

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2022.006.019

桉树液流径向变化及其对整树蒸腾估算的影响

秦佳双, 顾大形*, 倪隆康, 何文, 林芙蓉, 周翠鸣

(广西喀斯特植物保育与恢复生态学重点实验室, 广西壮族自治区中国科学院广西植物研究所, 广西 桂林 541006)

摘要: [目的] 分析液流密度径向差异及其对整树蒸腾量估算的影响, 以为中大径级桉树人工林蒸腾的准确估算和尺度扩展提供可靠依据。[方法] 采用 Granier 热扩散探针法 (TDP) 测定了 10 年生中等径级尾巨桉 (*Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis*) 3 个边材径向深度 0~2、2~4、4~6 cm 的液流密度。[结果] 尾巨桉液流密度径向分布格局为递减型, 日变化格局均为单峰型。用单点径向深度 0~2、2~4、4~6 cm 液流密度代表整个边材液流密度估算的整树日蒸腾量 T_{r2} 、 T_{r4} 和 T_{r6} 较基于多点估算值 T_{r246} 分别高估 92.9%、低估 28.2% 和低估 74.0%。由于 0~2 cm 边材深度液流密度对环境变化较为敏感, 并且 T_{r2} 与 T_{r246} 之间的拟合精度较高 ($R^2=0.964$), 因此, 基于 T_{r2} 构建的整树日蒸腾量估算校正函数 $T_{r246}=0.522T_{r2}$ 有效的提高了整树蒸腾估算的便捷性和准确度。[结论] 中等径级尾巨桉液流密度具有明显的径向变化特征, 不考虑这种径向变化将会导致整树蒸腾估算的较大误差。基于边材最外侧 (0~2 cm) 液流密度估算的整树蒸腾经过校正后可以方便准确地估算中等径级桉树人工林蒸腾耗水。

关键词: 尾巨桉; 树干液流; 径向变化; 日蒸腾量

中图分类号: S718.43

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2022)06-0170-07

森林蒸腾在“土壤—植被—大气”水循环过程中起着关键作用, 根部吸收水分的 90% 以上均通过叶片蒸腾散失到大气中^[1]。作为连接树木吸水部位 (根系) 和蒸腾部位 (叶片) 的器官, 树干是树木水分传输的唯一路径^[2]。树干液流可较好地反映植物结构特征和外界环境对水分利用的综合调节作用^[3]。树干液流测量方法众多, 其中, 热扩散法 (TDP) 因使用简单、破坏性小、能连续监测等优点, 被广泛用于单木蒸腾耗水研究^[4]。

准确测量单木耗水量是进行森林水量平衡评价的基础, 也是估算森林生态水文功能的重要依据^[5]。目前, 利用热扩散法估算单木蒸腾时, 不少研究没有考虑液流密度的径向变化, 并采用边材最外层的液流密度代表整个边材的液流密度^[6-8]。然而, 树干边材液流密度的径向变化在许多树种中被发现,

如 Dang 等^[9] 和张璇等^[5] 发现, 新疆杨 (*Populus alba* var. *pyramidalis* Bunge) 和四川山矾 (*Symplocos setchuensis* Brand) 液流密度随边材深度的增加呈单峰型; 党宏忠等^[10] 证明了二白杨 (*Populus gansuensis* C. Wang et H. L. Yang) 液流密度的径向变化为不规则型; 在 Tomonor 等^[11] 和 Bodo 等^[12] 的研究中, 刺槐 (*Robinia pseudoacacia* Linn.)、辽东栎 (*Quercus liaotungensis* Koidz.) 和红松 (*Pinus resinosa* Loisel.) 液流密度由外向内均呈递减型。这表明, 树木边材液流密度的径向变化是普遍现象, 且有明显的种间变异。在估算单木蒸腾时, 如果以最外侧的液流密度代表整树边材液流密度, 必然会导致较大误差^[13-14], 并在估算林分蒸腾时进一步放大这种误差^[15]。Nadezhdina 等^[16] 认为, 不考虑树干径向

收稿日期: 2022-04-17 修回日期: 2022-05-26

基金项目: 广西科技计划项目 (桂科 AD20159086); 广西创新驱动发展专项 (桂科 AA17204087-9); 国家自然科学基金 (32060243, 41830648, 31870382); 广西喀斯特植物保育与恢复生态学重点实验室自主研究课题 (19-A-04-03, 20-065-7)

* 通讯作者: 顾大形, 博士, 副研究员, 主要研究方向: 植被生理生态。电话: 18290000901。Email: gudaxing2008@163.com

变化会导致-90%~300%的估算误差。因此,准确测量不同树种的边材液流密度径向变化,对提高森林蒸腾估测精度具有重要意义。

桉树由于生长快、轮伐期短、经济效益好,在我国南方大面积种植,其中,广西是目前我国最大的桉树种植区^[17]。作为主要速生用材林,桉树人工林耗水问题备受关注,需要准确估算以便正确评估其生态影响。目前,对桉树液流径向变化的研究还不充分,仅Zhou等^[18]和周翠鸣等^[19]分别研究了尾叶桉(*Eucalyptus urophylla* S. T. Blake)和尾巨桉(*Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis*)树干液流密度的径向变化,但其研究个体的树干直径较小(胸径<15 cm),中大径级(16~26 cm^[20])桉树液流密度的径向变化还未可知^[21]。随着经济发展,对大径级木材需求量的日益增加和桉树林可持续经营的需要,桉树大径材培育成为经营方向之一。为此,本研究通过特制的长度为2、4、6 cm 3种TDP探针,分别同步测量0~2、2~4、4~6 cm深度范围的液流密度,并基于单个深度的液流密度和综合3个深度液流密度分别估算整树蒸腾量,分析液流密度的径向差异及

其对整树蒸腾量估算的影响,以期为中大径级桉树人工林蒸腾的准确估算和尺度扩展提供可靠依据,这对准确评价大径级桉树人工林的生态水文效应具有重要意义。

1 研究地概况和试验材料

1.1 研究地概况

试验样地位于中国科学院桂林植物园内(110°17' E, 25°01' N),海拔150~300 m,林地土壤主要是砂页岩发育而成的红壤,属中亚热带季风气候区。年均气温19.2℃,极端最高气温40℃,极端最低气温-6℃。年均降水量1 865.7 mm,主要集中在4—8月。

1.2 试验材料

选择在广西种植面积最大的桉树品种尾巨桉为研究对象,在株行距为2 m × 3 m的10年生(2011年种植)尾巨桉人工林样地内,选取生长状况良好、树干圆满通直无挤压的5棵样树(表1),根据前期已构建的尾巨桉边材厚度^[19]和边材面积^[21]与胸径的经验关系,利用其胸径计算出边材厚度及相应的边材面积。

表1 样树形态特征

Table 1 Morphological characteristics of the test plants

编号 No.	胸径 Diameter at breast height/cm	边材厚 Sapwood thickness/cm	总边材面积 Total sapwood area/cm ²	0~2 cm边材面积 0~2 cm sapwood area/cm ²	2~4 cm边材面积 2~4 cm sapwood area/cm ²	>4 cm边材面积 >4 cm sapwood area/cm ²
A1	22.5	8.1	306.21	114.02	88.89	103.30
A2	20.9	7.6	266.60	105.32	80.18	81.10
A3	21.3	7.7	276.38	107.52	82.39	86.48
A4	24.9	8.8	371.88	127.34	102.21	142.33
A5	23.2	8.3	325.12	117.98	92.85	114.28

2 研究方法

2.1 液流测定

在树干距离地面1.3 m高度附近安装TDP探针。使用常规2 cm探针测量最外层边材(0~2 cm)液流密度。为减小外层边材较大破坏对液流径向传递的影响,使用测量规格相同的不同长度(4、6 cm)探针分别对2~4 cm和4~6 cm径向深度进行测量。每组上下探针的间距约10 cm,探针组间水平相隔约5 cm,并上下错位排列以避免不同组间探针的相互干扰。为减小光照等因素影

响,探针均安装于树干北向一侧,并用防辐射膜等材料进行包裹^[22]。于2021年6月至10月进行测量,使用CR1000数据采集仪记录每组加热探针和参比探针间的温差,30 s读取1次,10 min存储1次平均值。3个径向深度的液流密度均采用Granier提出的经验公式计算^[4]:

$$J_s = 119 \times [(\Delta T_m - \Delta T) / \Delta T]^{1.231}$$

式中: J_s 为瞬时液流密度; ΔT_m 为加热探针和参比探针间的昼夜最大温差; ΔT 是加热探针和参比探针间的瞬时温差。

整树日蒸腾量的计算公式:

$$T_{r246} = \sum_{i=1}^n [(J_{s2i}A_{s2} + J_{s4i}A_{s4} + J_{s6i}A_{s6}) \times t_i] / 1\ 000$$

$$T_{r2} = \sum_{i=1}^n (J_{s2i} \times A_s \times t_i) / 1\ 000$$

$$T_{r4} = \sum_{i=1}^n (J_{s4i} \times A_s \times t_i) / 1\ 000$$

$$T_{r6} = \sum_{i=1}^n (J_{s6i} \times A_s \times t_i) / 1\ 000$$

式中: T_{r246} 为基于 3 个径向深度 (0~2、2~4、4~6 cm) 液流密度和对应边材面积估算 (多点组合估算) 的整树日蒸腾量; T_{r2} 、 T_{r4} 和 T_{r6} 分别为只用径向深度 0~2、2~4、4~6 cm 边材液流密度代表整株边材液流密度估算的整树日蒸腾量 (单点估算); J_{s2i} 和 J_{s4i} 分别为径向深度 0~2 cm 和 2~4 cm 边材液流密度, J_{s6i} 为径向深度 4 cm 处到心材边界的边材圆环的液流密度 (本文桉树径向深度 6 cm 处到心材边界的厚度较小, 故假设径向深度 4 cm 边材到心材边界的液流密度是均匀的); A_s 、 A_{s2} 、 A_{s4} 和 A_{s6} 分别为单株总边材面积、径向深度 0~2、2~4、4 cm 以上边材的面积; t_i 为时间, 本文为 600 s; n 为数据日记录量。

以多点组合估算的 T_{r246} 为整树日蒸腾量的准确值, 其与单点估算的整树日蒸腾量 (T_{r2} 、 T_{r4} 和 T_{r6}) 的误差计算公式为:

$$V_2 = (T_{r2} - T_{r246}) / T_{r246} \times 100\%$$

$$V_4 = (T_{r4} - T_{r246}) / T_{r246} \times 100\%$$

$$V_6 = (T_{r6} - T_{r246}) / T_{r246} \times 100\%$$

式中: V_2 、 V_4 和 V_6 分别为只用单点径向深度 0~2、2~4、4~6 cm 边材液流密度估算的整树日蒸腾量与多点组合估算值的误差。

2.2 环境因子监测

利用桂林城市森林生态系统定位观测研究站的气象站 (距离实验地直线距离约 900 m) 持续观测林外光合有效辐射 (PAR)、空气温度 (T)、空气湿度 (RH) 等环境因子, 使用 CR1000 数据采集仪采集数据, 采集频率与液流数据同步。

采用水汽压亏缺 (VPD) 反映空气温度 (T) 和空气相对湿度 (RH) 的协同作用, 其计算公式为^[21]:

$$VPD = 0.611e^{[(17.5027)/(T+240.97)]} (1 - RH)$$

2.3 数据处理

选取降雨较多时段的晴天 (07—26、08—28、09—09) 或阴天 (09—01) 作为湿润期典型天气, 选取较长时间降雨少的晴天 (10—07) 或阴天 (10—12) 作为干旱期典型天气, 用以分析不同环境条件下尾巨桉边材液流密度径向变化的差异。液流密度采用 BaseLiner 3.0.8 进行计算。

3 结果与分析

3.1 液流密度径向的变化

图 1 为生长季湿润期 (a、b、c) 和干旱期 (d) 不同径向深度液流密度的日变化格局。不同条件下白天液流密度均随边材深度由外向内逐渐降低, 表现为 $J_{s2} > J_{s4} > J_{s6}$, 属于递减型。不同深度液流密度具有相似的日变化格局: 液流启动时间在 7:00—8:30, 并在午间前后达到峰值, 随后均逐渐下降。在湿润期, J_{s2} 和 J_{s4} 在早上的启动时间基本一致, 而 J_{s6} 的启动时间比 J_{s2} 和 J_{s4} 晚大约 0.5 h。在干旱期, J_{s2} 和 J_{s4} 在早上的启动时间基本一致, 而 J_{s6} 的启动时间比 J_{s2} 和 J_{s4} 晚大约 1 h。随着时间的推移, J_{s2} 峰值逐渐降低, 而 J_{s6} 和 J_{s4} 峰值变化较小。

3.2 不同环境条件下液流密度径向变化格局

由于夜间尾巨桉液流密度接近于零, 变化规律不明显, 本文仅对不同环境条件下白天 (6:00—19:00) 的平均液流密度的径向变化进行分析 (图 2)。不同环境条件下, 日平均液流密度随边材深度由外到内均表现为相同的径向分布格局, 即递减型。不同环境间液流密度在最外层 (0~2 cm) 差异明显, 随着边材深度增加不同环境间液流密度差异逐渐减小, 最内层 (4~6 cm) 液流密度在不同环境间较稳定。各深度液流密度基本表现为: 晴天 > 阴天, 湿润期 > 干旱期。在湿润期, 液流密度随着边材深度由外向内递减程度陡峭。随着土壤水分和光照强度的降低, 不同深度液流密度均有所降低, 表层 (0~2 cm) 液流密度降幅最大, 液流密度径向分布格局陡降程度减缓; 相同情况下, 土壤水分变化引起的降幅 (约 $18 \text{ mL} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 大于光照变化引起的降幅 (约 $12 \text{ mL} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。

3.3 径向变化对整树蒸腾估算的影响

以多点组合方法估算的整树日蒸腾量 (T_{r246})

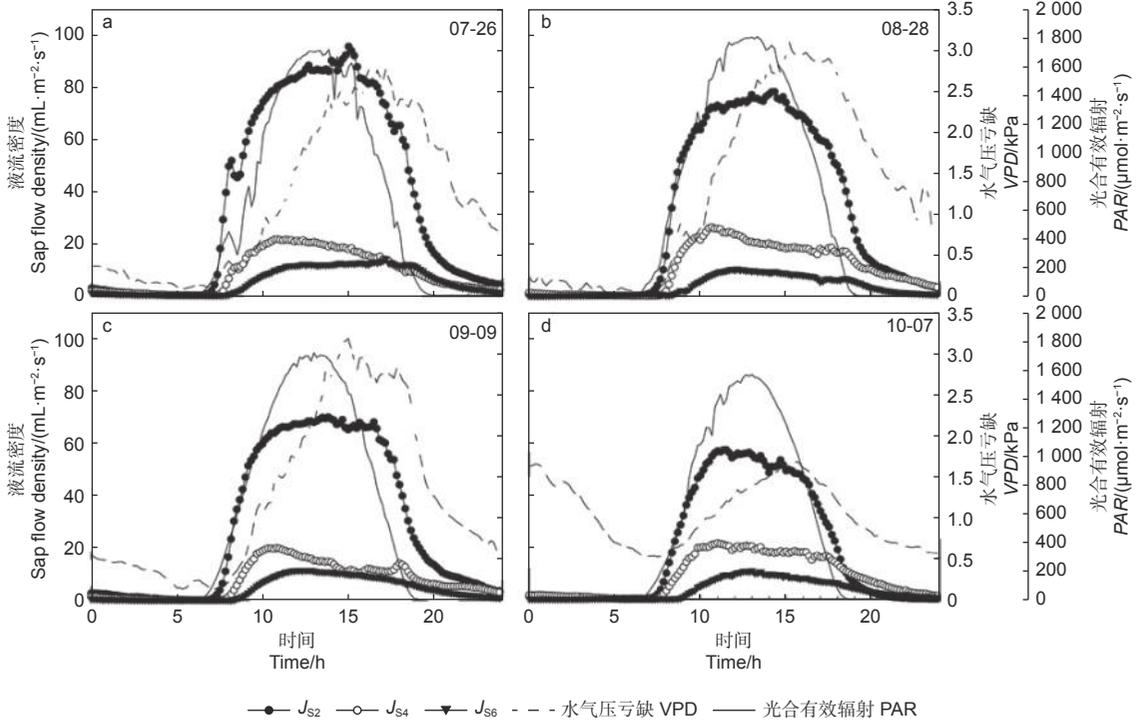
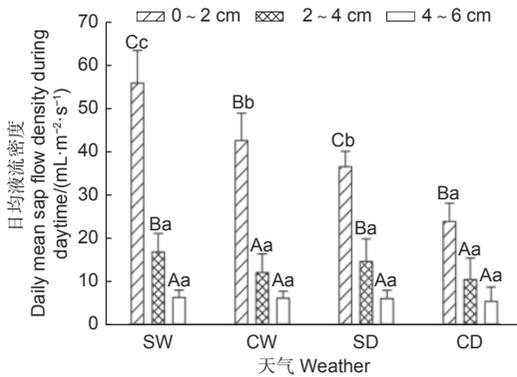


图 1 不同深度液流密度的日变化格局

Fig. 1 Diurnal variation patterns of sap flow density in different sapwood depths



注: SW 和 CW 分别为湿润期晴天和阴天, SD 和 CD 为干旱期晴天和阴天; 不同大写字母表示同一时期不同深度差异显著, 不同小写字母表示同一深度不同时期差异显著。

Notes: SW and CW represent sunny and cloudy days in wet periods, SD and CD represent sunny and cloudy days in dry periods; Different capital letters indicate significant differences of daily mean sap flow density in different sapwood depths in the same period, and different lowercase letters indicate significant differences of daily mean sap flow density at the same sapwood depth in different periods.

图 2 不同环境条件下液流密度径向分布格局

Fig. 2 Radial distribution pattern of the sap flow density under different environments

为基准, 对基于单点方法 (由单个径向深度液流密度) 估算的整树日蒸腾量 (T_{r2} 、 T_{r4} 和 T_{r6}) 进行

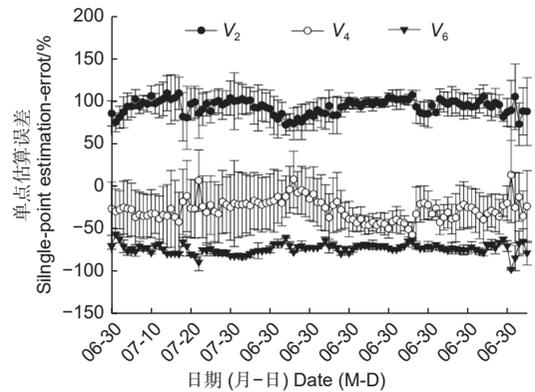


图 3 单点与多点估算整树日蒸腾量误差

Fig. 3 Errors in the single-point and multi-point estimations of the daily whole-tree transpiration

误差分析, 结果 (图 3) 显示: T_{r2} 比 T_{r246} (V_2) 平均高估约 92.9%, T_{r4} 与 T_{r246} 较接近 (但 V_4 仍平均低估 28.2%), T_{r6} 较 T_{r246} (V_6) 平均低估约 74.0%。

T_{r2} 、 T_{r4} 、 T_{r6} 分别与 T_{r246} 进行线性拟合, 结果 (图 4) 表明: 基于单点估算的整树耗水 (T_{r2} 、 T_{r4} 、 T_{r6}) 与基于多点估算的整树耗水 (T_{r246}) 均存在极显著的线性关系 ($P < 0.01$), 其中, T_{r2} 和 T_{r246} 的相关性最强 ($R^2 = 0.964$), T_{r4} 和 T_{r246} 的相关性次之 ($R^2 = 0.493$), T_{r6} 和 T_{r246} 的相关性最差

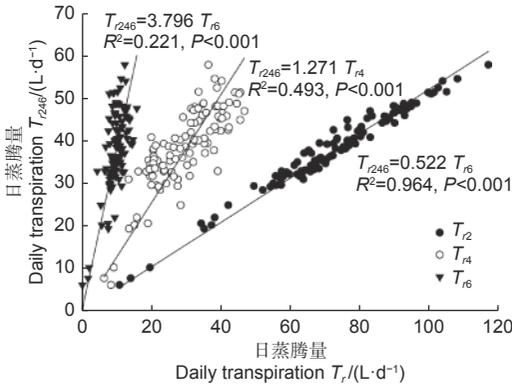


图 4 单点与多点估算整树日蒸腾量之间的关系

Fig. 4 Relationship between the daily whole-tree transpiration estimated through single-point and multi-point method

($R^2=0.221$)。

4 讨论

树木液流密度径向变化是一种普遍现象，也是基于树干液流准确估算整树蒸腾的基础。在日动态变化格局上，本研究中尾巨桉各径向深度液流密度日变化基本表现为单峰型，与孙振伟等^[23]、周翠鸣等^[19]、王志超等^[7]分别对广东柠檬桉 (*Eucalyptus citriodora* Hook. f.)、广西尾巨桉、雷州半岛尾叶桉的液流密度研究结果一致。在径向变化格局上，尾巨桉液流密度径向分布格局为陡峭式递减型，与 Tomonori 等^[11]的黄土区刺槐和辽东栎、周翠鸣等^[19]的广西尾巨桉研究结果相似，但与张璇等^[5]对杉木 (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)、四川山矾的研究结果相异，这可能是由不同物种间木质部结构差异所致。造成液流密度沿边材径向陡降式分布的原因可能有：(1) 不同深度边材生物学特征差异。随树龄增加、树木胸径生长，木质部结构也在不断改变，多数树种新形成的木质部导管尺寸随年龄增加呈增大趋势^[24]，一定生长周期中木质部的水分输导能力随导管直径增加呈指数级提升^[25]；另一方面，对成熟树木而言，靠近心材的边材导管发生的化学和生物变化增加了水分的通过阻力，导水效率明显降低^[26]，从而导致内外边材液流密度差异较大。(2) 树冠内叶片分布特征差异。对于树形高大、冠层叶片浓密的树木而言，边材内部液流密度相对活跃，液流密度径向分布也较平缓^[27-28]；而在同一林分的桉树人工林中，其树形笔直、冠幅较小、叶片主要集中在冠层，叶片垂直分

布不明显，边材内部中的液流很小，使液流密度的径向变化差异增大。

植物个体本身特征决定着植株蒸腾潜力，而外界环境影响着植株蒸腾的瞬间变化^[29]，所以，在考虑树木径向结构差异对蒸腾量影响的同时，不能忽略外界环境的影响^[30]。光合有效辐射 (*PAR*) 等主要气象因子驱动着植物蒸腾过程，而土壤水分则影响着植物水分的供给^[31]。一定情况下，*PAR* 的强弱控制着叶片气孔的开闭，从而调节植物的蒸腾量；但相对于主要气象因子的瞬时影响，土壤水分对液流密度的影响是长期的过程。本研究中，表层液流密度在干早期较湿润期大幅减小，但边材中间层和内层的液流密度随环境变化较小，液流密度由外向内递减程度变缓。Ford 等^[32]和 Nadezhdina 等^[33]认为，随着土壤水分降低，表层边材液流明显减少，内部液流变化较小，从而导致液流径向分布趋于平缓，这与本研究结果一致。这些结果表明表层液流密度受外界环境的影响较大，内部的液流密度则相对稳定。因此，若表层液流密度与整树液流密度具有较好的相关性，则可以基于表层液流对整树液流进行便捷和准确地估算。

对于边材液流密度存在径向变化的树木，如果忽略径向差异，仅用单一深度边材液流密度代表整树平均液流密度，会严重影响整树蒸腾的估算精度^[5, 11, 21, 34]。随着树木生长，边材结构特征和导水功能不断变化，相对小径级树木而言，中大径级树木的边材面积更大、导水结构和导水效率的径向变化也更明显。有研究显示，仅基于单点估算的桉树日蒸腾量误差随胸径增大而增大^[21]，将较小径级树木边材液流密度的径向变化规律应用于中大径级树木必然会引起较大误差。目前，桉树人工林大径级营林是解决市场大径材资源短缺、改善桉树人工林生态效应的有效经营途径^[17, 35]，因此，需要开展中大径级桉树蒸腾的精确估算，从而为桉树人工林水量平衡和大径材高效培育提供科学依据。本研究发现，相对于多点估算，单点估算的整树日蒸腾量 T_{r2} 高估约 92.9%， T_{r6} 低估约 74.0%，误差范围远大于较小径级桉树的 -32.9%~58.7%^[21]。因此，液流密度的径向变化在估算中大径级桉树时不可忽略，否则将导致整树蒸腾估算的较大误差，并且这种误差在估算林分尺度蒸腾时会进一步放大。多点测量的结果虽然较准确，但其便捷性不及单点

测量。本研究发现,尾巨桉最外层液流对环境变化最敏感,并且与整树液流具有较好的相关性($R^2=0.964$),因此,可以对基于最外层边材液流密度估算的整树蒸腾进行校正,获得较准确的整树蒸腾量。本研究基于 T_{r2} 构建的校正后的中等径级尾巨桉整树日蒸腾量估算函数($T_{r246}=0.522T_{r2}$)具有较好的应用前景。

5 结论

尾巨桉边材液流密度的径向变化趋势较稳定,在不同环境条件下均表现为递减型。相对于单点估算,多点估算有效提高了整树日蒸腾量估算精度,但也会增加观测上的不便和工作量。尾巨桉最外层液流密度对环境变化最敏感,并且与整树液流密度具有较好的相关性,同时鉴于0~2 cm深度边材液流密度测量的便捷性和普遍性,本文提出利用0~2 cm深度边材液流与整树液流的显著线性关系($T_{r246}=0.522T_{r2}$)估算单株蒸腾量。虽然本研究对中等径级尾巨桉液流密度径向变化进行了研究,但径级范围有限,该结果在更大径级树木的可应用性及准确性如何,还有待进一步验证。另外,本文仅研究了尾巨桉液流密度的径向变化,后续研究可结合木质部导水结构和导水性能的径向变化,以更好地揭示边材液流密度径向变化机理。

参考文献:

- [1] 王文杰,孙伟,邱岭,等.不同时间尺度下兴安落叶松树干液流密度与环境因子的关系[J].林业科学,2012,48(1):77-85.
- [2] Chapin F S, Matson P A, Vitousek P. Principles of terrestrial ecosystem ecology[M]. New York: Springer, 2011.
- [3] 王媛,魏江生,周梅,等.大兴安岭南段白桦树干液流对土壤水分的响应[J].水土保持研究,2020,27(4):128-133.
- [4] 赵平,饶兴权,马玲,等.Granier树干液流测定系统在马占相思的水分利用研究中的应用[J].热带亚热带植物学报,2005,13(6):5-16.
- [5] 张璇,张会兰,王玉杰,等.缙云山典型树种树干液流径向变化及单株日蒸腾量估算[J].水土保持学报,2016,30(3):337-343.
- [6] 李振华,王彦辉,于澎涛,等.华北落叶松液流速率的优势度差异及其对林分蒸腾估计的影响[J].林业科学研究,2015,28(1):8-16.
- [7] 王志超,许宇星,竹万宽,等.雷州半岛尾叶桉和湿加松人工林的蒸腾耗水规律[J].生态学报,2019,39(6):2147-2155.
- [8] 韩辉,张学利,党宏忠,等.沙地赤松树干边材液流速率的方位特征研究[J].林业科学研究,2019,32(2):39-45.
- [9] Dang H Z, Zha T S, Zhang J S, et al. Radial profile of sap flow velocity in mature Xinjiang poplar (*Populus alba* L. var. *pyramidalis*) in Northwest China[J]. Journal of Arid Land, 2014, 6(5): 612-627.
- [10] 党宏忠,杨文斌,李卫,等.民勤绿洲二白杨树树干液流的径向变化及时滞特征[J].应用生态学报,2014,25(9):2501-2510.
- [11] Tomonori K, Kyoichi O, Du S, et al. Spatial variation in sap flow velocity in semiarid region trees: its impact on stand-scale transpiration estimates[J]. Hydrological Processes, 2012, 26(8): 1161-1168.
- [12] Bodo A V, Arain M A. Radial variations in xylem sap flux in a temperate red pine plantation forest[J]. Ecological Processes, 2021, 10(1): 1-9.
- [13] Tateishi M, Kumagai T, Utsumi Y, et al. Spatial variations in xylem sap flux density in evergreen oak trees with radial-porous wood: comparisons with anatomical observations[J]. Trees, 2008, 22(1): 23-30.
- [14] Bush S E, Hultine K R, Sperry J S, et al. Calibration of thermal dissipation sap flow probes for ring- and diffuse-porous trees[J]. Tree Physiology, 2010, 30(12): 1545-1554.
- [15] 徐飞,杨风亭,王辉民,等.树干液流径向分布格局研究进展[J].植物生态学报,2012,36(9):1004-1014.
- [16] Nadezhkina N, Čermák J, Ceulemans R. Radial patterns of sap flow in woody stems of dominant and understory species: Scaling errors associated with positioning of sensors[J]. Tree Physiology, 2002, 22(13): 907-918.
- [17] 黄国勤,赵其国.广西桉树种植的历史、现状、生态问题及应对策略[J].生态学报,2014,34(18):5142-5152.
- [18] Zhou G Y, Huang Z H, Jim M, et al. Radial variation in sap flux density as a function of sap wood thickness in two eucalyptus (*Eucalyptus urophylla*) plantations[J]. Acta Botanica Sinica, 2002, 44(12): 1418-1424.
- [19] 周翠鸣,黄玉清,顾大形,等.尾巨桉树干木质部液流密度径向变化特征[J].生态学杂志,2015,34(8):2103-2108.
- [20] LY/T 2909—2017, 桉树大径材培育技术规程[S].
- [21] 周翠鸣,顾大形,赵平,等.液流径向变化对尾巨桉单株日蒸腾量估算的影响[J].应用生态学报,2017,28(8):2445-2451.
- [22] 王志超,许宇星,竹万宽,等.雷州半岛尾巨桉人工林树干液流对台风天气的响应[J].林业科学研究,2017,30(4):679-684.
- [23] 孙振伟,赵平,牛俊峰,等.外来引种树种大叶相思和柠檬桉树干液流和蒸腾耗水的季节变异[J].生态学杂志,2014,33(10):2588-2595.
- [24] 罗浩,齐锦秋,谢九龙,等.四川蓝桉幼龄林解剖性质及其变异规律[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2015,43(2):106-112,119.
- [25] Zhu S D, Song J J, Li R H, et al. Plant hydraulics and photosynthesis of 34 woody species from different successional stages of subtropical forests[J]. Plant, Cell & Environment, 2013, 36(4): 879-891.

- [26] Spicer R, Gartner B L. The effects of cambial age and position within the stem on specific conductivity in Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) sapwood[J]. *Trees*, 2001, 15(4): 222-229.
- [27] Jiménez M S, Nadezhdina N, Čermák J, *et al.* Radial variation in sap flow in five laurel forest tree species in Tenerife, Canary Islands[J]. *Tree Physiology*, 2000, 20(17): 1149-1156.
- [28] Flora A, Cescatti A. Vertical foliage distribution determines the radial pattern of sap flux density in *Picea abies*[J]. *Tree Physiology*, 2008, 28(9): 1317-1323.
- [29] 王城城, 陈丽艳, 赵从举. 热带桉树人工林液流特征及其对环境因子的响应[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(7): 69-75.
- [30] Zhang J G, He Q Y, Shi W Y, *et al.* Radial variations in xylem sap flow and their effect on whole-tree water use estimates[J]. *Hydrological Processes*, 2015, 29(24): 4993-5002.
- [31] 吕同汝, 蒋勇军, 吴 泽, 等. 亚热带岩溶区典型常绿和落叶树种
- 的蒸腾特征及其对环境因子的响应[J]. *生态学报*, 2022, 42(3): 1047-1058.
- [32] Ford C R, Goranson C E, Mitchell R J, *et al.* Diurnal and seasonal variability in the radial distribution of sap flow: predicting total stem flow in *Pinus taeda* trees[J]. *Tree Physiology*, 2004, 24(9): 951-960.
- [33] Nadezhdina N, Nadezhdin V, Ferreira M I, *et al.* Variability with xylem depth in sap flow in trunks and branches of mature olive trees[J]. *Tree Physiology*, 2007, 27(1): 105-113.
- [34] Van de Wal BAE, Guyot A, Lovelock C E, *et al.* Influence of temporospatial variation in sap flux density on estimates of whole-tree water use in *Avicennia marina*[J]. *Trees*, 2015, 29(1): 215-222.
- [35] 赵英伟, 邱炳发, 彭智邦, 等. 间伐对培育桉树大径材的影响及其经济效益分析[J]. *桉树科技*, 2021, 38(1): 16-22.

Radial Variation of Sap Flow in *Eucalyptus* and Its Effect on the Estimation of Whole Tree Transpiration

QIN Jia-shuang, GU Da-xing, NI Long-kang, HE Wen, LIN Fu-rong, ZHOU Cui-ming

(Guangxi Key Laboratory of Plant Conservation and Restoration Ecology in Karst Terrain, Guangxi Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Guilin 541006, Guangxi, China)

Abstract: [Objective] To provide a reliable basis for the accurate estimation and scale expansion of transpiration in medium and large diameter *Eucalyptus* plantations, the radial variation of sap flow and its effect on the estimation of whole tree transpiration were analyzed. [Methods] The sap flow density at three sapwood depths (0-2 cm, 2-4 cm and 4-6 cm) of 10-year-old *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* was monitored using the Granier-type thermal dissipation probe (TDP). [Result] The results showed that the diurnal variation of sap flow density in each sapwood depth showed a single-peak pattern, and the sap flow density decreased with the increase of sapwood depth. Compared with the daily whole tree transpiration estimated based on sap flow density in three sapwood depths (T_{r246}), the daily transpiration when trade the sap flow density in 0-2 cm (T_{r2}), 2-4 cm (T_{r4}) and 4-6 cm (T_{r6}) sapwood depth as the whole tree sap flow density were overestimated by 92.9% and underestimated by 28.2% and 74.0%, respectively. The sap flow in 0-2 cm sapwood depth was more sensitive to environment compared with the other two depths and T_{r2} had higher correlation with T_{r246} ($R^2=0.964$) compared with T_{r4} and T_{r6} . As a result, the sap flow in 0-2 cm depth could be used to estimate whole tree transpiration of *Eucalyptus* when calibrated based on T_{r246} ($T_{r246}=0.522 T_{r2}$). [Conclusion] *Eucalyptus* shows obvious radial variation in sap flow density and there may lead to large errors in estimating whole tree transpiration when ignoring the radial variation of sap flow. The whole tree transpiration of *Eucalyptus* can be estimated easily and accurately using sap flow in 0-2 cm sapwood depth based on the calibrated function.

Keywords: *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis*; sap flow; radial variation; daily transpiration