

我国树木蒸腾耗水研究进展

苏建平¹, 康博文²

(1. 河南省鹤壁矿务局林场, 河南 鹤壁 456300; 2. 西北农林科技大学林学院, 陕西 杨陵 712100)

摘 要: 综述了我国树木蒸腾的研究方法及其适用性, 树木蒸腾规律及其与环境的关系, 重点介绍了近期在树木蒸腾方面的进展, 并对未来研究方向作了展望。

关键词: 树木; 蒸腾效率; 耗水量

中图分类号: S715.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2004)02-0177-03

Research Proceeding of Trees Transpiration in China

SU Jianping¹, KANG Bowen²

(1. Forestry Farm, Mineral Office of Hebi City, Hebi 456300, Henan, China;

2. Forestry College, Northwest Sci-tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: The research situations of trees transpiration in China were summarized, including methods and its application, the relationship of trees transpiration and trees condition. The near progress of the research was pointed, and the future direction to the research was predicted.

Key words: tree; transpiration efficiency; water consumption

森林是地球上最复杂、生产力最高的生态系统, 是生物圈的能量基地。树木作为森林的主体, 对森林的组成、结构、功能等起决定作用。水分运动在土壤—植物—大气系统 (SPAC) 中最活跃, 而植被蒸腾、土壤蒸发在其过程中占有极为重要的地位。树种蒸腾耗水特性一直受到国内外水分生理学家、生态学家、林学家的共同关心, 这些学者先后在树种蒸腾测定方法、树种蒸腾特性及其与环境之间的关系、林地水量平衡等方面进行了大量研究, 并取得巨大成果。

1 树木蒸腾耗水测定方法的研究

森林植被与农田、草地等植被类型相比, 下垫面粗糙, 树木外形高大, 对近地面层气象特征影响明显, 梯度观测资料容易产生明显误差, 因而, 森林蒸散测定不仅困难多, 且精确度下降。从上世纪 60 年代起, 国内外陆续提出了多种植物蒸散测定方法, 并不断发展和趋于完善, 如水文学法、SPAC 模拟法等, 这些方法技术原理不同, 局限性各异, 有的还可用于分析蒸发散与环境因子的关系, 有的可用于估算一个地区和比较不同地区蒸散耗水量, 但往往把植物蒸腾和土壤蒸发不分 (通称蒸发散), 在阐述群落中不同种群及个体的水分消耗方面不足。树木蒸腾量测定主要有如下方法:

1.1 快速称重法

该方法用快速天平在田间防风罩内进行, 丛树冠中部摘叶, 称重后, 间隔 2 min 再称重, 以单位鲜叶量的失水量表示

蒸腾速度, 用其与树冠叶面积质量计算某一时刻的树冠蒸腾耗水量^[6]。该方法的前提是枝叶离体短时间内蒸腾改变不大。80~90 年代刘奉觉等人采用其它方法对快速称重法进行了订正, 发现在离体 1~3 min 称重, 可将偏差控制在 10% 以内, 在晴天下午有时偏差会大于 10%, 可用修正系数订正。在中等干旱条件下, 此法测得杨树蒸腾日平均值约为实际值的 70%~100%, 水分极度饱和时可达 130%~140%, 偏差范围 $\pm 30\%$, 估计其它蒸腾量较小的树种, 其偏差值不会超出这个范围。本方法适于不同树种、时间、天气、处理之间的蒸腾比较, 并能取得满意结果。局限性在于间断测定, 数据连续性不强, 取样采叶较多, 对小树影响较大。

1.2 整树容积法

该方法由 Ladefoged 于 1960 年提出, 方法是清晨将树干从地面处锯断, 移入盛水容器中, 定时 (20 min) 记录容器中水的损失量 (树冠蒸腾耗水量)。简便易行, 计量准确, 但由于切断了与根的联系, 又处于最优供水条件下, 因而不能完全代表处于土壤水分条件下又有根系的树木的蒸腾值, 但可用于同步比较研究, 作为比较的基准。

1.3 稳态气孔计测定法

用 LI—1600 稳态气孔计测定, 取样时间、部位同快速称重法。以整树容积法测值为基准, 气孔计测值约为基准值的 2.91 倍, 约为快速称重法的 2~3 倍。这种因仪器引起的系统偏差可用校正系数订正, 校正值相当于自然条件下的蒸

腾耗水量。该方法适于不同树种、不同时空、不同处理的蒸腾比较研究。

1.4 蒸渗仪法

大型蒸渗仪(Lysimeter)测量精度高,能精确揭示树木个体乃至群落蒸腾耗水的动态变化规律,但仪器昂贵,且无法解释树木蒸腾耗水的生态和生理作用机理,应用受到限制^[4],在我国林业研究方面很少使用。

1.5 盆栽称重法

把树苗移栽于同等规格的塑料或瓷盆中,盆口用塑料袋套住,露出苗木。选择典型晴天从早晨到傍晚间隔固定时间(1~2 h),称重一次,算得苗木蒸腾耗水量。简便易行,可用于不同树种及干旱胁迫时苗木蒸腾耗水变化的比较,借助其它仪器还可揭示蒸腾耗水量与光辐射强度等环境因子的关系,但只能测定较小的苗木。

1.6 示踪同位素法

上世纪 70 年代,Kline 等将氙水作为一种示踪法注入树干木质部内以研究水分传导速率。满荣洲(1986)、陈杰(1990)等分别用氙水作为示踪剂测定了华北油松林、红松、柞树蒸发和蒸腾,认为该方法比较方便,具有应用价值。

1.7 光合系统测定仪法

用 Licor-6400 便携式光合系统测定仪或其它型号的光合-蒸腾仪进行测定,简便易行,且与其它生态或气象因子传感器以其与数据采集器连接,利用专用软件实现对树木叶片蒸腾速率的定期或连续不间断测定,并蒸腾速率和环境因子波动曲线。该方法所测数据为瞬时蒸腾速率,反映树木的潜在耗水能力,与树木实际耗水速率数值差异较大,只能用于比较不同树种耗水特性,而不能用于精确推算实际耗水量。

1.8 热脉冲法及热扩散边材液流探针(Thermal dissipation sap flow velocity probe, TDP)法

热脉冲法由 Edwards 等人总结他人理论技术,形成第一代热脉冲液流检测仪(Heat pulse recorder, HPVR)。因实际测量操作误差对测量精度产生较大影响,且操作困难,使用不便,Granier 等把该系统改进为热扩散液流探针(TDP)。这种方法能连续或任意时间间隔测定液流速度,也可与其它生态或气象因子传感器以其与数据采集器连接,利用专用软件实现树干边材液流的连续不间断测定,并绘制边材液流和环境因子波动曲线和相应的表格^[5]。20 世纪 90 年代以后,本方法测定单木蒸腾耗水日益完善,并与生态学尺度转换方法有机结合,为直接测定林分蒸腾耗水量提供了可能,同时,该方法还克服了微气象方法对下垫面和气体稳定度要求严格的限制,以及水文法较大不确定性的缺点^[1],能够动态地掌握整株树木的蒸腾耗水规律,并揭示其生态、生理作用机理^[2]。

另外,为了明确这些测定方法的准确性和实用性,刘奉觉、巨关升^[3,4]等人先后对一些蒸腾测定方法进行了比较研究,建议可以根据经费和设备条件进行选择,对所测数据一般比较研究不必进行订正处理,用于天然植被蒸腾耗水量计算的数据则必须进行合理校正。提高测量准确性的途径是技术方法的校准。基层单位可以采用称重法,其估计误差不大于 30%,如能用整树容器法或气孔计进行细致的校准,将会

大大提高测定的准确性。

2 不同树种耗水特性的研究

树种蒸腾的差异是外界环境因子和内在生理遗传综合作用的结果,在同一条件下,不同树种蒸腾的差异反映了树种间遗传特性的不同,为自然条件尤其是降水量不同的地区选择适宜耗水量的树种提供了条件,这也是研究树种蒸腾耗水量的意义所在。

2.1 树种蒸腾强度的变化

树木长期适应环境变化,在蒸腾等生理上形成了对环境的适应机制,在整个生长季,植物蒸腾速率既有日变化,又有季变化。一天中树木蒸腾速率变化曲线呈单峰型或双峰型,即早晨和傍晚低,中午前后达高峰,季节变化也是呈单峰型或呈双峰型,平均蒸腾速率树种间不同,且阔叶树种大于针叶树。蒸腾速率日进程沙枣在水分较好条件下呈单峰曲线,在较干旱条件下呈双峰曲线^[6],杜仲叶片则在晴朗和晴—多云天气日呈双峰型,在阴天天气呈单峰型。山杨等 10 多种树木在长白山则表现出了与常规不同的日进程模式,即清晨和傍晚树木蒸腾速率有回升现象,这种现象可能和保卫细胞内某种代谢途径或代谢方式的开启与关闭需要克服的阻力有关。不同树种蒸腾速率日变化和季节变化规律既有相同处,又有与生物学特性和所处环境相适应的特性。

2.2 蒸腾速率与环境因子的关系

植物蒸腾是植物调节体内水分平衡的主要环节,是对变化着的环境的适应,与环境因子关系密切。为了探明树木蒸腾与环境因子的关系,余清珠等人研究得出,刺槐等树种蒸腾速率与环境因子的偏相关系数光照强度>气温>风速>空气相对湿度,光照强度和气温是影响蒸腾的主要环境因子,与许多人研究油松、沙棘、枣树、杉木的所得结果一致,而与刘淑明研究油松所得结果稍有差异^[7]。

郭连生等人研究樟子松等 9 种树苗得出,土壤供水充分时,影响蒸腾强弱的环境因子主要是气象因子,不同树种受各因子影响程度不同,但太阳生理辐射对所有树种的影响都显著,在土壤供水不足出现水分胁迫时,蒸腾速率与土壤含水量和叶水势关系密切,极端干旱条件下,北京杨、河北杨等树种蒸腾速率与环境因子相关性较差,而 I—69/55 杨在淹水胁迫下蒸腾速率有所下降。

申登峰、杨、贾志清、韩蕊莲等人还分别把刺槐、沙蒿、花棒、柠条、油蒿等蒸腾强度与气温、有效光辐射、大气相对湿度及风速的关系进行了模拟,各自指出了影响蒸腾的关键环境因子,各有异同,即使同一树种在不同环境下关键因子也不尽相同,进一步说明植物蒸腾是一个复杂的过程,受多种环境因子综合影响,加之研究条件和手段及其所处地域等方面的差异,决定了建立一种通用的树木蒸腾速率—环境因子关系式是不大可能的。按最小限制因子定律,一定条件下树种蒸腾速率可能和最小限制因子关系最密切,这还需今后的研究予以证实。

2.3 蒸腾速率与气孔的关系

气孔是蒸腾作用的主要控制系统和关键控制因素,植物

80%~90%的水分通常有气孔散失,气孔关闭、开张、收缩和气孔阻力的变化影响植物蒸腾作用。气孔运动及其阻力大小决定于植物本身,也受环境因子影响。

张劲松(2002)等人发现杜仲气孔导度日变化趋势与蒸腾强度基本一致,阮成江在沙棘上也发现与之十分相似的现象,即气孔导度增大,沙棘蒸腾强度增大,反之则减少。陶汉之发现夏秋季节茶叶气孔和蒸腾增大或减小是同步的。而马书荣发现裂叶沙参气孔行为与蒸腾缺乏相关性,并指出裂叶沙参的气孔控制不显著,赵正阳等人在半干旱地区自然干旱条件下研究苹果时,还发现了与典型不同的气孔变化模式,即一天中气孔在早晨迅速开放后,即逐渐关闭,没有重新开放现象,并推论这可能是苹果适应干旱环境的主要机理之一。

另外,张利平等人研究发现花棒在沙漠地区典型高温低湿条件下叶片气孔导度日变化曲线呈现周期波动,与之对应,蒸腾速率也同步呈现周期波动,但蒸腾速度周期波动起始时间滞后于气孔导度的起始时间,而与陶汉之等人的结论有出入。植物对环境的适应使得水分利用效率达到最高,即气孔的开度对植物失去水分的调节中符合最优控制原理。

2.4 林地蒸腾耗水量及林地水量平衡的研究

森林耗水研究,林学家关注的重点是林木的蒸腾耗水量,及由其决定与造林有关的问题,森林生态学家和森林文学家的侧重点则放于森林蒸散耗水在森林水分循环中的地位、作用,以及与之相关的森林水分平衡等问题。森林耗水测试和研究方法很多,并在一定程度上都存在一定的缺陷。因测试和研究方法及研究目的不同,加之植物蒸腾耗水与土壤蒸发耗水不分,很难准确了解森林个体和群体水文效益,直到20世纪90年代以前在准确测定上仍没有一个普遍满意的方法,之后,随着热脉冲技术测定单木蒸腾耗水的日益完善,及其与生态学尺度转换方法的有机结合,直接测定林分蒸腾耗水量才成为了可能,并在国际上逐渐得以广泛应用。尽管如此,我国学者还是根据各自的需求和条件,采用不同的树木蒸腾测定方法,对林木耗水及森林水分平衡等进行了测定和分析,得出了许多有价值的结果。

从北到南,分布于东北的原始红松林、蒙古栎林、白桦林、人工樟子松,华北地区的人工油松林,分布于秦岭南坡的油松林、华山松林、锐齿栎林,苏南丘陵区的次生栎林,湖南的杉木人工林,和分布于海南尖峰岭的热带雨林和山地林,它们的林冠蒸腾或蒸散量,及其占年降水量的比例,林地降水分配及水循环等有关内容,在国家森林生态网络体系研究中从不同的角度,取得了非常珍贵的资料和有价值的结论。

在干旱黄土高原和北方沙(荒)漠地区,一些主要树种的蒸腾耗水特性尤其受到了重视,研究表明人工油松、刺槐林在晋西黄土区蒸腾占总耗水量的57.7%~60.2%,4~6月水分供需矛盾突出,雨季供水量大于耗水量。在宁夏西吉县蒸腾耗水量,灌木占同期降水量的61.66%~66.1%,乔木一般占107.9%~119.5%。在宁夏固原沙棘、柠条林年蒸腾耗水量分别是264.88 mm、121.33 mm,占同期降水量76.1%、40.1%,在延安沙棘蒸腾耗水量是257.6 mm,占降水量的63%,可以正常生长。

油蒿等乡土乔灌木在甘肃荒漠地区蒸腾量159~171.5 mm,占降水量的86.0%~91.6%;新疆杨等培育品种蒸腾量269.3~314.2 mm,高于同期平均降水量,要维持正常生长必需灌溉。在内蒙古毛乌素沙地,黑沙蒿等灌木生长季节蒸腾耗水量是106.28~434.788 mm,树种间差异很大。

由非连续的蒸腾速率测定值推算树木总的蒸腾耗水量一般常用的有三种方法,第一种是由公式蒸腾耗水量(W)=蒸腾速率(E) \times 鲜叶生物量(b) \times 蒸腾时数(h) $\times 10^{-3}$ 计算得出,上述研究结果大多由这种方法得出。

第二种方法是由日本林学家森川提出的分阶段模拟曲线积分法,将树种生长季蒸腾强度相近的划分为三个阶段,以时间为自变量(x),蒸腾强度为因变量(y),用二次曲线拟合,再在发生蒸腾作用的时间区域内对曲线求积分,进而结合林分叶生物量及非雨日天数推算整个林分的蒸腾量。申登峰、阮宏华等在研究中采用过此方法。

第三种方法就是建立植物叶面积指数季节变化方程,与蒸腾速率(观测资料)相乘,对时间求积分算得树木在生长季节的总蒸腾耗水量。董学军采用过这种方法。

值得一提的是,进入20世纪90年代,热脉冲技术(HPVR)及其改进技术——TDP在我国得以应用。1991年刘奉觉在国内首次采用HPVR对杨树蒸腾耗水量时空变化进行了研究,发现该技术测定值与快速称重法接近。2000年~2001年马履一用TDP研究发现,油松、侧柏边材输水效率比较接近,但树干输水效率油松超过侧柏,树种间耗水量差异很大。

1996年严昌荣利用HPVR研究得出,核桃楸在水分充足条件下树干液流速率一天中会出现数次波动,有多个峰值,夜晚时核桃楸树干液流速率非常低,日进程与大气相对湿度、温度同步,很大程度上由微气候因子决定,尤其是大气相对湿度、温度和太阳辐射强度等。鲁小珍、李海涛利用HPVR技术,王华田利用TDP技术分别对马尾松、栓皮栎、棘皮栎、五角枫和油松生长盛期树干液流变化与环境因子关系进行了研究,结论与严昌荣基本一致。

1999年孙鹏森研究得出,油松树干液流启动主要受光照影响,夜间基本无液流,自髓心起木质部10年生年轮以外都有较强的输水活动,理论上可定为边材与心材的界线,干旱胁迫下液流水平是正常情况下的1/6~1/10,断续明显,昼夜差别小。他们^[8]还以林分调查为基础,构建了油松、刺槐林边材面积随生长时间变化的增长模型,并通过潜在液流通量预测模型预测林分的潜在耗水量,开辟了不同现实条件下、不同树种间潜在耗水量比较的先河。

2001年熊伟分别采用胸径和边材面积作为空间纯量,在测定单木液流量的基础上,通过尺度放大转换估计了华北落叶松林分的蒸腾耗水量,发现以树干液流量为基准估计单木蒸腾量与“截干测定”观测值相差不大,以胸径为空间纯量换算得出的整个林分日蒸腾耗水估计值,小于以边材面积换算出的值,并解释出现这差异的原因是可能高估了边材面积^[9]。

马李一(2001)为解决边材面积的测定,对油松、刺槐胸

(下转第186页)

的研究和次生湿地生态系统的研究, 确定能流关系、适应对策和分布机理; 开展原生植被恢复模拟实验, 确定湿地生态系统脆弱性生境主导因子, 寻求恢复途径, 筹建示范区。确定种群源和廊道, 提出详细的保育和恢复技术规划, 提出方案, 进行示范实验; 总结各分项研究资料, 总结保育措施和恢复技术研究结果和示范实验, 进行鉴定和成果推广。

4.2 达到的主要技术目的

研究主要的针对性目标是自然环境演变和土地资源、石油开发后植被的恢复, 通过对于新生地、次生地和周边环境湿地生态系统(乃至景观)结构、动态的研究, 在较大范围

内获取必要的本底资料, 进而研究保育措施和恢复技术, 分析出自然生态系统功能健康的机制, 建立用当地野生植物快速恢复退化湿地植被的技术体系, 使恢复植被的生态功能指标(盖度、生产力、物种多样性等)达到类似生境的野生植物群落水平, 筛选出适宜不同生境湿地的优势野生植物群落类型, 建立主要湿地类型生态系统的功能健康评价指标体系和监测技术体系, 为进一步保护和开发利用该地区的资源与环境提供必要的理论指导和技术支撑。建立生态保育、生态恢复、生态重建示范点各 1~2 处, 设立定位监测试验示范点, 提出试验示范点湿地保育的相应技术对策。

参考文献:

- [1] 王天明, 房用, 等. 山东省湿地现状、存在问题及研究趋势[J]. 山东林业科技, 2001, (6): 14-16
- [2] 王仁卿, 等. 从第五届国际湿地会议看湿地保护与研究趋势[J]. 生态学杂志, 1997, 16(5): 72-76
- [3] 张高生, 等. 黄河三角洲自然保护区生物多样性及其保护[J]. 农村生态环境, 1998, 14(4): 16-18
- [4] 白军红. 黄河三角洲湿地资源及可持续利用对策[J]. 水土保持通报, 2000, 20(6): 6-10
- [5] 王仁卿, 张淑萍. 千年湿地会议评述[J]. 国际学术动态, 2001, (1): 34-37
- [6] 国家林业局科技局. 中国湿地保护行动计划[M]. 北京: 中国林业出版社, 1997
- [7] 国家林业局科技局. 中国湿地保护研讨会文集[C]. 北京: 中国林业出版社, 1998

(上接第 179 页)

径与边材面积的关系进行了研究, 发现边材面积与胸径之间呈较高的相关性, 并建立了模型, 并提出不同的水文立地条件下, 模型会有些变化; 通过实测标准地的胸径分布, 可以推算出林地边材面积的分布; 利用 HPVR 测定单木液流量, 可以推算林分的实际耗水量^[10]。

3 未来研究展望

水资源的保护和平衡问题, 仍是今后一个相当长的时期人们所关注的焦点, 森林作为维护、恢复生态平衡的主体和生物圈水循环的重要环节, 关于林木蒸腾耗水规律、对环境的影响和对环境的适应机制等方面的研究必将持续下去, 也

必然推动理论和研究方法的进步。

HPVR 和 TDP 技术在研究较大树体(乔木)蒸腾特性方面有明显优势, 树木与林分水平耗水的尺度转换还有很多工作要做, 与之对应, 现阶段一些传统方法在研究幼林和灌木林蒸腾方面还会发挥其不可替代的作用。我国南北和东西自然环境(尤其是降水和温度)差异很大, 南方及东部降水较为充足的地区, 今后植物蒸腾机理及其在维护较大范围的水循环中的作用仍是研究重点, 北方内陆地区不同树种间蒸腾耗水量的差异, 及由其决定的适于当地降水条件的林木栽植密度还将是今后研究的主要内容。

参考文献:

- [1] 魏天兴, 朱金兆, 等. 林分蒸散耗水量测定方法述评[J]. 北京林业大学学报, 1999, 21(3): 85-91
- [2] Anfodillo, et al Applications of a thermal imaging technique in the study of the ascent of sap in woody species[J]. Plant Cell and Environment 1993, (16): 997-1001
- [3] 魏天兴, 朱金兆, 等. 水分蒸散耗水量测定方法述评[J]. 北京林业大学学报, 1999, 21(3): 85-91
- [4] 巨关升, 刘奉觉, 等. 稳态气孔计与其它三种方法蒸腾测值的比较研究[J]. 林业科学研究, 2000, 13(4): 360-365
- [5] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas fir stand by means of sap flow measurements[J]. Tree Physiology, 1987, (7): 309-320
- [6] 杨, 高清竹, 等. 库布齐沙地油蒿蒸腾作用特征及其与环境因子的关系[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 1999, 30(3): 372-376
- [7] 刘淑明, 孙丙寅, 等. 油松蒸腾速率与环境因子的研究[J]. 西北林学院学报, 1999, 14(4): 27-30
- [8] 孙鹏森, 马李一, 等. 油松刺槐林潜在耗水量的预测及其与造林密度的关系[J]. 北京林业大学学报, 2001, 23(2): 1-6
- [9] 熊伟, 颜辉, 等. 宁南山区华北落叶松人工林蒸腾耗水规律及其对环境因子的影响[J]. 林业科学, 2003, 39(2): 1-7
- [10] 马李一, 孙鹏森, 等. 油松刺槐单木与林分水平耗水量的尺度转换[J]. 北京林业大学学报, 2001, 23(4): 1-5