

# 陕北山杏树干茎流变化及其影响因子分析

孙存举<sup>1,2</sup>, 赵鹏祥<sup>1</sup>, 王宏哲<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 四川省林业调查规划院, 四川 成都 610500)

**摘要:** 采用热扩散式树干茎流计(TDP)于 2009 年 5—9 月对农牧交错带的常用造林树种山杏(*Prunus sibirica* L.)树干茎流的时空动态变化及其与相关环境气象因子(温度、湿度、太阳辐射等)的关系进行了观测研究。结果表明:(1) 山杏茎流速率日变化呈宽峰曲线,每日约 7:40 启动,12:00—14:00 达到峰值,约 18:30 迅速下降,没有明显的茎流停止界限,夜间有较高的茎流存在;日树干茎流量集中在 8:00—18:30,占全天树干茎流量的 60%以上。(2) 在典型的晴天、阴雨天气下,山杏树干茎流的日变化差异显著,茎流速率表现为晴天高于阴雨天气。(3) 山杏茎流的月变化呈现为先上升后下降的趋势。7 月份平均茎流速率最大,为 64.247 g/h;其次是 6 月份,其平均值为 58.139 g/h;9 月最小,其平均值为 49.156 g/h。(4) 主枝与侧枝茎流日变化趋势一致,主枝流速高于侧枝;侧枝对环境变化响应更加灵敏,波动强烈,与侧枝相比,主枝茎流变化响应迟钝且有明显滞后效应。(5) 不同坡位山杏的茎流速率差异显著,茎流速率大小顺序为:下坡>中坡>上坡。(6) 山杏茎流变化受周围环境因子的影响,影响强弱大小依次为:空气温度>饱和蒸汽压>相对湿度>太阳辐射>风速>土壤温度。

**关键词:** 热扩散; 山杏; 茎流; 变化规律; 吴旗县

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)06-0042-05

中图分类号: Q945

## Variation of Stem Sap Flow in *Prunus Sibirica* L. in North Shaanxi Province

SUN Cun-ju<sup>1,2</sup>, ZHAO Peng-xiang<sup>1</sup>, WANG Hong-zhe<sup>1</sup>

(1. College of Forestry, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Sichuan Forestry Inventory and Plan Institute, Chengdu, Sichuan 610500, China)

**Abstract:** The dynamics of sap flow rates in apricot and related environmental factors in ecotone of agriculture and animal husbandry were observed using TDP sap flow measuring meter from May to September in 2009 in Wuqi County. The results showed that:(1) A broad peak curve of diurnal sap flow change was occurred in apricot forest with the beginning of sap flow at 7:40 and the peak value at 12:00—14:00 and the quick declining at 18:30. And obvious stopping sign of the sap flow did not exist even at night. Moreover the sap flux from 8:00 to 18:30, which accounted for 60% of the sap flux of whole day, was the major part of sap flux. (2) The significant difference in the change of sap flow was detected in typical sunny and rainy day with a higher daily sap flow rate in sunny day than in rainy day. (3) The value of sap flow increased first and then decreased with time. And the highest value occurred in July with a mean value of 64.247 g/h, followed in June whose mean value was 58.139 g/h, while the lowest value of 49.156 g/h appeared in September. (4) The variation trend of sap flow in bough was similar to that in lateral branch. But compared to lateral branch, the bough had a higher sap flow velocity. The lateral branch was more sensitive to the variation of environmental factors than the bough and the response of bough to sap flow was slower than lateral branch and showed an obvious lag effect. (5) There was significant difference in the sap flow rate of apricot among different positions. The sap flow rate in the upper side is higher than that in the middle part which is higher than lower part. (6) Environmental factors influenced the sap flow variances of apricot. The order of intensity of influence was as follows: air temperature>saturation vapor pressure>relative humidity>solar

收稿日期:2011-01-09

修回日期:2011-03-24

资助项目:国家“十一五”科技支撑计划“西北农牧交错带严重侵蚀区植被恢复与造林技术研究”(2006BAD09B06; 2006BAD03A0308); 水利部“948”项目(200207)

作者简介:孙存举(1985—),男(汉族),甘肃省靖远县人,硕士研究生,研究方向为 3S 技术在资源和环境中的应用。E-mail:scj19854017@yahoo.com.cn.

通信作者:赵鹏祥(1965—),男(汉族),青海省乐都县人,副教授,硕士生导师,主要从事林业遥感方面研究。E-mail:zpx666@yahoo.com.cn.

radiation>wind speed>soil temperature.

**Keywords:** thermal diffusion; *Prunus sibirica* L.; sap flow; variations; Wuqi County

山杏(*Prunus sibirica* L.)属蔷薇科、李属,通常为落叶乔木或灌木。山杏喜光、抗寒、耐旱、耐瘠薄、耐风沙、根系发达、萌蘖能力强、容易繁殖、生长快、病虫害少,是固沙保土、涵养水源、改善生态环境的优良乡土树种,并且有较高的经济价值及药用价值<sup>[1]</sup>。现已成为干旱半干旱地区的水土保持树种和主要造林树种,在植被恢复和生态建设中发挥着重要的作用。近几年来,山杏在退耕还林、山区绿化及果树种植业结构调整中发挥了重要作用,生产规模日渐扩大,是发展贫困山区农村经济的重要手段之一。

树木在发挥巨大生态效益的同时,维持自身生长发育需要消耗大量水分<sup>[2]</sup>,植物的水分利用效率对维持高的生长速率至关重要,树木必须具备有效的机制从土壤吸收足够的水分,并经树干不受阻断地输送至树冠,才能维持叶片的膨胀状态,以保证较高的光合速率。而水资源缺乏已经成为当今全球日益突出的问题,因此,树木的水分传输规律特别是整株树木的耗水量受到国内外树木水分生理学家、生态学家、林学家和园林学家的共同关注<sup>[3]</sup>。由于树干茎流速率及茎流量制约着整株树木的蒸腾量,因而对树干茎流进行标记并测定其流动速率就可以简捷地确定树冠蒸腾耗水量<sup>[4-5]</sup>。陕北地区位于黄土高原地区,气候干旱,降水稀少,水分一直是该区植树造林的主要限制因子之一。热扩散技术是在基本保持树木自然生活状态不变的条件下,将微型热电偶传感器插入边材木质部中,根据电热转换和能量平衡原理测定树干边材茎流的运移速率,进而利用被测部位的边材横断面面积求得单木整株茎流量<sup>[6]</sup>。由于这种方法简便易行、测量精度高,所以越来越多的国内外学者投入到边材茎流的研究中<sup>[7]</sup>,研究通常选择栽植在山地或丘陵等宜林地上的树木边材茎流进行阶段性或长期观测。本研究采用热扩散式茎流计对生长在陕北吴旗县长城乡的山杏树干茎流进行长期观测,揭示该区环境下山杏树干茎流传输的变化规律,以期对西北地区退耕还林树种的选择、合理灌溉和景观的优化配置提供理论依据。

## 1 试验区概况

吴旗县位于延安市西北部,东经 107°38'57"—108°32'49",北纬 36°33'33"—37°24'27",地处毛乌素沙地南缘农牧过渡地带,属黄土高原梁峁沟壑区。区内有无定河、北洛河两大流域,白于山、子午岭两大山系。南北长 93.40 km,东西宽 79.89 km,总面

积 3 791.50 km<sup>2</sup>。该区气候干旱,年均降雨量仅为 478.3 mm,且时空分布不均;年均气温 7.8℃,无霜期 146 d,雨热同季,农作物一年一熟,平均年陆面蒸发量为 400~450 mm,属典型干旱半干旱地区。

吴旗县 1998 年开始实行“封山退耕,植树造林,舍饲养羊,林牧主导,强农富民”的开发战略,大力开展退耕还林(草)工程。除人工造林外,大部分退耕地和荒山荒坡被封禁,植被处于自然恢复状态。由于有效地综合治理,该区形成了比较完整的植被演替群落,这为黄土丘陵区树种研究提供了较为理想的条件。

## 2 研究方法

### 2.1 树干茎流测定

按照树干通直、生长良好、不偏心、不偏冠的要求分别在试验地内的上坡、中坡和下坡选择山杏植株作为研究对象,采用 Dynamax Flow 32 包裹式植物茎流计,建立 TDP 树干茎流测定系统,设置 3 个重复。

于 2009 年 5 月 27 日至 9 月 27 日共 5 个月对各样木的边材茎流进行连续同步测定。为了避免因树干不同方位茎流的差异而导致研究结果产生偏差,所以将 TDP 探针统一安装在每株树干 1.3 m 处的南向。首先在探针安装处刮去样木的粗皮,然后采用特定规格的钻头,依据仪器自带模具沿树干纵向垂直钻取直径 1.5 mm 的孔洞,插入 TDP-30 探针。将所有探针的另一端与数据采集器(Data Logger)连接,数据采集的间隔期为 10 min。

### 2.2 环境因子监测

在样地内安装自动气象站(LI-1400),同样与数据采集器连接,实现树干茎流和气象因子数据的同步自动采集,LI-1400 是一个多用途的数据采集器,它既可以作为数据采集器,也可以作为一个多通道的自动记录仪来使用。依照仪器说明书安装 LI-1400。连续测定山杏周围的太阳辐射(PAR,UM),土壤温度( $T_a$ ,℃),气温( $T_b$ ,℃),饱和蒸汽压(SVP,kPa),风速(Wind,mph)和相对湿度(RH,%);设定每 30 min 进行自动记录。

### 2.3 数据处理

应用 Dynamax 公司提供的软件,Excel 和 SPSS 13.0 等统计软件对所测数据进行分析。

## 3 结果与分析

### 3.1 边材茎流速率的日变化

5—9 月树干各日茎流速率的日变化图形非常密

集,很难直观地对其日变化及月变化动态进行具体分析,所以在中坡从 8 月中选择 1 个连续的晴天(2 d)和 1 个连续的阴雨天(2 d),所选日期的山杏树干茎流速率测定结果详见图 1。从图 1 可以看到,山杏树干茎流的日变化为典型的宽峰曲线,且有明显的昼夜规律性变化。晴天的茎流速率要明显大于阴雨天的茎流速率,并且晴天茎流启动相对较早,停止较晚,日变化幅度较大,晴、阴 2 d 的树杆茎流日平均值分别为 62.899(晴天)和 9.746 g/h(阴雨天),最大流速分别为 116.476(晴天)和 65.687 g/h(阴雨天)。晴天茎流变化大体趋势为:每日约从 7:40 启动,流速逐渐增大,约 12:00—14:00 达到峰值,茎流达到峰值后仍有较一定幅度的“波动”,形成多个小峰组成的“高峰平台”。约 18:30 开始迅速下降,直至次日茎流启动之前降至低谷。山杏树干茎流量集中在 8:00—18:30 之间,通过全天分时段计算,这段时间的树干茎流量占全天的 60% 以上。阴雨天时,茎流流速缓慢且各位点间差异较小,最小接近于 0,仪器无法测得。晴、阴雨天树木茎流密度的显著差异与环境因子影响有关。另外,2 d 峰值出现时间并不完全相同,有提前或者滞后的现象,如 8 月 11 日第一个峰值较 8 月 12 日有所提前,也有异常波动现象,如 8 月 12 日晚 21:40 左右出现一次较大幅度的茎流变化,每天下午 16:00—17:30 之间有一个茎流低谷,可能是该时段叶温达到最高值,导致气孔关闭,蒸腾下降。夜间气孔关闭,叶片蒸腾已经停止,但仍观测到微弱的茎流存在,原因可能是白天的强耗水,树木体内各部分组织的水容储水被释放出来,导致组织水容降低,因此在水容作用下,根系仍处于缓慢吸水状态,吸收的水分用于恢复根系、树干及枝叶的水容,恢复植物体内的水分平衡,回填白天所产生的空穴<sup>[8]</sup>。

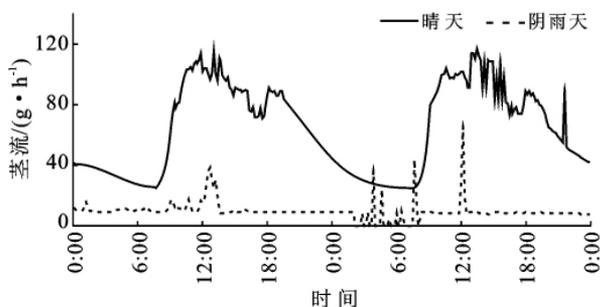


图 1 不同天气条件下山杏茎流日变化

### 3.2 边材茎流通量的月变化

将 2009 年 6—8 月连续观测到的山杏的茎流速率按月统计平均数,计算平均茎流通量。山杏的平均茎流通量 7 月最大,9 月最小,4 个月的平均流速由大

到小依次为:7 月(64.247 g/h) > 6 月(58.139 g/h) > 8 月(54.198 g/h) > 9 月(49.156 g/h)。

从每个月选择连续的两天的测定几个表达曲线特征进行分析(表 1),由表 1 可以看出,由于不同月份的气象、土壤及山杏自身生理状况不同,使得茎流的启动时间、结束时间、最大值及其出现时间等出现差异。从启动时间来看,7 月启动较早,约为 7:10,9 月启动较晚,约为 8:00。茎流启动的这种变化规律与太阳辐射强弱变化的规律一致。从生理学的角度来看,清晨,随着太阳辐射的逐渐增强,空气温度逐渐升高,诱导山杏叶片气孔张开,光合与蒸腾逐渐增强,产生的蒸腾拉力带动茎流启动<sup>[9]</sup>,7 月日出早较,所以茎流启动早。

表 1 2009 年不同月份茎流各指标测定值

观测日期	启动时间	峰值时间	峰值/(g·h <sup>-1</sup> )	平均速度	迅速下降时间
0607	7:40	13:10	453.684	93.093	17:00
0608	7:20	13:20	249.677	59.186	17:30
0716	7:00	12:40	651.884	97.726	18:50
0717	7:20	12:50	711.807	64.767	18:30
0811	7:40	13:00	115.230	62.599	18:30
0812	7:40	13:30	116.476	60.468	18:20
0915	8:00	13:40	123.940	38.560	17:00
0916	7:50	13:30	134.250	38.674	16:50

从达到峰值的时间来看,7 月较早,出现在 12:40,9 月较晚,出现在 13:40,7 月早于 9 月 1 h,与茎流启动变化规律一致;从峰值和日平均茎流速率来看,7 月最大,峰值平均为 681.846 g/h,日平均茎流速率为 81.247 g/h,9 月最小,连续 2 个观测日的峰值平均为 129.095 g/h,日平均茎流速率为 38.617 g/h;从茎流开始迅速下降的时间来看,7 月较晚,约为 18:30,9 月较早,为 17:00。

综上所述,6 和 7 月夏季茎流的启动时间和达到峰值的时间均早于 8 和 9 月,而迅速下降的时间又晚于 8 和 9 月,即维持茎流高峰的时间较长,这主要是由于 6 和 7 月的太阳辐射较其它 2 个月强,9 月已经进入秋季,太阳辐射减弱,日照时间变短,茎流持续时间短,流速减小。

### 3.3 不同坡位树干茎流速率变化

图 2 为同一时期对上坡、中坡、下坡山杏茎流速度的测定结果。由图 3 可知,在同一时期山杏树干茎流速率在不同坡位的变化趋势基本一致,均表现宽多峰曲线。不同坡位的树干茎流速率的大小存在明显差异,下坡的平均茎流速率最大,为 63.171 g/h,上坡最小,为 36.813 g/h。主要是因为下坡土壤、水分

等环境条件较为适宜,植株的生长良好,蒸腾作用强,致使茎流速率较大。

化幅度是比较小的,因此不能说明是土壤水分引起的,其气象因子是主导因素。

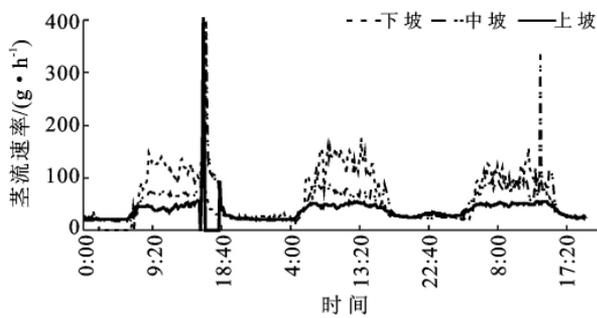


图 2 不同坡位山杏茎流速率变化

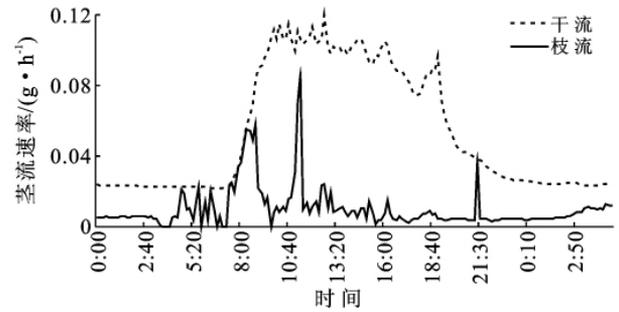


图 3 山杏干、枝茎流对比

### 3.4 山杏树干与枝条茎流比较

图 3 为 7 月 30—31 日山杏枝和其主干 30 h 茎流流速变化情况。由图 3 可知,山杏主干与侧枝茎流有相似变化趋势,夜间比较平缓,白天波动较大,昼夜差异显著;主干茎流流速高于侧枝;主干流速变化较侧枝平缓,波动较小,相对于枝的茎流变化,主干的茎流变化响应迟钝,侧枝在 21:30 左右出现了一个高峰值,而主干依然保持低流速;主干对枝茎流变化响应滞后,侧枝茎流于 4:30 开始启动,而主干将近 7:30 才开始,主干约在 12:40 迎来白天的最高峰值,而侧枝约在 11:00 就达到了峰值。通过对主干和枝茎流变化的比较分析可知,枝对环境变化响应更加灵敏,可能更适合进行茎流变化与环境因子关系的分析研究<sup>[10]</sup>。

环境因子在不同地区,对于不同植物种的茎流速率影响不尽相同,将试验区的环境因子(空气温湿度,土壤温度,光辐射量,风速等)与山杏茎流流速进行进行相关分析(表 2)。结果表明,山杏树干茎流速率与环境因子气温和饱和蒸汽压呈极显著正相关关系, $r$  值分别为 0.934 5 和 0.893 8;与太阳辐射呈显著正相关, $r$  值为 0.711 7,与相对湿度呈极显著负相关关系, $r$  值为 -0.853 0。在相关分析基础上,利用 SPSS 16.0,采用逐步回归方法,以 5%的可靠性作为因变量的入选和剔除临界值,确定了山杏茎干茎流与太阳总辐射、土壤含水量、相对湿度和温度的关系模型:

### 3.5 山杏茎流速率与影响因子的统计分析

茎流速率的变化除了受树木的生物学结构、土壤供水水平影响外,还受到周围气象因子的制约。生物学结构决定茎流的潜在能力,土壤供水决定茎流总体水平,而气象因素决定茎流的瞬间变动<sup>[11]</sup>。树干茎流速率存在明显的昼夜变化规律,但土壤水分昼夜变

$$Y = 240.386971 - 0.0155266X_1 - 3.632139X_2 - 6.414796X_3 - 3.36365X_4 + 86.210744X_5 + 5.94358X_6$$

式中:  $Y$ ——茎干茎流 (g/h);  $X_1$ ——太阳辐射 (UM);  $X_2$ ——土壤温度 (°C);  $X_3$ ——大气温度 (°C);  $X_4$ ——相对湿度 (%);  $X_5$ ——饱和蒸汽压 (kPa);  $X_6$ ——风速(m/h)。

方程的相关系数 ( $R$ ) = 0.88, 决定系数 ( $R^2$ ) = 0.77,  $F = 98.026$ , 显著性 ( $\text{sig}$ ) =  $2.84E-42$ , 说明方程达到了极显著水平。

表 2 山杏茎流速率及其影响因子方差分析

项目	茎流	全辐射	土温	气温	相对湿度	饱和蒸汽压	风速
茎流	1						
太阳辐射	0.711 7*	1					
土温	0.604 2	0.604 5	1				
气温	0.934 5**	0.791 5	0.855 6	1			
相对湿度	-0.853 0**	-0.720 5	-0.875 8	-0.945 0	1		
饱和蒸汽压	0.893 8**	0.829 2	0.867 5	0.991 2	-0.925 3	1	
风速	-0.723 6	-0.780 2	-0.881 5	-0.94 7	0.987 1	-0.943 3	1

注: \* 表示  $r_{0.05} = 0.707 6$  关系显著, \*\* 表示  $r_{0.01} = 0.834 3$  关系显著。

## 4 讨论

植物的蒸腾耗水是一个复杂的过程,既由自身生理生长特性决定,同时也与气温、空气相对湿度、太阳

有效辐射、土壤温湿度等密切相关。因此要准确地建立树体蒸腾耗水量的估算模型有赖于对树体茎流动态及其影响因子的全面了解<sup>[12-14]</sup>。

目前,研究多集中于对短时期内树体的瞬时蒸腾

及其影响因素的研究<sup>[15]</sup>,何斌,李卫红等<sup>[10]</sup>应用 TDP 技术对胡杨树干茎流的研究表明,胡杨树干茎流速率与太阳总辐射、大气水势、空气相对湿度、绝对温度呈明显的线性相关关系,并可通过影响因子估算树干茎流。马长明,袁玉欣和翟明普<sup>[16]</sup>对核桃树干茎流的研究表明,在生长季不同阶段,核桃树干液流是由空气相对湿度、空气温度和辐射共同作用的结果,但这 3 个因子在不同生长阶段的作用是不同的。在花期、果实成熟期,液流速率与辐射强度和空气温度的相关性较好,但与相对湿度的相关性则较差,而在果实生长期,液流速率与相对湿度的偏相关系数最高,其次是太阳辐射,而与空气温度的相关性则较差。可见,由于植物自身生理调控机制的差异致使各环境因子对树体茎流的影响程度因植物种类的不同而有所差异;同种植物在不同生长阶段的茎流对各环境因子的响应程度也有所差异;通过对影响因子进行逐步回归可以较好地模拟出植物的茎流变化。

## 5 结论

(1) 山杏树干茎流日变化呈宽峰曲线,受环境因子影响有明显波动,在夜间仍能维持较高的茎流速率;晴天时茎干茎流约在 7:40 启动,峰值出现在 12:00—14:00 期间,18:00—18:30 茎流速率迅速下降,最小值出现在 0:00—3:00 期间;阴雨天茎流速率显著低于晴天,且变化规律不明显;在 8:00—18:30 期间保持高的茎流速率,这一阶段的茎流量占全天茎流总量的 60%~70%。

(2) 在山杏生长季节的 6—9 月平均茎流速率由大到小依次为:7 月(64.247 g/h)>6 月(58.139 g/h)>8 月(54.198 g/h)>9 月(49.156 g/h)。

(3) 山杏树干茎流和枝茎流差异明显,主干茎流流速高于侧枝;主干流速变化较侧枝平缓,波动较小,相对枝的茎流变化响应迟缓。

(4) 不同坡位的山杏茎流速率差异显著。由大到小依次为:下坡>中坡>上坡。

(5) 影响山杏树干茎流变化的主要环境因子按相关性高低依次为:空气温度>饱和蒸汽压>太阳辐射>土壤温度>风速>空气相对湿度。

## [参 考 文 献]

- [1] 李亚峰. 对山杏等三个乡土灌木树种种源及单株的选择研究[D]. 内蒙古呼和浩特:内蒙古农业大学,2008:1-11.
- [2] 王华田. 林木耗水性研究述评[J]. 世界林业研究,2003,16(2):23-27.
- [3] 苏建平,康博文. 我国树木蒸腾耗水研究进展[J]. 水土保持研究,2004,11(2):177-186.
- [4] 李海涛,陈灵芝. 应用热脉冲技术对棘皮桦和五角枫树干液流的研究[J]. 北京林业大学学报,2008,20(1):1-6.
- [5] 高岩,张汝民,刘静. 应用热脉冲技术对小美旱杨树干液流的研究[J]. 西北植物学报,2001,21(4):644-649.
- [6] 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.
- [7] 王瑞辉,马履一,奚如春,等. 元宝枫生长旺季树干液流动态及影响因素[J]. 生态学杂志,2006,25(3):231-237.
- [8] 夏桂敏,康绍忠,李王成,等. 甘肃石羊河流域干旱荒漠区柠条树干液流的日季变化[J]. 生态学报,2006,26(4):1186-1193.
- [9] 武维华. 植物生理学[M]. 北京:科学出版社,2003:42-46.
- [10] 何斌,李卫红,陈永金,等. 干旱胁迫下胡杨茎流日变化分析[J]. 西北植物学报,2007,27(2):0315-0320.
- [11] 张宁南,徐大平,Jim Morris. 雷州半岛尾叶桉人工林树液茎流特征的研究[J]. 林业科学研究,2003,16(6):661-667.
- [12] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements[J]. Tree Physiology,1987,3(4):309-320.
- [13] Kostner B, Granier A, Cermak J. Sap flow measurements in foreststands: Methods and uncertainties[J]. Ann. Forest Sci.,1998,55:13-27.
- [14] James S A, Clearwater M J, Meinzer F C. Heat dissipation sensors of variable length for the measurement of sap flow in Izees with deep sapwood[J]. Tree Physiology,2002,22:277-283.
- [15] 刘健,赖娜娜,赵炳祥,等. 银杏树体茎流变化及其对环境因子的响应[J]. 中国农学通报,2007,23(6):232-237.
- [16] 马长明,袁玉欣,翟明普. 基于物候期的核桃树干液流特征[J]. 东北林业大学学报,2008,36(1):4-9.