

柽柳不同季节树干液流特征及其与土壤含水量及土壤温度的关系

黄雅茹¹, 马迎宾¹, 辛智鸣¹, 罗凤敏¹, 刘湘杰¹, 李永华^{2,3,4*}, 张雅楠⁵

(1. 中国林业科学研究院 沙漠林业实验中心/内蒙古磴口荒漠生态系统国家定位观测研究站, 内蒙古 磴口 015200;
2. 中国林业科学研究院 荒漠化研究所, 北京 100091; 3. 库姆塔格荒漠生态系统国家定位观测研究站, 甘肃 敦煌 736200;
4. 甘肃敦煌荒漠生态系统国家定位观测研究站, 甘肃 敦煌 736200; 5. 内蒙古自治区水文与水资源中心, 内蒙古 呼和浩特 010010)

摘要:为揭示库姆塔格沙漠东南部柽柳的水分传输过程,探究柽柳的耗水特性,本研究利用 PS-TDP8 树木茎流监测系统对柽柳的树干液流速率进行测定,分析土壤因子与液流速率在不同季节的差异。结果表明,夏季树干液流的启动时间最早,为 7:20,峰值最大($6.93 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$),春季启动时间为 7:40,峰值为 $6.46 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$,秋季启动时间最晚,为 8:40,峰值最小($4.22 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$)。在日尺度上,春、夏、秋季柽柳树干液流速率与土壤含水量及土壤温度呈正相关,土壤温度分别单独能解释 61.1%、65.6%、64.0% 的树干液流变化,土壤含水量与土壤温度分别共同能解释 73.4%、74.1%、76.9% 的树干液流变化。在小时尺度上,春、夏、秋季树干液流与 20、50 cm 层土壤含水量及土壤温度呈显著负相关,50 cm 层土壤温度是影响树干液流的主导因子。本研究建立了不同季节柽柳液流速率与土壤因子之间的回归方程,能够较好地解释不同季节树干液流速率变化,为柽柳树干液流速率预测与耗水量估算提供了很好的途径,明确了在不同季节通过土壤因子估算柽柳树干液流速率的可行性,可为制定水分管理措施提供参考。

关键词:柽柳; 树干液流; 库姆塔格沙漠; 林地土壤

中图分类号:S718.43

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2021)05-0001-10

Flow Characteristics of *Tamarix chinensis* Tree Trunk Fluid in Different Seasons and the Relationships with Soil Water Content and Soil Temperature

HUANG Ya-ru¹, MA Ying-bin¹, XIN Zhi-ming¹, LUO Feng-min¹, LIU Xiang-jie¹,
LI Yong-hua^{2,3,4*}, ZHANG Ya-nan⁵

(1. Experimental Center of Desert Forestry, Chinese Academy of Forestry, Inner Mongolia Dengkou Desert Ecosystem National Observation Research Station, Dengkou 015200, Inner Mongolia, China; 2. Institute of Desertification Studies, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 3. National Forestry Bureau's Kumtag Desert Ecosystem Location Research Station, Dunhuang 736200, Gansu, China; 4. Dunhuang Desert Ecosystem Location Research Station, National Forestry and Grassland Administration, Dunhuang 736200, Gansu, China; 5. Inner Mongolia Hydrology and Water Resources Center, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China)

Abstract: In order to reveal the water transport process and water consumption characteristics of *Tamarix chinensis* occurring in the southeast part of Kumtag Desert, in this study, the flow rate of *T. chinensis* trunk sap was measured by the PS-TDP8 system. The relationships between sap flow and soil factors in different seasons were analyzed. The results showed that the sap flow of *T. chinensis* trunk had the earliest start time (7:20 a. m.) in summer with the highest peak value ($6.93 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$). The start time in spring was 7:40 a. m. with the peak value of $6.46 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$. In autumn, the start time was the latest (8:40 a. m.)

收稿日期:2020-07-29 **修回日期:**2021-03-10

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(CAFYBB2019MA004, CAFYBB2020ZE005, CAFYBB2021MA005); 国家自然科学基金(32001374)。

作者简介:黄雅茹, 工程师, 硕士。研究方向: 荒漠化防治。E-mail: hu_angyaru@126.com

*** 通信作者:**李永华, 博士, 副研究员。研究方向: 干旱区生态学。E-mail: lyhids@caf.ac.cn

with the smallest peak value ($4.22 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$). On a daily scale, the flow rate was positively correlated with soil water content and soil temperature in spring, summer and autumn. Soil temperature alone could explain 61.1%, 65.6% and 64.0% of the sap flow changes in spring, summer and autumn, respectively, soil water content and soil temperature together could explain 73.4%, 74.1% and 76.9% of sap flow changes, respectively. On an hourly scale, the sap flow in the three seasons was significantly and negatively correlated with the soil moisture content and soil temperature in the 20 and 50 cm soil layers. Soil temperature of 50 cm layer was the dominant factor affecting sap flow. Regression equations between the sap flow rate and soil factors in different seasons were established, which could better explain the changes of the sap flow rates in different seasons, and provide a good way to predict the sap flow rate and water consumption of the *T. chinensis*. The results also indicated that the estimation of the sap flow rate by soil factors in different seasons was feasible. This study can provide a reference for formulating water management measures.

Key words: *Tamarix chinensis*; sap flow; Kumtag Desert; forest soil

怪柳(*Tamarix chinensis*)是干旱区防风固沙的优良树种,具耐干旱、耐盐碱、抗风沙等特点,在维护生态平衡、保护生物多样性等方面具有重要意义^[1],但维持自身生长需要消耗大量的水分^[2]。我国干旱沙漠区水资源相对缺乏,研究怪柳的耗水特性是怪柳水分合理利用的重要基础^[3-4]。怪柳在长期适应环境的过程中形成了特殊的耗水机理,因此,研究怪柳树干液流速率及其影响因素,进而分析其耗水特性,对于高效利用有限的水资源具有重要意义,对探讨干旱地区生态经济可持续发展具有很强的指导意义。树体蒸腾耗水的研究手段众多,其中树干液流作为植物蒸散作用的水分来源,是植物水分消耗的直观量化监测指标,研究树干液流对于明晰怪柳耗水规律极为重要,也为深入探讨怪柳在不同季节的耗水特征提供了重要手段。热扩散技术是研究树木耗水的主要方法之一^[5]。热扩散技术时间分辨率及准确度高,能够实现长期、连续性的自动监测^[6-8]。

植物液流的潜在能力是由生物学结构决定,液流的瞬间变化是由气象因素决定,液流总体水平是由土壤供水决定^[9-10]。国内应用该技术研究了不同树种的液流特征^[11-15],主要集中在液流速率的日变化及其与环境因子的关系^[16-18]。研究表明土壤含水量与液流速率呈正相关^[5,20],浅层土壤温度对树干液流强度有显著影响^[21],土壤水分及土壤温度是驱动植物液流速率的重要因素^[22-25]。不同时间尺度上土壤温度、土壤含水率对液流速率都有影响^[15-16,26-28],大时间尺度土壤因子可以估算植物的耗水量^[13]。关于怪柳树干液流的研究主要集中在液流速率的变化规律及其对环境因子的响应^[11,29-33],且主要集中在小时尺度,日尺度、季节尺度上的研究相对较少,在干旱半干旱区液流速率对环境变化较为敏感^[10],探究树干液流与土壤因子间

是否存在时间尺度差异,可为准确估算耗水量提供依据,但不同层次土壤水分及土壤温度与树干液流的关系并没有深入分析,不同季节土壤温度及土壤水分能够解释多少的树干液流变化鲜有报道。

本研究通过对库姆塔格沙漠东南部怪柳树干液流及土壤含水量、土壤温度的实时动态监测,分析土壤因子与液流速率在不同季节的差异,建立不同季节液流速率与土壤因子之间的回归方程,明确通过土壤因子估算怪柳树干液流速率的可行性。研究结果对于阐明库姆塔格沙漠东南部怪柳耗水规律具有重要意义,为该区域怪柳生理特性的研究提供数据支撑,对合理利用有限水资源具有深远意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

崔木土沟全长约 140 km,海拔 962 m,地理位置 $40^{\circ}10'35''\text{N}$, $93^{\circ}41'9''\text{E}$,发源于库姆塔格沙漠东南缘阿尔金山北麓(甘肃省阿克塞哈萨克族自治县境内),穿过崔木土山后进入甘肃敦煌西湖国家级自然保护区。崔木土沟径流的补给主要包括降水、出露泉水、冰雪融水。大龙沟、红柳沟、七里沟、柳城子沟是崔木土沟上游的主要支流^[34-36]。胡杨(*Populus euphratica*)、怪柳(*Tamarix chinensis*)、红砂(*Reaumuria songarica*)是研究区主要物种。本研究选取的怪柳平均树高 370 cm,平均冠幅 $160 \text{ cm} \times 142 \text{ cm}$ 。5 棵怪柳样本的基径分别为 2.87、3.25、2.74、3.11、2.86 cm。研究站点位于崔木土沟,沟道内有出露泉水补给,在没有发生大的降水时,阿尔金山冰雪融水是地表径流的主要来源,地表径流出山后,消散于山前洪积扇,随后,形成出露泉水(冲蚀沟内),流经 15~20 km 后,出露的泉水很快消失,此时如果有较大的降水,便会形成地表径流出现在洪积扇内,最终在冲蚀沟内汇集^[17]。怪柳为天然

林, 林下植被盖度为 30%, 分布于极干旱区季节性洪沟中下游, 沟宽 300~400 m, 海拔 1 030 m, 周边地貌为戈壁, 沟内为冲积、沉积的风沙土, 植被结构简单没有明显分层。根据阿克塞县和敦煌市气象资料统计记录, 崔木土沟下游年平均气温 9.4℃, 年平均降水量 39.9 mm, 蒸发量 2 486 mm^[17]。

1.2 研究方法

采用 Plant Sensors PS-TDP8 树木茎流监测系统测定茎干液流的流速, 参照 PS-TDP8 茎流系统说明书, 探针均安装在树干北侧, 距地面 50 cm, 用泡沫软塑料包裹, 然后再包上锡纸和塑料纸^[10]。数据采集仪是 CR300S, 数据采集时间间隔设为 10 min。

土壤含水量(SW)及土壤温度(ST)的测定采用 5TM 土壤温度与湿度传感器(Decagon 公司), 数据采集器采用 Em50, 探头安装土层深度为 20、50、100、150、200 cm。每棵柽柳附近安装 2 套, 5 棵共安装 10 套。采用烘干法进行校正。

1.3 树干液流速率计算

树干液流速率计算公式^[37]如下:

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

式中, V_s 为树干边材树干液流速率/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$), ΔT_m 为 24 h 内最大探针温差值, ΔT 为两探针间的瞬时温差值, ΔT 由 TDP 两探针所输出的电压差除

以经验常数 0.04 所得。

1.4 数据处理

树干液流数据基于零基准面进行校准。采用 Excel 2010 对树干液流速率与土壤因子进行数据处理, 柽柳日均值采用算术平均, 采用 SPSS 17.0 软件对树干液流速率与土壤因子的偏相关性进行分析, 采用 SPSS 17.0 软件的回归分析对树干液流速率与土壤因子逐步回归进行拟合。

2 结果与分析

2.1 柽柳生长季树干液流日均值变化

柽柳树干液流速率日均值呈现明显的季节变化(图 1)。6 月柽柳平均树干液流速率最大, 为 4.116 $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$, 其次为 7 月(3.953 $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$), 8 月为 3.420 $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$, 5 月为 3.120 $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$, 9 月平均树干液流速率最小, 为 2.769 $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。6 月 17 日的日平均树干液流速率最高, 为 4.640 $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$, 最小日平均树干液流速率发生在 9 月 30 日, 为 1.937 $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$, 整个观测期间日平均树干液流速率为 3.476 $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。降雨时树干液流速率有明显的降低, 而降雨后树干液流速率快速升高, 例如, 8 月 14 日—8 月 15 日发生降雨, 树干液流速率逐渐降低至 2.385 $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$, 而在 8 月 17 日树干液流速率升高至 3.591 $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$, 是降雨后最低树干液流速率的 1.51 倍。

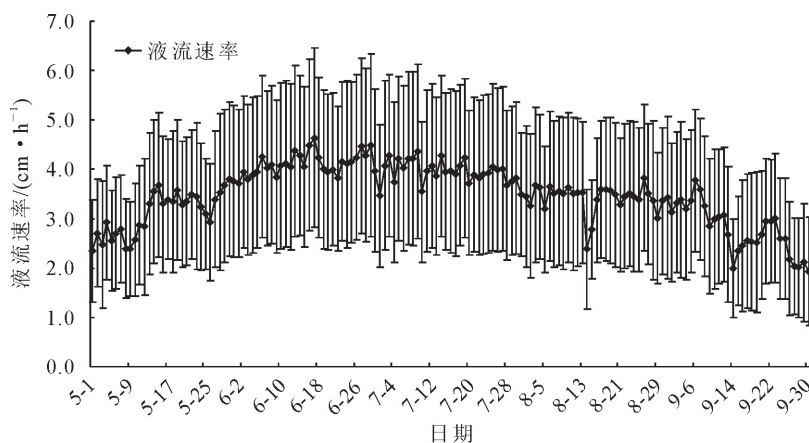


图 1 柽柳生长季树干液流速率日均值变化(2018 年)

Fig. 1 Changes of the daily mean values of sap flow rate of *Tamarix chinensis* in growing season

2.2 柽柳不同季节树干液流速率变化规律

春季(5 月 16—20 日)、夏季(7 月 16—20 日)、秋季(9 月 16—20 日)的树干液流变化规律见图 2, 图 2 中所选典型日均为晴天。夏季树干液流的启动时间最早, 持续时间最长, 峰值最大, 树干液流启动为 7:20, 第 1 个峰值为 6.93 $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$, 8:00—21:40 出现波峰, 最大树干液流速率在 3.08~6.93 $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$, 夜间存在微弱树干液流。春季树干液流启动时间 7:40, 8:20—20:10 达到最高值, 最大树干液流速

率为 6.46 $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。秋季树干液流启动时间最晚, 峰值最小, 启动时间为 8:40, 10:00—20:20 出现峰值, 最大树干液流速率为 4.22 $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。不论春季、夏季和秋季, 在夜间有微弱树干液流存在。

2.3 柽柳生长季土壤水分变化

在整个柽柳生长季土壤体积含水量变化规律较明显(图 3), 150 cm 层土壤体积含水量最高, 为 0.111 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, 随着时间呈先上升后下降趋势, 其次为 200 cm 层, 为 0.087 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, 20 cm 层土壤

体积含水量最小,为 $0.042 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, 随着时间变化, 土壤体积含水量波动较大。100 cm 层随着时间呈先上升后下降趋势, 波动较小。7、8 月平均土壤体

积含水量最高, 均为 $0.076 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, 5 月土壤含水量最小, 为 $0.069 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ 。土壤体积含水量大小顺序为 $150 \text{ cm} > 200 \text{ cm} > 100 \text{ cm} > 50 \text{ cm} > 20 \text{ cm}$ 。

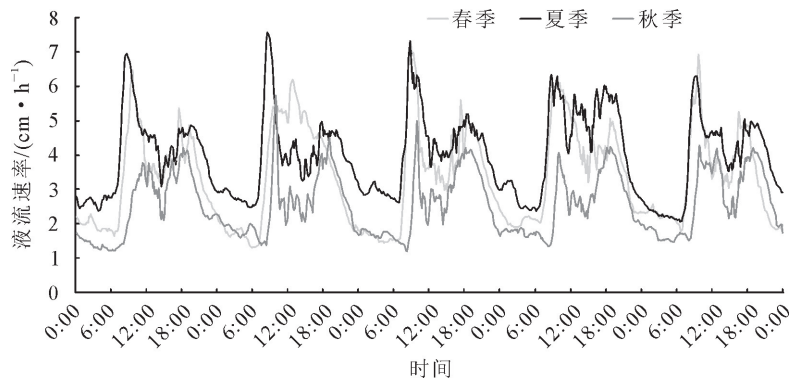


图2 柽柳不同季节树干液流速率(2018年)

Fig. 2 Sap flow rate of *T. chinensis* trunk in different seasons

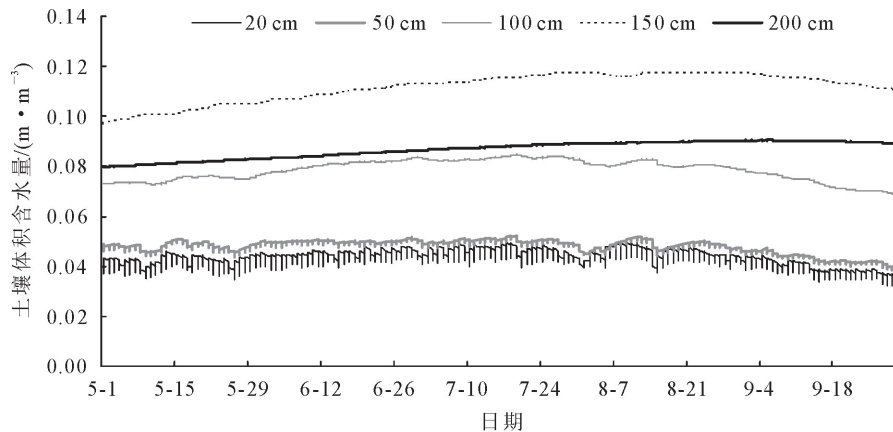


图3 柽柳生长季土壤体积含水量

Fig. 3 Soil volumetric water contents of *T. chinensis* in growing season

2.4 柽柳生长季土壤温度变化

生长季柽柳土壤温度呈先增加后减小的趋势(图4), 20、50 cm 层土壤温度波动较大, 150、200 cm 层土壤温度波动较小, 不同土层深度土壤温度大小顺序为 $20 > 50 > 100 > 150 > 200 \text{ cm}$, 7 月平均土壤温度最高为 27.13°C , 5 月最低, 为 19.78°C 。

2.5 柽柳树干液流速率与土壤因子的关系

日尺度上树干液流速率与土壤因子的偏相关系数见表1, 春季树干液流速率是3—5月的日均值, 夏季树干液流速率是6—8月的日均值, 秋季树干液流速率是9—11月的日均值。整体来看, 春季、夏季、秋季, 柽柳树干液流速率与土壤含水量及土壤温度呈正相关关系。春季树干液流速率与土壤含水量、土壤温度呈极显著正相关($P < 0.01$), 夏季树干液流速率与土壤含水量、土壤温度呈显著正相关($P < 0.05$), 秋季树干液流速率与土壤含水量、土壤温度呈极显著正相关($P < 0.01$), 春、秋季土壤含水量与土壤温度对柽柳茎干树干液流有极显著影响,

夏季土壤含水量与土壤温度对柽柳树干液流有显著影响。偏相关分析表明, 春季、夏季、秋季土壤温度是影响柽柳树干液流的主导因子。

逐步回归分析结果见表2, 在日尺度上, 春季, 土壤温度和土壤含水量依次进入, 决定系数分别为0.611和0.734, 夏季, 土壤温度和土壤含水量依次进入, 决定系数分别为0.656和0.741, 秋季, 土壤温度和土壤含水量依次进入, 决定系数分别为0.640和0.769, 柽柳树干液流速率与土壤含水量、土壤温度呈正相关。春季, 土壤温度单独能解释61.1%的树干液流变化, 土壤含水量与土壤温度共同能解释73.4%的树干液流变化, 夏季, 土壤温度单独能解释65.6%的树干液流变化, 土壤含水量与土壤温度共同能解释74.1%的树干液流变化, 秋季, 土壤温度单独能解释64.0%的树干液流变化, 土壤含水量与土壤温度共同能解释76.9%的树干液流变化。不同季节回归模型差异显著, 回归模型精度较高, 因此, 回归模型能够较好解释不同季节柽

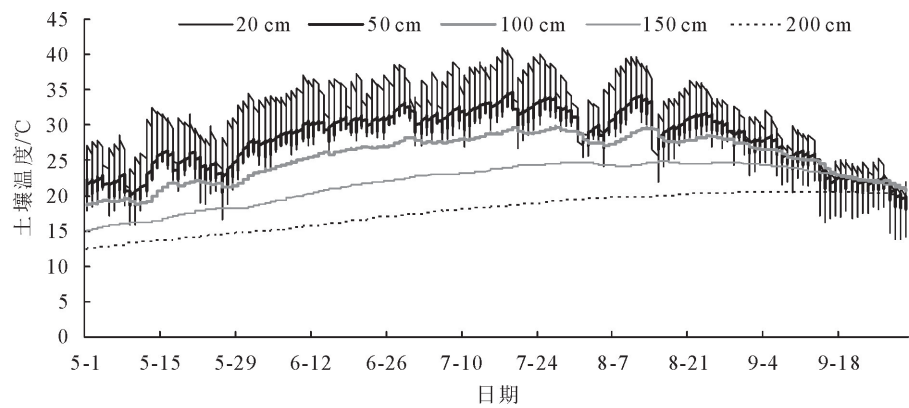


图 4 桤柳生长季土壤温度

Fig. 4 Soil temperature of *T. chinensis* in growing season

表 1 日尺度上树干液流速率与土壤因子的偏相关系数($n=90$)

Table 1 Partial correlation coefficients between sap flow rate and soil water content on daily scale($n=90$)

		树干液流速率	
土壤含水量	春季	相关性	0.563**
		显著性(双侧)	0.001
	夏季	相关性	0.320*
		显著性(双侧)	0.035
	秋季	相关性	0.598**
		显著性(双侧)	0.000
土壤温度	春季	相关性	0.780**
		显著性(双侧)	0.000
	夏季	相关性	0.391*
		显著性(双侧)	0.027
	秋季	相关性	0.750**
		显著性(双侧)	0.000

注: **表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。*表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。下同。

表 2 日尺度上桤柳树干液流速率与土壤因子逐步回归拟合

Table 2 Stepwise regressions between sap flow of *T. chinensis* and soil factors on daily scale

季节	顺序	进入因子	R^2	回归方程
春季	1	ST	0.611	$Y = -0.706 + 0.158ST$
	2	SW	0.734	$Y = -0.944 + 0.136ST + 17.893SW$
夏季	1	ST	0.656	$Y = 12.634 + 182.957ST$
	2	SW	0.741	$Y = -4.087 + 175.569ST + 16.423SW$
秋季	1	ST	0.640	$Y = -0.562 + 0.149ST$
	2	SW	0.769	$Y = -0.667 + 0.115ST + 21.905SW$

注: SW 表示土壤含水量。ST 表示土壤温度。

春季、夏季、秋季,选择连续的 5 d 数据比较小时尺度上树干液流速率与不同土层深度土壤温度的偏相关系数(表 4)。整体来看,春、夏、秋季,20、50 cm 层土壤温度对桤柳树干液流活动有显著影响。春季桤柳树干液流速率与 20 cm 层土壤温度呈显著负相关($P<0.05$),与 50 cm 层土壤温度呈极显著负相关($P<0.01$),夏季桤柳树干液流与 50 cm 层土壤温度

柳树干液流速率变化。

小时尺度上,春季、夏季、秋季桤柳树干液流速率与土壤体积含水量变化趋势相反,呈负相关(图 5)。土壤含水量与桤柳树干液流速率存在紧密的联系,是影响桤柳树干液流的重要因素。

小时尺度上,春季、夏季、秋季土壤温度与桤柳树干液流速率变化趋势相反,呈负相关(图 6),土壤温度影响桤柳根系的吸水。

春季、夏季、秋季,选择连续的 5 d 数据比较小小时尺度上树干液流速率与不同土层深度土壤含水量的偏相关系数(表 3)。整体来看,春、夏、秋季,20、50 cm 层土壤含水量对桤柳树干液流活动有显著影响。春季桤柳树干液流速率与 50 cm 层土壤含水量呈极显著负相关($P<0.01$),夏季桤柳树干液流与 20、50 cm 层土壤含水量呈显著负相关($P<0.05$),秋季桤柳树干液流与 50 cm 层土壤含水量呈显著负相关($P<0.05$)。

呈显著负相关($P<0.05$),秋季桤柳树干液流与 50 cm 层土壤温度呈极显著负相关($P<0.01$)。

3 结论与讨论

3.1 结论

1)夏季树干液流的启动时间最早,为 7:20,峰值最大,为 $6.93 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。春季树干液流启动时间

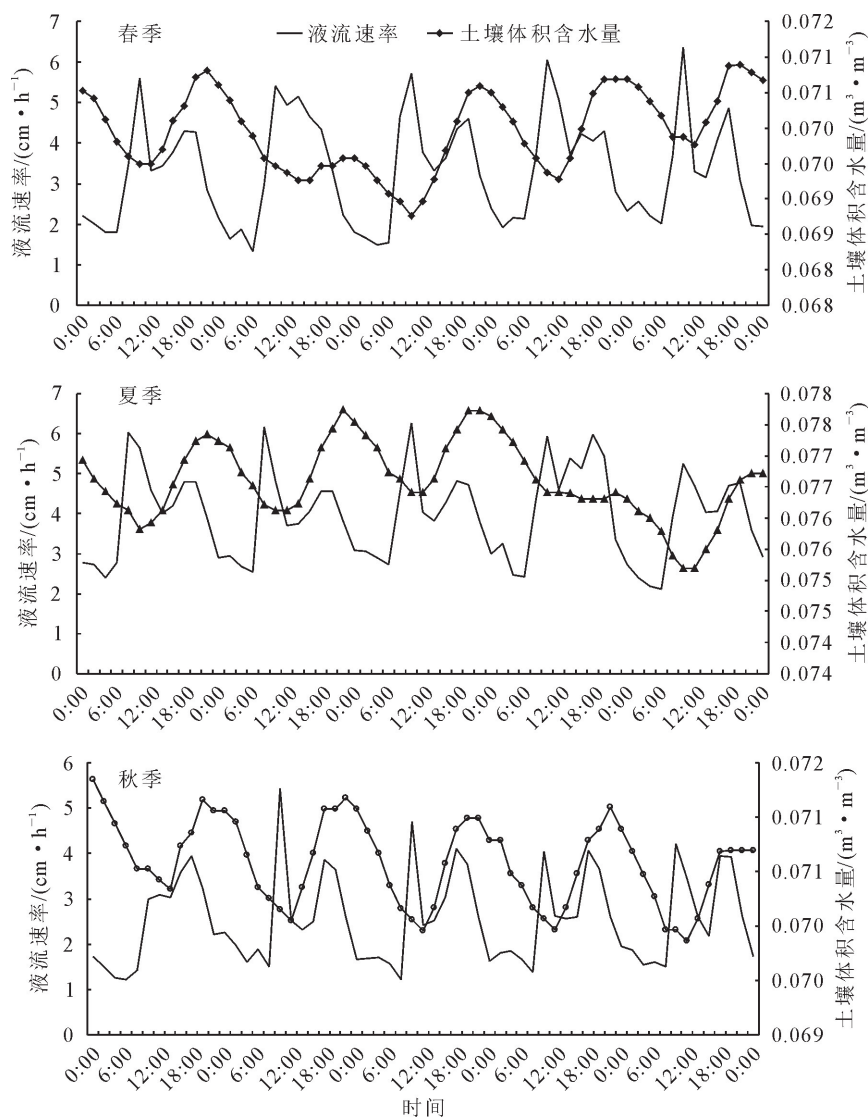


图5 桤柳不同季节树干液流速率与土壤体积含水量的关系

Fig. 5 Relationship between stem sap flow rate and soil volumetric water content of *T. chinensis* in different seasons

为7:40,峰值为 $6.46 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$;秋季树干液流启动时间最晚,为8:40,峰值最小,为 $4.22 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。春、夏、秋季夜间有微弱树干液流存在。

2)在整个桤柳生长季,150 cm层土壤体积含水量最高,为 $0.111 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$,随着时间呈先上升后下降趋势,20 cm层土壤体积含水量最小,为 $0.042 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$,随着时间变化,土壤体积含水量波动较大。生长季桤柳土壤温度呈先增加后减小的趋势,20、50 cm层土壤温度波动较大。7、8月平均土壤体积含水量最高,为 $0.076 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$,5月土壤含水量最小,为 $0.069 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ 。

3)日尺度上,春、夏、秋季,桤柳树干液流速率与土壤含水量及土壤温度呈正相关关系,土壤温度是影响桤柳树干液流的主导因子。小时尺度上,春季、夏季、秋季,桤柳树干液流速率与20、50 cm层土壤含水量、土壤温度呈显著负相关,50 cm层土壤温度

是影响树干液流速率的主导因子。

4)春季、夏季、秋季土壤温度分别单独能解释61.1%、65.6%、64.0%的树干液流变化,土壤含水量与土壤温度分别共同能解释73.4%、74.1%、76.9%的树干液流变化。春季回归模型为 $Y = -0.944 + 0.136ST + 17.893SW$,夏季回归模型为 $Y = -4.087 + 175.569ST + 16.423SW$,秋季回归模型为 $Y = -0.667 + 0.115ST + 21.905SW$,不同季节回归模型精度较高,能够较好地解释不同季节桤柳树干液流速率变化,通过回归模型能够为桤柳树干液流速率预测与耗水量估算提供很好的途径,并进一步实现由单木耗水至群体蒸腾耗水的尺度扩展。本研究可为制定水分管理措施提供参考。

5)为了能够实现桤柳生态效益和崔木土沟水资源的合理利用,应对桤柳采取适当的管护措施,为合理有效地利用水资源提供决策依据。因此,从崔木

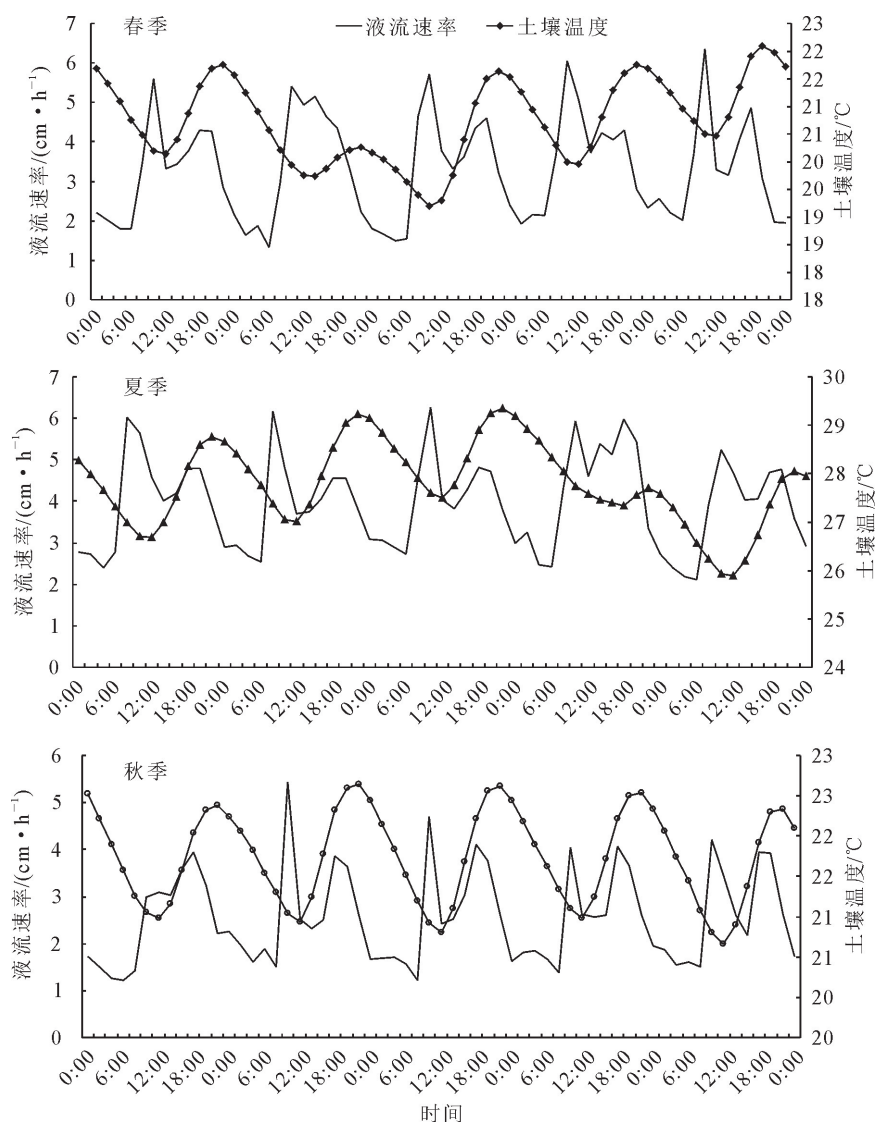


图6 柽柳不同季节树干液流速率与土壤温度的关系

Fig. 6 Relationship between stem sap flow velocity and soil temperature of *T. chinensis* in different seasons

土沟水资源合理利用的角度出发,以最小的耗水量为前提,发挥最大的生态功能,下一步需要对柽柳最小耗水量问题进行深入研究。

3.2 讨论

柽柳树干液流速率白天高、夜间低,树干液流速率变化幅度白天大、夜间小,这是由于气温白天高夜间低,植物蒸腾作用随温度的增加而增加,胡杨白天蒸腾作用强烈,使胡杨缺水严重,为了维持正常生长,夜间在根压的作用下不断吸水来保持水分平衡^[38-39]。李浩等^[37]研究发现,夏季植物为了补充水分,夜间树干保持一定的树干液流来维持正常的生理活动。本研究中,夜间柽柳维持着一定的液流速率。这与李双等^[29]、杨文新^[11]的研究结果一致。柽柳夜间存在较高的液流速率,干旱区植物白天蒸腾作用强烈,失水严重,夜间通过根系吸水补充水分,因此夜间存在液流速率,柽柳耐旱性得到提高。

大量文献表明树干液流总体水平由土壤供水决定,液流的潜在能力由生物学结构决定,液流的瞬间变化由气象因素决定^[40-42]。研究表明,在一定干旱胁迫下,土壤含水量将是柽柳耗水的主要限制因子,植物赖以生存的主要环境因子是土壤水分^[19-20],柽柳光合及蒸腾作用需要的水分主要来源是土壤水分,而库姆塔格沙漠是极干旱区,柽柳需要吸收地下水来维持自身正常的生命活动。因此液流速率变化受土壤含水量影响较大。本研究发现土壤因子对柽柳的液流影响存在时间尺度上的差异,日尺度上,春季、夏季、秋季,柽柳液流速率与土壤含水量及土壤温度呈显著正相关关系($P < 0.05$)。在小时尺度,春季、夏季、秋季柽柳液流速率与20、50 cm层土壤含水量、土壤温度呈显著负相关($P < 0.05$)。这与郝少荣等^[13]研究结果一致,他认为小时尺度下,环境因子对植物茎流的影响较为复杂。由于每月的环

境差异,在小时尺度上,各环境因子变化较快,所以桤柳茎流不同季节在小时尺度、日尺度对土壤因子的正负相关性有差异。郝少荣等^[13]认为在较小时时间尺度下,茎流对环境因子的敏感度逐步提高,对茎流影响的环境因子由土壤因子扩展到了环境综合因子,气象因子占主导作用,土壤因其具有极大的热容性和热传导阻力,对液流速率的影响是一个长期过程^[15],故在小时尺度上不占主导作用。

表 3 小时尺度上树干液流速率与不同土层深度土壤含水量的偏相关系数($n=120$)

Table 3 Partial correlation coefficients between sap flow rate and soil water content with different soil depths($n=120$)			
		土层深度/cm	树干液流速率
春季	20	相关性	-0.187
		显著性(双侧)	0.133
	50	相关性	-0.391* *
		显著性(双侧)	0.001
	100	相关性	-0.232
		显著性(双侧)	0.060
	150	相关性	-0.214
		显著性(双侧)	0.085
	200	相关性	0.087
		显著性(双侧)	0.489
夏季	20	相关性	-0.271*
		显著性(双侧)	0.028
	50	相关性	-0.299*
		显著性(双侧)	0.015
	100	相关性	-0.186
		显著性(双侧)	0.169
	150	相关性	-0.093
		显著性(双侧)	0.458
	200	相关性	-0.021
		显著性(双侧)	0.865
秋季	20	相关性	-0.208
		显著性(双侧)	0.094
	50	相关性	-0.277*
		显著性(双侧)	0.024
	100	相关性	0.067
		显著性(双侧)	0.596
	150	相关性	-0.141
		显著性(双侧)	0.260
	200	相关性	0.148
		显著性(双侧)	0.235

本研究回归分析表明,春季,土壤温度能解释 61.1%的茎干液流变化,夏季,土壤温度能解释 65.6%的树干液流变化,秋季,土壤温度能解释 64.0%的树干液流变化。郝少荣等^[13]研究表明 30 cm 处土壤温度能解释沙柳树干液流 87.9%的变化,植物根系活性受土壤温度制约,根系细胞的根压、原生质黏度受土壤温度影响,根系吸水能力会随

表 4 小时尺度上树干液流速率与不同土层深度土壤温度的偏相关系数($n=120$)

Table 4 Partial correlation coefficients between sap flow rate and soil volumetric water content with different soil depths($n=120$)

		土层深度/cm	树干液流速率
春季	20	相关性	-0.249*
		显著性(双侧)	0.044
	50	相关性	-0.415* *
		显著性(双侧)	0.001
	100	相关性	-0.214
		显著性(双侧)	0.084
	150	相关性	0.199
		显著性(双侧)	0.109
	200	相关性	0.083
		显著性(双侧)	0.510
夏季	20	相关性	-0.169
		显著性(双侧)	0.176
	50	相关性	-0.344*
		显著性(双侧)	0.048
	100	相关性	0.070
		显著性(双侧)	0.574
	150	相关性	-0.058
		显著性(双侧)	0.658
	200	相关性	-0.024
		显著性(双侧)	0.699
秋季	20	相关性	-0.097
		显著性(双侧)	0.437
	50	相关性	-0.417* *
		显著性(双侧)	0.000
	100	相关性	-0.005
		显著性(双侧)	0.966
	150	相关性	0.083
		显著性(双侧)	0.509
	200	相关性	0.107
		显著性(双侧)	0.391

着土壤温度变化而变化。树干液流速率受根系吸水的制约,根系吸水受土壤温度限制。在一定范围内,增加土壤温度能够促进根系吸水,提高根系周围酶活性,降低土壤水分黏性,土壤温度过高会抑制根系吸水能力,减小树干液流速率^[43]。

参考文献:

[1] 康佳鹏,马盈盈,马淑琴,等.荒漠绿洲过渡带桤柳种群结构与空间格局动态[J].生态学报,2019,39(1):269-280.
KANG J P,MA Y Y,MA S Q,*et al.* Dynamic changes of spatial pattern and structure of the *Tamarix ramosissima* population at the desert-oasis ecotone of the Tarim Basin [J]. Acta Ecologica Sinica,2019,39(1):269-280. (in Chinese)
[2] 陈有婷,姚燕琴,黄登艳,等.不同技术措施对桤柳林生长状况的影响[J].甘肃林业科技,2014,39(1):43-44.
[3] 王勇,赵成义,王丹丹,等.塔里木河流域不同林龄胡杨与桤柳的水分利用策略研究[J].水土保持学报,2017,31(6):157-

163.
WANG Y, ZHAO C Y, WANG D D, *et al.* Water use strategies of *Populus euphratica* and *Tamarix ramosissima* at different ages in Tarim River Basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(6): 157-163. (in Chinese)
- [4] 孔庆仙, 夏江宝, 赵自国, 等. 不同地下水矿化度对桤柳光合特征及树干液流的影响[J]. 植物生态学报, 2016, 40(12): 1298-1309.
KONG Q X, XIA J B, ZHAO Z G, *et al.* Effects of groundwater salinity on the characteristics of leaf photosynthesis and stem sap flow in *Tamarix chinensis* [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2016, 40(12): 1298-1309. (in Chinese)
- [5] 迟琳琳, 韩辉, 党宏忠, 等. 彭武松树干液流特征及其与环境因子间的关系[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(1): 186-191.
CHI L L, HAN H, DANG H Z, *et al.* Relationships between stem sap flow rate of *Pinus densiflora* Sieb. et Zucc. var. *zhangwuensis* and environmental factors[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, 34(1): 186-191. (in Chinese)
- [6] STEPPT K, VANDEGHUCHTE M W, TOGNETTI R, *et al.* Sap flow as a key trait in the understanding of plant hydraulic functioning[J]. Tree Physiology, 2015, 35(4): 341-345.
- [7] GRANIER A. Sap flow measurements in douglas-fir tree trunks by means of a new thermal method[J]. Annales Des Sciences Forestieres, 1987, 44(1): 1-14.
- [8] SMITH D M, ALIEN S J. Measurement of sap flow in plant stems[J]. Journal of Experimental Botany, 1996, 47(12): 1833-1844.
- [9] LU P, URBAN L, ZHAO P. Granier's thermal dissipation probe (TDP) method for measuring sap flow in trees: theory and practice[J]. Acta Botanica Sinica, 2004, 46(6): 631-646.
- [10] 黄雅茹, 辛智鸣, 罗红梅, 等. 乌兰布和沙漠中国沙棘果实成熟茎干液流规律及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2015, 34(11): 3125-3131.
HUANG Y R, XIN Z M, LUO H M, *et al.* Stem sap flow dynamics of *Hippophae rhamnoides* L. subsp. *sinensis* Rousi in relation to environmental factors in Ulan Buh Desert during fruit stage[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(11): 3125-3131. (in Chinese)
- [11] 杨文新. 玛纳斯河流域典型荒漠植物光合蒸腾及耗水规律研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2014: 22-23.
- [12] 刘华, 余春燕, 白志强, 等. 喀纳斯保护区西伯利亚云杉树干液流动态变化[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2016, 40(1): 65-72.
LIU H, YU C Y, BAI Z Q, *et al.* Dynamic changes of trunk sap flow of *Picea obovata* in the Kanas national nature reserve[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition, 2016, 40(1): 65-72. (in Chinese)
- [13] 郝少荣, 裴志永, 段广东, 等. 不同时间尺度下环境因子与沙柳茎流关系的差异研究[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(3): 152-158.
HAO S R, PEI Z Y, DUAN G D, *et al.* Relationships between environmental factors and *Salix psammophila*'s sap flow at different time scales[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, 34(3): 152-158. (in Chinese)
- [14] 姚依强, 陈珂, 王彦辉, 等. 华北落叶松树干液流速率主要影响因子及关系的时间尺度变化[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(2): 155-161.
- [15] 任启文, 张岩, 李联地, 等. 不同时间尺度下落叶松液流速率与森林小气候的关系[J]. 中南林业科技大学学报, 2018, 38(12): 30-37, 44.
REN Q W, ZHANG Y, LI L D, *et al.* Relationship between sap flow velocity of *Larix principis-rupprechtii* and forest microclimate in different time scales[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2018, 38(12): 30-37, 44. (in Chinese)
- [16] 吴鹏, 杨文斌, 崔迎春, 等. 喀斯特区天峨槭(*Acer wangchii*)树干液流特征及其与环境因子的相关分析[J]. 生态学报, 2017, 37(22): 7552-7567.
- [17] 陈新均, 王学全, 卢琦, 等. 季节性河道土壤水分及其渗漏特征初探[J]. 干旱区研究, 2020, 37(1): 97-104.
CHEN X J, WANG X Q, LU Q, *et al.* Soil moisture content and soil water infiltration in seasonal watercourse in arid area[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(1): 97-104. (in Chinese)
- [18] 赵梦炯, 吴文俊, 马超, 等. 陇南地区土壤水分及气象因子对油橄榄树干液流的响应特征[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(5): 104-109.
ZHAO M J, WU W J, MA C, *et al.* Influence of soil moisture and meteorological factors on stem sap flow of olive in southern Gansu[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(5): 104-109. (in Chinese)
- [19] 杨明杰, 杨广, 何新林, 等. 干旱区梭梭茎干液流特性及对土壤水分的响应[J]. 人民长江, 2018, 49(6): 33-38.
- [20] 魏新光, 聂真义, 刘守阳, 等. 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.
- [21] 王玥, 鄢春华, 邱国玉. 土壤温度对油松树干液流启动与停止的影响[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2019, 55(3): 580-586.
WANG Y, YAN C H, QIU G Y. Soil temperature triggers sap flow onset and offset of *Pinus tabulaeformis* [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2019, 55(3): 580-586. (in Chinese)
- [22] 党宏忠, 却晓娥, 冯金超, 等. 晋西黄土区苹果树边材液流速率对环境驱动的响应[J]. 应用生态学报, 2019, 30(3): 823-831.
DANG H Z, QUE X E, FENG J C, *et al.* Response of sap flow rate of apple trees to environmental factors in Loess Plateau of western Shanxi Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(3): 823-831. (in Chinese)
- [23] 陈胜楠, 孔喆, 陈立欣, 等. 半干旱区城市环境下油松林分蒸腾特征及其影响因子[J]. 生态学报, 2020, 40(4): 1269-1280.
CHEN S N, KONG Z, CHEN L X, *et al.* The stand transpiration characteristics of *Pinus tabulaeformis* and its influential factors in a semi-arid urban environment[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(4): 1269-1280. (in Chinese)
- [24] 吕金林, 何秋月, 闫美杰, 等. 黄土丘陵区辽东栎树干液流特征对边材面积和土壤水分的响应[J]. 应用生态学报, 2018, 29(3): 725-731.
LÜ J L, HE Q Y, YAN M J, *et al.* Sap flow characteristics of *Quercus liaotungensis* in response to sapwood area and soil moisture in the loess hilly region, China[J]. Chinese Journal

- of Applied Ecology, 2018, 29(3): 725-731. (in Chinese)
- [25] 陈宝强, 张建军, 张艳婷, 等. 晋西黄土区辽东栎和山杨树干液流对环境因子的响应[J]. 应用生态学报, 2016, 27(3): 746-754.
- [26] 崔鸿侠, 唐万鹏, 胡文杰, 等. 神农架 2 树种树干液流特征及与环境因子关系[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(1): 37-44.
- CUI H X, TANG W P, HU W J, *et al.* Characteristics of the sap flow and correlation analysis with environmental factors of two tree species in Shennongjia[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(1): 37-44. (in Chinese)
- [27] 赵天宇, 关东海, 苏里坦, 等. 环境因子对胡杨树干液流动态的影响[J]. 水土保持通报, 2015, 35(6): 15-20.
- ZHAO T Y, GUAN D H, SU L T, *et al.* Effects of environmental factors on trunk sap flow of *Populus Euphratica*[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(6): 15-20. (in Chinese)
- [28] 任冉冉, 夏江宝, 张淑勇, 等. 黄河三角洲柽柳光合作用及树干液流对潜水埋深的响应[J]. 自然资源学报, 2019, 34(12): 2615-2628.
- REN R R, XIA J B, ZHANG S Y, *et al.* Response characteristics of photosynthesis and sap flow parameters in *Tamarix chinensis* leaves to depth of groundwater table in the Yellow River Delta[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(12): 2615-2628. (in Chinese)
- [29] 李双, 杜建括, 肖洪浪, 等. 干旱区雨养多枝柽柳茎干液流动态及其对环境因子的响应[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(12): 170-175.
- [30] 徐先英, 孙保平, 丁国栋, 等. 干旱荒漠区典型固沙灌木液流动态变化及其对环境因子的响应[J]. 生态学报, 2008, 28(3): 895-905.
- XU X Y, SUN B P, DING G D, *et al.* Sap flow patterns of three main sand-fixing shrubs and their responses to environmental factors in desert areas[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(3): 895-905. (in Chinese)
- [31] 梁凤超, 张新平, 张毓涛, 等. 干旱区荒漠梭梭柽柳蒸腾耗水对比分析[J]. 新疆农业科学, 2011, 48(5): 962-967.
- [32] 何斌, 陈亚宁, 李卫红, 等. 塔里木河下游地区胡杨、柽柳液流变化研究——以英苏断面为例[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(7): 135-141.
- HE B, CHEN Y N, LI W H, *et al.* Analysis on the variation of sap flow of *Populus euphratica* Oliv. and Chinese Tamarisk at the Lower Reaches of Tarim River—a case study along Yinsu Section[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2007, 21(7): 135-141. (in Chinese)
- [33] 许浩, 张希明, 闫海龙, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地多枝柽柳茎干液流及耗水量[J]. 应用生态学报, 2007, 18(4): 735-741.
- [34] 杨转玲, 钱广强, 董治宝, 等. 库姆塔格沙漠北部三垄沙地区风成沉积物粒度特征[J]. 中国沙漠, 2016, 36(3): 589-596.
- [35] 肖洪浪, 肖生春, 董治宝, 等. 库姆塔格沙漠地区土壤及分布特征[J]. 中国沙漠, 2010, 30(4): 837-843.
- [36] 苏琦, 袁道阳, 谢虹, 祁连山—河西走廊黑河流域地貌特征及其构造意义[J]. 地震地质, 2016, 38(3): 560-581.
- SU Q, YUAN D Y, XIE H. Geomorphic features of the Heihe river drainage basin in western Qilian shan-Hexi Corridor and its tectonic implications[J]. Seismology and Geology, 2016, 38(3): 560-581. (in Chinese)
- [37] 李浩, 胡顺军, 朱海, 等. 基于热扩散技术的梭梭树干液流特征研究[J]. 生态学报, 2017, 37(21): 7187-7196.
- LI H, HU S J, ZHU H, *et al.* Characterization of stem sap flow *Haloxylon ammodendron* by using thermal dissipation technology[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(21): 7187-7196. (in Chinese)
- [38] 徐军亮, 马履一. 土壤温度对油松(*Pinus tabulaeformis*)树干液流活动的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(12): 326-331.
- [39] 赵春彦, 司建华, 冯起, 等. 胡杨(*Populus euphratica*)树干液流特征及其与环境因子的关系[J]. 中国沙漠, 2014, 34(3): 718-724.
- ZHAO C Y, SI J H, FENG Q, *et al.* Xylem sap flow of *Populus euphratica* in relation to environmental factors in the lower reaches of Heihe river[J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(3): 718-724. (in Chinese)
- [40] 张利刚, 曾凡江, 刘镇, 等. 极端干旱区 3 种植物液流特征及其对环境因子的响应[J]. 干旱区研究, 2013, 30(1): 115-121.
- [41] 刘延惠, 丁访军, 舒德远, 等. 茂兰喀斯特原生林细叶青冈树干液流环境响应特征[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2017, 41(3): 77-85.
- LIU Y H, DING F J, SHU D Y, *et al.* Characteristics of sap flow of *Cyclobalanopsis gracilis* in Maolan Karst original forests and its response to environmental factors[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition, 2017, 41(3): 77-85. (in Chinese)
- [42] 张小由, 龚家栋, 周茂先, 等. 应用热脉冲技术对胡杨和柽柳树干液流的研究[J]. 冰川冻土, 2003, 25(5): 585-590.
- ZHANG X Y, GONG J D, ZHOU M X, *et al.* A study on the stem sap flow of *Populus euphratica* and *Tamaris* spp. by heat pulse technique[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(5): 585-590. (in Chinese)
- [43] 徐世琴, 吉喜斌, 金博文. 典型荒漠植物沙拐枣茎干液流密度动态及其对环境因子的响应[J]. 应用生态学报, 2016, 27(2): 14-22.
- XU S Q, JI X B, JIN B W. Dynamics of sap flow density in stems of typical desert shrub *Calligonum mongolicum* and its responses to environmental variables[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(2): 14-22. (in Chinese)