1.2.4 枣树日蒸腾量确定

枣树日蒸腾量 T 由枣树全天瞬时液流速率积分得到,即

$$T = \int_0^{24} \frac{0.6v_t t A}{L_{\text{col}} L_{\text{row}}} dt \quad (2)$$

式中 T ——日蒸腾量, μmm

v_t —— t 时刻的液流速率, $\mu\text{m/s}$

L_{col} ——株距,取 3 m

L_{row} ——行距,取 2 m

A ——边材面积, cm^2

其中,边材面积 A 的确定需根据边材面积和胸径关系转化而得到,具体确定步骤参照文献[19]。

2 结果与分析

2.1 枣林 0~10.0 m 土层土壤含水率时空变化动态

(1) 土壤含水率的垂直(空间)变化规律

通过对枣林地 0~10.0 m 土层土壤质量含水率连续 3 年的动态监测(图 2),发现 3 年土壤水分垂

直分布规律基本一致,土壤含水率的变异程度随着土层深度的增加逐渐减小,土壤含水率变化总体呈现倒 S 型变化,即从 0~2.6 m 土壤含水率先增加后减少,2.6~6.0 m 土壤含水率变化很小,基本稳定在 6.8% 左右,6.0~10.0 m 土壤含水率逐渐增加。根据土壤含水率在垂直方向的大小及其变异程度可以将其分为 3 个主要层次:土壤水分变化层、土壤水分干层和土壤水分稳定层。

土壤水分变化层位于 0~2.6 m 之间。该层水分又可细分为:土壤水分剧烈变化层(0~0.8 m)和土壤水分变化层(0.8~2.6 m)。在土壤水分剧烈变化层,各层含水率变化都极为剧烈,各层的变异系数(C_v 值)均大于 10%。0.2、0.4、0.6 m 土层土壤含水率 3 年的平均 C_v 达到 51.8%、36.5% 和 14.5%。在土壤水分变化层,虽然随着土层深度的增加,其含水率变异程度逐渐减小,但其 C_v 值仍大于 5%。该层土壤水分拐点出现在 1.2 m 深度处,2012—2014 年该层土壤质量含水率分别达到 $(9.68 \pm 0.39)\%$ 、 $(9.25 \pm 0.52)\%$ 和 $(8.77 \pm 0.90)\%$,均高于上层和下层土壤含水率。各层土壤含水率的变化均是降雨入渗和根系吸水共同作用的结果,在该层以上土壤(0~1.2 m)土层较浅,更容易受到土壤水分补给,有时甚至大于根系的吸水作用,因而该层水分呈现出一定的累积趋势,而该层以下的土层降雨的补给作用逐渐减弱甚至消失,在根系吸水作用下,土壤含水率逐渐降低。即 1.2 m 以上土层受降雨的补给作用大于枣树根系吸水作用,而该层以下土层恰恰相反。换言之,1.2 m 以上土层含水率变化的主要控制因素是降雨,而 1.2 m 以下土层则是枣树根系吸水。

2.6~6.0 m 是土壤水分干层,该层各深度土壤含水率均非常低(6.5%~7.0%),变异系数也非常小,平均 C_v 仅为 3.9%,且基本不随时间变化,这主要是因为该层受到枣树根系的吸水作用,而又难以得到有效的水分补给,土壤可利用水分已基本利用殆尽^[20],含水率接近于土壤的凋萎含水率。刘晓丽等研究表明,黄土区枣树根系细根最大深度可达 5.6 m^[21],即枣树根系对林地土壤水分的影响最大层为 5.6 m。这和本研究的结果基本吻合,可见该土壤水分干层的出现很有可能是由于枣树根系强烈的吸水作用,而且无有效的水分补充造成的。

6.0~10.0 m 是土壤水分恢复层,虽然该层土壤水分依然比较稳定, C_v 也较小,但是随着土层深度的增加,土壤含水率呈现出明显的单调递增趋势,土壤含水率由 6.0 m 处的 7.8% 上升到 10.0 m 处的 18.67%。而且该层土壤含水率的 C_v 也有一定程度

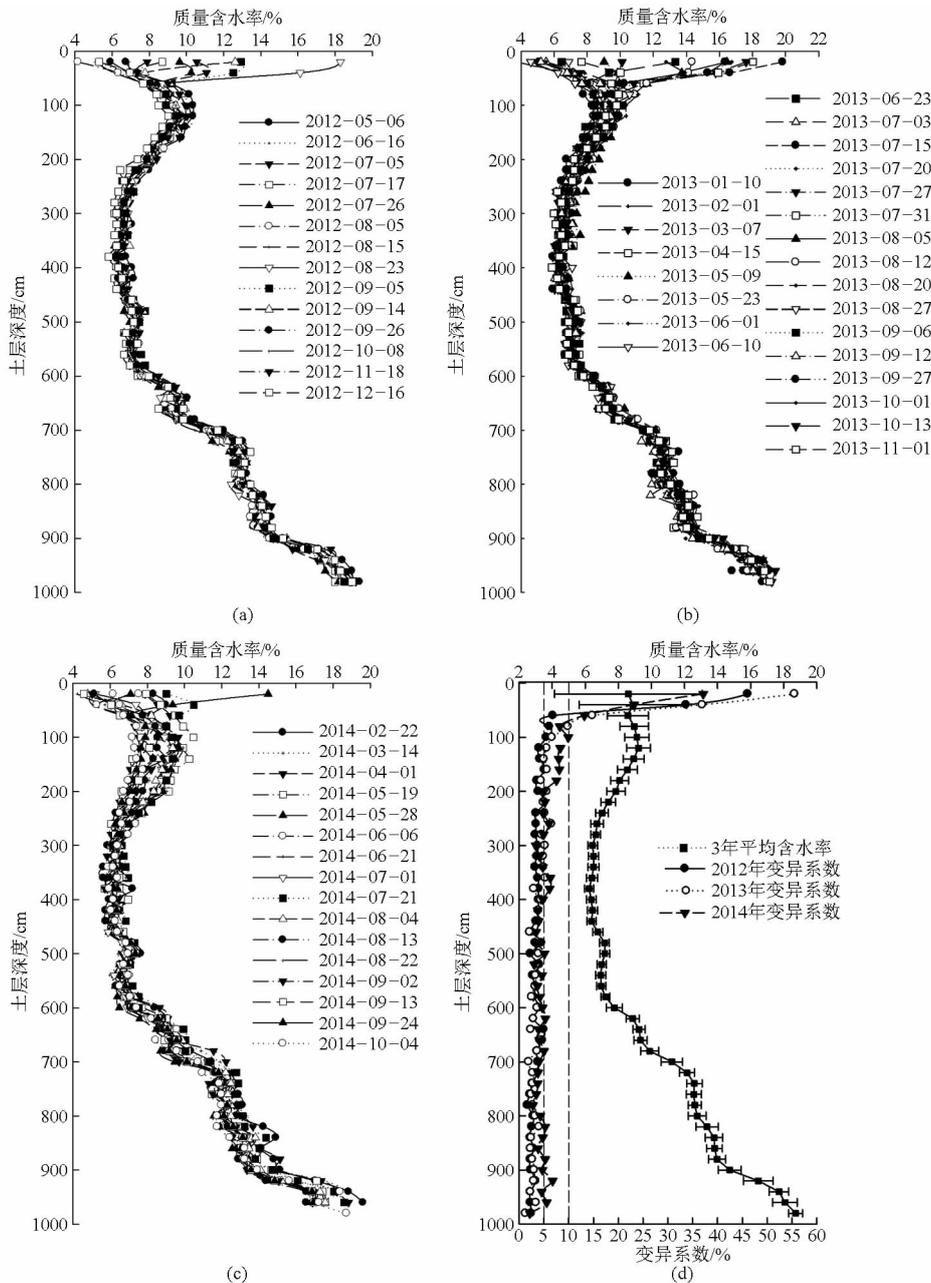


图 2 土壤水分垂直变化

Fig. 2 Vertical variations of soil moisture

(a) 2012 年 (b) 2013 年 (c) 2014 年 (d) 变异系数

的增加(1.9%~6.7%)。特别在7.0 m和9.2 m土层深度土壤含水率发生突变,而且其 C_v 也随之增大。可见该层存在水分夹层或有一定量的土壤水分侧向补给。在黄土高原丘陵区,沟壑纵横的地势地形各异,下垫面情况比较复杂^[22],虽然降雨不会直接补给到该层,但是地势低洼地带和下坡位在降雨后会产生一定量的水分积聚和侧向补给,使得台地的深层土壤含水率呈现增加趋势^[23]。黄土高原山地,地下水位很低,基本不存在地下水补给的可能性;因此该层土壤含水率的上升,是浅层地下水的侧向补给造成的。浅层地下水来源仍然是雨水,所以补给呈现出一定的季节性变化,因而在2个水分补

给层深度处(7.0 m和9.2 m)土壤含水率的变异系数有所增加, $C_v = 4.8%$,略高于土壤水分稳定层的平均值($C_v = 3.9%$)。由此推断,在土壤水分干层(2.6~6.0 m)中也有可能存在一定量的侧向补给,但是由于枣树根系的存在,其强烈的吸水作用使得该层土壤水分没有发生显著变化。

虽然3年土壤水分变化规律相同,但是不同水文年型下,各层特别是上层土壤含水率的变化仍然差异明显。2013年(图2b)是典型的丰水年,降雨较多,土壤含水率总体较高,因而表层含水率大于10%达10次,特别是7月15日,表层土壤含水率达到19.83%,为3年来的最大值。在平水年(2012

年)观测到表层含水率大于10%的仅有3次,而在枯水年(2014年)观测到表层含水率大于10%的仅有1次,且含水率也仅为14.5%。由图2d可知,虽然0~2.0 m处土壤含水率变化规律相同, C_v 均随着土层深度的增加而减小,但同层的 C_v 却在逐年增大。2012—2014年0.6、1.0、1.8 m深度处土壤含水率 C_v 分别为6.8%、14.8%、13.1%、5.5%、6.6%、9.9%和3.6%、4.4%、7.5%。这可能是由于逐年采取了综合节水措施,使得林地土壤的蓄水保墒能力逐渐得到提高,降雨对土壤水分的影响深度在逐渐提升。说明采取合理的田间管理措施特别是聚水保墒措施,可以有效地改善林地土壤水分状况,提高林地储水能力,这对于干旱半干旱地区的果林地管理是十分重要的。

(2) 土壤含水率的年季变化规律

由于土壤含水率在0~0.8 m变化较剧烈(图2d),所以对监测的0~1.0 m水分数据进行重点分析(图3),发现在生育期(5—10月)土壤含水率受降雨和枣树根系吸水综合作用波动剧烈,休眠期(11月—翌年4月)土壤含水率保持基本稳定。根据监测结果发现,在土壤含水率较高的情况下(2013年)两种方法测定结果基本一致,而当土壤含

水率较低时(2012年和2014年)中子仪测定结果略高于TDT水分探针。采用干燥称重法对两种方法监测结果进行检验,也发现TDT水分探头在土壤含水率较低时误差较大。由此可见,虽然中子仪监测结果较为准确,但是数据连续性较差,TDT水分探针监测结果连续性较好,但是在土壤含水率较低时监测结果偏低。2012、2013、2014年降水量分别达到477.2、529.8、386.4 mm,分别是多年平均降水量(451.6 mm)的106%、118%、85%,是典型的平水年、丰水年和枯水年。同期土壤含水率变化受降雨影响显著,生育期土壤含水率在降雨后迅速升高,在丰水年(2013年)生育期平均含水率达到8.75%,至生育期末土壤含水率提高了3.4%,土层储水量增加34 mm。而在平水的2012年和枯水的2014年,生育期土壤平均含水率分别为7.56%和7.42%,生育末期土壤储水量相对于初期分别减小了5.5 mm和40 mm。丰水年不仅土壤平均含水率较高而且受降水影响土壤含水率变异也较大($C_v = 6.4%$)。2013年7月15日土壤含水率达到历史最高值12.33%(2013-07-07—07-15,9 d累计降水量达109.6 mm),最大值远高于2012年和2014年的最大值9.31%和10.26%。

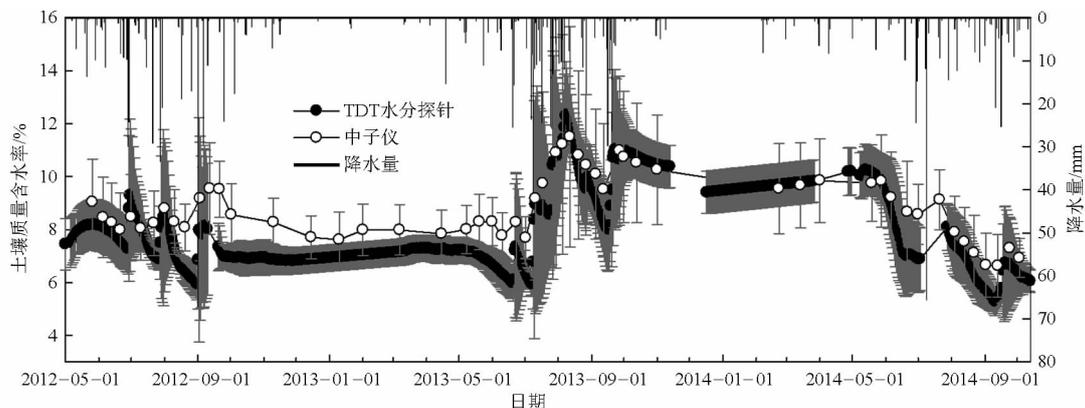


图3 试验期内枣林地的土壤含水率

Fig. 3 Dynamics of soil moisture in jujube orchard

2.2 基于液流参数特征的枣树生育期界定

枣树是多年生落叶乔(灌)木,枣树树体的蒸腾耗水主要发生在生育期,而休眠期树体落叶、生命活动及其微弱,几乎观察不到液流现象。所以对枣树生育期和休眠期的准确界定对于准确计算枣树的蒸腾耗水量极为重要。

2.2.1 枣树液流参数的测定与特征值提取

树体的液流并不能够直接测定,利用TDP探针监测树体液流主要基于热扩散原理^[17],通过监测液流参数(两监测探针之间的温差)与液流速率的回归关系进行确定。一段时间内液流值的变化不仅与实时监测的参数(温差)有关,还与温差的

最小值、温差变幅有关。在枣树液流确定之前需要对液流的监测参数进行提取与甄别,在此基础上确定枣树实际的液流速率。

(1) 液流参数的测定

由于TDP液流监测从2012-05-01开始到2014-10-20结束,数据量大。限于篇幅仅在树体生育期(约5—10月)和休眠期(约11月—翌年4月)的中期分别选取6个连续日(2012-07-01—07-06日和2013-02-01—02-06),列出其实时监测温差(图4a)并与同期环境温度(图4b)进行比较。

由图4a可知,树体休眠期和生育期监测的液流参数(最大值、最小值、温差日变幅)变化规律在生

育期和休眠期存在明显差异,生育期液流参数变化较为平稳,监测温差的最大值(峰值)、最小值(谷值)分别为 4.0℃和 5.5℃;日变幅仅为 1.5℃,且与环境温度变化不一致;而在枣树的休眠期,液流参数波动剧烈,监测温差的最大值、最小值分别约为 4℃

和 7.8℃,日变幅达 3.8℃,且与环境温度变化同步。由此可见,在液流基本停止以后,其监测参数的波动主要受环境温度的影响,而不能代表真实的液流变化。

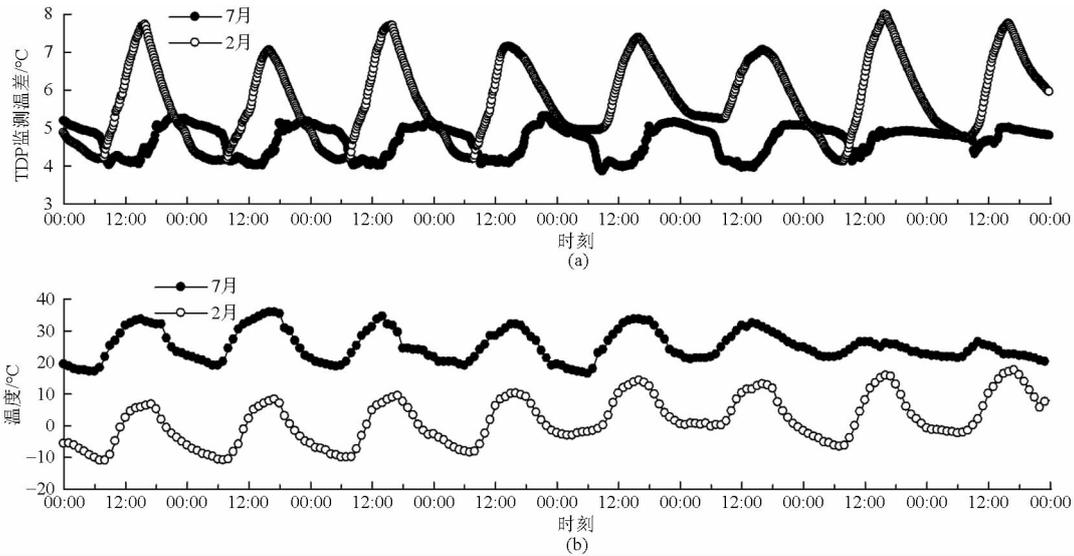


图 4 枣树生育期和休眠期逐日液流参数变化

Fig. 4 Dynamics of sap flow parameters during growing and dormant periods of jujube tree

(a) TDP 探头监测的实时温差 (b) 同期环境温度

(2) 液流参数特征值的提取

由于液流速率的变化和液流监测参数(最大值、最小值和温差日变幅)的关系密切,为了确定枣树液流的日变化,对整个观测期内逐日特征值进行了提取。

从图 5 可以看出,日最大温差、最小温差和温差日变幅这 3 个参数在生育期(5—10 月)和休眠期(10 月—翌年 4 月)差异较为明显,以 2013 年为例,3 个参数逐日变化在生育期平均值分别为: 5.19、4.15、1.03℃,日变化幅度不大,且各样本一致性很高(3 个参数平均 C_v 分别为: 3.4%、6.8% 和 19.6%),而在休眠期这 3 个参数的平均值上升到 5.92、4.47、2.18℃。比生育期分别提高了 14%、

8% 和 117%,且参数日变化剧烈,样本一致性很差(3 个参数的 C_v 分别为: 8.2%、5.4% 和 42.9%)。综上所述,液流参数在生育期和休眠期的差异十分显著。一方面,生育期液流和环境温度的变化不一致,而休眠期二者变化一致;另一方面,相对于枣树的休眠期,生育期监测的参数数值偏低,温差日变幅减小,数据的波动性降低。根据图 5 可知,在每年的 4 月下旬到 5 月上旬和 10 月中上旬,3 个参数特征都会发生突变,特别是温差日变幅差异最大,说明温差日变幅对有无液流的响应最敏感。可以借助这 3 个参数,特别是温差日变幅的突变来判断是否有真实液流的存在,进而对枣树的生育期和休眠期进行较为准确的界定。

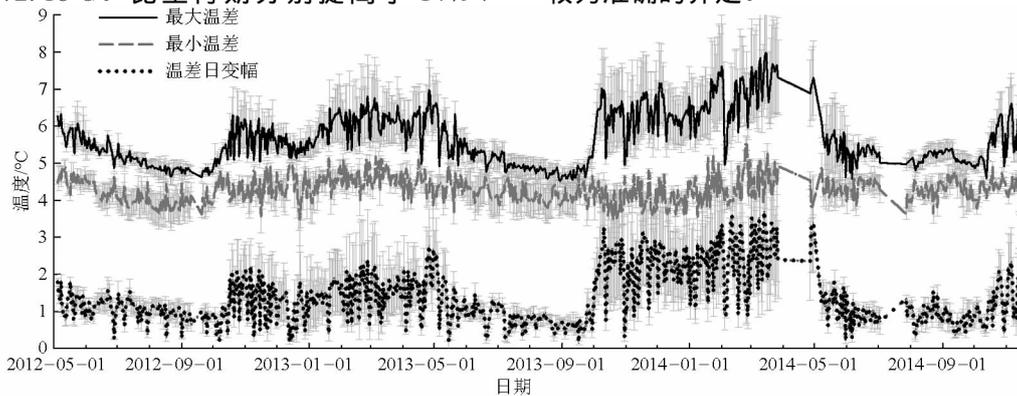


图 5 枣树观测期逐日液流参数动态

Fig. 5 Dynamics of jujube tree sap flow parameters

2.2.2 基于液流参数特征的生育期界定

(1) 传统的枣树生育期界定方法

在陕北地区,有两种传统的枣树生育期确定方法:一种是根据月序的粗略划分,另一种是根据观察枣树的萌芽和落叶来确定。根据月序划分就是根据生产经验将5—10月定义为枣树的生育期,而将11月—翌年4月定义为枣树的休眠期。在枣树的生育期又划分为:开花坐果期(5—6月)、果实膨大期(7—8月)、果实成熟落叶期(9—10月)。这种划分方式将生育期固定在每年的5月1日—10月31

日,每年生育期时长均为184 d。而通过观察枣树的萌芽和落叶日期发现,枣树在每年的5月上中旬开始萌发,10月中下旬开始大规模落叶。由于每年气温、地温、辐射等的差异,生育期的起止时间并不一致,具体统计结果如表1所示。

(2) 基于液流参数的生育期界定

根据液流参数变化规律确定的枣树生育期和休眠期如表1所示。它和根据传统月序划分的生育期以及根据观察树木萌芽和落叶确定的生育期存在一定差异。

表1 不同方法确定的枣树生育期

Tab.1 Growth stages of jujube tree determined by different methods

年份	生育期开始日期			生育期结束日期			生育期长/d		
	液流启动	树木萌芽	传统统计	液流停止	树木大规模落叶	传统统计	液流特征	观察萌芽落叶	传统统计
2012	—	05-04		10-14	10-16		—	165	
2013	04-30	05-05	05-01	10-06	10-10	10-31	159	157	184
2014	05-08	05-15		10-17	10-21		162	159	

注:由于2012年数据开始监测时,树木液流已经启动,未统计其启动日期。

统计结果表明,以5—10月界定枣树的生育期会使得生育期延长约20 d。而根据液流监测数据和观察树木萌芽、落叶确定的生育期时长差异不大,均约为160 d。在树木萌芽前树木的液流已经开始启动,随着树木生命活动逐渐增强,液流启动后的5~7 d,树木开始萌芽。同样,在生育期末液流停止后的3~5 d,树木开始大规模的落叶。综上所述,以5—10月确定生育期会使得生育期延长,而根据液流参数和观察树木萌芽、落叶确定的生育期长度基本一致,但会使得生育期的时间提前约5 d。

(3) 生育期液流的加强和减弱过程

枣树休眠期和生育期的过渡,伴随着液流的启动与停止,其启动和消失过程不仅受到自身发育状况的调控还和温度、土壤水分、辐射等气象条件密切相关。根据式(1)可知,树木液流速率和日最小温差呈反比。根据图5可知,最小温差在生育初期呈现缓慢下降的趋势,在生育末期则呈现快速上升趋势,这说明枣树生育初期液流的增大是一个缓慢的过程,而在生育末期液流的停止是一个较快的过程。从表2可知,枣树液流完全正常大约需要28 d,(2013年为22 d,2014年34 d)但是在生育末期,液流的停止时间要迅速得多,只需要2~3 d(2012年为2 d,2013、2014年为3 d)。

2.3 土壤水分对枣树蒸腾的影响

2.3.1 土壤水分对液流(瞬时蒸腾)特征的影响

土壤含水率不仅影响蒸腾(液流)数值的大小,

表2 蒸腾的加强和减弱过程

Tab.2 Transpiration enhancing and reducing process of jujube tree

年份	生育期开始日期			生育期结束日期		
	液流启动	液流正常	历时/d	液流开始减弱	液流停止	历时/d
2012	—	05-20	—	10-15	10-17	2
2013	04-30	05-22	22	10-03	10-06	3
2014	05-08	06-11	34	10-14	10-17	3

也显著地影响液流峰值和谷值出现的时间(图6)。对枣树生育期液流峰值和谷值出现的时间进行统计分析(为避免天气因素对液流变化的影响,只对非极端天气条件下的样本进行统计分析,并排除仪器故障缺失的数据,2012、2013、2014年分析样本数分别为143、138、118 d),为克服年际之间样本天数的不一致性,对3年统计结果进行天数加权平均($N=139$ d),对峰值、谷值出现频次,各年累积频率、3年加权累积频率进行对比分析。

通过对液流谷值出现时间节点进行统计分析(图6a~6c),发现液流谷值大部分出现在19:00—翌日01:00左右,可见液流的停滞时间主要出现在太阳辐射减弱和彻底消失之后,此阶段树木依然吸收水分是由于树木根压的存在^[24]。频数的峰值则出现在19:00—21:00,丰水年(2013年)使得谷值时间提前,19:00和21:00的累积频率分别达到78.1%和92.2%,比同期平均水平分别高14.2%和4.9%。这主要是因为较好的土壤水分状况,使得枣

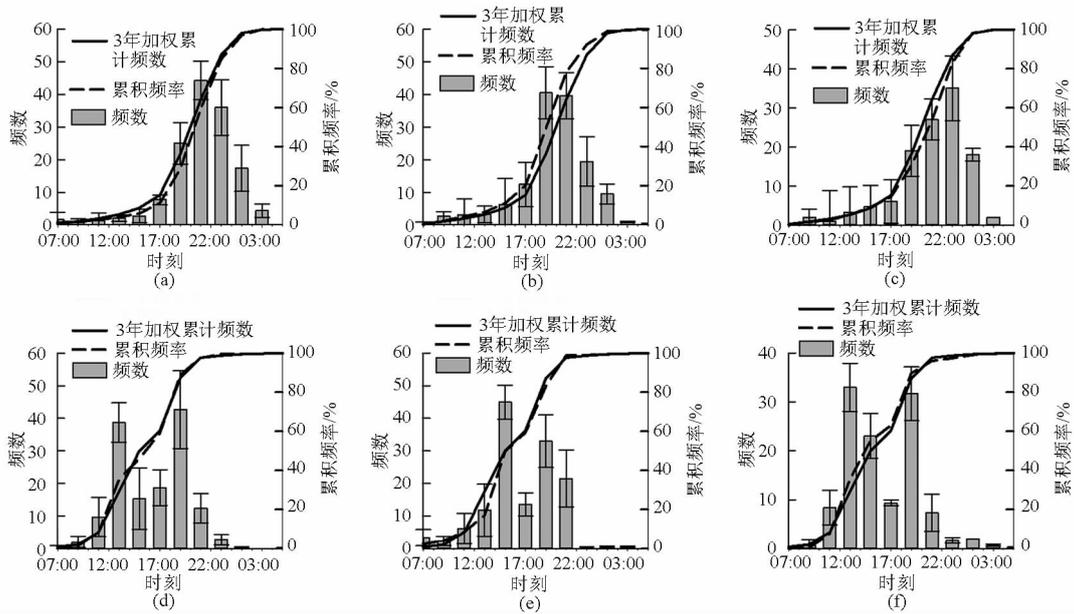


图 6 不同水文年枣树液流特征值

Fig. 6 Sap flow characteristics of jujube tree in different hydrological years

(a) 2012 年谷值 (b) 2013 年谷值 (c) 2014 年谷值 (d) 2012 年峰值 (e) 2013 年峰值 (f) 2014 年峰值

树体较容易从土壤中吸收水分, 树体水分恢复较快, 树体的水势较高, 土壤水势和树体水势之间的能差减小, 根压作用减弱, 土壤水分状况越好, 树体通过根压补水作用越强^[25-26]。由此可见, 土壤含水率的减小, 会导致液流停滞时间推后。反之, 土壤含水率的增加会使液流谷值时间提前。

通过对液流峰值出现时间节点进行统计分析(图 6d~6f), 发现液流峰值出现的时间呈明显的双峰分布^[27], 上午峰值主要出现在 07:00—09:00, 下午出现在 13:00—15:00。这主要是受到辐射和土壤水分状况的综合作用, 当辐射强度过大, 或者土壤含水率较低时, 叶片的气孔导度降低甚至气孔完全关闭, 以减少蒸腾作用对树体水分的过度消耗。液流双峰变化在水分逆境中的耐旱植物上表现得尤为明显^[28-29], 但是不同土壤水分状况下液流峰值出现时间仍然存在明显的差异。2013 年(丰水年)峰值主要出现在 09:00 和 13:00, 2012 年(平水年)和 2014 年(枯水年)峰值主要出现在 07:00 和 13:00 左右, 在较好的土壤水分下, 液流上午的峰值会提前 1 h 左右出现。树体通过改变液流峰值出现的时间节点, 从而实现树体蒸腾的调控。湿润条件下会使得液流峰值出现的时间推后, 上午、下午峰值之间的时间间隔缩短, 树体气孔的“午休”时间减少, 保持较高蒸腾强度的时间延长, 反之则会使得液流峰值出现时间提前, 气孔“午休”时间延长。总之, 土壤水分较好条件下, 液流峰值出现时间推后, 谷值出现时间提前, 午休时间缩短, 反之亦然。

2.3.2 土壤含水率对生育前期蒸腾量的影响

由于枣树生育初期和中后期, 降雨和土壤水分差异明显(图 3), 蒸腾规律也存在明显的差异。在陕北地区降雨主要集中在枣树生长的中后期, 而前期降雨则相对较少。为了更准确地描述土壤水分和枣树蒸腾的关系, 分枣树生育期前期和中后期对其蒸腾和土壤水分的关系分别进行研究。

由图 7 可以看出, 2012—2014 年土壤含水率差异明显, 2013 年和 2014 年同期降雨仅有 42.0 mm 和 17.2 mm, 随着日蒸腾量的增加, 土壤含水率都出现了明显的下降。特别是 2014 年土壤含水率从 10.1% 下降到 7.3%, 土壤储水量减少 28.0 mm。2012 年同期降雨较多, 达到 61.5 mm, 使得土壤水分得到了及时补充, 土壤含水率一直保持在 7.5% 左右。生育前期蒸腾量总体呈现逐日增加趋势, 这主要是因为这一时期正处于树体的萌芽展叶和叶片生长期, 树体的叶面积和叶面积指数都在快速增加, 这和郑睿等在沙漠绿洲葡萄园观测到的结果一致^[30], 通过图 7 还可以看出树体蒸腾受到降雨的影响会出现波动。这主要是因为降雨造成环境温度的暂时降低, 进而减弱了树体的蒸腾作用, 使得日蒸腾量出现暂时回落, 随着环境温度的恢复蒸腾量会继续上升。

2.3.3 土壤含水率对生育中后期蒸腾量的影响

在枣树生长的中后期, 树体的叶面积增长缓慢, 甚至保持恒定, 此时蒸腾量的波动主要受到气象和土壤因子的影响。通过对日蒸腾量和土壤含水率的回归分析(图 8)发现, 土壤含水率和日蒸腾量呈现极显著的的正相关关系, 2012—2014 年决定系数分别达到 0.53、0.43、0.46。通过对比发现, 在平水年

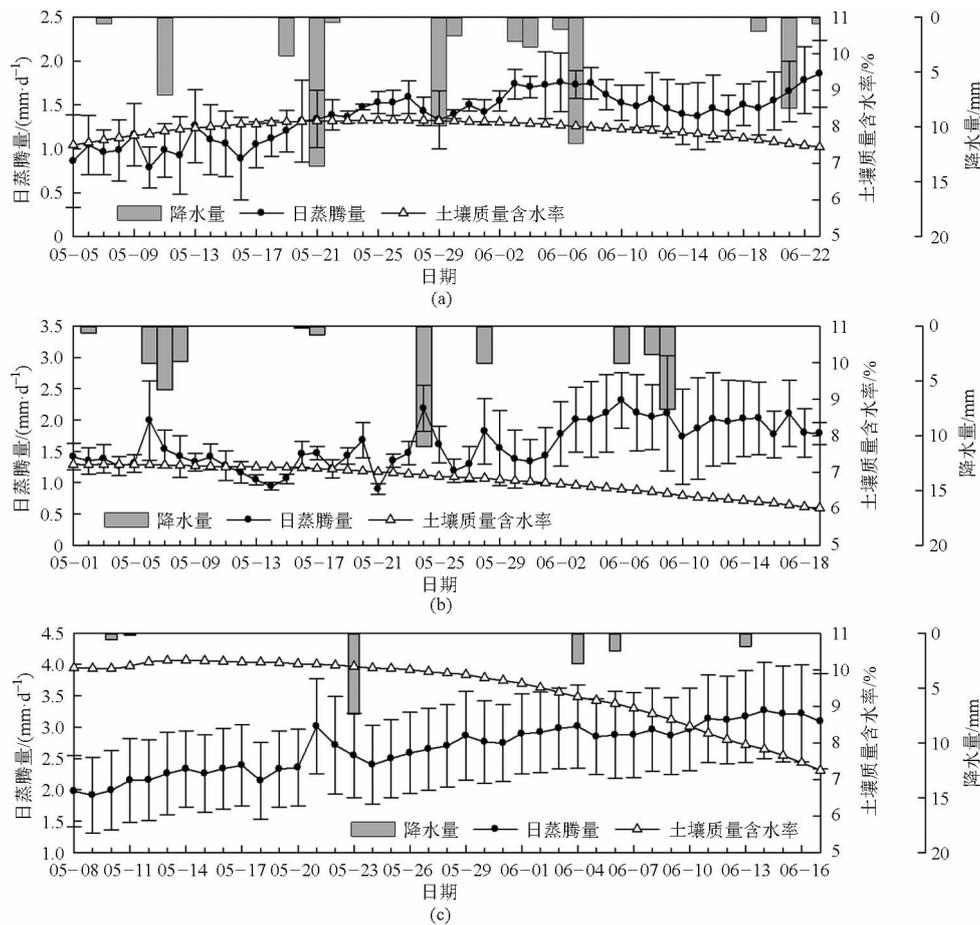


图7 土壤水分对枣树生育前期蒸腾的影响

Fig. 7 Influence of soil moisture on transpiration in early growth stage of jujube tree
(a) 2012年 (b) 2013年 (c) 2014年

(2012年,图8a),二者的相关性最好,而在丰水年(2013年,图8b)和枯水年(2014年,图8c)相关性则稍差。由此可见,在不同的土壤含水率条件下,其与蒸腾的响应程度存在一定的差异。当土壤含水率较高时,水分对蒸腾的限制作用减弱甚至消失,此时枣树的蒸腾主要受气象因子的影响。当土壤含水率较低时,土壤含水率对枣树蒸腾的抑制作用显著增强,土壤水分的改变会带来蒸腾对辐射、气温等气象因子的响应阈值和响应方式的改变。在土壤含水率较高的条件下,温度和辐射等气象因子会促进树体蒸腾和根系的水分吸收。但是在土壤水分状况较差

的条件下,较高的温度和辐射反而会降低叶片气孔导度,使得气孔开度较小甚至部分气孔关闭^[31]。这种树木在土壤水分逆境条件下对气象因子响应方式的改变,反而使得土壤含水率和蒸腾的相关关系有所降低。但总体而言,在枣树生长的中后期,枣树日蒸腾量和土壤含水率都呈现极显著的正相关关系。

3 结论

(1) 用中子仪和 TDT 水分探针两种监测方法对枣林地 0~1.0 m 土层的土壤水分状况进行对比分析,发现当土壤含水率较高时(2013年)两种方法的

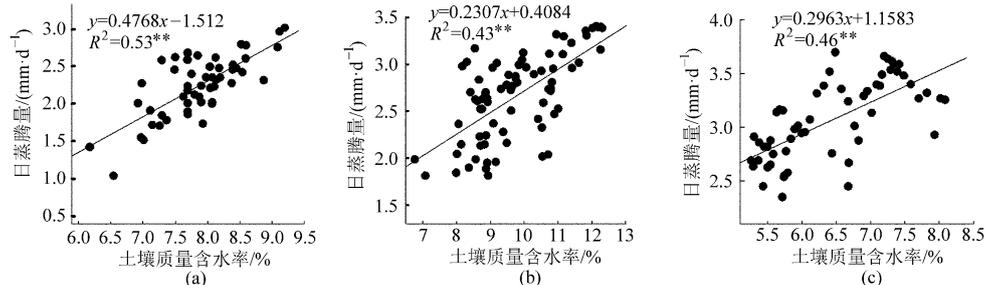


图8 土壤水分对枣树生育中后期蒸腾量的影响

Fig. 8 Influence of soil moisture on transpiration in mid-later growth stage of jujube tree
(a) 2012年 (b) 2013年 (c) 2014年

监测结果基本一致,而当土壤含水率较低时,中子仪监测结果略高于 TDT 探针。土壤含水率受降水影响显著,生育期波动剧烈,休眠期比较稳定。在丰水年(2013年)土壤含水率显著上升(土壤储水量增加 34 mm),中水年(2012年)和枯水年(2014年)分别出现轻度(-16.5 mm)和重度(-120 mm)的水分亏缺。

(2) 土壤水分波动在垂直方向上随着监测深度加深逐渐减小。垂向按其变异程度可分为:土壤水分变化层(0~2.6 m)、土壤水分干层(2.6~6.0 m)和土壤水分恢复层(6.0~10.0 m)。其中,在 7.0 m 和 9.2 m 深度处水分发生突变,在该层可能存在一定量的侧向补给。

(3) 液流监测参数在枣树的生育期和休眠期

差异很大,根据监测数据对枣树的生育期和休眠期进行了较为准确的界定,发现其界定结果和根据观测枣树萌芽、落叶确定的生育期长度基本一致,为 160 d,但会使得生育期的日期提前约 5 d。树木春季液流(蒸腾)启动后会经历大约 28 d 的增加过程,但液流的减弱和消失会在 2~3 d 内迅速完成。

(4) 土壤含水率较高的情况下会使得液流的谷值出现时间提前,峰值出现时间推后,液流“午休”时间缩短,反之亦然。枣树的日蒸腾量在生育前期主要受自身发育状况影响,呈现逐渐增加的趋势;而在生育中后期,日蒸腾量和土壤含水率关系密切,在不同水文年型下都呈现极显著的正相关关系。

参 考 文 献

- 1 韩永伟,高吉喜,王宝良,等. 黄土高原生态功能区土壤保持功能及其价值[J]. 农业工程学报, 2012, 28(17): 78-85, 294. Han Yongwei, Gao Jixi, Wang Baoliang, et al. Evaluation of soil conservation function and its values in major eco-function areas of Loess Plateau in eastern Gansu Province[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(17): 78-85, 294. (in Chinese)
- 2 新华网. 红枣产业成为黄河沿岸脱贫致富的“铁杆庄稼”[DB/OL] http://news.xinhuanet.com/fortune/2014-10/26/c_1112980371.htm, 2014-10-26.
- 3 易浪,任志远,张翀,等. 黄土高原植被覆盖变化与气候和人类活动的关系[J]. 资源科学, 2014, 36(1): 166-174. Yi Lang, Ren Zhiyuan, Zhang Chong, et al. Vegetation cover, climate and human activities on the Loess Plateau[J]. Resources Science, 2014, 36(1): 166-174. (in Chinese)
- 4 杨文治,邵明安,彭新德,等. 黄土高原环境的旱化与黄土中水分关系[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 1998(4): 357-365. Yang Wenzhi, Shao Ming'an, Peng Xinde, et al. The relationship between desiccation of Loess Plateau environment and Loess moisture[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 1998(4): 357-365. (in Chinese)
- 5 王力,邵明安,王全九,等. 黄土区土壤干化研究进展[J]. 农业工程学报, 2004, 20(5): 27-31. Wang Li, Shao Ming'an, Wang Quanjiu, et al. Review of research on soil desiccation in the Loess Plateau[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(5): 27-31. (in Chinese)
- 6 陈洪松,王克林,邵明安. 黄土区人工林草植被深层土壤干燥化研究进展[J]. 林业科学, 2005, 41(4): 155-161. Chen Hongsong, Wang Kelin, Shao Ming'an. A review on the effect of vegetation rehabilitation on the desiccation of deep soil layer on the Loess Plateau[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2005, 41(4): 155-161. (in Chinese)
- 7 Chen Dianyu, Wang Youke, Liu Shouyang, et al. Response of relative sap flow to meteorological factors under different soil moisture conditions in rainfed jujube (*Ziziphus jujube*) plantations in semiarid Northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2014, 136: 23-33.
- 8 王志强,刘宝元,张岩. 不同植被类型对厚层黄土剖面水分含量的影响[J]. 地理学报, 2008, 63(7): 703-713. Wang Zhiqiang, Liu Baoyuan, Zhang Yan. Effect of different vegetation type on soil moisture in deep loess soil profiles[J]. Acta Geographica Sinica, 2008, 63(7): 703-713. (in Chinese)
- 9 王涛,于冬雪,杨强. 陕北黄土高原地区降水时空变化特征[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(6): 24-28, 33. Wang Tao, Yu Dongxue, Yang Qiang. Characteristics of spatial-temporal change of precipitation in Loess Plateau area of northern Shaanxi[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2014, 25(6): 24-28, 33. (in Chinese)
- 10 Ma Lihui, Liu Xiaoli, Wang Youke, et al. Effects of drip irrigation on deep root distribution, root in depth, and soil water profile of jujube in a semiarid region[J]. Plant and Soil, 2013, 373(1-2): 995-1006.
- 11 程立平,刘文兆. 黄土塬区土壤水分分布特征及其对不同土地利用方式的响应[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 203-207. Cheng Liping, Liu Wenzhao. Soil moisture distribution in deep layers and its response to different land use patterns on Loess Tableland[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(9): 203-207. (in Chinese)
- 12 Clearwater M J, Meinzer F C, Andrade J L, et al. Potential errors in measurement of nonuniform sap flow using heat dissipation probes[J]. Tree Physiology, 1999, 19(10): 681-687.
- 13 Kigalu J M. Effects of planting density on the productivity and water use of tea (*Camellia sinensis* L.) clones: I. measurement of water use in young tea using sap flow meters with a stem heat balance method[J]. Agricultural Water Management, 2007, 90(3): 224-232.
- 14 Pfautsch S, Bleby T M, Rennenberg H, et al. Sap flow measurements reveal influence of temperature and stand structure on water use of *Eucalyptus regnans* forests[J]. Forest Ecology and Management, 2010, 259(6): 1199.

- 15 赵英,汪有科,韩立新,等. 山地枣树茎直径对不同生态因子的响应[J]. 生态学报, 2012, 32(17): 5476-5483.
Zhao Ying, Wang Youke, Han Lixin, et al. Response of upland jujube tree trunk diameter to different ecological factors [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(17): 5476-5483. (in Chinese)
- 16 Lu Ping, Urban L, Zhao Ping. Granier's thermal dissipation probe (TDP) method for measuring sap flow in trees: theory and practice [J]. Acta Botanica Sinica, 2004, 46(6): 631-646.
- 17 Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir and by means of sap flow measurements [J]. Tree Physiology, 1987, 3(4): 309-320.
- 18 杨德志,李琳琳,杨武,等. 中子法测定土壤含水率分析[J]. 节水灌溉, 2014(3): 14-15, 19.
Yang Dezhi, Li Linlin, Yang Wu, et al. A study on using neutron method to measure soil water content [J]. Water Saving Irrigation, 2014(3): 14-15, 19. (in Chinese)
- 19 赵平,邹绿柳,饶兴权,等. 成熟马占相思林的蒸腾耗水及年际变化[J]. 生态学报, 2011, 31(20): 6038-6048.
Zhao Ping, Zou Lülüu, Rao Xingquan, et al. Water consumption and annual variation of transpiration immature *Acacia mangium* plantation [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(20): 6038-6048. (in Chinese)
- 20 刘晓丽,汪有科,马理辉,等. 密植枣林地深层土壤水分垂直变化与根系分布关系[J]. 农业机械学报, 2013, 44(7): 90-97.
Liu Xiaoli, Wang Youke, Ma Lihui, et al. Relationship between deep soil water vertical variation and root distribution in dense jujube plantation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(7): 90-97. (in Chinese)
- 21 刘晓丽,马理辉,杨荣慧,等. 黄土半干旱区枣林深层土壤水分消耗特征[J]. 农业机械学报, 2014, 45(12): 139-145.
Liu Xiaoli, Ma Lihui, Yang Ronghui, et al. Deep soil water depletion characteristics of jujube plantation in loess semiarid region [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12): 139-145. (in Chinese)
- 22 张子祥. 陇东黄土高原地下潜水富水规律探讨[J]. 中国煤田地质, 2000, 12(4): 40-41, 48.
Zhang Zixiang. Explore the rich underground water diving laws in Longdong Loess Plateau [J]. Geology of China, 2000, 12(4): 40-41, 48. (in Chinese)
- 23 崔长美,王孝安,郭华,等. 黄土高原天然柴松纯林不同坡位幼苗更新特性研究[J]. 中国农学通报, 2011, 27(4): 48-52.
Cui Changmei, Wang Xiaohan, Guo Hua, et al. Studies on the seedlings regeneration of *Pinus tabulaeformis* f. *shekannensis* in different slopes on Loess Plateau [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(4): 48-52. (in Chinese)
- 24 丁国华. 根压与根系的主动吸水[J]. 植物生理学通讯, 1993(2): 123.
- 25 梁宗锁,邵明安,张建华. 土壤干旱条件下木质部汁液成分变化及其在根冠信号传递中的作用[J]. 植物生理学通讯, 2002(1): 62-66.
Liang Zongsuo, Shao Ming'an, Zhang Jianhua, et al. Change of xylem sap composition and its role in signal transduction from root to shoot communication under soil drying [J]. Plant Physiology Communications, 2002(1): 62-66. (in Chinese)
- 26 孙林,熊伟,管伟,等. 华北落叶松树体储水利用及其对土壤水分和潜在蒸散的响应: 基于模型模拟的分析[J]. 植物生态学报, 2011, 35(4): 411-421.
Sun Lin, Xiong Wei, Guan Wei, et al. Use of storage water in *Larix principis-ruprechtii* and its response to soil water content and potential evapotranspiration: a modeling analysis [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011, 35(4): 411-421. (in Chinese)
- 27 王力,王艳萍. 黄土塬区苹果树干液流特征[J]. 农业机械学报, 2013, 44(10): 152-158, 151.
Wang Li, Wang Yanping. Characteristics of stem sap flow of apple trees in loess tableland [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 152-158, 151. (in Chinese)
- 28 徐炳成,山仑,黄瑾. 黄土丘陵区不同立地条件下沙棘光合生理日变化特征比较[J]. 西北植物学报, 2003, 23(6): 949-953.
Xu Bingcheng, Shan Lun, Huang Jin. Comparison diurnal course of photosynthetic characteristics of seabuckthorn at different site conditions in semiarid loess hilly-gully region [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2003, 23(6): 949-953. (in Chinese)
- 29 张毓涛,王文栋,李吉玫,等. 新疆乌拉泊库区沙枣与胡杨光合特性比较[J]. 西北植物学报, 2011, 31(2): 377-384.
Zhang Yutao, Wang Wendong, Li Jimei, et al. Comparison of photosynthetic characteristics of *Elaeagnus angustifolia* and *Populus euphratica* in Wulab reservoir area of Xinjiang [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2011, 31(2): 377-384. (in Chinese)
- 30 郑睿,康绍忠,佟玲,等. 不同天气条件下荒漠绿洲区酿酒葡萄植株耗水规律[J]. 农业工程学报, 2012, 28(20): 99-107.
Zheng Rui, Kang Shaozhong, Tong Ling, et al. Water consumption of wine grape under different weather conditions in desert oasis [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(20): 99-107. (in Chinese)
- 31 李茂松. 作物奢侈蒸腾及其调控基础研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2010.
Li Maosong. Research on luxury transpiration and its modification [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2010. (in Chinese)