



东北东部山区主要树种树干 液流特征研究

孙慧珍 著

东北林业大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

东北东部山区主要树种树干液流特征研究/孙慧珍著. —哈尔滨: 东北林业大学出版社, 2006.6

ISBN 7-81076-887-5

I. 东… II. 孙… III. 山区—树干水流—研究—东北地区
IV. S715.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 060513 号

责任编辑: 任 俐

封面设计: 彭 宇



NEFUP

东北东部山区主要树种树干液流特征研究

Dongbei Dongbu Shanqu Zhuyao Shuzhong Shugan Yeliu Tezheng Yanjiu

孙慧珍 著

东北林业大学出版社出版发行

(哈尔滨市和兴路 26 号)

黑龙江省教育厅印刷厂印装

开本 850 × 1168 1/32 印张 5.25 字数 130 千字

2006 年 6 月第 1 版 2006 年 6 月第 1 次印刷

印数 1—1 000 册

ISBN 7-81076-887-5

Q·129 定价: 16.00 元



作者简介

孙慧珍，女，1973年12月生，河北定州人，森林生态学博士、副教授。主要从事森林生态学、森林水文学研究和教学工作。曾参加国家基金委重大项目、国家自然科学基金面上项目、国家“948”引进项目和国家林业局重点项目，目前主持东北林业大学优秀青年教师创新项目和东北林业大学校立基金各1项，发表论文10余篇。



NEFUP

目 录

1 引 言	(1)
1.1 国外发展状况	(1)
1.2 国内发展情况	(21)
2 试验地概况和研究方法	(23)
2.1 试验地概况	(23)
2.2 试验材料的选择	(23)
2.3 试验测定方法	(25)
3 白桦、水曲柳、樟子松树干液流密度动态对比及 环境影响因子	(30)
3.1 白桦、水曲柳、樟子松不同生长时期树干液流 密度日动态及环境影响因子	(30)
3.2 水曲柳、樟子松和白桦树干液流季节变化及 环境影响因子	(83)
4 不同天气条件下白桦、水曲柳和樟子松树干液流 密度变化	(87)
4.1 晴阴天气组合	(87)
4.2 雨晴天气组合	(97)
5 叶斑病对白桦树干液流的影响	(108)
5.1 研究方法	(108)
5.2 结果与分析	(110)
5.3 讨 论	(116)
6 幼龄树木树干液流动态及与环境因子关系比较	(118)
6.1 幼树树干液流日动态	(119)

6.2	各树种树干液流日动态与环境因子关系	(127)
6.3	树干液流密度季节变化与环境因子关系	(131)
7	生长季各树种用水量	(136)
8	讨论	(139)
	参考文献	(143)

1 引 言

我国水资源人均占有量低于世界平均值，尤其北半部缺水或严重缺水，而且随着全球变暖，我国北半部将可能进一步趋于干热^[48]。水分是植物分布和生长的一个重要的限制因子，同时水分作为森林生态系统中能量流动和养分循环的主要载体。作为陆地上的主体——森林生态系统具有涵养水源、消洪补枯的作用，同时森林对降水进行重新分配。其中森林蒸发散（蒸腾 + 蒸发）是向大气输送水分的唯一途径，在森林水分循环中占有比重为最大的一项^[25,26,37,48]。树木蒸腾作用可以加速根从土壤中吸收的矿物质向上输导；防止因日光照射使叶子温度过高等作用。在自然界中可看到植物在蒸腾过程中所丢失的大量水分常常取决于外界条件，不同植物种对外界环境有不同的反映，因此准确测定或计算不同林型、不同树种蒸腾量的变化对于评价森林水文循环影响机理和流域水文模型开发，正确评价森林水文效应，制定合理的森林经营管理方案具有十分重要的意义。而且对植物水分关系的探讨是植物生理生态学研究的重要课题之一。研究和科学分析主要造林树种耗水与需水的规律，选择节水树种，为造林推荐节水和耐旱树种；同时对现有植被的树种选择搭配、合理布局的经营和未来植被的科学建设、调控水分关系、更加有效地发挥森林保水的生态功能有重要的指导意义，无疑也具有一定的理论价值。

1.1 国外发展状况

为了准确测定森林耗水量，不同学科的许多学者对树木在自

然生长条件下，测定树木叶子、单株到林分三个水平上的蒸腾量，做了许多尝试以求找出合适的测定方法。目前主要有以下几种测定方法。

1.1.1 测定方法

1.1.1.1 林分水平

(1) 能量平衡法——波文比法

基于能量守恒原理，进行计算林分蒸发散。时间尺度为小时到月。当森林的蒸发作用很强时，用此法测定森林蒸散的精确度比较高。但当林分极其干旱或者当波文比趋于 -1 时误差比较大。这后一种情况往往出现在日出或日落前后，这时温度梯度处于交替过程，有时也出现在夜间。应用此法必须满足一个基本的假定：即下垫面是均匀的，也就是森林面积要足够大，不出现引起热量和水气的平流。

(2) 空气动力学法

利用风速垂直梯度求得湿度乱流交换系数与动量乱流交换系数的关系，以求得水气垂直通量。在摩擦层内，输送通量与风的梯度关系是非常复杂的，这就大大限制了空气动力学方法在测定森林蒸发散的应用。当有平流时，和波文比一样，采用空气动力学方法也会有很大误差。时间尺度为小时、月。

(3) Penman - Monteith 方程

该方程将通量方程和能量方程结合起来，这一方法也称为混合法。在充分郁闭、林冠没有水湿的森林中用此方法估算其蒸散，结果令人满意。当林冠郁闭不好，冠层不均匀或者处于水湿状态时，估算的精度不高。时间尺度为日、月、年。

(4) 涡动相关法

用涡动通量仪可以测定垂直风速和湿度的瞬间脉动值，计算水汽通量。适用于集水区，时间尺度为小时、日。

以上四种方法也称为微气象法。微气象法时间分辨率高,但是估算森林冠层的蒸发很难,因为森林冠层的粗糙度和林冠上层和下层具有平流通量^[228]。并且不能用于非均匀一致的林分。

(5) 水分平衡法

森林对降水的重新分配分为森林蒸散、进入地下水的渗流、地表径流和土壤含水量的变化。利用水分平衡方程,测定某一区域的水分平衡各分量,从而可以计算出森林蒸散量。可用于小至径流场,大至集水区。时间范围可以从几个星期到数年。用水分输入和输出分析可精确估算林分蒸发散,但是时间分辨率低,没有考虑树木水分储存的变化。同时很难准确测量地表径流和排水。

以上五种方法是计算林分或集水区的蒸发散量,包括了森林蒸腾量及土壤、林冠的蒸发量。

1.1.1.2 个体水平

(1) 蒸渗仪法

通过直接称量装有土壤和植物的容器重量变化,得到植物蒸散值^[122,125]。若蒸渗仪表面有塑料覆盖,通过称重可以测定植物的蒸腾量。此种方法在农业上及幼树应用较多,在大树上很少应用此法。要求容器深度至少应该达到植物的根层深度,并且在土壤剖面结构、含水量和温度方面都应与四周大地接近。由于蒸渗仪有一个底面,要使蒸渗仪内土壤含水量的剖面很接近四周,即使在靠近地表的层次也很难达到。蒸渗仪法对系统中少量的水分丢失反应敏感,可以精确测定单株树的蒸腾量,但对树根部产生干扰,并受定量的土壤限制。

(2) 整树容器法

清晨将树木从地面处锯断,移入盛水的容器中,容器口适当密封,定时记录容器水量损失,即为树冠蒸腾量^[167,207]。此法只代表树木在最优供水情况下的蒸腾值,不能代表在自然田间条件

下周围有根树木的蒸腾值，可作为树木最优供水条件来考虑。并可检验其他测量蒸腾的方法。缺点是不能在树木自然生境条件下测定蒸腾，观测时间只能数日。并且由于树木根部切断，导致树木叶水势和气孔导度发生变化。

(3) 示踪同位素法

常用 H_2O 和 P^{32} ，它们都是纵向传导。由于横向传输很小，因此其数学处理简单^[77,119,160,161,165,166,181,211,241]。 P^{32} 的 β 射线比较强，可以在树皮表面用计数器来监测^[241]。测定误差主要为：样叶（枝）代表性差；一些 P^{32} 和 H_2O 不可逆转地运到了木质部的心材或同树木有机成分发生交换，造成损失；测定时间太短造成有些放射性物质没有测到。可以用来测定整树的蒸腾量，测定值是几天的平均值，时间分辨率低。很难测到树木水分季节利用格局。

(4) 风调室法

将完整植株或植物体的一部分置于植物生长室中，测定一定时间间隔中室内空气湿度的变化，便可以计算出蒸腾速率^[116,139]。并且可以同时测定二氧化碳交换量^[108]。但是风调室法改变了树木的自然环境条件。

(5) 热技术法

由于蒸腾作用引起的植物体内水分的上行液流，在根部水分吸收不受阻碍时，木质部的水分流速就随着蒸腾强度的增加而提高。在较大树木中，水分移动开始于清晨树冠顶部和分枝的尖端，拉起自根部延伸到树干基部的的水柱。然后，液流开始迅速流动，与树冠的蒸腾速度相一致。傍晚液流变缓，直到深夜缓慢的水流还会进入树干，因而水分储备得到补充。对于大树液流与蒸腾有一定的滞后时间，而对小树来说，液流与蒸腾基本同步。蒸腾流能够非常快地适应于蒸腾强度。既能反映出蒸腾的短暂变化，也能在树干中得到的液流速度的记录指示出整个树冠蒸腾的

信息。在基本不改变树木的内部条件和不改变树木蒸腾的外界条件下,准确测定树木蒸腾量的大小。木质部中水流的速率,可以通过外部电源加热,然后测定在木质部热传递的速率或热损失量来确定。现在日益成熟的热技术法可以准确测定植物蒸腾耗水量。而且热技术法在研究森林水文或能量平衡中是很重要的工具,当用液流方法估计林分的蒸腾量时,应选用适当的取样方法^[150,238]。

1.1.1.3 叶片水平

(1) 气孔计法

气孔计法可在叶室中进行不离体、无损伤测定叶片的蒸腾速率。近年来有一种稳态气孔计,其透明小室的直径仅1~2 cm,将叶片夹在小室内,在微电脑控制下向小室内通入干燥空气,流速恰好能使小室内的湿度保持恒定。然后可根据干空气流量、干空气水气密度、叶室水气密度和叶面积的大小计算蒸腾速率和蒸腾量。但由于叶室内扇驱动气流,使蒸腾速率测值大大提高。并且由测定单叶的气孔导度计算的蒸腾量耦合到整个树冠是很困难的,因为叶龄、边界层导度的差异和树冠的光和湿度存在不同梯度,所以气孔计法对于测定整树的蒸腾量不是首选的方法^[61,216,217]。并且该方法时间分辨率低和费时费力^[112]。若研究目的是描述植物对自然条件下的生理反应,使用此法值得怀疑。

(2) 离体称重法

假定的前提是植物整体或部分重量的减少是由于蒸腾作用失水引起的,并且假设枝叶离体短时间内蒸腾改变不大,则可剪枝在田间进行两次间隔称重,用离体失水量和间隔时间换算蒸腾速率,代表正常生长状况下的蒸腾速率。此法必须进行大样本测定,多次重复得出的平均值与离体前蒸腾值相近。缺点:不能连续测定,不同位置叶片的蒸腾速率是不同的,导致取样复杂并且取样损失叶片较多。

在以上方法中,热技术方法以保持树木在自然生长环境条件下,基本不破坏树木正常生长状态,可以连续测定树干液流量,易于野外操作、使用及远程下载数据等优点成为研究者首选的研究方法。据粗略统计,1970~2002年发表的有关树木或林分蒸腾文章中,多于一半使用热技术方法通过测定液流进行研究。热技术方法已在农业、园林、林业和生态学上进行很多植物水分利用的研究。如用来测定花草^[66,145,219]、果树^[76,136]、人工林^[91,109,150,176]和天然林^[169]及灌木^[58]的水分利用;研究树木吸水对地下水的影响^[84];用液流方法研究植物水分关系^[75];空气湍流对树木蒸腾的影响^[155]及二氧化碳浓度增加对蒸腾的影响^[113,114,115]。用液流方法研究植物的水分利用将越来越广泛。

1.1.2 热技术方法及研究内容

1.1.2.1 热技术方法

热技术法根据不同的原理和适用范围分为热脉冲法(Heat Pulse Velocity Method—HPVM)、茎部热平衡法(Stem Heat Balance Method—SHBM)、树干热平衡法(Tissue Heat Balance Method—THBM)、热扩散法(Thermal Dissipation Method—TDM)。现将各种方法的基本原理简单介绍如下。

(1) 茎部热量平衡法(SHBM)

该法是将探测器捆绑在茎粗为2~125mm的树枝或树干^[225,226]、草本^[66,142]植物上测定液流速度。随着被测茎的增粗,加热器宽度应增大^[144]。此方法是将加热器和热电偶绑在茎的表面,要保证接触良好,并用绝缘的材料包裹上,防止热损失及防雨。加热器加热茎的周围,通过测定液流从加热区进入和出去的温差,计算液流的速度^[66,208,209]。公式为

$$P = Q_v + Q_r + Q_f$$

式中: Q_v ——纵向传导热损失;

Q_r ——径向传导热损失；

Q_f ——液流带走的热量；

P ——加热量。

此仪器分为两种：一类采用恒定功率加热；另一类采用变化功率加热保持树干温度恒定^[141,164,156,242]，此方法耗电低并且避免了在低液流时对树干的过分加热。有研究者发现若加热部位的热贮存的变化忽视时，测的液流速度有误差^[140,142,220]。如针叶幼苗在低液流速度时，热平衡法效果不好，应把热贮存部分包括在热平衡方程中^[142,243]。忽略热储存而产生的误差随着茎的增粗而增大，如测一天总液流时，此误差可忽略，因为一天的热贮存变化为0^[242]。此法准确计算液流速率完全依靠 K_{sh} 值^[65]， K_{sh} 是在无液流时估计的，所以假设黎明前无液流^[226]，然而事实上树木在晚上也有液流，尤其在晚上空气干燥有风时。Allen (1995) 从大雨后计算 K_{sh} ，这是低辐射，高湿度和叶截留水分，假设此时液流为0^[58]。 K_{sh} 还可从伐倒的树木中测得^[66,226]。最近新的仪器设计不需要 K_{sh} ，因为使用了两个加热器和可变功率^[200]。安装此仪器时应使用凡士林，以保证探头与树干接触良好并且防水，而 Wiltshire et al (1995) 发现当这样测定被测木几个月后，凡士林挤压 ash trees 的直径生长，导致树干收缩^[245]。防辐射罩用在加热针上下部，减小外界温度对树干加热部分的影响到忽略的水平^[66,226]，而 Kenneth (1992)^[163]、Gutierrez (1994)^[143] 发现应考虑环境对树干温度梯度的影响，所以要做好探头及被测树干部位的绝热。在野外，茂密树冠减小辐射，从而减小外界对树干温度的影响，无需校正树干温度梯度的影响。

(2) 树干热平衡法 (THBM)

该法可用于测树干直径大于 120 mm 液流^[79,80,82,83,84,103,171]，原理与茎热量平衡法相同，不同之处是利用插入树干的探针测定树

干液流，而不是捆绑在树干的外部。由加热部分的热平衡公式计算液流速度。树干热平衡法也分为恒定功率加热^[79]和可变功率保持恒定的温差值^[171]两种方法。测定液流的树干部分用绝缘和防晒的材料遮盖。

(3) 热脉冲法 (HPVM)

该法只是用于树干直径大于 30 mm 的木本植物。依据补偿原理^[229]，测定时向加热元件通以短暂即逝的电流产生热脉冲，在测定距离一点上随时间波动求得液流速度。液流量根据流体的几何特征、茎横断面积和液流速度推算。该仪器包括一个加热器和 2 个传感器探头。测定液流时同时使用 4 套，分别安装在待测树干东、西、南、北向的不同深度上。最初由德国学者 Huber (1932) 提出，经 Marshall (1958) 的流量转换分析^[183]，纠正伤口的误差^[100,230]得以发展起来。此方法可准确测定液流速度^[136]。由于液流速度在边材各个位点上是不同的^[98,174,189]，因此根据边材不同深度取样测定液流速度，然后根据统计方法将点上的速度整合到整个边材输水面积^[98,136]。Hatton (1990) 用加权平均法来解决不同位点液流速度的整合^[148]。这两种方法是在假设边材横切面径向对称的基础上。Hatton Thomas (1992) 介绍了基于 Hatton (1990) 加权平均法基础上，对椭圆形树干的液流速度的整合方法减小计算误差^[149]。热脉冲法的准确性在树木上经过检验^[67,98,107,183,189,195,227]；但在树干液流速度较低时，热脉冲技术不准确^[68,95,174,183,230]。而低液流对热带林下树木和上层木具有重要的生理学意义^[68]。

(4) 热扩散方法 (TDM)

该法是由 Granier (1985)^[127]发明的，由 2 个直径为 1.2 mm 相连的探针插入树干内，上部的探针含有加热器和热电偶，下面探针只有热电偶。恒定加热测得两探针的温差计算液流速度。液流密度 ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$) = $0.0119Z^{1.231}$ ，该公式在环孔材、散孔

材和针叶材等不同材质树木中均得到验证。液流速度为液流密度与边材面积的乘积。此法安装方便,液流量计算简便和费用较低,将来可得到普遍应用。

许多学者对热平衡法、热脉冲法和热扩散法以及其他的方法进行对比试验,如热平衡法与气孔计法、生长室法、放射性示踪法、微气象法、蒸渗仪法对比^[61,90,92,112,126,146,162,169,218,225,248];热扩散与热平衡、涡度相关法、能量平衡法的对比^[111,129,134,168,204,213];热脉冲法与放射元素示踪法对比^[227],及与叶室法、整树容器法和能量平衡法对比^[107,121,138,195,229]得到较为一致的结果,并且以上方法可以联合使用,进行林分蒸腾的测算,提高林分蒸腾测定的精度。Kostner et al (1996)^[168]对比了热扩散法、树干热量平衡法(恒定加热)和树干热量平衡法(保持恒定温度)对欧洲赤松进行对比,三种方法单位边材面积最大液流量分别为(单位: $\text{gcm}^{-2}\text{h}^{-1}$) 11~17; 8~21和4~14,都在一个数量级上。Granier et al (1996c)^[134]用以上三种液流方法测定欧洲赤松林分蒸腾量与涡度相关法对比,发现液流滞后蒸腾 90 min。以上四种热技术测定液流方法经对比后,热扩散法安装简便,计算简单,费用相对较低。

1.1.2.2 研究内容

(1) 树干水分运输格局及数量

树干液流上升运输格局及速度最早采用染色法^[62,147,170]。目前广泛应用热技术定量测定径向和不同方位树干液流的格局及其数量^[69,85,102,118,132,174,189,196,203,221,224]。如 Granier (1994)^[132]对 30~40 年生的无梗花栎 (*Quercus petraea*)、英国栎 (*Quercus robur*) 树干的径向液流格局采用整树容器法、热扩散法、热脉冲法和热成像法四种独立的方法测定。四种方法测定的总液流量相当;染色法、热成像和热脉冲法测的径向液流大多数发生在当年生年轮上,尽管在老年轮上有很显著的液流。

通过热技术对不同树种、草本等蒸腾耗水量做了大量研究,据粗略统计,从1970到现在,测定了67种树木耗水量,树木用水量从32年生的无梗花栎(*Quercus petraea*) 10 kgd^{-1} ^[73]到热带雨林上层木的 $1\ 180 \text{ kgd}^{-1}$ ^[161]。树木高为33~76 m,整树水分利用高于 400 kgd^{-1} ^[83, 161, 166],高度21 m左右的树木水分利用在 $10 \sim 200 \text{ kgd}^{-1}$ 。

(2) 利用液流数据推算林分冠层导度

许多学者利用树干液流数据计算林分冠层导度^[6, 13, 149, 152, 155, 156, 159, 201]。如Martin等(1997)^[185]用树干热平衡法和茎热量平衡法测定华盛顿西部43年生冷杉林整树树干液流。冠层导度用液流数据和气象数据通过彭曼方程反推得出。各株树的液流量和冠层导度随着树的大小变化很大,小树的冠层导度为 0.57 mms^{-1} ,蒸腾为 4.9 kgd^{-1} ,最大的树冠层导度为 7.2 mms^{-1} ,蒸腾量为 98 kgd^{-1} ;冠层导度与辐射成线性正相关,与蒸汽压亏缺为指数负相关。这些公式建立冠层导度经验模型可解释树冠导度变化的52%~73%(平均66%)。Granier和Loustau(1994)^[132]及Granier(1996)^[133]通过液流方法测定林分蒸腾量,来构建林冠导度模型(包括蒸汽压亏缺、土壤水分亏缺和辐射),模型计算的蒸腾量与实测数据具有很好的一致性(R^2 高于0.85)。

(3) 影响树木蒸腾的内在因素

热技术不仅可以准确测定树木水分利用量,而且将树木液流量与叶、枝、整树生理指标联合测定,可得到有意义的生理学知识,包括:

1) 气孔导度和边界层导度控制树冠蒸腾

Sarawak(1999)^[212]研究热带雨林5个主要林冠种,这5个种有很强的蒸腾,当在高温时,通过气孔的开关调控机制保持一定水平的蒸腾速率。事实上树木蒸腾作用是由边界层导度和气孔导度共同控制的。气孔导度是气孔密度、大小和开度的函数;边界

层导度是由叶子大小、形态和风速控制的。用气孔计法测定叶子的蒸腾速率，不能直接从单片叶子推算到整株树的水分利用，因为气孔运动对蒸腾的影响由于叶子周围边界层扩散阻力而被减弱。这些边界层增加叶子周围水气，减小叶子表面与空气的水气压差^[159]。这种微气象反馈改变蒸腾的驱动力最终改变叶子和整株树的蒸腾。采用 Ω 作为气孔控制蒸腾程度的系数，此值是气孔导度与边界层导度的比值，其值变化范围 $0 \sim 1$ ^[159]。当气孔导度远远小于边界层导度时，气孔是主要控制蒸腾的因素，气孔导度的降低导致蒸腾成比例降低，此种植物的 Ω 接近于 0，针叶树的 Ω 在 $0 \sim 0.1$ ^[159]；相反若边界层导度远远小于气孔导度，冠层辐射是蒸腾的主要驱动力，此时 Ω 接近于 1。阔叶树的 Ω 在 $0.3 \sim 0.6$ ^[153, 175, 188]，测定的天然林和人工林中，针叶树种的 Ω 最小 ($0.05 \sim 0.08$) 因为它们的叶子小，边界层导度大和气孔导度相对较小^[178]；因为边界层导度减小和气孔导度的增大 Ω 值随叶子增大而增大。 Ω 值大小可解释气孔控制蒸腾程度的系数。Hinckley 等 (1994)^[153] 测定杂交杨林分 Ω 值为 0.66，气孔导度变化 10%，可导致蒸腾变化于 3% ~ 4%。Wullschleger 等 (1998)^[246] 研究处于林冠下层的 *Acer rubrum* 幼树的 Ω 在 $0.64 \sim 0.72$ ，当气孔导度变化 10%，导致 2.6% 的蒸腾变化。

2) 整树的水分导度

树木水分导度影响水分从根至叶的运输速度。限制了水分、气体交换和在不同生境下的树木分布，甚至树木可达到的最大高度^[236]。水分导度的空间变异是树木蒸腾和叶水势很重要的指示者，同时可评价水分导度和木质部空穴化的补偿性关系、土壤严重干旱时树干储存水分对树木存活的意义等。计算水分导度有两种方法：①木质部液流量与叶水势回归法：Schulze 等 (1985)^[218] 用木质部水分流量和叶水势的回归关系计算 72 年生的 *Picea abies* 和 33 年生 *Larix* 的水分导度。当小树和幼苗蒸腾与叶水势变化同