doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.015

黄土丘陵半干旱区枣林露水量研究

高志永¹ 汪有科^{2,3} 汪 星² 周玉红² 赵 英^{1,2} 郭旭新^{1,2} (1.杨凌职业技术学院水利工程分院,陕西杨凌 712100; 2.西北农林科技大学水利与建筑工程学院,陕西杨凌 712100; 3.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西杨凌 712100)

摘要:利用 2012 年和 2013 年叶片湿度传感器(LWS)、温湿度仪、热扩散式探针(TDP)、中子仪实测的露水强度、冠层温湿度、树干径流、土壤水分及气象站监测的气象因子,分析了枣林生育期内露水量的变化规律,探讨了其与水资源输入、输出项的关系。研究结果表明,2012 年和 2013 年枣林露水量随生育期变化呈现递增趋势,果实成熟期达到最大值。露水总量分别为 31.31、37.87 mm,分别占同期降水量、蒸腾量和蒸发量的 6.87%、10.00%、17.65% 和 7.90%、15.00%、17.90%,露水量日平均值分别达 0.44、0.47 mm。此外,露水量具有发生频率高、稳定性强、重度露水量(大于 0.20 mm)比重大的特点。在枣树全生育期内,露水量作为水资源输入项会引起蒸腾量在果实膨大和成熟期显著降低(P < 0.05),但对蒸发量无显著影响。研究显示露水是该区枣林重要水源,是水量平衡中不可缺少的输入项。

关键词:黄土丘陵 半干旱区 露水量 降水量 蒸腾量 蒸发量 中图分类号: P426.3; S715.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2015)10-0105-11

Dew Amount of Jujube Plantation in Semi-arid Loess Hilly-gully Region

Gao Zhiyong¹ Wang Youke^{2,3} Wang Xing² Zhou Yuhong² Zhao Ying^{1,2} Guo Xuxin^{1,2}

(1. Department of Water Conservancy, Yangling Vocational & Technological College, Yangling, Shannxi 712100, China

2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shannxi 712100, China

3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Ministry of Water Resources,

Yangling, Shannxi 712100, China)

Abstract: Dew is one of the important water sources for plants growing, especially in arid and semi-arid regions. However, it was seldom researched. The dew amount and its relationships with input-output of water resources in the jujube plantations in semi-arid Loess hilly-gully region were investigated during jujube growth periods in 2012 and 2013, depending on the dew intensities, canopy temperature, canopy relative humidity, sap flow, soil moisture and meteorological factors which were measured by the dielectric leaf wetness sensor (LWS), the VP – 3 relative humidity/temperature sensor, thermal diffuse probe (TDP), neutron probe and meteorological station, respectively. The results showed that the dew amount increased throughout the jujube growth seasons and reached its maximum value at the fruit ripening stage. The cumulative dew amounts during jujube growth periods in 2012 and 2013 were 31.31 mm and 37.87 mm, respectively, which accounted for 6.87% and 7.90% of rain, 10.00% and 15.00% of transpiration, and 17.65% and 17.90% of evaporation at the same period, respectively. The dew amount with high frequency and strong stability had a large proportion of heavy dew in the jujube plantations in the Loess hilly-gully region. As one of the input water resources, dew significantly reduced jujube transpiration during fruit enlargement and ripening stages (P < 0.05), but had no significant

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

收稿日期: 2015-01-15 修回日期: 2015-02-05

^{* &}quot;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:高志永,助教,主要从事节水灌溉新技术研究,E-mail: GZYstruggling@163.com

effect on evaporation. It is indicated that dew is an important part of water resource which affects regional water balance in the jujube plantations in semi-arid Loess hilly-gully region and it should not be ignored.

Key words: Loess hilly-gully region Semi-arid region Dew amount Rainfall Transpiration Evaporation

引言

在干旱半干旱地区,自然水资源短缺,露水成为 重要的水资源^[1-3],甚至是极端干旱地区植物的唯 一液态水源^[4]。露水不仅是生物结皮、昆虫和小动 物的主要水源^[5],而且能够被某些植物冠层叶片直 接吸收来补充体内亏缺的水分^[6-9],降低其周围的 水汽压差,促进植物气孔开放和光合作用^[10],进而 影响冠层温度^[11]。另一方面,露水是引起叶片湿润 的主要因素^[12],植物叶片的长期湿润会引起病菌孢 子的繁殖^[13-14],降低杀菌剂对植物的药效,影响灰 霉病和锈病的防治^[15]。

迄今为止,关于植物叶片露水持续时间的研究 已得到广泛关注^[16-21],但露水量的研究仅停留在湿 润区的玉米、大豆、水稻等农作物^[15,22-23],或干旱荒 漠区的乔木、灌木、被毛植物、生物结皮等方 面^[3,24-25]。众所周知,叶片温度低于露点温度是结 露的必要条件。然而,由于植物种类及地域的差异, 冠层叶片的温度各异,从而影响到植物冠层结露与 否和结露的多寡。此外,露水量也会因不同种类及 种间的植物叶片吸水能力差异而受到影响^[26]。

枣树因具有适应性、耐旱性强的特性和显著的 经济收益,已成为黄土高原退耕还林的主要经济树 种,截止2010年其种植面积已达100万hm^{2[27]}。目 前对于黄土高原半干旱区露水量研究甚少,仅对砂 石覆盖条件下的露水量^[1]和土壤表层露水量形成 的物理特征进行了研究^[28],关于黄土丘陵半干旱区 枣树冠层露水量研究尚未见报道。本文采用拟合的 数学公式对缺失的枣树冠层露水量数据进行填补, 利用实测的降水量、蒸腾量和土壤水分数据,并借助 水量平衡原理对蒸发量进行计算。分析露水量在枣 树生育期内的分布规律和在水资源输入、输出项中 所占份额,并探讨露水量与降水量、蒸发量、蒸腾量 的关系。以期为正确评价露水量对黄土丘陵区生态 效应提供依据,也为水量平衡中露水作为水资源输 入项提供支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验在米脂县银州镇孟岔村山地红枣示范基地 进行。米脂县(109°28′E、37°12′N)属于典型的黄土 高原丘陵沟壑区,中温带半干旱性气候。年均日照 时数 2 761 h,日照百分率 62%,年总辐射量 580.5 kJ/cm²,年平均气温 8.4℃。年均降水量 451.6 mm,其中7、8 月份降水量占全年降水量的 49%。土壤以黄土母质上发育的黄绵土为主,质地 为粉壤土。以无定河为分水岭,地势总体西北高东 南低。海拔高度最高1252 m,平均为1049 m。地 貌主要以峁、沟、梁、川为主,构成梁峁起伏、沟壑纵 横、支离破碎的特殊地貌景观(图1)。



图 1 研究区位置 Fig. 1 Location of study area

1.2 研究方法

监测对象为 5 a 生矮化梨枣树,树体的株行距为 2 m × 3 m,选取树体长势和冠层大体一致的枣树 3 株,树体平均高度(2 ± 0.12) m。2012 年,枣树的 生育期为 5 月 10 日—10 月 15 日。分为 4 个生育

期,分别为萌芽展叶期(05-10-06-15)、开花坐果 期(06-16-07-15)、果实膨大期(07-16-08-31)、果实成熟期(09-01-10-15)。2013年,枣树 的生育期为5月13日-10月17日。4个生育期的 时间分别为05-13-06-17、06-18-07-20、07 $21 - 09 - 08, 09 - 09 - 10 - 17_{\circ}$

1.2.1 冠层内露水量及气象因子测定

在选取的 3 株枣树冠层顶部各放置温湿度仪 (Temperature & humidity sensor, Decagon),记录冠层 温度和相对湿度。采用 Decagon 公司生产的高分辨 率且 无 需 校 准 的 电 介 质 式 叶 片 湿 度 传 感 器 (Dielectric leaf wetness sensor, LWS)监测枣树冠层 露水强度^[29],将传感器水平置于温湿度仪上,同时 使传感器的叶尖指向正北方^[15]。由于仪器购置较 晚,2012 年的监测日期为 8 月 15 日—10 月 15 日, 2013 年整个生育期内均进行了监测。数据由 EM50 (Decagon)每隔 15 min 自动采集一次。对于露水量 而言,目前尚无明确定义^[1,30],本文根据 Zangvil^[30] 提出的方法,规定一日内露水强度 *I_i* 的最大值所对 应的 *W_{di}*值为该日内的日露水量。本文采用 Xu 等^[23]和 Kabela 等^[15]的公式计算露水量,即

$$W_{di} = 2I_i LAI_i \tag{1}$$

式中 W_{di}——第*i*时段的计算露水量,mm

 I_i ——仪器 LWS 所测第 i 时段的露水强度, mm

LAI_i——第 i 时段的叶面积指数

式中2表示植物叶片正反两面的系数。

1.2.2 叶面积指数测定

采用基于冠层孔隙度分析的 Winscanopy 叶面 积指数仪测定 LAI,步长为 10 d。为了获取 LAI 的 日动态,利用 Logistic 生长函数对 LAI 变化进行了拟 合,效果良好。其中,2012 年叶面积指数拟合方程为

 $LAI = \frac{2.93}{1 + \exp(-0.049(D_{oy} - 154.91))} (R^2 = 0.93)$ 式中 D_{oy} —年积日

2013年叶面积指数拟合方程为

$$LAI = \frac{3.12}{1 + \exp(-0.052(D_{oy} - 151.38))} \quad (R^2 = 0.91)$$

1.2.3 环境气象因子测定

在试验点附近布设小型气象站,监测步长为 10 min,测量要素包括:降水量(P,mm)、总辐射(R, W/m²)、光合有效辐射(P_{AR} ,W/m²)、风速(u,m/s)、 温度(T, \mathbb{C})和相对湿度(RH,%)。

1.2.4 蒸腾量测定

在选取的3株梨枣树干北侧,距离地表40 cm 处各安装一组热扩散式探针(Thermal diffuse probe, TDP),利用CR1000数据采集器每10 min 收集一次 瞬时树干液流速率,并结合测定的树干导水面积 (边材面积)测定树体的蒸腾耗水。

考虑到在较低的饱和水汽压差下,测量树干液 流的 TDP 探针会出现较大的误差^[31]。叶面积指数 显著影响液流^[32-33],为消除测量误差,利用测定的 树干液流除以同期的叶面积指数作为相对液流来反 映树木蒸腾趋势^[34]。相对液流计算公式为

$$S_{FR} = \frac{S_F}{LAI} \tag{2}$$

式中 S_{FR} —相对液流,kg/(d·m²)

 S_F ——测量的液流,kg/(d·m²)

1.2.5 土壤水分测定

在枣树株间和行间分别布设深度为3m中子管(铝管)。利用中子仪每隔10d以20cm为步长测定0~3m土层内体积含水率。2012、2013年土壤水分的测定起始日期分别为4月30日和4月23日,测定枣树各生育期内土壤水分观测值的平均值,见图2。



图 2 2012 年和 2013 年枣树全生育期内的土壤水分状况 Fig. 2 Soil water content of jujube growth periods in 2012 and 2013 (a) 2012 年 (b) 2013 年

液流与土壤水分密切相关^[35],相对有效水分是 评价土壤水分是否限制树干液流的一个评价指 标^[32,36]。根系吸水策略是植物获取有效水分的主 要途径,Ma等^[37]的研究表明,枣树的主要吸水根系 集中在0~1m的土层内。因此,0~1m土层内的 土壤水分被用于计算有效土壤水分。相对有效用水 率的计算式为

$$\theta_e = \frac{\theta - \theta_w}{\theta_c - \theta_w} \tag{3}$$

式中 0。——相对有效用水率

 θ_w ——凋萎系数

 θ_{c} ——田间持水率

θ——土壤含水率

1.2.6 土壤蒸发量的计算

枣树种植在水平阶地上,生育期内未观测到地 表液流。此外,叶面积指数较低,故忽略冠层截留。 结合气象站监测的降水资料,以水量平衡法计算蒸 发量

$$E_{i} = P_{i} + V_{i}^{o} - V_{i} - T_{ri}$$
(4)

$$T_{ii}$$
——第*i*时段内枣树的蒸腾量,mm

0~3 m 土层内土壤储水量为有效储水量,其计 算公式为

$$V = \theta h \tag{5}$$

式中 V——土壤储水量,mm

h-----土层深度,mm

1.3 数据处理

采用 SPSS 18 进行数据统计分析,利用 Origin 8.5 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 露水强度与气象因子

露水形成是一个极其复杂的过程,与空气的动 力学和热力学特性有关^[38],因而与水汽分布、水分 输送、凝结过程有关的环境因素均会影响结露过 程^[39]。为进一步理解冠层露水强度与冠层气象因 子的关系,进行时尺度和日尺度露水强度与气象因 子的相关性分析(表1)。表1表明,在时尺度上,露 水强度与相对湿度 RH、温度 T、饱和水汽压差 VPD、 温度露点差 DPD、最大与最小温度之差 T_{max-min}、风 速 u 均表现出显著性相关,与 DPD 的相关性最强 (r = -0.484)。在日尺度上,露水强度仅与温度 T、 温度露点差 DPD、最大与最小温度之差 T_{man}相 关,与 DPD 的相关性最强(r = -0.335)。可见,露 水强度与影响因子相关性的强弱随尺度的变化而发 生变化,但气象因子对露水强度的正反影响不会随 时间尺度的变化而发生变化。RH、VPD 的大小直接 反映空气中水汽接近饱和的程度。较高的 RH、较 小的 VPD 为结露提供充足的水汽。温度 T 是饱和 水汽压的函数,温度升高,饱和水汽压增大,空气中 的水汽难以达到饱和,空气容纳水汽的能力增强,结 露不易发生。反之,温度降低,使得空气承载水汽能 力减弱,露水容易形成。因此,T_{max-min}值增大,过剩 的水汽将凝结成为露水。露点温度 DPD 是判断空 气中水汽是否凝结为露水的指标,DPD 增大,表示 温度远离露点温度,露水难以形成。风速 u 对露水 形成存在不确定性,可起正面或反面的作用^[28,38], 该研究区域风速抑制了露水的形成。此外,无论在 时尺度还是日尺度上,DPD 对露水强度影响最大。 时尺度上的气象因子与露水强度的相关性大小更能 准确反映出其对露水瞬时变化的影响,而在日尺度 上,露水强度因气象因子求均值或累加,其敏感性可 能被淹没。因此,在露水强度的计算中,采用时尺度 上的数据来建立露水强度方程。

表 1 不同时间尺度冠层露水强度与冠层各气象因素的相关性分析 Tab.1 Correlation analysis of dew amount and meteorological factors on canopy at different time scales

时间尺度	参数	RH/%	<i>T∕</i> ℃	VPD/kPa	DPD∕℃	$T_{\rm max-min}$ /°C	$u/(\mathbf{m} \cdot \mathbf{s}^{-1})$
时尺度	Pearson 相关系数 r	0. 220 * *	-0.371 * *	-0.129 * *	-0.484 * *	0. 089 * *	-0.146 * *
	<i>P</i> 值	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
日尺度	Pearson 相关系数 r	0.129	-0.308 *	-0.212	-0.335 * *	0.304 * *	- 0. 162
	<i>P</i> 值	0.327	0.030	0. 139	0.026	0.006	0.260

注:**表示在 P < 0.01 水平(双侧)显著相关,*表示在 P < 0.05 水平(双侧)显著相关。

2.2 露水强度的计算

由于缺乏 2012 年的部分实测露水强度资料,通 过利用 2013 年(05 - 10—10 - 17) 枣树冠层时尺度 气象资料建立露水强度方程,并借助 2012 年(05 -10—08 - 15) 气象站实测气象数据来估算 2012 年缺 失的露水强度数据。露水强度与气象因子的相关性 分析表明,在时尺度上,露水强度与所列举的各因子 均显著相关。其中温度和相对湿度是控制露水形成 的两个关键性因素^[1,23,40]。DPD 是相对湿度和温 度的函数,与露水强度的相关性最大。此外,DPD 在日尺度上对露水强度也表现出最强的相关性。因 此本研究仅考虑温度和相对湿度两因子对露水强度 的影响,采用 2013 年实测部分冠层温度、相对湿度 和露水强度数据,建立露水强度与 DPD 的回归方 程。图 3 为 05 - 10—07 - 20 (图 3a)和 07 - 21— 10 - 17 (图 3b)不同时段冠层相对湿度和温度条件 下,露水强度与 DPD 的回归方程,其具有较好的拟 合效果(*R*² > 0.80)。

为了评估拟合方程对露水强度的估算效果,采 用未参与建模的气象数据,借助回归方程分别计算 相应时段内的露水强度,并将其作为露水强度的估 计值。以 LWS 所测相同时段内露水强度为实测值, 绘制估计值与实测值的散点图(图4)。选取决定系 数 R^2 、拟合指数 W、置性指数 C、平均偏离差 MBE、 平均离差 MAE 为评价指标进行误差分析,其计算方 法参见 Sentelhas 等的方法^[21],计算结果见表 2。从 图 4 可以看出,估计值与实测值的回归线接近于 1:1线,说明模型能够较好地估算露水强度。表 2 中





(a) 05 - 10-07 - 20 (b) 07 - 21-10 - 17

模型的平均偏离差 MBE 均接近于 0,也表现出了同 样的结果。此外,表 2 表明,利用模型均能准确地估 测露水强度(W 值变化范围为 0.94 ~ 0.96, R²值变 化范围为 0.80 ~ 0.84, C 值变化范围为 0.84 ~ 0.86)。

表 2 露水强度模型的回归检验

 Tab.2
 Regression analysis and errors related to estimated dew intensity by models

	模型	R^2	W	С	MAE	MBE
	1	0.80	0.94	0.84	0.0046	- 0. 001 3
_	2	0.84	0.96	0.86	0.0098	0.0008
	注:	模型1为	y = 0.01	x ^{-0.4} (🕅	3a),模型	则 2 为 y =

 $e^{-4.22+13.22x+179.50x^2}$ (图 3b)。

图 5 为冠层温度、相对湿度与大气温度、相对湿度的统计关系图。实测日期内(2013 年 05 - 10-10-17),以10 d 步长作为典型日,时间步长为1 h, 图 5a、5c 为实测典型日冠层温度与大气温度、冠层 相对湿度和大气相对湿度的时变化,图 5b、5d 为实 测典型日冠层温度与大气温度、冠层相对湿度和大 气相对湿度线性回归。图 5a、5c 表明,典型日内大 气温度和相对湿度与冠层温度、相对湿度的变化同 步调。此外,图 5b、5d 显示,利用线性回归方程能够 很好地将大气温湿度转化为冠层温湿度(*R*² > 0.93)。可见,借助实测时尺度气象数据建立的大 气温湿度与冠层温湿度函数关系,能够将时尺度大 气温湿度转化为冠层温湿度,并采用转化后的冠层 温湿度逐日计算 DPD。根据 2013 年统计的露水发 生频率发现 DPD 值不大于 1.5℃即可结露。因此, 以 1.5℃的 DPD 值作为判断能否结露的标准,甄别 出结露日。根据结露日内的 DPD 值,利用模型 1、2 来估算 2012 年缺失的露水强度数据。

2.3 露水量

图 6a 为利用露水强度方程对 2012 年缺失露水 量进行填补后得到的露水量图,图 6b 为 2013 年实 测露水量。从图 6 中可以看出,观测日内露水量呈 现不规则的变化趋势,这可能与冠层复杂的气象因 子有关,露水量的多寡取决于温度、相对湿度等诸多 气象因子。

表 3 为 2012 年和 2013 年枣树生育期内的水资 源输入和输出量,表 3 表明,露水量在枣树全生育期 所占同期水资源输入和输出量比重不均。2012 年和 2013 年枣树全生育期总露水量分别占同期降水量、蒸 腾量和蒸发量的 6.87%、10.00%、17.65% 和 7.90%、 15.00%、17.90%。此外,露水量随着枣树生育期延长



图 5 冠层温度、相对湿度与大气温度、相对湿度的统计关系

Statistical relationship between canopy temperature, canopy relative humidity and air temperature, air relative humidity Fig. 5





而增加,果实成熟期是露水量发生的最主要时段。 2012、2013年果实成熟期内露水量是其他3个生育期 总和的1.43和1.23倍。枣树在不同的生育期内对水 分的需求不同,水分在果实品质形成过程中起着关键 作用[41],可见,果实成熟期凝结在枣果上较大量的露水 被枣果直接吸收,对枣果品质形成有一定的影响。

枣树生育期内降水量、蒸腾量、蒸发量及露水量 表 3

	Tab. 3 Rainfall, transpiration,	evaporation and dev	v amount during j	ujube growth periods	mm
年份	生育期	降水量	蒸腾量	蒸发量	露水量
	萌芽展叶期(05-10-06-15)	53.80	65.34	39.38	0. 23
	开花坐果期(06-16-07-15)	106.80	68.54	39. 51	2.58
2012	果实膨大期(07-16-08-31)	142.40	106.01	42.99	10.07
	果实成熟期(09-01-10-15)	152.90	73.27	55.56	18.43
	全生育期(05-10-10-15)	455.90	313.16	177.44	31.31
	萌芽展叶期(05-13-06-17)	29.00	49.81	41.68	1.85
	开花坐果期(06-18-07-20)	190.00	61.85	55.27	3.42
2013	果实膨大期(07-21-09-08)	158.40	77.68	61.21	11.74
	果实成熟期(09-09-10-17)	101.60	63.16	53.43	20.86
	全生育期(05-13-10-17)	479.00	252.50	211.60	37.87

讨论 3

3.1 露水量与降水量

2012年和2013年枣树全生育期内的总露水量 分别为 31. 31 mm 和 37. 87 mm, 远小干同期的降水 量,其发生次数分别为71、80次,频率分别为 45.22% 和 50.96%, 而 2012 年和 2013 年枣树全生 育期内普通降水的天数为40、45 d,发生频率为 25.48%和 28.66%,小于露水发生频率。由此可 见,虽然露水量小干降水量,但可以频繁发生,具有 降水所不及的普遍性。降水量在枣树全生育期内的 变异系数为 162.32% 和 117.85%, 露水量的变异系 数为 80.82% 和 74.28%, 2012、2013 年降水量与露 水量变异系数在枣树各生育期的比值分别为 3.19~

5.07、1.06~3.87(表4)。说明露水量无论在枣树 的整个生育期还是在各生育期内,其变异系数要小 干降水量,显示出稳定性的特点。

2012、2013年露水量变化范围分别为 0.006 8~ 1.32 mm 和 0.014~1.22 mm(图 6),日平均值分别 为 0.44 mm 和 0.47 mm。Kidron^[42]的研究结果表明 露水量大干 0.03 mm 即能够被微生物利用,那么黄 土丘陵半干旱区这一量级的露水量无论对微生物还 是枣树均有利。此外,根据 Kabela 等^[15] 对露水量 等级的定义,重度露水量(露水量大于0.2 mm)无论 在2012年还是2013年发生的频率都大于70%。可 见,露水在黄土丘陵半干旱区不仅频发而且量较大, 是该区植物的另一重要水源,是水资源的一个输入 项。

表 4 降水量、蒸腾量、蒸发量及露水量在枣树各生育期内的变异系数

1 ab. 4	variation coefficient of rannan,	transpiration, evaporation a	and dew amoun	it during Jujube gro	owin periods %
年份	生育期	隆水量	蒸腾 量	蒸发量	露水量

年份	生育期	降水量	蒸腾量	蒸发量	露水量
	萌芽展叶期(05-10-06-15)	86.11	31.69	21.52	37.63
	开花坐果期(06-16-07-15)	108.39	18.22	9.46	15.56
2012	果实膨大期(07-16-08-31)	140. 26	22.39	31.12	64.13
	果实成熟期(09-01-10-15)	233. 62	24.88	48.04	46.12
	全生育期(05-10-10-15)	162.32	27.00	25.61	80. 82
	萌芽展叶期(05-13-06-17)	93.06	49.81	26.60	87.58
	开花坐果期(06-18-07-20)	123.27	59.14	45.24	39.83
2013	果实膨大期(07-21-09-08)	104. 79	37.71	51.87	55.28
	果实成熟期(09-09-10-17)	138.79	27.13	43.11	35.86
	全生育期(05-13-10-17)	117.85	48.87	46. 62	74. 28

3.2 露水量与蒸腾量

随着生育期的变化,露水量占蒸腾量的比重呈 现增加趋势,2012年和2013年露水量与蒸腾量在 4个生育期内的比值分别为 0.35%、3.76%、 9.50%、25.15%和3.71%、5.53%、15.11%、 33.03%。此外,仅在开花坐果期,蒸腾量的变异系 数大于露水量的变异系数,在其他生育期内蒸腾量 的变异系数小于露水量的变异系数,其比值的变化 范围为 0.35~0.84 和 0.57~0.76(表 4)。为了探 讨露水量与蒸腾量的关系,绘制了 2012 年和 2013 年枣树各生育期内蒸腾量和蒸腾量与露水量差值图 (图7),图7表明,萌芽展叶和开花坐果期,露水量 对蒸腾量影响不显著,但任何水资源的输入对生 态系统都具有积极影响^[43]。在果实膨大和果实成



枣树各观测生育期内蒸腾量及蒸腾量与露水量差值

Fig. 7 Transpiration and difference between transpiration and dew amount during jujube growth periods in 2012 and 2013

(a) 2012 年 (b) 2013 年

熟期,蒸腾量和蒸腾量与露水量差值存在显著性 差异(P<0.05),即露水量较大,能够影响蒸腾量, 可作为叶片直接获取水分的水源。植物在夜间通 过利用角质层、专门化的吸收毛或排水器来吸收 叶片表面的露水^[26],增加叶片组织含水量以补充 因蒸腾而损失的水分,达到改善植物体内水分的 目的^[44]。

Li^[1]、Xu 等^[45]、Beysens^[2]和 Ye 等^[38]认为相对 湿度和温度是影响露水的关键性因子。表 5 为 2012 年及 2013 年枣树冠层各生育期内的日平均相 对湿度及温度。从表 5 可以看出,果实膨大和成熟 期的冠层相对湿度显著高于萌芽展叶和开花坐果 期,冠层较高的相对湿度为露水的形成提供了充足 的水汽来源。果实成熟期的冠层温度显著低于其他 生育期,而果实膨大期的温度显著高于果实成熟期, 接近于萌芽展叶或开花坐果期。相对湿度是温度的 函数^[46],相对湿度的变化会影响到温度。果实膨大 期显著较高的冠层湿度会影响到冠层温度,使得枣 树叶片保持相对较低的温度而易于达到露点温度。 正是由于冠层相对湿度和温度为露水形成提供了良 好的环境条件,致使露水量在果实膨大和成熟期急 速递增,在成熟期达到最大(表3)。

表 5 枣树冠层相对湿度和温度在各生育期内的显著性分析 Tab.5 Significance analysis of relative humidity and temperature during jujube periods

年份	参数	萌芽展叶期	开花坐果期	果实膨大期	果实成熟期
2012	日平均相对湿度/%	54 ± 7^{a}	$62 \pm 7^{\mathrm{b}}$	$70 \pm 13^{\circ}$	84 ± 4^{d}
	日平均温度/℃	20.05 ± 3.31^{a}	24.73 $\pm 1.68^{b}$	21.86 \pm 3.16 ^b	10. 31 \pm 3. 85 °
2013	日平均相对湿度/%	56 ± 9^{a}	56 ± 12^{a}	$71 \pm 4^{\rm b}$	$74 \pm 6^{\mathrm{b}}$
	日平均温度/℃	21.75 ± 3.49^{a}	25.80 $\pm 2.92^{b}$	21.70 \pm 3.30 ^{ac}	13.96 \pm 3.19 ^d

树木蒸腾与其树干液流速率呈现线性关系,树 干液流速率能够被用来估算树木的蒸腾耗水^[47-48], 因此树干液流速率能够很好地表征树木的蒸腾状 况^[49]。而相对液流排除了其他因素干扰,因此采用 相对液流来描述蒸腾趋势。图 8a 表明,在生育期 内,相对液流呈现下降趋势。也就是说,枣树蒸腾耗 水量随着生育期的变化逐渐减小。此外,Oren 等^[50] 认为土壤水分作为影响植物气孔开关的关键因素, 它直接作用于液流对气象因子的响应。图 8b 显示, 生育期内的可利用水分均小于 0.4。此时会出现水 分胁迫,进而影响到蒸腾^[51]。低于 0.4 的有效水分 限制了枣树蒸腾,使得蒸腾量在整个生育期内相对 较低。但露水量随着生育期变化,逐渐增加,在果实 膨大和成熟期快速增加。进而导致蒸腾量和蒸腾量 与露水量差值在果实膨大和成熟期存在显著性差 异。



图 8 枣树生育期内相对液流及土壤相对有效用水率



3.3 露水量与蒸发量

随着生育期的变化,露水量占蒸发量的比重呈 现增加趋势,2012 年和 2013 年露水量与蒸发量在 4 个生育期内的比值分别为 0.58%、6.53%、 23.42%、33.17% 和 4.44%、6.19%、19.18%、 39.04%(表3)。此外,在果实成熟期,蒸发量的变 异系数大于露水量的变异系数(表4)。为了探讨露 水量与蒸发量的关系,绘制枣树各生育期内蒸发量 和蒸发量与露水量差值图(图9),图9a、9b表明, 2012年和2013年枣树全生育期内,露水量对蒸发 量均无显著影响(P<0.05),即植物叶片露水量的 多寡不足以影响土壤蒸发。

本研究仅分析了植物冠层结露状况,事实上,土 壤水分也会因表层温度低于露点温度而发生凝结现 象^[10]。王胜等^[28]的研究表明黄土高原半干旱区秋 季土壤表层日最大凝结量可以达到 0.33 mm,非降 水性水分来源(土壤吸附水和土壤露水)超过陆面 总水分来源的 15%^[52]。可见土壤表层凝结水不应 被忽视。在干旱条件下,土壤因蒸发失去水分平衡。 凝结在土壤表层的露水被土壤吸收,缓解土壤因蒸 发损失的水分,露水通过改善土壤水分平衡间接对植 物生存或生长产生积极影响^[53]。土壤表层温度也因露 水蒸发散热而降低,进而引起土壤蒸发量相应减少,露 水对蒸发量的减少也起着一定的作用^[54]。



图 9 枣树各观测生育期内蒸发量及蒸发量与露水量差值

Fig. 9 Evaporation and difference between evaporation and dew amount during jujube growth periods in 2012 and 2013 (a) 2012 年 (b) 2013 年

4 结论

(1) 枣林露水量经验模型能够较准确地估算出 2012 年枣林生育期内缺失的部分露水量数据。无 论是 2012 年还是 2013 年, 枣林露水量均随生育期 延长呈现递增趋势, 果实成熟期达到最大值。总露 水量值分别为 31. 31 mm 和 37. 87 mm, 分别占同期 降水量、蒸腾量和蒸发量的 6. 87%、10.00%、 17. 65% 和 7. 90%、15. 00%、17. 90%。

(2)2012年、2013年黄土丘陵半干旱区枣林生

育期露水的发生频率为 45.22% 和 50.96%,变异系数为 80.82% 和 74.28%,与降水相比,其具有发生频率高,稳定性强的特点。此外,重度露水(露水量大于 0.2 mm)发生的频率大于 70%,具有重度露水量比重大的特点。

(3)在枣树萌芽展叶和开花坐果期,露水量对 蒸腾量影响不显著,但在果实膨大和成熟期,露水量 作为水资源输入项会引起蒸腾量的显著降低(*P* < 0.05)。在枣树的全生育期内,露水量对蒸发量无 显著影响。

参考文献

- 1 Li X Y. Effects of gravel and sand mulches on dew deposition in the semiarid region of China[J]. Journal of Hydrology, 2002, 260(1): 151-160.
- 2 Malek E, Mccurdy G, Giles B. Dew contribution to the annual water balances in semi-arid desert valleys [J]. Journal of Arid Environments, 1999, 42(2):71-80.
- 3 Hao X M, Li C, Guo B, et al. Dew formation and its long-term trend in a desert riparian forest ecosystem on the eastern edge of the Taklimakan Desert in China[J]. Journal of Hydrology, 2012, 472: 90 98.
- 4 Kidron G. Dew moisture regime of endolithic and epilithic lichens inhabiting limestone cobbles and rock outcrops, Negev Highlands, Israel[J]. Flora Morphology Geobotany Ecophysiology, 2000, 195(2):146-153.
- 5 Jacobs A F G, Heusinkveld B G, Berkowicz S M. Dew deposition and drying in a desert system: a simple simulation model[J]. Journal of Arid Environments, 1999, 42(3):211-222.
- 6 Grammatikopoulos G, Manetas Y. Direct absorption of water by hairy leaves of *Phlomis fruticosa* and its contribution to drought avoidance[J]. Canadian Journal of Botany, 1994, 72(12):1805-1811.
- 7 郑新军,李崇,李彦. 准格尔盆地荒漠植物的叶片水分吸收策略[J]. 植物生态学报, 2011, 35(9):893-905. Zheng Xinjun, Li Chong, Li Yan. Leaf water uptake strategy of desert plants in the Junggar Basin, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011, 35(9):893-905. (in Chinese)
- 8 Zhuang Y, Ratcliffe S. Relationship between dew presence and Bassia dasyphylla plant growth [J]. Journal of Arid Land, 2012, 4(1):11-18.
- 9 Liang X, Su D, Yin S, et al. Leaf water absorption and desorption functions for three turfgrasses [J]. Journal of Hydrology, 2009, 376(1):243-248.

- 10 Agam N, Berliner P. Dew formation and water vapor adsorption in semi-arid environments—a review [J]. Journal of Arid Environments, 2006, 65(4):572-590.
- 11 Bourque C P A, Arp P. Dawn-to-dusk evolution of air turbulence, temperature and sensible and latent heat fluxes above a forest canopy: concepts, model and field comparisons [J]. Atmosphere Ocean, 1994, 32(2):299-334.
- 12 Sentelhas P C, Dalla marta A, Orlandini S, et al. Suitability of relative humidity as an estimator of leaf wetness duration [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2008, 148(3):392-400.
- 13 Chtioui Y, Francl L, Panigrahi S. Moisture prediction from simple micrometeorological data[J]. Phytopathology, 1999, 89(8): 668-672.
- 14 Huber L, Gillespie T. Modeling leaf wetness in relation to plant disease epidemiology [J]. Annual Review of Phytopathology, 1992, 30(1):553-577.
- 15 Kabela E D, Hornbuckle B K, Cosh M H, et al. Dew frequency, duration, amount, and distribution in corn and soybean during SMEX05[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149(1):11-24.
- 16 Dalla marta A, Magarey R D, Martinelli L, et al. Leaf wetness duration in sunflower (*Helianthus annuus*): analysis of observations, measurements and simulations[J]. European Journal of Agronomy, 2007, 26(3):310-316.
- 17 Dalla marta A, Orlandini S. Analysis of leaf wetness duration dynamics on a sunflower (*Heliantus annuus*) canopy[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2010, 35(1):31-34.
- 18 Kima K S, Taylorb S E, Gleason M L. Development and validation of a leaf wetness duration model using a fuzzy logic system [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 127(1-2):53-64.
- 19 Madeira A, Kim K, Taylor S, et al. A simple cloud-based energy balance model to estimate dew [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2002, 111(1):55-63.
- 20 Marta A D, Vincenzi M D, Dietrich S, et al. Neural network for the estimation of leaf wetness duration: application to a *Plasmopara viticola* infection forecasting[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2005,30(1-3): 91-96.
- 21 Sentelhas P C, Gillespie T J, Santos E A. Leaf wetness duration measurement: comparison of cylindrical and flat plate sensors under different field conditons[J]. International Journal of Biometeorology, 2007, 51(4):265-273.
- 22 Jacobs A F G, Nieveen J P. Formation of dew and the drying process within crop canopies [J]. Meteorological Applications, 1995, 2:249-256.
- 23 Xu Y Y, Yan B X, Luan Z Q, et al. Dewfall variation by large-scale reclamation in Sanjiang Plain [J]. Wetlands, 2012, 32(4):783-790.
- 24 Kidron G J, Herrnstadtw I, Barzilay E. The role of dew as a moisture source for sand microbiotic crusts in the Negev Desert, Israel[J]. Journal of Arid Environments, 2002, 52(4):517-533.
- 25 庄艳丽,赵文智. 荒漠植物雾冰藜和沙米叶片对凝结水响应的模拟实验[J]. 中国沙漠, 2010, 30(5):1068-1074. Zhuang Yanli, Zhao Wenzhi. Experimental study of effects of artificial dew on Bassia dasyphylla and Agriophyllum squarrosum [J]. Journal of Desert Research, 2010, 30(5):1068-1074. (in Chinese)
- 26 Limm E B, Dawson T E. Polystichum munitum (Dryopteridaceae) varies geographically in its capacity to absorb fog water by foliar uptake within the redwood forest ecosystem[J]. American Journal of Botany, 2010, 97(7):1121-1128.
- 27 Liu S Y, Wang Y K, Wei X D, et al. Measured and estimated evapotranspiration of jujube (*Ziziphus jujuba*) forests in the Loess Plateau, China[J]. International Journal of Agriculture & Biology, 2013, 15(5):811-819.
- 28 王胜,张强.黄土高原半干旱区露水形成的大气物理特征研究[J].物理学报,2011,60(5):846-853. Wang Sheng, Zhang Qiang. Atmospheric physical characteristics of dew formation in semi-arid in loess plateau[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(5):846-853. (in Chinese)
- 29 高志永, 汪有科, 魏新光, 等. 植物叶片形成露水的室内模拟[J]. 应用生态学报, 2014, 25(3):725-730. Gao Zhiyong, Wang Youke, Wei Xinguang, et al. Indoor simulation on dew formation on plant leaves[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(3): 725-730. (in Chinese)
- 30 Zangvil A. Six years of dew observations in the Negev Desert, Israel[J]. Journal of Arid Environments, 1996, 32(4):361-371.
- 31 Obrien J, Oberbauer S, Clark D. Whole tree xylem sap flow responses to multiple environmental variables in a wet tropical forest [J]. Plant Cell Environment, 2004, 27(5):551-567.
- 32 Granier A, Biron P, Lemoine D. Water balance, transpiration and canopy conductance in two beech stands[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 100(4):291-308.
- 33 Liu C, Du T, Li F, et al. Trunk sap flow characteristics during two growth stages of apple tree and its relationships with affecting factors in an arid region of northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2012, 104:193 - 202.
- 34 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 usingsap flow meters with a stem heat balance method[J]. Agricultural Water Management, 2007, 90(3): 224 232.
- 35 Liu X, Kang S, Li F. Simulation of artificial neural network model for trunk sap flow of *Pyrus pyrifolia* and its comparison with multiple-linear regression [J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(6):939-945.
- 36 Black T A. Evapotranspiration from Douglas fir stands exposed to soil water deficits [J]. Water Resource Research, 1979,

15(1):164 - 170.

- 37 Ma L H, Wu P T, Wang Y K. Spatial distribution of roots in a dense jujube plantation in the semiarid hilly region of the Chinese Loess Plateau [J]. Plant and Soil, 2012, 354(1-2):57-68.
- 38 Ye Y, Zhou K, Song L, et al. Dew amounts and its correlations with meteorological factors in urban landscapes of Guangzhou, China[J]. Atmospheric Research, 2007, 86(1):21-29.
- 39 张强, 王胜. 关于干旱和半干旱区陆面水分过程的研究[J]. 干旱气象, 2007, 25(2):1-4. Zhang Qiang, Wang Sheng. Processes of water transfer over land surface in arid and semi-arid region of China[J]. Arid Meteorology, 2007, 25(2): 1-4. (in Chinese)
- 40 Beysens D. The formation of dew[J]. Atmospheric Research, 1995, 39(1):215-237.
- 41 李晓彬, 汪有科, 赵春红, 等. 水分调控对梨枣果实品质与投入产出效益的影响分析[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(4):818-822.

Li Xiaobin, Wang Youke, Zhao Chunhong, et al. Effect of regulated irrigation on input-output benefits of pear jujube [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(4):818-822. (in Chinese)

- 42 Kidron G J. Analysis of dew precipitation in three habitats within a small arid drainage basin, Negev Highlands, Israel [J]. Atmospheric Research, 2000, 55(3-4):257-270.
- 43 Kidron G J. Altitude dependent dew and fog in the Negev Desert, Israel[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1999, 96(1-3): 1-8.
- 44 Munné-Bosch S, Nogues S, Alegre L. Diurnal variations of photosynthesis and dew absorption by leaves in two evengreen shrubs growing in Mediterranean field conditions [J]. New Phytologist, 1999, 144:109 - 119.
- 45 Xu Y Y, Yan B X, Guo Y D. Measurement and analysis of formation conditions of dew in *Carex lasiocarpa* marsh[J]. Wetland Science, 2009(2):155-161.
- 46 Beysens D, Muselli M, Nikolayev V, et al. Measurement and modelling of dew in island, coastal and alpine areas [J]. Atmospheric Research, 2005, 73(1):1-22.
- 47 Dragoni D, Lakso A N, Piccioni R M. Transpiration of apple trees in a humid climate using heat pulse sap flow gauges calibrated with whole-canopy gas exchange chambers [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2005, 130(1-2):85-94.
- 48 Kume T, Komatsu H, Kuraji K, et al. Less than 20-min time lags between transpiration and stem sap flow in emergent trees in a Bornean tropical rainforest[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2008, 148(6-7):1181-1189.
- 49 Steppe K, De Pauw D J W, Doody T M, et al. A comparison of sap flux density using thermal dissipation, heat pulse velocity and heat field deformation methods [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150(7-8):1046-1056.
- 50 Oren R, Pataki D E. Transpiration in response to variation in microclimate and soil moisture in southeastern deciduous forests [J]. Oecologia, 2001, 127(4):549-559.
- 51 Chen D Y, Wang Y K, Liu S Y, et al. Response of relative sap flow to meteorological factors underdifferent soil moisture conditions in rainfed jujube (*Ziziphus jujuba* Mill.) plantations in semiarid Northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2014, 136:23-33.
- 52 张强,王胜,问晓梅,等.黄土高原陆面水分的凝结现象及收支特征试验研究[J]. 气象学报,2012,70(1):28-35. Zhang Qiang, Wang Sheng, Wen Xiaomei, et al. On measuring methods and exploitation technology for dew fall on land surface [J]. Plateau Meteorology, 2012, 70(1):28-35. (in Chinese)
- 53 叶有华,彭少麟. 露水对植物的作用效应研究进展[J]. 生态学报, 2011, 31(11):3190-3196. Ye Youhua, Peng Shaolin. Review of dew action effect on plants[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(11):3190-3196. (in Chinese)
- 54 Monteith J L. Dew[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorology Society, 1956, 42:572 580.

(上接第 278 页)

- 23 Ahmed J, Ramaswamy H S, Raghavan G S V. Dielectric properties of soybean protein isolate dispersions as a function of concentration, temperature and pH[J]. LWT—Food Science and Technology, 2008, 41(1): 71-81.
- 24 Tanaka F, Morita K, Mallikarjunan P, et al. Analysis of dielectric properties of soy sauce [J]. Journal of Food Engineering, 2005, 71(1): 92-97.
- 25 Zhu Xinhua, Guo Wenchuan, Wu Xiaoling, et al. Dielectric properties of chestnut flour relevant to drying with radio-frequency and microwave energy[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 113(1): 143 - 150.
- 26 Guo Wenchuan, Wu Xiaoling, Zhu Xinhua, et al. Temperature-dependent dielectric properties of chestnut and chestnut weevil from 10 to 4 500 MHz[J]. Biosystems Engineering, 2011, 110(3): 340 347.