

雷州半岛尾巨桉人工林树干液流对台风天气的响应

王志超, 许宇星, 竹万宽, 杜阿朋*

(国家林业局桉树研究开发中心, 广东湛江桉树林生态系统国家定位观测研究站, 广东 湛江 524022)

摘要: [目的] 为正确认识台风对桉树人工林蒸腾耗水的影响。[方法] 采用热扩散茎流计对尾巨桉树干液流在台风前后进行连续监测, 分析其对台风天气的响应, 并同步测定林分气象条件, 分析台风过程中树干液流与气象因子之间的相关性。[结果] 表明: 台风当天, 树干液流密度与台风登陆前后(单峰)不同, 呈不规则多峰型曲线, 树干日均液流密度($2.89 \text{ mL} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$)较台风前减少 53%, 夜间液流波动较大; 日间最大峰值($7.76 \text{ mL} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$)出现在下午, 峰值较台风前降低 55%, 树干液流日通量极显著小于台风登陆前后; 台风登陆前树干液流密度峰值($17.4 \text{ mL} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$)及平均液流密度($6.15 \text{ mL} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$)分别是台风登陆过后的 1.24 倍和 1.14 倍, 台风后树干液流日通量较台风前均有所下降; 台风当天, 影响液流的主要气象因子为风速、大气温度、空气湿度、水汽压亏缺和降雨量, 液流与风速的相关系数较台风前增大 52%, 与降雨量的相关系数是台风前的 2.6 倍, 与其他因子的相关系数较台风前均下降了 50% 左右, 而台风登陆前后之间的主要影响因子差异不大。[结论] 台风当天的日均液流密度、白天的平均液流密度和日通量均极显著小于台风前后, 而夜间液流显著大于台风前后; 台风前后的日均液流密度差异不显著, 夜间液流台风前显著大于台风后; 台风过程中风速成为影响液流的关键因子, 与太阳辐射相关性不显著, 其他影响因子与台风前后相同, 但相关系数除风速和降雨量外均显著下降。

关键词: 尾巨桉; 台风; 树干液流; 热扩散式探针法

中图分类号: S792.39

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2017)04-0679-06

Responses of Sap Flow of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* to Typhoon Weather in Leizhou Peninsula

WANG Zhi-chao, XU Yu-xing, ZHU Wan-kuan, DU A-peng

(China Eucalypt Research Centre, Guangdong Zhanjiang Eucalyptus plantation Ecosystem Research Station, Zhanjiang 524022, Guangdong, China)

Abstract: [Objective] To examine the affect of typhoon to water consumption of eucalyptus plantation, [Methods] The sap flow of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* plantation was continuously measured using thermal diffusion stem flow meter (Germany, SF-G) during the typhoon process, and to analyze the responses of sap flow of *E. urophylla* × *E. grandis* to the typhoon weather conditions. The stand meteorological conditions were determined synchronously to enable the correlations between sap flow and meteorological factors to be examined during the typhoon weather process. [Result] The results showed that diurnal variations of sap flow displayed irregular multi-peak curves during the typhoon process, which was different from the typical single-peaked curves before and after the typhoon. The average daily flow density ($2.89 \text{ mL} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$) was 53% less than that before the typhoon landing. The sap flow during typhoon night changed a lot, and the maximum peak ($7.76 \text{ mL} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$) appeared in the afternoon which was 55% less than that before the typhoon landing. The flux in the day time during the typhoon process was significantly less than that before and after the typhoon ($P < 0.01$). The flow peak before ty-

收稿日期: 2017-01-09

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(31300383); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(CAFYBB2014QB024); 广东湛江桉树林生态系统国家定位观测研究站运行补助(2017-LYPT-DW-137)

作者简介: 王志超, 硕士, 助理研究员, 从事生态水文研究。E-mail: wzc2254@163.com

* 通讯作者: 杜阿朋, 博士, 副研究员, 从事森林生态学研究。E-mail: dapzj@163.com

phoon landing ($17.4 \text{ mL} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$) and the average flow density ($6.15 \text{ mL} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$) were respectively 1.24 times and 1.14 times after the typhoon, and the flux in day time after the typhoon was lower than that before the typhoon. The main meteorological factors during the typhoon weather process were wind speed, air temperature, air humidity, vapor pressure deficit and rainfall, and the correlation coefficient of the wind speed increased by 52% compared to that before the typhoon. The correlation coefficient of rainfall was 2.6 times in front of the typhoon, and the other factors decreased about 50% than that before the typhoon. The main meteorological factors changed little before and after the typhoon process. [**Conclusion**] The average daily flow density, average flow density in the day time and daily flux during typhoon process were significantly less than that before and after the typhoon landing. But the fluid flow at night was significantly greater than that before and after the typhoon process. There was no obvious difference about the average daily flow density before and after the typhoon landing. But the fluid flow at night before the typhoon landing was significantly greater than that after the typhoon landing. The typhoon speed became the key factor of fluid flow through, and no significant correlation with solar radiation during the typhoon was found. Other factors kept unchanged before and after the typhoon, but the correlation coefficient in addition to the wind speed and rainfall were down significantly.

Keywords: *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*; typhoon; stem sap flow; thermal dissipation probe (TDP)

台风是热带海洋上生成的一种强热带风暴,因其超强的风力和降雨严重影响了林业的正常可持续发展^[1-2],成为我国东南部沿海的主要自然灾害之一^[3]。目前,国内外很多学者研究了台风对森林生态系统的影响^[4-6],但大部分集中在森林生态系统的植被结构动态^[7-11]、生态水文功能^[12-13]、水土流失^[14]和森林恢复^[15]等方面的研究,对台风过程中林木单株生理活动研究较少。林木蒸腾是林木生理活动的重要体现,是林木吸水的主要动力,定量研究植物的蒸腾耗水一直是树木生理生态学和生态水文研究的重要方向^[16-17]。桉树(*Eucalyptus* L' Hérít.)作为我国南方的重要战略树种,其耗水研究一直是国内外研究的热点,王志超等^[18]对尾巨桉(*E. urophylla* × *E. grandis*)树干液流动态及其影响因子进行了分析,张宁南^[19]研究了尾叶桉(*E. urophylla* S. T. Blakely)液流密度及其耗水特征,VERTESSY等^[20]与WULLSCHEGER等^[21]研究了王桉(*E. regnans* F. M.)的树干液流动态,孙振伟等^[22]对柠檬桉(*Corymbias citriodora* Hook. f.)水分利用特征的季节动态进行了研究。由于我国桉树的种植区域多为台风高发地^[23],洪奕丰等^[24]研究发现,桉树是台风过程中受灾最严重的树种,其平均受害级高达2.82,受害指数高达0.56,均显著高于湿地松(*Pinus elliottii* Engelm.)和木麻黄(*Casuarina equisetifolia* Forst.),且重度受害占76.5%,因此,研究台风过程中桉树生理活动对了解桉树在恶劣环境下的适应机制具有重大意义。目前,国内对台风天气下的林木

蒸腾研究较少,仅见对马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)^[25]和木麻黄^[26]的研究,而对台风天气下桉树人工林树干液流的响应尚未见报道。尾巨桉是桉树属最具有代表性的树种之一,广泛种植于广东、广西等地,因此,本研究在之前工作的基础上利用热扩散探针法对2年生(最易受害林龄^[27])尾巨桉在整个台风过程中的树干液流进行连续观测,并同步测定各气象因子,以期揭示尾巨桉树干液流在台风天气下的响应,进而为探讨桉树人工林对恶劣环境的适应机制以及为台风降雨是否增加桉树可利用水分提供数据支持。

1 研究区概况及台风情况

1.1 研究区概况

研究区位于台风高发地的广东湛江,试验地设置在南方国家级林木种苗示范基地($21^{\circ}30'N$, $111^{\circ}38'E$),属海洋性季风气候,每年平均台风1~2次,风力均在12级以上,年平均气温 $23^{\circ}C$,年降水量1500 mm以上,多集中在5—9月份,年相对湿度80%以上,年蒸发量高达1700 mm,基本无霜期。试验地所处地区地势平坦,属台地及低丘陵缓坡地形,螺岗岭为最高峰,海拔220.8 m,土壤为砖红壤,pH值为5.4~5.7,肥力中等。试验林地乔木层主要是尾巨桉和少量台湾相思(*Acacia confusa* Merr.);灌木层有鹅掌柴(*Schefflera octophylla* (Lour.) Harms)、白背叶(*Mallotus apelta* (Lour.) Muell.-Arg.)、五色梅(*Lantana camara* L.)等;草本层较为丰富。试验

地造林树种为尾巨桉无性系 32-29,造林密度 1 666 株·hm⁻²,造林时间为 2012 年 7 月,造林面积为 2 hm²,造林方式为挖穴造林;其中,2 年生林分的平均胸径为 8.48 cm,平均树高为 9.78 m,平均冠幅为 3.14 m × 3.6 m(东西 × 南北),叶面积指数平均为 4.16。

1.2 台风情况

根据中央气象台的观测结果,台风“海鸥”的中心于 2014 年 9 月 16 日 9 时 40 分前后在海南省文昌市翁田镇沿海登陆,登陆时中心附近最大风力 13 级(40 m·s⁻¹),中心最低气压为 960 hPa。2014 年 9 月 16 日 12 时 45 分前后在广东徐闻南部沿海再次登陆,登陆时中心附近最大风力 13 级(40 m·s⁻¹),中心最低气压为 960 hPa。根据南方国家级林木种苗示范基地内桉树人工林生态系统定位研究站的气象观测场测定数据显示,15 日夜间 19:30 时起风(风速 6.22 m·s⁻¹)后逐渐加大,到 16 日 14:30 风速达到最大(61.95 m·s⁻¹),之后逐渐降低。15—16 日 2 d 降水量总计为 71.4 mm。

2 研究方法

2.1 气象因子测定

在尾巨桉人工林的林外空地及林下各放置 1 个美国 CSI-Compell 公司生产的 CR3000 型自动气象监测系统,观测样地的各气象指标,记录频率为 10 min 1 次,最终换算出 30 min 中的平均值(降雨量为

和),使之与热扩散树干液流测定仪同步;同时,为了综合反映大气温度和相对湿度的协同效应,增加了水汽压亏缺(VPD, KPa)指标。水汽压亏缺通过大气温度和相对湿度计算得出,计算公式为:

$$VPD = (1 - RH)(0.6108e^{(\frac{17.27T}{T+273.3})}) \quad (1)$$

式(1)中:RH 为空气相对湿度,% ; T 为空气温度,℃。

2.2 尾巨桉树干液流测定

在尾巨桉人工林固定样地内,选择生长状况良好、树干通直无挤压、无病虫害的标准木 3 株实施树干液流连续监测,样木的基本情况见表 1。由于样树胸径较小,茎流传感器采用 2 针型探针传感器(型号 SF-G,探针长度 33 mm, Ecomatik 公司,德国),安装高度为 1.3 m。为了避免树干不同方位产生的液流差异和日晒的影响,统一将探针安装在树干的北侧,且用防辐射铝箔覆盖。数据采集器采用 Campbell 公司的 CR3000,频率为 30 min 1 次。液流量密度计算公式为:

$$J_s = 0.0119K^{1.231} \times 3600 \quad (2)$$

$$K = (\Delta T_{max} - \Delta T) / \Delta T \quad (3)$$

式(2)、(3)中:J_s 为液流密度,指单位边材面积单位时间内的液流量(mL·h⁻¹·cm⁻²);ΔT_{max} 为无液流时加热探针与参考探针的最大温差值,ΔT 为测定温差值。

表 1 样木基本情况

Table 1 Basic conditions of the sample trees

样木编号 Sample wood number	胸径 DBH/cm	树高 Height/m	皮厚 Thickness/cm	边材面积 Sapwood area/cm ²	树干位点高度 Trunk loci height/m	测定方位 Direction
1	9.6	10.8	0.3	32.9	1.3	北
2	8.3	9.8	0.2	26.2	1.3	北
3	8.7	10.1	0.2	28.1	1.3	北

3 结果分析

3.1 环境因子和树干液流密度的变化

分析台风前后尾巨桉树干液流(3 株样树平均值)及各环境因子变化并作图。由图 1 可看出:尾巨桉树干液流密度在台风登陆前及台风过后,均呈现白天高夜晚低的单峰型变化曲线,白天液流变化幅度大,夜晚较小且平稳;台风前液流峰值各日差异不大,4 日平均为 17.4 mL·h⁻¹·cm⁻²,是台风登陆过后 4 日平均值的 1.24 倍;台风前后树干平均液流密度分别为 6.15、5.38 mL·h⁻¹·cm⁻²,二者差异不

显著。台风当天的树干液流密度呈不规则多峰型曲线,夜晚变化幅度较大,最高峰值出现在 15:30,为 7.76 mL·h⁻¹·cm⁻²,较台风前下降 55%,其余 2 个较大峰值分别出现在 7:30 和 22:30,分别为 4.56、3.42 mL·h⁻¹·cm⁻²,台风当天树干平均液流密度为 2.89 mL·h⁻¹·cm⁻²,较台风前减少了 53%,极显著小于台风前和台风后。对台风前、中、后期白天和晚上的树干液流密度分别进行方差分析,结果表明:台风当天,白天的树干平均液流密度(3.53 mL·h⁻¹·cm⁻²)极显著小于台风前(9.86 mL·h⁻¹·cm⁻²)和台风后(8.01 mL·h⁻¹·cm⁻²),而晚上的

树干平均液流密度($2.17 \text{ mL} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$)极显著大于台风前($1.26 \text{ mL} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$)和台风后($0.88 \text{ mL} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$)。台风前后白天差异不显著,但晚上台风前显著大于台风后。台风期间主要环境因子的变化情况表现为:台风当天,降雨集中达 55.4 mm ,风速最高达 $61.95 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,平均风速达 $35.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,空气相对湿度保持在 81.2% 以上,三者均极

显著大于台风前后;水汽压亏缺最高为 0.56 KPa ,太阳辐射波动较小,最高峰值只有 $60.72 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,大气温度一直在 23.8°C 和 27.7°C 间波动,范围变小,三者台风当天的平均值均极限显著小于台风前后;而台风前后之间的气象指标除风速台风后显著大于台风前外,其他各指标间的差异均不显著。

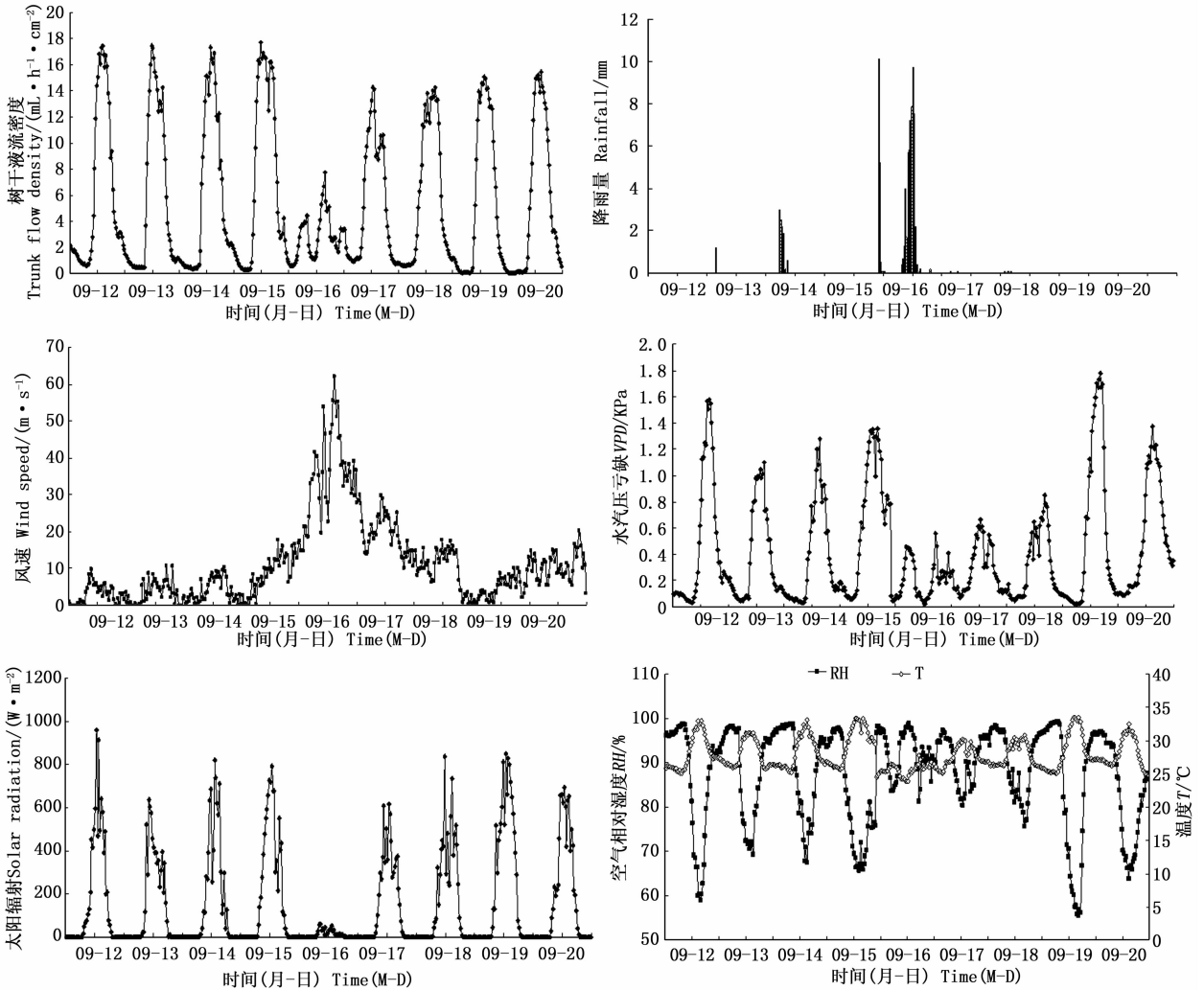


图1 台风过程环境因子和树干液流变化进程

Fig. 1 Environmental factors and the change of the sap flow process in the process of the typhoon

3.2 树干液流与环境因子的相关性

对台风前后及台风过程中树干液流及各气象因子指标(以 30 min 尺度)作 Pearson 相关分析,结果(表2)表明:台风前树干液流密度与太阳辐射、空气湿度、水汽压亏缺及风速呈极显著正相关,相关系数分别为 0.874 、 0.937 、 0.921 、 0.506 ,与空气相对湿度呈极显著负相关(相关系数 -0.923),与降雨量呈显著负相关(相关系数 -0.122)。在台风过程中,

树干液流密度与太阳辐射相关不显著,与空气温度、水汽压亏缺及风速呈极显著正相关(相关系数分别为 0.472 、 0.396 、 0.768),与台风前相比,除与风速的相关系数增大 52% 外,与其他气象因子的相关系数均下降较大;与空气相对湿度呈极显著负相关(相关系数 -0.388),较台风前下降 58% ;与降雨量呈显著负相关(相关系数 -0.312),是台风前的 2.6 倍。台风过后,树干液流密度与各气象因子间的关系与

台风前相同,各相关系数除降雨量外均有少许下降,但差异不大。

表2 台风前后与期间的尾巨桉树干液流密度与各气象因子的相关系数

Table 2 The correlation coefficients between sap flow density of *E. urophylla* × *E. grandis* and meteorological factors before, during and after the typhoon

项目 Index	太阳辐射 Solar radiation	空气温度 Air temperature	相对湿度 Relative humidity	水汽压亏缺 Vapor pressure deficit	降雨量 Rainfall	风速 Wind speed
台风前 Before typhoon landfalling	0.874 **	0.937 **	-0.923 **	0.921 **	-0.122 *	0.506 **
台风过程中 Typhoon period	0.140	0.472 **	-0.388 **	0.396 **	-0.312 *	0.768 **
台风后 After the typhoon	0.864 **	0.914 **	-0.864 **	0.853 **	-0.139 *	0.223 **

3.3 台风过程对尾巨桉水分利用情况的影响

由图2可看出:3株样树在台风当天的液流量均维持在较低水平。通过方差分析发现:台风当天,3株样树的日通量均极显著小于台风前和台风后($P < 0.01$)。台风前,样树1的液流日通量($4.03 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$)极显著大于台风后($3.18 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$),而台风后,样树2和样树3的液流日通量虽比台风前有所下降,但不显著。

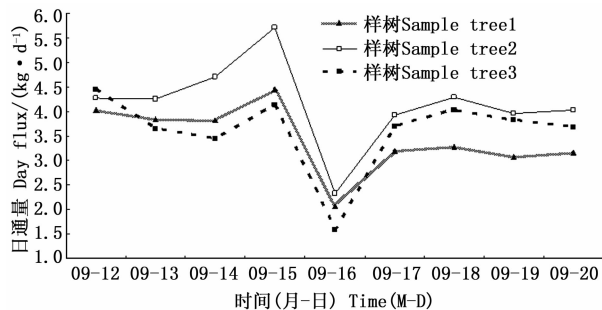


图2 台风前后及期间的树干液流日通量变化

Fig. 2 The variation of daily sapflow flux before, during and after the typhoon

4 讨论

对雷州半岛2年生尾巨桉人工林在台风前后与台风中天气下的树干液流研究表明:台风前后尾巨桉树干液流密度均呈昼高夜低的单峰曲线,而台风当天呈不规则多峰型曲线,夜晚出现2个较大峰值,通过分析得出,晚上峰值出现的原因是多个气象因子综合影响的结果,其中,水汽压亏缺、温度和风速在峰值时刻均出现较大峰值,而相对湿度恰恰相反。台风当天,树干平均液流密度极显著小于台风前和台风后,最高峰值出现在下午,峰值较台风前下降55%,液流日通量较低,极显著的小于台风登陆前后,这与郑怀舟等^[25]对台风天气下马尾松树干液流的研究结果相似,原因是较低的阳光辐射和空气温度,减弱了植物的蒸腾动力,同时,较高的空气湿度导致水汽压亏缺减小。晚间的树干平均液流密度极

显著大于台风前和台风后,原因是台风当天晚上较大的风速加速叶片周围的空气流动,加大了蒸腾拉力,较大的降雨量使土壤水分含量增加,促进林分蒸腾;而白永会^[26]对沙地木麻黄台风天气下液流明显提高的研究结果与本文相反,这可能是沙地土壤含水量较少,台风较大的降雨量增加了土壤含水量,从而较大促进了其蒸腾作用,或与其本身生物学特性有关,具体原因还需进一步求证。

台风天气下的剧烈环境变化使桉树树干液流与气象因子的关系也发生了较大改变,台风当天树干液流密度与太阳辐射不显著相关,原因是较小的日均太阳辐射($12.9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$)产生的蒸腾动力对液流影响较小,而台风天气下较大的风速加速了叶片周围水汽交换,反而成为影响液流的最关键因子,相关系数较台风前显著增大,较大的降雨量很大程度增大了空气湿度、降低了大气温度,使水汽压亏缺显著减小,从而较大的抑制了树木的蒸腾,因此,树干液流密度与降雨量的相关(负相关)系数较台风前后显著增大,而与其他气象因子(大气温度、相对湿度和水汽压亏缺)的相关系数均显著下降。

对台风前和台风后的树干液流密度对比发现:日平均液流密度、白天平均液流密度,台风前后均差异不显著,而晚上的平均液流密度台风前显著大于台风后。台风前树干液流密度峰值是台风后的1.24倍。3株样树的液流日通量在台风后均有所下降,其中,样树1台风后液流日通量极显著的小于台风前,而样树2和3在台风前后液流日通量差异不显著,造成这种结果的原因推测可能是台风对枝叶的机械损伤造成的。台风对林木的损害,如枝叶脱落、树干折断甚至连根拔起^[28-29],这些机械损伤严重影响林木蒸腾。另外,土壤含水量增加在一定程度上又促进林木蒸腾^[30],因此,推测台风前后的蒸腾差异是否明显,由包括林木机械损伤程度在内的多个因素决定的,还需进一步的研究求证。

5 小结

对台风天气下的尾巨桉树干液流的研究表明,台风天气下的液流特征较台风前后均有较大差异,台风当天树干液流密度呈不规则多峰型曲线,而台风前后均是昼高夜低的单峰曲线,且台风当天的日均液流密度、液流峰值、白天的平均液流密度和日通量均极显著小于台风前和台风后,而夜间的液流密度显著大于台风前和台风后;台风前的日均液流密度与台风后差异不显著,夜间液流密度台风前显著大于台风后;台风过程中,风速成为影响液流的关键因子,与太阳辐射相关不显著,其他影响因子与台风前后相同,但相关系数除风速和降雨量外均显著下降。

参考文献:

- [1] 陈玉军, 郑德璋, 廖宝文, 等. 台风对红树林损害及预防的研究[J]. 林业科学研究, 2000, 13(5):524-529.
- [2] Ulanova N G. The effects of windthrow on forests at different spatial scales: a review[J]. Forest Ecology & Management, 2000, 135(1):155-167.
- [3] 陈佩燕, 杨玉华, 雷小途, 等. 我国台风灾害成因分析及灾情预估[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(1):64-73.
- [4] Witze A. Meteorology: bad weather ahead[J]. Nature, 2006, 441(7093):564-566.
- [5] Peterj B. Cyclone effects on Australian rain forests: An overview[J]. Austral Ecology, 2008, 33(4):580-584.
- [6] 李秀芬, 朱教君, 王庆礼, 等. 森林的风/雪灾害研究综述[J]. 生态学报, 2005, 25(1):148-157.
- [7] 许涵, 李意德, 骆士寿, 等. 达维台风对海南尖峰岭热带山地雨林群落的影响[J]. 植物生态学报, 2008, 32(6):1323-1334
- [8] 王敏英, 刘强, 高静. 海南岛中部丘陵地区受台风侵袭影响的4种植物群落凋落物动态[J]. 海南师范大学学报:自然科学版, 2007, 20(2):156-160.
- [9] 李意德, 周光益, 林明献, 等. 台风对热带森林群落机械损伤的研究[J]. 生态学杂志, 1998, 17(S1):9-14.
- [10] 吴仲民, 杜志鹤, 林明献, 等. 热带风暴(台风)对海南岛热带山地雨林凋落物的影响[J]. 生态学杂志, 1998, 17(S1):26-30.
- [11] 王勤, 徐小牛, 平田永二. 日本冲绳岛琉球松林台风干扰后的群落特点[J]. 安徽农业大学学报, 2003, 30(4):400-406.
- [12] 陈步峰, 周光益, 曾庆波, 等. 热带山地雨林生态系统水文动态特征的研究[J]. 植物生态学报, 1998, 22(1):68-75.
- [13] 周光益, 陈步峰, 李意德, 等. 热带林生态系统对台风暴雨的再分配规律[J]. 生态学杂志, 1998, 17(S1):31-36.
- [14] 周光益, 吴仲民, 陈步峰, 等. 尖峰岭不同降水条件下无林与有林地坡面土壤流失量比较[J]. 生态学杂志, 1998, (S1):42-47.
- [15] 全川, 杨玉盛. 飓风和台风对沿海地区森林生态系统的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(2):5337-5344.
- [16] 胡伟, 杜峰, 徐学选, 等. 黄土丘陵区刺槐树干液流动态分析[J]. 应用生态学报, 2010, 21(6):1367-1373.
- [17] 凡超, 邱燕萍, 李志强, 等. 荔枝树干液流速率与气象因子的关系[J]. 生态学报, 2014, 34(9):2401-2410.
- [18] 王志超, 杜阿朋. 尾巨桉树干液流动态及其影响因子分析[J]. 东北林业大学学报, 2016, 44(5):24-28.
- [19] 张宁南. 广东桉树人工林耗水量研究[D]. 北京:中国林业科学研究院, 2010.
- [20] Vertessy R A, Hatton T J, Reece P, *et al.* Estimating stand water use of large mountain ash trees and validation of the sap flow measurement technique[J]. Tree Physiol, 1997, 17(12):747-756.
- [21] Wullscheger S D, Hanson P J, Todd D E. Transpiration from a multi-species deciduous forest as estimated by xylem sap flow technique[J]. For Ecol & Manage, 2001, 143(1/3):205-213.
- [22] 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.
- [23] 朱成庆. 雷州半岛桉树无性系抗风性的研究[J]. 林业科学研究, 2006, 19(4):532-536.
- [24] 洪奕丰, 王小明, 周本智, 等. 闽东沿海防护林台风灾害的影响因子[J]. 生态学杂志, 2012, 31(4):781-786.
- [25] 郑怀舟, 朱锦懋, 李守中, 等. 福建长汀土壤严重侵蚀区马尾松树干液流对台风天气的响应[J]. 亚热带植物科学, 2011, 40(1):13-17.
- [26] 白永会. 沿海沙地木麻黄人工林树干液流特征研究[D]. 福建:福建农林大学, 2012.
- [27] 陈少雄, 王观明, 罗建中. 桉树幼林不同株行距配置抗台风效果[J]. 林业科学研究, 1995, 8(5):582-585.
- [28] Kozłowski T T, Kramer P J, Pallardy S G, *et al.* The physiological ecology of woody plants[M]. Tokyo: Academic Press, 1991:657.
- [29] Nvl B, Walker L R. Summary of the effects of Caribbean hurricanes on vegetation[J]. Biotropica, 1992, 23(4):442-447.
- [30] 杨之歌, 史宇, 余新晓, 等. 北京山区典型树种树干液流特征及其对环境因子的响应研究[J]. 水土保持研究, 2012, 19(2):165-200.

(责任编辑:徐玉秀)