

DOI: 10.5846/stxb201601280203

万艳芳, 于澎涛, 刘贤德, 王顺利, 王彦辉, 熊伟. 祁连山青海云杉树干液流密度的优势度差异. 生态学报, 2017, 37(9): - .

Wan Y F, Yu P T, Liu X D, Wang S L, Wang Y H, Xiong W. Variation in sap flow density among levels of tree dominance in *Picea crassifolia* in the Qilian Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(9): - .

祁连山青海云杉树干液流密度的优势度差异

万艳芳^{1,2}, 于澎涛^{2,*}, 刘贤德^{1,3}, 王顺利³, 王彦辉², 熊伟²

1 甘肃农业大学林学院, 兰州 730070

2 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091

3 甘肃省祁连山水源涵养林研究院, 张掖 734000

摘要:以祁连山排露沟小流域青海云杉林为研究对象,选取有代表性的优势木、亚优势木、中等木和被压木各 3—5 株,2015 年 6 月 16 日至 10 月 14 日应用热扩散技术对不同优势度青海云杉树干液流密度进行测定,并同步测定相关的林外气象因子。结果表明:(1)青海云杉液流密度呈昼高夜低趋势,晴天液流密度变化幅度较大,而阴雨天变化幅度较小。(2)晴天树木优势度越大,其液流在日内的启动越早,结束越晚,峰值也越大;优势木的平均液流密度为(0.0758±0.0475) mL cm⁻² min⁻¹,是亚优势木的 1.5 倍,是中等木和被压木的 1.68 倍。(3)青海云杉平均液流密度基本呈现 6 月份最大,其次是 8 月份,9、10 月份明显减小,且优势木>亚优势木>中等木>被压木。(4)相关性分析和逐步回归表明,青海云杉日均液流密度与太阳辐射强度、饱和水汽压差和空气温度呈正相关关系,与空气相对湿度和降雨量呈负相关关系。影响优势木、亚优势木和中等木液流密度的主要气象因子是太阳辐射强度,被压木液流密度主要受空气相对湿度的影响。

关键词:树干液流;优势度;气象因子;青海云杉林;祁连山

Variation in sap flow density among levels of tree dominance in *Picea crassifolia* in the Qilian Mountains

WAN Yanfang^{1,2}, YU Pengtao^{2,*}, LIU Xiande^{1,3}, WANG Shunli³, WANG Yanhui², XIONG Wei²

1 Forestry of Gansu Agriculture University, Lanzhou 730070, China

2 Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

3 Academy of Water Resources Conservation Forests in Qilian Mountain of Gansu Province, Zhangye 734000, China

Abstract: Tree transpiration plays a determining role in water balance for forest stands and in water yield from forested catchments. In the present study, an experiment was conducted in the Pailugou watershed in the Qilian Mountains, in the arid region of Northwest China. In a 86-year-old *Picea crassifolia* forest stand, 3—5 trees from each of dominant, subdominant, intermediate and suppressed trees were chosen as sample trees. The sap flux density for these trees was measured using the thermal dissipation probe (TDP) method from June 16 to October 14, 2015. Furthermore, the related meteorological factors, including solar radiation (R_s), air temperature (T), air relative humidity (R_h), and precipitation (P) were simultaneously monitored by an automatic meteorological station in the outer forest. The results showed that: (1) Daily sap flow density was higher during the day than during the night. On sunny days, daily variation in sap flow density exhibited large amplitudes, whereas it exhibited little variation on cloudy and rainy days. (2) On sunny days, daily sap flow density began earlier in the morning, ended later at night, and exhibited a larger maximum of sap flow density as tree dominance class increased. The value of the mean sap flow density of dominant trees was (0.0758 ± 0.0475) mL cm⁻²

基金项目:国家自然科学基金项目(91225302;91425301;31360201;41461004);甘肃省基础研究创新群体(145RJG337)

收稿日期:2016-01-28; 网络出版日期:2016-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yupt@caf.ac.cn

min^{-1} , which was 1.5 times of that of subdominant trees and 1.68 times that of intermediate and suppressed trees. (3) Mean daily sap flow density for all dominant trees showed that the maximum values were achieved in June, with the next highest values in August, and decreasing values in September and October. In addition, sap flow density exhibited the following order: dominant > subdominant > intermediate > suppressed trees. (4) Correlation and stepwise regression analyses indicated that mean daily sap flow density was significantly correlated with solar radiation, vapor pressure deficit, and air temperature, and was negatively correlated with air relative humidity and precipitation. Solar radiation was the main meteorological factor influencing mean daily sap flow density of dominant, subdominant, and intermediate trees, whereas air relative humidity primarily influenced suppressed trees.

Key Words: sap flow; dominance; meteorological factors; *Picea crassifolia* forest; Qilian Mountains

对干旱地区的森林而言,蒸散是树木、林下植被和地面向大气输送的水汽总量,是森林生态系统的最大水分输出分量。其中,林木蒸腾是蒸散的最重要组分,在土壤-植被-大气水分传输过程中起着重要作用,也对流域产水量变化有着重要的影响。

树干液流测定是一种准确估计树木单株蒸腾量的方法,并结合边材面积、胸径或叶面积等空间纯量,可以实现由单株液流向林分蒸腾的尺度扩展^[1-3]。目前测定树干液流的方法有很多,包括茎部热量平衡法、树干热平衡法、热脉冲法、热扩散方法等^[4],其中热扩散方法具有能够长期地连续监测、时间分辨率高,同时具有对样木损伤较少、数据采集自动化等优点,是测定树干液流的常用方法之一^[3]。

国内外研究者应用热扩散方法测定树干液流,研究单株树木的树干液流时空动态^[5-7]和树干液流与影响因子之间的关系,如树木形态特征^[7-8]、气象因子^[7-8]和土壤供水水平^[9-11]等因子对树干液流的影响,这些研究主要通过测定一株或几株样树推算林分液流,并假设相同径阶树木的树干传输水分的能力是一致的,再根据样地内树木的边材面积或胸径来推算样地的总蒸腾量^[1-3],但此法忽略了其它树形因子的影响。事实上,在天然林内,树木个体之间在形态和立地环境上存在很大的差异,如优势度的不同^[12-14],导致树木接受的光照不同,可能会影响单株树木的液流,进而会影响单株树木以及整个林分的蒸腾^[9]。因此,有必要对树木进行优势度划分,进行树干液流密度的研究。

青海云杉林(*Picea crassifolia*)是祁连山的主要建群种,呈斑块状分布在海拔 2500—3300 m 的阴坡、半阴坡上,对涵养水源、净化水质、保持水土具有重要的作用^[15]。但目前针对青海云杉的蒸腾研究较少,仅见 Chang 和魏潇等^[11,16-17]分析了单株青海云杉树干液流径向变化以及液流时空动态及其影响因素,而未考虑树木优势度差异对液流的影响。因此,本研究选取位于祁连山排露沟小流域的青海云杉,研究树干液流密度的优势度差异,为准确估算青海云杉林分蒸腾量奠定基础。

1 试验区概况

试验区位于祁连山排露沟小流域(38°33′58.7″N,100°17′18.0″E,海拔范围 2600—3800 m),属于温带气候,在海拔 2600 m 处,年均气温 0.5℃,年均降水量 435.5 mm,且集中在 5—9 月份,年均蒸发量 1051.7 mm,年日照时数 1892.6 h,年均相对湿度 60%。试验区森林类型单一,主要是以青海云杉(*Picea crassifolia*)林为主的寒温性针叶林,呈斑块状分布在阴坡、半阴坡;阳坡以草地为主,零星分布有祁连圆柏(*Sabina przewalskii*)林和灌丛;灌丛优势种有鬼箭锦鸡儿(*Caragana jubata*)、高山柳(*Salix cupularis*)、银露梅(*Dasiphora davurica*)等。草本主要有苔草(*Koeleria cristata*)、马蔺(*Iris ensata*)、马先蒿(*Pedicularis spp.*)等。土壤主要有山地森林灰褐土、山地栗钙土、草甸土、亚高山灌丛草甸土和高山寒漠土等类型。

2 研究材料与方法

2.1 样地概况

在海拔 2700 m 处选取了一块大小为 25 m×50 m 的藓类青海云杉林样地,其坡向 350°,位于坡面的中下

部,平均坡度为 23° ;该林分密度为 $1128 \text{ 株}/\text{hm}^2$,林龄 86 年,郁闭度 0.55,平均树高 (10.6 ± 5.6) m,平均胸径 (15.3 ± 9.1) cm,平均冠幅 (3.6 ± 1.1) m。林下灌木层主要由银露梅 (*Dasiphora davurica*) 组成,盖度在 4% 左右;草本层有披针苔草 (*Koeleria cristata*)、藜生马先蒿 (*Pedicularis spp.*)、棘豆 (*Oxytropis kansuensis*) 等,盖度在 37% 左右;苔藓层平均厚度为 (8.4 ± 3.1) cm,盖度在 30% 左右。

2.2 样树选取

依据样地内树木在林冠内的相对位置,按照 Kraft 树冠优势度分级标准^[18],将样地内青海云杉按林木个体优势度分为 5 级:I 代表优势木,II 代表亚优势木,III 代表中等木,IV 代表被压木,V 代表濒死木。对样地内的树木进行每木检尺,并记录其优势度等级。

根据样地内青海云杉的树木优势度分布,在每个优势度级别中选择 3—5 棵树作为样树(枯死木除外),共选取了 13 株样树(表 1)。样树的胸径介于 10—38 cm,树高介于 6—21 m,冠幅介于 2—7 m。其中,优势木的平均胸径、树高和冠幅都最大,分别为 (28.18 ± 6.93) cm、(19.4 ± 1.0) m 和 (5.2 ± 0.8) m,其次是亚优势木和中等木,被压木都最小,分别为 10.52 cm、6.1 m 和 3.6 m。

基于该实验地建立的青海云杉边材宽度与胸径之间的函数关系^[19](式 1)计算出每株样树的边材宽度:

$$y = 22.19 \times e^{0.025x} \quad (R^2 = 0.85, n = 17) \quad (1)$$

式中, y 为青海云杉林木边材宽度(mm), x 为青海云杉林木的胸径(cm)。

本研究选取的 13 株样树 2 的边材宽度介于 28—57 mm(表 1),其中,优势木的边材面积最大,平均值为 (45.45 ± 8.15) mm,介于 39.39—56.88 mm,其次是亚优势木(34.07 ± 1.08) mm)和中等木(30.81 ± 1.61) mm),被压木最小,为 28.87 mm。

表 1 样树特征参数

Table 1 The characteristics of sample trees for sap flow measurement

优势度等级 Tree dominance classes	均值±S.D. Average value				树号 Tree No.	胸径 Diameter/ cm	树高 Height/m	冠幅 Canopy width/m	边材宽度 Sapwood depth/mm
	胸径 Diameter/ cm	树高 Height/m	冠幅 Canopy width/m	边材宽度 Sapwood depth/mm					
优势木 Dominant tree	28.18±6.93	19.4±1.0	5.2±0.8	45.45±8.15	1	37.65	19.0	6.7	56.88
					2	33.55	20.5	4.9	51.34
					3	23.45	18.5	5.1	39.88
					4	23.31	18.5	4.8	39.74
					5	22.95	20.5	4.8	39.39
亚优势木 Subdominant tree	17.13±1.28	16.3±2.2	4.1±0.6	34.07±1.08	6	18.11	16.4	3.8	34.90
					7	17.61	14	4.8	34.46
					8	15.68	18.5	3.6	32.84
中等木 Intermediate tree	13.08±2.11	12.0±3.4	3.2±0.7	30.81±1.61	9	15.16	15.2	2.8	32.42
					10	14.32	7.6	3.9	31.74
					11	12.43	11.2	3.8	30.28
					12	10.43	14.2	2.4	28.80
被压木 Suppressed tree	10.52	6.1	3.6	28.87	13	10.52	6.1	3.6	28.87

2.3 树干液流密度测定

树干液流密度用德国 Ecomatik 公司生产的 SF-L 型热扩散液流计进行测定。SF-L 树干液流测定仪是基于热扩散原理设计的,它由 4 个探针(记为 S_0 、 S_1 、 S_2 和 S_3)组成,探针长度为 20 mm,所测出的液流密度是线平均值(有别于热脉冲测定系统的点平均值)^[4,20],探针基本上能整合青海云杉液流密度随边材厚度变化而可能出现的变异(即液流密度在边材内的径向变化),测定值反映的是平均液流密度。测定探针之间的温差,再由温差推算出液流密度($J_s, \text{mL cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$)(式 2 和 3):

$$J_s = 0.714 \times \left(\frac{d_{tmax}}{d_{tact}} - 1 \right)^{1.231} \quad (2)$$

其中, d_{tmax} 是液流密度为 0 时的 d_{tact} , d_{tact} 的计算公式如下(式 3):

$$d_{tact} = T_{1-0} - \frac{T_{1-2} + T_{1-3}}{2} \quad (3)$$

式中, T_{1-0} 、 T_{1-2} 和 T_{1-3} 分别为探针 S_1 和 S_0 、 S_1 和 S_2 、 S_1 和 S_3 之间的温差($^{\circ}\text{C}$)。

数据采集时间间隔为 10 min, 测定时间为 2015 年 6 月 16 日至 10 月 14 日。

2.4 环境因子测定

在试验样地内设有美国 Campbell 公司生产的 CR3000 自动气象站, 用于连续采集森林冠层上方降水 (P , mm)、太阳辐射强度 (R_s , w/m^2)、空气温度 (T , $^{\circ}\text{C}$)、空气相对湿度 (R_h , %) 和林内土壤湿度 (M_s , %) 和土壤温度 (T_s , $^{\circ}\text{C}$) 等数据。其中冠层上方环境因子的观测高度为 30 m, 土壤体积含水率分别在 0—10、10—20、20—40、40—60 cm 和 60—80 cm 5 个土层进行测定, 土壤温度分别在 10、20、40、60 cm 和 80 cm 5 个土层进行测定。数据采集时间间隔为 10 min。

根据空气温度和空气相对湿度, 计算饱和水汽压差 (VPD , kPa) 如下(式 4 和 5):

$$E = 0.611 \times e^{\frac{17.502 \times T}{T + 240.97}} \quad (4)$$

$$VPD = E - \frac{E \times R_h}{100} \quad (5)$$

式中, E 为饱和水汽压(kPa); T 为空气温度($^{\circ}\text{C}$); R_h 为空气相对湿度(%)。

2.5 数据处理

利用 Excel 2007 和 SPSS 19.0 对数据进行统计分析和作图。

3 结果与分析

3.1 典型天气下林外气象因子日变化

太阳辐射强度呈昼高夜低趋势, 白天太阳辐射强度变化曲线呈单峰型或多峰型, 夜间太阳辐射强度非常微弱, 一般保持在 $5 \text{ w}/\text{m}^2$ 以下, 太阳辐射强度晴天 > 阴天 > 雨天(图 1)。如 8 月 4 日晴天, 太阳辐射强度日变化曲线为典型的抛物线, 太阳辐射从 6:10 开始启动, 之后快速上升, 于 13:50 到达峰值, 峰值为 $1340.17 \text{ w}/\text{m}^2$, 之后快速降低, 于 20:50 到达谷值。8 月 19 日阴天和 8 月 7 日雨天, 太阳辐射强度呈多峰形; 阴雨天太阳辐射启动时间和结束时间与晴天基本相同, 但出现峰值的个数与峰值间差异较大; 8 月 19 日阴天出现 3 个持续时间较短且数值较小的峰值, 于 11:30 到达第一个峰值, 峰值为 $1048.59 \text{ w}/\text{m}^2$, 比晴天小 $291.58 \text{ w}/\text{m}^2$; 而 8 月 7 日雨天出现 2 个峰值, 于 13:40 到达第一个峰值, 峰值为 $522.59 \text{ w}/\text{m}^2$, 明显小于晴天和阴天的峰值。

在不同天气条件下, 饱和水汽压差在一天之内的变化幅度并不相同(图 1)。0:00—8:00 期间饱和水汽压差呈现出雨天 > 晴天 > 阴天, 8:00—24:00 期间饱和水汽压差呈现出晴天 > 阴天 > 雨天。晴天与阴天饱和水汽压差变化趋势基本相同, 呈昼高夜低的变化趋势, 但阴天的饱和水汽压差略小于晴天的; 雨天的饱和水汽压差曲线与晴天和阴天差别较大, 饱和水汽压差在 0:00—8:10 期间缓慢降低, 8:10—24:00 期间变化幅度较小, 基本维持在 0.23 kPa 的较低水平, 明显低于该时段晴天与阴天的饱和水汽压差。

3.2 典型天气下树干液流密度日变化

液流密度日变化呈现明显的昼夜变化规律(图 2), 即白天液流密度明显高于清晨和夜晚, 变幅较大; 而清晨和晚上的液流密度缓慢, 但并不为 0, 且变幅相对较小; 这与太阳辐射强度日变化曲线相似(图 1)。晴天(8 月 4 日)液流密度呈宽峰型曲线, 太阳辐射强度从 6:10 启动, 液流密度则从 7:00 启动, 滞后于太阳辐射 50 min, 之后液流快速上升, 于 12:20 到达峰值, 峰值为 $(0.1107 \pm 0.0511) \text{ mL cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$, 之后液流缓慢减小, 19:00 左右急剧下降, 于 22:20 左右降低到夜间水平, 而太阳辐射强度于 20:50 降低到 $5 \text{ w}/\text{m}^2$ 以下, 液流结束

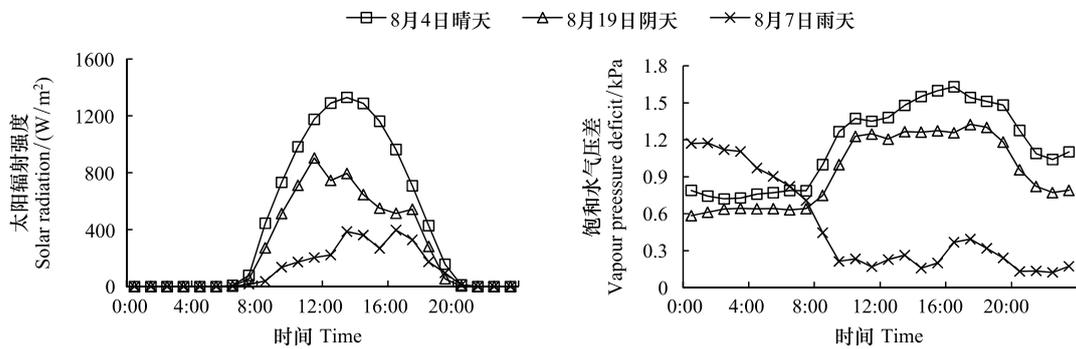


图1 典型天气下太阳辐射强度和饱和水汽压差日变化

Fig.1 Daily courses of solar radiation intensity and vapor pressure deficit in different weather condition

时间明显比太阳辐射滞后 1.5 h, 这表明液流的启动和结束与太阳辐射强度紧密相关。

天气条件影响液流密度, 阴天(8月19日)和雨天(8月7日)的液流曲线明显不同于晴天(图2), 阴天和雨天液流呈窄峰型曲线, 阴天液流曲线变化比较平缓, 雨天液流曲线变化幅度相对较小。而且, 阴天的启动时间比晴天滞后 30 min, 雨天明显比晴天推迟 6 h; 阴天((0.0824 ± 0.0369) mL cm⁻² min⁻¹)和雨天((0.0524 ± 0.0229) mL cm⁻² min⁻¹)的峰值明显小于晴天的。统计表明, 晴天、阴天和雨天的平均液流密度分别为 (0.0590 ± 0.0320) mL cm⁻² min⁻¹、 (0.0363 ± 0.0281) mL cm⁻² min⁻¹和 (0.0250 ± 0.0086) mL cm⁻² min⁻¹, 平均夜间液流密度分别为 (0.0291 ± 0.0136) mL cm⁻² min⁻¹、 (0.0124 ± 0.0083) mL cm⁻² min⁻¹和 (0.0207 ± 0.0113) mL cm⁻² min⁻¹。

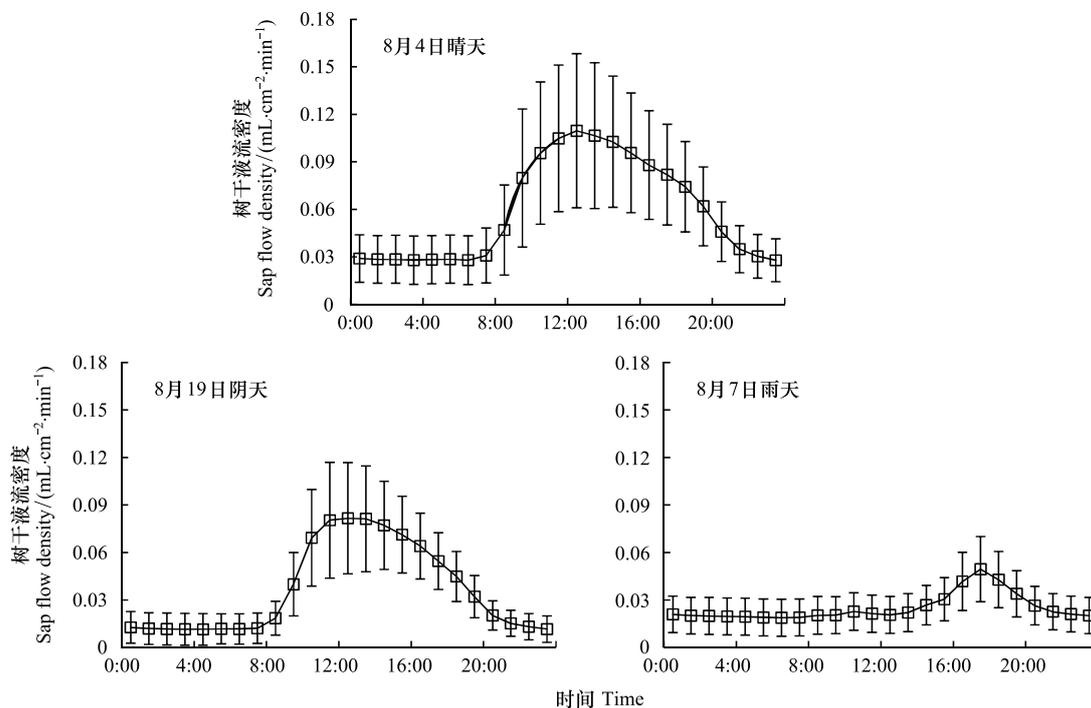


图2 典型天气下树干液流密度日变化

Fig.2 Daily courses of sap flow density in different weather condition

3.3 不同优势度青海云杉树干液流密度日变化

8月4日晴天, 日最高气温 20.25℃, 最低气温 11.93℃, 平均相对湿度 38.14%, 7月31日至8月3日期间降雨较多, 故8月4日不同优势度树木所处林地的土壤水分供应充足($21.4\% \pm 2.6\%$), 可以忽略土壤水分条

件对不同优势度青海云杉液流日变化造成的差异。

晴天优势木、亚优势木、中等木和被压木液流密度呈单峰型曲线。其中,优势木、亚优势木和中等木液流密度变化幅度较大,而被压木昼夜变化不明显(图3)。液流从清晨7:00—8:00启动,12:00—13:00达到峰值,20:00—23:00降到夜间水平,但不为0。

优势度越大,液流启动越早,结束时间越晚,液流时间跨度越长。即优势木、亚优势木、中等木和被压木的液流启动时间分别在7:00、7:10、7:30和7:50,结束时间分别在22:40、22:10、21:10和20:00。而且,优势木、亚优势木和中等木出现峰值的时间相近,于12:00—13:00到达峰值,但峰值差异较大,优势木峰值为 (0.1487 ± 0.0294) $\text{mL cm}^{-2} \text{min}^{-1}$,是亚优势木的1.3倍,是中等木的1.9倍;而被压木则表现为一个略有波动的宽平曲线,峰值不明显,从10:40开始一直维持到17:00左右,液流密度基本保持在 $0.055 \text{ mL cm}^{-2} \text{min}^{-1}$ 左右。统计表明,优势木的平均液流密度最大,为 (0.0758 ± 0.0475) $\text{mL cm}^{-2} \text{min}^{-1}$,是亚优势木的1.5倍、是中等木和被压木的1.68倍。但被压木平均夜间液流密度最大,为 (0.0419 ± 0.0029) $\text{mL cm}^{-2} \text{min}^{-1}$,是中等木和优势木的1.5倍,是亚优势木的1.8倍。

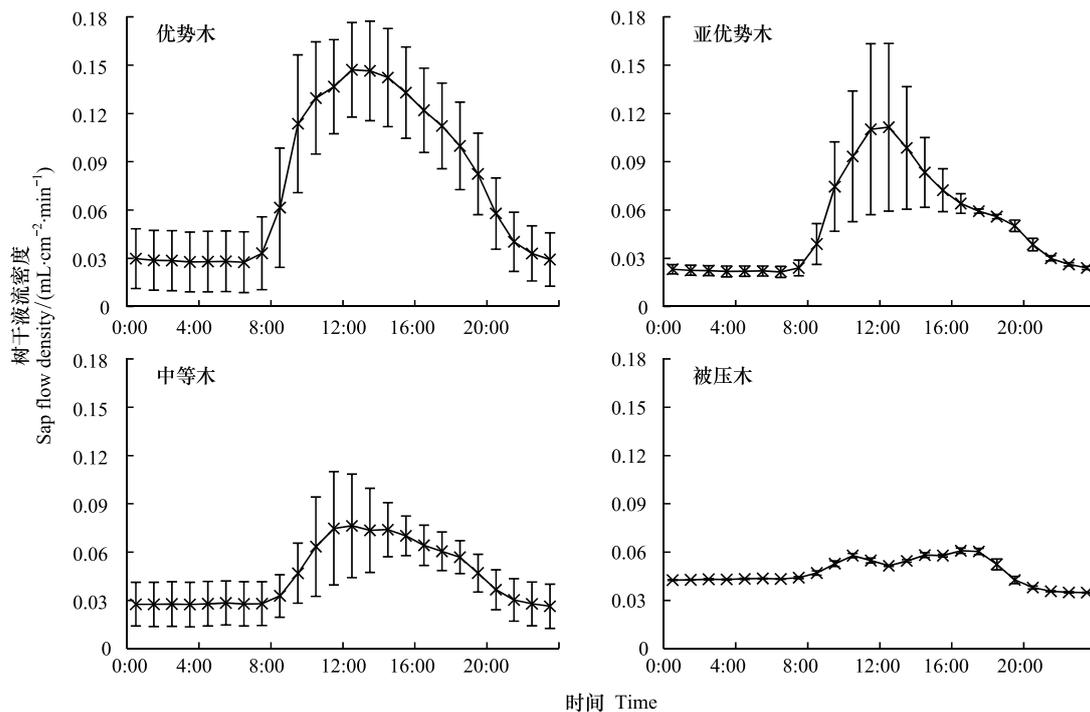


图3 8月4日(晴天)不同优势度青海云杉树干液流密度日变化

Fig.3 Daily courses of sap flow density for each crown class of *Picea crassifolia* on August 4, 2015

3.4 不同优势度青海云杉树干液流密度季节变化

优势木平均液流密度6月份最大,其次是8月份,9、10月份明显减小,且较接近,二者相差 $1.81 \text{ mL cm}^{-2} \text{d}^{-1}$ (表2)。亚优势木、中等木和被压木平均液流密度与优势木的变化趋势基本一致,但被压木8月份稍有反弹,比6月份的平均液流密度大 $2.80 \text{ mL cm}^{-2} \text{d}^{-1}$ 。另外,随着优势度的减小,液流密度月均值呈现减小的趋势,即优势木>亚优势木>中等木>被压木。优势木、亚优势木、中等木和被压木的液流密度月均值之间的差异也随着生长季的进程而减小。

3.5 青海云杉日均液流密度与林外气象因子的关系

青海云杉日均液流密度与太阳辐射强度(R_s)、饱和水汽压差(VPD)和空气温度(T)呈正相关关系,而与空气相对湿度(R_h)和降雨量(P)呈负相关关系(表3)。

林外气象因子对日均液流密度的影响程度随着优势度的减小而减小(即相对系数 R^2 减小)。其中,优势

木、亚优势木和中等木日均液流密度与 R_s 、 VPD 和 T 呈极显著的正相关关系,而被压木与 VPD 呈显著的正相关,与 R_s 和 T 仅呈正相关,且相关系数较小;青海云杉日均液流密度与 R_h 均呈极显著的负相关关系,相关系数的绝对值随优势度的减小而减小;优势木和亚优势木日均液流密度与降雨过程中的降雨量呈极显著的负相关,而中等木与 P 仅呈显著的负相关,被压木与 P 呈负相关关系。总体来看,优势木日均液流密度受林外气象因子的影响最大,其次是亚优势木和中等木,被压木最小。

表 2 不同月份日均液流密度变化 ($\text{mL cm}^{-2} \text{d}^{-1}$)

Table 2 Mean sap flow density in different month

月份 Month	优势木 Dominant tree	亚优势木 Subdominant tree	中等木 Intermediate tree	被压木 Suppressed tree
6	57.69±22.87	45.13±18.02	38.64±13.33	13.15±7.57
7	80.90±5.78	55.03±11.08	36.60±2.48	15.92±5.22
8	42.81±20.25	31.76±16.11	25.03±14.49	18.72±13.83
9	25.35±14.79	18.02±11.06	12.61±7.45	5.41±3.52
10	23.54±7.92	16.35±6.18	12.32±4.46	7.16±2.88

(1) 数据表示为:平均值±S.D.;(2) 7 月份为 29 日—31 日的平均值。

表 3 液流密度与气象因子的 Pearson 相关系数

Table 3 Pearson's correlation coefficient between mean sap flow density and related meteorological factors

优势度等级 Tree dominance class	太阳辐射强度 Solar radiation / (w/m^2)	饱和水汽压差 Vapour-pressure deficit/kPa	空气温度 Air temperature/ $^{\circ}\text{C}$	空气相对湿度 Air relative humidity/%	降雨量 Precipitation/mm
优势木 Dominant tree	0.682 **	0.554 **	0.493 **	-0.542 **	-0.385 **
亚优势木 Subdominant tree	0.624 **	0.457 **	0.339 **	-0.521 **	-0.386 **
中等木 Intermediate tree	0.465 **	0.389 **	0.317 **	-0.443 **	-0.297 *
被压木 Suppressed tree	0.211	0.284 *	0.159	-0.335 **	-0.135

** , * 分别表示该值在 0.01 和 0.05 水平上差异显著

多元逐步回归分析表明,影响青海云杉液流密度的主要气象因子因树木优势度等级而异(表 4)。

影响优势木、亚优势木和中等木液流密度的主要气象因子是太阳辐射强度,被压木液流密度主要受空气相对湿度的影响。

表 4 液流密度与气象因子的多元回归模型

Table 4 Multiple linear regression models of sapflow density against related meteorological factors

优势度等级 Tree dominance class	逐步回归方程 Stepwise regression equation	R^2	F	P
优势木 Dominant tree	$J_1 = 8.679 + 0.122R_s$	0.682	60.96	0.000
亚优势木 Subdominant tree	$J_2 = 7.990 + 0.087R_s$	0.624	44.73	0.000
中等木 Intermediate tree	$J_3 = 8.403 + 0.053R_s$	0.465	19.34	0.000
被压木 Suppressed tree	$J_4 = 23.982 - 0.1888R_h$	0.335	8.84	0.004

4 讨论

本研究中青海云杉林在个体形态(胸径 10—38 cm、树高 6—21 m)和功能上分化明显,13 株被测样树的平均液流密度介于 12.84—43.35 $\text{mL cm}^{-2} \text{d}^{-1}$ 。而且,对于胸径差别较小,优势度等级为中等木(DBH 10.43 cm)和被压木(DBH 10.52 cm)的 2 株样树,液流密度的平均值分别为(21.80±18.68) $\text{mL cm}^{-2} \text{d}^{-1}$ 和(12.24±8.84) $\text{mL cm}^{-2} \text{d}^{-1}$,分别介于 2.64—92.48 $\text{mL cm}^{-2} \text{d}^{-1}$ 和 0.68—36.20 $\text{mL cm}^{-2} \text{d}^{-1}$,说明树木优势度较大有利于液流产生,其原因可能与树木优势度大时接受的太阳辐射能量较多有关。

青海云杉树干液流日动态因树木优势度等级而异。晴天液流密度呈单峰型曲线,液流从 7:00—8:00 启动,12:00—13:00 出现最大值,20:00—23:00 降到夜间水平,但不为 0。这与银白杨(*Populus alba* L.×*P. talassica*)^[7]、红松(*Pinus koraiensis*)^[13]、木荷(*Schima superba*)^[14]和冷杉(*Abies fabri*)^[21]的晴天液流曲线变化趋势一致,均呈单峰曲线。而相比于华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)^[22]液流的液流曲线,青海云杉未出现“午休”现象。这是由于液流密度的日变化与大多数树种叶片光合速率的日进程基本同步^[23],而青海云杉在午间气孔开度可能处于变小状态,但饱和和水气压差增大,从而促进了青海云杉的蒸腾作用,使得由于气孔关闭而引起的“午休”现象未出现。优势木、亚优势木、中等木和被压木的液流密度日变化趋势基本一致,但树木优势度越大,树干液流启动时间越早,结束时间越晚,这是由于树木优势度越大,树木在林分中占据的空间位置越有利,能获取太阳辐射也越多,对液流的驱动作用也越强^[23];另外,树木优势度越大,峰值越大,反映了优势度大的树木树体水容和根系吸水能力较强^[24]。

青海云杉树干液流季节动态因树木优势度等级而异。平均液流密度基本呈现 6 月份最大,其次是 8 月份,9、10 月份明显减小。这是由于青海云杉液流密度季节变化与叶面积指数的季节变化有很大关系^[25];8 月份青海云杉的叶面积指数较大且稳定,介于 3.0—4.0,液流密度较高;而 9、10 月份叶面积指数减小到 2.5 左右,青海云杉已进入生长末期,液流密度明显较低。优势木、亚优势木、中等木和被压木的季节变化趋势基本一致,但被压木 8 月份出现反弹。这可能是由于被压木多处于主林层之下,林内气象因子对液流的影响较大,当 8 月份林内温度较高时,会促进青海云杉体内的代谢加快,从而促进液流密度加快。而且,还发现液流密度月均值呈现出优势木>亚优势木>中等木>被压木,表明树木优势度越大其液流密度也越高,其原因可能与优势度大的树木获得的水、热、营养等资源较多有关。

此外,青海云杉日均液流密度还受林外气象因子的影响,日均液流密度与太阳辐射强度、饱和水气压差和空气温度呈正相关关系,而与空气相对湿度和降雨量呈负相关关系。这与银白杨^[7]、红松^[13]、冷杉^[21]和华北落叶松^[22]等研究结论基本一致。优势木、亚优势木、中等木和被压木日均液流密度均受这些林外气象因子的影响,且影响程度依次减小。而且,影响的主导因子因树木优势度等级也不同,优势木、亚优势木和中等木液流密度的主要受太阳辐射强度的影响,而被压木液流密度主要受空气相对湿度的影响。这是由于优势木、亚优势木和中等木获取太阳辐射较为容易,且根系吸水范围也大^[14,24],而被压木处于获取光源不利位置,且根系吸水范围有限,空气相对湿度的适度增大,能有效地补充植物体内的水分亏损,当温度升高时,会促进植物体内的代谢加快,从而促进液流密度加快。孙龙等^[13]也发现影响红松优势木、亚优势木和被压木液流密度的主要环境因子为光合有效辐射和蒸汽压亏缺,吴永波等^[21]也发现影响冷杉液流密度的主要环境因子是光合有效辐射。

5 结论

本文通过对祁连山排露沟小流域青海云杉树干液流密度研究,得到以下结论:

(1)青海云杉树干液流密度呈昼高夜低趋势,晴天液流密度呈宽峰型曲线,变化幅度较大,而阴天和雨天液流呈窄峰型曲线,阴天液流曲线变化比较平缓,雨天液流曲线变化幅度相对较小。

(2)晴天优势木、亚优势木、中等木和被压木液流密度呈单峰型曲线,液流从 7:00—8:00 启动,12:00—13:00 达到峰值,20:00—23:00 降到夜间水平。但树木优势度越大,液流密度启动时间越早,结束时间越晚,液流时间跨度越长,峰值也越大。而且,优势木的平均液流密度最大,为 $(0.0758 \pm 0.0475) \text{ mL cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$,是亚优势木的 1.5 倍,是中等木和被压木的 1.68 倍。但被压木平均夜间液流密度最大,为 $(0.0419 \pm 0.0029) \text{ mL cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$,是中等木和优势木的 1.5 倍,是亚优势木的 1.8 倍。

(3)青海云杉平均液流密度基本呈现 6 月份最大,其次是 8 月份,9、10 月份明显减小,但被压木 8 月份稍有反弹。而且,液流密度月均值随着优势度的减小而减小,液流密度月均值之间的差异随着生长季的进程而减小。

(4)青海云杉日均液流密度与太阳辐射强度、饱和水汽压差和空气温度呈正相关关系,而与空气相对湿度和降雨量呈负相关关系。太阳辐射强度是影响优势木、亚优势木和中等木液流密度的主要气象因子,而被压木液流密度主要受空气相对湿度的影响。

参考文献 (References):

- [1] Grier C G, Running S W. Leaf area of mature Northwestern coniferous forests: relation to site water balance. *Ecology*, 1977, 58(4): 893-899.
- [2] Hatton T J, Vertessy R A. Transpiration of plantation *Pinus radiata* estimated by the heat pulse method and the Bowen Ratio. *Hydrological Processes*, 1990, 4(3): 289-298.
- [3] 孙慧珍,周晓峰,康绍忠. 应用热技术研究树干液流进展. *应用生态学报*, 2004, 15(6): 1074-1078.
- [4] 熊伟,王彦辉,于澎涛,刘海龙,徐丽宏,时忠杰,莫菲. 华北落叶松树干液流的个体差异和林分蒸腾估计的尺度上推. *林业科学*, 2008, 44(1): 34-40.
- [5] Čermák J, Cienciala E, Kučera J, Hällgren J E. Radial velocity profiles of water flow in trunks of Norway spruce and oak and the response of spruce to severing. *Tree Physiology*, 1992, 10(4): 367-380.
- [6] Köstner B, Granier A, Čermák J. Sapflow measurements in forest stands: methods and uncertainties. *Annales Des Sciences Forestières*, 1998, 55(1/2): 13-27.
- [7] 张俊,李晓飞,李建贵,王华,黄春堂,闵首军,李刚,张福海,田旭,孔军. 干旱荒漠区银白杨树干液流动态. *生态学报*, 2013, 33(18): 5655-5660.
- [8] 凡超,邱燕萍,李志强,李建光,张邦跃,袁沛元. 荔枝树干液流速率与气象因子的关系. *生态学报*, 2014, 34(9): 2401-2410.
- [9] 李振华,王彦辉,于澎涛,王艳兵,韩新生,曹恭祥. 华北落叶松液流速率的优势度差异及其对林分蒸腾估计的影响. *林业科学研究*, 2015, 28(1): 8-16.
- [10] 冯永建,马长明,王彦辉,杜阿朋. 华北落叶松人工林蒸腾特征及其与土壤水势的关系. *中国水土保持科学*, 2010, 8(1): 93-98.
- [11] Chang X X, Zhao W Z, He Z B. Radial pattern of sap flow and response to microclimate and soil moisture in Qinghai spruce (*Picea crassifolia*) in the upper Heihe River Basin of arid northwestern China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 187: 14-21.
- [12] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. *Tree Physiology*, 1987, 3(4): 309-20.
- [13] 孙龙,王传宽,杨国亭,张全智,周晓峰. 应用热扩散技术对红松人工林树干液流通量的研究. *林业科学*, 2007, 43(11): 8-14.
- [14] 梅婷婷,王传宽,赵平,蔡锡安,刘晓静,张全智. 木荷树干液流的密度特征. *林业科学*, 2010, 46(1): 40-47.
- [15] 车克钧,傅辉恩,王金叶. 祁连山水源林生态系统结构与功能的研究. *林业科学*, 1998, 34(5): 29-37.
- [16] Chang X X, Zhao W Z, Liu H, Wei X, Liu B, He Z B. Qinghai spruce (*Picea crassifolia*) forest transpiration and canopy conductance in the upper Heihe River Basin of arid northwestern China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 198-199: 209-220.
- [17] 魏潇,常学向,杨淇越,刘冰,王国华. 祁连山青海云杉 (*Picea crassifolia*) 夜间树干液流特征及影响因素. *冰川冻土*, 2015, 37(1): 87-94.
- [18] 德国林业和林产品研究中心, ICP 项目协调中心编辑. 空气污染对森林影响的统一采样、评价、监测和分析的方法与标准手册. 北京: 中国科学技术出版社, 2002.
- [19] 常学向,赵文智,何志斌,王金凤. 青海云杉 (*Picea crassifolia*) 边材心材边界的确定及树干传输水分的空间格局. *冰川冻土*, 2013, 35(2): 483-489.
- [20] 马玲,赵平,饶兴权,蔡锡安,曾小平. 乔木蒸腾作用的主要测定方法. *生态学杂志*, 2005, 24(1): 88-96.
- [21] 吴永波,薛建辉. 岷江流域冷杉树干液流的动态变化规律. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2005, 29(6): 61-64.
- [22] 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. *林业科学*, 2003, 29(2): 1-7.
- [23] 赵平,饶兴权,马玲,蔡锡安,曾小平. 马占相思 (*Acacia mangium*) 树干液流密度和整树蒸腾的个体差异. *生态学报*, 2006, 26(12): 4050-4058.
- [24] 马履一,王华田,林平. 北京地区几个造林树种耗水性比较研究. *北京林业大学学报*, 2003, 25(2): 1-7.
- [25] 常学向,赵文智. 荒漠绿洲农田防护树种二白杨生长季节树干液流的变化. *生态学报*, 2004, 24(7): 1436-1441.