

文章编号:1001-4810(2008)03-0228-07

岩溶区青冈栎树干液流特征及其与环境因子关系

张中峰¹, 黄玉清¹, 李先琨¹, 莫凌¹, 焦继飞^{1,2}, 尤业明^{1,2}

(1. 广西壮族自治区、中国科学院广西植物研究所, 广西 桂林 541006; 2. 广西师范大学生命科学学院, 广西 桂林 541002)

摘要:为阐明岩溶区植物液流变化特征,应用 Granier 热消散探针法,连续测定了桂林岩溶区植物青冈栎1年整的树干液流密度变化,并用 ICT-2000TE 环境气象站同步监测林地环境因子。结果表明:不同季节青冈栎树干液流密度差异较大,液流密度峰值分别为:1月份 $36.17\text{gH}_2\text{O}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$,4月份 $62.01\text{gH}_2\text{O}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$,7月份 $63.41\text{gH}_2\text{O}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$,10月份 $39.03\text{gH}_2\text{O}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 。土壤含水量在1月份、4月份、7月份与树干液流呈极显著相关;空气湿度和水汽压亏缺在1月份、10月份与树干液流呈极显著相关;空气温度在4月份、10月份与树干液流呈极显著相关,而光合有效辐射在所有的观测月份均与树干液流呈极显著相关。对各时期树干液流密度与环境因子的多元线性回归方程进行 F 值检验,均达到极显著水平。

关键词:青冈栎; 岩溶地区; 树干液流; 环境因子

中图分类号:S715.2

文献标识码:A

国内外植物生理学者为准确测定植物耗水量,自20世纪60年代起,陆续提出了多种测定和研究方法,研究对象包括叶片^[1,2]、个体^[3,4,5]和林分^[6,7]3个水平上。目前测定植物蒸腾的代表性方法包括整树容器法、称重法、组织热平衡法、热脉冲法等^[8]。其中以组织热平衡原理设计的热扩散探针(Thermal dissipation probe, TDP)法可在自然条件下活体测定树木的液流量,能够准确反映出树木日及其季节尺度上的变化,具有操作简单、测量精度高的优点^[9,10]。20世纪90年代以后, TDP 技术在我国得到了广泛的应用,许多学者应用此方法研究了树干液流特征与环境因子的关系^[11~14],均取得了较好的效果。

虽然近年来国内对植物蒸腾作用与环境因子的关系进行了大量研究,但是对岩溶植物,特别是对石漠化地区植物的研究较少,目前尚未发现有类似研究。我国西南岩溶山区面积达50多万平方公里,是世界上发育最完全的喀斯特连续地带^[15]。在岩溶区,植物多样性低,生态环境极为恶劣,石山植被易毁难复,研究岩溶植物耗水规律和植物对干旱环境的适应性,

对岩溶区石漠化生态恢复重建具有重要意义。本文选取桂林典型岩溶区作为研究区域,以西南岩溶区分布较广、适应性较强的优势植物青冈栎作为研究对象,对1年中不同季节的相关观测数据进行分析 and 统计检验,通过逐步多元回归建立环境因子与树干液流密度的统计模型,揭示环境因子对岩溶植物水分生理活动的影响及岩溶植物不同季节的液流变化规律,为岩溶区生态恢复重建提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究地自然概况

研究地点选择广西桂林市南郊大埠乡甘棠村后山(当地的风水山)($110^{\circ}18' \sim 110^{\circ}22' \text{E}$, $25^{\circ}01' \sim 25^{\circ}03' \text{N}$),地貌属桂林典型的岩溶峰林地貌。甘棠村后山体海拔150~210m(高差约60m),植被较密,为次生林。依山体部位及植被外貌可分为三个部分,山顶较密的乔一藤刺灌丛、悬崖乔一藤灌丛和悬崖下密集的乔一藤灌丛。青冈栎主要分布在悬崖下的一个狭长地

基金项目:国家科技支撑计划项目(2006BAC01A10)、中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB2-08)、广西自然科学基金(桂科回0575009;桂科自0832223)

第一作者简介:张中峰(1983-),男,硕士,研究实习员,主要从事岩溶植物生理生态研究,电话:0773-3550076, E-mail: zfzhang@gxib.cn.

收稿日期:2008-06-24

带,为群落优势种。群落中下层种类较少,偶见朴树(*Celtis tetrandra*)、青檀(*Pteroceltis tatarinowii*)等树种,林下有粗糠柴(*Mallotus philippinensis*)、斜叶榕(*Ficus tinctoria*)以及青冈幼树等种类。样地设在比山脚高5~20 m的地段,约700m²,其中连续观测的6棵样树面积150m²。样地内岩石裸露度约70%,有土壤的地表只占约30%。各种植物根系随处可见,时而从岩缝中穿出,沿着岩石上爬行,时而插入土中。

1.2 树干液流的测定

依据样木的代表性原则,选取生长良好、树干通直、无病虫害、径级大小适中的6棵青冈栎作为样木。在东向距树干基部1.3~1.5m处刮掉树皮,按照Dynamax说明书安装TDP探头。根据Granier热消散探针的工作原理,上下探针的温度差与树干液流密度密切相关,将一对内置有热电偶的探针(上方的探针外缠绕加热丝和内置热电偶,下面的探针作为参考仅内置热电偶)插入具有水分传输功能的树干边材中,上面的探针加热后,与下面感测周围温度的探针作为对比,通过检测热电偶之间的温差 ΔT ,计算液流热耗散(液流携带的热量),建立温差与液流密度的关系,进而确定液流密度的大小^[10]。为防止太阳辐射对探头的影响,使用特殊的太阳膜隔热层包裹探针和树干。茎流仪采用PlantSensor(澳大利亚)提供的自动采集仪(Delta-T data logger)自动记录。通过计算机程序为数据采集仪设定观测频度:每10s测读一次,每隔30min进行平均并存储于数据采集仪中。

1.3 环境因子的测定

在距离青冈栎林50m空旷处安装气象站(ICT-2000TE,澳大利亚ICT公司),利用Delta-T数据自动采集仪监测光合有效辐射(Photosynthetically active radiation, PAR)、冠层空气温度(Air temperature, T_a)、空气相对湿度(Air relative humidity, RH)、林地土壤含水量(Soil water content, W_s)等,观测频度设置为每30min记录1次,自动记录和储存。

1.4 数据处理

Granier建立了温差与液流密度关系的经验公式^[13]:

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

其中, J_s 为液流密度(gH₂O/m²·s),即单位时间通过单位边材面积的液流量; ΔT 为两探针之间的瞬时温差, ΔT_m 为记录的昼夜最大温差。本实验采用美国Duke大学环境学院植物生理生态实验室开发的

Basliner 3.0 应用软件,计算瞬时液流密度值 J_s 。

水汽压亏缺(Vapour pressure deficit VPD)运用以下公式^[16]计算:

$$e_s(T) = a \cdot \exp \left[\frac{bT}{T+c} \right] \quad (2)$$

$$VPD = e_s(T) - e_a = e_s(T)(1 - h_r) \quad (3)$$

式中, $e_s(T)$ 代表 T 温度下的饱和水蒸气压, a 、 b 、 c 为参数,分别取值为:0.611kPa、17.502、240.97℃, T 为温度, e_a 为周围气体的水蒸气压, h_r 为相对湿度,VPD为水蒸气压亏缺。采用SPSS13.0软件进行偏相关分析和回归分析,并对相关系数和回归系数进行 t 检验,对回归方程进行 F 检验。

2 结果与分析

2.1 青冈栎树干液流变化特征

选取2007年四个不同时期(1月、4月、7月和10月)的树干液流和环境因子数据进行分析。结果表明各月份间液流密度差异极显著,液流密度峰值分别为:1月份36.17gH₂O/m²·s,4月份62.01gH₂O/m²·s,7月份63.41gH₂O/m²·s,10月份39.03gH₂O/m²·s。从图1液流变化曲线可以看出,1月与4月液流密度日变化波动大,而7月与10月液流密度变化相对平缓,这可能是由于1~4月份阴雨天气较多(见图2),树干液流随冠层的蒸腾作用的波动而变化,日间常出现两个甚至多个波峰;而夏季之后,特别是10月份之后晴天时间较多阴雨天气少,日间多为1个峰值。各月份液流启动时间与峰值时间也有较大差异,表现为1月份液流启动时间在9:30~11:00,峰值时间为14:30~15:30;4月份液流启动时间为7:30~8:30,峰值时间为13:30~15:00;7月份液流启动时间为7:00~7:30,峰值时间为12:30~14:00;10月份液流启动时间为8:00~9:00,峰值时间为12:30~13:30。

在整个生长季节里,青冈液流密度昼夜变化具有相似性,除天气原因引起液流曲线呈现多个峰值外,大部分时间里青冈液流密度变化呈现单峰曲线,说明青冈树干液流并无明显的“午休”现象。以7月31日为例,青冈树干液流密度在7:30左右开始稳步上升,至13:30左右达到峰值,为58.97gH₂O/m²·s,然后开始逐渐下降,下降趋势较为平缓。20:00之后开始急剧下降,21:30至次日早晨6:00液流密度维持在0.1~0.8gH₂O/m²·s之间。夜晚间的青冈栎 J_s 很小,但仍然存在极小的茎流,可能是因为白天蒸腾消耗过多

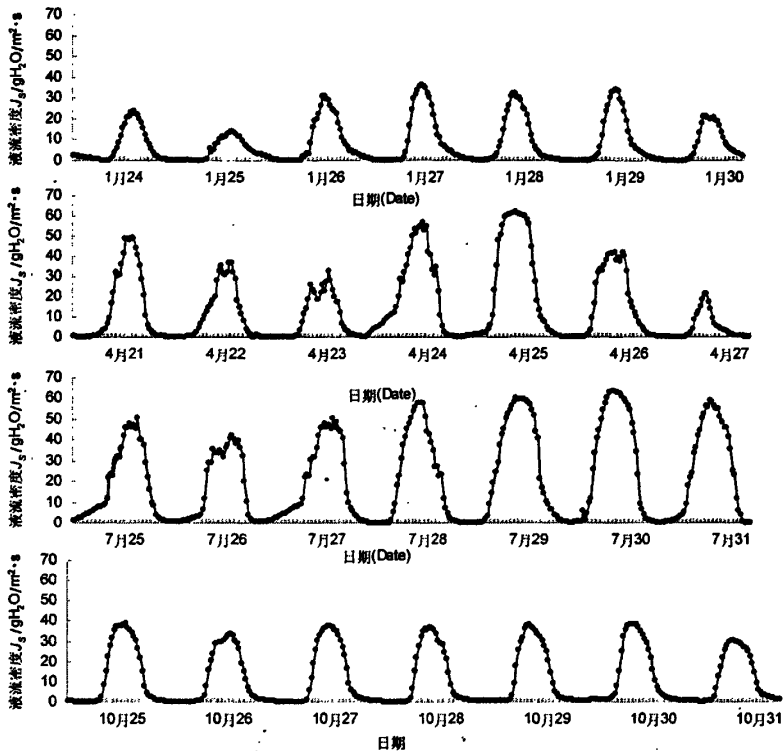


图 1 不同时期液流的连日变化曲线

Fig. 1 Diurnal changes of *Quercus glauca* sap flow during different periods

的水分导致植物体内储水减少,形成植物体内水势梯度和根压的存在并推动树液流动,植物根系继续从土中吸收水分,向上运输并贮存在茎杆和叶肉细胞内,直至植物体储水器官达到水势平衡^[17]。

2.2 不同天气条件下树干液流密度变化

不同天气下青冈栎树干液流存在较大的差异,对每个时期分别选取雨天和晴天条件下的液流日变化进行对比(图3)。从图中可以看出,雨天条件下,树干液流密度均明显低于晴天,液流启动时间和峰值时间比晴天时滞后,尤其在10月份,滞后时间极为明显,可达2小时左右;雨天条件下液流出现多个波峰,而晴天时多为一个波峰,且变化平缓,这可能是因为阴雨天太阳辐射小,空气水蒸气压亏缺极小,这些环境因素诱导叶片孔开启比较慢,太阳辐射等环境因素变化的不规则性也导致液流变化的不确定性。以4月份为例,4月23日为阴雨天气,全天降雨量10.8mm,青冈栎树干液流启动时间比4月21日晴天条件下推迟约1.5h,最大液流密度出现在15:00,为32.77 gH₂O/m²·s;21日为晴朗天气,最大液流密度为48.80 gH₂O/m²·s,出现在14:00。在阴雨天,空气温度低、

相对湿度大,植物水分亏缺不明显,夜间23:00至次日3:00青冈栎树干液流大部分为0;而晴天时,夜间液流密度很小,但仍然有液流存在。树干液流的变化不仅与植物本身特性有关,与当日的天气因素也有相当大的关系。

2.3 青冈栎树干液流与环境因子之间的关系

在多个影响因子的情况下,任意两个变量之间都可能存在相关关系,计算得到的两个变量因子间的简单相关系数往往不能正确说明它们真正关系,偏相关系数则是在扣除或固定某两个变量以外的其他变量对它们的影响以后,这两个变量之间的相关关系,能够反映事物间的本质联系^[18]。为此,我们对不同时期的树干液流与环境因子观测数据分别进行了偏相关分析(见表1)。结果显示,每个季度树干液流与环境因子的相关性都有所不同。在1月份,PAR、W_s、RH和VPD与树干液流密度的相关性均达到了显著水平,由偏相关系数绝对值的大小可以判断环境因子对液流影响大小:PAR>VPD>RH>W_s;4月份和7月份,T_a、PAR和W_s分别与树干液流密度显著相关,4月份环境因子对树干液流影响作用大小依次为:

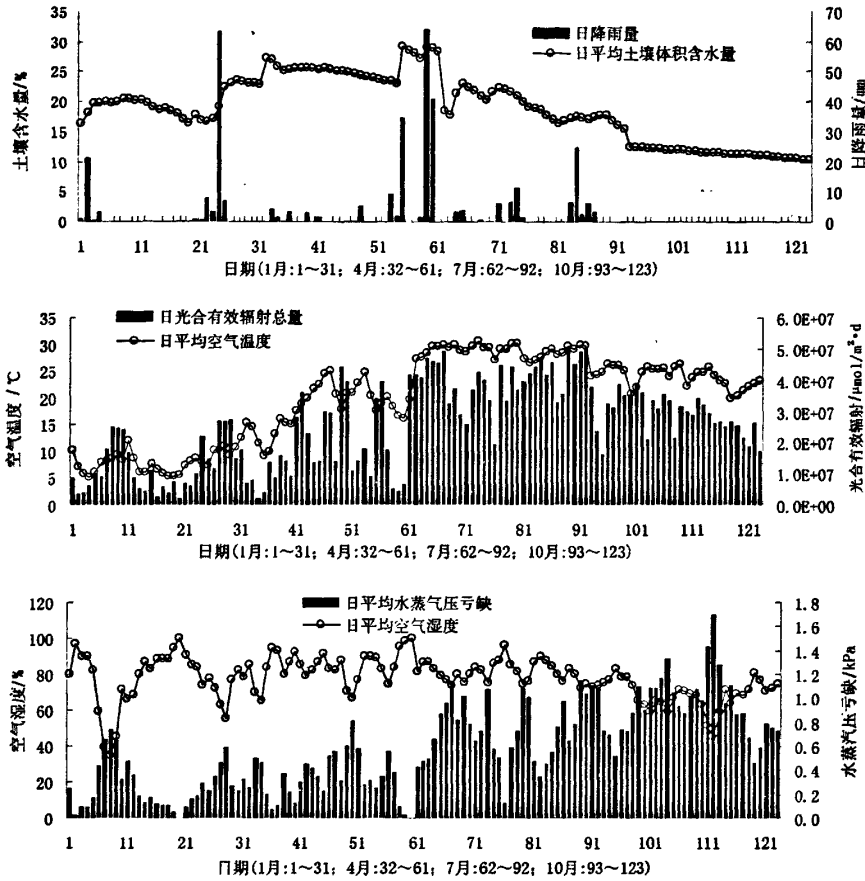


图2 不同季节环境因子变化特征

Fig. 2 Variation of environmental factors in different seasons

$PAR > T_a > W_i$; 7月份为: $W_i > PAR > T_a$; 在10月份, PAR 、 RH 和 VPD 与树干液流密度显著相关,作用大小顺序为 $PAR > RH > VPD$ 。

光合有效辐射与树干液流在每个季节都具有极显著的相关性,说明光合有效辐射是影响青冈栎树干液流变化的最直接因子。树干液流每天的启动时间和达到峰值的时间均滞后于光合有效辐射,这是由于植物的树干液流由冠层的蒸腾作用带动,而冠层的蒸腾作用滞后于光合有效辐射。青冈栎树干液流滞后光合有效辐射启动时间和峰值时间为:1月份滞后0.5~2h、0.5~1.5h;4月份滞后0.5~1.5h、0.5~1h;7月份滞后0~1h、0~0.5h;10月份滞后0~1h、0~0.5h。

水汽压亏缺是植物细胞间隙与外界大气之间的水汽分压差,水汽压亏缺越大,蒸腾作用越强烈,液流密度越大,对树干液流的变化也有直接的影响^[19,20]。

青冈栎树干液流峰值比空气水汽压峰值时间提前1~3h,这是由于在岩溶地区土壤水分较为缺乏,随着温度的升高、湿度下降,水汽压亏缺逐渐增大,植物蒸腾作用不断增强,强烈的蒸腾作用进行一段时间后,植物根系土壤水分供应不足,导致气孔部分关闭,使树干液流密度下降,而水汽压亏缺不受土壤水分影响,在空气温度和湿度的作用下继续增大一段时间后才下降。在1月与4月,水汽压亏缺比树干液流滞后约1h;而在7月与10月,滞后时间约2h;这主要由于2007年上半年各月份土壤含水量相对较高,水汽压亏缺滞后青冈栎树干液流密度时间较短,而7月份之后土壤水分相对较低(7月与10月土壤体积含水量平均值分别为18.1%和10.7%),树干冠层强烈的蒸腾作用使土壤水分供应不足,树干液流在水汽压亏缺没有达到最高值时已开始下降。

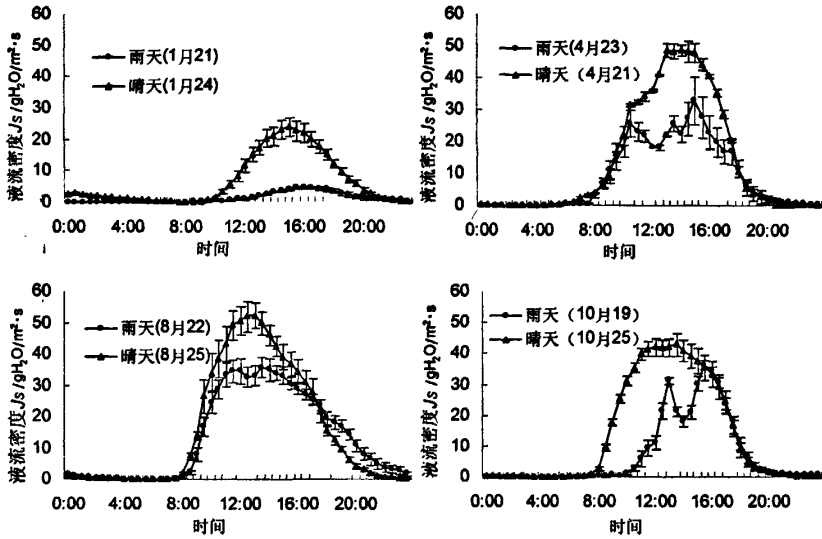


图3 不同天气条件下树干液流变化曲线

Fig. 3 Diurnal changes of sap flow under different weather conditions

表1 树干液流与环境因子偏相关关系

Tab. 1 Partial correlation between sap flow and environmental factors

环境因子	1月		4月		7月		10月	
	偏相关系数	sig. P 值	偏相关系数	sig. P 值	偏相关系数	sig. P 值	偏相关系数	sig. P 值
T_a	-0.091	0.469	0.675	0.000	0.380	0.002	0.230	0.063
PAR	0.749	0.000	0.801	0.000	0.400	0.001	0.902	0.000
W_s	0.328	0.007	0.569	0.067	0.746	0.000	-0.012	0.921
RH	0.556	0.000	-0.065	0.000	-0.052	0.677	0.633	0.000
VPD	0.635	0.000	-0.038	0.000	-0.182	0.143	0.626	0.000

2.4 青冈栎树干液流与环境因子的回归分析

建立环境因子与树干液流之间的相关关系,不仅可以揭示环境对青冈栎水分平衡状况的影响,而且还可以根据气象因素估测树木的液流密度的变化。采用逐步剔除法进行多元回归分析,将 J_s 作为因变量, T_a 、RH、 W_s 、PAR、VPD作为自变量进行分析,建立树干液流与环境因子的回归方程。不同时期的液流密度与环境因子回归方程分别为:

$$\begin{aligned} 1 \text{ 月份: } \hat{J}_s &= 35.557 + 4.074PAR + \\ & 0.110W_s + 0.154RH + 17.088VPD \\ (F &= 261.25, p = 0.000, R^2 = 0.948); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 4 \text{ 月份: } \hat{J}_s &= -99.432 + 1.654T_a + \\ & 8.751PAR + 0.888W_s \\ (F &= 164.767, p = 0.000, R^2 = 0.902); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 7 \text{ 月份: } \hat{J}_s &= 2199.787 + 0.571T_a + \\ & 2.374PAR + 5.148W_s, \end{aligned}$$

$$(F = 189.618, p = 0.000, R^2 = 0.914);$$

$$\begin{aligned} 10 \text{ 月份: } \hat{J}_s &= -26.234 + 10.266PAR + \\ & 0.258RH + 11.029VPD \end{aligned}$$

$$(F = 757.543, p = 0.000, R^2 = 0.971);$$

回归方程和回归系数均达到了极显著水平(见表2),说明利用环境因子可以较好地预测树干液流变化。4个季节中树干液流对各环境因子的响应程度有差异,环境因子对液流作用大小与偏相关分析结果相同。青冈栎树干液流受空气温度、光合有效辐射、土壤含水量、空气相对湿度、水蒸气压亏缺等因素共同作用,但不同季节,各因子对树干液流的作用大小是不同的。从入选回归方程的环境因子可以看出,每个季节光合有效辐射都对青冈栎液流密度有较大影响;空气温度、土壤含水量则在青冈栎的主要生长季节4~7月对液流密度有较大影响;空气相对湿度与空气水蒸气压亏缺仅在1月与10月对液流密度的影响比较明显。

表 2 树干液流与环境因子回归分析

Tab. 2 Regression analyses on sap flow and environmental factors

环境因子	1 月			4 月			7 月			10 月		
	回归系数	t 值	sig. P 值	回归系数	t 值	sig. P 值	回归系数	t 值	sig. P 值	回归系数	t 值	sig. P 值
常数项	35.557	4.409	0	-99.432	-5.983	0	2199.787	6.105	0	-26.234	-7.874	0
T_a	—	—	—	1.654	11.257	0	0.571	2.502	0.015	—	—	—
PAR	4.074	9.483	0	8.751	13.24	0	2.374	3.216	0.002	10.266	24.484	0
W_s	0.110	2.831	0.006	0.888	5.217	0	5.148	9.490	0	—	—	—
RH	0.154	6.203	0	—	—	—	—	—	—	0.258	7.375	0
VPD	17.088	10.879	0	—	—	—	—	—	—	11.029	12.436	0

3 结论与讨论

研究表明,季节间树干液流有明显差异,在生长旺盛季节液流密度大,植物在生长缓慢季节液流密度较小^[11,14];本研究中青冈栎的秋冬季最大液流密度低于春夏季节,这除了受植物自身特性影响外,还与秋季土壤含水量少,也与冬季气温、太阳辐射小有很大关系。孙慧珍等^[9]对白桦树干液流日变化研究认为,树木白天蒸腾旺盛,树干液流量大,水分是通过根部以被动方式吸收;青冈栎夜间存在微弱流量,主要由根压引起,水分以主动方式吸收至树干,补充白天过度的水分蒸腾所造成的树干水分减少^[21],尤其是在干旱的秋季,夜间的补水对第二天的液流变化有较大影响。

丁日升等^[22]认为树干液流量与土壤水分呈有效性相关,但在土壤水分胁迫导致植物体内水分亏缺条件下,边材液流密度随土壤与大气干旱胁迫的加剧而日渐降低^[23],液流峰值减小且出现时间提前,此时通过热脉冲速率来估算蒸腾速率值不太可靠。尹光彩等^[24]对尾叶桉研究发现,土壤有效持水量和饱和水汽压差是决定树干液流通量变化的主要因素;曹文强等^[25]对辽东栎树干液流进行研究认为土壤相对含水量对雨天液流的影响最大。本研究中,当土壤水分相对充足时,青冈栎树干液流与土壤含水量有较强的相关性,而在干旱的秋季,土壤体积含水量下降至 10.7%,土壤含水量与青冈栎树干液流密度不呈显著相关性,这可能是因为实验地所在的裸露岩溶地区,虽然土层薄而不连续,但很多树种如青冈栎的根系主要分布在土壤以下的岩石裂隙中,即表层岩溶带中,当土壤水分不足的情况下,植物的水分供应可能很大程度依赖于表层岩溶带。表层岩溶带为岩溶区丰富的含水层,在桂林一带厚度达 10m^[26],即使秋季土壤十分干燥,较大的乔木如青冈栎能够从表层岩溶吸收水分,其液流密度达到 35~40gH₂O/m²·s,远远高于同

一时期在南方非岩溶区的马占相思的液流密度^[27]。

空气温度、光合有效辐射和土壤水分是决定青冈栎树干液流密度的关键因子,以此为变量建立多元回归模型能较好地预测液流密度和计算树木耗水量,但环境因子是随季节变动的,不同时期环境因子对树干液流的影响程度也有较大差异。本研究区域由于温度适宜,春季、夏季和秋季均是青冈栎的主要生长季节,春季由于雨水多,土壤湿度往往是充足的,空气温度、太阳辐射为影响植物液流的最重要因子;夏季土壤水分相对变化较大,土壤水分、太阳辐射是影响青冈栎液流的决定性因素;在秋季,土壤十分干燥,土壤湿度对液流密度影响较小,而太阳辐射和水汽压亏缺对液流的影响最大;在冬季,青冈栎生长缓慢,对水分和温度的要求相应降低,而作为树木蒸腾驱动力的水蒸汽压亏缺和空气湿度成了影响液流变化的主要因子。

参考文献

[1] 刘淑明,孙丙寅,孙长忠. 油松蒸腾速率与环境因子关系的研究[J]. 西北林学院学报,1999,14(4):27-30.

[2] 陈德祥,李意德,骆士寿,等. 海南岛尖峰岭热带山地雨林下层乔木中华厚壳桂光合生理生态特性的研究[J]. 林业科学研究,2003,16(5):540-547.

[3] Lu P, Urban I, 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.

[4] 孙慧珍,周晓峰,赵惠勋. 白桦树干液流的动态研究[J]. 生态学报,2002,22(9):1387-1391.

[5] 闫文德,田大伦,项文化. 樟树林冠层生态因子及其对蒸腾速率的影响[J]. 林业科学,2004,40(2):170-173.

[6] Barbour M M, Hunt J E, Walcroft A S, et al. Components of ecosystem evaporation in a temperate coniferous rainforest, with canopy transpiration scaled using sapwood density[J]. New phytologist, 2005, 165: 549-558.

[7] Schipka F, Heimann J, Leuschner C. Regional variation in canopy transpiration of central European beech forests[J]. Oecologia, 2005, 143: 260-270.

[8] 马玲,赵平,饶兴权,等. 乔木蒸腾作用的主要测定方法[J]. 生态

- 学杂志, 2005, 24 (1), 88—96.
- [9] 王华田, 马履一. 利用热扩式边材液流探针 (TDP) 测定树木整株蒸腾耗水量的研究[J]. 植物生态学报, 2002, 26(6): 661—667.
- [10] Granier A. Evaluation of transpiration in a douglas fir stands by means of sap flow measurements [J]. Tree Physiology, 1987, 3: 309—320.
- [11] 马履一, 王华田. 油松边材液流时空变化及其影响因子研究[J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(3): 23—27.
- [12] 孙慧珍, 孙龙, 王传宽, 等. 东北东部山区主要树种树干液流研究[J]. 林业科学, 2005, 41(3): 36—43.
- [13] 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.
- [14] 张小由, 康尔酒, 张智慧, 等. 沙枣树干液流的动态研究[J]. 中国沙漠, 2006, 26(1): 146—151.
- [15] 姚长宏, 蒋忠诚, 袁道先. 西南岩溶地区植被喀斯特效应[J]. 地球学报, 2001, 22(2): 159—164.
- [16] Campbell G S, Norman J M. An Introduction to Environmental Biophysics[M]. New York, Berlin, Heidelberg: Springer—Verlag, 1998: 36—51.
- [17] 王华, 赵平, 王权, 等. 马占相思夜间树干液流特征和水分补充现象的分析[J]. 生态学报, 2007, 26(4): 476—480.
- [18] 王海燕, 杨方廷, 刘鲁. 标准化系数与偏相关系数的比较与应用[J]. 数量经济技术经济研究, 2006, (9): 150—155.
- [19] Schfer K V R, Oren R, Tenhunen J D. The effect of tree height on crown level stomatal conductance[J]. Plant, Cell and Environment, 2000, 23: 365—375.
- [20] 谢恒星, 张振华, 杨润亚, 等. 龙爪槐树干液流相对于气象因子的滞后效应分析[J]. 林业科学, 2007, 43(5): 106—110.
- [21] 马玲, 赵平, 饶兴权, 等. 马占相思树干液流特征及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2005, 25 (9): 2145—2151.
- [22] 丁日升, 康绍忠, 龚道枝. 苹果树液流变化规律研究[J]. 灌溉排水学报, 2004, 22(2): 21—25.
- [23] 岳广阳, 张铜会, 刘新平, 等. 热技术方法测算树木茎流的发展及应用[J]. 林业科学, 2006, 42(8): 102—108.
- [24] 尹光彩, 周国逸, 王旭, 等. 应用热脉冲系统对桉树人工林树液流通量的研究[J]. 生态学报, 2003, 23(10): 1984—1990.
- [25] 曹文强, 韩海荣, 马钦彦, 等. 山西太岳山辽东栎夏季树干液流通量研究[J]. 林业科学, 2004, 40(2): 174—177.
- [26] 蒋忠诚, 袁道先. 表层岩溶带的岩溶动力学特征及其环境和资源意义[J]. 地球学报, 1999, 20(3): 302—308.
- [27] 赵平, 饶兴权, 马玲, 等. Granier 树干液流测定系统在马占相思的水分利用研究中的应用[J]. 热带亚热带植物学报, 2005, 13 (6): 457—468.

Features of *Quercus glauca* sap flow and its relationship to environmental factors in karst terrain

ZHANG Zhong-feng¹, HUANG Yu-qing¹, LI Xian-kun¹, MO Ling¹, JIAO Ji-fei^{1,2}, YOU Ye-ming^{1,2}

(1. Guangxi Institute of Botany, Guangxi Zhuangzu Autonomous Region and the Chinese Academy of Sciences, Guilin, Guangxi 541006, China; 2. Guangxi Normal University, College of Life Sciences, Guilin, Guangxi 541002, China)

Abstract: Sap flow of *Quercus glauca* was measured continuously with Granier's thermal dissipation probe (TDP) method over a whole year in Guilin karst area. Meanwhile, the meteorological data were recorded by Environmental Meteorological Station. The results showed that the sap flux density (J_s) of *Q. glauca* varied in different seasons with peak value of $36.17 \text{ gH}_2\text{O/m}^2 \cdot \text{s}$ in January, $62.01 \text{ gH}_2\text{O/m}^2 \cdot \text{s}$ in April, $63.41 \text{ gH}_2\text{O/m}^2 \cdot \text{s}$ in July and $39.03 \text{ gH}_2\text{O/m}^2 \cdot \text{s}$ in October respectively. J_s was significantly correlated to soil moisture in Jan., Apr. and Jul., to the relative humidity (RH) of air and the vapor pressure deficit (VPD) in Jan. and Oct., to air temperature in Apr. and Oct., and to photosynthetically active radiation (PAR) in all seasons. Multiple linear regression models between sap flow and environmental variables were established for four separate seasons, each met the significance at 0.01 levels with F test.

Key words: *Quercus glauca*; karst terrain; sap flux density; environmental factor