

柠条主根液流与叶面积关系初探

党宏忠, 张劲松, 李卫

(中国林业科学研究院林业研究所, 国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091)

摘要: 运用热扩散技术对 3 株柠条主根部液流速率进行了监测, 对试验期间典型晴天日 (30 d) 液流速率的分析表明: 柠条根部液流传输受大气蒸发力、冠层输出、边材面积的共同影响; 1、2、3 号样株边材面积分别为 6.61、7.17、5.06 m^2 , 日平均液流总量分别为 457.92、1 014.66、292.12 $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$, 日平均液流总量随边材面积的增加而增大; 各样株间日平均液流总量的差异显著, 而单位叶面积的液流量无显著差异; 2 号柠条样株的液流速率日变化动态与潜在蒸腾的相关性最强, 叶面积/边材面积为 0.62 $\text{m}^2 \cdot \text{cm}^{-2}$, 可以作为评定柠条单株是否具有与当地水文条件相适应的根冠比例关系的重要指标。试验期间样株根区 60~140 cm 内土壤平均含水量分别占田间持水量的 51.04%、63.26% 和 87.0%, 土壤水分状况较好。

关键词: 柠条; 根部; 液流速率; 热扩散技术; 叶面积

中图分类号: S793; S715.4

文献标识码: A

Preliminary Study on Relationship between Taproot Sap Flow and Leaf Area of *Caragana korshinskii*

DANG Hong-zhong, ZHANG Jin-song, LI Wei

(Research Institute of Forestry CAF, Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry Administration, Beijing 100091, China)

Abstract Based on sampling and measuring sap flow in taproot of *Caragana korshinskii* by Thermal Dissipation Probe (TDP), data for 30 typical sunny days were selected for analyzing. It showed that the transportation of sap flow in taproot was controlled by atmosphere evaporation, canopy export and sapwood area. Sapwood area played an important role in ensuring water transport unblocked under high atmosphere evaporating and canopy transporting condition. It was indicated that the daily mean sap flow velocity of No. 1-3 sample trees were 457.92, 1 014.66 and 292.12 $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$ respectively, and the sapwood area were 6.61, 7.17, and 5.06 m^2 respectively, the former varied accordingly with the latter. There were significant differences in sap flow velocity among the sample trees while no significant differences were found in sap flow velocity per leaf area, so leaf area which characterized by canopy transpiration demand may be a more important variable than sapwood area for water transporting and soil water for providing in soil-plant-atmosphere continuum. The soil moisture condition at depth from 60 to 140 cm in trial period was adapted for 3 sample trees of *Caragana korshinskii* which accounted for 51.04%, 63.26% and 87.0% of field moisture capacity respectively. The daily variation pattern of No. 2 was related with Potential Evapotranspiration (ET_0) more closely than the others, so the ratio of leaf area to sapwood area of No. 2 which was 0.62 $\text{m}^2 \cdot \text{cm}^{-2}$ implied that the ability of sapwood transportation matched well with canopy demands and could be used as a biological characteristic index for reflecting the hydrobiological adaptation of *Caragana korshinskii*.

Key words *Caragana korshinskii*; taproot; sap flow; Thermal Dissipation Probe; leaf area

收稿日期: 2009-02-17

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目 (200708), 国家“十一五”科技支撑项目 (2006BAD03A0501; 2006BAD03A1205)

作者简介: 党宏忠 (1971—), 男, 甘肃定西人, 副研究员, 博士, 主要从事水土保持和森林生态水文研究。

热扩散技术自 1985 年由 Granier 发明以来, 因其结构简易、测量精度高、成本相对低等优势, 正越来越多地被应用到林木单株蒸腾的测定中^[1-5]。热扩散技术较精准的测量能提高林木蒸腾耗水从单株到林分尺度上推的可靠性^[6], 但前提是林木液流个体间的差异应与林木生物学特征及林分因子间存在稳定的藕合关系, 这样才易于在较大尺度上依据林分因子调查实现植被蒸腾耗水的估算。在林分因子中, 胸径与边材面积具有可靠的关系^[7-8], 因此胸径断面面积成为估算林分蒸腾耗水的主要空间纯量; 但是边材面积(胸径)表征的主要是输水能力, 由于液流的主要“去向”是通过叶片蒸腾输送到大气, 因此冠层如同控制阀, 对液流实际输出量的影响更为关键。Morikawa 等^[9]曾报道林分在稀疏后单株树木的液流量增加而林分的蒸腾量减少 21%, 并认为这与减少 24% 的叶生物量有关。Hatton 等^[10]研究认为在土壤水分亏缺时单位叶面积的大树蒸腾量小于小树。Vestessy 等^[11]认为大树水分利用并不随直径线性增长。熊伟等^[6]指出如果不考虑树冠重叠度而仅以边材面积为空间纯量, 过高估计的华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii* Mayr) 的日蒸腾量达 13.13%。更多学者还注意到了冠幅等树形因子对个体间液流量差异的影响^[4], 这些研究均指示着冠层差异影响着树木液流的分布格局。现实林分由于竞争、遮荫、雪压、风折、病虫害或人工抚育等干扰的不可避免, 很难在胸径(或边材面积)与冠层叶面积间建立稳定可靠的函数关系, 由于乔木树种冠层叶面积的测定较难, 目前对单株液流量或由单株到林分的上推研究中并没有把冠层叶面积这一纯量考虑进去, 从而在一定程度上削弱了研究结果的可靠性。

柠条(*Caragana korshinskii* Kam.) 主根明显、分枝性强, 是我国干旱半干旱区普适性的优良豆科固氮灌木树种。本研究利用 TDP 技术探讨了叶面积与林木主根液流日变化格局的关系, 采用把探针植入柠条主根部位实时监测液流的方法, 避开灌木树种分枝性强、枝条细难以直接用探针以及从样枝到单株尺度扩展的误差等不利条件, 也避免了辐射等外界环境因子对探针的影响。灌木树种相对低矮, 冠层叶面积也较容易直接测定, 这为研究液流动态与叶面积的关系提供了较好的材料与方法。

1 试验材料与方法

1.1 材料选择

试验地位于半干旱区黄土丘陵沟壑第 V 副区的

甘肃省定西市石家岔流域(35°43′307″N, 104°39′232″E), 海拔 2 218 m, 年均降水量 427 mm, 年平均气温 7℃, 土壤为黄绵土, 流域植被以 20 年生人工带状灌木篱柠条林为主, 选择 3 株生长旺盛、互不干扰的柠条单株为试验材料, 各样株的情况见表 1。

表 1 柠条试验样株基本情况表

样株号	平均高 /m	平均冠幅 /m	主根直径 /cm	边材面积 /cm ²	叶面积 /m ²	(叶面积 / 边材面积) / (m ² · cm ⁻²)
1	2.10	2.20	3.13	6.61	1.35	0.20
2	2.15	2.75	3.25	7.17	4.43	0.62
3	1.30	1.65	2.80	5.06	0.85	0.17

1.2 边材面积与叶面积的测定

在以样株为中心半径 10 m 的临时样地内选择 6 株生长状态良好、冠幅相近的柠条单株为临时样株, 挖取主根样段, 立即用锋利的铡刀切出光滑、平整的截面, 用游标卡尺量取各样段相互垂直方向的皮厚、韧皮部、边材、心材宽度并平均, 计算出各样段的边材宽度、边材面积。统计表明边材面积(S , cm²)与根径(D , cm)间的回归关系为:

$$S = 4.6814D - 8.0447 \quad R^2 = 0.97$$

据此公式并根据对根径的测量结果, 推算出各样株根段的边材面积(表 1)。

柠条为羽状复叶, 每个叶柄上一般着生着 10 片左右的小叶片, 每个叶芽上着生着 3 个左右的叶柄。通过抽样统计, 计算出每个叶柄的平均叶面积和每个叶芽所着生的平均叶柄数, 就可通过对枝条上叶芽的计数来推算所有叶片的叶面积总和, 为此, 在临时样株上随机选取了共 291 个叶芽, 逐一对着生的叶柄数、每一叶柄的小叶片数进行计数与统计。选取 30 个叶柄, 对叶片计数后用 LI-3000A (Licor USA) 测定每个叶柄上的叶面积(重复 3 次取平均值)。统计结果显示, 柠条每个叶柄着生的平均叶数为 10 片, 每个叶芽的平均叶数为 29.52 片, 每个小叶片的平均面积为 0.214 cm², 据此根据对 3 个样株叶芽数的统计得到各样株的叶面积(表 1)。

1.3 TDP 安装与液流测定

采用按 Granier 原理设计的 TDP-10 mm 热电藕探针, 探针直径 1.2 mm, 宽 40 mm, 电阻 48 Ω, 加热电压为 1.5 V。Katherine^[12]、Rafael^[13] 等的研究均证实了 10 mm 针用于林木液流测定的可靠性。安装时间为 2008 年 3 月 21 日, 安装前先从地面近根茎处沿根向下挖开宽约 30 cm 的土槽, 在距地面

约 20 cm 深处挖开一空穴, 使约 20 cm 的根段完全露出, 刷掉表面土, 在用游标卡尺量取直径后用专用电钻在根表面垂直于根的走向钻孔 (钻头直径与深度均与探针匹配), 孔内涂适量凡士林后插入探针, 用泡沫塑料纸紧紧包裹, 在上端接口处用黄油密封, 避免渗入水分。安装完后用砖瓦加固空穴以免坍塌, 并以水平放置的直径 5 cm 的 PVC 细管与外界相通, 以排湿与防积水。空穴大小以 TDP 及包裹不与周围土壤直接接触为原则。采用 220 V 交流转接 12 V 铅酸蓄电池连续供电, 采用英国 SQ2020 数采器采集数据, 每 5 min 记录 1 次数据。液流密度 ($F_d, \text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、液流速率 ($F_s, \text{g} \cdot \text{h}^{-1}$) 的计算采用 Granier 公式^[14] [见式 (1)、(2)], 式中 A_s 为木质部的横截面积 (m^2), ΔT 、 ΔT_{\max} 的计算均按照 Granier 方法确定, 其中 ΔT_{\max} 根据 Granier^[14]、Ping 等^[1] 的研究, 以 1 周 (7 d) 为时长。

$$F_d = 119 \times 10^{-6} \left[\frac{\Delta T_{\max} - \Delta T}{\Delta T} \right]^{1.291} \quad (1)$$

$$F_s = F_d \times A_s \times 3600 \quad (2)$$

1.4 环境要素的测定与潜在蒸散发 (ET_0) 的计算

测定的环境要素类目及传感器见表 1, 均与 SQ2020 数采器相连接, 每 5 min 记录 1 次数据。

表 2 环境要素类目及传感器类型

传感器类型	环境要素类目
AV-20P	太阳辐射 / ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)
AV-S3IH	大气温度 / $^{\circ}\text{C}$; 大气相对湿度 / %
AV-30WS	风速 / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
AV-3665	雨量 / mm
AV-10T	土壤温度 / $^{\circ}\text{C}$

根据 FAO Penman Monteith 公式^[15] (式 (3)) 计算 ET_0 , 其中在以天为步长计算时, $C_n = 90$, $C_d = 0.34$; 在以小时步长的计算中, $C_n = 37$, C_d 的取值根据文献 [16] 进行了修正, 其中白天 (6:00—20:00) $C_d = 0.24$, 晚间 (21:00—5:00) $C_d = 0.90$ 。土壤热通量 G 的计算根据以小时为时间尺度计算时的精度要求, 以固定系数乘以净辐射计算而得, 该系数在白天、晚间分别取 0.5 和 0.1^[15]。

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{C_n}{T + 273} U^2 (\theta_s - \theta_a)}{\Delta + \gamma (1 + C_d \times U_2)} \quad (3)$$

通过在样株旁埋设 2 m 管, 运用 TDR 每周按 20 cm 的间隔测定 2 m 内土壤体积含水量, 通过乘以土壤密度和土钻法的校正系数转换成质量含水量。

1.5 统计分析

选取 2008 年 4 月 30 日—10 月 13 日间 30 d 典型晴天的观测数据, 在 Origin8.0 程序下进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 柠条主根部单株液流速率日变化特征的比较

液流速率 (F_s) 是边材面积与液流密度的乘积。从图 1 中可以看出: 典型晴天日柠条根部液流速率日变化与潜在蒸散发的日变化趋势基本吻合。午间液流速率的宽峰型分布可能与冠层气孔对液流运动产生的影响有关。试验期间 3 株样株的日平均液流总量分别为 457.92、1014.66、292.12 $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$, 其排序与边材面积排序相同, 但总量差异显著。从表 1 可知: 根径较小的 1、3 号样株的边材面积分别为 2 号样株的 92.19% 和 70.57%, 而日平均液流量分别只占到 2 号样株的 45.13% 和 28.79%, 液流总量的个体间差异并没有与边材面积的差异成同等比例。对于同龄的柠条树种, 在相同的立地环境与测定时期, 影响液流个体间差异的主导因素可能是表征需求的叶面积间的差异, 表征输水潜力的边材面积的差异居次要地位, 林木即便有足够大的边材面积保证输水畅通, 如果没有一定的叶面积和旺盛的蒸腾作用形成足够的拉力, 树木的液流量也会受到限制。从图 1 中可以看出: 各样株由于根压的趋动均有夜间液流活动, 其中 2 号样株夜间平均液流量为 56.39 $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$, 占全天液流量的 5.56%, 这一比例与夜间蒸散发潜在所占全天的比例 5.10% 接近, 考虑到蒸散发潜在与液流速率间比较紧密的相关关系 ($r = 0.86$), 如果不考虑土壤水分的限制 (讨论见 2.4), 则 2 号样株的边材面积与叶面积大小比较匹配, 叶面积/边材面积为 0.62 $\text{m}^2 \cdot \text{cm}^{-2}$, 这一值可能表征了 2 号柠条具有与当地水文条件相协调的根冠比例。1 号、3 号样株夜间液流量所占比例较高, 分别占全天液流总量的 17.22% 和 16.97%, 夜间平均液流量分别达到 78.86、49.58 $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

2.2 基于叶面积的根部液流速率日变化特征的比较

从图 2 中可以看出: 2 号样株根部液流速率呈较典型的梯形曲线分布, 在 10:00—18:00 呈现出平均液流速率约为 0.02 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的平台期, 之前的上升和之后的下降阶段变化趋势均较单一, 夜间单位面积的液流速率约为零, 说明 2 号不仅午间冠层蒸腾

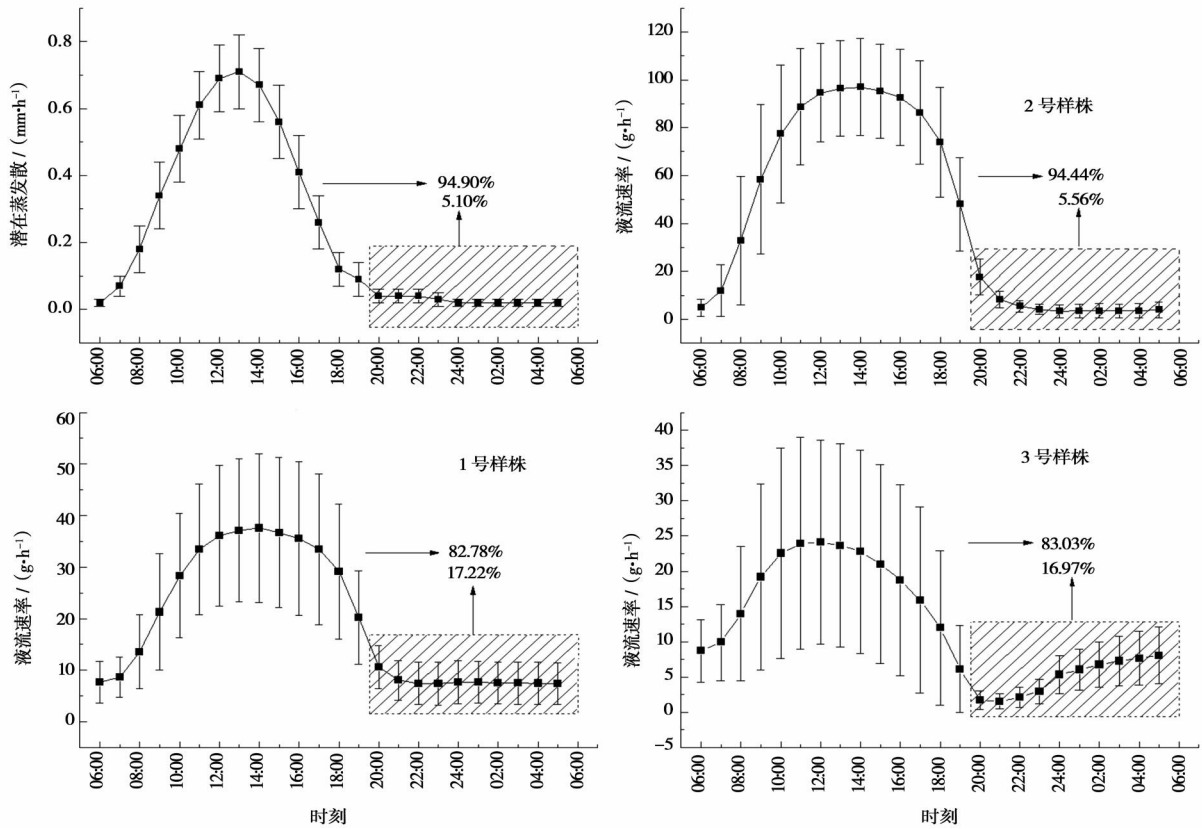


图 1 典型晴天日不同样株液流速率的日变化趋势

(实心方框和须线分别表示 30 d 的平均值和标准差, 箭头所示百分数为白天、夜间(斜线方框)所占全天的比例)

拉力强大, 使根部液流在较长时间保持在较稳定的水平, 而且边材输水系统与冠层散逸系统的面积相匹配。相对于 2 号样株而言, 1 号样株稳定液流时刻(平台期)出现时间推迟而结束时间提前, 3 号样株午间稳定液流时刻(平台期)持续时间也较短, 由于边材面积差异较小, 这可能主要是由于冠层叶面积较小使得蒸腾需求总体拉力较弱所致。虽然 2 号样株全天液流总量分别是 1 号样株的 2.22 倍和 3 号样株的 3.47 倍, 但平均单位叶面积的蒸腾量只有 1 号、3 号样株的 68% (1 号、3 号样株近似), 1 号、3 号样株单位叶面积较高的蒸腾量会形成冠层较强的水分亏缺, 成为夜间有较大液流活动(见 2.1)的主要驱动力。

2.3 基于叶面积的不同时段液流速率的比较

图 3 展示了各样株在一天中不同时段单位叶面积的液流速率, 从中可以看出: 各样株在整个下午时段(13:00—19:00)的液流量最大, 其次为上午(6:00—12:00), 该趋势与图 1 中潜在蒸发散的时间变化具有一致性。对于夜间, 虽然叶片已基本没有蒸腾, 但如果把因水分补充形成的夜间液流量平均分配于冠层, 仍可以反映冠层在白天的蒸腾特征, 其中

1 号、3 号样株夜间 2 个时段单位面积的液流速率均高于 2 号样株在相应时段, 这与 1 号、3 号样株在白天 2 个时段单位面积液流速率较高是相一致的, 这可能指示着夜间液流量与白天单位叶面积蒸腾失水状况具有某种相关性。1 号、3 号样株单位叶面积日液流总量基本相同(2.16 mm), 而且白天、夜间各时段也相等(分别为 1.98 和 0.57 mm), 这与其边材叶面积相近具有一致性(表 1)。图 3 中所示 3 号样株下午 13:00—19:00 时段的单位叶面积液流量并没有高于上午 6:00—12:00 时段, 这可能与该样株冠层叶面积小有关, 冠层叶面积小会使冠层导度相对增大, 午间大气强烈蒸发造成的冠层水分亏缺将严重, 这将促进启动气孔调节使蒸腾总量下降, 从而使平均午间峰值时刻提前(图 2), 午后的受限在晚上 20:00—24:00 仍有延续, 白天的这种较大的亏缺可能也是凌晨 1:00—5:00 时段液流量大的主要驱动力(图 3), 从而维持植株整体上的水分平衡。

2.4 土壤水分对液流活动的影响

相对于太阳辐射等环境因子, 土壤水分的日变化是微弱的、缓慢的, 土壤水分对树木液流日变化的影响很小; 但在干旱半干旱区, 过低的土壤水分含量

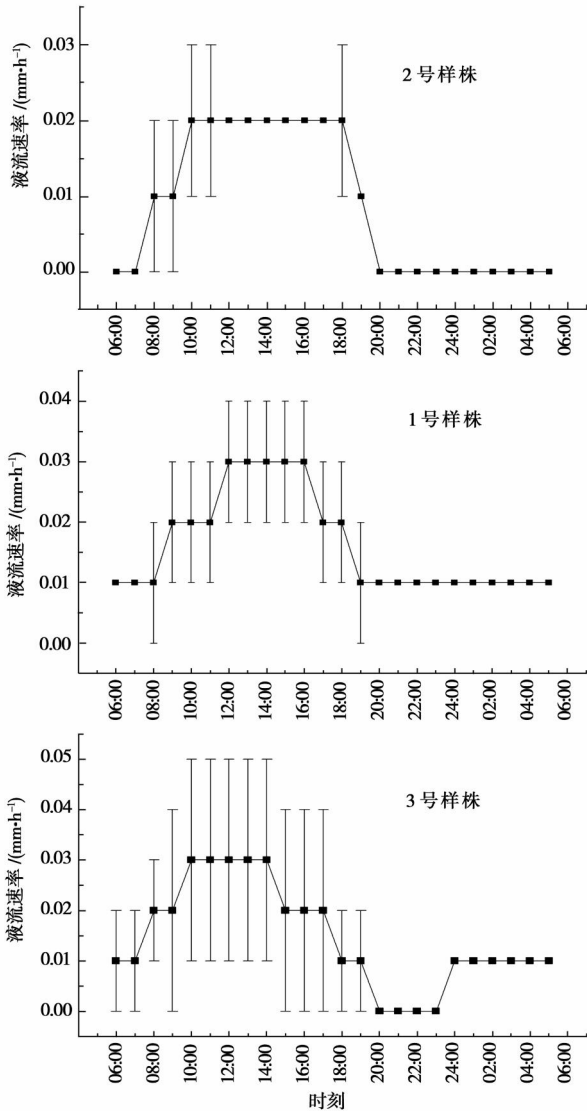


图 2 典型晴天日不同样株单位叶面积液流速率的日变化 (实心方框和须线分别为 30 d 的平均值和标准差)

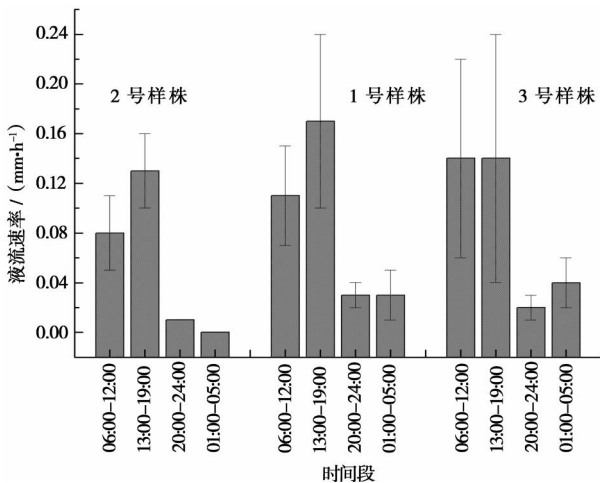


图 3 典型晴天日不同时间段单位叶面积液流速率日变化趋势分布图 (实心方框和须线分别表示 30 d 的平均值和标准差)

也可能导致木质部导管栓塞从而限制液流活动。本研究试验期间各样株 60~ 200 cm 内(根系的主要分布区)土壤水分共计 20 次测定值的统计分析表明(图 4):在 60~ 140 cm 内, 3 株样株间各层次的土壤水分基本上呈 3 号 > 2 号 > 1 号的趋势, 这与单株夜间液流总量值恰恰相反, 虽然尚无法确定它们间是否存在因果关系, 但由于夜间液流的主要动力是根压^[17], 3 号样株较高的土壤水分含量可能是促进其凌晨 1: 00—5: 00 时段液流升高的原因之一。160~ 200 cm 内土壤水分含量基本相等且变异小, 除了降水入渗受限外, 柠条根系分布密度相对较低可能也是主要原因。

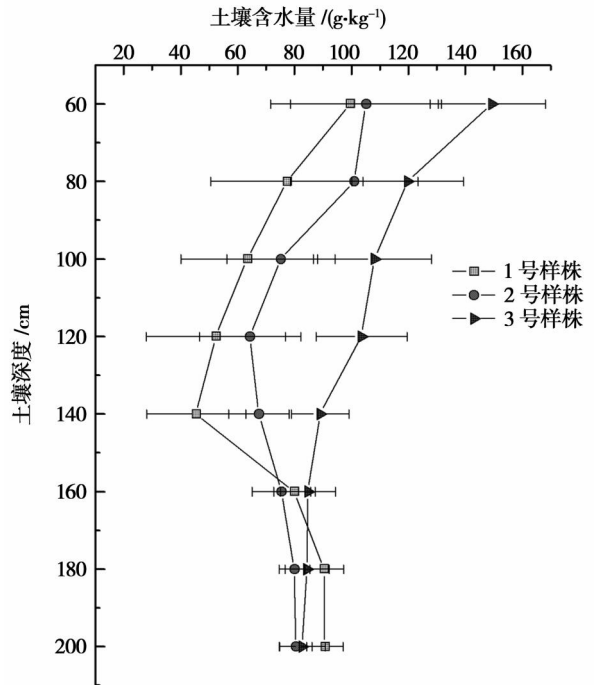


图 4 不同深度土壤水分状况分布图 (实心方框和须线分别表示平均值和标准差)

测定结果表明: 各样株不同层次土壤水分含量的差异明显, 但试验期间 1、2、3 号样株的根系主要分布层 60~ 140 cm 的土壤平均含水量分别占到田间持水量的 51.04%、63.26% 和 87% (期间降水 227.30 mm), 考虑到柠条属于主根发达的深根性树种, 在满足一定的土壤水分条件下, 土壤水分可能不是限制液流个体间日变化差异的主要因素。事实上已有研究表明, 如果土壤水分亏缺严重导致供水不能满足蒸发的需求, 则在典型晴天时液流日变化将出现较明显的时滞或午休现象^[15], 这类现象在本次试验的 30 d 典型晴天中均没有观察到, 这将支持 2 中对土壤水分不是导致液流日变化个体间差异

主要因子的判断,冠层是大气蒸发力的主要传递和液流输出的载体,同时也是液流活动的主要“控制阀”(气孔调节),冠层叶面积的差异是导致液流速率个体间差异的主要原因。

3 结论与讨论

在理想的土壤供水和根系吸水环境下,液流的传输受大气蒸发压、冠层的蒸腾能力和边材面积三方面的共同影响。王华^[4]研究发现马占相思(*Acacia mangium* Willd.)径级较小个体的夜间水分补充量占总蒸腾量的比率比径级较大个体的大,夜间水分补充量更多,在本次试验中发现,柠条单株日平均液流量的相对大小与相应的边材面积具有相同的变化趋势,但总量差异显著,这种差异并没有与边材面积的差异成同等比例。各样株单位叶面积分配的液流量的差异却不显著,这说明在影响液流个体间差异的主导因素中,表征需求的叶面积比表征输水潜力的边材面积与表征供水潜力的土壤水分含量具有更主要的地位。叶面积/边材面积为 $0.62 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ 的 2 号样株的边材输水能力与冠层需求潜力间基本吻合,这一值可能表征了柠条与当地水文条件相适应、较稳定的生物学特征。单位叶面积所分配的液流量比单株液流总量更利于解释液流速率的日变化动态,个体间叶面积的差异不仅形成气孔导度与数量上的差异,而且也导致冠层导度差异,从而成为影响水分输散速率的主要生物学因子。对于生长健康的植物,单位叶面积的蒸腾速率和气孔导度随叶面积减小而在一定范围内升高^[7],较小叶面积会提高冠层单位叶面积的蒸腾量,以使冠层日间受到较强的水分胁迫,夜间在根压的作用下补充这部分水分损失,从而使夜间液流增大。

树木蒸腾的生物学结构由树木吸收、传导和散逸系统组成,树形管道模型理论将林木的传导系统视为若干单位管道系的集合,树冠叶量取决于树干内具有导水能力的横断面积大小^[18],这说明在理想环境条件下(没有水、肥、光的限制)的树木其冠层叶量与边材面积存在统计关系,但对于现实林分而言,由于各类干扰和个体间的竞争,从水分运输与利用角度来看,林木边材面积与冠层叶量往往并不是最优匹配,在实际林木水分利用的研究中如果忽略了冠层叶面积这一重要因子,就难以全面系统的反映树木水分传输连续体间的联系,必然削弱对液流真实规律认识的可靠性。

参考文献:

- [1] IU P, Laurent U, 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
- [2] 孙慧珍,康绍忠,龚道枝. 测定位点对计算梨树树干液流的影响 [J]. *应用生态学报*, 2006, 17(11): 2024-2028
- [3] 刘海军, Shabtaic, Josef T, 等. 应用热扩散法测定香蕉树蒸腾速率 [J]. *应用生态学报*, 2007, 18(1): 35-40
- [4] 王华,赵平,蔡锡安,等. 马占相思夜间树干液流的分配及其对整树蒸腾估算的影响 [J]. *植物生态学报*, 2007, 31(5): 777-786
- [5] 王华,赵平,蔡锡安,等. 马占相思夜间树干液流与光合有效辐射和水汽压亏缺的时滞效应 [J]. *应用生态学报*, 2008, 19(2): 225-230
- [6] 熊伟,王彦辉,于澎湃,等. 华北落叶松树干液流的个体差异和林分蒸腾估计的尺度上推 [J]. *林业科学*, 2008, 44(1): 34-40
- [7] 孙慧珍. 东北东部山区主要树种树干液流特征研究 [M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 2006
- [8] 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
- [9] Morkawa Y, Hattori S, Kiyono Y. Transpiration of a 31-year old *Chamaecyparis obtuse* Enkl Stand before and after thinning [J]. *Tree Physiology* 1986, 2(1/3): 105-114
- [10] Hatton T J, Wu H I. Scaling theory to extrapolate individual tree water use to stand water use [J]. *Hydrobiologia*, 1995, 9: 527-540
- [11] Vertessy R A, Hatton R J, Reece P H, et al. Estimating stand water use of large mountain ash trees and validation of the sap flow measurement technique [J]. *Tree Physiology* 1997, 17: 747-756
- [12] Katherine A, McCullough Klaus W, et al. A comparison of daily water use estimates derived from constant heat sap flow probe values and gravimetric measurements in pot-grown saplings [J]. *Tree Physiology*, 2007, 27: 1355-1360
- [13] Rafael P, Jan C, Pilar L. Variation in the radial patterns of sap flux density in pubescent oak (*Quercus pubescens*) and its implications for tree and stand transpiration measurements [J]. *Tree Physiology* 2007, 27: 537-548
- [14] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas fir stand by means of sap flow measurements [J]. *Tree Physiology* 1987, 3: 309-320
- [15] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements [M]. FAO Irrigation and Drainage Paper 1998, 56: 301
- [16] Allen R G, Williams O, Pruitt et al. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ET₀ by the FAO 56 Penman-Monteith method [J]. *Agricultural Water Management* 2006, 81: 1-22
- [17] Fisher J B, Bakker D, Misson L, et al. What the towers don't see at night: nocturnal sap flow in trees and shrubs at two AmeriFlux sites in California [J]. *Tree Physiology*, 2007, 27(4): 597-610
- [18] 马钦彦,刘胜,刘志刚. 树形管道模型原理 [J]. *北京林业大学学报*, 1991, 18(3): 84-91