

## 祁连山东部祁连圆柏树干液流变化特征及其与气象因子的响应研究

苏军德, 李国霞 (甘肃有色冶金职业技术学院, 甘肃金昌 737100)

**摘要** 采用 TDP 技术在自然条件下测定了祁连山东部祁连圆柏的树干液流, 在深入分析其日变化和季节变化的基础上探讨生态环境因子对其的影响。结果表明, 祁连圆柏树干液流日变化大多表现为单峰型的变化趋势, 但在不同天气条件下会出现双峰型和多峰型变化。祁连圆柏树干液流的大小、启动时间、变化趋势、最高峰到达时间等因素在不同月份具有明显的差异, 其流通量在各月表现为 8 月 > 7 月 > 6 月 > 5 月 > 10 月 > 12 月 > 9 月。祁连圆柏树干液流受多种环境因子的影响, 但不同环境因子对其影响存在显著的差异, 多元逐步回归分析发现, 气温是研究区祁连圆柏树干液流的限制因子, 而土壤含水量并非是研究区内祁连圆柏生长的限制因子。该研究结果为进一步探讨祁连山植被变化的驱动机制奠定一定的理论基础, 也为祁连山植被保护提供一定的技术支持。

**关键词** 祁连圆柏; 树干液流; 变化特征; 气象因子; 相关分析; 响应; 祁连山东部

**中图分类号** S718.45 **文献标识码** A

**文章编号** 0517-6611(2020)02-0098-05

**doi**: 10.3969/j.issn.0517-6611.2020.02.026



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

### Characteristics of Sap Flow of *Sabina przewalskii* and Its Response to Meteorological Factors in Eastern Qilian Mountains

SU Jun-de, LI Guo-xia (Gansu Vocational and Technical College of Nonferrous Metallurgy, Jinchang, Gansu 737100)

**Abstract** TDP technology was used to determine the sap flow of *Sabina przewalskii* in the eastern Qilian Mountains under natural conditions. Based on the in-depth analysis of its daily and seasonal changes, the impact of ecological factors on it was discussed. The results showed that the diurnal variation of sap flow of *Sabina przewalskii* was mostly unimodal, but there were bimodal and multimodal changes under different weather conditions. The size, start-up time, change trend, peak arrival time and other factors of sap flow had obvious differences in different months, and their circulation was expressed in each month: August > July > June > May > October > December > September. The sap flow of *Sabina przewalskii* was affected by various environmental factors, but there were significant differences in the influence of different environmental factors. Multivariate stepwise regression analysis found that the temperature was the limiting factor of sap flow of *Sabina przewalskii* in the study area, and the soil water content was not studied. The research results lay a certain theoretical foundation for further exploring the driving mechanism of vegetation change in Qilian Mountain, and also provide certain technical support for the vegetation protection of Qilian Mountain.

**Key words** *Sabina przewalskii*; Sap flow; Change characteristics; Meteorological factors; Correlation analysis; Response; Eastern Qilian Mountains

祁连山是西北地区重要的生态水源地, 对河西绿洲具有重要的意义。但随着全球气候的变暖, 祁连山地区气候暖干化现象越来越突出, 干旱化程度不断加剧<sup>[1]</sup>。加之近年来祁连山地区人类活动频繁, 区域内植被遭到了严重的破坏。国内许多学者对祁连山植被变化与降水进行了深入研究, 并有学者认为, 降水是祁连山植被变化的重要限制因子<sup>[2]</sup>。但很少有学者在生理生态的角度分析祁连山植被变化与水分间的关系。近年来, 随着热脉冲和热平衡技术的发展, 从生理生态学角度研究树木生长与水分消耗间的关系成为可能。树干液流是由于植物蒸腾作用使土壤水分在植物体内向上流动的过程, 能够很好地反映植物的生长状况和土壤水分的利用效率<sup>[3]</sup>。魏潇等<sup>[4]</sup>利用人脉冲技术估算了祁连山中段青海云杉的耗水情况; 赵春彦等<sup>[5]</sup>利用 SF100 热脉冲茎流仪研究了胡杨树干液流与太阳辐射间的关系。

祁连圆柏作为祁连山东部重要的树种, 具有生态适应幅较宽、耐寒、耐旱和耐贫瘠的特性, 由于其生长环境恶劣且分布海拔较高, 对环境变化的敏感度较高<sup>[6]</sup>。因此, 笔者利用 SF-L 热脉冲茎流仪对祁连山东部祁连圆柏树干液流的时空变化以及与环境因子的关系进行深入分析, 试图为进一步研

究祁连山植被变化的驱动机制奠定一定的理论基础, 同时也为祁连山自然保护区的治理提供一定的技术支持。

#### 1 资料与方法

**1.1 研究区自然概况** 该观测点位于祁连山东部的吐鲁沟国家森林公园, 地处 36°40' ~ 36°44'N、102°36' ~ 102°45'E, 由于深居内陆, 具有明显的温带大陆性气候特征; 年均气温 7.4 °C, 年蒸发量 1 542 mm, 全年日照时数 1 744 h, 年均降雨量 419 mm, 且主要集中在 6—9 月, 无霜期 125~135 d。植被具有明显的垂直梯带性和阴阳坡差异, 土壤以亚高山草甸土、栗钙土和灰褐土为主。观测植被以祁连圆柏为主, 伴有杜鹃、高山柳等亚高山灌丛, 林下草本植物以禾本科和莎草科植物为主<sup>[7]</sup>。

**1.2 祁连圆柏树干液流及相关气象因子的测定** 为了能够很好地观测祁连圆柏的树干液流, 在观测点相对开阔的地方选择不互相遮阴、树干笔直、生长状况良好的 4 棵祁连圆柏作为观测树木。2017 年 5—12 月, 将选好的 4 棵树木在树干离地约 1.3 m 的位置用小刀将树干死树皮刮去, 用电钻分别在树干东南和西北 2 个方向钻取约为 3 mm 的小孔, 两孔之间的距离为 40 mm, 将 SF-L 型热扩散液流探头 (thermal dissipation probe, 简称 TDP) 插入孔中, 用蜡状密封胶密封, 设定数据记录固定间隔为 30 min, 连续观测其树干液流。同时用自动气象站连续监测观测点太阳辐射、气温、空气相对湿度、土壤含水量、土壤温度、风速等气象因子。

**1.3 数据处理** 整个观测期间, 共测得 143 d 的有效数据,

**基金项目** 2019 年陇原青年创新创业人才(个人)项目(2019012); 甘肃省社会科学规划项目(19YB155); 甘肃省青年科技基金计划项目(18JR3RC420); 金昌市一般科技计划项目(2018KJH); 甘肃省高等学校科研项目(2017A-290)。

**作者简介** 苏军德(1986—), 男, 甘肃金昌人, 讲师, 硕士, 从事植物地理学、遥感生态学等方面的研究。

**收稿日期** 2019-08-09; **修回日期** 2019-09-29

为了更好地反映气象因子与树干液流之间的关系,该研究剔除记录不完整和连续降雨天气的数据,之后用 Microsoft Excel 2019、SPSS 13.0 及 Origin 8.5 等软件进行相关和多元逐步回归分析。其次,为了准确地比较不同月份之间树干液流日变化进程的差异,分别选取各月中典型的晴朗天气(5月31日、6月27日、8月2日、8月24日、9月21日、10月21日和12月6日)进行对比,其中7月份由于仪器出现了故障,因而数据缺失,9月份由于观测点为连续阴雨天气,故9月21日树干液流相对较低,且具有较多的波动。

## 2 结果与分析

### 2.1 祁连圆柏树干液流日变化

**2.1.1 不同月份树干液流日变化。**从图1可以看出,祁连圆柏树干液流存在明显的昼夜交替变化规律,树干液流在08:00—10:00开始启动,在13:00—15:00达到最大值,00:00—05:00出现最低值,呈现出单峰型、双峰型和多峰型变化趋势。树干液流白天高于夜间,下午高于上午,这主要是由于植物体内水分的移动需要强大的驱动力,下午较高的温度和较强的光照可使空气中水分亏缺值进一步提高,从而促使土壤水分向植物体内转移<sup>[8]</sup>;其次,木质部内运输水分的导管中充满气泡时,也可引起导管堵塞而使水分移动

减少<sup>[9]</sup>。

祁连圆柏树干液流在流速、日变化趋势、启动时间及树干液流达到最大值、最小值的时间等方面在不同月份之间具有显著差异(图1)。在整个观测段,晴朗天气条件下,树干液流都相对较高,8月份由于较高的温度和较强的光照,致使树干液流最大,9月份观测点大多为阴雨天气,致使光照较弱,空气湿度较高,树干液流相对较小。5月31日、6月27日、8月2日、8月24日、10月21日和12月6日祁连圆柏平均树干液流流量分别为235.41、229.85、458.33、430.18、141.25和109.84 g/h;茎流启动的时间分别为09:05、09:15、09:50、08:50、11:00和09:47;祁连圆柏树干液流达到最大值的时间分别为13:30、14:55、13:45、12:45、14:38和11:35。

树干液流的日变化进程受气温、光照、空气相对湿度、土壤湿度等因素的共同影响。白天较高的树干液流是由于白天气温较高、光照较强、空气相对湿度较小,树木蒸腾作用较强,木质部水柱间的张力较大,致使土壤中大量水分涌入根部以被动方式被植物吸入<sup>[10]</sup>。夜间微弱的树干液流主要是为补充白天植物蒸腾丢失的大量水分,使植物体内水分得以恢复。不同月份树干液流的启动时间有所差异,主要由不同月份日出时间不同而引起的<sup>[11]</sup>。

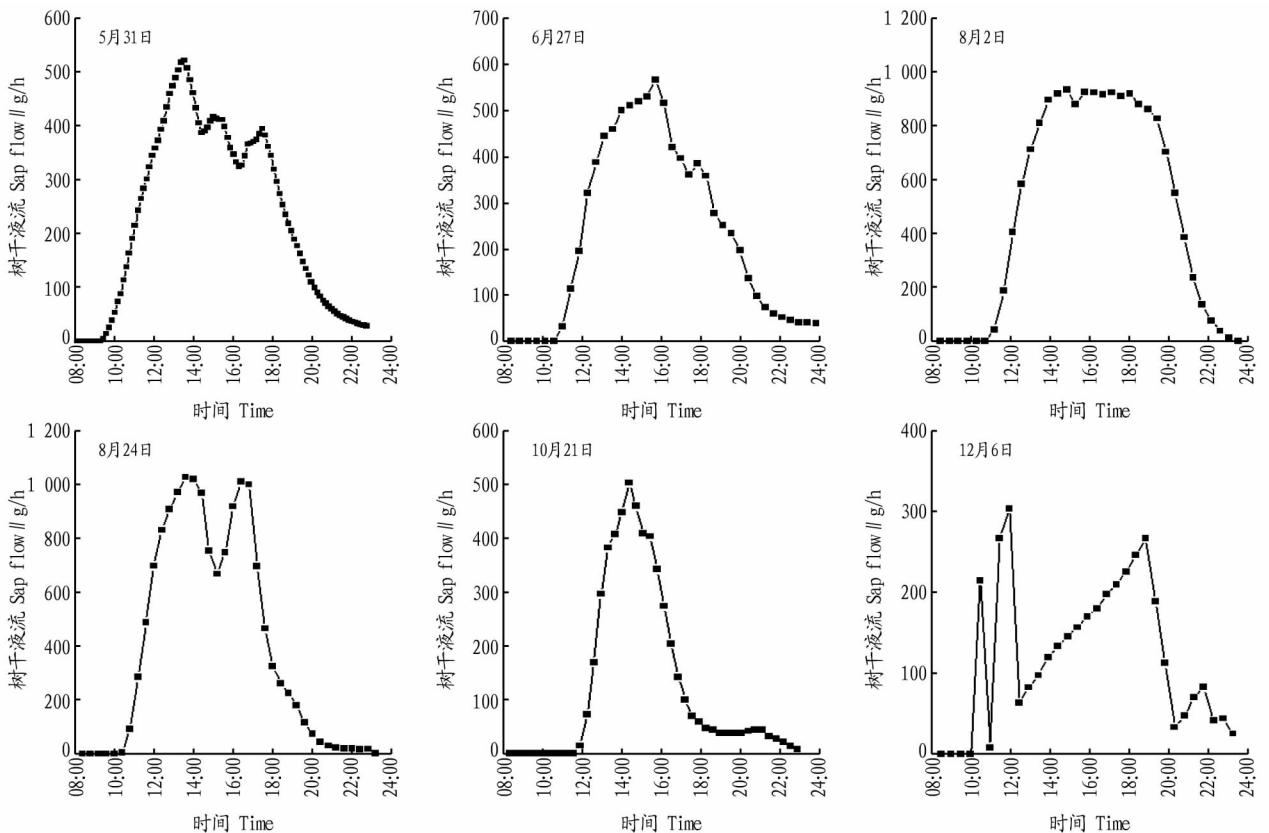


图1 不同月份树干液流日变化

Fig.1 Diurnal variation of sap flow in different months

**2.1.2 不同天气条件下树干液流日变化。**从图2可看出,在不同的天气情况下,树干液流表现出不同的日变化进程。6月1日为典型的晴天,树干液流启动时间较早,09:05开始启动并迅速增加至最大值(529.2 g/h),之后出现微弱的下降趋

势,这主要因为观测点突变的天气所致,树干液流在21:00达到一天中的最小值(49.9 g/h),日变化进程表现出典型的单峰型。6月12日为典型的阴天,树干液流相对较低,10:00开始启动,12:35达到最大值(439.6 g/h),然后迅速下降,在

14:20 出现另一个高峰,呈现出双峰型的变化趋势。在多云天气条件下(5月31日、6月13日),树干液流存在较大的波动,日变化进程呈现出多峰型的变化趋势。

## 2.2 祁连圆柏树干液流与环境因子的相关分析

**2.2.1 树干液流与气温的关系。**在观测点,祁连圆柏树干液流与温度存在显著的正相关,树干液流随着温度的升高以幂函数方式增加(图3),但在不同的温度范围内,增加速率却存在明显的不同。当温度低于12℃时,树干液流增长缓慢,

当温度超过12℃时,树干液流增长变快,其二者之间的拟合方程为  $y = 87.371e^{0.087 \cdot 3x}$  ( $R^2 = 0.433, P < 0.001$ )。一般来说,一定范围内温度的升高,能够加快植物体内物质的扩散和水分的传导,同时还能提高酶促反应<sup>[12]</sup>,影响植物的生物化学过程;其次,温度的升高能够增加植物体内水分的亏缺值,进而引起植物根系对水分的吸收<sup>[13]</sup>。因此,祁连圆柏树干液流会在一定范围内随着气温的升高而增大。

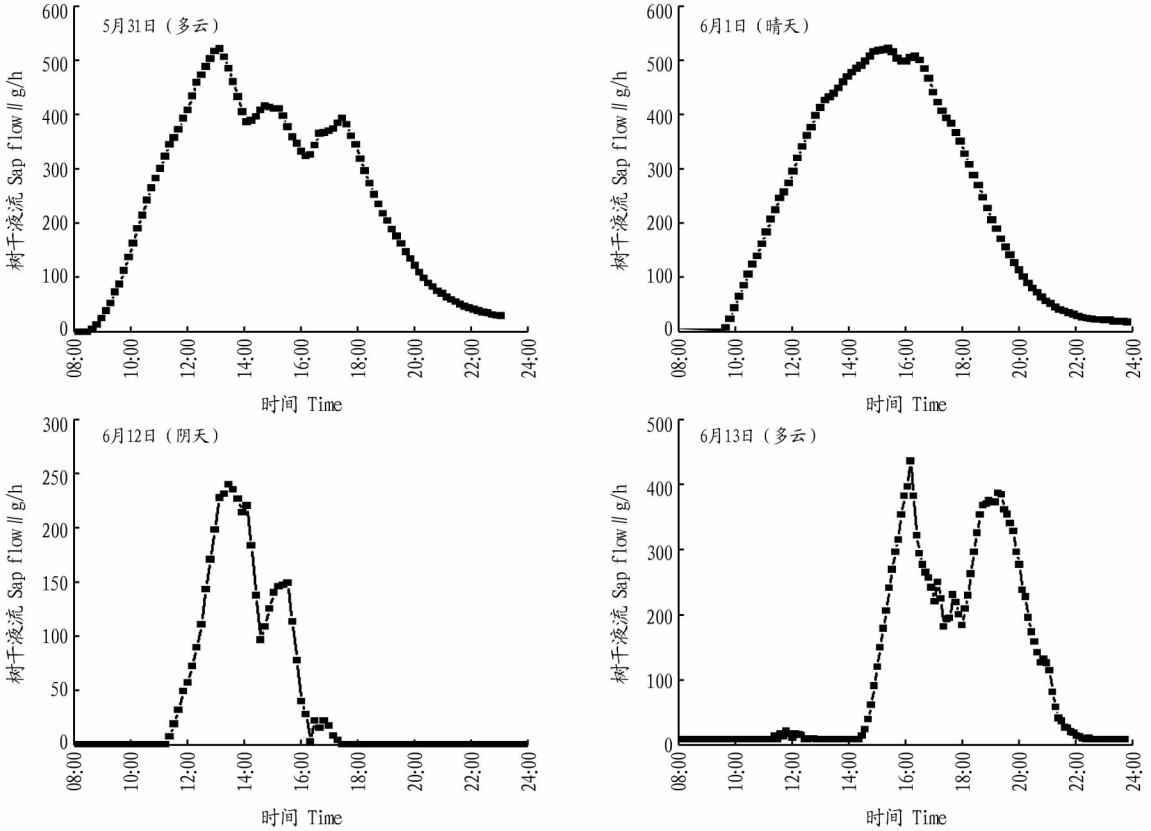


图2 不同天气条件下树干液流日变化

Fig.2 Diurnal variation of sap flow in different weather conditions

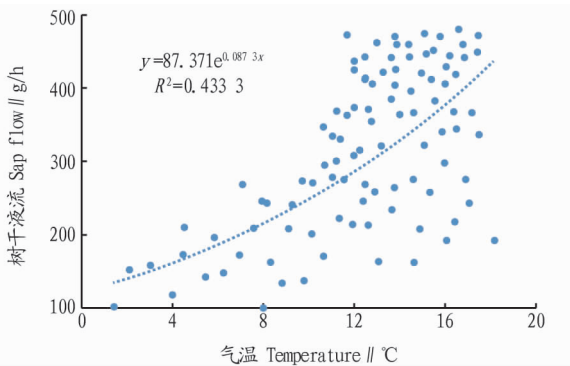


图3 树干液流与气温的响应曲线

Fig.3 Response curve of sap flow and temperature

**2.2.2 树干液流与光照强度的关系。**在晴朗天气下,观测点祁连圆柏树干液流随光照以幂函数方式增加(图4),其拟合方程为  $y = 134.761\ln(x) - 524.32$  ( $R^2 = 0.395, P < 0.001$ )。一般来说,光照会通过控制植物气孔的关闭来影响植物水分的传导<sup>[14]</sup>,其次,光照增强会引起气温升高、空气相对湿度和水

汽压亏缺值减小<sup>[15]</sup>,而这些因子的协同作用会加强祁连圆柏的蒸腾作用,进而引起树干液流的增大。

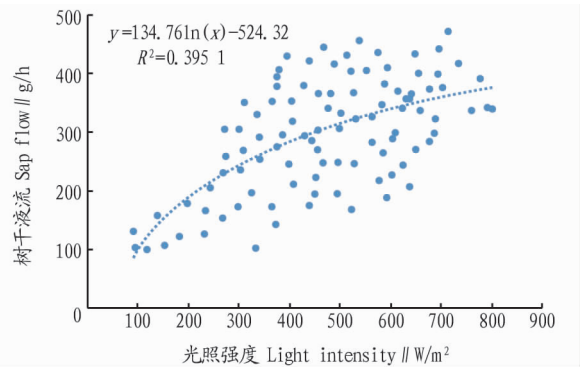


图4 树干液流与光照强度的响应曲线

Fig.4 Response curve of sap flow and light intensity

**2.2.3 树干液流与空气相对湿度的关系。**祁连圆柏树干液流与空气相对湿度呈负指数相关(图5),随着空气湿度的增加而减小,其拟合方程为  $y = 962.33e^{-0.022x}$  ( $R^2 = 0.692, P <$

0.001)。一般来说,空气湿度过高,会减小外界与叶片气孔间的水汽压梯度和水气压亏缺值,减慢水汽化过程<sup>[16]</sup>;其次,过高的空气湿度,会增加气孔对脱落酸的敏感程度<sup>[17]</sup>,导致气孔关闭,进而影响植物的蒸腾作用。

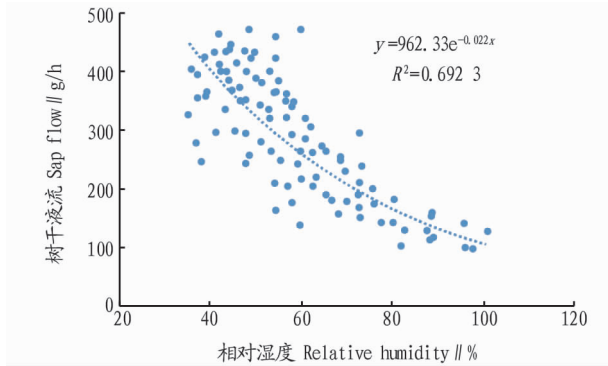


图5 树干液流与空气相对湿度的响应曲线

Fig.5 Response curve of sap flow and air relative humidity

2.2.4 树干液流与土壤含水量的关系。在季节变化上,祁连圆柏树干液流与太阳辐射具有显著的正相关( $R^2 = 0.373$ ,

$P < 0.001$ ),但与土壤含水量关系相对复杂(图6)。值得一提的是,7月底到9月初,观测点土壤含水量呈减小趋势,但树干液流却呈现出明显的增加趋势,这与熊伟等<sup>[18]</sup>在干旱区树干液流的研究结果较为一致。通常来说,土壤水分是干旱半干旱地区植物生长的限制因子,树木的蒸腾作用会随着土壤含水量的增大而增大。研究区祁连圆柏树干液流在土壤含水量持续下降的情况下不断升高,主要是因为植物对于外界的胁迫具有一定的抗性,土壤水分充足时,植物内层木质部内水分相对稳定,当土壤含水量持续下降,出现连续干旱的情况下,植物内层木质部的水分会及时补充外层木质部的大量失水<sup>[19]</sup>,从而保证植物正常的生理状态。其次,当土壤水分充足时,短时期内的干旱并不能影响植物的蒸腾作用,程国栋等<sup>[20]</sup>研究表明祁连山地区土壤最大持水量为72.8 mm,而观测点土壤最大持水量高达88.25 mm,这充分说明研究区土壤水分充足,土壤含水量并非观测点树木蒸腾作用的限制因子,而只是在一定程度上通过空气温度和湿度来间接的影响树木的树干液流。

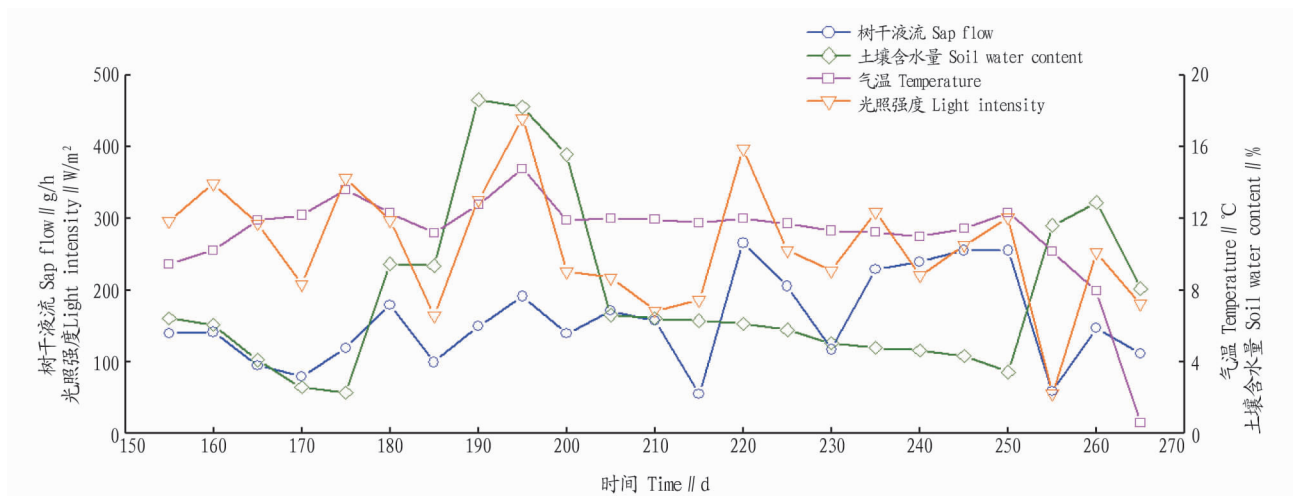


图6 祁连圆柏树干液流和各气象因子的季节变化

Fig.6 Seasonal changes of sap flow and various meteorological factors of *Sabina przewalskii*

树干液流与土壤含水量的响应曲线表明祁连圆柏树干液流与土壤含水量关系较为复杂,植物在不同的土壤含水量情况下,表现出不同的变化趋势。当土壤含水量小于13%时,祁连圆柏树干液流随着土壤含水量的增加呈指数方式快速增长(图7),其二者间的拟合方程为 $y = 12.441e^{22.945x}$  ( $R^2 = 0.484, P < 0.001$ );当土壤含水量大于13%时,祁连圆柏树干液流随着土壤含水量的增加呈线性方式增长(图7),其二者间的拟合方程为 $y = 2601.8x - 176.9$  ( $R^2 = 0.701, P < 0.001$ )。水分在土壤和植物体内流动时存在较大的阻力<sup>[21]</sup>,当土壤含水量较低时,土壤中水分多为吸湿水和结合水<sup>[22]</sup>,此时土壤水势较低,且具有较强的保水能力,水分在土壤和植物间流动存在过高的阻力<sup>[23]</sup>,水分不能被植物有效的吸收。因此,在此情况下提高土壤含水量,就能明显地改善土壤中自由水的含量<sup>[24]</sup>,进一步提高土壤与植物之间的水势梯度,从而为液体流动提供动力,促进根系对水分的吸收。随着土壤

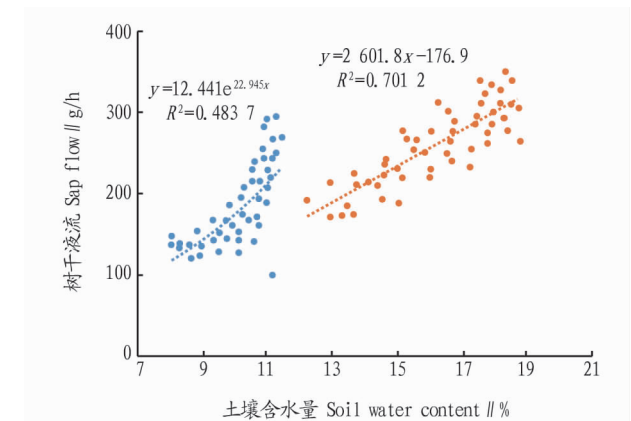


图7 树干液流与土壤含水量的响应曲线

Fig.7 Response curve of sap flow and soil water content

含水量的进一步升高,土壤中自由水的含量不断增加,同时土壤与植物间的水势差也逐渐增大,当到达一定限度时,再

提高土壤含水量,土壤与植物间的水势差就能不明显地得以改善<sup>[25]</sup>,植物的水分利用效率也就不能有效地得以提升。

**2.2.5 树干液流与环境因子的回归分析。**在单因素分析的基础上,选择光合有效辐射( $x_1$ )、空气温度( $x_2$ )、空气相对湿度( $x_3$ )、土壤温度( $x_4$ )、土壤湿度( $x_5$ )和风速( $x_6$ )与祁连圆柏树干液流( $Y$ )进行逐步多元回归分析,得到最优方程: $y = 175.31 + 0.95x_1 + 27.23x_2 - 2.143x_3 - 19.05x_5$  ( $R^2 = 0.585$ );观测点由于海拔较高,温度低而降水多,祁连圆柏的生长受温度的主要影响,从回归方程系数也可以看出,温度是观测点祁连圆柏树干液流的主要影响因子,而土壤湿度并非研究区树木生长的控制因子。但通径分析表明,较高的土壤湿度能够显著地提高空气相对湿度( $R^2 = 0.240, P < 0.001$ ),并且能够有效地降低空气温度( $R^2 = 0.139, P < 0.001$ ),这充分说明土壤湿度是通过改变空气温度和相对湿度以间接方式对祁连圆柏树干液流产生影响的。

### 3 结论

该研究利用热脉冲技术对祁连山东部祁连圆柏树干液流进行了长期观测,并对结果进行了统计分析,结果表明,祁连圆柏树干径流存在明显的昼夜节律性变化,日变化进程多表现为单峰型的变化趋势,但在不同天气条件下,会呈现出双峰型和多峰型变化;在季节尺度上,祁连圆柏树干液流具有明显的季节差异性,具体表现为8月>7月>6月>5月>10月>12月>9月;不同的环境因子对祁连圆柏树干液流的影响程度也明显不同,具体表现为空气温度>土壤温度>空气相对湿度>光合有效辐射。多元逐步回归分析发现,温度是研究区祁连圆柏树干液流的主要限制因子,土壤含水量会通过改变气温和空气相对湿度对树干液流产生一定的影响。

### 参考文献

[1] 张赫林,彭代亮,邓睿,等.基于 Landsat 时间序列数据的祁连山区域土地利用变化[J].北京工业大学学报,2017,43(5):665-676.  
[2] 刘雪梅,张明军,王圣杰,等.2008-2014年祁连山区夏季降水的日变化特征及其影响因素[J].地理学报,2016,71(5):754-767.  
[3] 张晓艳,褚建民,孟平,等.民勤绿洲荒漠过渡带梭梭(*Haloxylon ammodendron* (C.A.Mey) Bunge)树干液流特征及其对环境因子的响应[J].生态学报,2017,37(5):1525-1536.

[4] 魏潇,常学向,杨淇越,等.祁连山青海云杉(*Picea crassifolia*)夜间树干液流特征及影响因素[J].冰川冻土,2015,37(1):87-94.  
[5] 赵春彦,司建华,鱼腾飞,等.胡杨树干液流进程与太阳辐射的关系[J].干旱区资源与环境,2015,29(5):99-104.  
[6] 刘建泉,杨建红.祁连山圆柏种群结构和生活史分析[J].干旱区资源与环境,2015,29(7):140-144.  
[7] 路明,勾晓华,张军周,等.祁连山东部祁连圆柏(*Sabina przewalskii*)径向生长动态及其对环境因子的响应[J].第四纪研究,2015,35(5):1201-1208.  
[8] 成添,胡继超,李映雪,等.淹涝胁迫对水稻植株叶片光合性能的影响[J].气象与环境科学,2019,42(1):26-33.  
[9] 王锦旗,宋玉芝,黄进.气溶胶对陆生植物生长的影响研究进展[J].气象与环境科学,2018,41(1):116-124.  
[10] 赵哈林,李瑾,周瑞莲,等.风沙流持续吹袭对樟子松幼树光合蒸腾作用的影响[J].生态学报,2015,35(20):6678-6685.  
[11] 刘华,余春燕,白志强,等.不同径级的西伯利亚红松树干液流及蒸腾耗水特征的差异[J].西北植物学报,2016,36(2):390-397.  
[12] 于明含,高广磊,丁国栋,等.植物体温研究综述[J].生态学杂志,2015,34(12):3533-3541.  
[13] 马雅丽,郭建平.近36年东北地区春玉米气候资源利用率评估[J].气象与环境科学,2018,41(2):1-10.  
[14] 王宏亮,郭思义,王棚涛,等.植物气孔发育机制研究进展[J].植物学报,2018,53(2):164-174.  
[15] 商业纬,李明,丁博,等.生长素调控植物气孔发育的研究进展[J].植物学报,2017,52(2):235-240.  
[16] 裴志永,郝少荣,乔敬伟,等.毛乌素沙地沙柳枝条茎流特征[J].生态环境学报,2019,28(1):48-56.  
[17] 高冠龙,张小由,鱼腾飞,等.极端干旱条件下胡杨叶片气孔导度模拟[J].干旱区地理,2016,39(3):607-612.  
[18] 熊伟,王彦辉,徐德应.宁南山区华北落叶松人工林蒸腾耗水规律及其对环境因子的响应[J].林业科学,2003,39(2):1-7.  
[19] ZHAO X N, LI N, GAO X D, et al. Characteristics of soil water utilization for different stand ages of jujube trees based on <sup>18</sup>O tracking[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2018, 34(3): 135-142.  
[20] 程国栋,赵传燕.西北干旱区生态需水研究[J].地球科学进展,2006,21(11):1101-1108.  
[21] 鱼腾飞,冯起,司建华,等.植物根系水力再分配测定与模拟方法研究进展与展望[J].生态学杂志,2015,34(10):2930-2936.  
[22] 成林,刘荣花.农学模式在冬小麦产量动态预报中的应用[J].气象与环境科学,2017,40(2):28-32.  
[23] 张红霞,袁凤辉,关德新,等.维管植物木质部水分传输过程的影响因素及研究进展[J].生态学报,2017,36(11):3281-3288.  
[24] 王玉阳,陈亚鹏.植物根系吸水模型研究进展[J].草业学报,2017,26(3):214-225.  
[25] 朱成刚,李卫红,马建新,等.极端干旱生境下胡杨克隆水分整合特征及其生态意义[J].植物科学学报,2017,35(3):344-353.