# 长沙地区典型树木蒸腾对环境因子的响应及模拟

戴军杰<sup>1</sup>章新平<sup>1</sup>罗紫东<sup>1</sup>刘仲藜<sup>1</sup>黎祖贤<sup>21</sup>

(1. 湖南师范大学 资源与环境科学学院, 湖南 长沙 410081;

2. 湖南省气象局,湖南 长沙 410007)

【摘 要】: 以长沙地区的桂花树、樟树、马尾松和枫香等典型树木为研究对象,基于 2013~2015 年监测的树 木茎水势、树干液流、土壤水分和各气象因素,探究树木蒸腾对环境因子的响应;利用 MJS、BTA 和 MBTA 蒸腾模型 模拟 4 种典型树木的蒸腾,选出适合当地气候条件的最优模型。结果表明:在非干旱期间,树木蒸腾对降水和土壤 水分的敏感性较弱,太阳辐射对桂花树和马尾松蒸腾的影响最大,敏感系数>0.75,而樟树与枫香的蒸腾对太阳辐射 和水汽压亏缺的敏感性均强。在 2013 年夏季干旱期间,土壤含水量是树木蒸腾的主导因子,敏感系数>0.71,气温 和水汽压亏缺对树木蒸腾均有抑制作用。3 个模型中,MBTA 模型对树木蒸腾的模拟效果最好,相对误差低于 5%;BTA 模型未能模拟出 2013 年夏季干旱时树木日蒸腾量的下降过程,且明显高估 2014~2015 年生长季马尾松的蒸腾水平; MJS 模型对树木蒸腾的模拟效果一般。3 个模型对 2013 年生长季树木蒸腾的模拟效果均较 2014~2015 年生长季的 模拟效果差,这表明当环境胁迫超出树木的适应范围时,树木生理结构会发生改变,并导致基于环境因子构建的蒸 腾模型模拟精度降低。

【关键词】: 蒸腾 环境因子 模拟 季节性干旱

【中图分类号】:S715.4【文献标识码】:A【文章编号】:1004-8227(2021)03-0699-13

蒸腾作用是树木水分利用的重要方式,在森林生态系统的水循环中扮演着重要角色。树木通过根系从土壤中吸收水分,其中约90%的水分又通过蒸腾作用回归大气<sup>[1]</sup>。尽管全球背景下未来的年降水量呈增加趋势<sup>[2]</sup>,但我国湿润、半湿润地区的季节性干旱依然严重。研究表明,长沙地区的季节性干旱年发生概率在85%以上,且危害程度自20世纪60年代以来持续增加<sup>[3]</sup>。较严重的季节性干旱往往导致农作物及经济树木的生产力大幅下降。通过对湿润、半湿润地区树木蒸腾的研究,掌握树木在不同环境条件下的水分需求量以及对环境因子的敏感程度,可为节水树种的选择、提高植物水分利用效率以及解决季节性干旱问题提供理论依据。

近年来,基于热技术实现植物树干液流精确地监测并估算树木蒸腾量的方法已被国内外众多学者运用。大量研究表明,树 木蒸腾不仅与叶面积指数和叶片气孔导度等自身的生理结构特征有关,同时也受到太阳辐射、水汽压亏缺、气温、相对湿度和 土壤水分等环境因子的影响<sup>[4]</sup>。通常,在湿润、半湿润地区,树木根系可以从土壤中汲取较充足的水分,水汽压亏缺和太阳辐射 往往是驱动树木蒸腾的主要环境因子<sup>[5]</sup>;在干旱、半干旱地区,由于土壤水分胁迫严重,树木蒸腾受降水量和土壤含水量等水分 条件影响较大。相对干旱、半干旱地区而言,过去对南方湿润地区树木蒸腾对环境因子响应的研究较少,且主要集中在西南喀 斯特地区和华南地区,研究的树种主要有青冈<sup>[6]</sup>、海桐<sup>[7]</sup>、马占相思<sup>[8]</sup>、桉树<sup>[9]</sup>、荷木<sup>[10]</sup>等,而对位于洞庭湖流域的长沙地区树

'**作者简介:**戴军杰(1995~),男,硕士研究生,主要研究方向为生态水文.E-mail:473995984@qq.com 章新平,E-mail:zxp@hunnu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571021);湖南省人工影响天气领导小组办公室自主科研课题(201801)

木蒸腾开展的研究更少。

树木蒸腾与环境因子关系密切,这也为利用环境因子构建树木蒸腾模型并预测蒸腾量提供了可能。目前,已有许多经验、 半经验以及具有生理过程的蒸腾模型成功应用在不同气候区树木蒸腾的模拟中。如刘胜等<sup>[11]</sup>应用修正后的 PM (Penman-Monteith) 模型<sup>[12]</sup>进行了树木蒸腾模拟。Whitley 等<sup>[13]</sup>对传统的 JS (Jarvis-Stewart)模型<sup>[14,15]</sup>进行了改进。在未采用 PM 模型的情况下,他 们直接用太阳辐射、水汽压亏缺和土壤含水量的函数关系与不受环境胁迫下的最大蒸腾量的乘积模拟树木蒸腾,并把该模型称 为 MJS 模型 (Modified Jarvis-Stewart model)。Buckley 等<sup>[16,17]</sup>简化了一个基于植物生理过程的气孔导度模型,该模型仅考虑 太阳辐射和水汽压亏缺两个环境因子,并在植物气孔导度和蒸腾的模拟中取得较好的效果。后来这一模型被 Wang 等<sup>[18]</sup>称作 BTA 模型。然而,在以往研究中,大多仅用单一模型对同一树种进行蒸腾模拟,无法比较多个模型在不同树种之间的模拟效果;也 未对 MBTA 模型 (考虑了土壤水分条件的 BTA 模型)的模拟效果进行检验。

本研究以长沙地区的桂花树、樟树、马尾松和枫香等典型树木为研究对象,基于 2013~2015 年监测的树木茎水势、树干液流、土壤水分和各气象因素,探究树木蒸腾对环境因子的响应;利用 MJS、BTA 和 MBTA 等蒸腾模型模拟和描述 4 种典型树木的 蒸腾特征,比较蒸腾模型的模拟效果并选出适合当地气候条件的最优模型。

# 1 材料与方法

#### 1.1 实验场地概况

实验场地位于湖南省长沙市岳麓区。该区受亚热带季风的影响,四季分明,气候温和,雨热同期。多年平均气温 17.4℃, 平均年积温 5457℃,多年平均降水量 1447mm,且主要集中在 3~6 月。7~8 月受副热带高压控制,易出现季节性干旱。具体实验 场地包括长沙市西郊王家湾(28°09′46″N,112°53′20″E,海拔 70m)和长沙市岳麓山(28°10′33″N,112°55′57″E,海拔 196m),均布设在一片小树林中,如图 1 所示。实验场地土壤类型为红壤。常见树种有桂花树(Osmanthus fragrans)、樟树 (Cinnamomum camphora)、枫香(Liquidambar formosana)、马尾松(Pinus massoniana)、苦槠(Castanopsis sclerophylla)和 白栎(Quercus fabri)等。在实验场地中,选择生长状况良好、具有代表性的桂花树、樟树、马尾松和枫香进行观测,分别记为 GH、ZS、MWS 和 FX。样树的基本特征见表 1。



图1实验场地位置

#### 表1样树的基本特征

样树	观测日期	实验地点	树龄(a)	树高(m)	胸径(cm)	叶面积指数
GH. 1	2013-04~2013-10	王家湾	8	4.5	7.6	2.2
GH. 2	2013-04~2013-10	王家湾	9	3.8	8.8	2.0
ZS. 1	2013-04~2013-10	王家湾	12	6.0	15.8	1.8
ZS. 2	2013-04~2013-10	王家湾	16	6.2	16.0	2.1
ZS. 3	2013-11~2015-12	岳麓山	12	8.1	19.1	3.1
ZS. 4	2014-10~2015-12	岳麓山	14	8.3	22.0	3.0
MWS.1	2013-04~2013-10	王家湾	20	7.0	19.9	1.2
MWS.2	2013-11~2015-12	岳麓山	45	8.5	32.5	1.5
FX. 1	2014-03~2015-12	岳麓山	50	17.2	38.2	3.6
FX. 2	2014-10~2015-12	岳麓山	30	16.5	25.5	3.4
FX. 3	2014-10~2015-12	岳麓山	40	17.0	35.0	3.5

#### 1.2 数据获取与处理

采用热比率法茎流计(SFM1, ICT International Pty Ltd, Australia)每隔 30min 自动测量树干液流速率并记录一次,具体 观测时间见表 1。茎流计的传感器探头由 3 个探针组成,其中一个探针用来释放稳定的热脉冲,其余两个探针用于测定温度。在 每棵样树的树干南、北两侧高度约 1.3m 处各安装一套热比率法茎流计。样树的树皮厚度、边材厚度等信息于实验结束后用生长 锥钻取样树木芯得到。边材信息、木质部干湿重和茎流计所测的原始数据均导入 ICT 公司开发的液流处理软件 SapFlowTool 进 行分析,估算出液流速率及液流通量。最后通过树干南北两侧平均的液流通量及对应的样树冠层投影面积计算蒸腾速率。相关 计算公式如下:

$$Q = \sum_{i}^{n} SF_{i} \times A_{s} \times \Delta t$$
(1)  
$$E_{c} = \frac{Q}{A_{p}} \times 10$$
(2)

式中:Q 为累积液流通量 (cm<sup>3</sup>/h);n 为每天记录数据的次数;SF<sub>i</sub>为第 i 次记录数据时的液流速率 (cm<sup>3</sup>/h);A<sub>s</sub>为边材面积 (cm<sup>2</sup>);  $\Delta$  t 为数据记录间隔时间 (h);E<sub>s</sub>为树木日蒸腾量 (mm/d);A<sub>s</sub>为有效冠层投影面积 (cm<sup>2</sup>);10 为单位转换值。

由于未对土壤含水量进行实际观测,表层土壤体积含水量采用欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)逐日的再分析数据,格点精度为 0.125°×0.125°,时间范围从 2013 年 4 月至 2015 年 10 月,其基本能够反映样地的土壤水分状况。

茎水势由热电偶干湿度计(PSY1, ICT International Pty Ltd, Australia)每隔 30min 记录一次,观测时间与茎流计一致。 己有的研究表明,黎明前的植物水势能有效反映根区土壤水分状态<sup>[19]</sup>。因此,将黎明前 04:00~06:00 的平均茎水势与表层土 壤含水量进行比较。

太阳辐射、气温、相对湿度和降水量等气象数据由安装在距观测场地约150m处开阔地的自动气象站(Weather Hawk-232, USA) 获取,采集频率和观测时间同上。水汽压亏缺则根据气温和相对湿度计算得到<sup>[20]</sup>。

1.3 敏感性分析

基于偏导数方法分析树木蒸腾对环境因子的敏感性,计算方程如下[21]:

$$SCx_{i} = \lim_{\Delta x_{i} \to 0} \left( \frac{\Delta LT_{0}/LT_{0}}{\Delta x_{i}/x_{i}} \right) = \frac{\partial LT_{0}}{\partial x_{i}} \cdot \frac{x_{i}}{LT_{0}} \quad (3)$$

式中: SCx<sub>i</sub>为 LT<sub>0</sub>(树木蒸腾)对 x<sub>i</sub>(环境变量)的敏感系数,无量纲。当敏感系数为正时,表示树木蒸腾随着该环境因子的增大而增大;当敏感系数为负时,表示树木蒸腾随着该环境因子的增大而减小。敏感系数的绝对值越大,说明树木蒸腾对该环境因子越敏感,反之亦然。

1.4 蒸腾模型选择

MJS 模型直接用太阳辐射(R<sub>s</sub>)、水汽压亏缺(D)和土壤含水量(θ)函数 f(i)与不受环境限制时的最大日蒸腾量(E<sub>ax</sub>)的乘积模 拟树木日蒸腾量(E<sub>c</sub>)<sup>[13]</sup>,其表达式如下:

$$E_{c} = E_{\max} \times f(R_{s}) \times f(D) \times f(\theta)$$
(4)

式中:各环境因子函数值范围均在 0~1之间。函数值越大,表明树木蒸腾受该环境因子的限制越小。f(R<sub>s</sub>)、f(D)和 f( $\theta$ )的计算分别参考 Stewart<sup>[15]</sup>、Whitely 等<sup>[22]</sup>和 Harris 等<sup>[23]</sup>:

$$f(R_{s}) = \frac{R_{s}}{R_{s} + k_{R_{s}}} \times \frac{R_{sh} + k_{R_{s}}}{R_{sh}}$$
(5)

$$f(D) = e^{\left[-k_D(D-Dpeak)^2\right]}$$
(6)

$$f(\theta) = \frac{(\theta_0 - \theta_m)}{(\theta - \theta_m)}$$
(7)

式中:  $R_{sh}$  (W/m<sup>2</sup>)为实测的最大太阳辐射;  $D_{peak}$  (kPa)和  $\theta_0$  (cm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>)分别是树木蒸腾不受水汽压亏缺和土壤含水量限制时的值;  $k_{Rs}$ 、 $k_0$ 和  $\theta_n$ 是拟合参数。

BTA 模型的表达式为<sup>[18]</sup>:

$$E_c = E_{\max} \frac{R_s D}{k + bR_s + R_s D} \tag{8}$$

式中: k和b是拟合参数,其它参数和变量同公式(4)。

MBTA 模型的表达式为:

$$E_{c} = E_{\max} \frac{R_{s}D}{k + bR + RD} \times f(\theta)$$
(9)

式中各参数和变量同公式(4)和(8)。

1.5 模型参数优化和模型评价

模型参数拟合时,将树木蒸腾量和环境因子数据逐日排序。其中,奇数序号数据用于训练模型,偶数序号数据用于检验模型的模拟效果,本研究仅展示模型检验的结果。MJS、BTA和 MBTA 模型参数均在 Matlab 软件中由 DREAM (Differential evolution adaptive metropolis)算法迭代 40000 次进行拟合和优化。DREAM 算法根据实测数据会自动匹配模型参数值,但为了得到更可靠的结果,运算前须给定参数范围。参数范围主要通过前期多次运算来确定。不同模型对树木蒸腾的模拟参数如表 2 所示,模型参数率定以及模型验证过程的相对误差、效率系数等见结果部分。

推刑	会粉	20	013 年生-	长季	2014~2015 生长季				
快空	参奴	GH	ZS	MWS	FX	ZS	MWS		
	$E_{\text{max}}$	2.32	3.48	4.50	4.02	4.15	4.48		
MJS	K <sub>R</sub>	5.27	199.61	197.58	55.02	93.89	114.80		
	KD	0.03	0.01	0.75	0.06	0.06	0.28		
	$D_{\rm peak}$	3.49	0.21	1.31	3. 47	3.06	1.62		
	θ <sub>m</sub>	0.87	0.48	0.53	0.96	0.86	0.56		
	θ ₀	0.44	0.40	0.40	0.40	0.41	0.40		
	$E_{\text{max}}$	2.00	2.00	2.01	5.27	4.01	3.34		
BTA	k	0.39	6.36	93.68	99.52	103.19	93.90		
	b	0.47	1.23	0.01	0.83	0.16	0.0002		
	$E_{\text{max}}$	3.16	3.44	4.96	5.50	4.50	4.50		
	k	4.18	37.59	74.66	110.92 111.14		87.72		
MDIA	b	0.53	0.01	0.002	0.46	0.02	0.001		
	θ "	0.76	0.47	0.49	0.99	0.97	0.64		

表2不同模型对树木蒸腾的模拟参数

	θ 0	0.43	0.40	0.40	0.42	0.40	0.40
--	-----	------	------	------	------	------	------

本研究以相关系数(R)、均方根误差(RMSE)和纳什效率系数(NSE)<sup>[24]</sup>进行模型模拟效果评价。RMSE 和 NSE 的表达式分别为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (Y_i^{\text{obs}} - Y_i^{\text{wim}})^2}{n}}$$
(10)

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (Y_i^{\text{obs}} - \overline{Y}_i^{\text{sim}})^2}{\sum_{i=1}^{n} (Y_i^{\text{obs}} - \overline{Y})^2}$$
(11)

式中:Y<sup>obs</sup>;为实测值;Y<sup>sim</sup>;为模拟值;Y<sup>-</sup>为实测值的平均。模拟值与实测值之间 R 越高、RMSE 越小、NSE 越大,模型模拟效 果越好。

# 2 结果与分析

#### 2.1 环境因子动态变化特征

研究区 2013~2015 年生长季(4~10月)各气象因子逐日变化见图 2。日均气温的变化范围为 8.4℃~35.3℃,表现出显著的季节性变化,最高温出现在 7月;相对湿度的变化范围为 41.3%~92.3%,平均值为 70.8%;水汽压亏缺在 0.2~3.4kPa 范围内变化,最大值出现在 7~8月;太阳辐射的变化范围为 7.2~294.1W/m<sup>2</sup>,受降水影响较大,低值基本出现在降水日;日降水量在 0.3~126.8mm 范围内变化,在季节上分布不均,5~7月降水较多,9~10月降水较少,研究期间降水天数为 227d,占总降水天数的 35.4%。

除季节变化外,气象因子还具有明显的年际变化。2013、2014和2015年生长季平均日均气温分别为25.4℃、23.7℃和23.7℃, 平均相对湿度分别为66.1%、73.7%和72.6%,平均水汽压亏缺分别为1.2、0.8和0.8kPa,平均太阳辐射分别为163.2、112.5和 118.7W/m<sup>2</sup>,累计降水量分别为841.0、1136.0和1152.8mm,降水日数分别为68、81和78d。可以看出,研究区生长季各气象因子 在2013年与2014、2015年间存在显著差异,而在2014年与2015年间无明显差异。

研究区在 2013 年 7~8 月经历了较严重的夏季干旱,从 7 月 8 日至 8 月 18 日期间持续 42d 无降水,日均气温维持在 30.9℃~ 35.3℃的高值范围。这也是该区自 1951 年以来遭遇的最为严重的一次夏季高温干旱事件<sup>[25]</sup>。根据干旱发生的时段,本研究将 2013 年生长季划分为干旱前(4 月 1 日至 7 月 7 日)、干旱时(7 月 8 日至 8 月 18 日)和干旱后(8 月 19 日至 10 月 31 日)3 个时段。

受降水、蒸散发的影响,土壤水分存在明显的动态变化。图 3 描述了 2013~2015 年生长季表层土壤含水量和黎明前茎水势的变化特征。由图 3 可知,土壤含水量在 0.17~0.41cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>范围内变化,具体表现为在降水日明显增加,在持续无降水日迅速减小,例如在 2013 年干旱时由 0.26cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>减小至 0.17cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>。在 2013~2015 年生长季中,土壤含水量总体上均表现出明显下降趋势。2013、2014 和 2015 年生长季平均土壤含水量分别为 0.26、0.32 和 0.31cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>。黎明前茎水势的变化范围为-2.53~-0.12MPa,最小值出现在 2013 年的干旱时。除在干旱期外,茎水势始终处于-1.07~-0.12MPa 较高的范围。然而,在 2013 年 8 月 10 日,由于人为灌溉,树木得到暂时的水分补给,茎水势在时间序列上出现了一个波峰。



图 3 研究区 2013~2015 年生长季土壤水分和黎明前茎水势动态变化特征

<sup>2.2</sup> 不同树木的蒸腾特征及对环境因子的响应

研究区 2013~2015 年生长季内不同树木蒸腾速率的逐日变化见图 4。由图 4 可知,在 2013 年生长季,GH.1和GH.2 日蒸腾量的变化范围分别为 0.21~2.15 和 0.14~1.97mm/d。干旱前,GH.1和GH.2 蒸腾速率呈增加趋势,平均日蒸腾量分别为 1.38 和 1.27mm/d;干旱时,两树的日蒸腾量均呈减小趋势;干旱后,两树平均日蒸腾量分别为 1.23 和 1.00mm/d,基本恢复到干旱前的蒸腾水平。ZS.1和ZS.2在干旱前与桂花树蒸腾速率的变化相近,但在干旱时日蒸腾量始终处于迅速下降趋势。实验观察中发现,研究区樟树在干旱时出现大面积落叶,并且ZS.1在此阶段中枯死,ZS.2在干旱后平均日蒸腾量为 0.22mm/d,仅占干旱前平均日蒸腾量的 13.9%。与樟树蒸腾速率变化相似,MWS.1日蒸腾量在干旱前呈上升趋势,最大值可达 3.15mm/d,干旱时日蒸腾量 急剧下降,由 3.03mm/d 降至 0.26mm/d,干旱后日蒸腾量有所回升,平均值为 0.82mm/d,占干旱前平均日蒸腾量的 38.7%。

在 2014~2015 年生长季,樟树、马尾松和枫香的蒸腾速率变化趋势相似,均在夏季达到峰值。相关分析表明,除 FX.2 和 FX.3外,不同树木日蒸腾量之间的相关系数在0.85~0.94高值范围内(P<0.001),说明不同树木尽管自身的结构和功能存在差异,但由于生长在同一区域内,其蒸腾对环境因子具有较一致的响应。ZS.3 在 2014 和 2015 年生长季平均日蒸腾量分别为 1.72 和 1.80mm/d,ZS.4 在 2015 年生长季平均日蒸腾量为 1.64mm/d;MWS.2 在 2014 和 2015 年生长季平均日蒸腾量分别为 1.70 和 1.44mm/d;FX.1 在 2014 和 2015 年生长季平均日蒸腾量分别为 1.71 和 1.78mm/d,FX.2 和 FX.3 在 2015 年生长季平均日蒸腾量分别为 1.70 和 1.44mm/d;FX.1 在 2014 和 2015 年生长季平均日蒸腾量分别为 1.71 和 1.78mm/d,FX.2 和 FX.3 在 2015 年生长季平均日蒸腾量分别为 1.70 和 1.44mm/d;FX.1 在 2014 和 2015 年生长季平均日蒸腾量分别为 1.71 和 1.78mm/d,FX.2 和 FX.3 在 2015 年生长季平均日蒸腾量分别为 1.73 和 1.65mm/d。

观测还发现,各树木日蒸腾量的低值通常出现在降水日中,这主要与降水期间相对较小的太阳辐射、水汽压亏缺以及较大的相对湿度等有关。值得注意的是,降水期间桂花树的日蒸腾速率占非降水日期间的 65.5%,樟树、马尾松和枫香的日蒸腾速率 平均日蒸腾量分别占非降水日期间的 60.5%、59.1%和 60.5%(以 2014 年生长季为例),表明降水日的树木蒸腾不可忽视。



图 4 研究区 2013~2015 年生长季内不同树木蒸腾速率动态变化特征

表 3 给出了研究区 2013~2015 年生长季内不同树木蒸腾对各环境因子的敏感性系数。敏感系数为正数时表示蒸腾速率与环 境变量之间呈正相关,反之,敏感系数为负数时表示蒸腾速率与环境变量之间呈负相关。可以看出,在 2013 年干旱前、干旱后 和 2014~2015 年生长季,降水量、相对湿度和土壤含水量均与各树木日蒸腾量具有负相关关系,气温、水汽压亏缺和太阳辐射 均与各树木日蒸腾量具有正相关关系;在 2013 年干旱时,相对湿度、土壤含水量和太阳辐射与各树木日蒸腾量具有正相关关系, 气温和水汽压亏缺与各树木日蒸腾量具有负相关关系。

根据敏感系数绝对值的大小,在2013年干旱时,土壤含水量对桂花树、樟树和马尾松蒸腾速率的影响均最大,敏感系数>0.71; 在非干旱期间,对桂花树和马尾松蒸腾速率影响最大的环境因子为太阳辐射,敏感系数>0.75,然而,太阳辐射(敏感系数>0.71) 和水汽压亏缺(敏感系数>0.66)对樟树与枫香蒸腾速率影响均很大。相对而言,非干旱期各树木蒸腾速率对土壤含水量和降水敏 感性均较弱。

### 2.3 不同树木的蒸腾模拟

图 5 展示了 MJS、BTA 和 MBTA 模型对不同树木蒸腾的模拟精度。在 2013 年生长季的桂花树、樟树和马尾松蒸腾模拟中, MBTA 模型的模拟精度最高, R、RMSE 和 NSE 分别在 0.65~0.78、0.22~0.51mm/d 和 0.39~0.74 之间, MJS 模型的模拟精度稍次之, BTA 模型的模拟精度最低。

时间	环境因子	GH. 1	GH. 2	ZS. 1	ZS. 2	MWS.1
	降水量	-0.38	-0.27	-0.24	-0.27	-0.64
2013 年(干旱前)	气温	0. 58	0.55	0.77	0.57	0.59
	相对湿度	-0.88	-0.78	-0.77	-0.80	-0.90
	水汽压亏缺	0.82	0.77	0.88	0.76	0.83
	太阳辐射	0.89	0.75	0.71	0.83	0.87
	土壤含水量	-0.66	-0.65	-0. 58	-0.62	-0.71
2013 年(干旱时)	降水量	_	_	_	—	_
	气温	-0.19	-0.18	-0.42	-0.46	-0.47
	相对湿度	0.54	0.44	0.67	0.65	0.69
	水汽压亏缺	-0.43	-0.36	-0.60	-0.61	-0.64
	太阳辐射	0.56	0.61	0.48	0.43	0.38
	土壤含水量	0.74	0.71	0.76	0.71	0.76
	降水量	-0.54	-0.76	_	-0.49	-0.65
2013年(干旱后)	气温	0.69	0.84	—	0.22	0.35
	相对湿度	-0.72	-0.80	_	-0.80	-0.64

#### 表 3 2013~2015 年生长季内不同树木蒸腾对环境因子的敏感性系数

水 注 太		汽压亏缺		0.7	78	0.	86	-	_		0.6	5	0.59
		阳辐射		0.86		0.	95	_			0.72		0.85
	土均	襄含水量	圭	-0.	38	-0.	40	-	_	-	-0.79		-0.31
时间		环:	境因	子	ZS.		3		MWS	. 2		]	FX.1
		隆	承水量			-0.3	37	-0.38			_	0.30	
2014 年生长季		,	气温		0.54		0.68			0.71			
		相》	对湿度	度		-0.7	71	-0.56			-0.63		
		水汽压亏缺		缺	0.87		0.83			0.90			
		太阳辐射		討	0.90		0.86			0.83			
		土壤含水量		量		-0.20		-0.03			-0.26		
时间	环境因子		ZS.	3	ZS.	4	4 MWS		5.2 FX.1 FX		FX	.2	FX. 3
	降7		-0.39		-0.	40	-0.	38	-0.	41	-0.	60	-0.51
2015 年生长季	气温		0.5	51	0.71		0.	47	0.7	75	0.	31	0.61
	相对	湿度	-0.7	73	-0.67		-0.	66	-0.	61	-0.	87	-0.85
	水汽店	玉亏缺	0.8	3	0.88		0.	73	0.8	36	0.	83	0.90
	太阳	辐射	0.8	89	0.8	36	0.	83	0.8	36	0.	81	0.93
	土壤含	含水量	-0.3	37	-0.31		-0.	23	-0.	37	-0.	52	-0.47

在 2014~2015 年生长季蒸腾模拟中,MBTA 模型对枫香、樟树和马尾松蒸腾模拟精度均最高,R、RMSE 和 NSE 分别在 0.90~ 0.95、0.26~0.40mm/d 和 0.79~0.90 之间;对枫香和樟树蒸腾模拟精度最低的是 MJS 模型;对马尾松蒸腾模拟精度最低的是 BTA 模型。3 种模型对 2013 年生长季树木蒸腾的模拟效果均比 2014~2015 年生长季的模拟效果差,这与研究区 2013 年经历了 严重的夏季高温干旱有关。土壤水分胁迫较严重,树木生理结构发生改变,直接导致蒸腾作用受限,从而蒸腾模型的精度降低,尤其体现在未考虑水分输入项的 BTA 模型中。

图 6 和表 4 展示了利用 MJS、BTA 和 MBTA 模型对不同树木蒸腾模拟结果的比较。除了 BTA 模型未能模拟出 2013 年干旱时各 树木蒸腾速率的下降过程外,3 种模型模拟的逐日蒸腾量与实测蒸腾量的变化趋势较一致,基本呈现了树木蒸腾的季节性变化。

从日均蒸腾量的特征来看, MJS 模型对 2013 和 2014~2015 年生长季马尾松日蒸腾量的模拟值分别较实测值偏低和偏高,相 对误差均超过 10%,而对其他树木日蒸腾量的模拟值均略高于实测值,相对误差在 10%以内; BTA 模型对 2014~2015 年生长季枫 香和马尾松日蒸腾量的模拟值较实测值均偏高,相对误差分别为 15%和 42%,而对其他树木日蒸腾量的模拟值与实测值基本一致, 相对误差在 5%以内,然而 BTA 模型未能模拟出 2013 年干旱时树木蒸腾速率下降的过程; MBTA 模型对各树木日蒸腾量的模拟值 与实测值基本一致,相对误差均小于 5%。上述比较表明,MBTA 模型为研究区不同树木蒸腾的最优模型。







图 6 不同模型 (MJS、BTA 与 MBTA) 对树木蒸腾的模拟结果

|--|

时间	树种		实测蒸腾	MJS	BTA	MBTA
2013	GH	日均蒸腾量	1.35	1.42	1.35	1.34
生长季		RE	0	5.2%	0	-0.7%
	ZS	日均蒸腾量	0.92	0.95	0.93	0.94
		RE	0	3.3%	1.1%	2.2%

	MWS	日均蒸腾量	1.29	1.15	1.35	1.35
		RE	0	-10.9%	4.7%	4.7%
2014~2015	FX	日均蒸腾量	1.68	1.82	1.93	1.66
生长季		RE	0	8.3%	14.9%	-1.2%
	ZS	日均蒸腾量	1.68	1.84	1.68	1.69
		RE	0	9.5%	0	0.6%
	MWS	日均蒸腾量	1.57	1.73	2.23	1.62
		RE	0	10.2%	42.0%	3.2%

除模拟树木日蒸腾量外,各蒸腾模型的参数也能够反映树木蒸腾能达到的潜在最大值以及受各类环境胁迫的程度,模型参数见表 2。根据最优蒸腾模型预测 2013 年生长季桂花树、樟树和马尾松在理想环境条件下最大日蒸腾量分别为 3.16、3.44 和 4.96mm/d,是各树木实际观测最大蒸腾量的 1.5~1.7 倍;2014~2015 年生长季的枫香、樟树和马尾松在理想环境条件下的最大日蒸腾量分别为 5.50、4.50 和 4.50mm/d,均为各树木实际观测最大蒸腾量的 1.3 倍。

由于 MBTA 模型在 BTA 模型基础上增加了土壤水分函数 f(θ),其对树木蒸腾的模拟精度明显提高。在 f(θ)中,θ。代表树木 蒸腾不受水分胁迫时的土壤含水量。由表 2 可知,各树木的 θ。在 0.40~0.43cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>范围内变化。2013 年生长季桂花树、樟树 和马尾松的 f(θ)分别在 0.56~0.87、0.24~0.83 和 0.29~0.76 范围内,2014~2015 年枫香、樟树和马尾松的 f(θ)分别在 0.74~1.02、0.73~1.00 和 0.54~1.05 范围内。可以看出,具有严重夏季干旱的 2013 年生长季较 2014~2015 年生长季的土壤 水分胁迫明显更大,并且桂花树比樟树和马尾松明显更耐旱,对干旱的响应机制更好。

## 3 讨论

本研究表明,尽管在同一生长环境中不同树木蒸腾速率的变化趋势相接近,但不同树木蒸腾速率大小之间存在明显差异, 这不仅取决于树木自身的生理结构,还与树木蒸腾对环境要素的响应有关。本研究中,在非干旱期,桂花树、樟树、马尾松和 枫香的日蒸腾量均与气温、水汽压亏缺和太阳辐射呈正相关关系,与降水量、相对湿度和土壤含水量呈负相关关系,这与姚依 强等<sup>[26]</sup>研究结果相似。在干旱时,相对湿度、土壤含水量和太阳辐射与各树木日蒸腾量具有正相关关系,气温和水汽压亏缺与 各树木日蒸腾量具有负相关关系,树木蒸腾对环境要素响应的变化可能是连续干旱期间各树木叶片气孔关闭以减少水分损失所 致,期间各树木蒸腾速率明显降低,这与张慧玲等<sup>[27]</sup>对西南喀斯特区典型乔木的研究结果相反,可能原因是后者采用 2 个月遮 雨实验来模拟连续干旱环境,树木根系处的土壤水分损失不大,或者树木利用深层相对稳定的储存水。

根据不同树木蒸腾对环境因子的敏感性分析,非干旱期间影响树木蒸腾速率最大的环境因子是太阳辐射或水汽压亏缺,而 干旱时土壤含水量是影响树木蒸腾的主导因子。就树木蒸腾对降水的响应而言,在降水日,太阳辐射往往处于低值,相对湿度 较大,气温相对较小,水汽压亏缺小,促使气孔关闭,蒸腾减弱<sup>[28]</sup>,其蒸腾速率平均为非降水日树木蒸腾速率的 59.1%~65.5%。 然而,降水后较降水前的树木蒸腾速率往往增大<sup>[29]</sup>。

对于不同树木蒸腾的模拟,MBTA 模型在 3 种模型中的模拟精度最高,说明在 BTA 模型中引入土壤水分变量十分必要。MJS 模型和 BTA 模型对不同树木蒸腾的模拟各有优劣,与模型本身的物理机制有关。由于干旱在很大程度上影响了树木蒸腾对各环 境因子的响应,因而 3 种模型对 2013 年干旱时树木蒸腾的模拟效果均较差,尤其体现在 BTA 模型中,未能模拟干旱时各树木蒸 腾速率下降的过程。根据最优模型的参数,各树木蒸腾不受水分限制时的土壤含水量为 0.40~0.43 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>,桂花树相比樟树和马 尾松明显更耐旱,其在干旱时的土壤水分胁迫函数值更大。从图 4 中也可发现,桂花树蒸腾速率在 2013 年干旱后基本恢复到干 旱前的水平,马尾松蒸腾速率在干旱后为干旱前的 38.7%,樟树蒸腾速率在干旱后仅为干旱前的 13.9%,并且在干旱时出现大面积 落叶现象,结果说明樟树的耐旱性很差。

## 4 结论

通过分析在 2013~2015 年生长季亚热带典型树种桂花树、樟树、马尾松和枫香蒸腾对环境因子的响应特征以及利用 MJS、 BTA 和 MBTA 模型对树木蒸腾的模拟,得到了以下结论:

(1)在非干旱期间,太阳辐射对桂花树和马尾松蒸腾速率的影响(敏感系数>0.75),以及太阳辐射和水汽压亏缺对樟树与枫香 蒸腾速率的影响(敏感系数分别>0.71和>0.66)均很大,而树木蒸腾对降水和土壤含水量的敏感性较弱;在严重干旱期间,土壤 含水量是所有树木蒸腾的主导因子,敏感系数>0.71,且与日蒸腾量具有正相关关系,而气温和水汽压亏缺与日蒸腾量均呈负相 关关系,对树木蒸腾表现为抑制作用,并且严重的水分胁迫明显削弱了树木蒸腾对太阳辐射的敏感性。

(2)树木蒸腾受环境因素的综合影响,这为基于环境因子构建蒸腾模型预测蒸腾量提供了途径。就模拟的日蒸腾量而言,BTA 模型对 2014~2015年生长季枫香和马尾松日蒸腾量的模拟值较实测值均偏高,相对误差分别为 15%和 42%,并且未能模拟出 2013 年夏季干旱时树木日蒸腾量的下降过程;MBTA模型的模拟值与实测值基本一致,相对误差均小于 5%。就模拟精度而言,MBTA模 型最高;MJS模型对 2014~2015年生长季枫香和樟树蒸腾的模拟精度最低;BTA模型对 2013年生长季所有树木及 2014~2015 年生长季马尾松蒸腾的模拟精度最低。

(3)3种模型对经历了严重夏季高温干旱的 2013 年生长季树木蒸腾的模拟效果均比 2014~2015 年生长季差。原因在于:当 环境胁迫在树木的适应范围内,树木通过自身调节功能响应环境变化,如水分缺失时关闭叶片气孔导度;然而,当环境胁迫超 出树木的适应范围,树木自身生理结构发生改变,如 2013 年夏季干旱时大面积落叶,导致基于环境因子的蒸腾模型模拟效果变 差。根据蒸腾速率和土壤水分函数 f(θ)的变化特征,桂花树比樟树和马尾松更耐旱,能迅速从干旱中恢复过来。

#### 参考文献:

[1]石磊,盛后财,满秀玲,等.不同尺度林木蒸腾耗水测算方法述评[J].南京林业大学学报(自然科学版),2016,40(4): 149-156.

[2]WANG H L, TETZLAFF D, J DICK J, et al. Assessing the environmental controls on Scots pine transpiration and the implications for water partitioning in a boreal headwater catchment[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 240-241:58-66.

[3]戴军杰,章新平,吕殿青,等.南方红壤丘陵区樟树林土壤水分动态变化[J].水土保持研究,2019,26(4):123-131.

[4]陈彪,陈立欣,刘清泉,等.半干旱地区城市环境下樟子松蒸腾特征及其对环境因子的响应[J].生态学报,2015,35(15): 5076-5084.

[5] 倪广艳,赵平,朱丽薇,等.荷木整树蒸腾对干湿季土壤水分的水力响应[J]. 生态学报, 2015, 35(3):652-662.

[6]刘延惠,丁访军,舒德远,等.茂兰喀斯特原生林细叶青冈树干液流环境响应特征[J].南京林业大学学报(自然科学

版),2017,41(3):77-85.

[7]刘延惠,舒德远,崔迎春,等.茂兰喀斯特森林亚优势种短萼海桐树干液流特征及其环境因子响应[J].水土保持学报,2016,30(5):205-211.

[8]张振振,赵平,倪广艳,等.华南丘陵植被恢复先锋树种木荷与马占相思的水分利用[J].应用生态学报,2014,25(4):931-939.

[9]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.

[10]朱丽薇,赵平,蔡锡安,等.荷木人工林蒸腾与冠层气孔导度特征及对环境因子的响应[J].热带亚热带植物学报,2010,18 (6):599-606.

[11]刘胜,贺康宁.基于 Penman-Monteith 模型的林木日蒸腾模拟[J].西北林学院学报,2006,21(3):15-20.

[12]贺康宁,田阳,张光灿.刺槐日蒸腾过程的 Penman-Monteith 方程模拟[J]. 生态学报, 2003, 23 (2): 251-257.

[13] 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(1):256-266.

[14] JARVIS P G. The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences, 1976, 273 (927):593-610.

[15]STEWART J B. Modeling surface conductance of pine forest[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1988, 43(1): 19-35.

[16]BUCKLEY T N, MOTT K A, FARQUHAR G D. A hydromechanical and biochemical model of stomatal conductance[J]. Plant Cell &Environment, 2003, 26(10):1767-1785.

[17]BUCKLEY T N, TURNBULL T L, ADAMS M A. Simple models for stomatal conductance derived from a process model: cross-validation against sap flux data[J]. Plant Cell & Environment, 2012, 35(9):1647-1662.

[18]WANG H L, GUAN H D, SIMMONS C T. Modeling the environmental controls on tree water use at different temporal scales[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2016, 255:24-35.

[19] 罗紫东,关华德,章新平,等. 桂花树冠层气孔导度模型的优化及其参数分析[J]. 生态学报, 2016, 36(13): 3995-4005.

[20]刘娜,关华德,罗紫东,等.环境因子对洞庭湖流域三种树木蒸腾的影响[J].生态学杂志,2016,35(6):1460-1466.

[21]MCCUEN R H. A sensitivity and error analysis of procedures used for estimating evaporation[J]. Water Resource Bulletin, 1974, 10(3):486-498.

[22]WHITLEY R, TAYLOR D, MACINNIS-NG C, et al. Developing an empirical model of canopy water flux describing the common response of transpiration to solar radiation and VPD across five contrasting woodlands and forests[J]. Hydrological Processes, 2013, 27(8):1133-1146.

[23]HARRIS P P, HUNTINGFORD C, COX P M, et al. Effect of soil moisture on canopy conductance of Amazonian rainforest [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 122:215-227.

[24]NASH J E, SUTCLIFFE J V. River flow forecasting through conceptual models part I-A discussion of principle[J]. Journal of Hydrology, 1970, 10:282-290.

[25]罗伯良,李易芝. 2013 年夏季湖南严重高温干旱及其大气环流异常[J]. 干旱气象, 2014, 32(4):593-598.

[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]张慧玲,丁亚丽,陈洪松,等.出露基岩生境典型植物树干液流对自然降水和连续干旱的响应特征[J].应用生态学报, 2018,29(4):1117-1124.

[28] 曹文强, 韩海荣, 马钦彦, 等. 山西太岳山辽东栎夏季树干液流通量研究[J]. 2004, 40(2):174-177.

[29]赵春彦,司建华,冯起,等.胡杨(Populus euphratica)蒸腾耗水对小降雨事件的响应[J].中国沙漠,2017,37(5):942-949.