

# 热带雨林冠层树种绒毛番龙眼树冠蒸腾及其与气候因子的关系<sup>1)</sup>

宋清海 张一平 谭正洪 赵俊斌 赵俊福 张翔

(中国科学院热带森林生态学重点实验室(西双版纳热带植物园),昆明 650223)

**摘要** 利用依据热量平衡原理设计的热扩散探针(TDP)在自然条件下测定了西双版纳热带季节雨林顶级树种绒毛番龙眼(*Pometia tomentosa*)活体树冠蒸腾量,并定量评价了树冠蒸腾与主要气候因子PAR和VPD的关系。结果表明:绒毛番龙眼树冠蒸腾的昼夜变化趋势与PAR和VPD变化趋势一致,基本呈单峰型。白天蒸腾显著高于夜晚,各月白天的蒸腾量约占全天的80%~90%。树冠蒸腾总量呈现明显的季节变化特征,雨季、雨季末和干热季蒸腾总量平均值分别为530.32、460.81、222.80 kg·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>。树冠蒸腾与VPD之间幂指数曲线拟合最好,而与PAR之间直线拟合最好;树冠蒸腾的变化更多地依赖于PAR地变化。

**关键词** 树冠蒸腾;树干液流;光合有效辐射;饱和水汽压差;绒毛番龙眼  
**分类号** S715.4; Q945.174

**Canopy Transpiration and Its Relationship with Meteorological Factors of *Pometia tomentosa* in Tropical Rain Forest**/Song Qinghai, Zhang Yiping, Tan Zhengong, Zhao Junbin, Zhao Junfu, Zhang Xiang (Key Laboratory of Tropical Forest Ecology, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650223, P. R. China) // Journal of Northeast Forestry University. -2013 41(3). -6~8 23

The tree canopy transpiration of the dominant tree (*Pometia tomentosa*) in a tropical rain forest in Xishuangbanna was measured by thermal dissipation probe (TDP), and the relationship between the environmental factors, including photosynthetically active radiation (PAR) and vapor pressure deficit (VPD), and canopy transpiration were investigated simultaneously. The results indicated that the canopy transpirations exhibit similar unimodal patterns with PAR and VPD. Canopy transpiration value in day takes up 80%~90% of all transpiration among different months, and is significantly higher than that in night. The values of the canopy transpiration are 530.32 kg·m<sup>-2</sup>·day<sup>-1</sup>, 460.81 kg·m<sup>-2</sup>·day<sup>-1</sup> and 222.80 kg·m<sup>-2</sup>·day<sup>-1</sup> in the rainy season, later rainy season and dry hot season, respectively. There are best fitting power exponent curves between the canopy transpiration and VPD and best linear fitting between the canopy transpiration and PAR. The canopy transpiration depends more on PAR.

**Keywords** Canopy transpiration; Sap flow; Photosynthetically active radiation; Vapor pressure deficit; *Pometia tomentosa*

经由植物气孔蒸腾散失到大气中的水分是森林生态系统水分平衡的重要组分,蒸腾速率的变化直接关系到森林的总生产力。树木的蒸腾耗水量是植树造林与环境水分研究的重要内容<sup>[1-2]</sup>。造林与林分经营的关键是林地水分环境容量问题,即保证林分在整个生长发育阶段林地水量收支达到平衡,而林地蒸散是森林水文平衡中的一个重要过程,其中树木的蒸腾量占林地总蒸散量的一半以上,在林地水分平衡中具有重要意义<sup>[3-5]</sup>。树木的整株耗水性影响造林树种选择与林分结构配置。利用热量平衡原理设计的热扩散探针(TDP),可在自然条件下活体测定树木的蒸腾量,能够准确反映出树木日及其季节尺度上的变化,具有操作简单、测量精度高的优点<sup>[6]</sup>。

西双版纳热带雨林位于世界第二大热带雨林——印度马来热带雨林的北缘,是其重要组成

部分。热带季节雨林是西双版纳热带雨林的主要类型和地带性植被,主要分布在海拔900 m以下的沟谷两侧及低丘台地,以西双版纳东南部的勐腊县最为集中。这片物种丰富的热带季节雨林是我国热带雨林的重要组成部分,对区域水循环起着重要作用。观测样地在云南省西双版纳州勐腊县境内的国家级自然保护区内。样地所在的森林为原生热带季节雨林,其群落高度35 m左右,结构复杂,分层现象明显。绒毛番龙眼(*Pometia tomentosa*)是西双版纳热带季节雨林常见的冠层顶级树种,也是沟谷雨林的一个标志种,对维持雨林生态系统结构与功能具有重要作用,然而目前成了渐危种或稀有种。以前对绒毛番龙眼的研究主要集中在幼苗上,绒毛番龙眼幼苗叶片较薄,单位面积上的呼吸损失较少,有利于其在林下的碳平衡,表现出一定的耐阴特性。绒毛番龙眼幼苗的光合特性对光照条件的变化有较强的可塑性;在雨季强光高温的自然条件下,绒毛番龙眼2种不同发育阶段叶片的光合作用均受到了明显的光抑制,这种光抑制是非辐射能量耗散增加引起的,保护光合机构免受光破坏的结果。但是,对于绒毛番龙眼大树树冠蒸腾的研究还是空白。因此,本研

1) 国家自然科学基金项目(41001063、41071071、41271056、31200347);国家重点基础研究发展计划项目(2010CB833501)。

第一作者简介:宋清海,男,1979年12月生,中国科学院热带森林生态学重点实验室(西双版纳热带植物园)助理研究员。

通信作者:张一平,中国科学院热带森林生态学重点实验室(西双版纳热带植物园)研究员。E-mail: yipingzh@xtbg.ac.cn。

收稿日期:2012年5月18日。

责任编辑:程红。

究以绒毛番龙眼成树为研究对象,定量把握其树冠蒸腾耗水量,并探讨主要气候因子与树冠蒸腾的关系,为植物恢复提供数据支持。

## 1 研究区概况

研究区位于热带雨林的北缘,终年受西南季风控制,属热带季风气候,一年中有雾凉季(11—2月)、干热季(3—4月)、湿热季(5—10月)之分,该地区由于处于静风区(年均风速 $0.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),导致了独特的天气现象:雾日较多,年雾日170 d左右,在雾凉季(11—2月)月平均雾日均超过23 d,最多的1月可达26 d;一般在22:00左右开始起雾,直到第2天12:00时以后才逐渐消散;与雾凉季相比,干热季的雾生成时刻较迟,维持时间较短,一般在23:00之后才开始起雾,而在10:00左右就逐渐消散。

## 2 研究方法

选取3株植株大小基本相同的绒毛番龙眼,利用热扩散传感器进行树干液流测定。热扩散探头(TDP)是一种改良的热扩散传感器,由2根探针组成,上部探针恒定连续加热,内含有加热元件和热电偶,下部探针为参考端,只有热电偶。通过测定2根探针在边材的温度差值计算蒸腾速率,如图1所示。当蒸腾速率等于零或很小时,2个传感器之间的温差较大,当蒸腾增大,温差降低。由蒸腾速率和温差之间的关系,可以计算出蒸腾速率 $V(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$ 。

$$V=0.0119K^{-1.231} \quad (1)$$

式中: $K=(d_{\text{TM}}-d_{\text{T}})/d_{\text{T}}$ , $d_{\text{TM}}$ 为无蒸腾时探针的最大温差值, $d_{\text{T}}$ 为当时测定的温差值(电压为25 V)。

将蒸腾速率 $V$ 转化成日蒸腾量 $F_{\text{s}}(\text{kg}\cdot\text{d}^{-1})$ :

$$F_{\text{s}}=A_{\text{s}}\times V\times 6.4 \quad (2)$$

式中: $A_{\text{s}}$ 为边材面积( $\text{m}^2$ )。

将蒸腾量 $F_{\text{s}}$ 转化为蒸腾速率 $J(\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$ :

$$J=F_{\text{s}}/A_{\text{s}} \quad (3)$$

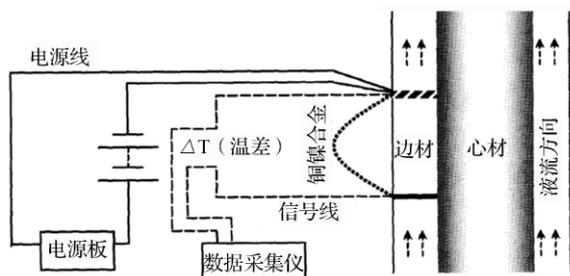


图1 树干液流方法测定示意图

## 3 结果与分析

### 3.1 树冠蒸腾日变化和季节变化

从蒸腾速率的日变化可以看出(图2),在不同月份绒毛番龙眼树冠蒸腾量的昼夜变化趋势一致,

基本呈单峰型,与光合有效辐射(PAR)和饱和水汽压差(VPD)变化趋势相一致(图3),14:00左右蒸腾速率达到最大。白天蒸腾显著高于夜间。在夜间蒸腾相对稳定,变化平缓,维持较低水平;清晨随太阳辐射逐渐增强,气温升高,相对湿度降低,蒸腾速率逐渐加快,一般会在正午前后达到最高值;而后随着太阳辐射减弱,气温降低,相对湿度升高,蒸腾速率剧烈降低,日落后蒸腾最终趋于稳定。在白天,冠层蒸腾速率相对较高,变化幅度大,受太阳辐射、空气温度、空气湿度等环境因素的影响大;而在晚上和凌晨,蒸腾缓慢,变化幅度小,但是这对于树木补充白天消耗的水分和增强生理适应性等方面具有重要的意义。树木边材蒸腾峰值出现时间的早晚既能反映树种耗水速率大小和耗水调控能力强弱,也能反映该树种树体水容大小和根系吸收与供应水分能力的大小。

为了更好地分析蒸腾格局差异,将全天蒸腾分为白天(5:00—19:00)、晚上(19:30—23:30)和凌晨(0:00—5:00)3部分。不同月份各时段蒸腾速率及其单位面积蒸腾量统计结果(表1)显示,不同月份白天时段绒毛番龙眼树冠蒸腾速率和蒸腾量均明显高于晚上和凌晨时段,白天的蒸腾量占全天的80%~90%。液流探针所处方位的不同(南、北方位)测得的冠层蒸腾明显不同。这是由于南面获得的太阳直接辐射较强,加速了树干液流的上升速率。绒毛番龙眼树冠蒸腾总量有明显的季节变化(表1),雨季(7月)大于雨季末(10月)大于干热季(3月)。雨季、雨季末和干热季蒸腾总量平均值分别为530.32、460.81、222.80  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。

### 3.2 树冠蒸腾与VPD和PAR的定量关系

雨季时,随着VPD和PAR的增大,绒毛番龙眼树冠蒸腾的升高速率(斜率)均显著高于干热季(图4)。绒毛番龙眼树冠蒸腾与VPD之间幂指数曲线拟合得最好,而与PAR之间直线拟合得最好;树冠蒸腾的变化更多地依赖于PAR的变化(表2)。

## 4 结论与讨论

绒毛番龙眼树冠蒸腾的昼夜变化趋势一致,基本呈单峰型。绒毛番龙眼树冠蒸腾总量呈现明显的季节变化特征,雨季最大,而干热季最小。绒毛番龙眼树冠蒸腾与VPD之间幂指数曲线拟合得最好,而与PAR之间直线拟合得最好;树冠蒸腾的变化更多地依赖于PAR的变化。很多研究表明<sup>[5-7]</sup>,PAR、VPD与树冠蒸腾之间相关显著,可以解释树干液流的变化。在其他地点,一些研究者对不同种类树木液流的研究也发现,影响液流的各种环境因子中,PAR和VPD是影响液流变化的主导因子<sup>[8-11]</sup>。但

是随着时空的变化,影响液流的主导因子也会发生变化。PAR和VPD并不是独立存在和作用的,其间还存在相互制约和相互协调,PAR影响温度和相对

湿度,而VPD是温度和相对湿度的函数。所以需要进一步开展在可控试验条件下,监测树干液流的变化,研究各因子对树干液流的影响机制。

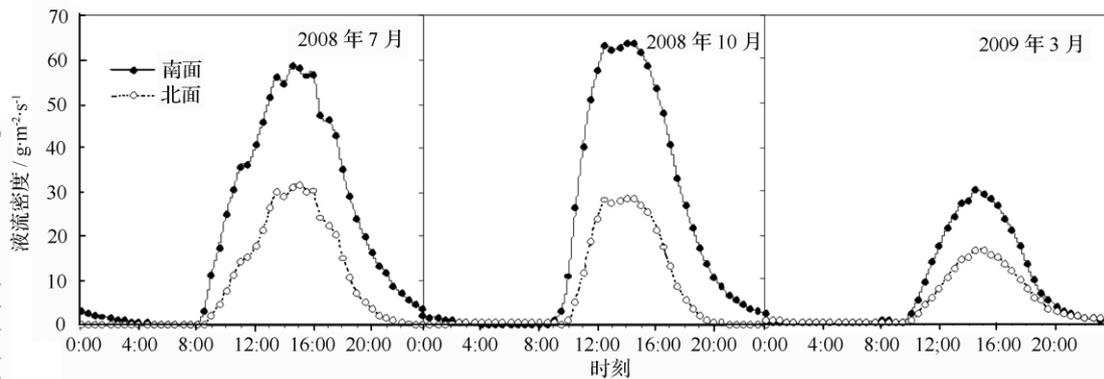


图2 绒毛番龙眼树干蒸腾日和季节变化

表1 绒毛番龙眼不同季节冠层蒸腾速率和蒸腾量

月份	方位	凌晨(0:00—5:00)			白天(5:30—19:00)			晚上(19:30—23:30)			全天蒸腾总量/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$
		蒸腾速率平均 值/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	蒸腾量/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$	占全天蒸腾 量比例/%	蒸腾速率平均 值/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	蒸腾量/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$	占全天蒸腾 量比例/%	蒸腾速率平均 值/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	蒸腾量/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$	占全天蒸腾 量比例/%	
7	南	1.50	26.95	3.51	30.90	556.15	72.46	10.25	184.48	24.03	767.57
	北	0.09	1.59	0.54	14.48	260.68	88.95	1.71	30.80	10.51	
	均值	0.79	14.27	2.03	22.69	408.41	80.70	5.98	107.64	17.27	
10	南	0.91	16.38	2.36	31.06	559.13	80.55	6.59	118.63	17.09	694.14
	北	0.37	6.63	2.91	11.85	213.29	93.76	0.42	7.56	3.32	
	均值	0.64	11.50	2.64	21.46	386.21	87.16	3.51	63.09	10.21	
3	南	0.29	5.13	1.84	12.91	232.32	83.05	2.35	42.30	15.12	279.75
	北	0.41	7.35	4.43	6.91	124.43	75.03	1.89	34.07	20.54	
	均值	0.35	6.24	3.13	9.91	178.37	79.04	2.12	38.18	17.83	

表2 绒毛番龙眼不同季节冠层蒸腾量与VPD和PAR拟合公式

时间	方位	Flow-VPD 拟合			Flow-PAR 拟合		
		公式	相关系数	P 值	公式	相关系数	P 值
2008年7月	南	$F = \exp(0.64V_{PD})$	$R^2 = 0.60$	$P < 0.01$	$F = 3.99 + 0.09P_{AR}$	$R^2 = 0.93$	$P < 0.01$
	北	$F = \exp(0.53V_{PD})$	$R^2 = 0.77$	$P < 0.01$	$F = -0.03 + 0.05P_{AR}$	$R^2 = 0.95$	$P < 0.01$
2008年10月	南	$F = \exp(0.47V_{PD})$	$R^2 = 0.57$	$P < 0.01$	$F = 3.34 + 0.09P_{AR}$	$R^2 = 0.92$	$P < 0.01$
	北	$F = \exp(0.37V_{PD})$	$R^2 = 0.73$	$P < 0.01$	$F = -0.11 + 0.04P_{AR}$	$R^2 = 0.94$	$P < 0.01$
2009年3月	南	$F = \exp(0.14V_{PD})$	$R^2 = 0.42$	$P < 0.01$	$F = 1.08 + 0.05P_{AR}$	$R^2 = 0.91$	$P < 0.01$
	北	$F = \exp(0.11V_{PD})$	$R^2 = 0.50$	$P < 0.01$	$F = 0.85 + 0.02P_{AR}$	$R^2 = 0.87$	$P < 0.01$

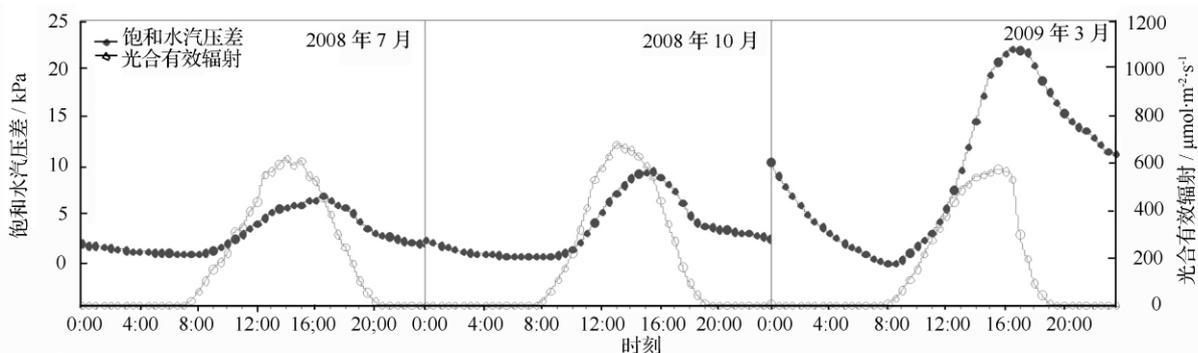


图3 VPD和PAR日和季节变化

基于树干液流方法估算整个森林群落蒸腾量,需选定一系列不同胸径大小样树,这主要取决于树木种类、树龄和生长状况等。为更好估算该

森林群落蒸腾总量,今后需再增加观测样树数量和种类。

(下转23页)

弃地恢复中要推广这些技术,为植被恢复提供良好的技术支撑。通过研究尾矿库废弃地植被生长规律,可为今后通过对植被演替阶段的人工模仿和控制、加快植被恢复的速度提供技术支持。

尾矿库废弃地植被恢复研究具有很强的区域性,研究结果会因所选择研究区域的不同而不同,而且矿业废弃地退化生态系统类型多样、退化程度与退化原因各异,其恢复过程中生物多样性的变化规律、功能和作用机制也不同。植被的恢复以及整地方式对尾矿库废弃地的土壤状况有明显影响,对于不同的植被恢复目标,应采取不同的植被恢复模式和整地方式。因此,今后需要对不同区域矿业废弃地退化生态系统做更深入地研究,从而制定科学的矿业废弃地退化生态系统恢复措施和生物多样性保护措施。本研究表明6种恢复措施在一定程度上改善了爬地柏的生长环境,提高了土壤的水分含量,但笔者仅对爬地柏1个树种进行了研究,试验对象受到限制,这6种恢复措施对其它树种是否有同样的效果,有待于进一步深入研究。

## 参 考 文 献

- [1] 白育英,郭永盛.沙地柏扦插繁育及苗木栽培技术[J].内蒙古林业科技,2010,36(1):25-26.
- [2] 杨宏伟,郭永盛,尚海军等.爬地柏扦插繁育试验研究[J].内蒙古林业科技,2011,37(4):44-45,48.
- [3] 彭凤,赵德君.凤凰山采石矿山的景观恢复探讨[J].安徽农业

- 科学,2007,35(12):3566-3567,3662.
- [4] Bank A D. Reform of environmental and land legislation in the People's Republic of China [M]. Manila: Asian Development Bank, 2000: 234-258.
- [5] Marrs R H, Bradshaw A D. Nitrogen accumulation, cycling and the reclamation of china clay wastes [J]. Journal of Environmental Management, 1982, 15: 130-157.
- [6] 谭绿贵,傅先兰,汪万芬等.寿县八公山景区放牛山石料矿山生态恢复对策探讨[J].皖西学院学报,2008,24(5):121-125.
- [7] 王存存,陈东田,王永俊.论采石场的生态恢复和景观重建:以山东省菏泽市巨野县为例[J].山东林业科技,2006(6):37-38,48.
- [8] 刘宗磊.藏中拉屋矿山植物生长限制因子研究[D].林芝:西藏大学,2011.
- [9] Wong M H. Ecological restoration of mine degraded soils, with emphasis on metal contaminated soils [J]. Chemosphere, 2003, 50(6):775-780.
- [10] 鲁统春,高德武,王创争等.废弃采石场植被快速恢复研究[J].水土保持研究,2006,13(6):210-212.
- [11] Bell L C. Establishment of native ecosystems after mining-australian experience across diverse biogeographic zones [J]. Ecological Engineering, 2001, 17(2/3):179-186.
- [12] 韩方,李传荣,孙明高等.废弃采石场植被自然恢复初期群落的结构特征[J].中南林业科技大学学报,2008,28(2):35-49.
- [13] Bradshaw A. The use of natural processes in reclamation: advantages and difficulties [J]. Landscape and Urban Planning, 2000, 51(2/4):89-100.
- [14] 张志良,瞿伟菁.植物生理学实验指导[M].3版.北京:高等教育出版社,2003:35-43.
- [15] 潘东明,李合生.植物生理生化实验原理和技术[M].北京:高等教育出版社,2000:119-263.
- [16] 丛日春,胡雅君,刘洪庆.几种攀缘植物耐旱性研究[J].内蒙古林业学院学报,1996,18(3):33-39.
- [17] 张福锁.土壤与植物营养研究新动态[M].北京:北京农业大学出版社,2002.

(上接8页)

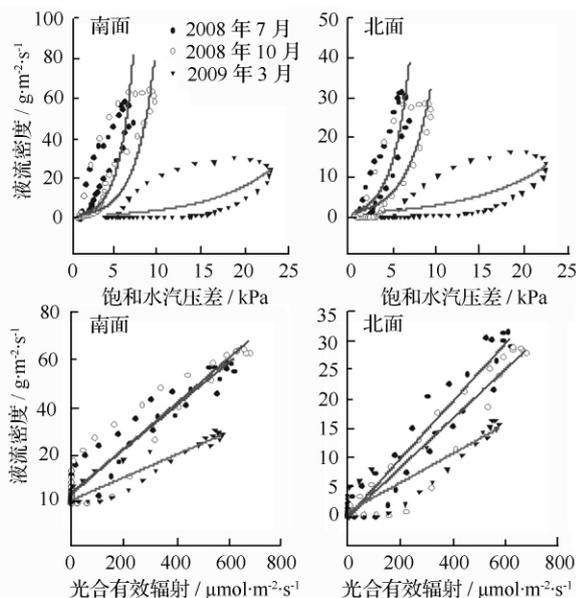


图4 绒毛番龙眼树冠蒸腾和 VPD 与 PAR 关系

致谢:本研究得到中国科学院西双版纳热带雨林生态系统研究站的帮助和支持,在此表示感谢。

## 参 考 文 献

- [1] Wang Huatian, Ma Lüyi. Measurement of whole tree's water con-

- sumption with thermal dissipation sap flow probe (TDP) [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2002, 26(6):661-667.
- [2] Lu Ping, Urban L, Zhao Ping. Granier's B thermal dissipation probe (TDP) method for measuring sap flow in trees: theory and practice [J]. Acta Botanica Sinica, 2004, 46(6):631-646.
- [3] Zhao Ping, Ma Ling, Sun Gu, et al. Combining sap flow measurement-based canopy stomatal conductance and  $^{13}\text{C}$  discrimination to estimate forest carbon assimilation [J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(18):2021-2027.
- [4] 吴征镒.云南哀牢山森林生态系统研究[M].昆明:云南科技出版社,1983.
- [5] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurement [J]. Tree Physiology, 1987, 3(4):309-320.
- [6] Wullschlagger S D, Wilson K B, Hanson P J. Environmental control of whole-plant transpiration, canopy conductance and estimates of the decoupling coefficient for large red maple trees [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 104(2):157-168.
- [7] O'Brien J J, Oberbauer S F, Clark D B. Whole tree xylem sap flow response to multiple environmental variables in a wet tropical forest [J]. Plant, Cell and Environment, 2004, 27(5):551-567.
- [8] Oren R, Pataki D E. Transpiration in response to variation in microclimate and soil moisture in southeastern deciduous forests [J]. Oecologia, 2001, 127:547-559.
- [9] 司建华,冯起,张小由等.热脉冲技术测定树干液流研究进展[J].寒区科学与科技,2007,29(3):475-481.
- [10] 涂洁,刘琪璟,李海涛等.江西千烟洲湿地松生长旺季树干液流动态及影响因素分析[J].林业科学,2008,44(1):46-51.
- [11] 许文滔,赵平,王权等.基于树干液流测定值的马占相思 (*Acacia mangium*) 冠层气孔导度计算及数值模拟[J].生态学报,2007,27(10):4122-4131.