

乔木蒸腾耗水量研究方法述评与展望^{*}

于占辉^{1,2}, 陈云明¹, 杜盛¹

(1. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要: 参阅了大量国内外有关乔木蒸腾研究方法文献, 认为乔木蒸腾量研究方法主要有两大类, 即组织器官测定、单木测定; 分类对典型研究方法(快速称重法、气孔计法、整株容器称重法、同位素示踪法、热脉冲法、树干热平衡法、热扩散探针法)进行了述评, 对比分析了各种方法间的优缺点及其适用范围; 展望了乔木蒸腾耗水作用研究方法的应用前景, 认为热技术法是未来几年内的主要测定方法。

关键词: 蒸腾作用; 研究方法; 热技术法

中图分类号: S715.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2009)03-0281-05

Review and Prospect on Research Methods of Tree Water Consumption by Transpiration

YU Zhan-hui^{1,2}, CHEN Yun-ming¹, DU Sheng¹

(1. Institute of Soil and Water Conservation of Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Referring to a large number of domestic and foreign literature on research methods of tree transpiration, and authors concluded that there are mainly two types of research methods of tree transpiration, which includes determination of tissues and organs, determination of individual tree. This paper reviewed the typical research methods (Quick-weighting method, Porometer method, Whole-tree method, Isotopic tracer method, Heat pulse velocity method, Trunk (segment) heat balance method, Thermal dissipation probe method) from the perspective of classification. And the merits and drawbacks of various methods were contrastively analyzed and the scope of their application. A prospect on application of research methods of tree transpiration was given that thermal methods is the main determination in the next few years.

Key words: transpiration; research method; thermal methods

在土壤-植物-大气组成的连续体中, 水是连接各个环节的主要因子。植物根系从土壤中吸收水分, 其中约90%的水分要通过植物蒸腾作用散失到大气中^[1]。而准确测算植物蒸腾耗水量又是当前植物蒸腾研究中急需的一项技术。然而植物蒸腾量又受到多因素的影响, 尤其是乔木, 由于其个体高大、生长年限长, 蒸腾作用不仅受树种、环境的影响, 而且还受到空间、树龄等多因素的控制, 难以准确定量^[2]。长期以来, 有关乔木蒸腾量测定方法的研究

一直是植物生理、生态水文、气象学、土壤学等学科研究的热点问题^[3]。国内外用于测定乔木蒸腾作用的方法很多, 归纳起来主要有二类, 组织器官测定^[4-7]、单木测定^[8-10]。

旨在通过综合评述当前国内外常用测量乔木蒸腾量的研究方法及其使用情况, 对比分析其适用情况及优缺点, 展望未来乔木蒸腾研究方法的发展趋势。为从事乔木蒸腾研究的科研人员在测定方法选择方面提供参考依据。

* 收稿日期: 2008-11-24

基金项目: 中国科学院知识创新工程“百人计划”项目(KZCX2-YW-BR-02); 中科院西部行动计划项目(KZCX2-XB2-05)

作者简介: 于占辉(1983-), 男, 吉林扶余人, 硕士研究生, 主要研究方向: 植被生态与水文。E-mail: yuzhanhui06@mails.gucas.ac.cn

通信作者: 陈云明(1967-), 男, 陕西澄城人, 研究员, 主要研究方向: 植被生态与水文。E-mail: ymchen@ms.iswc.ac.cn

1 组织器官测定

组织器官测定主要测定的是枝叶部分的蒸腾量。主要有快速称重法和气孔计法两种测量方法。

1.1 快速称重法

又称离体称重法,是从植株上剪下某一部分进行称重(常见有扭力天平^[11]和精密电子天平^[5])。通过比较间隔一定时间 n 次重复称重结果,分析得出植物蒸腾速率的一种方法^[4]。因其投资少、简单易行,且有一定准确性等优点,故目前国内仍有很多学者在沿用这种方法。王孟本^[5]、程积民^[12]和何兴东^[11]分别利用此方法对晋西北地区的杨树、上黄地区的刺槐和塔克拉马干沙漠的怪柳进行蒸腾速率的测定;巨关升^[13]、刘奉觉^[14]等也与其他方法进行对比,取得较为一致的结果;但也有研究发现此种方法适用于容易计算叶片数量的苗木,由于高大乔木的蒸腾有效叶面积难以估算,不适用高大乔木;而且此方法在测定过程中取样、称重时叶片离体失水蒸腾迅速降低,且鲜叶失水量明显^[5],使测值通常偏低,产生的系统误差大,更不宜作尺度扩展^[15];刘奉觉^[16]就在测量杨树叶片时对快速称重法的离体偏差进行了订正,并在观测中发现由于水分胁迫程度不同而偏离实际蒸腾量值。叶水分充足时,观测值偏高;水分胁迫严重时测值偏低。

1.2 气孔计法

又称叶室法。就是使用稳态气孔计测定叶室条件下的蒸腾速率的一种方法,目前国内常用 LI-1600 稳态气孔仪^[13,17]和 LI-6400 便携式光合仪^[6]。计算公式^[13,18]如式(1)。

表 1 组织器官测定方法适用范围与优缺点

测定方法	测定类型	优点与适用范围	缺点
快速称重法	直接测定	投资少、简单易行,一般在便于计算或估算叶片数量和蒸腾有效叶面积时适用,适用于苗木或枝	精度不高,测值偏低,产生的系统误差大,不宜作尺度扩展
气孔计法	直接测定	不离体无损伤测定、操作方便、精度高,适用于叶和同一叶的上、下两个表面蒸腾的比较研究	测定结果通常显著高于叶片实际蒸腾速率

2 单木测定

单木测定主要是对整株树木蒸腾的测算,一般反映整株乔木的蒸腾量。主要包括整株容器称重法、同位素示踪法、热脉冲法、树干热平衡法、热扩散探针法 5 种测量方法。

2.1 整株容器称重法

该方法由 ladefoged^[21]在 1960 年提出的。具体操作是,在晴天选取样株,于凌晨从地面处锯断树

$$T_r = (\rho - \rho_a) F/A \tag{1}$$

式中: T_r ——蒸腾量; ρ ——叶室水汽密度; ρ_a ——干空气水汽密度; F ——干空气流量; A ——叶面积。

由于其操作方便,精度高,可进行不离体无损伤测定,适用于室内外不同树种、不同处理、不同时空的蒸腾比较研究,还可用于同一叶的上、下两个表面蒸腾的比较研究^[14]。黄运平^[17]、李红丽^[19]等就使用气孔仪分别对暖温带辽东栎和浑善达克沙地的榆树、黄柳和圆叶桦进行了测量;巨关升等^[13]用气孔计法与整树容器法、热脉冲法、快速称重法 3 种蒸腾测定方法对杨树耗水量进行测定比较,结果表明稳态气孔计得到的测定结果要高于其它 3 种方法的测定结果,同时也高于自然状态下植物的实际蒸腾耗水。田晶会等利用 LI-1600 稳态气孔仪对黄土高原半干旱山西省方山县实验地侧柏蒸腾速率进行测量并得出侧柏蒸腾速率与土壤含水量的关系呈三次曲线关系与气孔阻力呈幂指数相关^[20]。目前与其叶室法原理相同的一种野外常用的仪器——光合仪,它可同时测量光合和蒸腾速率二项指标。王翼龙^[6]、肖文发^[7]分别用 LI-6400 和 LI-6200 便携式光合测定系统对秦岭火地塘林区主要成林树种锐齿栎和江西分宜县人工杉木林的光合作用和蒸腾作用进行了测量。得出蒸腾作用受叶片气孔开度影响,二者呈一定的相关性。这种仪器克服了其它方法只能单一测量蒸腾作用的缺陷,使测量蒸腾和光合作用同时完成,为研究蒸腾作用机理提供全新视角,且操作简便。但其与气孔仪相同的缺点仍值得注意。而且这类仪器(气孔仪)价格昂贵,较高的操作技能限制它的广泛应用。

木,原地移入盛水的容器中,尽量不破坏周围小气候环境,用测针在容器边作水位指示,加水至指针水位。由于植株蒸腾的进行,树干断面吸入水分,杯内水位不断下降,定期向杯内加水至指示水位,并记录注水量,为该时段的树木蒸腾耗水量,然后结合样树叶面积换算出蒸腾速率。Roberts^[22]和 Knight^[23]分别在 10 m 高的欧洲赤松与 100 a 生的扭松上进行过类似测定。国内许多学者^[9]也由于该方法简便易行,计量精确等优点,用于同步比较研究实验中。但也有分析指出该实验过程中脱离了树木的自然生

长环境,水分供给处于最优状态,所以不能代表自然生长状态树木的蒸腾值,而且极具破坏性、也不能进行连续实验,所以不值得提倡^[24]。通常用于做其它测定方法的参照。

2.2 同位素示踪法

该方法是 Greenidge 于 1955 年提出的,是利用一些化学同位素如氘(^2H)、氚(^3H)、 ^{32}P 等元素作为示踪剂,定期注射于林木木质部内以研究水分传导速率的方法。Vincent Mark^[25] 利用氘示踪技术测定法国南部地区山毛榉树树干液流。他认为要有足够的氘示踪剂以便使示踪剂可随液流运输到每一个枝叶中,并认为在实验中最好选择分枝少的树木;Calder^[26] 等也利用氘示踪技术测定整株植物的蒸腾发现,其测定结果数据常常是几天的平均值且很难被解释;满荣洲^[27] 和陈杰^[28] 分别用氘水作为示踪剂测定了河北隆化碱房乡大水泉村西山 28 a 生华北油松林和东北地区红松、柞树蒸腾,并认为该方法比较方便,具有应用价值,但在野外应用不太方便,容易受到校正的限制而无法得到植物耗水的季节性模型。

2.3 热脉冲法

应用热脉冲方法测量树干液流速率是由德国植物生理学家 Huber 于 1932 年时提出的,并于 1937 年应用热脉冲液流检测仪(heat pulse recorder HPVR)测定树干液流^[29]。后经生态学家 Marshall 将完善后的理论与技术应用在测定树干液流上^[29]。这种方法是在树干一定距离上安装三个探针,其中上下两个是热敏探针,中间是热脉冲发生器加热丝。其原理是用热脉冲加热树液,上下两个探针测定温度变化,并转化为液流速率^[30-31]。

Leyton^[32] 总结了以往度量树木蒸腾的方法以及存在问题,认为在各种测量植物传输系统中树液流速的方法中,热脉冲法最适合森林。由于其能基本保持树木的自然生活状态不变而获得对树木蒸腾指标的度量,也被称为“最美妙的测定液流速率的方法”。国内的李海涛^[30] 在北京门头沟区小龙门林场对棘皮桦、五角枫和华北落叶松等上应用热脉冲技术进行了多种研究,均取得较好效果。但 Steve Green^[33] 研究发现木质部导管孔径的大小以及茎杆的湿润程度会影响热脉冲法对液流的测定,必须通过公式进行修正。Braun^[34] 也认为由于热脉冲法测定的只是脉冲发生时的液流,但间隔时间内气候因子很可能会发生变化,从而影响测定结果。且操作困难,使用不便,未见得是最佳的方法^[18]。

2.4 树干热平衡法

树干热平衡法是由 Cermak 提出的,主要用于测定大树的液流。大树的一段被内置的加热器加热,热量被均一地释放到木质部组织中,通过能量(直接与液流成比例)或者温度差(间接与液流成比例)的电路记录来计算液流,无须校正,并且不需要通过经验公式来计算^[33]。树干热平衡技术在 *Picea abies* 和 *Quercus petraea* 的研究中通过体积测定法得到验证^[35]。在 Schulze 的实验中也证明该方法的测定结果与气孔计测定的参数有很好的 consistency^[36]。国内王翠、张吉云也利用此方法测定大兴安岭地区 8 a 生的兴安落叶松^[39] 和鲁东大学内龙爪槐树干液流^[40]。不过该方法可能会由于植物组织的热储存而产生大的误差^[37]。且安装技术复杂,因此还未有广泛的应用。

2.5 热扩散探针法

又称为恒定热流传感器法(constant heat flow sensors),是由 Granier^[38] 于 1985 年提出的。他是在热脉冲方法的基础上进行大胆的改造而提出的一种新方法。主要是将两根温度探针插入树干边材,上方探针对边材恒定供热,下方探针不加热,由于树干液流的向上运输会将部分热量带走,通过两个探针间的温度差和液流密度之间的经验公式能够计算树干液流^[30-41]。Braun^[28] 通过测定的树干液流量和植物失水的质量对比分析实验,验证了该方法的准确性;马履一^[42] 等利用这一技术研究了油松树干边材液流传输的时空变化规律;王华田等^[43] 在北京林业大学西山林场对油松、侧柏深秋边材木质部液流变化规律进行研究。与热脉冲方法相比较,热扩散探针法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自动化测定^[41],而且测定结果比较准确,仪器成本较低,使得该方法得到广泛应用。但也有研究发现^[15],如果探针插入心材部分或植物木质部液流在径向上不均一,液流量可能会被低估。

3 问题与展望

综上所述,国内外目前用于测定乔木蒸腾的方法很多,依据测定部位的不同可分为组织器官和单木测定 2 种,其中组织器官测定(快速称重法、气孔计法)主要测定的是枝叶部分的蒸腾量,而且需要计算叶面积,测定的准确度较差,单木测定(整株容器称重法、同位素示踪法、热脉冲法、树干热平衡法、热扩散探针法)主要是对整株树木蒸腾的测算,一般反映整株乔木的蒸腾量。但由于测算技术和系统原因

也存在误差。

随着科学技术的进步, 每种测量技术都会随之不断改进而提高测定的精度, 但并不能掩盖其中存在的根本问题, 如有的方法没有考虑仪器本身给实

验结果带来的影响(如热脉冲法、热扩散法、树干热平衡发法)、有的方法树木未处于自然状态破坏了原植株, 很大程度上也影响了测量精度(如快速称重法和整株容器法)。

表 2 单木测定方法的适用范围与优缺点

测定方法	测定类型	优点与适用范围	缺点
整株容器称重法	直接测定	简便易行, 计量精确, 且能够反映树木整株耗水的动态变化、可用于同步比较研究	不能进行连续实验、脱离了树木自然生长环境、不能代表自然生长状态树木的蒸腾值
同位素示踪法	直接测定	比较方便, 具有较高的应用价值, 但对测量地实验器材要求比较高	不适合在野外应用, 容易受到校正的限制而无法得到植物耗水的季节性模型, 测量结果是几天平均值, 不能准确反映液流动态变化
热脉冲法	直接测定	适用于各种地形、能基本保持树木的自然生活状态不变而获得对树木蒸腾指标的度量, 较实际值偏小 10%	测定的仅是脉冲发生时的液流, 不适用于低液流时的树木, 且操作困难, 使用不便
树干热平衡法	直接测定	适合胸径较大的树木、无须经验公式进行标定	可能会因为植物组织的热储存而产生大的误差; 安装技术复杂
热扩散探针法	直接测定	能够连续放热, 实现连续或任意时间间隔液流速率自动化测定。结果准确、液流量计算简单、费用较低	如果探针插入心材部分或植物木质部液流在径向上不均一, 液流量可能会被低估。探针消耗较大的电量

通过比较可以看出, 虽然各种方法都具有优缺点, 相对而言, 热技术方法在植物蒸腾方面的应用有更广阔的前景, 由于热技术具有能够在自然生长条件下, 基本不破坏树木正常生长的状态下连续测定液流的优点, 可以简捷准确地确定树冠蒸腾耗水量, 而且经济可行, 测量精准度也十分高, 而且根据树干液流、边材面积之间关系在通过对土壤和气象因子的同步检测并结合遥感技术就可以较精确估算整个林分的蒸发蒸腾耗水量, 这些都是其它测量方法所无法比拟的。

参考文献:

[1] 黄锡荃. 水文学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1985: 54-52.

[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] 王介民, 高峰, 刘绍民. 流域尺度 ET 的遥感反演[J]. 遥感技术与应用, 2003, 18(5): 332-338.

[4] 王孟本, 李洪建, 柴宝峰, 等. 树种蒸腾作用光合作用和蒸腾效率的比较研究[J]. 植物生态学报, 1999, 23(5): 404-410.

[5] 王孟本, 李洪建, 柴宝峰. 晋西北小叶杨林水分生态的研究[J]. 生态学报, 1996, 16(3): 232-237.

[6] 王翼龙, 张硕新, 雷瑞德, 等. 秦岭火地塘林区锐齿栎光合、蒸腾特性[J]. 西北林学院学报, 2003, 18(4): 9-12.

[7] 肖文发, 徐德应, 刘世荣, 等. 杉木人工林针叶光合与蒸腾作用的时空特征[J]. 林业科学, 2002, 38(5): 38-46.

[8] 翟洪波, 李吉跃, 魏晓霞. 应用热扩散技术对油松栓皮栎比导率的研究[J]. 林业科学, 2006, 42(8): 14-17.

[9] 孙龙, 王传宽, 杨国亭, 等. 应用热扩散技术对红松人工林树干液流通量的研究[J]. 林业科学, 2007, 43(11): 8-14.

[10] 马玲, 赵平, 饶兴权. 乔木蒸腾作用的主要测定方法[J]. 生态学杂志, 2005, 24(1): 88-96.

[11] 何兴东, 丛培芳, 段争虎, 等. 荒漠植物蒸腾速率的变化与组织含水量的关系[J]. 干旱区资源与环境, 2001, 15(3): 68-70.

[12] 程积民, 董建国. 上黄试区主要灌木树种蒸腾作用的实验研究[J]. 水土保持通报, 1995, 15(2): 22-25.

[13] 巨关升, 刘奉觉, 郑世锴. 稳态气孔计与其它 3 种方法蒸腾测值的比较研究[J]. 林业科学研究, 2000, 13(4): 360-365.

[14] 刘奉觉, 郑世锴, 巨关升. 树木蒸腾耗水测算技术的比较研究[J]. 林业科学, 1997, 33(2): 117-126.

[15] 王华田, 马履一, 孙鹏森. 油松、侧柏深秋边材木质部液流变化规律的研究[J]. 林业科学, 2002, 38(5): 31-37.

[16] 刘奉觉. 杨树叶片离体前后蒸腾速率的变化[J]. 植物生理学通讯, 1990, 1(1): 57-59.

[17] 黄运平, 严昌荣. 暖温带落叶阔叶林中辽东栎蒸腾作用的特征[J]. 中南民族大学学报: 自然科学版, 2002, 21(3): 16-21.

[18] 孙慧珍, 周晓峰, 康绍忠. 应用热技术研究树干液流进展[J]. 应用生态报, 2004, 15(6): 1074-1078.

[19] 李红丽, 董智, 丁国栋, 等. 浑善达克沙地植物蒸腾特征

- 的研究[J]. 干旱区资源与环境, 2003, 17(5): 135-140.
- [20] 田晶会, 贺康宁, 王百田. 黄土半干旱区侧柏蒸腾作用及其与环境因子的关系[J]. 北京林业大学学报, 2005, 27(3): 53-56.
- [21] Ladefoged K. A method for measuring the water consumption of larger intact trees[J]. *Physiologia Plantarum*, 1960, 13(4): 648-658.
- [22] Roberts J. The use of tree-cutting techniques in the study of the water relations of mature *Pinus sylvestris* L[J]. *J. Exp. Bot.*, 1977, 28: 751-767.
- [23] Knight D H, Fahey T J, Running S W, et al. Transpiration from 100-yr-old lodgepole pine forests estimated with whole-tree potometers[J]. *Ecology*, 1981, 62(3): 717-726.
- [24] Grebet P, Cuenca R H. History of lysimeter design and effects of environmental disturbances[C]// Allen R G, Howell T A, Pruitt W O, et al. *Proceeding of the International Symposium on Lysimetry*, July 23-25, Honolulu, Hawaiian Island, USA: New York, 1991: 10-18.
- [25] Vincent M, Mark R. Application of the deuterium tracing method for the estimation of tree sap flow and stand transpiration of a beech forest (*Fagus silvatica* L.) in a mountainous Mediterranean region[J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 285: 248-259.
- [26] Calder I R, Kariyappa G S, Srinivasalu N V, et al. Deuterium tracing for the estimation of transpiration from trees: Field calibration[J]. *Journal of Hydrology*, 1992, 130: 17-25.
- [27] 满荣洲, 董世仁, 郭景唐. 华北油松人工林蒸腾的研究[J]. 北京林业大学学报, 1986, 8(2): 1-7.
- [28] 陈杰, 齐亚东. 对应用氡水法测定林木蒸腾量的评价[J]. 东北林业大学学报, 1990, 18(3): 105-113.
- [29] Cermak J, Kucera J, Nadezhdina N. Sap flow measurements with so othermo dynamic methods, flow integration with in trees and scaling up from sample trees to entire forest stands[J]. *Trees*, 2004, 18: 529-546.
- [30] 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, 1998, 20(1): 1-6.
- [31] 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.
- [32] Leyton L. Continuous recording of sap flow rates in tree stems[R]. IUFRO Meetings, 1967, 240-49.
- [33] Steve G, Brent C, Bryan J. Theory and practical application of heat pulse to measure sap flow[J]. *Agronomy Journal*, 2003, 95: 1371-1379.
- [34] Braun P, Schmid J. Sap flow measurements in grapevines (*Vitis vinifera* L.): Stem morphology and use of the heat balance method[J]. *Plant and Soil*, 1999, 215: 39-45.
- [35] Cermak J, Kucera J. Scaling up transpiration data between trees, stands and watersheds[J]. *Silva Carelica*, 1990, 15: 101-120.
- [36] Schulze E D, Cermak J, Matyssek R. Canopy transpiration and water fluxes in the xylem of *Larix* and *Picea* trees: a comparison of xylem flow, porometer and cuvette measurements[J]. *Oecologia*, 1985, 66: 475-483.
- [37] Mattias L, Fredrik L, Anders L. Evaluation of heat balance and heat dissipation methods for sap flow measurements in pine and spruce[J]. *Ann For Sci*, 2001, 58: 625-638.
- [38] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stands by means of sap flow measurements[J]. *Tree phsiol*, 1987, 3: 309-320.
- [39] 王翠, 王传宽, 孙慧珍. 移栽自不同纬度的兴安落叶松的树干液流特征[J]. 生态学报, 2008, 28(1): 136-144.
- [40] 张云吉, 隆惠敏, 谢恒星. 应用热平衡技术测量龙爪槐液流的试验研究[J]. 安徽农业科学, 2006, 34(17): 4229-4232.
- [41] Lu P, Urban L, 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.
- [42] 马履一, 王华田. 油松边材液流时空变化及其影响因素研究[J]. 北京林业大学, 2002, 23(4): 23-37.