

茎流计发展及应用综述

龙秋波, 贾绍凤

(中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要:回顾了茎流计及其应用发展历程。茎流计测定植物液流速率的工作原理主要有4种:热脉冲法、热平衡法、热扩散法和激光热脉冲法。通过SCI数据库和中国知网数据库查阅统计茎流计在国内外应用情况,介绍几种方法的应用成果。通过对现有研究成果和应用前景分析认为,热平衡法与热扩散方法将成为未来几年研究树木液流的重要测算方法,而鉴于激光热脉冲法的优越性,估计未来会有很广阔的应用前景。

关键词:蒸腾; 热脉冲速率法; 茎干热平衡法; 热扩散法; 激光热脉冲法

中图分类号: S161.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2012)04-0018-06

Review on the development and application of sap flow gauge

LONG Qiubo, JIA Shaofeng

(Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: The paper reviewed the development and application of sap flow gauge. There are four different principles of sap flow gauge to measure sap flow rate of plants which are heat pulse velocity method, stem heat balance method, thermal dissipation method and laser heat pulse method. By information searching in SCI database and national knowledge infrastructure database of China, the paper made a summary about the application of sap flow gauge. Based on the analysis for research results and application progress, the stem heat balance and the thermal dissipation method will become the important measuring methods in the near future. While in view of the superiority of laser heat pulse method, it will have a good prospect in the future.

Key words: transpiration; heat pulse velocity; stem heat balance; thermal dissipation; laser heat pulse

0 引言

树木蒸腾量的测定是量化树木耗水和需水的基础。近年来,利用茎流计测量植物蒸腾量的方法应用越来越广泛。茎流计,英文名称 Sap Flow Gauge,又叫树液仪,是通过加热植物茎干来测量茎流速率进而计算植物蒸腾量的一种仪器。学者们提出不同类型茎流计测定液流速率的方法和原理,主要有热脉冲速率法(HPV)、茎干热平衡法(SHB)、热扩散法(TDP)及激光热脉冲法(LHPG)。本文对茎流计的各种原理、主要仪器品牌、应用情况进行综述和总结。

1 茎流计发展历程简介

德国植物生理学家 Huber 于 1932 年提出热脉冲法,最先利用热脉冲作为植株液流的示踪物,并率先运用于实际研究。Huber 使用一根电阻线作为热脉冲源,通过安装在电阻线下方的单个热电偶感知

热脉冲到达的时间,此即茎流计的雏形。但此法却很难清楚解释热电偶的温度升降变化。Huber 等后来又采用了在热源上下不等距设置热电偶探头的方法,将热脉冲在液流传导系统中的运动和外界环境中的热干扰有效地区分开。然而,Huber 测得的热脉冲传导速率却显著低于实际液流速率^[1]。Marshall 改进了 Huber 的设计,将加热元件和测温结点插入植物的木质部。他假定热脉冲在移动时,液流跟木质部之间不存在阻碍,热量可以在树液和边材之间自由交换。但依据 Marshall 的理论计算出的液流速率亦低于实际速率,需进行修正。Swanson 发现以往测算中热脉冲速率和实际液流量存在偏差的真正原因“因伤效应”,从而否定了 Marshall 关于茎内木质部同质性的假设。他认为在安装热敏探头时,探头周围损伤部位会产生愈伤组织,使得探头周围区域的热传导性能降低,导致热脉冲速率低于真实液流速率。如果计算中对这种损伤作用加以修

收稿日期:2012-02-11

基金项目:国家自然科学基金项目(90302009);水利部公益性行业科研专项经费项目(201101047)

作者简介:龙秋波(1986-),男,湖南保靖人,博士研究生,研究方向为水资源与水资源管理。

通讯作者:贾绍凤(1964-),男,湖南龙山人,博士,研究员,博士生导师,主要研究水资源管理。

正,将大大提高热脉冲技术的可应用性。Swanson 于 1981 年通过数值计算模型模拟热对流及传导现象给出了修正参数表。Swanson 的研究是热脉冲技术发展中的一个里程碑。Edwards 等为了求得更准确的单位时间内通过树干断面内的流量,研究了形成层以下不同深度处的液流变化,得出了液流速率随深度变化的关系。至此,热脉冲液流检测方法理论系统构建完成^[1]。

20 世纪 70 年代,捷克布尔诺农业大学的 Cermak J, Deml M 等在利用热脉冲技术测定植株液流速率的研究基础上取得了新进展,提出了茎干热平衡方法。Sakuratani 和 Baker 等通过田间试验证实其可行性。该方法用独特包裹式探头,在测量直径较小的植物时,具有明显优越性。但该方法的测量系统对茎流瞬时变化的响应不是同步的,测量精度尚待提高。

Granier 等又在热脉冲速率法的基础上作出改进,将利用脉冲滞后效应为原理的热脉冲液流检测仪改进为利用双热电偶检测热耗散为原理的热扩散液流探针测量装置^[2]。与热脉冲方法相比较,热扩散探针的一个突出特点是能够连续放热,实现连续或任意时间间隔液流速率的测定。热扩散法具有更高准确度,正越来越广泛地应用于树干液流的研究。

针对热脉冲和热扩散方法插针损伤植物茎秆且干扰液流的缺点,William 等提出了液流激光测量系统,利用二极管激光器取代加热金属丝,用红外温度计来取代热敏电阻,这样的改进避免植物茎干内部组织受到破坏,也能消除因仪器位置变动所造成的误差,可惜因该系统造价高昂,目前应用并不广泛^[3]。

2 不同茎流计工作原理

2.1 热脉冲速率法(HPV, heat pulse velocity)测液流装置

热脉冲速率法测液流装置:热脉冲感应部分主要由一个热源和两个传感器探针组成,此外还有数据采集器、数据分析软件等组件,装置属于插针式。该方法最早由德国植物生理学家 Huber 于 1932 年提出,是基于热源发出热脉冲,然后测定热源上下游树液温度的升高来推算蒸腾耗水量。在树木茎干的茎向同一直线上,先将热源探针插入,然后分别在其上、下部位 1.0 cm 和 0.5 cm 处插入两传感器探针,打开热源发出小段热脉冲,因为离热源距离不同,上面传感器测得的温度应该小于下面传感器温度,但液流能携带一部分热量给上面的传感器,在一定时间内(t_z)两

个温度会相等。用 t_z 可以计算热脉冲速率^[4]。

根据 Marshall 于 1958 年得出的公式可求液流速率:

$$V = \frac{x_d + x_u}{2t_z} \quad (1)$$

式中: V 是液流速率; t_z 是指从热脉冲注入开始到上下两根探针温度一样时所用的时间; x_d 是上面探针与热源之间的距离; x_u 是下面探针与热源之间的距离。

因为探针对茎干内部组织的损害,须对(1)式所得热脉冲速率 V 进行修正。根据 Swanson 和 Whitfield 的研究,修正速率 V_c 可由下式得到:

$$V_c = a + bV + cV^2 + dV^3 \quad (2)$$

式中: a, b, c, d 是修正系数,取决于探针的尺寸和材料。

则液流通量密度 J 可以由下面的式子计算:

$$J = (0.505F_M + F_L)V_c \quad (3)$$

式中: F_M 和 F_L 分别是指测量部分边材和液流的体积分。系数 0.505 与木质部热性质有关,并假定在不同树木之间为一个常数^[5]。

最后,可以通过对液流速度场 $J(r)$ 积分求得液流通量 Q :

$$Q = 2\pi \int_H^R r \cdot J(r) dr \quad (4)$$

式中: R 是植物茎干半径; H 是植物心材的半径; r 是计算点至中心的距离。

2.2 茎干热平衡法(SHB, stem heat balance)测液流装置

茎干热平衡法(SHB)测液流装置由 Sakuratani 提出,经 Baker 和 Van Bavel 等改进。该测量系统提供稳定热源,因达到稳定状态需一定时间,在液流变化与茎流计反应之间有时间滞后。该方法测量探头设计成包裹式,在结构上有许多独特之处:探头外层是泡沫绝热材料,起密封和绝热作用;内层则由特殊设计的恒定供热装置——加热器及其他组件组成。由三组温度测量探头所构成的茎流测量装置,可以确定茎干中液流运动所产生的热传输和散发至周围环境中的辐射热通量^[6]。SHB 法通常用于测定直径较小的植物或器官,如小枝、苗木和作物等。安装时要保证探测器与茎表面接触良好。与热脉冲法相比,SHB 法两个最大的特点是其无须标定,也无须将温度探头插入茎杆中,可以直接得到测量结果。

根据热平衡与热传导原理,可以用下面的几个公式来计算植物茎干液流速率:

$$Q = q_f + q_u + q_d + q_r \quad (5)$$

式中: q_f 是指随植株液流传递的能量; q_u 和 q_d 分别指沿着茎干向上、向下热交换的能量; q_r 是指径向

的热损失量。

随植株液流传递的能量 q_f 可由下式计算:

$$q_f = cF(T_u - T_d) \quad (6)$$

式中: c 是水的比热; F 是茎干中液流速率; T_u 和 T_d 分别指上下两个温度监测点液流温度。 q_u 和 q_d 可以用下面的式子计算:

$$q_u = \lambda A(T_u - T'_u)/\Delta x \quad (7)$$

$$q_d = \lambda A(T_d - T'_d)/\Delta x \quad (8)$$

式中: λ 为茎干热传导特性; A 为茎干横截面积; T'_u 和 T'_d 分别指位于测量 T_u 和 T_d 两个监测点上方、下方 Δx 处的温度。

以辐射形式向四周散发的能量 q_r 用下式表示:

$$q_r = kE \quad (9)$$

式中: k 为护套的导热系数; E 为热源电压。

联立公式(3) ~ (7), 可求得液流速率 F :

$$F = \frac{Q - \lambda A[(T_u - T'_u) + (T_d - T'_d)]/\Delta x - kE}{c(T_u - T_d)} \quad (10)$$

其中导热系数 k 可在 $F = 0$ 的情况下求得。

2.3 热扩散法(TDP, thermal dissipation probe method)测液流装置

1986 年 Granier 等提出用热扩散法测定树木茎干液流速率, 测量装置包括两根圆柱形探针(直径 2 mm, 一根含有热源和热电偶, 一根只有热电偶), 属于插针式茎流计。该仪器测量原理是: 将一对内置有热电偶的探针(上面的探针内置有线形加热器和热电偶, 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), 建立温差与液流速率的关系, 进而确定液流速率的大小^[7]。

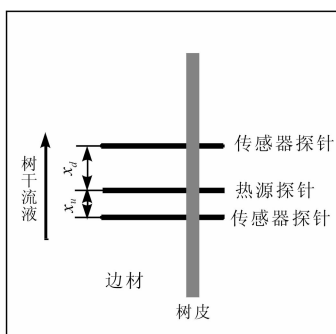


图1 热脉冲速率法(HPV)茎流计装置图

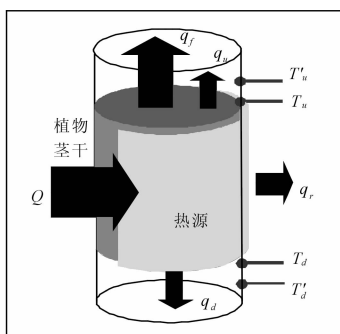


图2 SHB 茎流计热平衡原理图

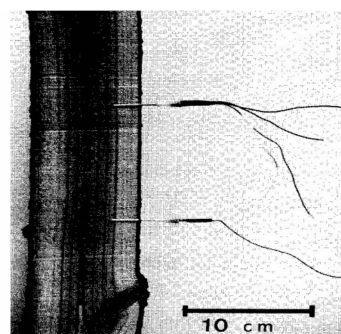


图3 热扩散插针式茎流计剖面图

根据 Granier(1985) 提出的计算方法:

$$u = 119 \times 10^{-6} K^{1.231} \quad (11)$$

式中: u 为树干平均茎流量; K 为系数。

$$K = (T_M - T)/(T - T_\infty) \quad (12)$$

式中: T_M 为液流速度为零时热源探针温度; T 为液流速度不为零时热源探针温度; T_∞ 为对比探针的温度。 K 也可以用下式来表达:

$$K = (\Delta T_M - \Delta T)/\Delta T \quad (13)$$

式中: ΔT_M 和 ΔT 分别是指液流速率为零和不为零时探针之间温度差。在实际测量温度差 ΔT_M 时, 必须分开测量两根探针的温度, 其值通过对十天 ΔT 的最大值建立线性回归关系估计而得。

树干总的茎流量由下式计算可得:

$$F = uS_A \quad (14)$$

式中: S_A 为热源探针高度处的边材横截面积; F 为指总的茎流量。利用以上 3 个计算公式可以求得树干茎流量^[8]。

2.4 激光热脉冲法(LHPG, laser heat pulse gauge)测液流装置

2000 年 7 月, 针对测量过程中用热电阻插入茎干内部加热造成的误差, 来自美国 Clemson 大学的 William L. 等人提出了一套新的测量植株茎流装置。与以前的测量系统相比, William 等人用一个二极管激光器代替了热电阻来提供热源, 并用非接触红外温度计代替之前所使用的温度计。激光热脉冲法茎流计结构见图 4。此套装置测量原理跟利用热脉冲速率法来计算液流速率是一样的, 但是因为不需要将热源插入植物茎干内, 避免了对茎干内组织破坏造成的误差^[9]。LHPG 法能克服之前的三个缺点, 得到的数据更加准确。

3 主要仪器

目前市场上茎流计产品主要分两种: 插针式(热脉冲速率茎流计、热扩散速率茎流计)和包裹式(热平衡茎流计)。表 1 给出了目前市场上最常用

茎流计的类型、特征及优点。

4 茎流计应用情况

自 1932 年德国植物生理学家 Huber 提出用热脉冲速率法测量植物茎流以来,茎流计工作原理和结构一直在不断地发展和改进。20 世纪 80 年代,茎流计产品被推向市场,大量学者和技术人员进行实验研究,利用茎流计测定植物茎干液流速率并计算蒸腾量,对研究区域植物耗水及生态水量平衡,合理有效节约利用水资源有很重要的意义。

通过检索文献数据库,作者对不同国家和地区实验研究中茎流计的应用情况作了总结。外文文献通过查阅 SCI 外文文摘数据库,以 Sap Flow 为主题词检索数据库中所有年份(1899 – 2011)文献,检索结果显示有 2937 篇相关文章。其中期刊文献占 75.2%,会议论文占 14.5%,近十年以来的文献占总数 60% 以上。同时作者对文中所述四种茎流计应用案例进行了统计。在以 Sap Flow 为主题词的检索结果的基础上加以限定词进行精炼检索。以

Stem Heat Balance 为限定词进行二次检索,结果显示有 153 篇文献,其中有 14 篇跟热平衡茎流计应用不相关的文献,国内学者发表的文献 10 篇,即关于热平衡茎流计在国外应用案例约有 129 起;以 Heat Pulse 为限定词进行二次检索,结果有 289 篇文献,其中不相关文献有 24 篇,国内学者发表的文献 7

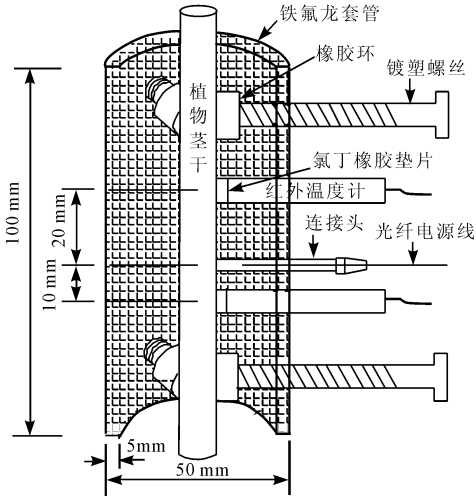


图 4 激光热脉冲法茎流计装置剖面图

表 1 目前市场上最常用的茎流计产品

茎流计型号	厂家	特 征	优缺点
FLGS – TDP 茎流计	美国 Dynamax 公司	插针式:FLGS – TDP 采用热扩散技术,特别适用于茎干较粗树木。利用 Granier 热扩散传感器原理,把 2 根热电偶探针直接插入边材,上面探针包含 1 个电加热器,下面探针作为参照,测量加热探针和参照探针之间的温差 dT。根据 dT 和零茎流时的 dTm,应用 Granier 模型,可以直接得到每个时刻的茎流速率,再根据边材面积积求出茎流通量。	恒温加热,采用热扩散方法;双探针,Granier 专利设计,探针易插拔,重复使用。
RR8210 自动测定系统	中国林科院林业研究所和中国农业大学共同改进产品	插针式:热扩散液流传感器采用 GRANIER 设计原理,设计有两根探针,上面的探针带有加热器,采用恒定电压加热,根据热扩散原理,通过测量上下两根探针的温差,即可将温差通过公式换算成植物茎杆体积液流量,并可通过 EXCEL 绘制液流随时间变化曲线。	主要用于测量较大树木的液流特征,采用恒定热量的热扩散方法,可以实时连续测量体积液流量。
SF – L 植物茎流计	德国 Ecomatik 公司	插针式:采用热耗散传感器原理,包括 4 个探针。第一和第二个探针插入植物茎杆上下不同部位,上部探针用恒定电流加热,两个探针之间形成温差。水流上升时,带走热量,两个探针之间温差变小。温差和茎流之间具有函数关系,通过测量温差算出茎流。第三、四个探针测量、纵向温度梯度,用以修改前两个探针因非茎流带来的温差。	在 Granier 专利设计基础上改进的测量植物茎流探针式仪器,可以直接测量得到茎流零点,消除茎秆纵向温度梯度,使精度大大提高
Flow 32 茎流计	美国 Dynamax 公司	包裹式:利用能量平衡原理,测量树液流动时产生热量变化,从而确定植物茎流和植物水分消耗(蒸腾)。	绝对测量,不需校准;多种规格传感器,适合不同大小植物:2 – 150mm 直径;实时测量植物茎流;直接得蒸腾读数,对植物无害。
EXO – Skin 茎流计	美国 Dynamax 公司	包裹式:基于经典的能量平衡液流测量技术,做进一步革新的产品,能测量不规则植物茎杆,根据植物生长特点测量,新增革新性特点,新的防水层,提供绝缘和防护层。	安装轻松,附件扩展性强,电子器件密封性更好。

篇,即关于热脉冲速率茎流计在国外应用案例约有 258 起;以 Thermal Dissipation 为限定词进行二次检索,有文献 112 篇,其中 9 篇为不相关文献,国内学者发表文献 3 篇,即关于热扩散茎流计在国外应用案例约有 100 起;而以 Laser-based 为限定词进行二次检索,只有 5 篇文献,其中有 1 篇不相关文献,即关于激光热脉冲茎流计在国外应用案例约有 4 起。中文文献通过查阅中国知网数据库,以茎流计为检索词,按全文检索,直接检索出文献 159 篇,查阅引证文献 14 篇。统计显示与茎流计应用不相关的文献有 51 篇,与茎流计应用相关文献有 112 篇,其中关于热脉冲速率茎流计应用 21 篇,热平衡茎流计应用 50 篇,热扩散茎流计应用 41 篇,激光热脉冲茎流计在国内尚无应用。

茎流计在世界各地皆有广泛应用,欧美学者自 20 世纪 30 年代就开始研究茎流计在测定植物蒸腾方面的应用。我国的研究人员则从上世纪九十年代后开始将茎流计运用于植物蒸腾的测定。茎流计应用对象可分为草本植物和木本植物。作者统计出茎流计在草本植物中主要应用于棉花、大豆、玉米、向日葵、甘蔗、冬小麦、茄子、荷花、罗布麻、黄芪和芦苇等;茎流计在树木方面主要应用于胡杨树、桉柳、山毛榉、冷杉、竹子、油松、梨树、刺槐、苹果树、杏树、李树、五角枫、茶树、桉树、榕树、柠檬、云杉、银桦、柠条、沙拐枣、锦鸡儿和梭梭等。

热脉冲速率茎流计在国内外研究中均有应用。Fernandez J E. 等研究了自动灌溉系统下橄榄树的蒸腾速率,结果说明在树木水分利用中,热脉冲速率法是一种有效的工具^[5]。Nicolas E. 等应用热脉冲速率茎流计研究了 11 年生杏树的蒸腾量,并与水量平衡法作比较,显示热脉冲速率法测得结果要比水量平衡法的结果低^[10]。原因可能由两方面造成,一是应用水量平衡法计算时各分项的值出现误差,二是由于白天树干中液流体积变化导致计算液流速率时出现误差。但 Nicolas E. 等认为热脉冲速率法仍不失为测定杏树蒸腾有意义的一种方法,并依此建立一个杏园自动灌溉系统。刘奉觉等首次在国内采用热脉冲茎流计对树木蒸腾耗水进行研究,经比较发现该技术测定值与快速称重法的结果接近^[11]。张小由等应用热脉冲茎流计对胡杨和桉柳树干液流进行研究,结果表明:在正常生长状态下,胡杨树干单位面积液流通量为 $0.134 \text{ L}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$,桉柳为 $0.115 \text{ L}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ 。在生长季节(5-10 月)胡杨总蒸腾量为 3419.4 L,桉柳仅为 63.9L^[12]。该研究对于确定胡杨树和桉柳的

生态耗水量,无疑具有重要的意义。

William L 等对热脉冲茎流装置做了改进,提出激光热脉冲茎流装置。William L 等人以菜豆(Kidney Bean)为研究对象,对三组不同条件下的菜豆作试验:①测量时段为 5 分钟的一组菜豆;②测量时段为 5 min,处于高光和低光照射下的一组菜豆;③单株菜豆。同时将试验结果与称重法测量结果进行了对比,两种方法计算出的液流速率之间存在着高度的相关性($R^2 = 0.99$),但是其结果需要校正^[9]。根据 William 等人实验结果知激光热脉冲法测量草本植物的蒸腾在技术上是可行的。

自 20 世纪 80 年代热平衡技术在国外被应用到植物的液流测定中后,此项技术得到长足的发展,应用广泛。Susan Steinberg 等对盆栽榕树(茎干直径 45.2 mm)的液流速率测定,测得结果与水量平衡法求得的蒸腾速率相比较,误差在 4% 以内^[6]。金红喜等应用热平衡茎流计探讨 4 种常见荒漠灌木植物(梭梭、花棒、沙拐枣和怪柳)蒸腾耗水,实验发现沙拐枣和梭梭单日液流量较大,平均值分别为 33.87、32.57 mg/h,怪柳和花棒的平均液流量较小,只有 16.53 和 12.96 mg/h。干旱沙漠地区植物有其自身独特的水分蒸腾特性,因此蒸腾量测定对沙漠区植物水分的研究有重要意义^[13]。Arthur Groot 等应用茎干热平衡法对液流速率较低的针叶林进行研究,建立了一个衡量茎流计准确度的三维数字模型。因为热传导量和两个温度监测点的差值都很小,茎流计在液流速率较低时精确度不高。当热传导量小于热源的 5% 或者温度差小于 2.5°C ,茎流计不再适用^[14]。Kentaro Takagi 等应用热平衡茎流计以荷花为例研究了水生植物的蒸腾,结果与称重法比较相差不大,效果很好^[15]。另外,许多学者在别的植物上也获得了十分相近的测定结果。

目前热扩散式茎流计的应用主要是在测定高大树木液流速率和单株耗水量等方面,揭示树木蒸腾耗水特征及水分供求关系,可以对研究区节水灌溉的发展提供水分生理依据,对水资源紧缺地区树木生产实践等具有重要的理论指导意义。自 A. Granier 等于 1986 年提出用热扩散式茎流测量树木液流速率以来,该技术日趋成熟,得到广泛应用。A. Granier 测得某晴天受抑制的、中等的和优势杨树的总蒸腾量分别为 1.6、8.0 和 22.0 L/d,这与水量平衡法测得结果很相近^[7]。Granier 发现当土壤含水量小于田间持水量的 30% 时,杨树的实际蒸腾量开始小于潜在蒸腾量。Mohamed H 等对突尼斯

南部一个庄园杏树和李树的蒸腾量进行了研究,结果表明杏树和李树日均蒸腾量分别为 1.91 mm 和 1.20mm,并建立了蒸腾量与太阳辐射之间的相关关系,这对制定庄园灌溉计划具有重要的参考价值^[16]。Mohamed 等同时指出该方法存在的问题——探针的位置或对研究树木的选择不同都会造成误差。张友焱等利用热扩散茎流计(TDP50)连续测定位于内蒙古乌审旗沙地樟子松的树干液流,探讨环境因子对树干茎流的影响,对樟子松需水规律作了了解,测定了其耗水量,满足环境水分定量研究的需要,并为沙区植被建设提供了依据^[17]。

综上所述,茎流计在测量植物蒸腾和耗水量的研究中应用越来越多,各国学者一直致力于研究茎流计发展,通过大量实验及与其他方法的对比积极探讨测量误差的原因,对茎流计在使用过程中的不足之处加以改进。虽然还有一些不足之处有待研究和改进,热脉冲速率法、茎干热平衡法和热扩散法等已经被广大用户普遍接受。国外研究更多应用热脉冲速率法,而国内则应用茎干热平衡法多些,热扩散法在国内外皆有应用,激光热脉冲法则因其系统成本较高应用较少。

5 结 语

经过半个多世纪发展,利用茎流计测量植株茎干液流的技术已日趋成熟,热脉冲速率法、茎干热平衡法、热扩散法和激光热脉冲法经一系列发展与改进,通过实验和其他植物蒸腾测量方法的结果相比,证明茎流计在测定植物蒸腾方面是有效可行的。目前国内外利用热脉冲速率和茎干热平衡茎流计测定植物茎流速率的方法应用十分广泛,是目前研究树木生理生态,测定植物水分利用比较理想的技术,并将在未来一段时间里植物蒸腾测定研究中发挥重要的作用。虽然激光热脉冲法因其系统造价高昂而应用不多,但是鉴于该方法的优越性,估计未来会有不错的应用前景。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements[J]. Tree Physiology, 1987, 3: 309-320.
- [3] William L Bauerle, Thomas H Whitlow, Clifford R Pollock, et al. A laser-diode-based system for measuring sap flow by the heat-pulse method[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2002,110:275-284.
- [4] 邓东周,范志平,王红,等. 林木蒸腾作用测定和估算方法[J]. 生态学杂志, 2008,27(6):1051-1058.
- [5] Fernandez J E, Palomo M J, Diaz-Espejo A, et al. Heat-pulse measurements of sap flow in olives for automating irrigation: tests, root flow and diagnostics of water stress[J]. Agricultural Water Management, 2001,51:99-123.
- [6] Susan Steinberg, Cornelius H M van Bavel, Marshall J McFarland, et al. A gauge to measure mass flow rate of sap in stems and trunks of woody plants[J]. Journal of the American society for Horticultural science, 1989,114(3): 466-472.
- [7] Granier A, Huc R, Barigah S T. Transpiration of natural rain forest and its dependence on climatic factors[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1996,78:19-29.
- [8] 白云岗,宋郁东,周宏飞,等. 热脉冲法对胡杨树树干液流的检测与蒸腾过程模拟[J]. 水土保持学报,2007,21(3): 188-192.
- [9] 白云岗,宋郁东,周宏飞,等. 应用热脉冲技术对胡杨树树干液流变化规律的研究[J]. 干旱区地理,2005, 28(3): 373-376.
- [10] Nicolas E, Torrecillas A, Ortuno M F, et al. Evaluation of transpiration in adult apricot from sap flow measurement[J]. Agricultural water management, 2005, 72:131-145.
- [11] 孙鹏森,马履一,王小平,等. 油松树干液流的时空变异特性研究[J]. 北京林业大学学报,2000,22(5): 1-6.
- [12] 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.
- [13] 金红喜,刘左军,王继和,等. 热平衡茎流计在荒漠灌木植物耗水研究中的应用[J]. 防护林科技,2004, 6: 9-13.
- [14] Arthur Groot, Kenneth M King. Measurement of sap flow by the heat balance method numerical analysis and application to coniferous seedlings[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1992, 59: 289-308.
- [15] Kentaro Takagi, Yoshinobu Harazono, Shin-ichi Noguchi, et al. Evaluation of the transpiration rate of lotus using the stem heat-balance method[J]. Aquatic Botany, 2006, 85:129-136.
- [16] Mohamed Habib Sellami, Mohamed Salah Sifaoui. Estimating transpiration in an intercropping system: measuring sap flow inside the oasis[J]. Agricultural Water Management, 2003,59:191-204.
- [17] 刘奉觉,郑世锴,巨关升,等. 用热脉冲速度记录仪(HPVR)测定树干液流[J]. 植物生理学通讯,1993,29(2):110-115.