

山地枣林蒸腾主要影响因子的时间尺度效应

魏新光¹, 陈滇豫¹, 汪星¹, 汪有科^{1,2}, 卫新东^{1,3}

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100; 3. 长安大学地球科学与国土资源学院, 西安 710054)

摘要:为揭示时间尺度效应对蒸腾规律的影响,对黄土丘陵区山地枣林蒸腾及其影响因子进行同步监测,并在不同时间尺度上分析蒸腾的主要影响因子。结果表明:不论逐月蒸腾还是全年蒸腾,其主要影响因子均存在明显的时间变异性和时间尺度效应。逐月蒸腾在生育期内时、日和旬尺度上主要影响因子分别是光合有效辐射(R^2 峰值, $R_{\max}^2=0.79$), 风速($R_{\max}^2=0.81$)和相对湿度($R_{\max}^2=0.78$), 叶面积($R_{\max}^2=0.73$)和叶面积指数($R_{\max}^2=0.82$)。全年蒸腾在较小时间尺度(时和日尺度)上和除风速外的其他气象因子均呈极显著相关($p<0.01$),而在较大尺度(旬和月尺度)上仅和叶面积、叶面积指数以及土壤水分呈极显著相关($p<0.01$)。随着研究尺度的提升,气象因子对蒸腾的影响逐渐减弱,作物自身生长状况和土壤水分状况对蒸腾的影响逐渐增强。该研究对于进一步揭示枣林的蒸腾规律,制定科学合理的节水措施具有重要的指导意义。

关键词:蒸腾; 含水率; 统计分析; 尺度效应; 综合气象因子; 叶面积指数

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2014.17.020

中图分类号: S161.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2014)-17-0149-08

魏新光, 陈滇豫, 汪星, 等. 山地枣林蒸腾主要影响因子的时间尺度效应[J]. 农业工程学报, 2014, 30(17): 149 - 156.

Wei Xinguang, Chen Dianyu, Wang Xing, et al. Time scale effect on main factors that influence jujube transpiration in hillside jujube orchard[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(17): 149 - 156. (in Chinese with English abstract)

0 引言

陕北黄土高原地区,光热资源丰富,适宜枣树生长。红枣一直是当地的传统优势产业,近年来受经济因素和新技术推广的影响,种植面积已超过 $1.6 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 。但是当地干旱少雨,水资源短缺,严重制约了当地枣业健康发展。因此探讨枣树蒸腾的主要影响因子,对于调控蒸腾过程,提高水分利用效率和实现密植枣林可持续经营具有重要的意义。

树体蒸腾是土壤—植物—大气连续体(soil-plant-atmosphere continuum, SPAC)中的重要环节,受到土壤、气象和自身生长特性的共同影响。前人对黄土高原天然和人工种植的常见树种:辽东栎^[1], 刺槐^[2], 洋槐^[3], 山杏^[4], 枣^[5], 苹果^[6], 柠条^[7]等的蒸腾规律进行了大量的研究,但是这些研究大多集中于直接探讨不同树种在各生育阶段蒸

腾的主要控制因子,而各因子的时间和空间尺度效应则往往被忽略。然而,直接将未经转换的较小时空尺度的结论上推到较大尺度,或者反之,往往造成很大的偏差^[8-10]。前人就对实现时空尺度的提升途径,以及不同尺度下蒸腾对气象因子的响应进行了很多有益的探索。许迪等^[11]对灌溉水文学尺度转换过程中涉及的非线性转换和自然异质性问题进行了初步探讨。Irmak S等^[12]借鉴电学原理实现了叶片气孔导度和冠层气孔导度的转化。蔡甲冰等^[13]确定了小区和田间尺度下,白天和全天蒸散的主要影响因子。刘国水等^[14]认为不同时间和空间尺度的蒸散量与净辐射的相关关系均较好,但与空气湿度、温度和风速的相关关系随尺度变化而变化。Wang Yilong等^[2]也发现不同生长季,叶片蒸腾与各影响因素间的关系不同。此外,杨汉波和杨大文^[15]用量纲分析和数学推导得到了适用于任何时间尺度的水热耦合方程,比较准确的模拟了年、月、旬、日尺度上的实际蒸发量。为了克服农业生产中相关因子搜集困难,和搜集到的因子尺度不统一的弊端,实现不同尺度影响因子之间的相互转化和研究尺度的提升,本文在不同时间尺度上对蒸腾及其影响因子的关系进行分析研究。研究结果对于进一步揭示尺度效应对蒸散规律的影响,确定枣树需水关

收稿日期: 2014-01-07 修订日期: 2014-08-27

基金项目: 国家支撑计划课题(2011BAD29B04, 2013BAD20B03); 林业公益性行业科研专项资助项目(20140470)

作者简介: 魏新光(1984-),男,山西寿阳人,博士,主要从事农业节水与水资源高效利用领域的研究。杨凌 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 712100. Email: weixg_wi@163.com

通信作者: 汪有科(1956-),男,甘肃民勤人,研究员,博士生导师,主要从事农业节水与水土保持领域方面的研究。杨凌 中国科学院水利部水土保持科学研究所, 712100. Email: gjzwyk@vip.sina.com

键期和关键影响因子,制定科学合理的节水调控措施,改善旱区枣园的土壤水分状况,实现山地经济林的可持续经营具有重要的指导意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料

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,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 月、8 月 2 个月的降雨量占全年降雨量的 49%。示范基地土壤为黄绵土,土壤容重 1.29 g/cm³,坡度平均为 25°。监测对象为 12a 生矮化梨枣树(*Ziziphus jujube* Mill.),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 24 株进行试验,试验从 2011 年 5 月 1 日开始,2013 年 10 月 30 日结束,其中 5 月 1 日-10 月 25 日为枣树生长期,10 月 26 日-次年 4 月 30 日为休眠期。

1.2 监测指标

气象指标: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:降雨量(precipitation P, mm)、总辐射(radiance R, W/m²)、光合有效辐射(photosynthetically active radiation PAR, μmol/(m²·s))、风速(wind speed WS, m/s)、气温(temperature TA,) 和相对湿度(relative humidity RH, %)。饱和水汽压亏缺(vapor pressure deficit VPD, kp) 根据文献[16]的计算方法确定。

土壤水分:土壤含水率(soil water content SW, m³/m³) 采用 CNC100 型中子管水分测定仪进行监测,中子水分测管统一安装在距离树干西侧 30 cm 处,测管安装有效监测深度为 3 m。利用中子仪每隔 10 d 测定 1 次,监测步长为 20 cm。

树体生长指标:对生育期内的树体的冠幅、新

稍生长量、叶面积(leaf area, LA) 采用刻度尺人工测量,叶面积指数(leaf area index, LAI) 采用基于冠层孔隙度分析的 Wins canopy 叶面积指数仪(Regent Co., Canada) 进行测定,测定频率为 15~20 d/次。

蒸腾速率:在选取的 24 株梨枣树干北侧,距离地表 40 cm 处各安装 1 组热扩散式探针(thermal diffuse probe, TDP-20),利用 CR1000 数据采集器(Campbell Co., America) 收集数据,采集频率为 10 min/次。采用 Granier 经验公式^[16]计算树干液流速率,公式如下:

$$V = 119 \times 10^{-6} \times \left(\frac{\Delta TM - \Delta T}{\Delta T} \right)^{1.231} \quad (1)$$

式中:V 为茎流强度, m³/(m²·h); ΔTM 为液流量为零时测头温度与周围空气温度的温度差; ΔT 为有上升液流时测头温度与周围空气温度之间的温度差; 则单位时间的茎流量 Q, m³/h 和蒸腾量(transpiration, T, mm/h) 分别为:

$$Q = V \times Area \quad (2)$$

$$T = \frac{3.6Q}{Col \times Row} \quad (3)$$

式中:Area 为 TDP 探针处树干的边材面积, cm²; Col 和 Row 分别代表株距和行距,分别为 3 和 2 m。枣树日、旬、月、年蒸腾量 T_d、T_t、T_m、T_y 的确定如公式(4)~(7)所示:

$$T_d = \sum_{i=0}^{i=24} T_i \quad (4)$$

$$T_t = \sum_{d=0}^{d=10} T_d \quad (5)$$

$$T_m = \sum_{t=0}^{t=3} T_t \quad (6)$$

$$T_y = \sum_{m=0}^{m=12} T_m \quad (7)$$

观测期逐日蒸腾量和降雨量数据如图 1 所示。由于监测设备出现故障,2012 年第 235-266 日数据缺失。

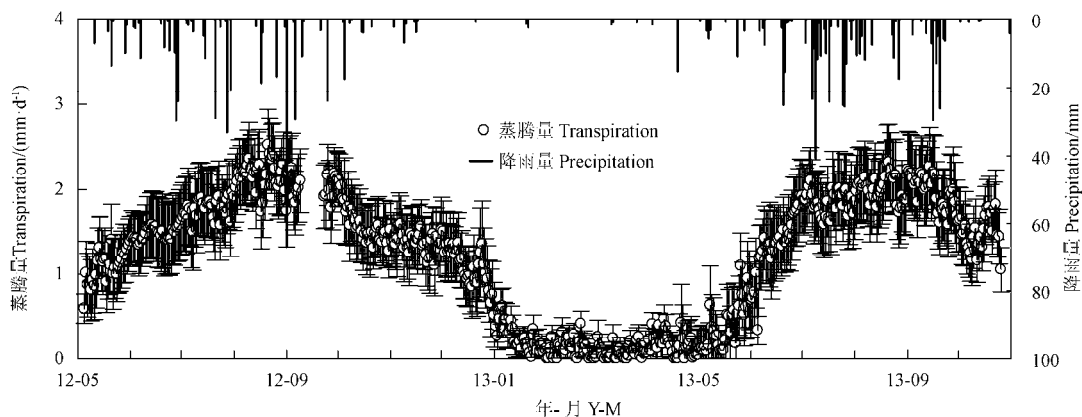


图 1 枣树蒸腾日动态

Fig.1 Daily variation of jujube transpiration

1.3 研究方法

采用皮尔逊相关分析法 (pearson correlation coefficient) 得到 R^2 和 K 2 个重要参数对不同时间尺度上蒸腾量和影响因子之间的关系进行分析研究。 R^2 为回归方程的决定系数, 值在 0~1 之间波动, 值越接近 1, 说明 2 者的相关关系越好, 模型的可信度越高, 回归方程结果值越集中, 反之则相关关系比较差, 模型可信度低, 回归方程的结果越离散。 K 为回归方程的回归系数 (斜率), 反映了结果对因子的响应程度, $K>0$ 时, 表明结果对影响因子为正响应 (促进作用), $K<0$ 时, 结果对影响因子为负响应 (抑制作用), K 的绝对数值越大, 则因子数值发生单位变化所引起的结果的变化越剧烈, K 越趋近于 0 时, 其响应关系越弱。同时为了便于不同因子间进行比较, 消除其量纲影响, 对 K 运用标准分数 (Z-score) 法进行标准化处理得到 K_d , 则标准化回归系数 K_d 如公式 8 所示:

$$K_d = \frac{X - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X}{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(X - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X \right)^2}} \quad (8)$$

式中: X 为指标样本的数值, n 为指标样本的数量, 则最终影响因子的评价指标为: R^2 和 K_d 。

2 结果与分析

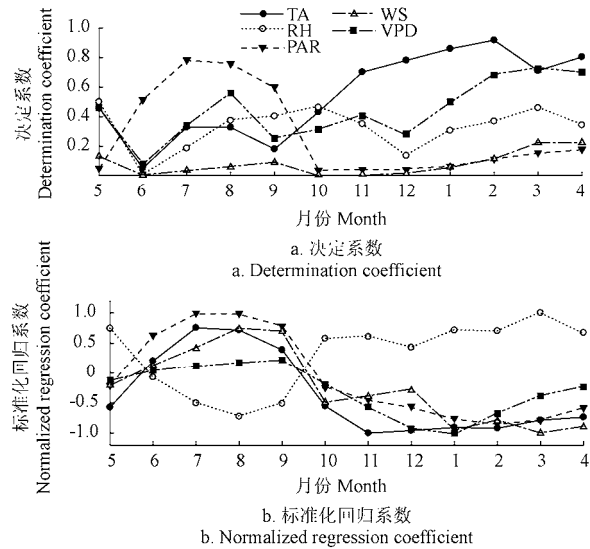
树体的蒸腾过程是一个包括物理学机理和生物学特性的复杂过程^[17], 其蒸腾强度主要受环境因子、土壤水分状况和自身生物学特性等 3 方面共同作用, 影响因子主要包括气温 (TA)、相对湿度 (RH)、风速 (WS)、总辐射 (R)、光合有效辐射 (PAR)、水汽压亏缺 (VPD)、土壤含水率 (SW)、叶面积 (LA) 和叶面积指数 (LAI)。由于 RA 与 PAR 线性相关, 两者与蒸腾关系相同, 此处选 PAR 进行研究。SW、LA、LAI 在较小的时间尺度上变化不明显, 所以在时尺度上不做研究; SW 仅在日、旬和月尺度上进行研究; LA 与 LAI 仅在旬和月尺度上进行研究。

2.1 逐月蒸腾主要影响因子的时间尺度效应

2.1.1 时蒸腾对气象因子的响应

树体逐月蒸腾在时尺度上主要受到气象因子的影响, 各因子对枣树蒸腾的影响大致可以分为 2 个时期, 生育期 (5 - 10 月) 和休眠期 (11 月到翌年 4 月)。由图 2a 可知, PAR 的 R^2 在全生育期呈单峰变化趋势, 峰值主要集中在 6 - 9 月, R^2 峰值 (R^2_{max}) 达 0.79 (7 月)。其 R^2 在休眠期较低且变化比较平稳, 可见 PAR 和枣树蒸腾在整个生育期都有极为显著的影响, 休眠期 2 者的关系则不显著。

VPD、RH 和 TA 的 R^2 在整个生育期呈现波动变化, 3 个因子对枣树生育期的蒸腾也有一定影响, 但是 6 月份 3 个因子的 R^2 均显著偏低, 这主要是因为当地 6 月份干旱少雨, 土壤水分亏缺严重制约了树体蒸腾, 且随着干旱的加剧, 各影响因子对蒸腾抑制的阈值不断降低造成的。VPD、RH 和 TA 的 R^2 在休眠期呈现出一定的上升趋势, 且存在小幅的波动。这主要是因为休眠期蒸腾量较低 (图 1), 且变化不明显, 影响因子的剧烈变化, 不会引起蒸腾相应变化造成的。WS 和树体蒸腾的关系比较复杂, 全年 R^2 均维持在较低水平, 即不论是生育期还是休眠期 WS 对蒸腾均没有显著影响。



注: TA, 温度; RH, 相对湿度; PAR, 光合有效辐射; WS, 风速; VPD, 饱和水汽压亏缺; 下同。
Note: TA, temperature; RH, relative humidity; PAR, photosynthetically active radiation; WS, wind speed; VPD, vapor pressure deficit; Same as below.

图 2 时蒸腾对气象因子的响应
Fig.2 Response of hourly transpiration to its climate factors

K_d 值的大小直接反映了因子对蒸腾的响应程度的大小, 从图 2b 可以看出, 除 RH 以外, 其他气象因子的 K_d 值在生育期均呈现明显的单峰变化趋势, 这和枣树蒸腾变化趋势 (图 1) 基本一致, 说明这些因子对枣树蒸腾能起到明显的促进作用。除 RH 以外, 其他因子的 K_d 值均在生育期较大, 休眠期较小。说明枣树的蒸腾在生育期较大, 在休眠期则比较微弱。RH 的 K_d 值在全年的变化趋势和其他因子相反, 且在休眠期其 K_d 值较高, 这主要是因为枣树的休眠期, 正好为干旱少雨的冬春季节, 气候比较干燥, RH 数值偏低造成的。

结合图 2a 和 2b 可知, 在枣树生育期, 特别是生长旺盛的 6 - 9 月, PAR 的 R^2 和 K_d 值均最大, R^2 峰值达 0.79, 而且变化规律和枣树蒸腾最为一致,

由此可见在时尺度上,影响枣树蒸腾最为显著,且影响作用最为稳定的因子是 PAR。此外 VPD、TA 和 RH 也对枣树蒸腾有一定的影响,但 RH 对枣树蒸腾的影响为负效应(抑制作用)。虽然在枣树生育期,WS 的 K_d 值也比较大,但是由于 R^2 很低,其回归模型的精度很低,即 WS 和枣树蒸腾在时尺度上没有显著的相关关系。这主要是因为 WS 对枣树蒸腾影响过程比较复杂,且和其他因子交互作用明显所造成的。Liu 等^[18]对枣树蒸腾和 WS 研究也得到类似结果。

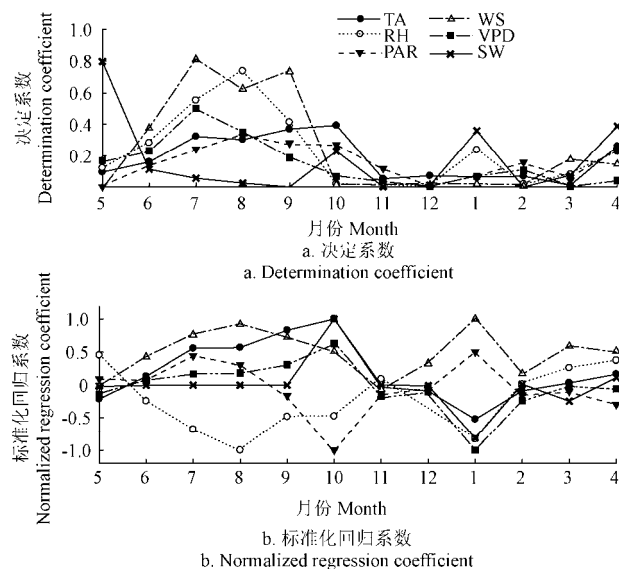
2.1.2 日蒸腾对其影响因子的响应

从图 3a 可以看出,在日尺度上各影响因子和树体蒸腾的相关性 (R^2) 存在明显的时间变异性,不同时期主导因子不同。生育期(5-10月),逐月最主要影响因子依次为:SW、WS、WS、RH、WS 和 TA。在枣树的生育期,WS 和 RH 的 R^2 值呈现单峰或双峰变化趋势且数值较大,在生长旺盛的 7-9 月,其 R^2 的峰值分别达到 0.81 和 0.78,可见两者均和枣树蒸腾有极为显著的相关关系。VPD、TA 和 PAR 在生育期也和枣树蒸腾有较好的相关关系,但是其峰值出现的时间各异。SW 和枣树生育期蒸腾的关系较为复杂,除 5 月和 10 月以外,其他月份均无显著相关关系(图 3a)。5 月正处于枣树萌芽展叶期,蒸腾量逐日增加,而同期又无有效降雨,土壤水分逐日下降,且同期土壤墒情较好,土壤水分没有对树体蒸腾构成抑制,两者均线性变化,所以相关性很高 ($R^2=0.80$)。10 月枣树开始成熟落叶,枣树蒸腾逐日下降,同期降雨较多,土壤水分含量逐日升高,所以 10 月份两者变化也有一定相关性 ($R^2=0.28$)。除此之外,在生育期的 6-9 月,由于降雨的随机性和枣树蒸腾量的季节性变化规律性存在差异,所以两者没有显著相关性。

在枣树休眠期,各因子和蒸腾的 R^2 均比较低(图 2a),但在 1 月和 4 月,部分因子的 R^2 有所上升,可见各因子在休眠期对树体蒸腾的影响并不显著。在 1 月,SW ($R^2=0.36$) 和 RH ($R^2=0.23$) 与蒸腾相关性有所增强。同期各因子的 K_d (图 3b)波动剧烈,这可能与 1 月初气温短期回升,引起树体生命活动暂时增强有关。4 月,部分因子的 R^2 值升高,则主要是因为当年春季气温回升较早,树体萌芽期有所提前造成的。

从图 3b 可以看出,在日尺度上各因子和蒸腾的响应关系较为复杂,且在 10 月和 1 月波动剧烈。10 月份各个因子的 K_d 变化剧烈主要是因为当时正处于枣树成熟落叶期,日蒸腾量明显减少,蒸腾量变化较为显著,但是同期气象因子相对稳定而造成的。除 5 月份以外,RH 在生育期对蒸腾均为负响

应,可见不论是在时尺度还是日尺度,RH 对枣树蒸腾均存在较为显著的抑制作用。



注: SW, 土壤含水率; 下同。
Note: SW, soil water content; Same as below.

图 3 日蒸腾对其影响因子的响应

Fig.3 Response of daily transpiration to its impact factors

由图 3 可知,在日尺度上蒸腾和 RH、WS 关系最为密切,是影响枣树蒸腾最主要的影响因子,PAR、VPD 和 TA 与蒸腾也有较好相关性,SW 和蒸腾的关系则不明显。除 RH 以外,其他因子对枣树的蒸腾均为促进作用。

2.1.3 旬蒸腾对其影响因子的响应

为了克服在旬尺度上研究逐月蒸腾相关性样本过少的不足,以 3 个月为 1 个研究单元,将全年分为生育前期(5-7月)、生育后期(8-10月)、休眠前期(11-1月)和深度休眠期(2-4月)四个阶段。在旬尺度上对树体蒸腾及其影响因子进行了相关分析,发现在旬尺度上,各个因子和蒸腾的相关性(见 R^2 值)仍然是生育期(5-7月和 8-10月)较高,休眠期(11-1月和 2-4月)较低,旬尺度上生育期内各因子和蒸腾的影响要普遍大于休眠期,但是在生育前期和后期各个因子的影响大小不同,生育前期各因子和蒸腾的相关关系表现为:SW>TA>LAI>LA>WS>VPD>RH>PAR,后期各因子和蒸腾的相关关系表现为:LA>LAI>RH>VPD>TA>PAR。由此可见,枣树全生育期(5-10月)蒸腾在旬尺度上和 LAI、LA、TA、VPD、RH 关系均比较密切 ($p<0.05$),而 PAR、SW 和 WS 仅在部分生育阶段和蒸腾关系较为密切。

在旬尺度上,相关因子对蒸腾的响应关系(见 K_d 值)不同,生育前期 TA、LA 和 LAI 和蒸腾显

著正相关 ($p < 0.01$, $K_d > 0$), VPD 和蒸腾呈现显著负相关 ($p < 0.01$, $K_d = -0.98$)。生育后期 PAR、VPD、LA、LAI 和蒸腾呈现显著正相关 ($p < 0.01$, $K_d > 0$), 但和 RH 显著负相关 ($p < 0.01$, $K_d = -1$)。这主要和生育前期干旱少雨, 生育后期雨水较多, 土壤水分恢复, 蒸腾对因子的响应方式发生变化有关。综合分析, 在旬尺度上和蒸腾影响关系最为密切, 而且较为稳定的影响因子是 LA 和 LAI, R^2 峰值分别达到 0.73 和 0.82, 其他气象因子 TA、VPD、RH

等和蒸腾也有较好的相关性, 但是由于尺度提升, 因子的回归系数值 (K_d) 的大小和正负会发生变化。

2.1.4 不同尺度蒸腾对影响因子响应的逐月动态

根据图 2、图 3 和表 1 综合分析, 各因子和蒸腾的响应关系存在明显的时间尺度效应。RH 在日和旬尺度上的 R^2 变化规律相似, 且均大于时尺度, PAR 在日和旬尺度上 R^2 变化规律相似且均小于小时尺度。VPD 在旬尺度上和蒸腾相关性最显著, 但在日和时尺度上相关性有所降低。

表 1 旬蒸腾对其影响因子的响应

Table 1 Response of 10-day's transpiration to its impact factor

月 Month		温度 TA/	相对湿度 RH/%	光合有效辐射 PAR/($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	风速 WS/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	饱和水汽 压亏缺 VPD/Kpa	土壤含 水率 SW/%	叶面积 LA/ m^2	叶面积 指数 LAI
5 - 7	R^2	0.84**	0.35*	0.08	0.60**	0.38*	0.88**	0.68**	0.82**
	K_d	1.00	0.29	-0.42	-0.50	-0.98	-0.34	1.00	1.00
8 - 10	R^2	0.43**	0.59**	0.33*	0.12	0.58**	0.05	0.73**	0.66**
	K_d	0.22	-1.00	1.00	0.57	1.00	-0.17	0.76	0.75
11 - 1	R^2	0.01	0.01	0.09	0.31	0.00	0.15		
	K_d	-0.02	-0.05	0.65	1.00	0.21	0.21		
2 - 4	R^2	0.06	0.00	0.32	0.13	0.08	0.23		
	K_d	0.03	0.01	0.23	0.32	0.18	1.00		

注: *表示行变量和列变量之间达显著相关水平 ($p < 0.05$); **表示行变量和列变量之间达极显著相关水平 ($p < 0.01$); 下同。

Note: *indicates significant influence of climate variable ($p < 0.05$); **indicates highly significant influence of climate variable ($p < 0.01$); Same as below.

日和旬尺度上, TA、VPD 和蒸腾的 R^2 均为生育期 > 休眠期 (图 3a、表 1), 但在时尺度上, 两者的 R^2 却为休眠期 > 生育期 (图 2a)。这主要是因为枣树的休眠期, 树体蒸腾微弱, 且在一日之内呈现较为规律的单峰变化趋势, 这和 TA、VPD 在 1 日之内的变化趋势基本一致, 但在日和旬尺度上, 因子数值发生剧烈变化, 蒸腾值依旧变化微弱, 所以在休眠期日和旬尺度上, 2 个因子的 R^2 偏低。

除生育前期, 在不同的时间尺度上 SW 和蒸腾的 R^2 均不明显。在日尺度上, 仅 5 月份显著相关 (图 3a, $R^2 = 0.80$), 在旬尺度上仅和生育前期 (5 - 7

月) 显著相关 (表 1, $R^2 = 0.88$), 这主要是因为枣树生长初期蒸腾量逐渐增大, 同期降雨偏少, SW 逐渐降低, 二者变化同步, 但是 K_d 呈现负值, 后期随着土壤水分的消耗加剧, 土壤水分对蒸腾的抑制作用开始加强, 加之降雨和气象因子的综合影响, 使得土壤水分和树体蒸腾无显著相关关系。

2.2 全年蒸腾主要影响因子的时间尺度效应

在不同尺度上分析全年蒸腾量和影响因子的关系 (表 2) 可以发现, 随着尺度的提升, R^2 的变化规律大体分为 3 类: 先增加后减少型、单调递增型和先减少后增加型。

表 2 全年蒸腾在不同尺度上对气象因子的响应

Table 2 Response of annual transpiration to climate factors at different time scale

尺度 Scale		温度 TA/	相对湿度 RH/%	光合有效辐射 PAR/($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	风速 WS/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	饱和水汽 压亏缺 VPD/Kpa	土壤含 水率 SW/%	叶面积 LA/ m^2	叶面积 指数 LAI
时 Hourly	R^2	0.010**	0.185**	0.012**	0.058**	0.008**			
	K_d	0.020	0.021	0.003	-0.165	0.439			
日 Daily	R^2	0.511**	0.022**	0.329**	0.0123*	0.250**	0.233**		
	K_d	0.035	0.004	0.002	-0.078	0.436	0.591		
旬 10days	R^2	0.256**	0.145*	0.155*	0.091	0.067	0.384**	0.767**	0.771**
	K_d	0.015	0.008	0.001	-0.300	0.155	0.651	0.163	0.266
月 Month	R^2	0.299	0.296	0.166	0.200	0.045	0.619**	0.893**	0.917**
	K_d	0.017	0.013	0.001	-0.368	0.133	0.956	0.170	0.324

TA、PAR、VPD 随着尺度的提升呈现先增加后减小趋势。其决定系数在日尺度达到最大,而后减小,相关性减弱。在时和日尺度上三者都和蒸腾有极显著的相关性,在旬尺度上蒸腾只和 TA 极显著相关,和 PAR 显著相关,在月尺度上三者和蒸腾的相关性均不显著。

SW、LA 和 LAI 随着尺度的提升呈现单调递增趋势,SW 在日、旬和月尺度上决定系数分别达到 0.23、0.38 和 0.62,随着尺度的提升 R^2 明显增大,且都和蒸腾量极显著相关,LA 和 LAI 和蒸腾关系极显著且 R^2 随着尺度提升而增大,它们和蒸腾的相关关系依次为: LAI>LA>SW。

RH 和 WS 随着尺度的提升呈现先减少后增加的趋势, R^2 在日尺度上最小。在时尺度上二者和蒸腾呈极显著相关,在日尺度上蒸腾仅和 RH 呈极显著相关,和 WS 显著相关,而在旬尺度仅和 RH 显著相关,随着尺度的进一步提升,虽然 R^2 有所上升,但是样本数明显减少,使得相关关系并不显著(图 2),它们和蒸腾的相关关系大小表现为: RH>WS。

在较小的时间尺度(时、日)上蒸腾和气象因子均呈现显著相关,时和日尺度上对蒸腾影响最大的因子分别是 RH ($R^2=0.185$) 和 TA ($R^2=0.511$)。在较大时间尺度(旬和月)上蒸腾和 SW、LA 和 LA 呈极显著相关,而且 R^2 随着尺度的提升呈线性增大。总体而言,在较小的时间尺度上蒸腾和气象因子相关性显著。随着尺度的提升,气象因子的影响减弱,而土壤水分状况和作物自身生长状况对蒸腾的影响越来越显著。

3 讨论

本文通过对不同时间尺度(时、日、旬、月)上影响枣树蒸腾的相关因子进行研究,发现,不论是逐月蒸腾还是全年蒸腾,其影响因子均有明显的时间变异性和尺度效应。

就日尺度数据而言,其影响因子的时间变异性明显,不同月份主导因子不同(图 3)。枣树生长季节,各月最主要影响因子依次为: SW、WS、RH、WS 和 TA。这和 Wang 等^[2]、Du 等^[3]对刺槐和辽东栎的研究结果相似,其研究发现 2 种植株在生长季不同时期分别与气孔导度(G_s)、PAR、TA、RH 显著或极显著相关。

枣树的逐月蒸腾量呈现单峰变化趋势,蒸腾主要集中在生育期(5-10 月份),其影响因子的决定系数 R^2 和回归系数 K_d 值亦呈单峰变化趋势,峰值一般出现在 7-9 月份,可见各影响因子对树体蒸腾的影响主要集中在蒸腾量较大的月份。在日尺度上,主要影响因子是 PAR,这和赵平等^[19]对马占

相思林的研究结果类似,但本研究 R^2 的数值普遍偏低,主要是因为本研究处于西北干旱丘陵区与马占相思林生长的华南丘陵区土壤水分状况差异较大,土壤干旱使其对树体蒸腾的制约作用增强,从而减弱了气象因子对蒸腾的影响^[20-21]。Chen 等^[22]研究发现,“节水型修剪”通过调控冠层结构和叶片规模可以对树体耗水进行优化调控,通过在不同时间尺度上 LA 和 LAI 蒸腾影响的分析发现,两者对结果影响差异不大,但 LAI 测定较为复杂,在生产实践中推荐将实测的 LA 作为树体蒸腾的调控指标。分析研究发现,生育期逐月蒸腾在时尺度上主要受 PAR 的影响;在日尺度上主要受 RH、WS 影响;在旬尺度主要受 LA 和 LAI 的影响。由此可见,随着时间尺度的提升,气象因子的影响减弱,作物自身生长状况的影响增强,这也和 Liu 等^[18]的研究结果类似。枣树全年蒸腾在不同时间尺度上主要影响因子亦存在差异。在时尺度上蒸腾和各个气象因子(TA、RH、PAR、VPD、WS)均极显著相关;在日尺度上和风速呈显著相关,而其他均呈极显著相关;在旬尺度上和 LAI、LA、SW、TA 极显著相关,和 RH、PAR 显著相关;在旬和月尺度上仅和 LAI、LA、SW 极显著相关。由此可知,气象因子随着时间尺度的扩大相关性降低,而 LAI、LA 和 SW 随着时间尺度的扩大相关性升高。

枣树蒸腾影响因子众多,不仅单一因子的变化会引起蒸腾的变化,多因子的联合作用也会对结果产生重要影响。在进一步研究中,需要通过对交互作用进行分析,了解诸因子间的协同和拮抗作用。另外,由于影响因子之间并不完全独立,为避免其相互影响,需要对因子进行正交化处理。对因子的交互作用和主成分分析,能够进一步揭示枣林蒸腾的影响机理。

4 结论

通过在不同时间尺度上,对影响枣树蒸腾的相关因子(气象因子、土壤水分因子和作物生长因子)的综合分析,研究影响因子对蒸腾规律的影响的尺度效应,对于深入探寻各因子对枣树蒸腾影响的作用机理,实现不同尺度影响因子的相互转化和研究尺度的提升,指导枣树灌溉和田间水分管理均有重要意义。通过研究发现:

1) 枣树不论逐月蒸腾还是全年蒸腾,其影响因子均存在明显的时间尺度效应:逐月蒸腾与其影响因子的决定系数(R^2)均随着时间变化而变化, R^2 较高的月份主要集中在 5-10 月(生育期)。生育期内时尺度的主导因子为光合有效辐射(R^2 峰值, $R_{\max}^2=0.79$)、日尺度上为相对湿度($R_{\max}^2=0.78$)

和风速 ($R_{\max}^2=0.81$)、旬尺度为叶面积指数 ($R_{\max}^2=0.82$) 和叶面积 ($R_{\max}^2=0.73$)。全年蒸腾量在不同时间尺度主要影响因子不同,除风速和蒸腾在日尺度上呈显著相关以外 ($p<0.05$),其他因子和蒸腾在较小时间尺度(时和日尺度)上均呈极显著相关 ($p<0.01$),而在较大尺度(旬和月尺度)上仅和叶面积指数、叶面积和土壤水分呈极显著相关 ($p<0.01$)。

2) 逐月蒸腾、全年蒸腾和影响因子的关系均表现为:随着时间尺度的提升,气象因子对蒸腾的相关关系逐渐减弱,作物自身生长状况和蒸腾的相关关系逐渐增强。但是相同尺度上逐月蒸腾量和全年蒸腾量的主要影响因子存在差异。

3) 土壤水分对枣树全年蒸腾和逐月蒸腾影响差异显著,土壤水分和全年蒸腾量的相关性随着尺度的提升而逐渐增大,而且均呈极显著关系。但是枣树月蒸腾和土壤水分在日、旬尺度上均无显著相关关系。换言之,枣树全年蒸腾总量主要受土壤水分状况影响,逐月蒸腾主要和自身生长发育阶段有关。

[参 考 文 献]

- [1] 王翼龙. 黄土高原半干旱区两典型林分主要树种光合耗水特性及影响因素研究[D]. 杨凌:中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 2010.
Wang Yilong. Characteristics of Photosynthesis and Water Use of Dominant Tree Species in Two Typical Forests and Related Factors in the Semiarid Region of Loess Plateau, China[D]. Yangling: Research Centre of Soil and Water Conservation & Eco-environment, CAS, EM, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [2] Wang Yilong, Liu Guobin, Kume T, et al. Estimating water use of a black locust plantation by the thermal dissipation probe method in the semiarid region of Loess Plateau, China[J]. Journal of Forest Research, 2010, 15(4): 241 - 251.
- [3] Du Sheng, Wang Yilong, Kume T, et al. Sapflow characteristics and climatic responses in three forest species in the semiarid Loess Plateau region of China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(1): 1 - 10.
- [4] 王百田, 张府娥. 黄土高原主要造林树种苗木蒸腾耗水特性[J]. 南京林业大学学报:自然科学版, 2003, 27(6): 93 - 97.
Wang Baitian, Zhang Fue. A Study on Transpiration Characteristics of Seedlings for Forestation in the Loess Plateau[J]. Journal of Nanjing Forestry University: JCR Science Edition, 2003, 27(6): 93 - 97. (in Chinese with English abstract)
- [5] 刘璇, 王渭玲, 徐福利, 等. 黄土丘陵区梨枣树氮、磷、钾施肥效应与施肥模式[J]. 林业科学, 2013, 49(2).
Liu Xuan, Wang Weiling, Xu Fuli, et al. The nitrogen, phosphorus, potassium fertilizer effect and fertilization model of pear jujube in Loess hilly-gully region[J]. Forest Science, 2013, 49(2). (in Chinese with English abstract)
- [6] 于金凤, 刘文兆, 甘卓亭, 等. 黄土塬区苹果树蒸腾速率变化特征及其影响因子[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(4): 59 - 63.
Yu Jinfeng, Liu Wenzhao, Gan Zhuoting, et al. The characteristics of apple tree transpiration rate and its influencing factors on the loess tableland region[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(4): 59 - 63. (in Chinese with English abstract)
- [7] 郭忠升, 邵明安. 黄土丘陵半干旱区柠条锦鸡儿人工林对土壤水分的影响[J]. 林业科学, 2010, 46(12): 1 - 7.
Guo Zhongsheng, Shao Ming'an. Effect of artificial caragana korshinskii forest on soil water in the semiarid area of loess hilly region[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010, 46(12): 1 - 7. (in Chinese with English abstract)
- [8] Sung H H, Hendrickx J M, Borchers B, et al. Up-scaling of SEBAL derived evapotranspiration maps from Landsat (30 m) to MODIS (250 m) scale [J]. Journal of Hydrology, 2009, 370(1): 122 - 138. (in Chinese with English abstract)
- [9] Anderson M C, Kustas W P, Norman J M, et al. Upscaling flux observations from local to continental scales using thermal remote sensing[J]. Agronomy Journal, 2007, 99(1): 240 - 254.
- [10] Anderson M C, Norman J M, Kustas W P, et al. A thermal-based remote sensing technique for routine mapping of land-surface carbon, water and energy fluxes from field to regional scales [J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(12): 4227 - 4241.
- [11] 许迪. 灌溉水文学尺度转换问题研究综述[J]. 水利学报, 2006, 37(2): 141 - 149.
Xu Di. Review on scaling study in irrigation hydrology[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(2): 141 - 149. (in Chinese with English abstract)
- [12] Irmak S, Mutibwa D, Irmak A, et al. On the scaling up leaf stomatal resistance to canopy resistance using photosynthetic photon flux density[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2008, 148(6): 1034 - 1044.
- [13] 蔡甲冰, 许迪, 刘钰, 等. 冬小麦返青后腾发量时空尺度效应的通径分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8): 69 - 76.
Cai Jiabing, Xu Di, Liu Yu, et al. Scaling effects and transformation of crop evapotranspiration for winter wheat after reviving[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(8): 69 - 76. (in Chinese with English abstract)
- [14] 刘国水, 刘钰, 蔡甲冰, 等. 农田不同尺度蒸散量的尺度效应与气象因子的关系[J]. 水利学报, 2011, 42(3): 284 - 289.
Liu Guoshui, Liu Yu, Cai Jiabing, et al. Study on scale effect of farmland evapotranspiration and relationship with meteorological factors[J]. Journal of Hydraulic Engineering (Natural Science Edition), 2011, 42(3): 284 - 289. (in Chinese with English abstract)
- [15] 杨汉波, 杨大文, 雷志栋, 等. 任意时间尺度上的流域水热耦合平衡方程的推导及验证[J]. 水利学报, 2008, 39(5): 610 - 617.

- Yang Hanbo, Yang Dawen, Lei Zhidong, et al. Derivation and validation of watershed coupled water-energy balance equation at arbitrary time scale[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 39(5): 610 - 617. (in Chinese with English abstract)
- [16] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements[J]. *Tree Physiol*, 1987, 3(4): 309-320
- [17] 康绍忠, 刘晓明, 熊运章. 土壤-植物-大气连续体水分传输理论及其应用[M]. 北京: 水利电力出版社, 1994.
- [18] Liu Shouyang, Wang Youke, Wei Xindong, et al. Measured and estimated evapotranspiration of jujube forests in the loess plateau, China[J]. *International Journal of Agriculture and Biology*, 2013, 15: 811-819.
- [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 Lvliu, Rao Xingquan, et al. Water consumption and annual variation of transpiration in mature *Acacia mangium* Plantation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(20): 6038 - 6048. (in Chinese with English abstract)
- [20] Savva Y, Szlavecz K, Carlson D, et al. Spatial patterns of soil moisture under forest and grass land cover in a suburban area, in Maryland, USA[J]. *Geoderma*, 2013, 192: 202 - 210.
- [21] Zhao Ying, Stephan P, Agnieszka R, et al. Response of soil moisture and temperature to grazing intensity in a *Leymus chinensis* steppe, Inner Mongolia[J]. *Plant and soil*, 2011, 340(1/2): 89 - 102.
- [22] 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 jujuba* Mill.) plantations in semiarid Northwest China[J]. *Agricultural Water Management*, 2014(136): 23 - 33.

Time scale effect on main factors that influence jujube transpiration in hillside jujube orchard

Wei Xinguang¹, Chen Dianyu¹, Wang Xing¹, Wang Youke^{1,2}, Wei Xindong^{1,3}

(1. *College of Water Resources and Architecture Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;* 2. *Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China;* 3. *School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China*)

Abstract: Jujube is widely cultivated in the Loess Plateau region with limited water resources because of its adaptation and high economic benefits. It is necessary to understand the jujube transpiration in order to provide a sustainable cultivation strategy with high water use efficiency. However, the results from the related studies vary partly because of the time-scale difference in different studies. This study aimed to investigate the influence of time scale effect on transpiration. Monthly and annual transpiration and its driving factors were monitored in the year of 2012-2013 in jujube plantations of the Loess Plateau. The relationship between transpiration and factors was analyzed. The results showed that: 1) With the ascension of time scale, the influence of meteorological factors on transpiration decreased, but the influence of crop growth status on transpiration increased, for both monthly transpiration and annual transpiration; however, the main impact factors of monthly transpiration were different from that of annual transpiration under the same time scale; 2) For monthly transpiration, the determination coefficient R^2 of its main impact factors varied with the time: during the growth period (May to October), the R^2 was higher than the dormant period, and the main impact factors at hourly, daily, and a period of ten days transpiration were photosynthetically active radiation (PAR), relative humidity (RH) and wind speed (WS), leaf area index (LAI) and leaf area (LA), respectively; 3) For annual transpiration, as the ascension of dimensions, the changing trends of R^2 of its impact factors were classified into three types: increase first and then decrease (temperature TA), PAR, vapor pressure deficit VPD), increase (soil water content SW, LA, LAI), and decrease first and then increase (RH, WS). Transpiration on smaller time scales (hourly and daily) had significant ($p < 0.01$) correlations with meteorological factors (except for wind speed that had a complicated influence), but with LAI, LA and SW only on larger time scales (ten daily and monthly). By the correlation analysis and comparison of transpiration and its impact factors under different time scales, we found that time scale was one of the important factors affecting their relationships. This conclusion is very important not only for revealing the impact mechanism of relevant factors on transpiration, but also for optimizing the management of jujube plantations in mountainous regions and guiding development of new type water-saving agricultural technology for dry land. Moreover, it has great value to improve the economic and ecological benefits of jujube plantations in mountainous regions, as well as to promote the sustainable development.

Key words: transpiration; water content; statistic analysis; scale effect; comprehensive meteorological factor; leaf area index