

# 沙地赤松树干边材液流速率的方位特征研究

韩辉<sup>1,2</sup>, 张学利<sup>1,2</sup>, 党宏忠<sup>3\*</sup>, 宋晓东<sup>1,2</sup>, 孟鹏<sup>1,2</sup>, 张日升<sup>1,2</sup>

(1. 辽宁省固沙造林研究所, 辽宁 阜新 123000; 2. 辽宁章古台科尔沁沙地生态系统国家定位观测研究站, 辽宁 彰武 123000;  
3. 中国林业科学研究院荒漠化研究所, 北京 100091)

**摘要:** [目的] 确定优良固沙树种沙地赤松 (*Pinus densiflora*) 树干边材液流速率 ( $J_s$ ) 方位变化规律, 探讨环境因素对方位差异的影响。 [方法] 采用热扩散式树干液流计 (TDP) 连续监测树干液流并同步监测环境因素, 比较分析不同方位树干液流速率的差异、季节动态及与降水、土壤体积含水率 ( $\theta$ )、太阳辐射强度 ( $R_s$ ) 间的关系。 [结果] 表明: (1) 在赤松树干东、南、西、北 4 个方位上,  $J_s$  的日变化与季节变化均呈现出基本一致的格局, 且均与  $R_s$  间表现出紧密的协同变化关系; (2) 在中等强度干旱和极端干旱情况下, 各方位边材  $J_s$  均同步受到明显抑制, 在土壤水分得到充分补充后又快速回升; (3) 在典型晴日里, 树干各方位边材  $J_s$  其日间峰值出现的时刻有差异, 呈从早到晚分别是东侧、南侧、西侧、北侧这种顺时针的方位规律; (4) 在整个生长季,  $J_s$  的日平均值大小一般为南侧 > 西侧 > 北侧 > 东侧, 但方位间差异并不显著 ( $P=0.35$ ), 北侧  $J_s$  的平均值最接近 4 个方位的平均值 (约为平均值的 1.01 倍)。 [结论] 为降低观测成本, 通过北侧一个方位的测定来估算赤松单株的液流量具有较好的可靠性; 影响赤松各方位液流过程明显变化的  $\theta$  的阈值为 7.5%。

**关键词:** 液流速率; 赤松; 方位; 水分利用; 热扩散技术 (TDP)

中图分类号: S718.45

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2019)02-0039-07

树木通过边材把根系吸收的水分传输到冠层, 即树干液流过程 (sap flow), 是在个体尺度上分析树木的水分利用特征、诊断树木水分状况的有力工具<sup>[1-3]</sup>, 也是估算单株蒸腾量的有力手段之一<sup>[4-5]</sup>。目前, 热示踪技术因能够连续、自动监测到边材液流速率而得到广泛运用<sup>[6-7]</sup>。然而, 除了树木优势度<sup>[8]</sup>、不同分化等级<sup>[9]</sup>等树形因子可能引起液流速率在不同个体间的明显差异外, 从某一方位测定的边材液流速率是否能够有效地代表整个树干的边材液流传输的平均值, 从而为估算单株的液流量提供可靠依据, 仍然没有取得一致的结论, 如报道认为西伯利亚落叶松 (*Larix sibirica* Ledeb.)<sup>[10]</sup>、沙地樟子松 (*Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv.) 均表现出南侧液流速率高<sup>[11]</sup>, 而枣树 (*Ziziphus jujuba* Mill.) 西向液流速率较高<sup>[12]</sup>, 旱柳 (*Salix matsudana* Koidz.) 与小叶杨 (*Populus simonii* Carr) 方位差异的关系不固定, 并随季节而变化等<sup>[13]</sup>。可见, 明确一个树种边材液流速

率的方位特征, 对于更深入地认识其水分传输特征、提高单株蒸腾量的估算都具有重大意义。

赤松 (*Pinus densiflora* Sieb. et Zucc.) 是继樟子松沙地引种培育成功后的又一个优良固沙造林树种<sup>[14-15]</sup>。对于沙地樟子松, 目前的研究已经对其树干液流特征有了较完整的认识<sup>[16-18]</sup>, 并发现了液流速率较明显的南、北方位差异<sup>[11]</sup>, 但是, 对于赤松在这一地区表现的水分利用特征仍很少见报道。作为一个新的优良固沙树种, 在大面积推广前迫切需要对其水分利用特征开展系统研究。为此, 本研究利用热扩散技术 (TDP) 对赤松树干 4 个方位的液流速率开展连续监测, 以期对沙地赤松的液流传输特征有较全面的认识, 为沙地赤松的生产经营活动提供技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验地选择在科尔沁沙地东南缘的辽宁省固沙

收稿日期: 2018-04-28 修回日期: 2018-08-08

基金项目: 国家自然科学基金 (31570704); 中央基本科研业务资金 (CAFYBB2014MA013)

\* 通讯作者: 党宏忠, E-mail: hzdang@caf.ac.cn

造林研究所实验林场三家子实验区。地理位置 42° 40'57" N, 122° 33'06" E, 海拔 207 m, 年均气温 6.3℃, 全年无霜期 150 ~ 160 d, 年均降水量 475.5 mm (1954—2010 年), 降水 60% ~ 70% 集中在 6—8 月, 年蒸发量 1 553.2 mm, 约为降水量的 3.27 倍。该区土壤以风沙土为主, 沙土颗粒均匀, 沙层厚度 126 ~ 128 m。林下草本主要为马唐 (*Digitaria sanguinalis* L. Scop.)、拂子茅 (*Calamagrostis epigeos* L. Roth.)、碱草 (*Aneurolepidium chinense* Trin. Kitag.)、中华隐子草 (*Cleistogenes chinensis* (Maxim.) Keng) 等 18 种草本, 草本总盖度约 93%。

表 1 样木基本情况

Table 1 Information of sample trees for measuring sap flow density

编号 Tree number	胸径 DBH/cm	死枝下高 Dead branch height /m	活枝下高 Live branch height/m	全树高 Tree height/ m	冠幅 Crown diameter/m			
					东侧 East side	南侧 South side	西侧 West side	北侧 North side
Tree 1	21.3	4.5	5.4	11.2	3.0	3.2	2.6	2.6
Tree 2	20.9	3.9	5.2	9.5	2.9	3.0	2.5	3.1
Tree 3	25.1	-	3.6	10.8	3.1	3.6	3.4	2.7

1.2.2 树干液流测定 应用 FLGS-TDP 植物液流计 (Dynamax, U. S. A), 于 2017 年 3 月分别在选定样株树干的东、南、西、北各安装 1 套 TDP 液流计 30 mm 长度探针传感器, 具体安装过程及防护措施见文献 [19-20]。数据采集器为 CR1000 (Campbell Scientific, U. S. A), 采样间隔为 10 min, 每隔 30 min 记录 1 次数据的平均值。选取 4—10 月的数据代表 1 个完整生长季进行数据分析。

液流速率 ( $J_s$ ) 的计算公式如下:

$$J_s = 0.0119 K^{1.231} \times 3600^{[21]}$$

式中:  $J_s$  为每小时的平均液流速率 ( $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$ );  $K = (dT_m - dT)/dT$ , 其中  $dT_m$  为无液流时加热探针与参考探针的最大温差值,  $dT$  为瞬时温差值。 $dT_m$  的确定以 10 天为 1 个周期, 采用两次回归法确定 [7, 20]。

1.2.3 土壤含水量的观测 利用便携式土壤水分测量仪 (TRIME-Pico 64/32 TDR, IMKO, 德国) 监测土壤体积含水率。于 2017 年 3 月末在样地内随机埋设 TDR 测管 3 处, 每处在 0 ~ 180 cm 层次内按 10、20、50、100、150、180 cm 共 6 个层次分层监测。每月 10、20、30 日为观测时间。

1.2.4 气象因子的监测 利用章古台生态站 CAWS600-B 型自动气象站 (华云公司, 中国) 监测的太阳总辐射、降水量数据。

## 1.2 材料与方法

1.2.1 材料 试验林为辽宁省固沙造林研究所三家子实验区 16 林班 9 小班的赤松纯林, 林龄 40 年, 面积 2.7  $\text{hm}^2$ 。于 1977 年用 2 年生裸根苗造林, 初植密度 1 100 株  $\cdot \text{hm}^{-2}$ , 从 1977 年到 2016 年该林分经历 2 次间伐, 现保存密度 420 株  $\cdot \text{hm}^{-2}$ , 平均胸径 20.15 cm, 平均死枝下高 4.2 m, 平均活枝下高 4.5 m, 平均全树高 10.9 m, 东西冠幅平均 5.3 m, 南北冠幅平均 5.9 m。根据林分调查结果, 在样地内选取树干通直、生长良好、无病虫害的 3 株赤松作为树干液流测定样木, 样木情况见表 1。

## 2 结果与分析

### 2.1 液流速率及气象要素与土壤水分的季节动态

4—10 月试验期间共观测到 21 次有效降水 (单次降水 > 2.5 mm 的次数), 降水总量为 335.8 mm, 占该地区同期平均降水量 (448.0 mm, 1983—2017 年 4—10 月间) 的 75%, 其中约 75% 的降水集中在 7、8 月份, 年内分布极不均匀 (图 1a)。受降水的影响, 10 ~ 20 cm 土层的平均体积含水率 (SWC, %) 表现出与降水过程相一致的季节变化规律, 而 50 cm 以下土层的 SWC 仅对于 70.4 mm (8 月 3 日) 的强降水有响应, 之后对降水不再有响应。从季节动态来看, 4—6 月份为水分衰减期, SWC 变化在 6.18% ~ 9.85% 范围内。7—8 月份, 随着降水的集中, 土壤水明显上升, SWC 最高达 17.9%, 9 月份之后又进入衰减期。试验期间 (4—10 月份) 各月的 SWC (10 ~ 180 cm 平均值) 分别为 8.82%、7.03%、6.21%、7.56%、11.73%、8.92%、7.30%、8、9 月份的值较高, 6 月份最小 (图 1b)。受天气变化的影响, 太阳总辐射 ( $R_s, \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ) 的日平均值波动较大, 但自 8 月份之后  $R_s$  表现出较明显的递减趋势 (图 1c)。

不同方位边材液流速率 ( $J_s, \text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$ ) 总体上表现出较一致的季节变化动态。从整个生长季来看,  $J_s$  的排序为南侧 ( $97.7 \pm 47.7 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ ) > 西侧

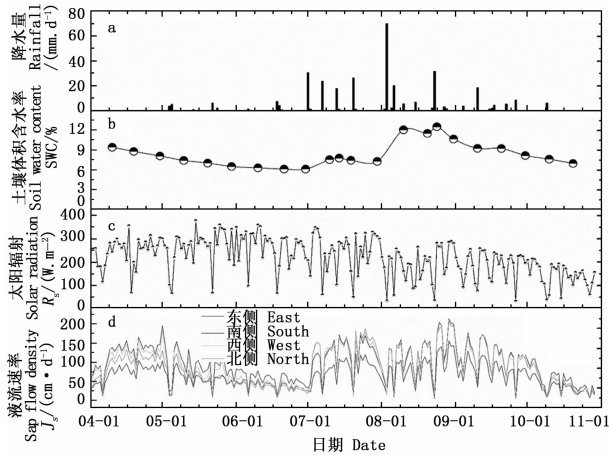


图1 液流速率与环境因素的季节变化动态

Fig.1 Seasonal dynamic of sap flow density ( $J_s$ ) and environmental factors

( $90.2 \pm 49.6 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ ) > 北侧 ( $85.7 \pm 50.8 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ ) > 东侧 ( $63.5 \pm 32.1 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ ), 其中北侧液流速率是4个方位平均值的1.01倍, 说明只测定北侧的液流速率就能较好地代表4个方位的液流。

### 2.2 典型晴天不同方位树干液流速率日变化进程比较

为了进一步比较不同方位  $J_s$  的日变化进程及

随季节的变化, 对整个生长季逐月气象条件筛查, 每月挑选出一典型晴天(确保该日数天前也为晴日), 比较其不同方位  $J_s$  的特征。就整个生长季节而言, 不同方位  $J_s$  的日变化进程有着不同的格局(图2a), 表现在南侧液流峰值出现早且峰值大( $11.5 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$ ), 其次为西侧液流峰值出现的时刻明显滞后。北侧液流表现出较典型的正态分布型, 而东侧液流的峰值最低( $9.68 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$ )。就不同月份方位特征的比较来看, 除了7、8月份西侧  $J_s$  略高于南侧外, 一般均以南侧  $J_s$  最高。赤松液流传输主要来自于南、西、北3个方位, 东侧  $J_s$  相对较低(图2a)。

一日内液流峰值出现的时刻均以东侧最早, 其次为南侧或北侧, 而以西侧为最晚。在生长季初期的4月份, 东、南、西、北各方位液流速率的峰值时间均比较早(图2b), 在11:30—12:00之间, 而在干旱月份的5—6月份, 峰值出现的时刻明显滞后, 如在6月份, 东、南、西、北各方位液流速率的峰值时间在16:00—17:30(图2d), 在降雨充沛的7—8月, 峰值时刻又趋于回归, 如在8月份, 东、南、西、北各方位液流速率的峰值时间在14:00—15:00(图2f)。尽管如此, 各方位液流速率峰值出现时刻差异不显著 ( $P = 0.53$ )。

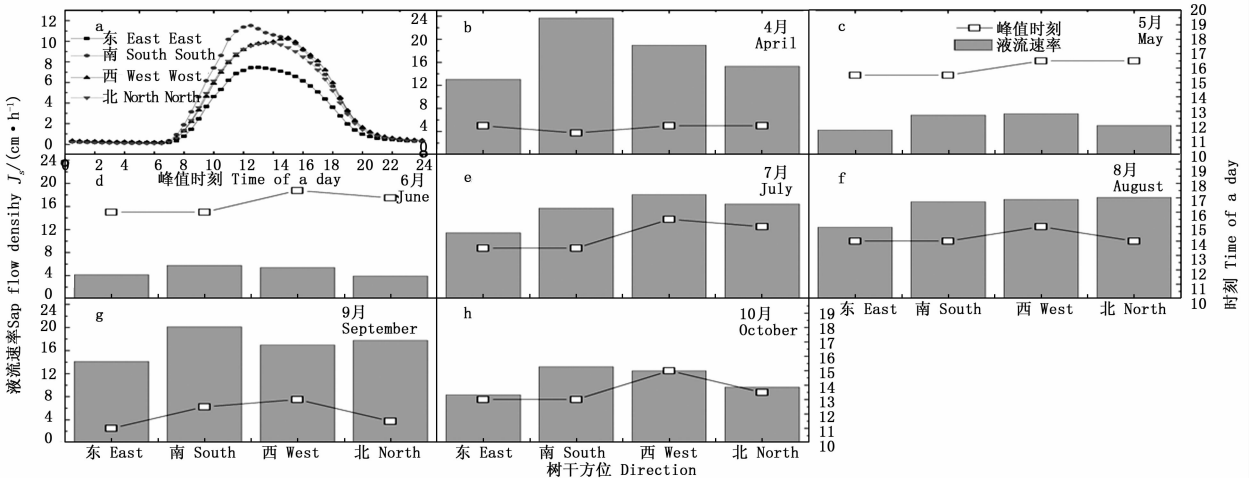


图2 不同方位液流速率的日变化过程, 峰值及峰值时刻的季节性差异

Fig.2 Diurnal course, peak value and peak time of sap flow density from four directions of the trunk over a growing season.

对不同方位液流速率以天为时间单位逐月进行统计结果表明, 在绝大部分季节, 不同方位液流速率以南侧最大, 其次依次为西、北、东侧(表2)。除10月份不同方位间差异不显著外, 其余月份差异均显著( $p = 0.05$ 水平)。

### 2.3 不同方位树干液流速率逐旬变化的比较

以旬为时间尺度的比较结果表明, 4—6月, 各方位  $J_s$  的旬平均值遵循相似的动态变化进程, 且具有较稳定的排序: 南侧 > 西侧 > 北侧 > 东侧。其中4月份  $J_s$  呈快速上升(图3a), 到下旬达到最高

表 2 不同方位液流速率差异统计

Table 2 Differences of sap flow density in different direction

月份 Month	液流速率百分比 Percentage/%				统计结果 Statistical results		
	南侧 South side	西侧 West side	北侧 North side	东侧 East side	变异系数 Cv	均方根 RMS	P 值 P value
4	100	92	78	59	0.30	30.01	<0.01
5	100	83	68	60	0.45	32.68	<0.01
6	100	71	59	67	0.32	13.59	<0.01
7	100	104	108	66	0.37	41.98	<0.01
8	100	97	98	69	0.48	53.17	=0.01
9	100	96	99	69	0.33	35.28	<0.01
10	100	86	81	66	0.58	24.96	=0.06

值:南侧(14.3 m·旬<sup>-1</sup>) > 西侧(13.1 m·旬<sup>-1</sup>) > 北侧(11.5 m·旬<sup>-1</sup>) > 东侧(8.8 m·旬<sup>-1</sup>)。5—6 月份  $J_s$  快速下降,其间降水强度分别为 3.8 mm(5 月 4 日)、5.2 mm(5 月 5 日)、6.2 mm(5 月 22 日)、7.4 mm(6 月 18 日)、4.2 mm(6 月 19 日)的次降雨事件只带来了液流的短暂回升(仅持续 2~3 天)(图 1d)。经过 1 个月的干旱期,北侧  $J_s$  最低(图 3b)。7 月份,随着几次强降雨事件(如 30.7 mm,7 月 1 日;23.8 mm,7 月 7 日;17.9 mm,7 月 13 日;26.4 mm,7 月 20 日), $J_s$  快速恢复,其中北侧  $J_s$  恢复强度最大(图 3c),到 7 月下旬北侧  $J_s$  平均为 15.4 m·旬<sup>-1</sup>。8 月份,随着降雨更加频繁, $J_s$  能达到的峰值基本稳定,只是受天气的影响,各旬实际的液流速率间波动较大(图 3d)。可以看出,随着土壤水分状况的改善,南、北、西 3 个方位的  $J_s$  值更高且更接近,与东侧  $J_s$  间的差距变大。9 月中旬后,随着气象蒸发条件的快速减弱,各方位  $J_s$  均下降明显,进入消退期(图 3e),直至 10 月下旬的生长末季,各方位间  $J_s$  比较接近(1.9~2.9 m·旬<sup>-1</sup>)。

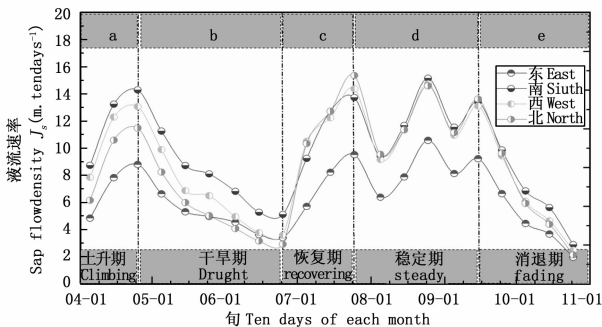


图 3 不同方位液流速率逐旬比较

Fig. 3 Comparison of sap flow density from four trunk direction on ten-day time scale

## 2.4 不同方位树干液流速率与太阳辐射间的关系

将整个生长季划分为干旱季(5—6 月份)与非干旱季,分别对不同方位液流速率与太阳辐射进行相关分析,结果表明:在非干旱期,各方位的  $J_s$  对  $R_s$  的增加具有紧密的协同响应关系(Guass 函数关系),表现出太阳辐射对树木蒸腾过程较强的驱动效应。但这一关系也具有阈值,当  $R_s$  升高到约 287.4~313.9 W·m<sup>-2</sup> 范围后,随着  $R_s$  的进一步增加, $J_s$  表现出下降趋势(图 4)。在干旱期, $J_s$  明显低于相同辐射强度下的非干旱期的  $J_s$ ,且与  $R_s$  间的关系不明确,反映了土壤水分亏缺对大气驱动蒸腾过程的抑制效应。

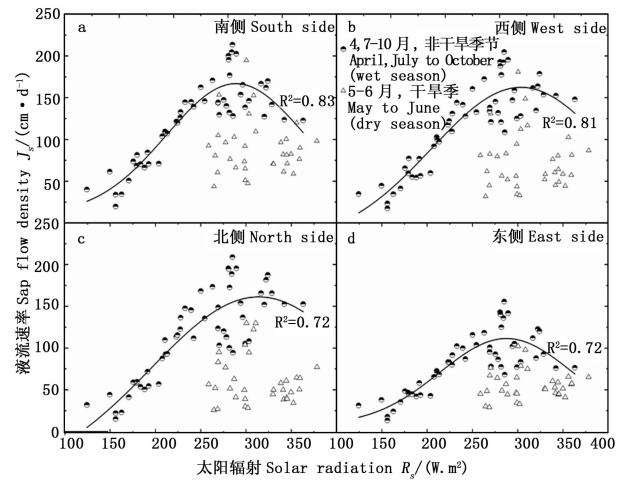


图 4 不同方位树干液流速率与太阳总辐射的关系

Fig. 4 Relationships between sap flow density in four directions of trunk and solar radiation

## 2.5 不同方位树干液流速率与土壤水分含量间的关系

土壤水分对乔木树种液流过程的影响一般仅在较大的时间尺度上才能显现出来。试验期间的 4—6 月份,获得的降水量只占同期降水均值(1983—2017 年)的 23.0%,为历年该时段所占比例最低值(范围为 23%~156%),赤松经历了较严重的水分胁迫,在 6 月末时,SWC 低至 6.2%,林下草本都已经处于萎蔫状态。尽管从图 1d 和图 3b 已经直观地展现了  $J_s$  对水分胁迫的响应,进一步通过构造变量  $J_s/R_s$  建立其与 SWC 之间的关系,结果表明:赤松 4 个方位的  $J_s/R_s$  具有对 SWC 较一致的响应规律,当 SWC 下降到一定值后, $J_s/R_s$  快速下降,其中南、西、北 3 侧当 SWC 下降到约为 7.5%~8.0% 时  $J_s/R_s$  快速下降(图 5a~5c),而对于东侧,这一值约为 8.0%~8.5%(图 5d)。

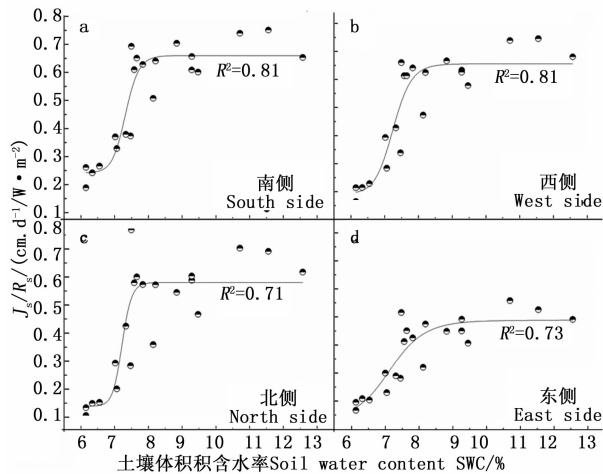


图5 不同方位液流速率与土壤含水量的关系

Fig.5 Relationships between sap flow density and soil water content

## 3 讨论

### 3.1 树干液流的方位差异及其影响因素

本研究中监测到了赤松树干边材液流速率不同方位的变化,总结出整个生长季液流速率平均值大小的排序:南侧>西侧>北侧>东侧,南侧液流速率比其它方位的液流速率值高,这与其它学者对于樟子松<sup>[12]</sup>、黄土区苹果树<sup>[23]</sup>等树种的研究结果类似,但也与黄土区枣树(西侧最大)<sup>[13]</sup>和苹果树(北侧最大)不一致。而且,液流速率方位特征的排序会随着季节的不同而变化,如在干旱的6月份,北侧液流最低,而在7—9月份,北侧液流速率快速升高并与西侧和南侧接近,三者都均远远高于东侧液流。对于赤松而言,北侧液流速率更敏感地响应于土壤水分的变化。本研究中监测到不同方位液流一日内峰值时刻早晚的差异,一般均以东侧最早,其次为南侧或北侧,而以西侧为最晚,这似乎与北半球地球自转引起的太阳入射角变化相一致,但是就某一方位而言,峰值出现的时刻在不同季节仍有较大差异(图2),其中在干旱月份(如5—6月),各方位液流速率的峰值降低且峰值时刻普遍都推后,显示了土壤水分亏缺加大了液流传输的阻力。

### 3.2 太阳辐射对树干液流过程的驱动

在树木液流特征研究中,太阳辐射作为树木蒸腾过程的主要驱动力之一而被广泛关注<sup>[24-25]</sup>。本研究中发现赤松在日时间尺度上,其液流传输对太阳辐射有较强的正响应关系,这与国内众多研究结果相类似<sup>[26-30]</sup>。但同时也发现了太阳辐射对液流

驱动过程的阈值效应,即当太阳辐射日平均值升高到约 $287.4 \sim 313.9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 范围后,随着太阳辐射的进一步增加,液流速率反而下降(图4),这说明即使在土壤水分状况较好的环境条件下,赤松仍能够较保守地利用土壤水分,这可能与其较强的叶片气孔调控策略相一致<sup>[24]</sup>。这一特性可能也是赤松在沙地生长表现较优的主要原因。

### 3.3 液流对土壤水分变化的响应

土壤水分状况对树木的蒸腾耗水过程有着直接的影响<sup>[31]</sup>。但是一般在较短时间尺度上难以准确辨析影响的具体关系,尤其是土壤水分阈值。本研究中通过构造液流速率与太阳辐射比率( $J_s/R_s$ )这一变量来描述大气对树木液流活动的驱动力。通过建立 $J_s/R_s$ 与SWC间的关系,确定了影响各方位液流过程的土壤水分阈值(7.5%~8.5%),这一阈值与章古台地区土壤水分影响樟子松液流的范围基本一致<sup>[32-33]</sup>。

## 4 结论

赤松在南、西、北、东4个方位的液流速率表现出不同的水平。相比较而言,赤松南侧的液流速率最高,其次依次为西侧和北侧,3个方位均高于东侧液流速率( $P < 0.05$ )。但4个方位的液流速率均具有相近的日变化格局与季节变化过程。树干东侧液流速率的日峰值最小,且出现的时刻也最早。平均而言,北侧液流速率的平均值更接近4个方位液流速率的平均值(约为1.01倍),为降低观测成本,实际测定中可以用北侧一个方位的测定值来估算整个单株的液流通量。液流速率的季节变化受太阳辐射与土壤含水率的共同影响,但土壤水分对液流速率的阈值效应更明显。当土壤体积含水率下降到约7.5%以下时,赤松各个方位的液流速率均呈明显的下降趋势,且在土壤水分得到充分补充后,各方位液流速率能够较快恢复。

### 参考文献:

- [1] Chirino E, Bellot J, Sanchez J R. Daily sap flow rate as an indicator of drought avoidance mechanisms in five Mediterranean perennial species in semi-arid southeastern Spain[J]. *Trees*, 2011, 25(4): 593-606.
- [2] Nadezhkina N. Sap flow index as an indicator of plant water status [J]. *Tree Physiology*, 1999, 19(13): 885-891.
- [3] Børja I, Světlik J, Nadezhdin V, et al. Sap flux—a real time assessment of health status in Norway spruce[J]. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2015, 31(5): 450-457.

- [4] Gong D Z, Kang S Z, Yao L M, *et al.* Estimation of evapotranspiration and its components from an apple orchard in northwest China using sap flow and water balance methods[J]. *Hydrological Processes*, 2007, 21(7): 931–938.
- [5] Whitley R, Medlyn B, Zeppel M, *et al.* Comparing the Penman – Monteith equation and a modified Jarvis-Stewart model with an artificial neural network to estimate stand-scale transpiration and canopy conductance[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 373: 256–266.
- [6] Lu P, Urban L, 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.
- [7] 党宏忠,张劲松,赵雨森. 应用热扩散技术对柠条锦鸡儿主根液流速率的研究[J]. *林业科学*, 2010, 46(3): 29–36.
- [8] 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.
- [9] 刘家霖,满秀玲,胡悦. 兴安落叶松天然林不同分化等级林木树干液流对综合环境因子的响应[J]. *林业科学研究*. 2016, 29(5): 726–734.
- [10] 白志强,刘华,余春燕,等. 西伯利亚落叶松树干液流的动态变化[J]. *河北农业大学学报*, 2016, 39(3): 49–54.
- [11] 张友焱,周泽福,党宏忠,等. 利用 TDP 茎流计研究沙地樟子松的树干液流[J]. *水土保持研究*, 2006, 13(4): 78–80.
- [12] 马建鹏,汪有科,陈滇豫,等. 不同时间尺度上枣树树干液流的变异特性[J]. *干旱地区农业研究*, 2016, 34(3): 95–101.
- [13] 徐丹丹,尹立河,侯光才,等. 毛乌素沙地旱柳和小叶杨树液流密度及其与气象因子的关系[J]. *干旱区研究*, 2017, 34(2): 375–382.
- [14] 孟鹏. 章古台沙地 37 年生赤松和樟子松生长特性研究[J]. *辽宁林业科技*, 2013(5): 20–23, 44.
- [15] 张日升. 章古台沙地 3 种针叶树生长规律对比研究[J]. *安徽农业科学*, 2017, 45(18): 140–142, 175.
- [16] 韩辉,张学利,党宏忠,等. 基于树干液流通量的沙地樟子松合理林分密度的确定[J]. *林业科学研究*, 2015, 28(6): 797–803.
- [17] 韩辉,白雪峰,徐贵军,等. 章古台樟子松树干液流的密度特征[J]. *东北林业大学学报*, 2013, 41(4): 27–31+82.
- [18] 卢志朋,魏亚伟,李志远,等. 辽西北沙地樟子松树干液流的变化特征及其影响因素[J]. *生态学杂志*, 2017, 36(11): 3182–3189.
- [19] Dang H, Zha T, Zhang J, *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.
- [20] Lu P. A direct method for estimating the average sap flux density using a modified Granier measuring system[J]. *Functional Plant Biology*, 2001, 24(28): 701–705.
- [21] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements[J]. *Tree Physiology*, 1987, 3(4): 309–320.
- [22] Lu P, Woo K C, Liu Z T. Estimation of whole-plant transpiration of bananas using sap flow measurements[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2002, 53(375): 1771–1779.
- [23] 孟秦倩,王健,张青峰,等. 黄土山地苹果树树体不同方位液流速率分析[J]. *生态学报*, 2013, 33(11): 3555–3561.
- [24] Naithani K J, Ewers B E, Pendall E. Sap flux-scaled transpiration and stomatal conductance response to soil and atmospheric drought in a semi-arid sagebrush ecosystem[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 464–465: 176–185.
- [25] Clausnitzer F, Koestner B, Schwaerzel K, *et al.* Relationships between canopy transpiration, atmospheric conditions and soil water availability-Analyses of long-term sap-flow measurements in an old Norway spruce forest at the Ore Mountains/Germany[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(8): 1023–1034.
- [26] 姚依强,陈珂,王彦辉,等. 华北落叶松树干液流速率主要影响因子及关系的时间尺度变化[J]. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(2): 155–161.
- [27] 万艳芳,于澎涛,刘贤德,等. 祁连山青海云杉树干液流密度的优势度差异[J]. *生态学报*, 2017, 37(9): 3106–3114.
- [28] 李浩,胡顺军,朱海,等. 基于热扩散技术的梭梭树干液流特征研究[J]. *生态学报*, 2017, 37(21): 7187–7196.
- [29] 张晓艳,褚建民,孟平,等. 民勤绿洲荒漠过渡带梭梭(*Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey) Bunge) 树干液流特征及其对环境因子的响应[J]. *生态学报*, 2017, 37(5): 1525–1536.
- [30] 党宏忠,杨文斌,李卫,等. 新疆杨树树干液流的径向变化及时滞特征[J]. *生态学报*, 2015, 35(15): 5110–5120.
- [31] 胡广录,赵文智,谢国勋. 干旱区植被生态需水理论研究进展[J]. *地球科学进展*, 2008, 23(2): 87–94.
- [32] 焦树仁. 辽宁省章古台樟子松固沙林提早衰弱的原因与防治措施[J]. *林业科学*, 2001, 37(2): 131–138.
- [33] 焦树仁. 辽宁章古台樟子松人工林水分动态的研究[J]. *植物生态学与地植物学学报*, 1987, 11(4): 296–307.

## Azimuthal Variation of the Sap Flow Rate in the Trunk of *Pinus densiflora* Planted in Sandy Land

HAN Hui<sup>1,2</sup>, ZHANG Xue-li<sup>1,2</sup>, DANG Hong-zhong<sup>3</sup>, SONG Xiao-dong<sup>1,2</sup>, MENG Peng<sup>1,2</sup>, ZHANG Ri-sheng<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Sand-fixation Afforestation Research of Liaoning Province, Fuxin 123000, Liaoning, China;

2. Zhanggutai Desert Ecosystem Research Station, Liaoning Province, Zhangwu 123000, Liaoning, China;

3. Institute of Desertification, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

**Abstract:** [ **Objective** ] To determine the azimuthal variation of the sap flow rate of trunks ( $J_s$ ) and estimate the effects of environmental factors on azimuthal variation. [ **Method** ] The sap flow rate of *Pinus densiflora*, an important windbreak and sand fixation species, was monitored continuously during the growing season using a thermal dissipation probe (TDP) method, combined with simultaneous observations of precipitation, soil moisture, and solar radiation and other environmental factors. [ **Result** ] The results of comprehensive analysis showed that the daily and seasonal changes of the  $J_s$  in the four directions of the trunk basically followed the same pattern, and all were in accordance with the solar radiation. In moderate-intensity drought and extreme drought conditions, the  $J_s$  of each direction was significantly suppressed simultaneously and quickly recovered after the soil moisture was fully replenished. On a typical sunny day, there were differences in the time at which the peaks of the  $J_s$  appeared at various times. From early to later, it ranked with the order of the east, south, west, and north sides clockwise. During the whole growing season, the daily mean value of  $J_s$  was generally ranked of south > west > north > east, but the difference between directions was not significant ( $P = 0.35$ ). Statistics show that the average of the  $J_s$  in the north side was the closest to the average of four azimuths (approximately 1.01 times the average). [ **Conclusion** ] The sap flow estimated through a measurement on the north side in the actual measurement will get better reliability in order to reduce the cost of observation. Meanwhile, the threshold value of soil moisture affecting the sap flow of *Pinus densiflora* is about 7.5%.

**Keywords:** sap flow rate; *Pinus densiflora*; azimuth; water use; Thermal Dissipation Probe method (TDP)

(责任编辑:彭南轩)