

热扩散式树木液流国产化传感器性能分析*

张劲松¹, 孟平¹, 刘尉², 施生锦¹, 王鹤松¹, 高峻¹, 任庆福¹

(1 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;

2 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100094)

摘要: 本研究以整树盆栽称重法(MBW)为标准, 美国 Dynamax 公司同类传感器(mdTDP)为对照, 以大叶女贞、栓皮栎为供试树种, 对国产化热扩散式液流(TDP)传感器(cTDP)的性能进行了验证, 结果表明: MBW 法得到的蒸腾速率与由 cTDP 测算得到的大叶女贞液流速率具有很好的相关关系, 且无显著性差异($P < 0.05$); 二者 30 min 平均值的线性相关系数为 0.90(样本数为 215); 二者日总量之间相关系数可达 0.99, 其相对误差的最大值、最小值及平均值分别为 13.3%、0.5%、8.7%。cTDP 测算得到的树干液流密度与 mdTDP 测算得到的树干液流密度日变化趋势完全一致, 二者具有很好的线性相关关系, 相关系数大于 0.98, 且无显著性差异($P < 0.05$)。

关键词: 热扩散式传感器; 树木液流; 国产化技术; 性能分析

中图分类号: S715.4

文献标识码: A

Performance Analysis for the Domestic TDP Sensor for Measuring Sap Flow in Trees

ZHANG Jin-song¹, MENG Ping¹, LIU Wei², SHI Sheng-jin², WANG He-song¹, GAO Jun¹, REN Qing-fu¹

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

2 College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100094, China)

Abstract Taking whole-tree weighing method (MBW) as criterion and compared with similar sensor made by Dynamax (mdTDP), the performance of domestic TDP sensor (cTDP) were assessed by measuring the sap flow (SF) and transpiration rate (TR) of *Ligustrum leucadendra* and *Quercus variabilis* as test materials. The results are as follows: (1) The TR of had good correlation with SF derived from the cTDP method and there was no significant difference between them ($P < 0.05$). The linear correlation coefficient between the average value of TR and that of SF in 30 minutes was 0.90 ($n = 215$), the maximum was 0.99 daily. The maximal, minimal and average values of relative error between the total TR and the total SF daily were 13.3%, 0.5% and 8.7% respectively. (2) The daily sap flux density value derived from the cTDP method had complete consistency with that derived from mdTDP method.

Key words TDP sensor; sap flow in trees; domestic technology; performance analysis

蒸腾是植物耗水的主要方式, 选择合适的测定方法来测算林木蒸腾耗水量是开展植物水分生态特征等相关研究工作的基础^[1]。鉴于林地或森林生态系统因下垫面的非均一性、林木冠层结构的复杂性、

不同部位叶片之间的变异性、土壤空间结构的变异性、根系分布的复杂性, 以及由此所导致蒸腾与蒸发分开计量的更加困难性等原因, 故目前被用于测定林木蒸腾, 并具有相对较高稳定性及精度的可行途

收稿日期: 2007-01-12

基金项目: 科技部科研条件专项项目/科学仪器升级改造课题(J-2004-32)、国家林业局 948 项目(2005-4-25)、国家“十一五”科技支撑课题(200603BADA11)部分研究内容

作者简介: 张劲松(1968—), 男, 浙江永嘉人, 博士、研究员, 主要研究方向: 复合农林业、农(林)业气象。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

径是通过热扩散式 (TDP) 液流 (SAP FLOW) 法直接测定单株蒸腾量。Fredrik 等^[2]总结了国际上对树干液流量和蒸腾关系的研究成果, 指出在正常情况下一天的蒸腾量与液流量相等, 因而在日时间尺度上, 可以用树干液流量表征蒸腾量^[3]。目前 TDP 传感器在国外已得到普遍应用, 主要产家在美国、德国、澳大利亚等国^[4]。

近几年来, 我国虽开始应用 TDP 技术, 但目前由于不能解决 TDP 工艺技术, 特别是传感器制作技术, 现有 TDP 传感器几乎全部来之国外, 最终因进口价格昂贵, 如: TDP 传感器在国内销售单价 350~500 美元, 从而限制了这一技术在我国推广应用, 使我国林木蒸腾耗水规律及其相关研究进展落后于国际水平。因此, 突破国外技术壁垒, 实现 TDP 传感器国产化生产, 在不降低稳定性及测定精度的前提下, 大幅度降低传感器单价, 具有十分重要的现实意义。本文将分析国产化 TDP 传感器的性能, 为其技术的推广与应用提供科学依据。

1 TDP 传感器的结构与原理

1.1 结构

TDP 传感器由特殊工艺制作的感应探针、高灵敏度的热电偶温差传感器和高电阻率的加热电阻构成。本国产化 TDP 传感器 (cFDTP) 探针内径为 1.25 mm, 根据实际应用, 长度可制成 5~80 mm, 探针外涂抹特富龙使探针均匀受热。探针分加热端探针和参考端探针。两探针内部分别放置热电偶的 2 个结点, 加热端探针内部集成线状加热电阻, 加热电阻的大小适应探针的长度变化, 其值为 20~50 Ω , 加热电压为 1.25~2.5 V, 加热功率为 0.05~0.12 W。参考端探针内部无加热电阻。探针头部和尾部用环氧树脂胶密封用于防水。cFDTP 与 Granier 型的主要区别在于, 前者将加热电阻整合于探针内部, 无需再加套铝制或铜制的导热管, 使应用更加方便, 且对于树干液流的感应灵敏度更高。

1.2 原理及测算公式

1.2.1 树干液流 应用 TDP 测算树干液流速率时, 将 1 根加热探针插入树干的木质部, 将另 1 根不加热探针 (参考端探针) 插入它下方一定距离的木质部, 再测量两探针间的温差 (dT)。加热探针的热量随着树干液流的流动向上扩散, 从而导致了加热探针的冷却。当树干液流密度为零或最小时, dT 达最大。随着树干液流密度增大, 树干木质部的导热

率也增大, dT 将减小。 dT 与木质部的液流密度存在一定的定量关系, Granier 等^[4-6]通过一系列标定试验得到了 dT 与液流密度之间的关系式如下:

$$Fd = 119(dTM/dT - 1)^{1.231} \quad (1)$$

$$SF = Fd \times SA \times 3.6 \quad (2)$$

式 (1)、(2) 中: Fd 为树干液流密度 ($g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$); SF 为树干液流速率 ($L \cdot h^{-1}$), 可近似为蒸腾速率; SA 为边材面积 (cm^2); dTM 为一日内最大温差值, dT 为某时刻温差值。

1.2.2 方差分析 采用单因素方差分析法^[7,8], 求算组间差异、组内差异、总变异及 F 值。

2 试验地概况及试验设计

试验地点位于河南省济源市境内的黄河小浪底森林生态系统定位研究站。该研究站地处太行山南段, 黄河流域北缘, 属温带大陆性季风气候; 全年日照时数为 2367.7 h 历年平均降水量 641.7 mm, 但由于受季风气候的影响, 年内季节性分布不均匀, 6—9 月多年平均降水量为 438.0 mm, 占全年的 68.3%; 试验区土壤以石灰岩风化母质淋溶性褐色土—棕壤土为主, 土层厚度 50~80 cm。

2.1 与整树称重法的对比试验设计

供试树种为 6 年生大叶女贞 (*Ligustrum lucidum* Ait), 生长情况见表 1。以单株盆栽称重法为标准, 对 cFDTP 性能进行验证。cFDTP 探针长度为 30 mm, 数据采集器为 SQ2020 每 2 min 采集 1 次, 每 30 min 输出 1 组平均值。每 2~3 d 对盆灌溉 1 次, 使土壤达饱和, 使用多层薄膜覆盖土壤表面, 以防止土壤蒸发, 确保蒸散量近似于蒸腾量。称重法采用的电子天平为 LA/LP64001S (Sartorius, German), 量程 64 kg 分辨率 0.1 g 每 30 min 记录 1 次数据。每天观测时段: 7:00—20:00 观测时期: 2006 年 8 月 3 日至 11 日。

2.2 与国外同类传感器的对比试验设计

供试树种为 6 年生大叶女贞 (见 2.1 节)、29 年生栓皮栎 (*Quercus variabilis* Bl)。栓皮栎生长情况见表 1, 其中, 栓皮栎设置 3 个样株 (相当于 3 个重复)。以美国 Dynamax 公司生产的 TDP 传感器 (mFDTP) 为对照, 比较 cFDTP 与 mFDTP 之间的性能差异性, 二者探针长度均为 30 mm。数据采集器同 2.1 节, 每 2 min 采集 1 次, 每 10 min 输出 1 组平均值。cFDTP 与 mFDTP 插针方位分别为正北、北偏西约 60°, 二者距地面均约 1.0 m 处。观测时间为: 2006 年 7 月 14 日至 20 日。

表 1 供试树种的生长情况

生长指标	大叶女贞	栓皮栎		
		样株 1#	样株 2#	样株 3#
树干直径 / cm	8.4	9.5	9.6	9.8
边材半径 / cm	4.1	3.5	3.5	3.6
树高 / m	3.1	8.2	8.1	8.2

3 结果与分析

3.1 与整树称重法的对比

整树称重法 (MBW) 是目前测量单株植物蒸腾耗水相对最为准确的方法, 可被作为标准对 TDP 法液流测算经验公式进行验证^[7]。本研究表明

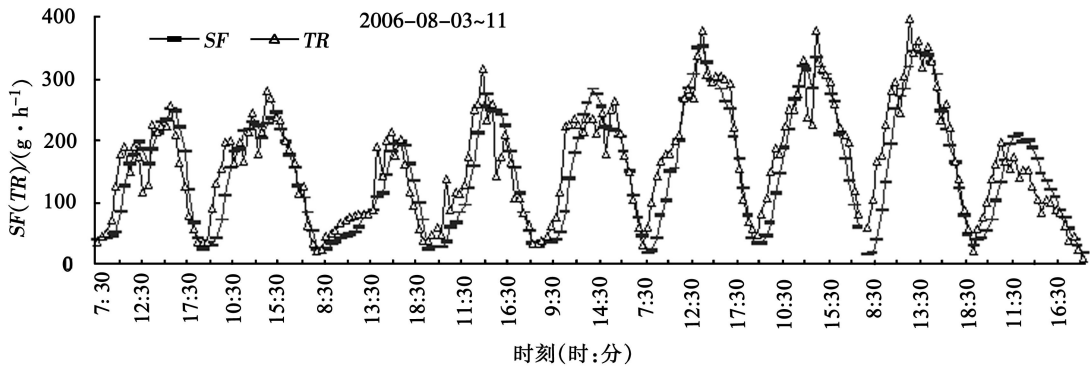


图 1 国产化 TDP 传感器测算得的树干液流速率 (SF) 与称重法得的蒸腾速率 (TR) 变化趋势的比较

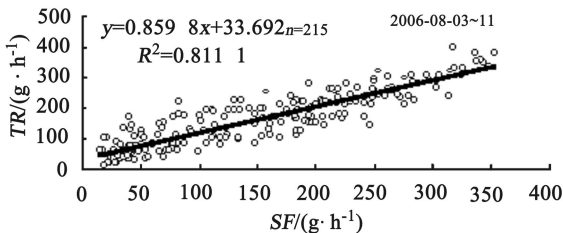
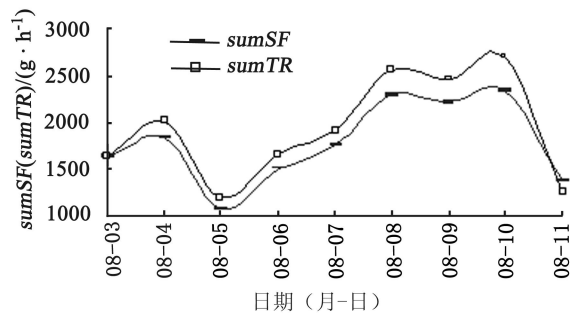
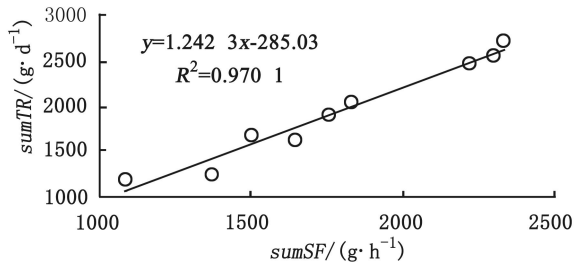


图 2 国产化 TDP 传感器测算得的树干液流速率 (SF) 与称重法得到的蒸腾速率 (TR) 的回归关系

从图 1 还可知: 由国产化 TDP 传感器测算得的树干液流速率 (SF) 的变化比称重法得的蒸腾速率 (TR) 要滞后, 从而导致 SF 与 TR 存在一定的差异。其主要原因在于: (1) 树干液流的流动由蒸腾作用驱动, 因此树干液流变化会滞后于树冠蒸腾的变化; (2) TDP 传感器内部热电偶对探针热量的变化有一个响应过程。为消除日内这种滞后性误差, 本研究分析了液流日累计值 (sumSF) 与蒸腾日累计值 (sumTR) 的关系, 结果表明: sumSF 与 sumTR 的变化趋势更为相近 (图 3 4), 相对误差最大值、最小值及平均值分别为 13.3%、0.49%、8.7%, 线性相关系数大于 0.98 与 Braun^[9] 验证 Grainee 型 TDP 传感器的结论基本一致。可见, 国

(图 1): 利用国产化 TDP 测算得到的大叶女贞每 30 min 液流平均速率 (SF) 与 MBW 法测定得到的每 30 min 平均蒸腾速率 (TR) 的日变化趋势基本一致。SF 与 TR 具有很好的线性相关关系 (图 2), 二者相关系数为 0.900 6 ($n = 215$)。试验观测日内 SF 与 TR 的平均值分别为 151.3、163.9 $\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$, 二者仅相差 7.7%。方差计算表明: $F = 1.95 < F_{0.05} = 3.86$ 说明由国产化 TDP 传感器测算得到的大叶女贞树每 30 min 平均液流速率与整树称重法测定得到的每 30 min 平均蒸腾速率无显著差异。

图 3 国产化 TDP 测算得的树干液流日累计值 (sumSF) 与称重法得的蒸腾日累计值 (sumTR) 变化趋势的比较图 4 国产化 TDP 测算得的树干液流日累计值 (sumSF) 与称重法得的蒸腾日累计值 (sumTR) 的回归关系

产化 TDP 传感器精度较高。

3.2 与美国 Dynamax 公司 TDP 传感器的比较

目前, 国内使用的 TDP 传感器几乎均为美国 Dynamax 公司生产。从图 5 可知, 由国产化 TDP 传感器测算得到的树干液流密度 (qFd) 与 Dynamax 公

司同类传感器 ($m dTDP$) 测算得到的树干液流密度 ($m dFd$) 日变化趋势完全一致, 二者具有很好的线性相关(图 6), 相关系数大于 0.98 优于美国 Dynamax 公司 30mm TDP 传感器与 Granier 型的对比结果^[10]。

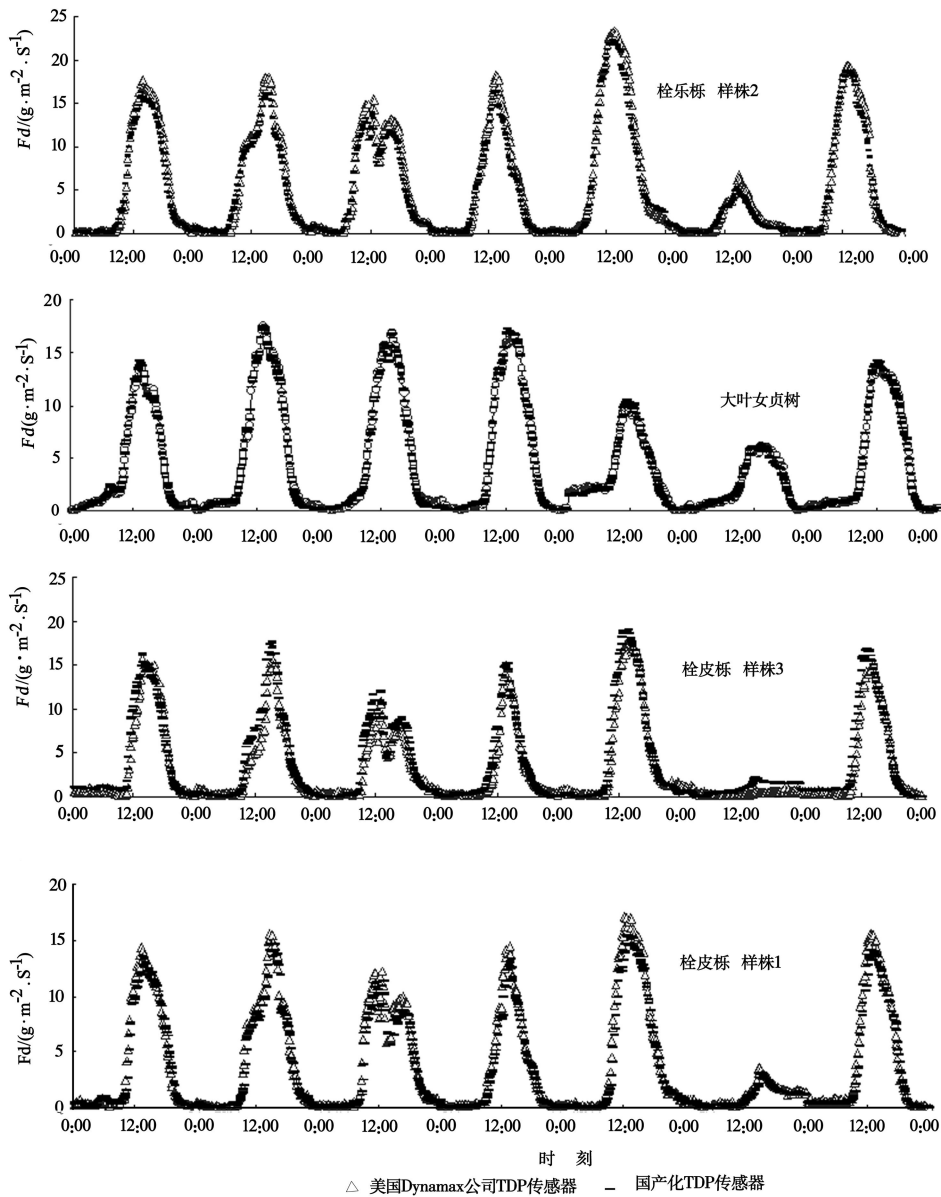


图 5 国产化 TDP 传感器和美国 Dynamax 公司 TDP 传感器测算得到的树干液流密度 (F_d) 变化趋势的比较

试验观测期内, 大叶女贞的 qFd 与 $m dFd$ 的平均值分别为 4.21 、 $4.13 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 方差计算表明: $F = 0.0117 < F_{0.05} = 3.84$ 。栓皮栎的 qFd 与 $m dFd$ 的平均值分别为 4.02 、 $4.13 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 方差计算表明: $F = 0.611 < F_{0.05} = 3.84$ 。说明用这 2 种传感器测得的树干液流密度无显著差异 ($P < 0.05$)。

司同类传感器 ($m dTDP$) 测算得到的树干液流密度在不同树种间及同一树种不同样株间的差异不一。相对栓皮栎, 大叶女贞树木质部的生长密度比较均一, 所以, 2 种 TDP 传感器树干液流密度的测值差异程度比栓皮栎的小。对于同一样株, 上述差异的主要原因是 2 种传感器的探针不可能插在相同位置, 而且位置越近, 因互相热量干扰程度越大, 二者计算得到的液流量差异越大; 但位置相差越大, 因树干结构本

身存在木质部生长密度的不均一性, 导致方位间液流存在一定差异。由此可见, 国产化 TDP 传感器与美国 Dynamax 公司生产的同类型号传感器在测定精

度、一致性及稳定性等方面不存在本质的差异性, 可以认为本类传感器具有良好的性能。

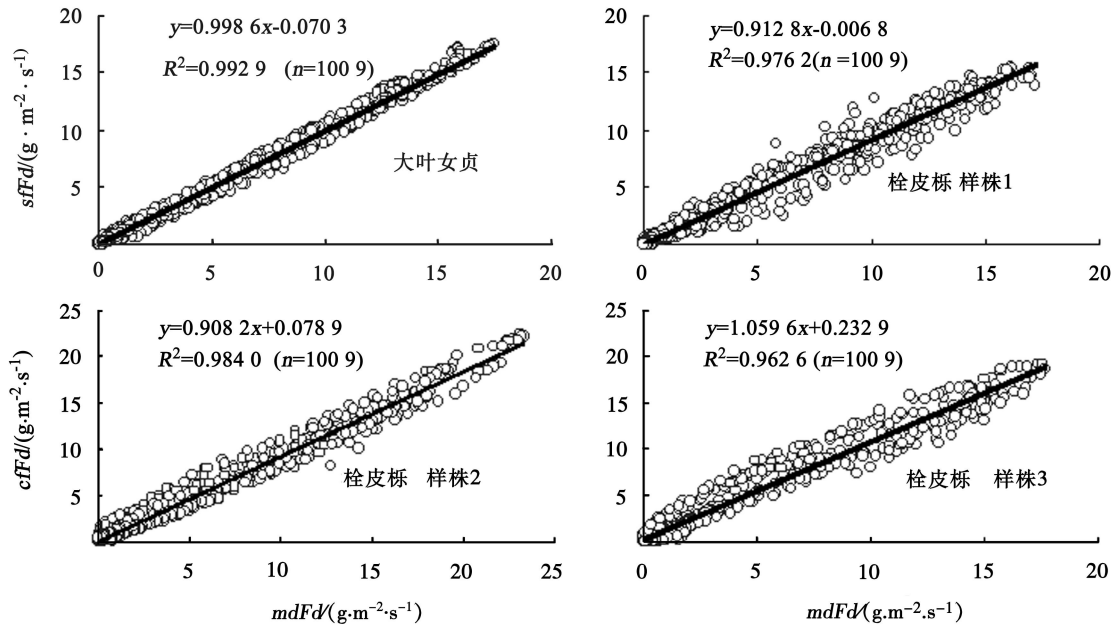


图 6 不同树种由国产化 TDP 传感器测得的树干液流密度 ($gfFd$) 和美国 Dynamax 公司 TDP 传感器测得的树干液流密度 ($mdFd$) 的回归关系

4 结论与讨论

本试验以大叶女贞为例, 国产化 30 mm 型 TDP 传感器测算得的树干液流量与称重法得到的蒸腾量的差异很小, 该结论与 Braun^[9] 验证 Granier 型 TDP 传感器的结论基本一致。二者 30 min 平均值的相关系数在 0.90 以上, 且无显著性差异 ($P < 0.05$)。日平均值相关系数可达 0.98, 相对误差平均值为 8.7%。

以大叶女贞、栓皮栎为供试树种, 国产化 30 mm 型 TDP 传感器与美国 Dynamax 公司同类传感器相比, 二者测算出的树干液流密度日变化趋势完全一致, 具有很好的线性相关关系, 相关系数大于 0.98, 且无显著性差异 ($P < 0.05$)。

国产化 TDP 传感器可以满足用以测算树木液流及蒸腾的要求, 而且单价约为 1200 元, 仅为国外同类商业化产品单价的 40% 左右, 具有显著的价格优势。国家知识产权局已接受国产化 TDP 传感器的专利申请, 国产化 TDP 传感器现已在中国科学院植物研究所、中国农业大学、中国林业科学研究院林业研究所、中国药用植物研究所等单位推广应用。本研究对突破 TDP 传感器国外技术壁垒, 促进我国植物水分生理

生态等相关主题研究水平的提高具有重要的意义。

参考文献:

- [1] 张劲松, 孟平, 孙惠民, 等. 毛乌素沙地樟子松蒸腾变化规律及其与微气象因子的关系 [J]. 林业科学研究, 2006, 19(1): 45~50
- [2] Fredrik L, Anders L. Transpiration response to soil moisture in pine and spruce trees in Sweden [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2002, 112: 67~85
- [3] 陈仁升, 康尔泗, 赵文智, 等. 中国西北干旱区树木蒸腾对气象因子的响应 [J]. 生态学报, 2004, 24(3): 477~485
- [4] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas fir stand by means of sap flow measurements [J]. Tree Physiology 1987, 3: 309~320
- [5] Granier A, Huc R, Barigah S T. Transpiration of natural rain forest and its dependence on climatic factors [J]. Agricultural and forest meteorology, 1996, 78: 19~29
- [6] Ping Lu, Lauren URBAN, ZHAO Ping. 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] 袁志发, 周静芋. 试验设计与分析 [M]. 北京: 北京高等教育出版社, 2000
- [8] 洪楠, 林爱华, 李志辉, 等. SPSS for Windows 统计分析教程 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2000
- [9] Braun P, Schmid J. Sap flow measurements in grapevines (*Vitis vinifera* L.) II. Granier measurements [J]. Plant and Soil 1999, 215: 47~55
- [10] Dynamax Inc. Sap flow-Thermal Dissipation Probe (TDP), TDP Brochure: www.dynamax.com, 2006