

文章编号:1001-1498(2003)06-0661-07

雷州半岛尾叶桉人工林树液茎流特征的研究^{*}

张宁南¹, 徐大平¹, Jim Morris², 周光益¹, 周国逸³, 吴仲民¹

(1. 中国林业科学研究院热带林业研究所, 广东 广州 510520;

2. Forest Science Centre, Heidelberg, Victoria, Australia 3084; 3. 中国科学院华南植物研究所, 广东 广州 510560)

摘要:应用热脉冲法对雷州半岛 4 年生尾叶桉单株树干液流时空的动态变化及与各环境因子的关系进行观测研究。研究表明:(1)形成层以内木质部不同深度的茎流密度不同,其中靠近形成层部分液流速度较快,但各层都具有相同的日变化趋势,中午 12 点至 1 点达到最大;夜间因根压作用影响各层仍有微弱上升液流;各深度日平均茎流密度 $11.6 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 最大为 $15.3 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ (晴天), 最小仅为 $5.4 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ (雨天);(2)不同直径尾叶桉的日茎流密度具有相似日变化趋势,胸径与高度相近其茎流密度相同,大树较小树快,这主要与树木根系吸收土壤水分的能力有关;(3)热脉冲法与整树容器法对 2 年生幼树耗水量的同步测定结果相一致,误差仅为 3.4%;(4)树干茎流量与饱和蒸气压差和太阳辐射相关性特别显著。

关键词:热脉冲技术;尾叶桉;茎流密度

中图分类号:S792.39 **文献标识码:**A

尾叶桉 (*Eucalyptus urophylla* S. T. Blake) 是优良的工业用材树种,近年来在华南地区发展迅速^[1,2]。尾叶桉人工林的发展对缓解华南地区的木材短缺发挥着重要的作用,但对于尾叶桉的水分利用存在很多争议。由于没有科学的观测数据,很多争议都是建立在假设的基础上,有必要对尾叶桉蒸腾耗水进行科学的测量,客观地评价它的水分利用情况。随着全球气候变暖,水资源短缺已成为突出的环境问题,对水资源的科学管理与合理利用势在必行。树木的蒸腾耗水量是人工林树种选择的重要参数,国内外由于这个问题考虑不周而导致环境恶化的事例已屡见不鲜^[3-5]。由于树木的蒸腾作用受树种、环境、时间、空间等多种因素控制,变化复杂,因此准确地测算树木蒸腾耗水量就成为环境水分定量研究的急需技术。热技术是利用树干是树木液流通道的咽喉部位,树干液流量的大小制约着树冠蒸腾量的变化,因此可以用测定树干液流的方法确定树冠的蒸腾耗水量^[6]。

热技术根据不同原理及适用范围可分为热脉冲法、热平衡法、热扩散法^[7]。热技术基本不破坏树木在自然生长环境条件下的正常生长状态,可以连续测定树木液流量,具有易于野外操作、使用及远程下载数据等优点^[8-11]。热脉冲法由 Huber 首次用于测量,Edwards 和 Warwick 总结成系统的理论技术^[8],后经 Olbrich 进一步完善^[11]。刘奉觉^[12,13]最早使用热脉冲技术对杨树

收稿日期:2003-04-24

基金项目:中澳合作项目 ACIAR FST 1997/77“桉树与水”、国家科技部专项 191“热带林对水资源供需调节的监测研究”、广东省自然科学基金“广东主要树种人工林水分利用的比较研究”(0113931)的部分研究内容

作者简介:张宁南(1974—),男,湖南会同人,助理研究员。

^{*} John Collopy、杨曾奖、周涛、申卫军参加了试验设备安装或部分实验数据收集,在此一并表示衷心感谢。

树干液流的时空动态进行了研究,到 90 年代后期才相继出现使用热脉冲技术测定树干液流^[14~16];严昌荣^[17]使用热平衡法测定核桃楸(*Juglans mandshurica* Maxim) 生长中期的树干液流。以上使用热技术测定单个或多个树种的树干液流短期对比,缺乏长期监测且主要用于对北方树种的研究。本课题组 1999 年从澳大利亚引进热脉冲仪对华南地区重要造林树种尾叶桉的树干液流及其蒸腾过程进行为期 1 a (1999—2000 年)的测定,为分析合理经营管理桉树人工林的生态效益提供科学的理论依据。

1 试验地概况

试验地位于雷州林业局纪家林场和河头林场(110°0'E、21°0'N),地处热带北缘,地势平坦,土层深厚,具有发展桉树的优越条件,是我国较为典型的桉树生产基地。属热带北缘海洋性气候,年平均气温 23.5℃,7 月平均气温 28.9℃,1 月平均气温 15.2℃;年降水量 1 600~1 400 mm,分配不均,干湿季明显,5—9 月为雨季,降水量占年降水量的 85%,年相对湿度 80%左右。每年夏季盛行南风 and 西南风,冬季多北风和东北风,6—10 月为热带风暴及台风季节,一般每年出现 2~3 次台风,风力 8~10 级,阵风 11 级,最大 12 级以上,对林木影响极大。

分别在纪家和河头林场 1996 年中期种植的尾叶桉人工林内设置一固定样地,样地面积均为 1 600 m² (40 m × 40 m),林分密度分别为 1 970 株·hm⁻²、1 345 株·hm⁻²,平均胸径分别为 9.3、9.5 cm (2000 年 4 月调查);两样地相距大约 40 km,均位于南渡河流域。河头林场为浅海沉积物砖红壤、纪家林场为玄武岩砖红壤。

2 研究方法

2.1 环境因子测定

分别在河头、纪家尾叶桉林内两样地旁的空旷地带,各建立一座 7.5 m 高的小气候观测塔,对林冠层附近的相对湿度、温度、太阳辐射、风速、降雨量及通过土壤水分测定仪(The probes, Delta T Devices, UK)对不同深度土层(50、150、250、350 cm)每 30 min 进行自动监测,监测数据存贮到 Tain 数据存贮器(Box Hill, Australia),并保证与热脉冲仪同步监测,每月定期使用笔记本电脑对数据进行下载。日降雨量由每 30 min 的测定值累加。饱和蒸汽压差(VPD)的计算公式^[6]:

$$VPD = 0.628(273 + T) \ln(RH) \quad (\text{式中 } 0.628 \text{ 为气体常数, } T \text{ 为气温, } RH \text{ 为相对湿度}) \quad (1)$$

2.2 热脉冲仪测定法

2.2.1 茎流密度的计算方法

$$\text{热脉冲速率}(u) \text{ 计算公式}^{[18]}: u = (X_{up} + X_{dn}) / 2t \quad (2)$$

式中 u 是校正前热脉冲速率, X_{up} 和 X_{dn} 分别为热源针到上方或下方热敏探针的距离; t 为数据采集器内上下方热敏探针的温度达到平等的时间。

$$\text{伤口校正参数的公式}^{[19]}: \dot{u} = p + qu + r(u)^2 \quad (3)$$

式中 $\dot{u}$ 是经过损伤校正后的热脉冲速率; p, q, r 是校正系数,它决定于受影响伤口的大小(宽 1.70~3.00 mm,在此范围内每 0.05 mm 为一个变化单位)及液流速率(速率大于或小于 3 cm h⁻¹时)。

$$\text{校正后的热脉冲速率可转化为液流密度}^{[18]}: V = \rho_b (m_c + 0.33) \dot{u} \quad (4)$$

式中 V 为茎流密度, ρ_b 是木材的基本密度, m_c 是液体体积, 0.33 是干木材比热

单位时间内树干断面茎流量的公式: 树液流量 = VA

(5)

式中 A 为总边材断面积

由于不同径向深度茎流密度不同, 树干中的上升液流仅发生在边材部分, 同一年轮圆周上的茎流速度相近, 而径向各位点流速变异较大。采用如下关系式: $V = ax^2 + bx + c$, x 为形成层下的深度, a, b, c 为回归参数^[8]: $Q = \int_0^{R-x} 2\pi(r-x)(ax^2 + bx + c) dx$

(6)

式中 Q 为每单位时间的树干断面茎流量, 式中 R 为形成层所在界面处半径, r 为心材与边材交界处半径, x 为形成层下深度。

2.2.2 数据采集及处理 热脉冲仪安装的具体操作方法可参见文献[14, 20]。

热脉冲仪(Heatpulsar, Edwards Industries, 新西兰)每 30 min 对树干液流进行自动测定, 测定数据自动贮存到数据采集器(Campbell 公司, CR10X, 美国), 数据采集间隔为 30 min; 3~4 周后下载数据, 更换被测木。用生长锥在每个测点旁取木芯样品, 测定边材的长度, 计算边材的输导面积, 并于室内测其鲜质量、干质量, 并用阿基米德定律测算体积, 计算其树液体积比率及木材体积比率。用铷子铷取热脉冲引起的树木边材损伤部分, 测定伤口大小。通过 HeatPulsar system 软件^[21], 对测定的数据自动处理后得到各位点的茎流密度(SFD)及平均茎流密度(MSFD)。

2.3 整树容器法^[22]

2001 年 9 月 6—7 日, 将 2 年生 6 m 高的尾叶桉幼树从树干底部以上 20 cm 处锯断后移入盛水的透明塑料桶中, 为防止气泡阻塞树体内的导管而影响水分运输将其固定。在桶外标定初始水位, 由于树冠蒸腾耗水, 桶内水位会不断下降; 定期(大约间隔 1 h)向桶内加水至初始水位的位置, 并记录注水量与时间, 即为该时段的树冠耗水量。同时安装热脉冲仪, 每 20 min 对幼树树干液流速度进行同步测定。

3 结果与分析

3.1 尾叶桉树干边材不同深度日液流的变化特征

由于树干木质部边材在结构上的异质性, 导致不同深度木质部在水分疏导能力上存在异质性^[23]。从图1可以看出不同位点的茎流密度具有相同的日变化趋势, 在夜间树干仍存在微弱

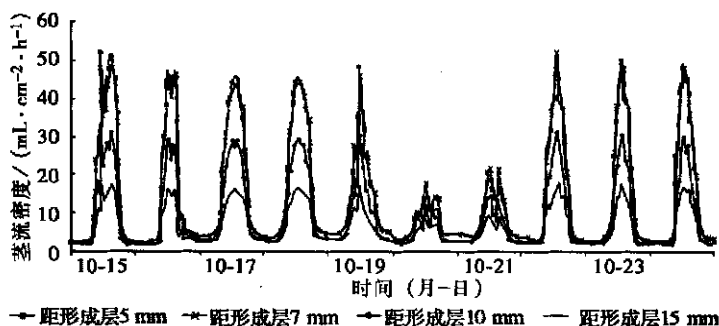


图1 1999 年尾叶桉边材不同深度茎流密度的时空变化

的上升液流,这可能是根压引起的;由于气象因素影响形成的曲线波动是显著的,各位点均十分同步。晴天时(图 2),从 8:00 左右液流启动开始,各位点流速的差异逐渐增大,12:00~13:00 左右各处流速都达到较稳定的高值,位点间差异也最大,直到 15:00 左右,各位点流速同步下降,位点间差异较小;雨天时,各位点茎流流速缓慢且各位点间差异较小,而出现降雨时各位点茎流速度均会急剧下降。其中最外层(距形成层 5、7 mm 处)在白昼具有较高的茎流密度,最内层(距形成层 10、15 mm 处)茎流密度最低。这是由于树木的木质部在生长过程中,由内向外逐渐老化,木质部的中心部位的导管老化、阻塞,而边缘处的木质部导管是新生长出的,导管很通畅,因此在空间上流速向外依此增加。期间各深度日平均茎流密度为 $11.6 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,最大为 $15.3 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ (晴天),而最小仅为 $5.4 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ (雨天),晴、雨天树木茎流密度的显著差异与环境因子影响有关。

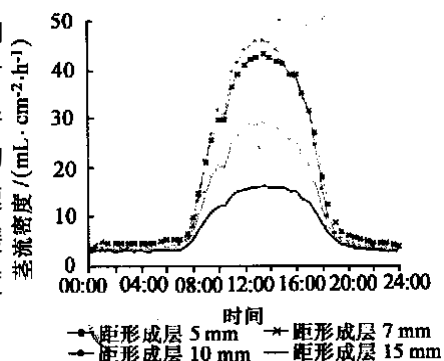


图 2 尾叶桉边材不同深度茎流密度的日变化

3.2 不同直径尾叶桉日茎流密度的变化特征

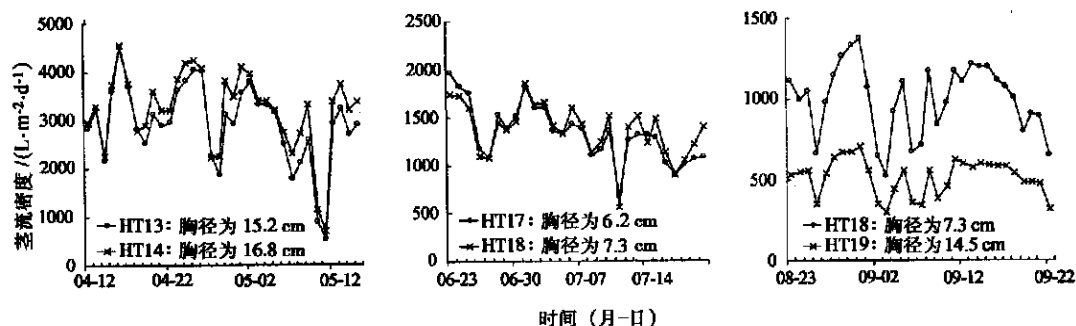


图 3 2000 年河头点不同直径尾叶桉日茎流密度的变化

据 2000 年 3 月调查河头点林分平均胸径为 9.5 cm, HT13、HT14、HT19 (HT 为 Hetou Tree 的缩写, HT13 表示被测木的代号) 生长旺盛, 属于林分上层优势木, 而 HT17 和 HT18 则生长较弱, 属于林分中下层木。从图 3 中可以看出树木胸径相差不大时(如 HT13 与 HT14 相差 3.6 cm; HT17 与 HT18 间 1.1 cm), 茎流密度相近, 而当胸径大小相差显著时(如 HT18 与 HT19 相差 7.2 cm), 茎流密度也相差显著, 这主要与树木生长旺盛时根系相应也发达, 能从更大范围吸收土壤水分有关, 同时不同直径日茎流密度变化受环境因子的影响变化趋势均一致。

3.3 整树容器法与热脉冲法测定比较

为了检验热脉冲法的测定精度, 2001 年 9 月 6—7 日用整树容器法与热脉冲法对 2 年生 6 m 高尾叶桉幼树的耗水量进行同步测定。由图 4 看出, 热脉冲法与整树容器法所测定的幼树耗水总量及速度均基本一致; 热脉冲法所测耗水值为 5.25 L, 而同期整树容器法的耗水量为 5.07 L, 相差 0.17 L, 误差仅约为 3.4%; 热脉冲法所测定的值较高, 可能与其对夜间茎流流速高估有关。热脉冲法测定茎流流速是根据热源针放热后到上下方热敏探针的温度达到平等的

时间,当茎流过于缓慢时达到的平衡时间超过热脉冲仪所设定的最大时限 800 s 时,就认为它的平衡时间为 800 s。

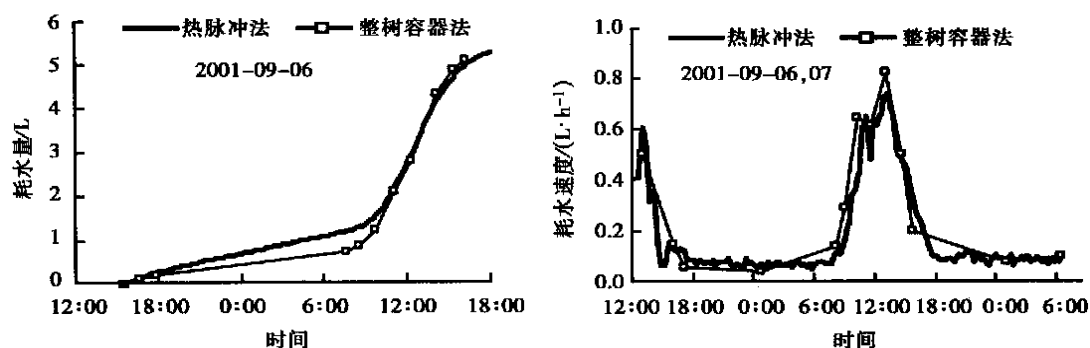


图4 尾叶桉的水分利用情况

3.4 日茎流密度与环境因子的关系

茎流密度的变化除了受树木的生物学结构、土壤供水水平影响外,还受到周围气象因子的制约。生物学结构决定茎流的潜在能力,土壤供水决定液流总体水平,而气象因素决定茎流的瞬间变动。从图5可以看出茎流密度与 VPD、太阳辐射关系特别显著,与平均气温的关系较显著,而与 50 cm 深土壤水分含水量的相关不明显。

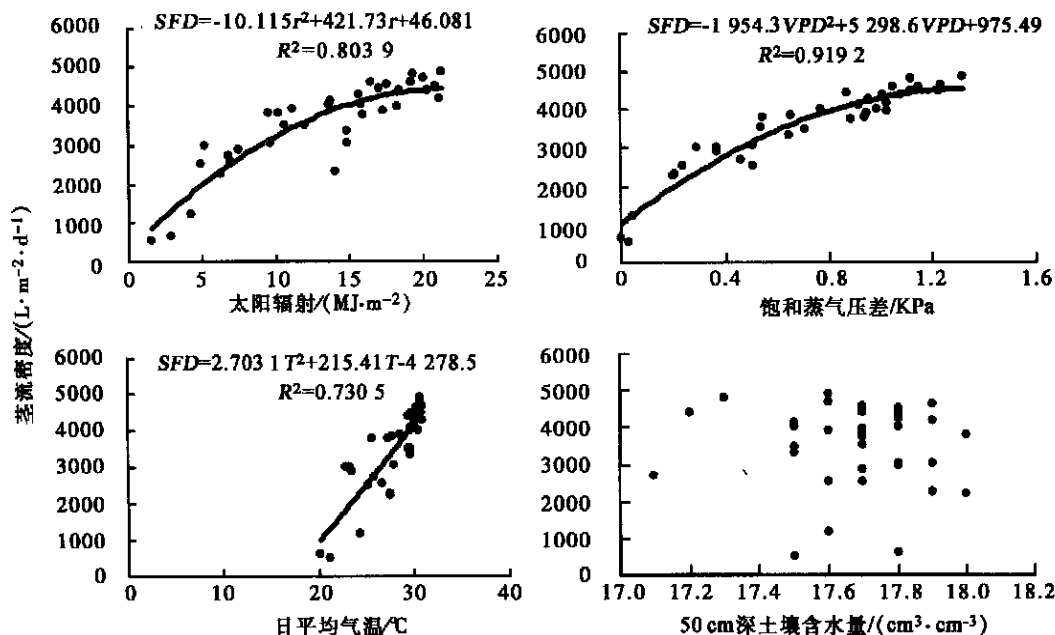


图5 尾叶桉日茎流密度(SFD)与各环境因子的关系

4 结语与讨论

树干径向不同边材深度的茎流密度具有相同的日变化趋势。晴天茎流快,雨天茎流缓慢,

各深度日平均茎流密度为 $11.6 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 最大为 $15.3 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ (晴天), 而最小仅为 $5.4 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ (雨天)。受气象因子的影响, 晴天时在树干形成层不同深度的茎流流速均快, 但差异大; 雨天时树干形成层不同深度茎流流速均慢, 但差异较小, 其中以靠近形成层部分的茎流流速较快, 这主要是与不同层次木质部的导水特性有关, 在近形成层部分的导管为新生、堵塞少、活性较强、运输能力强。Granier^[24]对橡树 (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl. and *Q. robur* L.) 的径向液流的研究表明, 大部分茎流集中在当年的年轮中; 王华田^[25]对华北主要水源林树种木材结构的分析表明, 多数树种导管直径以靠近髓心部位处最小, 并且由内而外逐渐增大, 即随着树龄的增大, 导管直径逐渐增大; 导管密度仍然以靠近髓心处最小, 但中部和外部的差异不大。

不同直径尾叶桉茎流密度同步比较的研究表明, 相同直径的树木茎流密度相似, 树木大时茎流密度大, 树木小时茎流密度小, 这主要与树木根系有关。树木胸径大时, 根系更发达且分布的范围大, 可从土壤深层吸收水分, 因此茎流密度大。不同株间树木所处的环境因子一致, 茎流具有相同的变化趋势。在短伐期, 人工林从单株水平扩大到林分水平的耗水量推算过程中, 因为树种组成单一、所处环境条件及经营措施相同, 可以通过选择测定不同径阶标准样木的茎流密度进行推测整个林分平均茎流密度^[26]。

热脉冲法与整树容器法的测定结果相差仅为 3.4%, 表明热脉冲是一种相对准确的测定树木水分利用的方法, 这部分误差主要是因为夜间热脉冲法测定的茎流速度稍高于整树容器法。热脉冲技术测定茎流流速的原理是通过测量热源针放热后到达上下热敏探针温度相等的时间, 而如果当上升茎流速度过缓、停止及反方向时 (在根部) 在规定的最大时限 (800 s) 上下热敏探针所感测的温度尚未相等, 则平衡时间被认为 800 s, 这样就高估了实际茎流流速, 因此, 在实际茎流测定过程中如发现夜间各位点平衡时间均为最大时限, 则可认为各位点夜间无上升茎流。当然在实际的操作中, 如发现夜间各层茎流所达到的平衡时间均为最大时限, 就可选择软件过滤功能自动将它们设置为零, 消除热脉冲法对流速过缓造成测定值偏大的现象。

日茎流密度与饱和蒸气压差、太阳辐射的相关性特别显著, 与气温的相关性明显, 饱和蒸气压差、太阳辐射可直接影响叶片气孔关闭; 表层土壤水分不直接影响树木耗水, 而主要作为限制因子控制水分供应。

参考文献:

- [1] 白嘉雨, 甘四明. 桉树人工林的社会、经济和生态问题[J]. 世界林业研究, 1996, 9(2): 63 ~ 68
- [2] 祁述雄. 中国桉树 (第二版) [M]. 北京: 中国林业出版社, 2002. 22
- [3] Boore M E D, Fries C. The ecological effects of *Eucalyptus* [A]. FAO Forestry Paper No. 59. FAO, Rome, 1985. 87
- [4] Dye P J. Climate, forest and streamflow relationships in South Africa afforested catchments[J]. Commonwealth Forestry Review, 1996, 75: 31 ~ 38
- [5] Calder I R. Water use of *Eucalyptus* — a review [A]. in: Calder I R, Hall R I. Growth and water use of forest plantation [C]. England, Chichester: John Wiley and Sons, 1992. 167 ~ 179
- [6] Kramer P J. Water relations of plants [M]. San Diego: Academic press, 1983
- [7] Swanson R H. Significant historical developments in thermal methods for measuring sap flow in trees [J]. Agric For Meteorol, 1994, 72: 113 ~ 132
- [8] Edwards W R N, Warwick N W M. Transpiration from a kiwifruit vine as estimated by the heat pulse technique and the Penman-Monteith equation [J]. New Zealand J Agric, 1984, 27: 537 ~ 543

- [9] Dye P J, Olbrich B W. Heat pulse observations of *Eucalyptus grandis* transpiration in South Africa[A]. in: Calder I R, Hall R I. Growth and water use of forest plantation[C]. England, Chichester: John Wiley and Sons, 1992. 216 ~ 225
- [10] Hutton T J, Vertessy R A. Transpiration of plantation *Pinus radiata* estimated by the heat pulse method and the Bowen ratio[J]. Hydrological Processes, 1990, 4: 289 ~ 298
- [11] Olbrich B W. The verification of the heat pulse velocity technique for estimating sap flow in *Eucalyptus grandis*[J]. Can J For, 1991, 21: 836 ~ 841
- [12] 刘奉觉, Edwards W R N. 杨树树干液流动态研究[J]. 林业科学研究, 1993, 6(4): 368 ~ 372
- [13] 刘奉觉, 郑世锴, 巨关升, 等. 用热脉冲仪速度记录仪(HPV)测定树干液流[J]. 植物生理学通讯, 1993, 29(2): 110 ~ 115
- [14] 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
- [15] 孙鹏森, 马履一, 王小平, 等. 油松树干液流的时空变异性研究[J]. 北京林业大学学报, 2000, 22(5): 1 ~ 6
- [16] 高岩, 张汝民, 刘静. 应用热脉冲技术对小美杨树干液流的研究[J]. 西北植物学报, 2001, 21(4): 644 ~ 649
- [17] 严昌荣, Alec Downey, 韩国兴, 等. 北京山区落叶阔叶林中核桃楸在生长中期的树干液流研究[J]. 生态学报, 1999, 19(6): 793 ~ 797
- [18] Marshall D C. Measurement of sap flow in conifers by heat transport [J]. Plant physiology, 1958, 33: 385 ~ 396
- [19] Swanson R H, Whitfield D W A. A numerical analysis of heat pulse velocity theory and practice [J]. Journal of experimental botany, 1981, 32: 221 ~ 239
- [20] 申卫军, 彭少麟. 热脉冲(Heat pulse)法原理及其应用[J]. 资源生态环境网络研究动态, 2000, 11(2): 22 ~ 27
- [21] Morris J D. HP: a heat pulse data management system for the Custom and Greenspan loggers[R]. Melbourne. Centre for Forest Tree Technology, 1995
- [22] Ladefoged K A. Method for measuring the water consumption of large intact tree[J]. Physiologia plantarum, 1960, 13: 648 ~ 658
- [23] Zimmermann M H. Xylem and the ascent of sap[M]. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-verlag, 1983
- [24] Granier A, Anfodillo T, Sabatti M, et al. Axial and radial water flow in the trunks of oak tree: a quantitative and qualitative analysis [J]. Tree physiology, 1995, 14: 1381 ~ 1396
- [25] 王华田. 北京市水源保护林区主要树种耗水性的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2002
- [26] Mahmood K, Morris J, Collopy J, et al. Groundwater uptake and sustainability of farm plantations on saline sites in Punjab province, Pakistan [J], Agricultural water management, 2001, 48: 1 ~ 20

Characteristics of Sap Flow in *Eucalyptus urophylla* Plantations on the Leizhou Peninsula

ZHANG Ning-nan¹, XU Da-ping¹, JIM Morris², ZHOU Guang-yi¹, ZHOU Guo-yi³, WU Zhong-min¹

(1. Research Institute of Tropical Forestry, CAF, Guangzhou 510520, Guangdong, China;

2. Forest Science Centre, Heidelberg 3084, Victoria, Australia;

3. South China Institute of Botany, CAS, Guangzhou 510650, Guangdong, China)

Abstract: Heat pulse method was applied to study sap flux density (*SFD*) of single tree in 4-year-old *Eucalyptus urophylla* plantation from September 1999 to September 2000 on Leizhou Peninsula, southern China. The results indicated that *SFD* of outer sapwood moved faster than the inner; the daily *SFD* of trees with different diameter followed similar pattern, the bigger trees had faster *SFD* than smaller trees due to size of root system. To prove the accuracy of heat pulse method, water use of a 2-year-old young tree with height of 6 m was measured by the heat pulse method and a cut-stem method at the same time. It was showed that the estimated water use differed by 3.4 % only. Among meteorological factors, solar radiation and *VPD* were the main factors affecting the sap flow. The heat pulse method was proved to be a accurate way to measure water transpiration by eucalypt tree plantations and recommended for wider application in water balance studies of plantations.

Key Words: heat pulse method; *Eucalyptus urophylla*; sap flow density