

基于热比率法的青海云杉林蒸腾量估算

杨军军^{1*} 封建民¹ 何志斌²

¹咸阳师范学院资源环境与历史文化学院, 陕西咸阳 712000; ²中国科学院西北生态环境资源研究院, 兰州 730000

摘要 流域上游森林蒸腾量的准确估算对于干旱区水资源管理至关重要。该文采用热比率法的树干液流技术对青海云杉 (*Picea crassifolia*) 单木和林分蒸腾量进行了估算和转换, 目的在于通过该研究为不同尺度森林蒸腾量估算提供一个系统的解决方案。研究结果如下: 第一, 青海云杉胸径与边材面积间存在显著指数函数关系, $R^2 = 0.94$, $p < 0.0001$; 第二, 热比率法的青海云杉蒸腾量测量中, 理论值与观测值间的比例系数为1.09, 观测值偏小; 第三, 基于单木平均液流速率和林分总边材面积的林分蒸腾量计算中, 不同胸径样树液流速率的异质会导致液流速率被高估或低估近1/3; 第四, 基于单木胸径与液流量间关系的林分液流估算技术能够更合理地估算青海云杉蒸腾量。根据该文研究结果, 基于探针式液流测量技术可以更为科学地对单一树种研究区不同尺度的蒸腾量进行估算。

关键词 蒸腾量; 尺度上推; 热比率法; 青海云杉

杨军军, 封建民, 何志斌 (2018). 基于热比率法的青海云杉林蒸腾量估算. 植物生态学报, 42, 195–201. DOI: 10.17521/cjpe.2017.0082

Estimating whole-tree water use of *Picea crassifolia* based on heat ratio method

YANG Jun-Jun^{1*}, FENG Jian-Min¹, and HE Zhi-Bin²

¹College of Resource & Environment and Historical Culture, Xianyang Normal University, Xianyang, Shaanxi 712000, China; and ²Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

Abstract

Aims Accurate estimation of forest transpiration in the upper reach of the watershed is vital to the management of water resources in arid region. The objective of this study was to provide a systematic method for calculating the forest evapotranspiration at different scales.

Methods In this study we measured the whole-tree transpiration using the heat ratio method technology and estimated the stand- and catchment-transpiration employing the upscaling methods.

Important findings The main results and conclusions were as follows: First, the diameter at breast height (DBH) exhibited significant correlations with sapwood area, and the correlation was characterized by the exponential function ($R^2 = 0.94$, $p < 0.0001$). Second, in the weighted calculation of sap-flux measurements based on two-point thermocouples and sapwood area of *Picea crassifolia*, the correction coefficient between the true value and the observation value was 1.09. Third, when calculating sap-fluxes based on the average-sap-flux and total sapwood area of stand-transpiration, ignoring sap-flux velocity heterogeneities of trees led to transpiration rates being overestimated or underestimated by nearly one third; Fourth, the stand-transpiration estimation method based on the relationship between DBH and sap-flux can give a more reasonable prediction of *Picea crassifolia* transpiration. The results indicated that the probe-based sap-flux measuring technology would perform well for the transpiration scaling-up calculation at the catchment with only one single tree species, and the calculation methodology can be applied to other watersheds.

Key words transpiration; upscaling; heat ratio method; *Picea crassifolia*

Yang JJ, Feng JM, He ZB (2018). Estimating whole-tree water use of *Picea crassifolia* based on heat ratio method. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 42, 195–201. DOI: 10.17521/cjpe.2017.0082

收稿日期Received: 2017-03-30 接受日期Accepted: 2018-01-04

基金项目: 国家科技支撑计划(2014BAL01B03)、国家自然科学基金(41522102)和陕西省重点科技创新团队计划项目(2016KCT-23)。Supported by the National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China (2014BAL01B03), the National Natural Science Foundation of China (41522102) and the Shaanxi Province Key Science and Technology Innovation Team Project (2016KCT-23).

* E-mail: junjun_yang@126.com

祁连山是中国西部干旱、半干旱区多条内陆河的产水区, 其中段北坡为中国第二大内陆河黑河上游, 流域上游产水是维持中下游居民生活、生产用水和生态环境稳定的重要保障。在森林覆盖率较大的流域, 森林是流域的重要耗水区(He *et al.*, 2012; Jasechko *et al.*, 2013), 青海云杉(*Picea crassifolia*)作为祁连山水源区的一个主要树种, 覆盖面积占所在区域水源涵养林的24.74% (田风霞, 2011)。因此, 青海云杉林的面积大小、林龄组成及林分结构等都与流域出水量的大小密切相关。

近年来, 随着祁连山人工林种植面积的增加(陈幸良等, 2014), 森林面积和结构变化可能引起的流域径流变化已经成为一个重要问题。流域上游森林演替过程所引起的蒸腾量变化急需准确估算, 然而受森林结构空间异质性和观测技术的限制, 如何准确估算不同尺度森林蒸腾量一直是该领域的研究热点(Ungar *et al.*, 2013; Schlaepfer *et al.*, 2014; de Dios *et al.*, 2015; Su *et al.*, 2016)。随着技术进步, 液流估算技术越来越成熟(Kume *et al.*, 2012; Shinohara *et al.*, 2013; Chang *et al.*, 2014b; de Dios *et al.*, 2015), 热比率法作为目前最先进的单木树干液流测量技术(van de Wal *et al.*, 2015), 测量精度已在全球诸多研究中得到广泛论证, 同时测量技术也在不断地完善和规范(Shinohara *et al.*, 2013; Chang *et al.*, 2014a; Sus *et al.*, 2014; de Dios *et al.*, 2015; van de Wal *et al.*, 2015; Su *et al.*, 2016)。热比率法测量中, 探针两个热电偶测量点上的液流速率并不相同, 例如Chang等(2014a)发现青海云杉蒸腾速率随边材深度增加呈高斯函数变化, 但其对胸径>35 cm植株的采样仅2个, 结果的合理性需要进一步确认。而Gebauer等(2008)对8种散孔材和环孔材的单木分析发现, 不同单木间液流速率在边材上的分布各异。因此, 针对不同树种, 两点式热比率法如何更为准确地估算树木边材区域液流量有待做进一步的细化和优化研究。

在基于单木的林分蒸腾估算中, 已有研究均采用观测单木液流速率的平均值和林分边材总面积估算林分蒸腾量(Wilson *et al.*, 2001; Fiora & Cescatti, 2008)。该算法的前提是假设所有单木的蒸腾速率相同, 但客观现实中不同胸径单木液流速率是否相同需要进一步验证。如果不同, 按照已有研究方法, 林分蒸腾量计算可能产生多大误差? 我们又该如何对林分蒸腾量进行估算? 这些蒸腾量尺度转换中存在

的问题都需要进一步探讨和研究。

因此, 本研究以我国西北部半干旱区祁连山排露沟流域典型森林青海云杉为研究对象, 基于林分调查数据和生长季单木树干液流观测数据, 对林木蒸腾量进行了估算和尺度转换, 以期为青海云杉林蒸腾量的量化、分析和模拟预测提供理论支持, 最终为区域森林生态水文功能的认识和营林管理提供借鉴。

1 研究区概况

研究区位于中国西北部祁连山中段北坡的排露沟小流域, 地理位置为38.40° N, 100.28° E。流域面积为2.91 km², 地形复杂多变, 海拔2 650–3 800 m。流域出口年降水量为376 mm, 其中约65%的降水集中在7至9月, 随海拔升高, 每100 m降水量增加约4.3% (He *et al.*, 2012)。年平均气温1 °C, 其中最低温在每年12月下旬(−27.6 ± 3.0) °C, 最高温在每年7月下旬(25.6 ± 2.4) °C。流域植被空间分布随地形、海拔和坡向而异, 高海拔以灌丛草地为主; 中低海拔阳坡为草地, 阴坡和半阴坡以林地为主。青海云杉是流域内的唯一乔木树种。林地土壤以灰褐土为主, 土壤厚度随海拔升高逐渐减小, 平均厚度1 m左右, 成土母质以钙质岩为主。

2 研究方法

2.1 单木液流测量

实验样地共布设8部热比率树干液流仪器(SFM 1 Sap Flow Meters, 探头为HRM30, ICT International PTY, Armidale, Australia)。选择样树时, 保证样树胸径分布能够代表区域林分胸径的基本情况, 样树的生理学和物理学参数见表1。根据林分实地调查(图1), 研究林分以中小树型为主, 且随着胸径增大, 树木所占比例逐渐减小。探针安装时选择位于树干胸径位置(约树高1.3 m处)朝北方向表面平整的部位为安装点。安装前, 去掉安装部位的树皮使边材外露, 固定钻孔模具时, 要保证模具上3个钻孔连线的方向与树干方向保持平行。探针安装时先用硅胶浸泡探针, 以保证安装后探头和木质部间紧密接触。探针安装深度35 mm, 垂直间距为5 mm, 从图中可见调查样木胸径分布基本能够代表样地主要胸径分布。安装完成后, 用硅胶将树皮损坏部位进行包裹, 避免外漏木质部发生蒸发, 最后用铝箔对探头周边

表1 青海云杉树干液流测量样木的生物、生理学统计参数
Table 1 Biometric and physiological parameters of sap flow measurements for *Picea crassifolia*

样树编号 Sample tree number	树高 Tree height (m)	胸径 Diameter at breast height (cm)	冠幅宽度 Crown width (m)	冠幅投影面积 Crown projection area (m ²)	树皮厚度 Bark depth (cm)	心材半径 Heartwood radius (mm)	边材厚度 Sapwood width (mm)	边材面积 Sapwood area (mm ²)
1	16.1	22.2	4.24	14.07	0.6	67	37.5	20 327.0
2	14.2	16.0	4.29	14.16	0.6	42	32.1	11 694.6
3	13.0	15.5	3.38	10.35	0.6	40	31.7	11 090.7
4	11.3	11.4	2.68	8.13	0.6	22	28.6	6 599.9
5	5.5	6.2	2.01	6.34	0.3	8	20.5	2 286.3
6	5.3	5.0	1.60	5.50	0.3	8	14.5	1 343.8
7	4.2	5.1	2.26	6.91	0.3	8	15.0	1 413.7
8	3.8	4.1	2.11	6.55	0.3	8	10.0	785.4

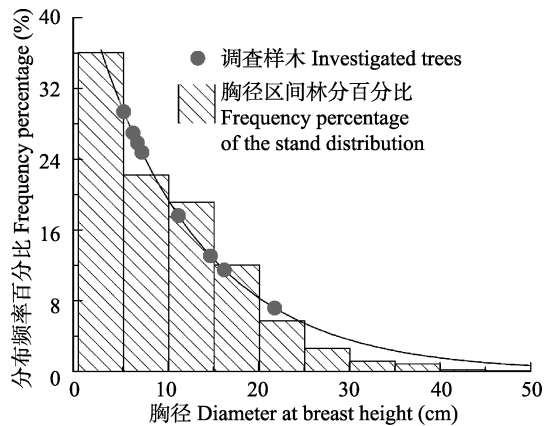


图1 调查林分胸径频率分布及调查样木胸径分布。
Fig. 1 Frequency percentage of diameter at breast height at investigation stand and the diameter of sample trees.

进行包裹, 以避免环境和辐射温度对测量探头的影响, 液流观测时间段为生长季。

2.2 边材面积计算

通过大量砍伐观测单木获取边材面积显然是不可取的, Chang等(2014b)发现青海云杉胸径与边材面积间存在良好的函数关系, 为青海云杉边材面积计算提供了更为便捷的估算方法。但Chang等(2014b)研究中的采样点较少(17个), 且拟合函数对胸径35 cm以上青海云杉的样本较少, 函数的代表性存在较大不确定性。为了提高拟合函数在该胸径范围内的准确性, 提高基于胸径的边材面积估算精度, 2015年8月在祁连山青海云杉样地调查了胸径频率分布均匀的84株单木, 取样168个。

取样时, 以直径为6 mm的生长锥按照单木胸径大小分布, 对生长状况良好的84株单木进行树芯取样, 每株单木以90度夹角分别取两个树芯, 取样高度为树高距地面1.3 m处。树芯边材厚度通过浓度为40%的HClO₄和福尔马林溶液进行染色确定, 染色后, 边材颜色较浅而心材颜色较深, 根据颜色差

异, 用游标卡尺测量获得单木的边材和心材厚度, 以同一单木两个树芯的平均值作为该单木边材和心材的厚度。另外, 由于青海云杉树干挺拔、匀称, 边材厚度分布均匀, 边材面积可以按圆环进行计算。统计发现胸径与边材厚度之间存在良好的指数函数关系(图2)。

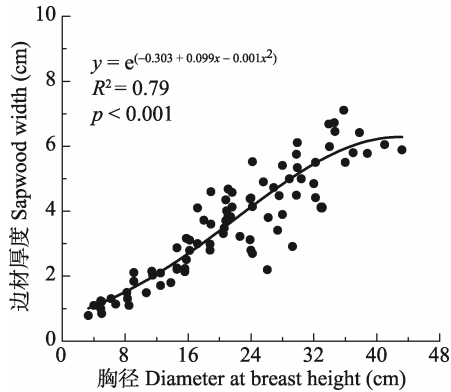


图2 青海云杉胸径(x)与边材厚度(y)变化拟合函数。
Fig. 2 Relationship between diameter at breast height (x) and sapwood width (y) for *Picea crassifolia*.

2.3 单木蒸腾量估算方法

热比率法树干液流测量过程中, 将两个温度探针等距插在热探针的上下方, 探针间垂直距离为5 mm。每个温度探针上, 在距离探头顶端7.5 mm和22.5 mm的地方分别内置一个热电偶, 用于感应来自热探头的热脉冲, 最后, 根据热脉冲发射和接收时的温度差计算两测量点间的液流速率(Burgess et al., 2001), 计算过程如下:

$$V_h = \frac{k}{x} \ln \left(\frac{v_1}{v_2} \right) \times 3600 \tag{1}$$

式中: V_h 为热脉冲速率, k 为鲜材热扩散系数, x 为热探头与温度探头间的距离, v_1 和 v_2 分别为上行和下行方向上温度的变化量, 对应液流速率(V_s)计算公

式如下:

$$V_s = \frac{V_h \rho_b (c_w + m_c c_s)}{\rho_s c_s} \quad (2)$$

式中: ρ_b 为木材密度(干材质量/鲜材体积), c_w 和 c_s 分别为鲜材比热容($1\,200\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$, 20 °C), 液流比热容(水, $4\,182\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$, 20 °C), m_c 和 ρ_s 分别为鲜材含水量和密度。

在单点液流速率计算的基础上, 以两热电偶中间位置为分割点, 将单木边材横断面分为内外两个环形区域, 单木总蒸腾量 Q 可按如下公式计算:

$$Q = V_s A_s = V_{ot} A_1 + V_{in} A_2 \quad (3)$$

式中: V_{ot} 和 V_{in} 分别为温度探头内外热电偶的液流速率, A_1 和 A_2 分别为外环和内环的面积。

2.4 林分蒸腾量的估算方法

林分蒸腾量估算是蒸腾量尺度转换的关键(Kume *et al.*, 2012; Hentschel *et al.*, 2013; Shinohara *et al.*, 2013), 胸径作为森林蒸腾量计算的一个重要变量, 在蒸腾量尺度转换中至关重要。根据定义, 林分总蒸腾量即林分内所有单木蒸腾量的总和:

$$Q_{sd} = \sum_{i=1}^n Q_i \quad (4)$$

式中, i 代表林分内第 i 株单木, 林分树木总数为 n , Q_i 为第 i 株单木的蒸腾量, Q_{sd} 代表林分总蒸腾量。

实际操作中, 我们无法对林分内的所有树木测量蒸腾量, 然后求和。对此, 已有研究提出通过计算林分总边材面积和林分平均液流速率估算林分的总蒸腾量, 但该方法存在上文中所提及的几点不确定性, 该算法的合理性有待进一步验证。

对此, 本文提出以下林分蒸腾量的计算方法。首先, 假设单木蒸腾量与胸径间存在直接关系, 即根据已有胸径液流观测数据可以估算出其他胸径的蒸腾量大小; 其次, 选择一个能代表研究区林分胸径分布情况的调查样地, 测量样地内所有单木的胸径, 结合观测单木蒸腾量, 根据上文假设中胸径与蒸腾量的拟合即可计算出样地总蒸腾量; 最后, 通过林分面积和调查样地总面积间的比例估算林分总蒸腾量 Q_{sd} :

$$Q_{sd} = \frac{A_s}{A} Q_t \quad (5)$$

$$Q_t = \sum_{k=1}^m Q_k \quad (6)$$

式中, A_s 为林分面积, A 为样地面积, Q_t 为选择样地的

总蒸腾量, m 为样地内样树数量, Q_k 为样地内第 k 株单木的蒸腾量。

2.5 流域蒸腾量估算方法

本研究针对树种单一、林相接近的林区情景, 提出采用不同林分平均蒸腾量与对应面积加权求和直接测量获得流域平均蒸腾量, 计算公式如下:

$$Q_w = \sum_{i=1}^n Q_{sti} \times A_{sti} \quad (7)$$

式中, Q_w 为流域平均蒸腾量, Q_{sti} 和 A_{sti} 为第 i 个林分的平均蒸腾量和面积, n 为流域被划分的林分数。

3 结果和分析

3.1 单木蒸腾量与胸径间关系的验证

在林分蒸腾量估算前, 首先对上文中单木蒸腾量与胸径间的关系进行分析。对生长季观测样树蒸腾量与边材厚度间关系分析发现, 两者间存在典型的指数函数(图3; 公式8)。同时, 由于边材厚度与胸径间存在特定的函数关系(详见Chang等(2014b)), 因此上文假设成立, 研究计算方法可行。

$$y = e^{(5.18 - 0.05x + 0.004x^2)} \quad (8)$$

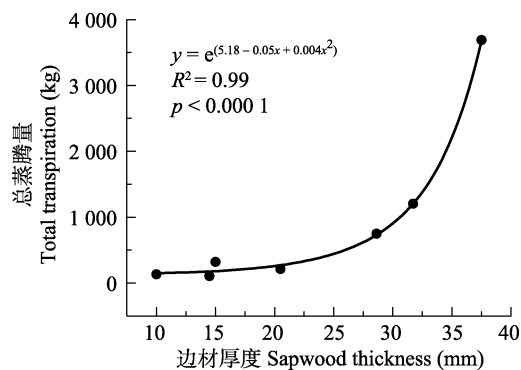


图3 青海云杉边材厚度与总蒸腾量间的变化关系。此处总蒸腾量为2015年7月23日到10月25日之间不同胸径青海云杉的总蒸腾量。

Fig. 3 Sap flow variation patterns of sapwood width for Qinghai spruce. Total transpiration was the transpiration of sample trees between July 23th and October 25th in 2015.

3.2 单木蒸腾量估算

单木蒸腾量的估算需要基于测量点观测结果进行尺度转换(Berdanier *et al.*, 2016), 尺度转换中, 边材面积的准确估算是液流量估算的一个关键。

3.2.1 观测蒸腾量校正

van de Wal等(2015)对液流速率在边材厚度和观测时间上的变化探讨后指出, 单木蒸腾量的估算必须考虑液流速率在边材空间和观测时间上的变异

性。Chang等(2014a)对青海云杉液流速率随边材厚度的变化发现, 液流速率与边材厚度间呈典型的高斯函数分布。因此, 单木液流量 Q 是液流速率在边材宽度上的积分(公式9) (Chang *et al.*, 2014b)。

$$Q = \int_0^R f(x)dx \tag{9}$$

式中, R 为边材深度, $f(x)$ 为液流速率随边材深度变化的高斯函数。热比率法探针测量时能够获得距离边材外边缘12.5 mm和27.5 mm两点的观测值。为了评价热比率探针上两测量点对液流速率估算的准确性, 我们分别对高斯函数边材厚度0–40 mm范围内热比率探针两热电偶(外电偶和内电偶)采样点对应面积的积分与理论函数积分估计值进行计算(公式10)。

$$c = \frac{\int_0^{40} f(x)dx}{\int_0^{12.5} f(x_1)dx + \int_0^{27.5} f(x_2)dx} \tag{10}$$

式中, $f(x)$ 为液流速率随边材深度变化的高斯函数, $x_1 = 12.5$ mm, $x_2 = 27.5$ mm分别为热比率探针上两个热电偶的位置。即, 第一部分为: 测量探针外电偶所对应的液流积分区间与测量探针内电偶对应的液流积分区间, 第二部分为: 高斯曲线与 x 轴间面积

为理论液流积分区间。结果发现两者比值 $c = 1.09$, 即青海云杉液流量计算中, 理论值与观测值的比值为1.09, 借助该校正系数, 可以对观测液流量 Q 进行校正, 计算过程见公式(11)。

$$Q = c \times Q_o \tag{11}$$

式中, $c = 1.09$, Q_o 为实测液流量, 计算过程见公式(1)(2)(3)。

3.2.2 单木蒸腾量计算

蒸腾量观测主要集中在生长季, 我们对观测期每月日平均蒸腾量进行统计(表2)。统计结果中, 不同胸径单木蒸腾量差异显著, 如7月份胸径为22.2 cm的单木蒸腾量为68.67 kg·d⁻¹, 胸径为11.4 cm的单木蒸腾量为17.89 kg·d⁻¹, 而胸径为5 cm的单木蒸腾量仅为7.54 kg·d⁻¹。不同胸径单木间蒸腾量并不呈线性分布, 因此在单木蒸腾量计算中不同胸径单木必须独立计算, 即代表林分平均胸径单木的蒸腾量不能代表林分的平均蒸腾量。

在时间尺度上, 胸径小于10 cm的单木在9到10月蒸腾量已变得非常小, 即非生长季液流量可忽略不计, 因此在年蒸腾量计算中, 可忽略非生长季的蒸腾量。但当样树胸径大于10 cm时, 该时段仍然存在

表2 观测期青海云杉逐月日均蒸腾量(平均值±标准偏差)(kg·d⁻¹)
Table 2 The daily mean whole-tree water use in each month in the observational period (mean ± SD)(kg·d⁻¹)

月份 Month	样树编号 Sample tree number						
	1	3	4	5	6	7	8
7月 July	68.67 ± 6.49	29.97 ± 4.19	17.89 ± 2.24	5.37 ± 0.33	7.54 ± 0.87	3.81 ± 0.43	2.78 ± 0.11
8月 August	44.55 ± 9.09	14.77 ± 4.41	9.74 ± 2.57	2.93 ± 0.89	4.36 ± 1.27	1.40 ± 0.53	1.81 ± 0.42
9月 September	34.83 ± 9.50	9.98 ± 3.29	6.88 ± 3.01	1.72 ± 0.72	2.56 ± 1.29	0.53 ± 0.09	0.97 ± 0.28
10月 October	25.81 ± 6.68	6.99 ± 1.43	3.16 ± 1.20	0.95 ± 0.31	1.64 ± 0.68	0.41 ± 0.03	0.79 ± 0.18

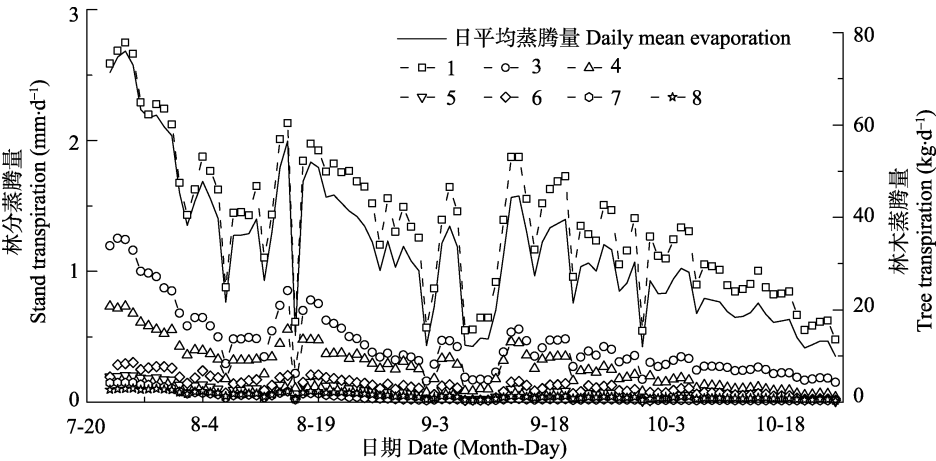


图4 观测期(7月23日到10月25日)林分蒸腾量与单木蒸腾量间对比关系。
Fig. 4 Stand sap-flow pattern and tree sap-flow patterns on seven measured trees during the observational period (between July 23th and October 25th in 2015).

在一定的蒸腾量, 因此, 在年蒸腾量计算中, 胸径大于10 cm的单木蒸腾量需要有观测记录, 不能忽略。由于已有观测数据时间段较有限, 对于其余月份的情况, 还需要更多数据进一步分析和探讨。

3.3 林分蒸腾量估算

同一林分的单木之间, 由于组成、起源、林相、林龄和空间分布非常接近, 为林分蒸腾量估算奠定了基础。

根据上文计算方法, 2 700 m样地的各单木及林分蒸腾量见图4。林分与各单木蒸腾过程基本保持一致。经统计, 观测时段林分日平均蒸腾量为1.17 mm, 其中每日最大蒸腾量为2.68 mm, 最小蒸腾量为0.35 mm。研究结果比Chang等(2014b)在该流域针对2011和2012年生长季蒸腾量的研究结果稍偏小, 这可能是因为本研究观测时间段位于生长季末期, 相比Chang等(2014b)的研究时段林木液流活动减弱, 液流量相对较小所致。

林分蒸腾量计算中, 如果只对胸径大于10 cm的单木液流速率进行林分蒸腾量估算, 按照Chang等(2014b)、Pataki和Oren (2003)和Wilson等(2001)的林分蒸腾量估算方法, 经计算观测期林分蒸腾量为1.54 mm, 最大蒸腾量为3.47 mm, 最小值为0.49 mm, 相对本研究结果, 日平均蒸腾量偏高约32%。由此可见, 林分蒸腾量计算中如果选择样树胸径分布不均或者只基于部分样树进行林分蒸腾量估算, 均有可能产生一定的误差。林分蒸腾量估算中不能通过部分单木液流速率的平均值和林分边材总面积计算林分总蒸腾量。

冠层蒸腾量的准确计算是流域水量平衡计算的一个关键环节和参数(McJannet *et al.*, 2007)。本文由于观测数据有限, 不对流域冠层蒸腾量进行计算, 在日后的工作中可以根据实际情况, 按照本研究的冠层蒸腾量计算办法对流域蒸腾量进行估算。

4 结论

单木、林分和流域蒸腾量的准确估算对于森林生态系统水文功能的计算和理解至关重要。本研究以青海云杉为研究对象, 分别就单木蒸腾量的观测和不同尺度蒸腾量的估算进行了分析, 得到以下结论: (1)通过青海云杉胸径可以准确地估算其边材面积, 函数关系为基于边材面积的单木蒸腾量估算提供了参数; (2)基于热比率法的双热电偶液流测量技

术, 理论值与观测值间比例系数为1.09; (3)林分蒸腾量计算中, 不同胸径样树间液流速率的差异, 会对基于平均液流速率和边材面积的蒸腾量计算带来一定误差; (4)生长季青海云杉林分蒸腾量估算中, 如果只对胸径大于10 cm的单木进行计算, 林分蒸腾量就会被高估近32%。

致谢 感谢原中国科学院寒区旱区环境与工程研究所祁连山森林生态系统观测点的所有工作人员在文章数据的采集中给予的积极配合和帮助。

参考文献

- Berdanier AB, Miniat CF, Clark JS (2016). Predictive models for radial sap flux variation in coniferous, diffuse-porous and ring-porous temperate trees. *Tree Physiology*, 36, 1–10.
- Burgess SSO, Adams MA, Turner NC, Beverly CR, Ong CK, Khan AAH, Bleby TM (2001). An improved heat pulse method to measure low and reverse rates of sap flow in woody plants. *Tree Physiology*, 21, 589–598.
- Chang XX, Zhao WZ, He ZB (2014a). Radial pattern of sap flow and response to microclimate and soil moisture in Qinghai spruce (*Picea crassifolia*) in the upper Heihe River Basin of arid northwestern China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 187, 14–21.
- Chang XX, Zhao WZ, Liu H, Wei X, Liu B, He ZB (2014b). Qinghai spruce (*Picea crassifolia*) forest transpiration and canopy conductance in the upper Heihe River Basin of arid northwestern China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 198, 209–220.
- Chen XL, Ju X, Lin KL (2014). Development status, issues and countermeasures of China's plantation. *World Forestry Research*, 27, 54–59. [陈幸良, 巨茜, 林昆仑 (2014). 中国人工林发展现状、问题与对策. 世界林业研究, 27, 54–59.]
- de Dios VR, Roy J, Ferrio JP, Alday JG, Landais D, Milcu A, Gessler A (2015). Processes driving nocturnal transpiration and implications for estimating land evapotranspiration. *Scientific Reports*, 5, 10975. DOI: 10.1038/srep10975.
- Fiora A, Cescatti A (2008). Vertical foliage distribution determines the radial pattern of sap flux density in *Picea abies*. *Tree Physiology*, 28, 1317–1323.
- Gebauer T, Horna V, Leuschner C (2008). Variability in radial sap flux density patterns and sapwood area among seven co-occurring temperate broad-leaved tree species. *Tree Physiology*, 28, 1821–1830.
- He ZB, Zhao WZ, Liu H, Tang ZX (2012). Effect of forest on annual water yield in the mountains of an arid inland river basin: A case study in the Pailugou catchment on northwestern China's Qilian Mountains. *Hydrological Processes*,

- 26, 613–621.
- Hentschel R, Bittner S, Janott M, Biernath C, Holst J, Ferrio JP, Gessler A, Priesack E (2013). Simulation of stand transpiration based on a xylem water flow model for individual trees. *Agricultural and Forest Meteorology*, 182–183, 31–42.
- Jasechko S, Sharp ZD, Gibson JJ, Birks SJ, Yi Y, Fawcett PJ (2013). Terrestrial water fluxes dominated by transpiration. *Nature*, 496, 347–350.
- Kume T, Otsuki K, Du S, Yamanaka N, Wang YL, Liu GB (2012). Spatial variation in sap flow velocity in semiarid region trees: Its impact on stand-scale transpiration estimates. *Hydrological Processes*, 26, 1161–1168.
- McJannet D, Fitch P, Disher M, Wallace J (2007). Measurements of transpiration in four tropical rainforest types of north Queensland, Australia. *Hydrological Processes*, 21, 3549–3564.
- Pataki DE, Oren R (2003). Species differences in stomatal control of water loss at the canopy scale in a mature bottomland deciduous forest. *Advances in Water Resources*, 26, 1267–1278.
- Schlaepfer DR, Ewers BE, Shuman BN, Williams DG, Frank JM, Massman WJ, Lauenroth WK (2014). Terrestrial water fluxes dominated by transpiration: Comment. *Ecosphere*, 5, 1–9.
- Shinohara Y, Tsuruta K, Ogura A, Noto F, Komatsu H, Otsuki K, Maruyama T (2013). Azimuthal and radial variations in sap flux density and effects on stand-scale transpiration estimates in a Japanese cedar forest. *Tree Physiology*, 33, 550–558.
- Su L, Xu WT, Zhao CM, Xie ZQ, Ju H (2016). Inter- and intra-specific variation in stemflow for evergreen species and deciduous tree species in a subtropical forest. *Journal of Hydrology*, 537, 1–9.
- Sus O, Poyatos R, Barba J, Carvalhais N, Llorens P, Williams M, Vilalta JM (2014). Time variable hydraulic parameters improve the performance of a mechanistic stand transpiration model. A case study of Mediterranean Scots pine sap flow data assimilation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 198, 168–180.
- Tian FX (2011). *Study on Eco-hydrological Processes of Qinghai Spruce (Picea crassifolia) Forest in the Qilian Mountains*. PhD dissertation, Lanzhou University, Lanzhou. [田风霞 (2011). 祁连山区青海云杉林生态水文过程研究. 博士学位论文, 兰州大学, 兰州.]
- Ungar ED, Rotenberg E, Raz-Yaseef N, Cohen S, Yakir D, Schiller G (2013). Transpiration and annual water balance of Aleppo pine in a semiarid region: Implications for forest management. *Forest Ecology and Management*, 298, 39–51.
- van de Wal BAE, Guyot A, Lovelock CE, Lockington DA, Steppe K (2015). Influence of temporospatial variation in sap flux density on estimates of whole-tree water use in *Avicennia marina*. *Trees*, 29, 215–222.
- Wilson KB, Hanson PJ, Mulholland PJ, Baldocchi DD, Wullschlegel SD (2001). A comparison of methods for determining forest evapotranspiration and its components: Sap-flow, soil water budget, eddy covariance and catchment water balance. *Agricultural and Forest Meteorology*, 106, 153–168.

责任编辑: 储诚进 责任编辑: 李 敏



扫码加入读者圈
听语音, 看问答