

干旱绿洲区微喷灌枣园蒸散量 时空尺度转换研究

张 洋,马英杰

(新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘 要:为探究干旱绿洲区不同时空尺度单棵枣树蒸散量向枣园尺度蒸散量的转换关系,通过涡度系统、茎流计和微型蒸渗仪对枣园蒸散量、枣树蒸腾量和土壤蒸发量进行了监测。通过对茎流系统与涡度系统测量的不同时间、空间尺度的枣园蒸散量进行分析,分析从点(枣树)尺度蒸散量向面(枣园)尺度蒸散量的转换关系得出:(1)全生育期蒸腾量为403.2 mm,占蒸散量的75%,各生育期的蒸腾量占比蒸散量的大小依次为成熟期>果实膨大期>花期>萌芽展叶期;(2)日尺度与灌水周期尺度下茎流系统和涡度系统测定枣园蒸散量的线性回归方程分别为: $Y=0.964X, R^2=0.674, NSE=0.67, RSR=0.57$; $Y=0.965X, R^2=0.832, NSE=0.78, RSR=0.47$;(3)茎流系统与涡度系统测得蒸散量的总差值为4.98 mm,差值占比0.93%。因此,茎流系统在不同时空尺度下测量的枣树蒸散量与涡度系统测量的枣园蒸散量均有较好的相关性,茎流系统测定的单棵枣树蒸散量能够向枣园尺度蒸散量转换。

关键词:枣园;蒸散量;土壤蒸发量;茎流;涡度;喷灌

中图分类号:S161.4;S665.1;S275.5 **文献标志码:**A

Temporal and spatial scale transformation of evapotranspiration of jujube orchard under micro sprinkler irrigation in arid oasis

ZHANG Yang, MA Yingjie

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China)

Abstract: The purpose of this study was to explore the transformation of single jujube tree evapotranspiration to jujube orchard evapotranspiration in different spatial and temporal scales in arid oasis area. In this experiment, the evapotranspiration of jujube orchard, jujube tree and soil evaporation were monitored by eddy covariance system, stem flow meter and micro lysimeter. Based on the analysis of evapotranspiration of jujube orchard measured by stem flow system and eddy covariance system in different time and space scales, the transformation relationship from point (jujube tree) scale evapotranspiration to surface (jujube orchard) scale evapotranspiration was revealed. The main conclusions are as follows: (1) The transpiration of the whole growth period was 403.2 mm, accounting for 75% of the total evapotranspiration. The order of the transpiration of each growth period was fruit maturity>fruit enlargement>flowering > leaf bud stage. (2) The linear regression equations of stem flow system and eddy covariance system for measuring evapotranspiration of jujube orchard under daily scale and irrigation cycle scale were $Y=0.964X, R^2=0.674, NSE=0.67, RSR=0.57$; $Y=0.965X, R^2=0.832, NSE=0.78, RSR=0.47$. (3) The total difference of evapotranspiration between stem flow system and eddy covariance system was 4.98 mm, accounting for 0.93%. In summary, the jujube evapotranspiration measured by stem flow system in different spatial and temporal scales had a good correlation with the jujube orchard evapotranspiration measured by eddy covariance system, and the single jujube tree evapotranspiration measured by stem flow system could be converted to the jujube orchard scale evapotranspiration.

收稿日期:2021-07-13

修回日期:2021-12-13

基金项目:国家自然科学基金(52069027);邓铭江院士工作站基金项目(2020.D-003);新疆高校科研计划项目(XJEDU2017T004)

作者简介:张洋(1997-),男,新疆阿拉尔人,硕士研究生,研究方向为节水灌溉技术。E-mail:1214598316@qq.com

通信作者:马英杰(1969-),男,新疆乌鲁木齐人,教授,博士生导师,主要从事干旱区灌溉排水理论与技术研究。E-mail:342834436@qq.com

Keywords: jujube orchard; evapotranspiration; soil evaporation; stem flow; eddy covariance; spray irrigation

新疆拥有得天独厚的地理位置和政策导向优势,特色林果业已经成为当地经济和社会发展的支柱产业^[1]。新疆红枣的产量约占全国总产量的 25%^[2],其经济价值突出。环塔里木盆地红枣的种植面积约占全疆的 90%,其中大部分仍以漫灌为主^[3],灌水定额高达 15 000~18 000 m³ · hm⁻²,这种漫灌方式使水资源的利用效率降低,并且导致了水资源的严重短缺,制约了当地经济的可持续发展^[4]。

在农田系统中,栽培植物绝大部分的吸水量通过蒸散形式被消耗^[5],蒸散包括植株蒸腾和土壤蒸发,是农田生态系统中水热平衡的重要组成部分。在不同时空尺度下如何准确测定作物蒸散量这一热点问题^[6-8]始终被众多学者关注。主要的测量方法有光合作用仪法^[9]、茎流法^[10]、蒸渗仪法^[11]、涡度相关法^[12]、大孔径闪烁仪法^[13]及遥感法^[14]。由于测量方法的原理、技术、假设理论及背景环境等都不尽相同,各有其局限性和优势。通过长期的实践证明,茎流法是单株尺度下植物蒸腾量测定较为可靠的方法,其测量精度较高,测量范围广,可适用于不同地区^[15-16]、较多类型的植物^[17-18],可在野外苛刻的环境下对植物蒸腾量进行长时间定点连续测定。涡度相关法理论完备、假设条件少,其他仪器测量数据的精度常用涡度系统的数据作为参考依据,目前被广泛应用于农田、草原、森林等^[19-21]生态系统的蒸散研究。枣树的蒸散量研究在黄土高原地区较多^[22-23],且研究的内容侧重于枣树蒸散量的特征分析及蒸散模型^[24-26],而新疆枣树蒸散量的研究较少^[27]。

以微型蒸渗仪^[28]测定的土壤蒸发量和茎流计测定的单棵枣树蒸腾量作为枣树的蒸散量,称为茎流系统。茎流系统测得点(单棵枣树)尺度的蒸散

量与涡度系统测量面(枣园)尺度的蒸散量,其测量尺度有很大不同,而两者的关系究竟如何还有待研究。本文通过对茎流系统与涡度系统测定的点(枣树)、面(枣园)尺度的蒸散量值进行对比,分析不同时空尺度下二者蒸散量的关系,探究点、面尺度间蒸散量的转换关系,旨在为干旱区枣树蒸散量尺度的转换研究提供方法和思路,为制定新疆枣园科学的灌溉制度提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验区位于新疆阿克苏市南工业园内,80°22'E,41°08'N,海拔 1 133 m。试验枣园地势较为平坦,园内东南角高,西北角相对较低。地处塔里木盆地北部,属于大陆性南温带干旱气候,光照资源丰富,四季分明。多年平均日照时数达 2 911 h,多年平均太阳辐射 5 671.36 w · m⁻²,年平均降雨量为 68.4 mm,多年平均气温 11.2℃,日最高温 40.9℃,日最低温为-27.4℃,无霜期长达 212 d。土壤的物理性质参数见表 1。

1.2 试验材料

试验时间:2020 年 4—11 月,供试灰枣树在 2000 年栽植,树龄 20 a,平均株高约 4 m,株行距 2.0 m×4.0 m。试验区采用微喷灌溉,管道布置在 2 行树中间,管径 20 mm,微喷头流量 47 L · h⁻¹,喷头间距 3.0 m,喷洒半径 1.5 m。灌溉制度采用当地的制度,在枣树花期前每 10 d 左右灌水,一次灌水时长为约 10 h;花期后每 5 天左右灌水,一次灌水时长约 5 h。通过对成龄灰枣树在整个生育期的观察和记录,把生育期划分为 4 个部分,见表 2。

表 1 土壤剖面基本物理性状
Table 1 Basic physical properties of soil

土层 Soil layer/cm	土壤容重 Soil bulk density /(g · cm ⁻³)	>0.05 mm 砂粒含量 Sand(>0.05 mm) content/%	0.002~0.05 mm 粉(砂)含量 Silt (0.002~0.05 mm) content/%	<0.002 mm 粘粒含量 Clay (<0.002 mm) content/%	土壤质地 Soil texture
0~10	1.57	95.8	3.6	0.6	细砂 Fine sand
10~20	1.61	95.2	4.1	0.7	细砂 Fine sand
20~30	1.57	95.5	3.9	0.6	细砂 Fine sand
30~40	1.63	80.8	16.2	3.0	壤砂土 Loam sandy soil
40~50	1.59	96.4	3.1	0.5	细砂 Fine sand
50~60	1.65	95.9	3.5	0.6	细砂 Fine sand
60~70	1.64	94.5	4.7	0.8	细砂 Fine sand
70~80	1.68	91.5	7.4	1.1	细砂 Fine sand
80~90	1.66	42.7	45.6	11.7	壤土 Loam
90~100	1.64	80.8	16.2	3.0	壤砂土 Loam sandy soil

1.3 项目测定及方法

本试验采用涡度系统对枣园蒸散量进行测定,采用茎流系统对枣树蒸散量进行测定。

1.3.1 枣园蒸散量的测定 园内试验仪器布置如图 1 所示,通过涡度系统对枣园蒸散量进行测定。本试验涡度相关系统设立在枣园的中心位置,该系统由三维超声风速仪和红外气体分析仪一体机(IR-GASON, Campbell Scientific, USA)组成,架设高度 6.0 m;四分量辐射计(CNR4)架设高度 4.2 m;土壤热通量板(HFP01)埋设于地下 5.0 cm 处,两块土壤热通量板间距 1.0 m,分别埋在干燥区域和湿润区域;采集涡度相关所有仪器观测的数据采集器 CR3000,安装高度 1.5 m,数据采集器程序设定为每秒采集数据 10 次,每 30 min 记录一次数据,CR3000 内载 Campbell Easy-Flux DL 在线全修正软件(Campbell Scientific Inc.2016)修正数据。在后期数据处理的过程中,依据以下原则对异常数据剔除和修补:传感器出现异常的数据、超出物理意义的异常数据及降雨前后 1 h 的数据。通过对观测的数据进行分析,枣园能量闭合度 0.81。计算蒸散量通过以下公式计算:

$$LE = \lambda C_p \overline{\omega'P'} \tag{1}$$

$$H = \rho C_p \overline{\omega'T'} \tag{2}$$

$$ET = 0.0018 \times LE/\lambda \tag{3}$$

式中, LE 为潜热通量($W \cdot m^{-2}$); H 为显热通量($W \cdot m^{-2}$); λ 为汽化潜热($J \cdot g^{-1}$); C_p 为空气定压比热($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$); ω' 为垂直风速脉动量($m \cdot s^{-1}$); P' 为比湿脉动量($g \cdot m^{-3}$); ρ 为干空气密度($g \cdot m^{-3}$); T' 为温度脉动量($^{\circ}C$); ET 为蒸散量(mm)。

1.3.2 枣树蒸腾量的测定 本试验随机选取长势基本一致、无病虫害且生长健康的灰枣树 3 棵。通过针式茎流计对其进行茎流速率的测定。3 棵样树的探针都安装在同样高度的位置以及每棵树上的两根探针间隔距离也相同,其中加热探针距地面 40 cm,另一根探针距加热探针上方 12 cm,并用泡沫板进行固定,用反光膜和隔热膜进行包裹,在探针上方用胶布对其包裹密封,防止水流顺着枣树的茎干流下并接触传感器。为了保持空气的流通性,探针下方不进行密封。每 30min 采集并记录一次数据。茎流速率计算公式如下:

$$U = 0.714 \times \left(\frac{\Delta T_{max} - \Delta T}{\Delta T} \right)^{1.231} \tag{4}$$

$$S = 0.1364C^{1.6936} \tag{5}$$

$$T = SU \tag{6}$$

式中, U 为茎流速率($ml \cdot cm^{-2} \cdot min^{-1}$); ΔT 为两探

针之间的温度差($^{\circ}C$); ΔT_{max} 为晚间两个探针之间最大温差($^{\circ}C$); S 为边材面积(cm^2); C 为树体周长(cm); T 为枣树蒸腾量($mm \cdot m^{-2}$)。

1.3.3 土壤蒸发量的测定 在测量茎流的 3 棵样树下,通过自制微型蒸渗仪测定土壤的蒸发量。微型蒸渗仪是由两个 PVC 管组成。外侧的 PVC 管长为 200 mm,直径为 125 mm;内侧 PVC 管长为 150 mm,直径为 110 mm,底部有钢丝网封底。在生育期内,选取一棵样树,沿株距方向 50 cm 处布置 1 个微型蒸渗仪,沿行距方向每隔 50 cm 布置 1 个微型蒸渗仪,共布置 4 个;3 棵样树共计 15 个微型蒸渗仪。在每次灌水次日的 10:30 用电子秤(精度为 0.01 g)对内侧 PVC 管土壤进行换土称重,每次灌水前一天早上 10:30 对内侧 PVC 管土壤称重,两次测量后重量的差值为此次灌水周期内土壤蒸发量的实测值,降完雨后则需及时换土称重。计算公式如下:

$$E = \frac{10A}{\pi r^2} \tag{7}$$

式中, E 为土壤蒸发量($mm \cdot m^{-2}$); A 为灌溉后一天与前一天微型蒸发器质量差值(g); π 为圆周率; r 为除去壁厚的 PVC 内管半径(cm)。

表 2 枣树生育期的划分/(m-d)

Table 2 Division of growth period of jujube			
萌芽展叶期(D1)	花期(D2)	果实膨大期(D3)	成熟期(D4)
Leaf bud stage	Flowering	Fruit enlargement	Fruit maturity
04-15—05-15	05-16—06-22	06-23—09-02	09-03—10-14

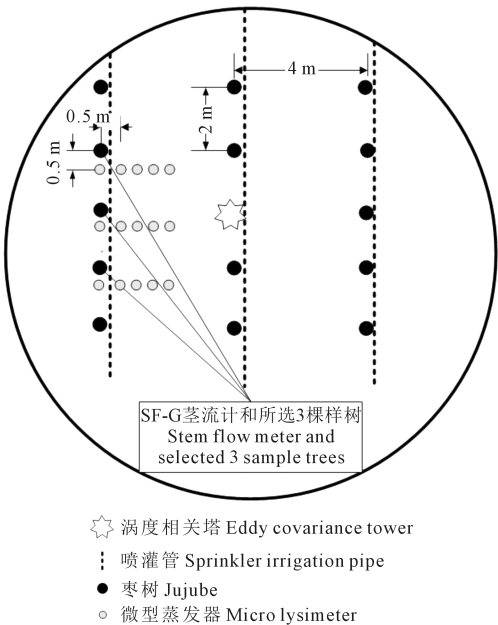


图 1 试验区喷灌枣园仪器布置图

Fig.1 Instrument layout of sprinkling irrigation jujube orchard in experimental area

1.3.4 数据评价标准 采取均方根误差与观测值标准差比率(RSR)和纳什系数(NSE)作为本试验数据精度的评价指标。计算结果在 $0 \leq RSR \leq 0.5$, $0.75 < NSE \leq 1$ 范围时,表明结果极好;在 $0.5 < RSR < 0.6$, $0.65 < NSE < 0.75$ 范围时,表明结果良好;在 $0.6 < RSR < 0.7$, $0.5 < NSE < 0.65$ 范围时,表明结果一般;在 $RSR > 0.7$, $NSE \leq 0.5$ 范围时,计算结果不接受。

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (ET_{wi} - ET_{ji})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (ET_{wi} - \overline{ET_{wi}})^2}} \quad (8)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (ET_{wi} - ET_{ji})^2}{\sum_{i=1}^n (ET_{wi} - \overline{ET_{wi}})^2} \quad (9)$$

式中, ET_{wi} 为涡度系统测定枣园第 i 天的蒸散量 (mm); ET_{ji} 为茎流系统测定枣树第 i 天蒸散量 (mm); $\overline{ET_{wi}}$ 为涡度系统测定枣园蒸散量的日平均值 (mm); n 为数据总个数。

2 结果与分析

2.1 典型日茎流速率和潜热通量的变化规律

通过茎流速率可以间接推算出枣树的蒸腾量,通过潜热通量可以间接计算出蒸散量。在枣树整个生育期内选取各个月典型日(4月21日、5月17日、6月24日、7月22日、8月15日和9月23日)进行茎流速率和潜热通量的对比分析,如图2所示。

各月典型日的茎流速率和潜热通量变化总体上呈现出先增大后减小的趋势。各时期从启动时间、

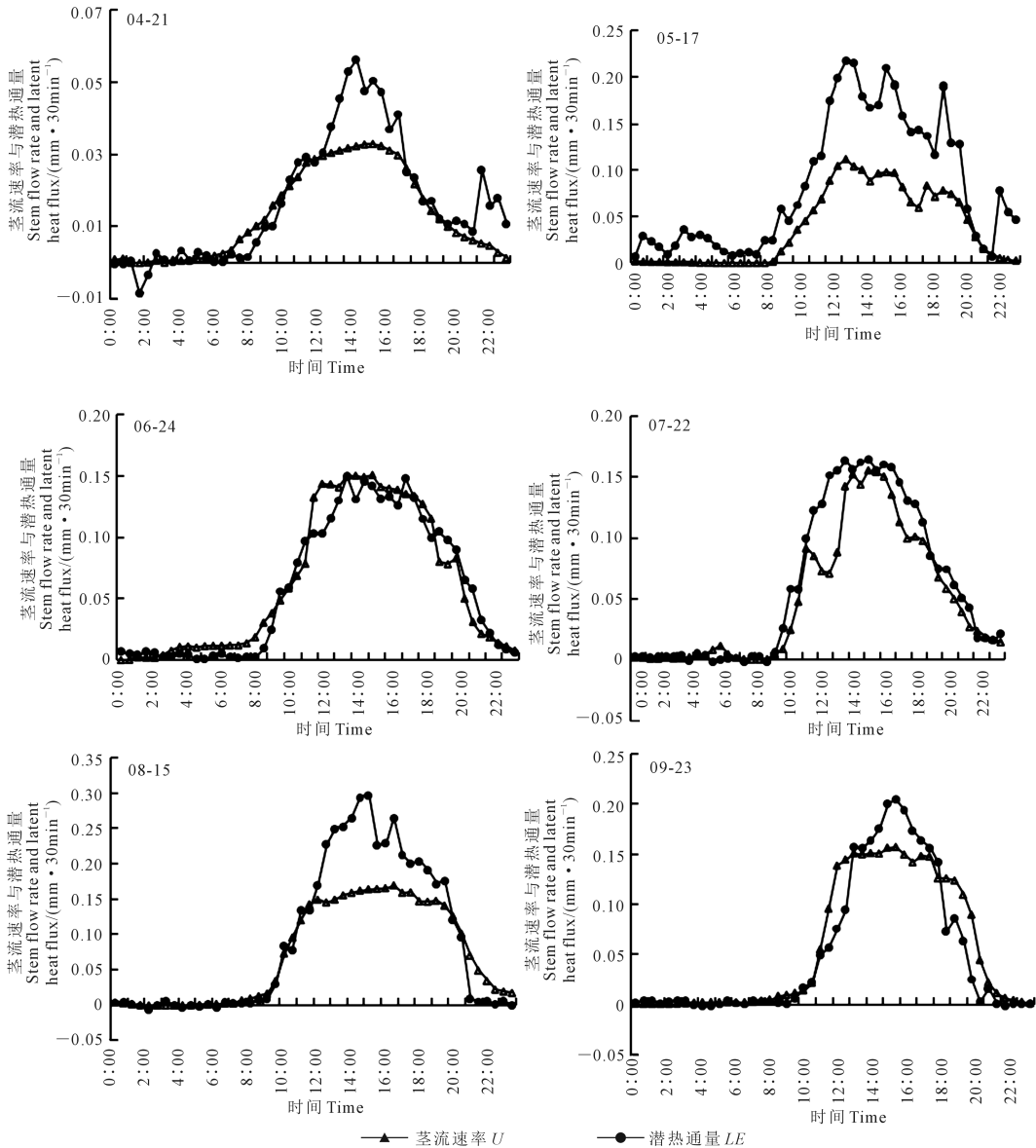


图 2 枣园各月典型日茎流速率和潜热通量变化规律

Fig.2 Variation of stem flow rate and latent heat flux at half-hour scale on typical day of each month in jujube orchard

最大增幅或降幅时间及峰值时间都有很明显差异。启动时间上茎流速率在 4 月的 6 : 00—7 : 00,其余各月在 8 : 00—9 : 00;潜热通量在 4—6 月的启动时间为 8 : 00—9 : 00,7—9 月为 9 : 00—10 : 00,潜热通量相对茎流速率的启动时间上有明显的滞后性。茎流速率和潜热通量最大增幅和降幅时间大都在 10 : 00—13 : 00 和 17 : 30—20 : 30。茎流速率和潜热通量峰值均在 4 月最小、8 月最大,分别为 0.03、0.05 mm · 30min⁻¹;0.17、0.29 mm · 30min⁻¹。在整个生育期内于 30 min 尺度下对茎流速率和潜热通量进行相关性分析,相关系数为 0.878 ($P < 0.01$, $N = 8832$),潜热通量和茎流速率具有显著相关关系。

通过各典型日对茎流速率和潜热通量变化规律进行分析,发现在一天中 11 : 30—18 : 00,茎流速率的波动幅度相对于潜热通量更加平缓。主要因为两种仪器的工作原理不同,茎流计通过探针测定枣树液流流过两根探针的温差计算茎流速率;涡度系统通过测定大气中的气象指标进而对潜热通量进行推算,其结果受气象条件的影响较大,而气象条件对枣树茎流速率的影响相对滞后,因此茎流速率相对潜热通量的变化趋势较为平缓。在 22 : 00 至次日 8 : 00,潜热通量和茎流速率都趋于零或在趋于零的过程中小范围内波动,但潜热通量在 4、5 月的 9 : 30 至次日的 4 : 30 出现明显的震荡现象,通过气象数据分析,发现夜间大风导致涡度系统测定的潜热通量出现波动。

2.2 枣树各生育期蒸散量与枣园蒸散量变化分析

通过茎流系统测量的枣树蒸散量和通过涡度系统测定的枣园蒸散量,其观测结果如图 3 和表 3 所示。茎流系统和涡度系统监测的蒸散量变化规律基本相同,从萌芽展叶期(D1)、花期(D2)的逐渐增大,果实膨大期(D3)达到最大,到成熟期(D4)内逐渐减小。这 4 个时期茎流系统和涡度系统测得蒸散量的平均值依次为:1.26 mm · d⁻¹和 1.33 mm · d⁻¹、2.82 mm · d⁻¹和 2.92 mm · d⁻¹、3.92 mm · d⁻¹、3.67 mm · d⁻¹以及 2.56 mm · d⁻¹和 2.76 mm · m⁻² · d⁻¹。各生育期的土壤蒸发量和枣树蒸腾量的平均值依次为:0.39 mm · d⁻¹和 0.90 mm · d⁻¹、0.75 mm · d⁻¹和 2.14 mm · d⁻¹、1.13 mm · d⁻¹和 2.84 mm · d⁻¹以及 0.36 mm · d⁻¹和 2.22 mm · d⁻¹。全生育期蒸腾量为 403.2 mm,占蒸散量的 75%,各生育期的蒸腾量占比蒸散量的大小依次为 D4>D3>D2>D1。各生育期的蒸腾量大小依次为 D3>D4>D2>D1,土壤蒸发量的大小依次为 D3>D2>D4>D1。

2.3 不同时间尺度下枣园茎流系统和涡度系统测定蒸散量相关分析

微型蒸渗仪是以灌水周期对土壤蒸发量进行测定的,所以茎流系统和涡度系统同样以灌水周期作为相同的时间尺度。二者测定的枣园蒸散量如图 4a 所示,茎流系统和涡度系统测量的变化规律基本一致,且茎流系统测得的总蒸散量为 538.37 mm,与涡度系统的蒸散量仅差 4.98 mm,比例仅为 0.93%。在灌水周期时间尺度下,整个生育期内二者差值在 0.01~3.25 mm 的范围内波动,花期和果实膨大期茎流系统测得的蒸散量大多数都略高于涡度系统,一般认为涡度系统测量蒸散量的结果比其他方法略小^[29]。通过对茎流系统和涡度系统测定的枣园蒸散量进行线性回归分析,结果如图 4(b)所示,二者具有较高的相关性,回归方程为:Y = 0.965X, R² = 0.832。通过统计分析, NSE = 0.78, RSR = 0.47,数据计算结果极好。

根据每日的参考作物蒸发蒸腾量在灌水周期内所占权重对每日土壤蒸发量进行加权分配得到日土壤蒸发量。日尺度下二者测定的枣园蒸散量如图 5(a)所示。茎流系统和涡度系统测得枣园蒸散量的变化范围分别为:0.32~4.97 mm 和 0.31~5.12 mm。在日尺度下,整个生育期内二者差值在 0.01~1.87 mm 的范围内波动,在灌水当天和后两天中两个系统测得蒸散量的差值较大(约 1 mm),可能是因为没有实际测量的日土壤蒸发量,仅从灌水周期尺度推延到日尺度的过程存在一定偏差。整个生育期内二者蒸散量在花期和果实膨大期的差值波动相对于成熟期较小。通过对茎流系统和涡度系统测定枣园的蒸散量进行线性回归分析,结果如图 5(b)所示,二者具有较高的相关性,回归方程为:Y = 0.964X, R² = 0.674, NSE = 0.67, RSR = 0.57,数

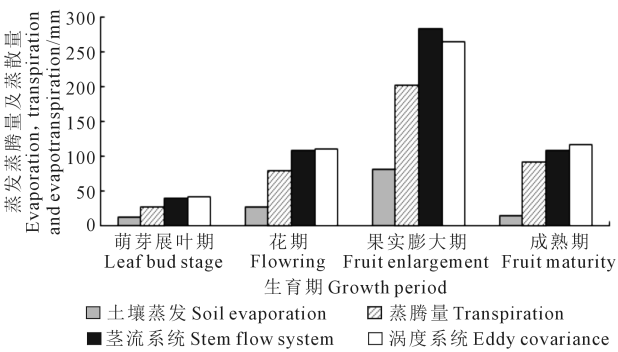


图 3 枣园各生育期蒸发蒸腾量及蒸散量的变化规律
Fig.3 Variation of evaporation, transpiration, and evapotranspiration in different growth stages of jujube orchard

表 3 枣园各灌水周期的蒸发蒸腾量及蒸散量					
Table 3 Evaporation, transpiration and evapotranspiration of each irrigation period in jujube orchard					
生育期 Growth period	灌水周期 Irrigation cycle/(m-d)	土壤蒸发量 Soil evaporation/mm	蒸腾量 Transpiration/mm	茎流系统蒸散量 Evapotranspiration of stem flow system/mm	涡度系统蒸散量 Evapotranspiration of eddy covariance/mm
D1	04-14—05-05	7.69	11.18	18.87	19.55
	05-06—05-16	5.16	17.77	22.93	24.88
D2	05-17—05-23	4.94	13.73	18.67	19.34
	05-24—06-02	6.73	21.73	28.46	28.47
	06-03—06-10	5.39	17.57	22.96	25.44
	06-11—06-16	4.70	10.90	15.59	17.10
	06-17—06-21	5.42	11.18	16.60	14.63
	06-22—06-27	4.47	17.33	21.80	18.54
D3	06-28—07-03	6.03	14.51	20.54	18.49
	07-04—07-08	5.31	12.57	17.88	16.70
	07-09—07-14	5.80	15.40	21.20	19.27
	07-15—07-19	5.89	11.82	17.71	16.39
	07-25—07-24	5.86	12.86	18.71	17.61
	07-25—07-29	7.01	15.79	22.80	21.25
	07-30—08-03	7.70	15.75	23.45	22.53
	08-04—08-08	6.72	15.92	22.64	20.44
	08-09—08-13	5.05	14.62	19.67	17.67
	08-14—08-18	5.43	15.68	21.11	21.34
	08-19—08-23	5.13	14.15	19.29	20.61
	08-24—08-28	6.00	15.19	21.19	20.38
D4	08-29—09-02	4.88	13.10	17.98	16.38
	09-03—09-07	4.88	10.71	15.60	15.31
	09-08—09-12	4.67	11.56	16.24	14.90
	09-13—10-14	5.23	71.27	76.50	86.18

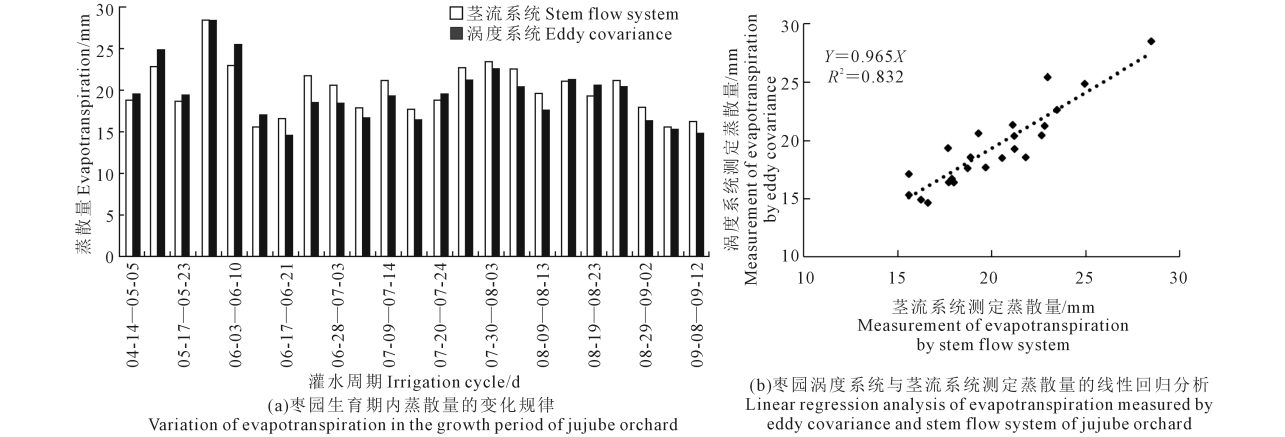


图 4 灌水周期内枣园茎流系统和涡度系统测定蒸散量的相关分析

Fig. 4 Correlation analysis of evapotranspiration measured by stem flow system and eddy covariance in jujube orchard scale

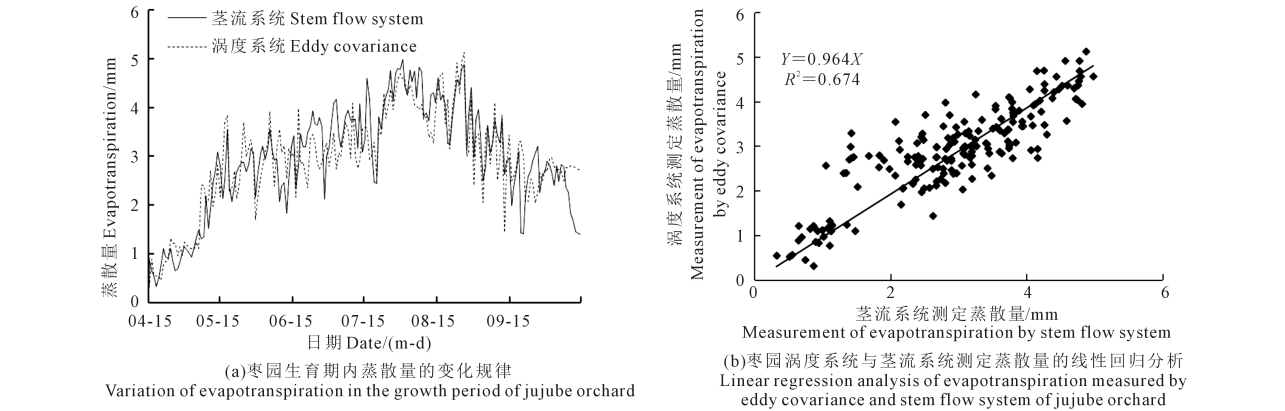


图 5 日尺度下枣园茎流系统和涡度系统测定蒸散量的相关分析

Fig.5 Correlation analysis of evapotranspiration measured by stem flow system and eddy covariance in jujube orchard at daily scale

据计算结果良好。综上表明,以茎流计和微型蒸渗仪组成的茎流系统可以测定枣园尺度下的蒸散量,且具有较高的可靠性,进而可以用茎流系统测定的单棵枣树尺度蒸散量向枣园尺度蒸散量转换。

3 讨 论

涡度系统测量枣园蒸散量时受外界气象因素影响较大,尤其是大风天气,而茎流计基本不受天气影响,二者结合使用更能准确地测量枣园蒸散量及反映枣园蒸散发的变化规律。在典型日(6月24日)夜间有明显的液流活动,因为白天枣树蒸腾活动剧烈,为了减少树体水分的亏缺和过度消耗,通过在夜间进行水分的补给以维持自身的动态水分平衡^[30]。此外,在阿克苏地区夜间空气仍然处于干燥状态,且夜间的液流活动受空气流动影响较大,以维持夜间蒸腾导致的水分缺失^[31]。

通过微喷的灌溉方式,枣园蒸腾量占蒸散量75%,这一比例间接反映了无效用水量(土壤蒸发量)的情况。微喷的灌溉方式相对于大水漫灌,有效减少了无效用水,相对于滴灌而言无效用水的比例略有增加,郑明等^[32]对于枣园滴灌局部湿润的土壤蒸发量研究表明,土壤蒸发量占总蒸散量的19.74%。但微喷的灌溉方式更有利于田间小气候的调节^[33],尤其在枣树的花期和果实膨大期降雨量少、空气干燥、相对湿度较低、环境温度较高,此时微喷灌对降低近地表面的空气温度和平均温度作用显著,同时能增加枣园内日平均相对湿度和降低近地表面与冠层间的温度,为枣树的蒸散发提供一个适宜的环境,农田在滴灌条件下的蒸散能力明显低于地表漫灌^[34]。

通过对茎流系统和涡度系统测定枣园蒸散量分析,二者显著相关,但线性回归方程的拟合度并不很好。原因有两点:首先,这和两种仪器的测量原理与测量尺度有关。涡度系统通过大气中垂直风速和水汽密度的协方差来计算蒸散量^[35],单位时间内枣园尺度下经过红外气体分析仪的水汽密度和风速的大小会直接影响其测定结果;茎流计则是在单位时间内单棵枣树尺度下经过两根探针的液流温差来计算枣树蒸腾量^[36]。其次,蒸散量差异与土壤蒸发量有关。本试验下的枣园灌溉充分,枣树的蒸腾量不考虑因土壤含水量太低而导致枣树蒸腾受抑制的情况。当地表的土壤含水率较大时,土壤蒸发越剧烈,在相同的外界气象条件下,枣树蒸腾量也基本相同,但占比总的蒸散量较小,反之当地表含水量较小时,蒸腾量占比蒸散量较大^[37]。因

此,建议灌溉的时间放在阴天或者晚间,减少不必要的无效水蒸发。

在茎流系统测定单棵枣树尺度蒸散量向枣园尺度蒸散量推延的过程发现,茎流系统与涡度系统测定蒸散量的变化趋势和规律较为一致,灌水周期尺度下 $NSE=0.78$, $RSR=0.47$, $R^2=0.832$, 数据计算结果极好;日尺度下 $NSE=0.67$, $RSR=0.57$, $R^2=0.674$, 数据计算结果良好。和其他尺度转换的研究^[38-39]相比,本试验田由果农精心管理,树龄基本相同、树干直径差别较小,因此茎流系统测定单棵枣树的蒸散量可以较好地向枣园尺度蒸散量转换。不同地区必须分析影响单棵树蒸散量差异的因素(树的叶面积指数、树干直径、冠层大小、种植模式等),未来在区域尺度与遥感技术更好地结合使用。

4 结 论

1) 由于两种仪器测量原理的不同,茎流速率在一天中的波动变化与潜热通量相比较为平缓,外界气象条件的突变对涡度系统的数据观测影响很大。

2) 枣园整个生育期的蒸腾量占比蒸散量的大小依次为 $D4>D3>D2>D1$ 。各生育期的蒸腾量大小依次为 $D3>D4>D2>D1$, 土壤蒸发量的大小依次为 $D3>D2>D4>D1$ 。

3) 茎流系统和涡度系统在日尺度和灌水周期尺度下测得枣园的蒸散量在整个生育期内的变化规律基本相同,通过相关分析和回归拟合,二者测得的数据一致性较高。茎流系统测得的总蒸散量为 538.37 mm,与涡度系统的蒸散量仅差 4.98 mm。因此,茎流系统测得点(单棵枣树)尺度的蒸散量能够推延涡度系统测量面(枣园)尺度的蒸散量。

参 考 文 献:

- [1] 彭刚,梁刚,玉山·库尔班,等.阿克苏地区特色林果产业发展现状、问题及对策[J].北方果树,2017, 14(5): 41-43.
PENG G, LIANG G, YUSHAN Kerban, et al. Development status, problems and countermeasures of characteristic forest and fruit industry in Aksu area[J]. Northern Fruits, 2017, 14(5): 41-43.
- [2] 李志刚,姚婷婷.新疆红枣产业供应链管理[J].江苏农业科学, 2017, 45(4): 288-292.
LI Z G, YAO T T. Supply chain management of Xinjiang jujube industry[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(4): 288-292.
- [3] 马文艺,杜虎林,史学斌.塔里木河下游枣树根灌需水量与灌溉制度研究[J].西北农业学报, 2014, 23(11): 92-99.
MA W Y, DU H L, SHI X B. Study on water demand and irrigation schedule of jujube root irrigation in the lower reaches of Tarim river [J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2014, 23(11): 92-99.
- [4] 牛靖冉,王春霞,何新林,等.新疆典型节水灌溉技术的三级模糊

- 评价模型及分析[J].石河子大学学报(自然科学版), 2020, 38(2): 191-198.
- NIU J R, WANG C X, HE X L, et al. Three-level fuzzy evaluation and analysis of typical water-saving irrigation technologies in Xinjiang [J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 2020, 38(2): 191-198.
- [5] KITE G. Using a basin-scale hydrological model to estimate crop transpiration and soil evaporation[J]. Journal of Hydrology, 2000, 229(1/2): 59-69.
- [6] 石磊, 盛后财, 满秀玲, 等.不同尺度林木蒸腾耗水测算方法述评[J].南京林业大学学报(自然科学版), 2016, 40(4): 149-156.
- SHI L, SHENG H C, MAN X L, et al. A review on the calculation methods of water consumption by tree transpiration in different scales [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2016, 40(4): 149-156
- [7] 李炜, 司建华, 苗政.林分耗水的尺度扩展研究进展[J].生态学杂志, 2012, 31(3): 714-723.
- LI W, SI J H, MIAO Z. Research advance in the application of up-scaling methods to stand evapotranspiration[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(3): 714-723.
- [8] 毛沂新.不同研究尺度下森林蒸腾观测技术方法[J].辽宁林业科技, 2015, (4): 49-52.
- MAO Y X. Observation techniques and methods of forest transpiration under different research scales [J]. Liaoning Forestry Science and Technology, 2015, (4): 49-52
- [9] JANUŠKAITIENĖ I. The dynamics of photosynthetic parameters of *Phaseolus vulgaris* and *Vicia faba* under strong cadmium stress[J]. Biologija, 2014, 60(3): 155-164.
- [10] 马长健, 刘馨惠, 卞城月, 等.热平衡式茎流计在测定植物蒸腾耗水中的进展[J].中国农学通报, 2015, 31(32): 241-245.
- Ma C J, LIU X H, BIAN C Y, et al. Application progress of heat balance stem-flow gauge in measuring plant transpiration water consumption[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(32): 241-245.
- [11] 余映军, 齐学斌, 韩洋, 等.蒸渗仪在农业科研上的应用现状及发展趋势[J].中国农学通报, 2020, 36(20): 127-135.
- SHE Y J, QI X B, HAN Y, et al. Lysimeter in agricultural scientific research: Application status and development trend[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2020, 36(20): 127-135.
- [12] 李霞, 刘廷玺, 段利民, 等.半干旱区沙丘、草甸作物系数模拟及蒸散发估算[J].干旱区研究, 2020, 37(5): 1246-1255.
- LI X, LIU T X, DUAN L M, et al. Crop coefficient simulation and evapotranspiration estimation of dune and meadow in semi-arid area [J]. Arid area research, 2020, 37(5): 1246-1255.
- [13] 杨凡, 齐永青, 张玉翠, 等.大孔径闪烁仪与涡度相关系统对灌溉农田蒸散量的对比观测[J].中国生态农业学报, 2011, 19(5): 1067-1071.
- YANG F, QI Y Q, ZHANG Y C, et al. Comparative advantages of large aperture scintillometer and eddy covariance instrument for measuring evapotranspiration in irrigated farmlands[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(5): 1067-1071
- [14] 杨扬, 王丽娟, 岳平, 等.利用陆面模式和遥感经验模型估算半干旱区陆面蒸散量[J].水土保持研究, 2020, 27(5): 147-153, 159.
- YANG Y, WANG L J, YUE P, et al. Terrestrial evapotranspiration estimated based on remote sensing empirical model and land surface model over semi-arid regions[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(5): 147-153, 159.
- [15] GAO Y, DUAN A W, QIU X Q, et al. Modeling evapotranspiration in maize/soybean strip intercropping system with the evaporation and radiation interception by neighboring species model [J]. Agricultural Water Management, 2013, 128: 110-119.
- [16] 黄雅茹, 辛智鸣, 李永华, 等.乌兰布和沙漠人工梭梭茎干液流季节变化及其与气象因子的关系[J].南京林业大学学报(自然科学版), 2020, 44(6): 131-139.
- HUANG Y R, XIN Z M, LI Y H, et al. Seasonal variation of the stem sap flow of artificial *Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge and its relationship with meteorological factors in Ulan Buh desert[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2020, 44(6): 131-139.
- [17] ZHANG Y Q, KANG S Z, WARD E J, et al. Evapotranspiration components determined by sap flow and microlysimetry techniques of a vineyard in northwest China: dynamics and influential factors [J]. Agricultural Water Management, 2011, 98(8): 1207-1214.
- [18] 贾天宇, 刘廷玺, 段利民, 等.半干旱沙丘草甸过渡带人工杨树蒸腾耗水规律[J].生态学杂志, 2020, 39(10): 3255-3264.
- JIA T Y, LIU T X, DUAN L M, et al. Transpiration and water consumption of poplar trees in semi-arid dune meadow transition zone [J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(10): 3255-3264.
- [19] 王娟, 王建林, 刘家斌, 等.R-K 蒸散模型用于华北平原冬小麦农田的参数校正与评价[J].农业工程学报, 2016, 32(9): 99-105.
- WANG J, WANG J L, LIU J B, et al. Calibration and evaluation of R-K evapotranspiration model for winter wheat in north China plain [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(9): 99-105.
- [20] 康晓明, 崔丽娟, 郝彦宾, 等.极端干旱对内蒙古羊草草原水分平衡的影响[J].应用与环境生物学报, 2015, 21(4): 700-709.
- KANG X M, CUI L J, HAO Y B, et al. Effects of extreme drought on the water balance of a *Leymus chinensis* steppe in Inner Mongolia, China[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2015, 21(4): 700-709.
- [21] 林友兴, 张一平, 费学海, 等.云南不同森林生态系统蒸散特征的比较研究[J].云南大学学报(自然科学版), 2019, 41(1): 205-218.
- LIN Y X, ZHANG Y P, FEI X H, et al. Comparative study of evapotranspiration characteristics over different forest ecosystems in Yunnan Province, Southwest China[J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition), 2019, 41(1): 205-218.
- [22] 汪星, 高志永, 高建恩, 等.黄土丘陵区旱作枣树规格与枣林耗水量关系研究[J].农业机械学报, 2017, 48(5): 227-236.
- WANG X, GAO Z Y, GAO J E, et al. Study on the relationship between dryland jujube tree specification and water consumption of jujube forest in loess hilly region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 227-236.
- [23] 胡永翔, 李援农, 张莹.黄土高原区滴灌枣树作物系数和需水规律试验[J].农业机械学报, 2012, 43(11): 87-91, 79.
- HU Y X, LI Y N, ZHANG Y. Experiment on crop coefficient and wa-

ter demand law of jujube under drip irrigation in Loess Plateau of China[J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(11): 87-91,79.

[24] 乔英, 马英杰, 辛明亮.基于改进 S-W 与结构方程模型的干旱区枣园蒸散特征分析[J].农业机械学报, 2021, 52(8): 307-317.

QIAO Y, MA Y J, XIN M L. Analysis of evapotranspiration characteristics of *Ziziphus jujube* Mill. Orchards in arid area based on improved S-W and structural equation model[J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 307-317.

[25] 卫新东, 刘向阳, 陈滇豫, 等.Shuttleworth-Wallace 模型模拟陕北枣林蒸散适用性分析[J].农业机械学报, 2015, 46 (3): 142-151.

WEI X D, LIU S Y, CHEN D Y, et al. Applicability of Shuttleworth Wallace model for evapotranspiration estimation of jujube forests in loess hillygully region[J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 142-151.

[26] 辛小桂, 吴普特, 汪有科, 等.山地梨枣树耗水特征及模型[J].生态学报, 2012, 32 (23): 7473-7482.

XIN X G, WU P T, WANG Y K, et al. A model for water consumption by mountain jujube pear-like[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(23): 7473-7482.

[27] 郑明, 赵经华, 马英杰, 等.新疆阿克苏市郊区滴灌枣园蒸散及环境影响因素[J].新疆农业大学学报, 2018, 41(3): 196-203.

ZHENG M, ZHAO J H, MA Y J, et al. Evapotranspiration and environmental factors of jujube orchards in suburbs of Aksu city, Xinjiang [J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2018, 41 (3): 196-203.

[28] 吴友杰, 杜太生.西北干旱区农田土壤蒸发量及影响因子分析[J].农业工程学报, 2020, 36(12): 110-116.

WU Y J, DU T S. Evaporation and its influencing factors in farmland soil in the arid region of Northwest China[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(12): 110-116.

[29] 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 G S, LIU Y, CAI J B, et al. Study on scale effect of farmland evapotranspiration and relationship with meteorological factors [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(3): 284-289.

[30] 王文明, 郑德明, 姜益娟, 等.滴灌条件下枣树耗水规律的研究[J].干旱地区农业研究, 2014, 32(6): 38-42, 111.

WANG W M, ZHENG D M, JIANG Y J, et al. Research on water consumption rule of jujube tree under drop irrigation[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(6): 38-42, 111.

[31] 岳广阳, 张铜会, 赵哈林, 等.科尔沁沙地黄柳和小叶锦鸡儿茎流及蒸腾特征[J].生态学报, 2006, 26(10): 3205-3213.

YUE G Y, ZHANG T H, ZHAO H L, et al. Characteristics of sap flow and transpiration of *Salix gordejewii* and *Caragana microphylla* in Horqin sandy land, northeast China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(10): 3205-3213.

[32] 郑明, 赵经华, 马英杰, 等.局部湿润模型模拟南疆滴灌枣园蒸散量及蒸腾量适用性研究[J].中国生态农业学报(中英文), 2019, 27 (5): 726-737.

ZHENG M, ZHAO J H, MA Y J, et al. Applicability of partial root-zone irrigation model to simulate evapotranspiration and transpiration in drip irrigation jujube orchards in southern Xinjiang [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(5): 726-737.

[33] 刘海军, 康跃虎, 刘士平.喷灌对冬小麦生长环境的调节及其对水分利用效率影响的研究[J].农业工程学报, 2003, 19(6): 46-51.

LIU H J, KANG Y H, LIU S P. Regulation of field environmental condition by sprinkler irrigation and its effect on water use efficiency of winter wheat [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 19(6): 46-51.

[34] 韩莹莹, 李宏, 程平, 等.不同灌溉条件下幼龄枣园土壤蒸发试验研究[J].江苏农业科学, 2016, 44(1): 220-223.

HAN Y Y, LI H, CHENG P, et al. Experimental study on soil evaporation of young jujube orchard under different irrigation conditions [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2016, 44(1): 220-223.

[35] 李思恩, 康绍忠, 朱治林, 等.应用涡度相关技术监测地表蒸发蒸腾量的研究进展[J].中国农业科学, 2008, 41(9): 2720-2726.

LI S E, KANG S Z, ZHU Z L, et al. Research progress of measurement of land surface evapotranspiration based on eddy covariance technology [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(9): 2720-2726.

[36] 凡超, 邱燕萍, 李志强, 等.荔枝树干液流速率与气象因子的关系[J].生态学报, 2014, 34(9): 2401-2410.

FAN C, QIU Y P, LI Z Q, et al. Relationships between stem sap flow rate of litchi trees and meteorological parameters [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(9): 2401-2410.

[37] 郑明, 赵经华, 马英杰, 等.滴灌条件下枣园蒸散量的不同时空尺度转换研究[J].石河子大学学报(自然科学版), 2019, 37(2): 162-169.

ZHENG M, ZHAO J H, MA Y J, et al. Study on different temporal and spatial scales of evapotranspiration in jujube orchard under drip irrigation [J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 2019, 37(2): 162-169.

[38] 郭映, 董阳, 党慧慧, 等.基于不同时间尺度玉米蒸散蒸腾量及其影响因素[J].资源科学, 2014, 36(7): 1501-1508.

GUO Y, DONG Y, DANG H H, et al. Evapotranspiration and transpiration of maize in two time scales and the environmental effects [J]. Resources Science, 2014, 36(7): 1501-1508.

[39] 赵平, 饶兴权, 马玲, 等.基于树干液流测定值进行尺度扩展的马占相思林段蒸腾和冠层气孔导度[J].植物生态学报, 2006, 30(4): 655-665.

ZHAO P, RAO X Q, MA L, et al. Sap flow - scaled stand transpiration and canopy stomatal conductance in an *Acacia mangium* forest [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2006, 30(4): 655-665.