

西北干旱区盛果期灰枣休眠期液流研究

张 洋, 马英杰*

(新疆农业大学水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052)

摘要:【目的】采用微喷灌的灌溉方式,通过对20年生灰枣的茎流速率连续2 a的定点监测,测定灰枣在休眠期内的耗水量,为新疆盛果期枣园高效节水灌溉提供理论依据。【方法】利用针式茎流计对灰枣树茎流速率连续监测,研究休眠期枣树的茎流速率与气象因子的关联程度。【结果】20年生灰枣在休眠期的夜间有明显的液流活动,在50~490 mL·h⁻¹的范围波动。休眠期茎流速率的峰值区间随着休眠的各阶段的不同而发生变化,从休眠期C1、C2和C3阶段的07:00—10:00间到C4和C5阶段的10:00—13:00间,茎流速率的峰值存在明显的偏移。枣树茎流速率峰值大都在07:00—12:00间波动,休眠前期(C1)和打破休眠期(C5)较大,轻度休眠期(C3)最小。休眠期各阶段的日累积耗水量呈现出先减少后增加的变化趋势,与生育期相反。休眠期各阶段茎流速率与空气湿度的相关系数分别为 $R_{C1}=0.770^{**}$ 、 $R_{C2}=0.818^{**}$ 、 $R_{C3}=0.660^{**}$ 、 $R_{C4}=0.549^{**}$ 和 $R_{C5}=0.769^{**}$ 。利用多元线性回归对枣树茎流速率和气象因子进行输入回归,建立休眠期各阶段枣树茎流速率和气象因子的多元线性回归模型,经过回归系数和相关系数检验,多元线性回归方程均达到了显著水平。【结论】2018年和2019年盛果期灰枣在跨年休眠期内的耗水量占全年总耗水量的22.19%和23.31%。休眠期内对枣树茎流速率影响最显著的气象因子是空气湿度。

关键词:灰枣;液流;休眠期;耗水量

中图分类号:S665.1

文献标志码:A

文章编号:1009-9980(2021)06-0934-13

Stem flow of mature jujube trees during dormancy in arid area of north-west China

ZHANG Yang, MA Yingjie*

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

Abstract: 【Objective】A jujube orchard about 6.67 hm² was selected in the South Industrial Park of Aksu, Xinjiang, for this study. The jujube trees were planted in 2000. Because the jujube trees in this area are mostly flood irrigated, a lot of water is lost due to evaporation and soil leakage. The evapotranspiration of jujube is mainly composed of transpiration and soil evaporation. In order to prevent the evaporation and soil leakage, micro sprinkler irrigation was used in this study. Through the fixed-point monitoring of stem flow rate of mature jujube trees for two consecutive years, the water consumption of mature jujube trees in the growth and dormancy period was accurately measured, which provided a theoretical basis for high-efficiency water-saving irrigation for mature jujube trees. 【Methods】In this experiment, three healthy mature gray jujube trees with similar vigor were randomly selected in the orchard. The stem flow was monitored with thermal diffusion probe method. The probes of 3 tree species were located at the same height and the distance between two probes on each tree was the same. The heating probe was 40 cm from the ground, and the other probe 12 cm above the heating probe, which was fixed by foam board, wrapped with reflective and heat-insulating film, and the top of the probe was wrapped adhesive tape to protect the sensors from the downward water flow along the stem. The correlation between the stem flow rate and meteorological factors during the dormancy period was analyzed, and mul-

收稿日期:2021-01-14 接受日期:2021-03-03

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

作者简介:张洋,男,在读硕士研究生,研究方向为节水灌溉技术。Tel:13579126895, E-mail:1214598316@qq.com

*通信作者 Author for correspondence. Tel:13579998634, E-mail:342834436@qq.com

multiple linear regression models of stem flow rate against meteorological factors were established. 【Results】Based on the analysis of stem flow, it was found that the sap flow still occurred in the dormancy period, and there were great differences in start-up time, maximum increase range, maximum decrease range, peak value and diurnal variation pattern of stem flow. The sap flow activity of mature jujube trees was obvious at night during dormancy period, which fluctuated in the range of 50-490 mL·h⁻¹. The peak range of stem flow rate varied with stages of dormancy, and the peak value of stem flow rate shifted from 7:00—10:00 in C1, C2 and C3 stages to 10:00—13:00 in C4 and C5 stages. The peak value of stem flow rate fluctuated between 7:00 and 12:00, and it was higher in the early dormancy stage (C1) and dormancy breaking stage (C5), and lowest in mild dormancy stage (C3). The daily cumulative water consumption in dormancy period decreased first and then increased, which was opposite to that in the growth stage. Daily cumulative water consumption was 4.99 L in C1 stage, 4.22 L in C2 stage, 4.00 L in C3 stage, 4.88 L in C4 stage, and 5.53 L in C5 stage in the season of 2018—2019; and 5.23 L, 4.99 L, 4.01 L, 4.91 L and 5.19 L in the corresponding stages in the season of 2019—2020. The correlation coefficients between stem flow rate and air humidity were 0.770**, 0.818**, 0.660**, 0.549** and 0.769** for C1, C2, C3, C4 and C5 stages, respectively. The correlation degree between stem flow rate and meteorological factors was in the order of air humidity > air temperature > solar radiation in C1, C2 and C3 stages, and was air temperature > air humidity > solar radiation in C4 stage. The multiple linear regression models of jujube stem flow rate and meteorological factors in dormancy period were established. The regression coefficient and correlation coefficient test showed that the multiple linear regression equation reached significant level. 【Conclusion】The ratio of water consumption of mature jujube trees in dormancy period to the total water consumption of the whole year was 22.19% to 23.31%. Air humidity was the most significant meteorological factor affecting stem flow rate during dormancy period.

Key words: *Ziziphus jujuba* ‘Huizao’; Stem flow; Dormancy period; Water consumption

中国水资源极为短缺,社会经济的被动发展在很大程度上受水资源短缺的制约^[1]。发展节水农业已成为中国农业的重大课题^[2]。作为西北干旱地的南疆片区,地均水资源仅为全国平均水平的六分之一,再加上季节变化差异和水资源的时空分布不均,导致南疆很大面积的土地沙化,生态环境恶化^[3]。南疆农业生产量占地区总值的24%,用水量却占总用水量的93%,农业的单位用水产出效率极低^[4]。阿克苏地区农业用水短缺已成为影响当地农业可持续发展的主要因素,以红枣为首^[5-6]的果树种植业更是受到严重的影响。因此,为了更合理地管理和利用有限的水资源发展特色林果业,在了解果树的水分运输机制和耗水特征的基础上,提高水资源的利用率具有重要的现实意义。

目前,许多研究者已经在果树的生育期内对其树体茎流进行探究。已有枣^[7-8]、苹果^[9-10]、梨^[11-12]、桃^[13-14]、杏^[15-16]、核桃^[17-18]、柑橘^[19-20]等果树茎流的研究

报道。通过针式茎流计^[21]对果树进行连续监测,茎流量的累计变化能直接反映蒸腾量的变化趋势。植物体的水分运输途径是由根通往茎再到叶,最后通过叶片的气孔散失,这其中被蒸腾消耗掉的水分绝大多数来自液流^[22]。建立果树茎流与气象因子(太阳辐射、空气温度、空气湿度、风速等)、环境因子(饱和水汽压差、露点温度、土壤温度、土壤水势等)、灌溉制度(灌水量、灌水时间等)的相关关系,可以得到茎流速率在所有综合因子制约下的变化规律,为了解果树在生育期内的用水量提供依据。国内外学者对多年生植物的休眠期机制研究较多,但是对于果树在休眠期的液流研究较少。Frewen等^[23]研究表明,空气温度是多年生木本植物休眠和诱导抗寒性状的先决条件,通过杨树开春出芽的数量及时间来探究杨树休眠期内温度对其产生的影响。Faust等^[24]和Buban等^[25]研究表明,在休眠期苹果枝芽中的束缚水转自由水是动态的、循序渐进的过程。魏

新光等^[26]研究枣林蒸腾与其影响因子的相关性发现,在生育期(5—10月)的相关性大于休眠期(11月—翌年4月)。

目前,有关枣树在休眠期液流的研究还很少,枣树在长达半年休眠期的液流变化特征及水分运移规律也亟待讨论。笔者利用针式茎流计监测枣树全年的茎流,对枣树在不同气象因子影响下的茎流速率变化规律进行分析,探究枣树休眠期内的耗水规律,建立茎流速率与气象因子的关系模型,精准测定新疆南疆枣树在休眠期的耗水量,为西北干旱区林果节水灌溉提供理论指导。

1 材料和方法

表1 土壤剖面基本物理性状

Table 1 The physical properties of soil

土层 Soil layer/cm	土壤容重 Soil bulk density/ (g·cm ⁻³)	w(>0.05 mm 砂粒) Sand (> 0.05 mm) content/%	w[0.002~0.05 mm 粉(砂)] Silt (0.002-0.05 mm) content/%	w(<0.002 mm 黏粒) 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

年4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。试验区采用种植行单管布置方式进行灌溉,管径20 mm,喷头流量47 L·h⁻¹,喷头间距3 m。在枣树花期前每10 d进行1次灌水,1次灌水时长为10 h;花期后每5 d进行1次灌水,1次灌水时长5 h。通过对盛果期灰枣树整个生育期的观察和记录,并结合其枣树自身的生长特征,把生育期划分为4个时期。根据试验地的日

1.1 试验地概况

试验区位于新疆阿克苏地区阿克苏市南工业园内,共计6.67 hm²,北纬41°08',东经80°22',海拔1133 m。试验园地势较为平坦,园内东南角高,西北角相对较低,沿东南向西北的坡降为10%~25%。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2911 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℃,日极端低温-27.4℃,无霜期长达212 d。土壤的物理性质参数见表1。

1.2 试验材料与处理方法

1.2.1 试验材料 试验时间2 a,2018年4月—2020

照时数和温度变化把休眠期划分为5个时期(表2)。

1.2.2 茎流速率的测定 随机选取长势基本一致、无病虫害、生长健康的灰枣树3株,利用针式茎流计对其进行茎流速率测定。3株样树的探针都安装在同样高度的位置,每株树上的2根探针间隔距离也相同,其中加热探针距地面40 cm,另一根探针位于加热探针上方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

表2 枣树生育期和休眠期的划分

Table 2 Division of growth period and dormancy period of jujube

年度 Year	全年时间划分 Annual time division								
	萌芽展叶期 (D1) Leaf bud stage	花期 (D2) Flowering	果实膨大期 (D3) Fruit enlargement	成熟期 (D4) Fruit maturity	休眠前期 (C1) Prophase of dormancy	休眠过渡期 (C2) Dormancy transition period	轻度休眠期 (C3) Mild dormancy	深度休眠期 (C4) Deep dormancy	打破休眠期 (C5) Breaking dormancy
2018—2019	04-12—	05-26—	06-26—	09-06—	10-21—	12-01—	01-01—	02-01—	03-01—
	05-25	06-25	09-05	10-20	11-30	12-31	01-31	02-28	04-18
2019—2020	04-19—	05-16—	06-23—	09-03—	10-16—	12-01—	01-01—	02-01—	03-01—
	05-15	06-22	09-02	10-15	11-30	12-31	01-31	02-29	04-15

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30 min采集并记录1次数据。茎流速率计算公式^[27]如下:

$$U = 0.714 \times \left(\frac{\Delta T_{\max} - \Delta T}{\Delta T} \right)^{1.231} \quad (1)$$

$$S = 0.1364 \times C^{1.6936} \quad (2)$$

式中, U 为茎流速率($\text{mL} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$); ΔT 为两探针之间的温度差($^{\circ}\text{C}$); ΔT_{\max} 为晚间2个探针之间最大温差($^{\circ}\text{C}$), S 为边材面积(cm^2), C 为树体周长(cm)。

1.2.3 气象数据监测 在试验地内安装小型自动监测气象站 Watch Dog,架设高度为4.5 m。气象站在枣树全生育期监测太阳辐射(R_s)、空气温度(T_a)、空气湿度(RH)、风速(W)等气象因子,每30 min记录1次。

1.3 数据处理与分析

数据采用Excel 2010和SPSS 25.0进行处理和分析,并构建盛果期枣树茎流速率和气象因子的多元回归模型。

2 结果与分析

2.1 休眠期各阶段枣树茎流昼夜变化特征

由于盛果期枣树相邻的休眠期各阶段之间在不同的气象因子条件下茎流速率曲线可能会出现相互重叠的情况,因此,在2018—2019年的休眠期各阶段中间范围内选取连续7 d的茎流速率数据进行对比。2018—2019年选取C1(11月15日—11月21日)、C2(12月13日—12月19日)、C3(1月14日—1月20日)、C4(2月12日—2月18日)、C5(3月11日—3月17日);2019—2020年选取C1(11月13日—11月19日)、C2(12月10日—12月16日)、C3(1月18日—1月24日)、C4(2月15日—2月21日)、C5(3月12日—3月18日),结果如图1所示。枣树休眠期的茎流变化与生育期相比有很大差异,但休眠期各个阶段的茎流昼夜变化趋势相近。随着外界太阳辐射强度和空气温度的大幅度下降,在第一天的17:00—20:00枣树茎流速率缓慢地趋于 $0 \text{ mL} \cdot \text{h}^{-1}$ 。从21:00开始,茎流速率明显增大,直到第二天6:00。在07:00—

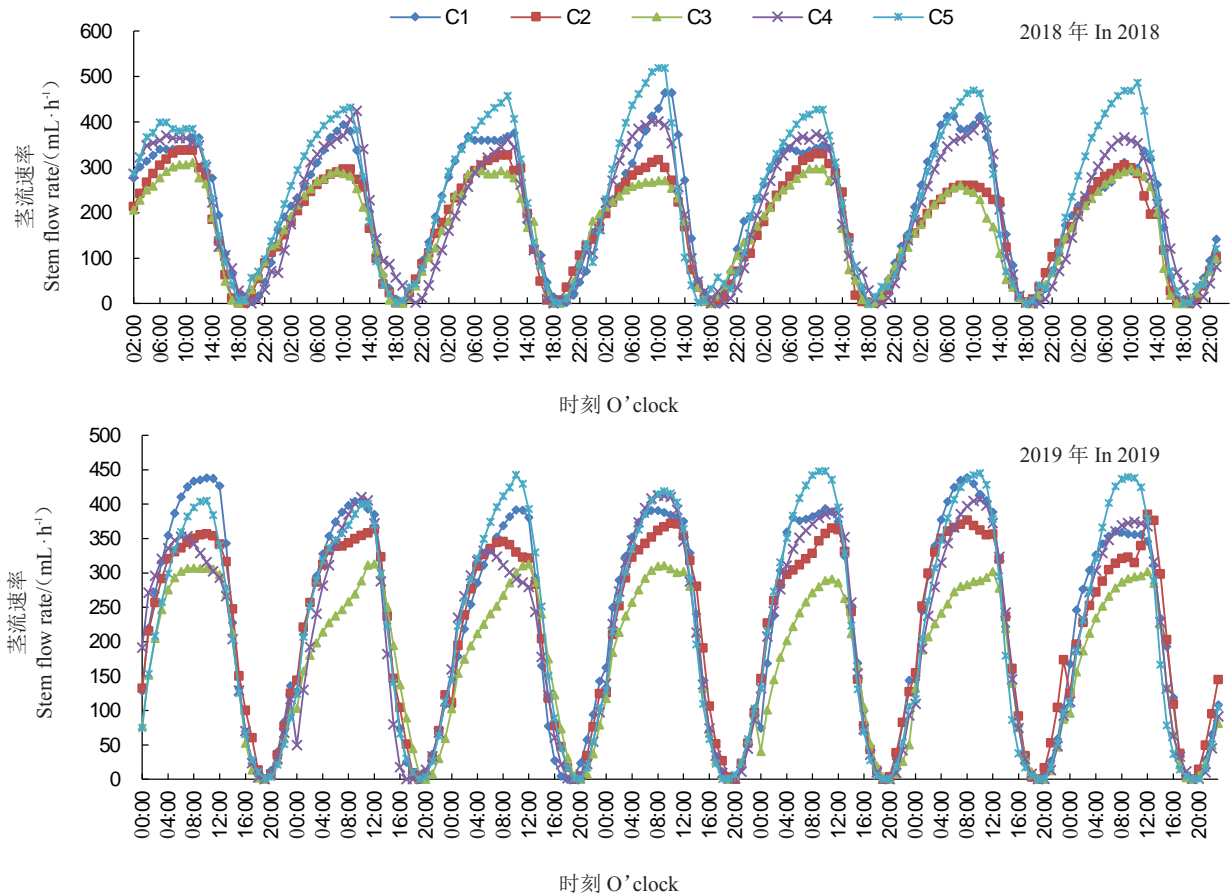


图1 休眠期各阶段盛果期枣树茎流速率昼夜变化

Fig. 1 Diurnal variation in stem flow rate of mature jujube trees in different stages of dormancy

12:00 间休眠期各个阶段的茎流速率陆续达到一天中最大值,这时外界太阳辐射强度和温度开始缓慢上升,茎流速率经过峰值后开始减小。在 13:00—17:00 间枣树茎流速率大幅度下降,直至趋于 $0 \text{ mL} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

在休眠期内通过对枣树茎流速率的昼夜变化规律进行分析可以发现,夜间有很强的液流活动并且活动趋势是单峰逐渐递增。在太阳辐射为 $0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 和较低空气温度的外界条件下,枣树液流活动开始加剧。休眠期内枣树最高日间活动时长仅有 9 h。休眠期内枣树夜间茎流活动在 $50 \sim 490 \text{ mL} \cdot \text{h}^{-1}$ 的范围波动。虽然生育期和休眠期的夜间枣树液流速率活动范围近似,但是液流波动趋势及引起夜间液流活动的原因完全不同。

从整体分析,休眠期内枣树茎流速率呈现相近的变化趋势,但休眠期的各个阶段也有不同的变化过程。枣树茎流速率峰值大都在 07:00—12:00 间波动,休眠前期(C1)和打破休眠期(C5)较大,轻度休眠期(C3)最小,其差值波动范围为 $65 \sim 240 \text{ mL} \cdot \text{h}^{-1}$ 。休眠过渡期(C2)和深度休眠期(C4)茎流活动峰值在 C1 和 C5 峰值之间。峰值的大小可以判断出休眠期茎流速率的阶段变化。以 C1 的茎流速率峰值

作为休眠阶段的开始,到 C2 阶段的略微下调,直至 C3 阶段的最低点,前几个阶段茎流速率峰值经历了缓慢下降且降到最低点的过程。茎流速率峰值经过最低点后从 C4 阶段开始上升,直至打破休眠(C5)阶段的休眠期结束,后几个阶段茎流速率峰值经历了从最低点开始缓慢上升的过程。总体上看,休眠期的液流活动是一直存在的,并且各阶段的茎流速率是先减小后增大的过程。

2.2 休眠期各阶段枣树茎流日变化特征

从枣树休眠期内各阶段分别选取 2018—2019 年 C1(11月19日)、C2(12月17日)、C3(1月18日)、C4(2月16日)、C5(3月15日),2019—2020 年 C1(11月19日)、C2(12月16日)、C3(1月24日)、C4(2月21日)、C5(3月18日)分析茎流速率的日变化特征。从图 2 可以看出,一天中枣树的茎流速率的日变化曲线呈扁平的“几”字形。在第一天 21:00 到第二天 05:00 间枣树的茎流速率大幅度提升,在 07:00—12:00 间茎流速率达到峰值,峰值区间内的波动很平缓,茎流速率在 13:00 过后开始大幅度下降,直到 17:00—20:00 间茎流速率趋于 $0 \text{ mL} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

休眠期内枣树的茎流速率和外界气象条件(太阳辐射、空气温度等)同样有着密切的联系^[28-29]。在

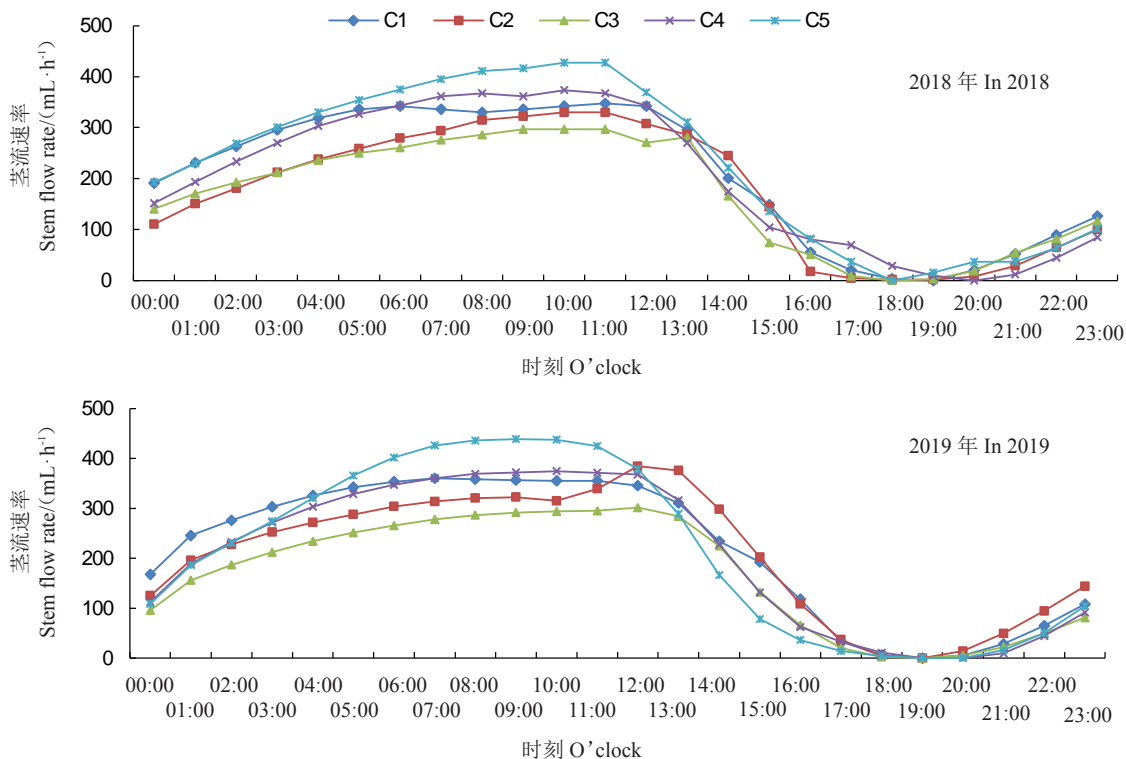


图 2 休眠期各阶段盛果期枣树茎流速率日变化

Fig. 2 Daily variation in stem flow rate of mature jujube trees in different stages of dormancy

休眠期 09:00—10:00 太阳升起,太阳辐射强度从 $0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 开始增大,空气温度也缓慢上升,此时枣树的茎流速率已经达到或者快要达到一天中最大值,随着太阳辐射强度的进一步增加和空气温度的上升,茎流速率呈现出明显的下降趋势。到了 13:00—18:00,太阳辐射强度和空气温度达到一天中的最大值,而枣树的茎流速率在这段时间内大幅度下降,直到 21:00 前降至 $0 \text{ mL}\cdot\text{h}^{-1}$ 。总体上看,休眠期内枣树液流活动的变化规律与太阳辐射和空气温度的变化规律有相反的趋势。树体在越冬期间的水分代谢强度与空气温度和地温呈现相反的变化趋势^[30]。

2.3 休眠期各阶段枣树茎流耗水量分析

通过对 2 a 盛果期灰枣树休眠期内液流变化分析,得到了休眠期各个阶段的耗水情况,结果如图

3、表 3 和表 4 所示。枣树休眠期内各个阶段的耗水量的变化情况:从休眠前期(C1)的逐步减少,轻度休眠期(C3)达到最低,此后开始逐步升高直到打破休眠期(C5),整个休眠期结束。

休眠期内枣树夜间液流有明显活动,在 00:00—13:00 间各个阶段茎流的累计递增趋势显著,也是累计增幅最大的时间段。此后茎流累计递增缓慢,主要是茎流速率从峰值开始降低。休眠期各阶段日累计耗水量:2018—2019 年 C1=4.99 L、C2=4.22 L、C3=4.00 L、C4=4.88 L、C5=5.53 L; 2019—2020 年 C1=5.23 L、C2=4.99 L、C3=4.01 L、C4=4.91 L、C5=5.19 L。各阶段的时间长短和茎流日累计耗水值的大小决定各阶段的耗水量在整个休眠期枣树总耗水量的占比,C1 和 C5 较多,C2 和 C4 次之,C3 最少,整

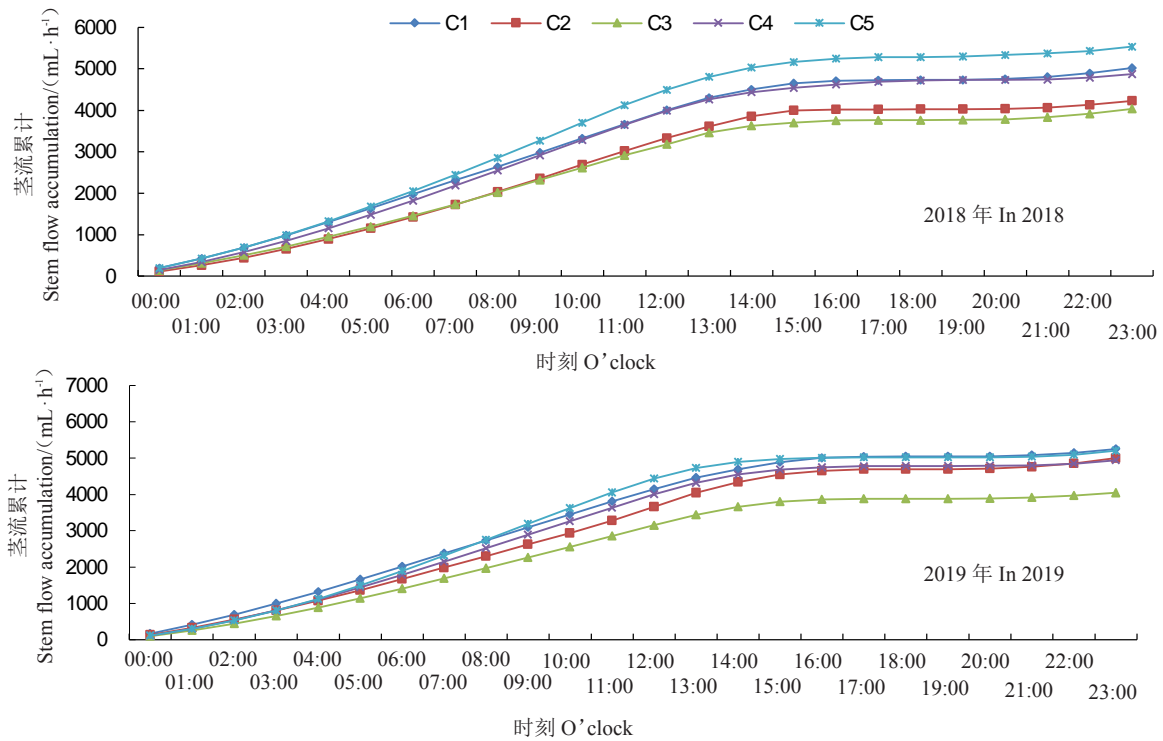


图 3 休眠期各阶段盛果期枣树茎流日累计变化

Fig. 3 Daily variation in stem flow of mature jujube trees in different dormancy periods

表 3 各生育期枣树耗水情况

Table 3 Water consumption of jujube trees in different growth periods

项目 Item	2018年枣树生育期 Growth period of jujube in 2018				2019年枣树生育期 Growth period of jujube in 2019			
	D1	D2	D3	D4	D1	D2	D3	D4
时间 Time/d	43	31	72	45	26	37	71	42
日均耗水量 Average daily water consumption/L	6.57	14.18	22.24	15.94	7.31	13.29	21.16	17.33
总耗水量 Total water consumption/L	282.34	439.52	1 601.05	717.29	189.95	505.18	1 523.60	745.10

表 4 休眠期盛果期枣树耗水情况

Table 4 Water consumption of mature jujube trees in dormancy periods

项目 Item	2018年枣树休眠期 Dormancy period of jujube in 2018					2019年枣树休眠期 Dormancy period of jujube in 2019				
	C1	C2	C3	C4	C5	C1	C2	C3	C4	C5
时间 Time/d	41	31	31	28	49	46	31	31	29	46
日均耗水量 Average daily water consumption/L	4.99	4.22	4.00	4.88	5.53	5.23	4.99	4.01	4.91	5.19
总耗水量 Total water consumption/L	204.55	130.75	124.11	136.57	270.84	240.74	154.58	124.28	142.36	238.70

个休眠期内各阶段的耗水量是一个逐渐减少再逐渐增大的一个过程,这也是外界空气温度在漫长休眠期的一个过程。

2018年休眠期耗水量占全年总耗水量(3 907.04 L)的22.19%,2019年休眠期耗水量占全年总耗水量(3 864.48 L)的23.31%。通过这2 a的统计,对于枣树这一多年生作物,休眠期耗水量之大,大于全年总耗水量的20%,这部分水量不能被忽略。因此,树木在越冬期间通过水分代谢所获得的水量补给是维持树木本身生存和繁衍的主导因子^[31]。

2.4 休眠期各阶段枣树茎流速率与气象因子的关联度分析

为探究枣树茎流速率与太阳辐射(R_s)、空气温度(T_a)和空气湿度(RH)在休眠期各阶段的关联程度,选取枣树休眠期内各阶段连续7 d的茎流速率数据进行比较分析,选取2018—2019年C1(11月15日—11月21日)、C2(12月13日—12月19日)、C3(1月14日—1月20日)、C4(2月12日—2月18日)、C5(3月11日—3月17日);选取2019—2020年C1(11月13日—11月19日)、C2(12月10日—12月16日)、C3(1月18日—1月24日)、C4(2月15日—2月21日)、C5(3月12日—3月18日)进行分析,结果如图4所示。在外界气象因子的作用下,休眠期内枣树的茎流速率变化趋势与空气湿度基本同步,与太阳辐射和空气温度的趋势相反。

当太阳辐射强度从 $0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 开始缓慢增大、空气温度开始逐渐升高时,茎流速率已经开始从峰值下降,这是休眠期内枣树茎流的一个整体趋势。通过对枣树休眠期各个阶段逐步分析发现,太阳辐射在整个休眠期内的峰值区间在14:00—16:00,在C1、C2和C3阶段茎流速率的峰值区间为07:00—10:00,在C4和C5阶段茎流速率的峰值区间为10:00—13:00,茎流速率的峰值存在明显的偏移。

休眠期内空气温度的总体变化趋势为从休眠前期(C1)的缓慢下降,降至轻度休眠(C3)和深度休眠期(C4)的最低点,随后到打破休眠期(C5)的日渐上升。即使在休眠期内最冷的时候(C3和C4),白天气温也在 $1 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右。空气温度始终与太阳辐射有密切的联系,空气温度升高和降低基本与太阳辐射有着相同的趋势。休眠期内空气温度的峰值滞后于太阳辐射约1 h。

从整体看,休眠期内的枣树茎流速率与空气湿度呈正相关,与空气温度和太阳辐射呈负相关。根据表5得出,休眠期内各阶段茎流速率与空气湿度的相关系数为: $R_{C1}=0.770^{**}$ 、 $R_{C2}=0.818^{**}$ 、 $R_{C3}=0.660^{**}$ 、 $R_{C4}=0.549^{**}$ 和 $R_{C5}=0.769^{**}$ 。休眠期内各阶段茎流速率与气象因子的关联程度表现为:(1)休眠前期(C1)、休眠过渡期(C2)、轻度休眠期(C3)和打破休眠期(C5):空气湿度>空气温度>太阳辐射;(2)深度休眠期(C4):空气温度>空气湿度>太阳辐射。空气湿度在枣树休眠期内对其茎流速率的影响最为显著。

通过对枣树2 a休眠期数据的分析,将太阳辐射、空气温度和空气湿度与休眠期各阶段的茎流速率构建回归模型,结果如表6所示。 $R_{C1}^2=0.865$ 、 $R_{C2}^2=0.882$ 、 $R_{C3}^2=0.852$ 、 $R_{C4}^2=0.748$ 、 $R_{C5}^2=0.835$,模型模拟效果较好。

3 讨 论

枣树在休眠前期对外界低温和短光照周期的响应,可诱导树木冷冻耐寒的抗性增强^[32],随后树木长时间暴露在较低的空气温度下,抗冻性迅速提高并引发树体内生理因素的一系列变化^[33-34]。糖类作为生物高分子和能源物质,是生物体内重要的调节物质,能维持树体内细胞质的稳定,持续为生命活动提供所需能量^[35-36]。休眠前期,树体内蔗糖的累计已经

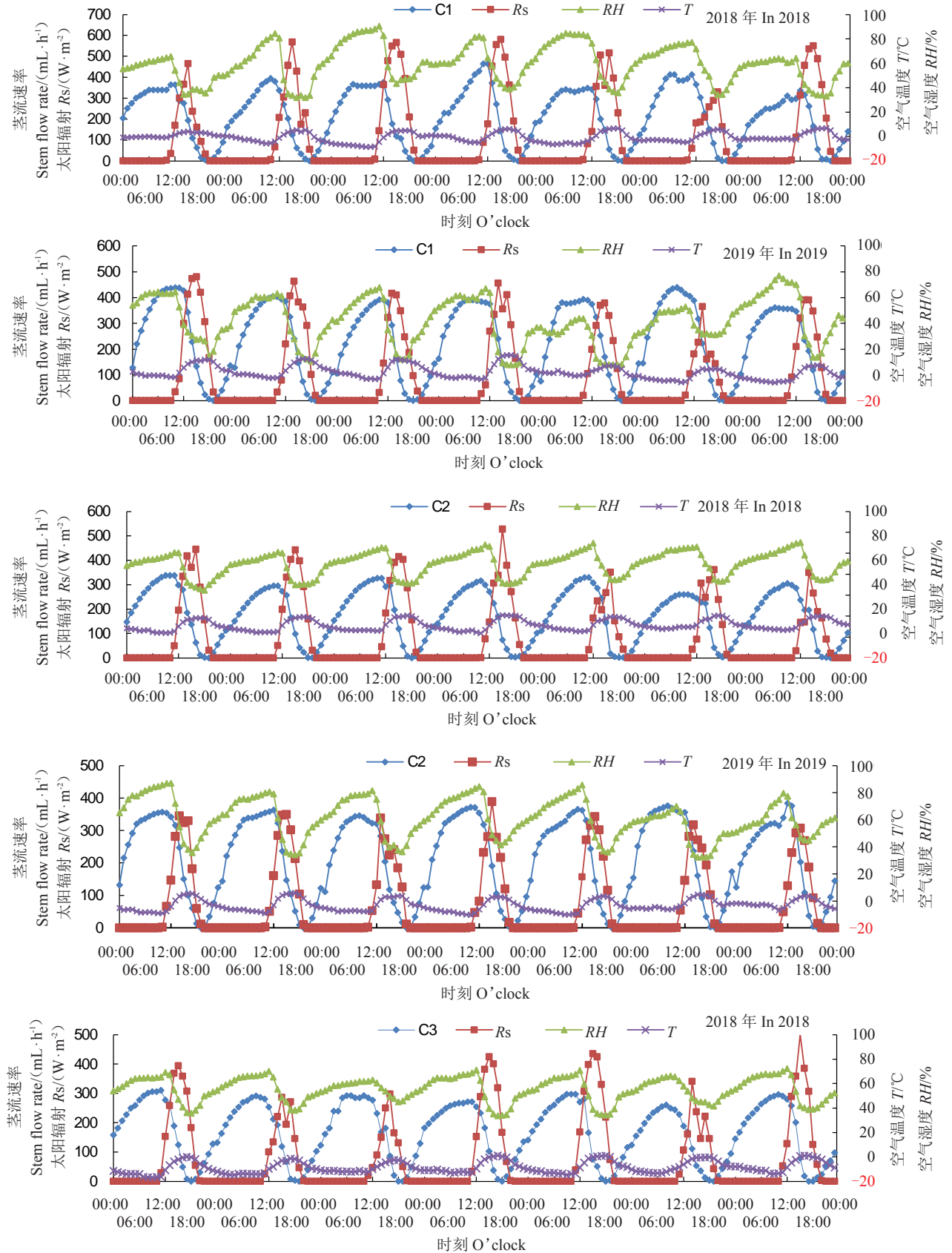


图 4 盛果期枣树休眠期各阶段茎流速率与气象因子的特征变化

Fig. 4 Characteristic changes in stem flow rate and meteorological factors of mature jujube trees in different dormancy periods

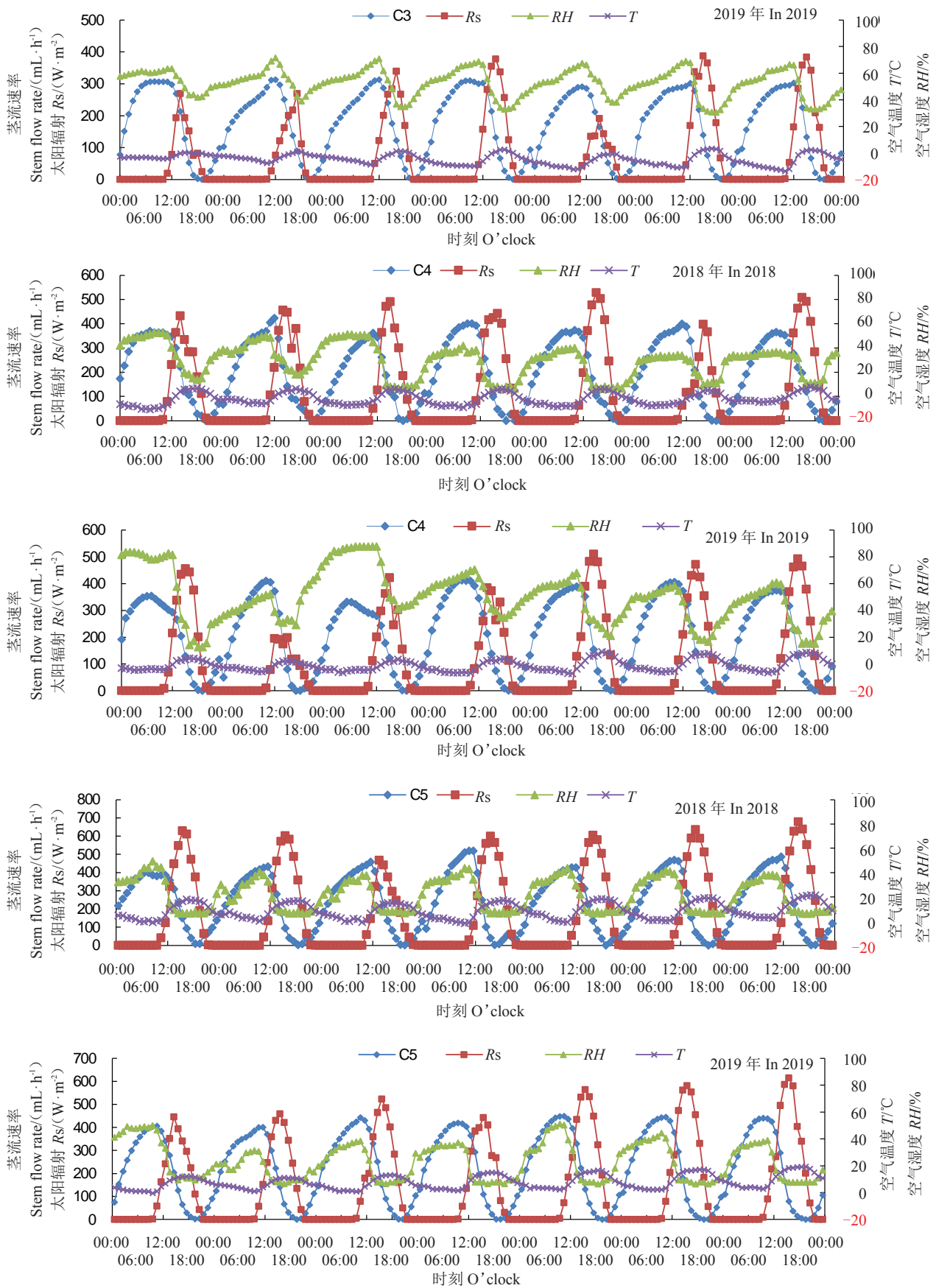


图 4 (续)

Fig. 4 continued

表5 2018和2019年盛果期枣树休眠期内茎流速率与气象因子的相关性

Table 5 Correlation between stem flow rate and meteorological factors in different dormancy periods of mature jujube trees in 2018 and 2019

休眠期 Dormancy	太阳辐射 Solar radiation	空气温度 Air temperature	空气湿度 Air humidity
休眠前期(C1) Prophase of dormancy	-0.095	-0.545**	0.770**
休眠过渡期(C2) Dormancy transition period	-0.096	-0.630**	0.818**
轻度休眠期(C3) Mild dormancy	-0.010	-0.655**	0.660**
深度休眠期(C4) Deep dormancy period	-0.166**	-0.606**	0.549**
打破休眠期(C5) Breaking dormancy	-0.264**	-0.706**	0.769**

注:**表示在0.01水平(双侧)上显著相关。

Note:** indicates significant correlation at 0.01 level (bilateral).

达到高峰状态^[37-38],为漫长的休眠期做好“冬眠”的准备。在整个休眠期内,蔗糖的含量逐渐降低,而已糖(果糖和葡萄糖等)的含量上升^[39],源源不断地为植物体提供所需能量。而细胞代谢的过程,水分扮演着重要的角色^[40-41]。树体在进入休眠期后水分代谢逐渐减弱^[42](细胞内自由水含量减少,束缚水含量增加),但仍然保持水分代谢和水分均衡值,以维持树体的正常机能^[43]。木本植物能够形成亚稳定状态的细胞溶液,这种溶液被称为水玻璃,可以使细胞在寒冷的环境中仍然能保持稳定,不受低温和冰的影响^[44]。水玻璃具有很高的黏性,在足够低的温度下由高浓度的溶质引起^[45],这是树体在寒冷的休眠期依然有液流存在的原因。

与生育期相比,枣树的液流在休眠期内的昼夜变化过程有很大不同。一天中液流启动时间、速率最大增幅或降幅区间和速率峰值区间都有显著差异。休眠期内枣树液流在17:00—20:00趋于0 mL·h⁻¹,这时太阳辐射强度也趋于0 W·m⁻²,温度开始降低,树体为了抵御外界寒冷开始通过细胞代谢为生物体供给能量,水分输送加快,液流活动加剧。第二天07:00—12:00时枣树液流活动达到顶峰,太阳辐射强度开始增大,空气温度开始上升,树体内细胞代谢产生的能量供给强度减弱,液流活动减弱。而在13:00—17:00,随着太阳辐射强度的增强,空气温度上升,液流活动也进一步减弱。研究表明,日间低温诱导活性氧的产生,特别是在强光作用下会造成膜的损伤,糖类和相容性溶质的积累都参与到了植物

表6 2018和2019年盛果期枣树休眠期各阶段茎流速率与气象因子的多元回归模型

Table 6 Multiple regression models of stem flow rate and meteorological factors in different dormancy periods of mature jujube trees in 2018 and 2019

休眠期 Dormancy	R ²	回归方程 Regression equation
休眠前期(C1) Prophase of dormancy	0.865	$G = -225.427 + 0.730Rs - 3.973Ta + 10.978RH$
休眠过渡期(C2) Dormancy transition period	0.882	$G = -339.699 + 0.759Rs - 13.863Ta + 8.193RH$
轻度休眠期(C3) Mild dormancy	0.852	$G = -307.466 + 0.967Rs - 32.647Ta + 5.986RH$
深度休眠期(C4) Deep dormancy period	0.748	$G = 86.292 + 0.792Rs - 45.447Ta + 0.545RH$
打破休眠期(C5) Breaking dormancy	0.835	$G = 176.037 + 0.492Rs - 20.905Ta + 8.292RH$

注:G. 茎流速率;Rs. 太阳辐射;Ta. 空气温度;RH. 空气湿度。

Note: G. Stemflow rate (mL·h⁻¹); Rs. Solar radiation (W·m⁻²); Ta. Air temperature (°C); RH. Air humidity (%).

细胞的抗冻性保护^[46]。因此,休眠期内太阳辐射强度的增大在某种程度上会破坏树体的抗冻机制,不利于枣树生长,进一步诠释了茎流速率在休眠期与太阳辐射和空气温度呈负相关的原因。

液流昼夜变化过程在整个休眠期也有着略微的差异。在休眠期的各个阶段,枣树茎流速率的峰值区间由C1、C2和C3阶段的07:00—10:00转移到C4和C5阶段的10:00—13:00。液流峰值区间的转移说明枣树从休眠期过渡到萌芽展叶期的变化过程。

多年生果树在休眠期的耗水往往不被关注,尤其是在干旱缺水的新疆地区。冬灌主要是冲洗土壤中累积的盐分,防治病虫害,并为春季果树生长提供适宜的土壤含水率,同时还为果树自身生长提供越冬的生理用水。本研究表明,枣树休眠期的耗水量大于全年总耗水量的20%,其树体在越冬期通过水分代谢所获得的水量补给是维持树体本身生存和繁衍的主导因子。休眠期枣树的液流总量应该由维持细胞生理代谢水量和树干表皮、枝条的蒸腾水量构成,目前还不能将各自的用水量区分出来,有待进一步研究。

4 结论

盛果期灰枣树在休眠期的夜间有明显的液流活动,在50~490 mL·h⁻¹的范围波动。在休眠期枣树液流日间活动的最长时间仅有9 h。休眠期的茎流速率日变化曲线呈扁平的“几”字形。茎流速率的峰值区间随着休眠的各阶段而发生变化,从休眠前期

(C1)阶段的 07:00—10:00 到打破休眠(C5)阶段的 10:00—13:00。休眠期内空气温度的峰值滞后于太阳辐射峰值约 1 h。休眠期各阶段的日累积耗水量呈现出先减小后增大的变化趋势。2018 和 2019 年休眠期耗水量分别占全年总耗水量的 22.19% 和 23.31%。空气湿度在枣树休眠期内对其茎流速率的影响最为显著,茎流速率与空气湿度的相关系数 $R_{C1}=0.770^{**}$ 、 $R_{C2}=0.818^{**}$ 、 $R_{C3}=0.660^{**}$ 、 $R_{C4}=0.549^{**}$ 和 $R_{C5}=0.769^{**}$ 。

参考文献 References:

- [1] 康绍忠,蔡焕杰,冯绍元. 现代农业与生态节水的技术创新与未来研究重点[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 1-6.
KANG Shaozhong, CAI Huanjie, FENG Shaoyuan. Technique innovation and research fields of modern agricultural and ecological water-saving in the future[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004, 20(1): 1-6.
- [2] 吴普特,冯浩. 中国节水农业发展战略初探[J]. 农业工程学报, 2005, 21(6): 152-157.
WU Pute, FENG Hao. Discussion of the development strategy of watersaving agriculture in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(6): 152-157.
- [3] 张娜. 新疆农业高效节水灌溉发展现状及“十三五”发展探讨[J]. 中国水利, 2018(13): 36-45.
ZHANG Na. Development status of agricultural high efficiency water saving irrigation in Xinjiang and discussion on the 13th five year plan [J]. China Water Resources, 2018(13): 36-45.
- [4] 雷小牛,张志良,张爱民,古力吉米兰·肉孜,何宇,苏海波. 构建南疆水-生态-经济协调发展水利战略格局的基本思路[J]. 水利发展研究, 2020, 20(7): 22-28.
LEI Xiaoniu, ZHANG Zhiliang, ZHANG Aimin, Guligimilan · Rouzi, HE Yu, SU Haibo. The basic thinking of constructing water conservancy strategic pattern of coordinated development of water ecology economy in southern Xinjiang[J]. Water Resources Development Research, 2020, 20(7): 22-28.
- [5] 洪明,赵经华,靳开颜,马英杰,王磊. 环塔里木盆地红枣灌溉现状调查研究[J]. 节水灌溉, 2013(2): 66-70.
HONG Ming, ZHAO Jinghua, JIN Kaiyan, MA Yingjie, WANG Lei. Investigation and study on the current situation of jujube irrigation around Tarim Basin [J]. Water Saving Irrigation, 2013 (2): 66-70.
- [6] 刘金爱,刘丽红. 我国红枣产业发展现状与对策[J]. 林业经济, 2018, 40(12): 57-59.
LIU Jin'ai, LIU Lihong. Current situation and countermeasures of Chinese jujube industry development[J]. Forestry Economy, 2018, 40(12): 57-59.
- [7] 李宏,刘帮,程平,韩莹莹,张志刚,王真真,武钰,苗乾乾,黎欢. 不同灌水量下幼龄枣树茎流变化规律[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(1): 23-30.
LI Hong, LIU Bang, CHENG Ping, HAN Yingying, ZHANG Zhigang, WANG Zhenzhen, WU Yu, MIAO Qianqian, LI Huan. Stem flow changes of young jujube trees under different irrigation amount[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34 (1): 23-30.
- [8] 孙雨婷,叶茂,武胜利,王霄,李宏. 南疆枣树茎流变化规律研究[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(5): 122-125.
SUN Yuting, YE Mao, WU Shengli, WANG Xiao, LI Hong. Study on stem flow of jujube in southern Xinjiang [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2013, 41(5): 122-125.
- [9] 夏桂敏,孙媛媛,王玮志,吴奇,迟道才. ‘寒富’苹果树茎流特征及其对环境因子的响应[J]. 中国农业科学, 2019, 52(4): 701-714.
XIA Guimin, SUN Yuanyuan, WANG Weizhi, WU Qi, CHI Dao-cai. The characteristics of sap flow of Hanfu apple trees and its response to environmental factors[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(4): 701-714.
- [10] 续海红,郭向红,仇群伊. 不同天气条件下苹果树液流日变化规律研究[J]. 中国农学通报, 2015, 31(22): 120-124.
XU Haihong, GUO Xianghong, QIU Qunyi. Research on daily variation of sap flow of apple trees under different weather conditions[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(22): 120-124.
- [11] 刘洪波,张江辉,白云岗,丁平. 干旱区香梨茎流特征及其与环境因子的关系[J]. 节水灌溉, 2014(11): 25-28.
LIU Hongbo, ZHANG Jianghui, BAI Yungang, DING Ping. Stem flow characteristics of fragrant pear and its relationship with environmental factors in arid area[J]. Water Saving Irrigation, 2014(11): 25-28.
- [12] 江振斌,廖康,庞洪翔,曼苏尔·那斯尔,赵世荣,杜润清,董胜利. ‘库尔勒香梨’3种树形树干液流变化及其与气象因子的关系[J]. 果树学报, 2016, 33(7): 814-822.
JIANG Zhenbin, LIAO Kang, PANG Hongxiang, Mansur · Nass-er, ZHANG Shirong, DU Runqing, DONG Shengli. Sap flow changes in ‘Kuerle Xiangli’ trees with three different canopy shapes and their relationships with climatic factors[J]. Journal of Fruit Science, 2016, 33(7): 814-822.
- [13] 全国栋,刘洪禄,李法虎,杨胜利,范海燕. 双作物系数法计算华北地区桃树蒸散量的可靠性评价[J]. 农业机械学报, 2016, 47(6): 154-162.
TONG Guodong, LIU Honglu, LI fahu, YANG Shengli, FAN Haiyan. Reliability evaluation of dual crop coefficient approach on evapotranspiration calculation of peach tree in North China [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(6): 154-162.
- [14] 张志亮,张富仓,郑彩霞,倪福全. 不同水氮条件下桃树幼苗茎干液流变化规律研究[J]. 节水灌溉, 2009(2): 1-4.
ZHANG Zhiliang, ZHANG Fucang, ZHENG Caixia, NI Fuquan. Study on stem sap flow of peach seedlings under differ-

- ent water and nitrogen conditions[J]. *Water Saving Irrigation*, 2009(2): 1-4.
- [15] 丁凡,潘存德.库车白杏茎直径和茎液流速日变化及其与环境因子的关系[J]. *新疆农业科学*, 2013, 50(1): 38-45.
DING Fan, PAN Cunde. Diurnal variation of stem diameter and sap flow rate of Kuqa white apricot and their relationship with environmental factors[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2013, 50(1): 38-45.
- [16] 刘温泉,潘存德.不同天气条件下‘库车白杏’树干液流变化规律及其与环境因子的关系[J]. *中国农学通报*, 2014, 30(31): 14-18.
LIU Wenquan, PAN Cunde. Changes of trunk sap flow of ‘Kuqa white apricot’ under different weather conditions and its relationship with environmental factors [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(31): 14-18.
- [17] 张清林,马英杰,洪明,曾冬梅,郑冰.滴灌条件下核桃树茎流变化规律研究[J]. *灌溉排水学报*, 2012, 31(1): 62-65.
ZHANG Qinglin, MA Yingjie, HONG Ming, ZENG Dongmei, ZHENG Bing. Stem flow variation of *Juglans regia* under drip irrigation[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2012, 31(1): 62-65.
- [18] 赵付勇,赵经华,马英杰,洪明,付秋萍.滴灌核桃树茎流变化规律与光合作用的研究[J]. *中国农村水利水电*, 2017(3): 31-40.
ZHANG Fuyong, ZHANG Jinghua, MA Yingjie, HONG Ming, FU Qiuping. Stem flow variation and photosynthesis of *Juglans regia* under drip irrigation [J]. *China Rural Water and Hydro-power*, 2017(3): 31-40.
- [19] 严东英,董晓华,李璐,赵乔,葛亮,洪江新.柑橘树与枇杷树蒸腾规律比较研究[J]. *节水灌溉*, 2019(8): 5-9.
YAN Dongying, DONG Xiaohua, LI Lu, ZHAO Qiao, GE Liang, HONG Jiangxin. Comparative study on transpiration of citrus and loquat [J]. *Water Saving Irrigation*, 2019(8): 5-9.
- [20] 孙立,董晓华,陈敏,龚兰强.柑橘树液流变化规律及其影响因素[J]. *江苏农业科学*, 2015, 43(4): 175-179.
SUN Li, DONG Xiaohua, CHEN Min, GONG Lanqiang. Variation of sap flow in citrus trees and its influencing factors [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2015, 43(4): 175-179.
- [21] GRANIER A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements[J]. *Tree Physiology*, 1987, 3(4): 309-320.
- [22] 张国平.植物生理生态学[M].杭州:浙江大学出版社, 2003: 124-139.
ZHANG Guoping. *Plant physiological ecology*[M]. Hangzhou: China Zhejiang University Press, 2003: 124-139.
- [23] FREWEN B E, CHEN T H H, HOWE G T, DAVIS J, ROHDE A, BOERJAN W, BRADSHAW H D. Quantitative trait loci and candidate gene mapping of bud set and bud flush in *Populus*[J]. *Genetics*, 2000, 154(2): 837-845.
- [24] FAUST M, LIU D, LINE M J, STUTTE G W. Conversion of bound to free water in endodormant buds of apple is an incremental process[J]. *Acta Horticulturae*, 1995, 395: 113-118.
- [25] BUBAN T, FAUST M. New aspects of bud dormancy in apple trees[J]. *Acta Horticulturae*, 1995, 395: 30-36.
- [26] 魏新光,聂真义,刘守阳,余檀,马建鹏,汪有科.黄土丘陵区枣林土壤水分动态及其对蒸腾的影响[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(6): 130-140.
WEI Xinguang, NIE Zhenyi, LIU Shouyang, SHE Tan, MA Jianpeng, WANG Youke. Soil water dynamics and its effect on transpiration of jujube forest in loess hilly region[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(6): 130-140.
- [27] 郑明,赵经华,马英杰,洪明.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 Ming, ZHAO Jinghua, MA Yingjie, HONG Ming. Study on temporal and spatial scale transformation of evapotranspiration in jujube orchard under drip irrigation[J]. *Journal of Shihezi University (Natural Science)*, 2019, 37(2): 162-169.
- [28] 朱仲龙,贾忠奎,马履一,王晓玲,段劫.休眠前期玉兰树干液流的变化及其对环境因子的响应[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(9): 2390-2396.
ZHU Zhonglong, JIA Zhongkui, MA Lüyi, WANG Xiaoling, DUAN Jie. Changes of stem sap flow and its response to environmental factors in early dormancy stage of *Magnolia denudata* [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(9): 2390-2396.
- [29] 阎光宇,冯建祥,杨盛昌,林光辉.中国漳江口红树植物秋茄茎流特征及其影响因子[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(7): 2048-2058.
YAN Guangyu, FENG Jianxiang, YANG Shengchang, LIN Guanghui. Stem flow characteristics and influencing factors of *Kandelia candel* in Zhangjiangkou, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(7): 2048-2058.
- [30] 斯琴毕力格,那平山,王波,徐洪峰.树木休眠越冬期间水分代谢与均衡研究[J]. *中国生态农业学报*, 2006, 14(3): 90-92.
SIQIN Bilge, NA Pingshan, WANG Bo, XU Hongfeng. Study on water metabolism and balance during dormancy and overwintering of trees [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2006, 14(3): 90-92.
- [31] 斯琴,那平山,王波.生态脆弱地区树木休眠期间水分代谢均衡探讨[J]. *内蒙古农业大学学报(自然科学版)*, 2005, 26(2): 24-27.
SI Qin, NA Pingshan, WANG Bo. Water metabolism balance of trees during dormancy in ecologically fragile areas[J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2005, 26(2): 24-27.
- [32] 贺润平,杜俊杰,赵飞,李捷,牛荣山.枣若干品种需冷量测定[J]. *果树学报*, 2004, 21(2): 182-184.
HE Runping, DU Junjie, ZHAO Fei, LI Jie, NIU Rongshan.

- Studies on the chilling requirement of Chinese jujube cultivars[J]. *Journal of Fruit Science*, 2004, 21(2): 182-184.
- [33] OLSEN J E. Light and temperature sensing and signaling in induction of bud dormancy in woody plants[J]. *Plant Molecular Biology*, 2010, 73(1/2): 37-47.
- [34] HEIDE O M, PRESTRUD A K. Low temperature, but not photoperiod, controls growth cessation and dormancy induction and release in apple and pear[J]. *Tree Physiology*, 2005, 25(1): 109-114.
- [35] 王慧, 李玲, 谭钺, 李冬梅, 谭秋平, 陈修德, 高东升. 休眠期间油桃花芽碳水化合物代谢及其相关基因的表达变化[J]. *植物生理学报*, 2011, 47(6): 595-600.
- WANG Hui, LI Ling, TAN Yue, LI Dongmei, TAN Qiuping, CHEN Xiude, GAO Dongsheng. Changes in carbohydrate metabolism and related gene expression in nectarine floral buds during dormancy[J]. *Plant Physiology Communications*, 2011, 47(6): 595-600.
- [36] ROOK F, HADINGHAM S A, LI Y H, BEVEN M W. Sugar and ABA response pathways and the control of gene expression [J]. *Plant, Cell & Environment*, 2006, 29(3): 426-434.
- [37] RICHARDSON A C, WALTON E F, BOLDINGH H L, MEEKINGS J S. Seasonal carbohydrate changes in dormant kiwifruit buds[J]. *Acta Horticulturae*, 2007, 753(39): 567-572.
- [38] RICHARDSON A C, WALTON E F, MEEKINGS J S, BOLDINGH H L. Carbohydrate changes in kiwifruit buds during the onset and release from dormancy[J]. *Scientia Horticulturae*, 2010, 124(4): 463-468.
- [39] JUDD M J, MEYER D H, MEEKINGS J S, RICHARDSON A C, WALTON E F. An FTIR study of the induction and release of kiwifruit buds from dormancy[J]. *Journal of the Science of Food & Agriculture*, 2010, 90(6): 1071-1080.
- [40] WELLING A, PALVA E T. Molecular control of cold acclimation in trees[J]. *Physiologia Plantarum*, 2006, 127(2): 167-181.
- [41] 贺润平, 翟明普, 杜俊杰. 枣树休眠生理研究[J]. *果树学报*, 2006, 23(6): 814-817.
- HE Runping, ZHAI Mingpu, DU Junjie. Study on the dormant physiology of Chinese jujube trees[J]. *Journal of Fruit Science*, 2006, 23(6): 814-817.
- [42] EREZ A, FAUST M, LINE M J. Changes in water status in peach buds on induction, development and release from dormancy[J]. *Scientia Horticulturae*, 1998, 73(2): 111-123.
- [43] 邢鑫, 刘洋, 李德全. 植物脱水素的结构和功能[J]. *植物生理学通讯*, 2010, 46(3): 268-276.
- XING Xin, LIU Yang, LI Dequan. Structure and function of plant dehydrins[J]. *Plant Physiology Communications*, 2010, 46(3): 268-276.
- [44] WISNIEWSKI M, BASSETT C, GUSTA L V. An overview of cold hardiness in woody plants: Seeing the forest through the trees[J]. *Hortence*, 2003, 38(5): 952-959.
- [45] MUNDY S J. Gene expression in response to abscisic acid and osmotic stress[J]. *Plant Cell*, 1990, 2(6): 503-512.
- [46] WANG W, VINO CUR B, ALTMAN A. Plant responses to drought, salinity and extreme temperatures: towards genetic engineering for stress tolerance[J]. *Planta*, 2003, 218(1): 1-14.