

紫玉兰树干液流对北京市综合环境变量的响应*

王 华¹ 欧阳志云^{1**} 郑 华¹ 任玉芬¹ 高付元²

(¹中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; ²北京教学植物园, 北京 100061)

摘 要 2008年4-10月,为明确典型城市绿化树种紫玉兰耗水特征的影响因素,研究了紫玉兰树干液流对北京市空气温湿度、辐射、风速、土壤温度和含水量、降雨等环境因子的响应。结果表明:影响紫玉兰树干液流的8个环境因子可分为蒸发需求因子(EDI)、土壤因子和降水因子3类,其中,EDI(大气温度、空气相对湿度、总辐射、风速和水汽压亏缺)是影响紫玉兰树干液流的关键因子,可以解释紫玉兰树干液流变化的60%,且紫玉兰树干液流对EDI的响应方式呈“S”型曲线,液流达到最大值后,即使光照和蒸发需求增加,液流也不再增加;土壤因子(土壤温度和土壤含水量)和降水因子(降水量)对紫玉兰树干液流的影响很小。

关键词 城市树木 热消散技术 树干液流 主成分分析 紫玉兰

文章编号 1001-9332(2011)03-0571-06 **中图分类号** Q948.11 **文献标识码** A

Magnolia liliiflora whole-tree sap flow in response to multiple environmental variables in Beijing. WANG Hua¹, OUYANG Zhi-yun¹, ZHENG Hua¹, REN Yu-fen¹, GAO Fu-yuan² (¹State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; ²Beijing Teaching Botanical Garden, Beijing 100061, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2011, 22(3): 571-576.

Abstract: In order to clarify the environmental factors affecting the water use of typical urban tree species *Magnolia liliiflora*, an investigation was conducted on the responses of *M. liliiflora* whole-tree sap flow to the air temperature, air relative humidity, radiation, wind speed, soil temperature and water content, and precipitation in Beijing from April to October, 2008. The eight environmental factors affecting *M. liliiflora* whole-tree sap flow could be divided into three categories, *i. e.*, evaporative demand index, soil index, and precipitation index. The evaporative demand index (air temperature, air relative humidity, total radiation, wind speed, and vapor pressure deficit) could explain 60% of the variation in the sap flow of individual trees, which presented S-type change trend, *i. e.*, the sap flow reached an asymptote where higher light and evaporative demands could not cause sap flow to increase further. Soil index (soil temperature and water content) and precipitation index (precipitation amount) had little influence on the sap flow.

Key words: urban tree; thermal dissipation method; sap flow; principal components analysis; *Magnolia liliiflora*.

城市化强烈地改变了气候、水资源、空气质量和生物多样性^[1-2]。这对城市内部及周边区域的植物产生了巨大影响。城市环境对植物生长有着明显的负作用(如较高的空气污染物浓度和土壤重金属元素含量等)^[3-5];同时,较高的空气温度和二氧化碳浓度以及灌溉施肥园林管理措施等又能够促进植物

的生长^[6]。由于城市树木具有降温增湿、吸收空气污染物、减少暴雨的速率和体积等多种生态效能^[7],很多城市致力于增加树木的覆盖面积,目前北京市绿化覆盖率已超过40%^[8]。然而,城市植物消耗性灌溉量非常大^[9],且容易受到“晒衣绳作用”的影响而耗水较多^[10],因此,迫切需要系统、全面地了解城市树木的耗水规律和机制。

自然环境下,树木耗水对单一环境因子(如辐射、水汽压亏缺、土壤湿度、降水、温度等)的响应规律已有很多研究^[11-15]。而在城市环境下,其研究多

* 国家自然科学基金重点项目(41030744)、国家“十一五”科技支撑计划项目(2007BAC28B01)和城市与区域生态国家重点实验室科研专项资助。

** 通讯作者。E-mail: zyouyang@rcees.ac.cn

2010-09-21 收稿,2010-12-19 接受。

关注某个城市环境特征(如城市下垫面能量平衡特征、建筑物、大气污染物、种植密度、灌溉、养分等)对植物耗水的影响^[16-22]. 环境因子之间彼此相关,单一环境因子对植物耗水影响的研究未能全面反映植物-环境之间的关系. 城市绿化树木间距较大,较低的冠层郁闭度改变了气候与土壤之间的关系. 由于多个环境因子共同影响植物耗水,且环境因子之间存在明显的共线性,因此,采用主成分分析把城市环境因子压缩成几个公因子,并以此衡量和预测树木耗水是一种简单、客观、有效的方法^[23].

以往研究城市植物耗水多以盆栽植物为对象^[16-18,21,22]. 然而,大树和小树不仅生物学结构差别很大,而且对环境因子的响应也不同. 因此,把基于盆栽植物得到的研究结果推广到大树上往往不准确. 热消散技术具有准确、连续和无破坏等优点^[24],是国际上测定树木耗水的先进研究方法,也是研究城市树木耗水的适宜方法. 紫玉兰(*Magnolia liliiflora*)具有很高的园林绿化应用价值,了解和掌握其耗水特性可为制定科学合理的绿地灌溉制度、绿化树种的配植,以及衡量绿化树种的生态功能提供理论依据. 为此,本研究采用热消散技术对紫玉兰树干液流进行原位长期观测,分析其对北京市城市环境的响应规律,并建立基于综合环境变量预测紫玉兰整棵树耗水的简易模型,以期选择合理参数预测和比较城市绿化树种耗水特征提供参考.

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于北京市南二环的教学植物园(39°52'20"-39°52'28" N, 116°25'37"-116°25'50" E),占地面积 11.65×10⁴ m². 该地区属于温带半湿润大陆性季风气候,年均气温 11℃~12℃,年降水量约 585.5 mm,降水集中在 6-9 月.

试验材料为 15 年生的紫玉兰共 3 株,胸径在 7.6±0.3 cm,树高 3.6±0.3 m,冠层投影面积 2.6±0.2 m²,边材面积 34.56±3.09 cm²(表 1). 树冠的垂直投影面积采用测定东西和南北冠幅,结合椭圆计算公式确定. 为了避免伤害研究对象,选取样地中与研究对象大小最接近的紫玉兰,以生长锥取木芯,直尺测定边材厚度,所计算的边材面积作为测定样树的边材面积.

1.2 研究方法

1.2.1 树干液流密度的测定 采用热扩散式边材液流探针(Thermal Dissipation Probe, Dynamax, USA)测

表 1 紫玉兰样树特征

Table 1 Characteristics of the sampled *Magnolia liliiflora* trees

样树号 Tree No.	胸径 DBH (cm)	树高 Height (m)	冠层投影面积 Canopy projected area (m ²)	边材面积 Sapwood area (cm ²)
1	7.0	4.3	2.98	29.11
2	7.6	3.0	2.40	34.74
3	8.1	3.4	2.54	39.83

DBH: Diameter at the breast height.

定树干液流密度. 每一种树按照树木健康、生长环境一致、胸径差别较小、测定部位附近无损伤的试验要求选择一定规格的单株作为研究对象,2008 年 4-10 月对各样木的边材液流进行连续同步测定. 由于紫玉兰胸径小于 15 cm,长度为 30 mm 的探针统一安装在每株样木北向 1.3 m 处. 探针的工作原理、安装及液流密度计算方法参见文献^[25-26]. 树干液流密度的监测时间为 2008 年 4 月至今,数据存储的间隔期为 10 min.

1.2.2 环境因子的测定 教学植物园内设有自动气象站,用于实时监测空气温、湿度 [Campbell HMP45C, T_a (°C); RH (%)]、风速 [MetOne 034B 型, w (m·s⁻¹)]、总辐射 [CMP-11, Kipp and Zonen, Delft, Netherlands, R_s (W·m⁻²)]、10、30、50、80 cm 深度土壤温度 [Campbell 109, T_s (°C)] 和土壤含水量 [Sentek EasyAG, SWC (%)]、雨量 (Campbell TE525MM 翻斗式雨量桶, P (mm)) 等气象要素,所有传感器均与数据采集仪相连,测量频度与液流测定同步. 空气水汽压亏缺 (D , kPa) 由下式求出:

$$D = a \exp\left(\frac{bT_a}{T_a + c}\right) \times (1 - RH)$$

式中: RH 为空气湿度; T_a 为空气温度; 常数 a 、 b 和 c 分别为 0.611 kPa、17.502 和 240.97℃^[27].

1.3 树干液流模型的建立

参考 O'Brien 等^[23]方法建立树干液流预测模型: 1) 城市环境变量间的相关性. 采用主成分分析将 8 个实测城市环境变量转换为 3 个不相关的综合指标,以客观地反映城市环境特征; 2) 保存对城市环境变量主成分分析产生的因子得分,并与瞬时树干液流数据匹配; 3) 基于因子得分,采用四参数的 S 型方程预测树干液流.

1.4 数据处理

采用 SPSS 11.5 统计软件 (SPSS Inc., Chicago, USA) 中的主成分分析对城市环境因子降维并消除共线性. 采用 SigmaPlot 10.0 软件 (Systat Software

Inc., San Jose, California) 对紫玉兰树干液流与蒸发需求因子进行曲线拟合.

2 结果与分析

2.1 北京市环境因子分析

由表 2 可以看出, 几乎所有的环境因子都在一定程度上相关, 其中土壤温度与大气温度相关; 降水与其他因子相关不显著. 用主成分分析消除城市环境因子共线性并降低自变量的维数(表 3, 表 4). 每个原始变量是 8 个因子的线性组合, 提取的 3 个因子可以概括原始变量所包含信息的 76.6% (表 3). 主成分分析得到的因子载荷值反映了环境变量间的关系(表 4). 第 1 主因子可以解释城市环境 42% 的变化, 其与辐射、水汽压亏缺、大气温度和风速正相关, 与空气相对湿度负相关, 且在晴朗、干燥、温暖、

有风的天气下得分高, 具有高蒸发需求的条件, 因此将其归纳为蒸发需求因子. 第 2 主因子可以解释城市环境 21.9% 的变化, 主要与土壤相关, 称为土壤因子. 第 3 主因子为 12.6% 的解释量, 主要与降水相关, 称为降水因子. 这与湿润热带森林对环境因子综合响应的结果一致^[23].

2.2 紫玉兰树干液流与环境因子间的时滞

在小时尺度下, 紫玉兰树干液流对辐射的响应存在逆时针方向的时滞, 对水汽压亏缺和蒸发需求因子存在顺时针方向的时滞(图 1). 紫玉兰树干液流与总辐射间的时滞 < 20 min, 与水汽压亏缺间的时滞 在 90 ~ 140 min^[28], 而与蒸发需求因子之间的时滞明显减弱. 因此, 采用蒸发需求因子作为紫玉兰整树耗水的预测因子会提高预测效果.

为区分辐射和水汽压亏缺对紫玉兰树干液流的

表 2 研究期间小时尺度上环境因子间的相关系数

Table 2 Correlations coefficients among the 1-hour averages of environmental variables ($n=3670$)

因子 Variable	T_a	RH	w	R_s	D	SWC_{30}	P	T_{s10}
T_a	1	-0.248	0.236	0.443	0.688	-0.374	x	0.905
RH		1	-0.557	-0.540	-0.804	x	x	x
w			1	0.387	0.471	x	x	x
R_s				1	0.658	-0.020	x	x
D					1	x	x	0.447
SWC_{30}						1	x	-0.408
P							1	x
T_{s10}								1

x : $r < 0.2$; T_a : 大气温度 Air temperature; RH : 空气相对湿度 Air relative humidity; w : 风速 Wind speed; R_s : 总辐射 Total radiation; D : 水汽压亏缺 Vapor pressure deficit; SWC_{30} : 土壤湿度 Soil water content; P : 降水 Precipitation; T_{s10} : 土壤温度 Soil temperature. 下同 The same below.

表 3 基于 PCA 分析的环境数据特征值和解释量

Table 3 Eigenvalues and the variance explained by the first three axes of the PCA on the environment data

主成分 数量 Axis number	特征值 Eigenvalue	解释量 Total variance explained (%)	累积特征值 Cumulative eigenvalue	累积解释量 Cumulative variance Explained (%)
1	3.370	42.1	3.370	42.1
2	1.750	21.9	5.120	64.0
3	1.011	12.6	6.131	76.6

影响, 依据 Meinzer 等^[29]的研究, 把标准化的树干液流密度与水汽压亏缺/辐射做图, 以控制光对气孔行为的影响. 结果表明, 二者呈偏正态的单峰格局, 随水汽压亏缺增加, 树干液流先上升, 之后迅速下降(图 2).

2.3 紫玉兰树干液流模型

紫玉兰树干液流与蒸发需求因子之间的拟合结果表明, 4 参数的“S”型曲线拟合效果最好, 可以解

释紫玉兰树干液流变化的 60%. 检验残差分布时发现, 其与土壤因子正相关, 与降水因子不相关, 但将土壤因子引入模型不能显著增加模型的拟合效果(图 3). 由 S 型拟合曲线可以看出, 当紫玉兰树干液

表 4 前 3 个 PCA 轴上的环境变量

Table 4 Factor loadings of the environmental variables on the first three PCA axes

环境变量 Environmental variable	公因子 1 Factor 1	公因子 2 Factor 2	公因子 3 Factor 3
T_a	0.82	0.50	-0.04
RH	-0.70	0.58	-0.01
w	0.58	-0.40	0.31
R_s	0.71	-0.32	0.00
D	0.93	-0.16	-0.04
SWC_{30}	-0.33	-0.56	0.10
P	-0.07	0.22	0.95
T_{s10}	0.61	0.72	-0.02

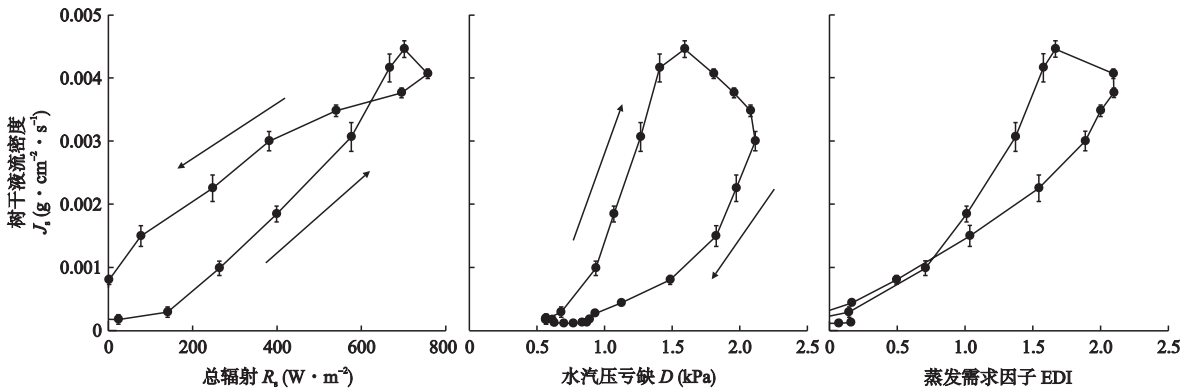


图1 紫玉兰平均树干液流密度(J_s)与总辐射、水汽压亏缺和蒸发需求因子的关系

Fig. 1 Relationships of 1-hour mean J_s against R_s , D and EDI in *Magnolia liliiflora* (mean \pm SE).

图中箭头指向下次连续观测的时刻 The arrows in the upper plots represented the direction where the next consecutive observation in time occurred.

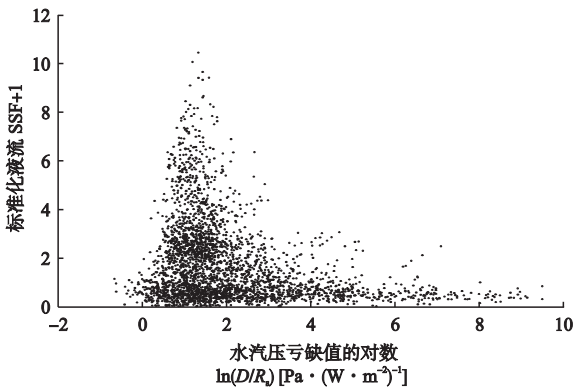


图2 研究期间标准化的树干液流密度与水汽压亏缺值对数

Fig. 2 Plots of standardized sap flux density (SSF+1) against the logarithm of the normalized D (D/R_s) values over the entire study period.

流达到下渐近线时,蒸发需求低,尤其在夜间或光线暗的时候,树干液流变化很小;当环境处于温暖、干燥、光线充足、多风时,树干液流对蒸发需求因子的响应近乎直线;树干液流达到上渐近线时,即使环境条件有利于蒸腾,树干液流也不增加。

3 讨论

蒸发需求因子是影响城市绿化树种紫玉兰耗水的主要因素,这与湿润热带森林对环境因子综合响应的结果一致^[23]. 阶段性发生的降水代表了输入水分的季节分配,对紫玉兰耗水几乎没有影响. 而且研究期间水分供给充足,土壤湿度在 20% 以上,故土壤湿度不是紫玉兰耗水的限制因子。

基于综合环境变量的耗水模型不但能从机理上反映树木耗水对环境的响应规律,而且便于进行种间比较. 城市环境特征可能会改变树木耗水对综合环境变量的响应形式:一方面,城市扩张和灌溉会影

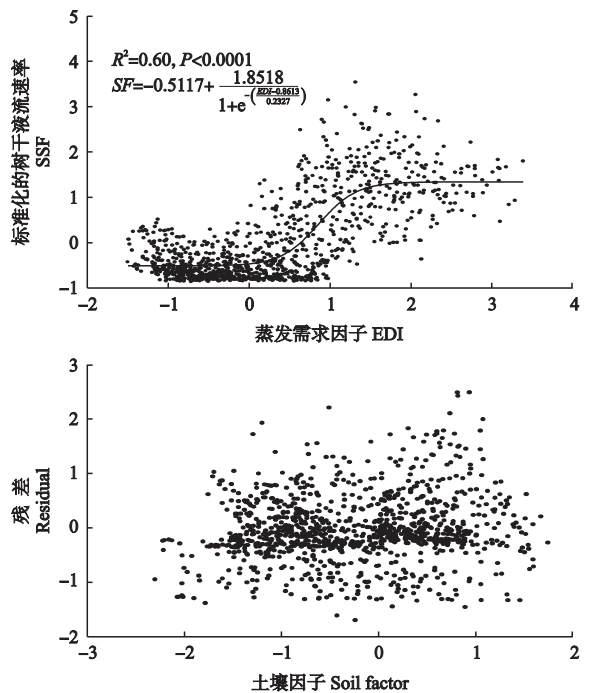


图3 紫玉兰树干液流密度与蒸发需求因子及树干液流实测值与预测值的残差与土壤因子的关系

Fig. 3 Relationships of sap flux density against EDI and residual of actual and predicted sap flux density of *Magnolia liliiflora* against soil factor.

响土壤湿度^[30]. 当土壤湿度下降到一定程度,成为树木耗水的限制因子,此模型的上渐进线消失^[23];另一方面,植物在夜间具有蒸腾功能^[31],城市夜间较高的温湿度和照明^[32]可能成为城市树木夜间蒸腾的环境驱动力,意味着下渐进线变短甚至消失. 城市树木耗水模型还可考虑空气污染物和土壤湿度异质性. 空气污染物通过改变植物表皮^[33]、气孔特征^[34]以及升温对森林水文的负作用^[22]来增加树木耗水,所以增加空气污染因子(CO_2 、臭氧等)可能会

提高模型的预测能力. 城市草坪上的树木由于灌溉充分,较少受到水分胁迫,而行道树则受到水分胁迫较大,因此,预测同一种城市树木耗水应充分考虑到土壤水分状态的差异.

致谢 野外试验得到北京城市生态系统研究站和北京市教学植物园的支持,表示感谢.

参考文献

- [1] Wu JG. Making the case for landscape ecology: An effective approach to urban sustainability. *Landscape Journal*, 2008, **27**: 41–50
- [2] Landsberg HE. *The Urban Climate*. New York: Academic Press, 1981
- [3] Rajput M, Agrawal M. Biomonitoring of air pollution in a seasonally dry tropical suburban area using wheat transplants. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2005, **101**: 39–53
- [4] Gregg JW, Jones CG, Dawson TE. Urbanization effects on tree growth in the vicinity of New York City. *Nature*, 2003, **424**: 183–187
- [5] Jim CY. Physical and chemical properties of a Hong Kong roadside soil in relation to urban tree growth. *Urban Ecosystems*, 1998, **2**: 171–181
- [6] Kjelgren RK, Clark JR. Growth and water relations of *Liquidambar styraciflua* L. in an urban park and plaza. *Trees-Structure and Function*, 1993, **7**: 195–201
- [7] Nowak DJ, Dwyer JF. Understanding the benefits and costs of urban forest ecosystems// Kuser JE, ed. *Urban and Community Forestry in the Northeast*. New York: Springer, 2007: 25–46
- [8] Beijing Statistical Bureau (北京市统计局). *Beijing Statistics Yearbook*. Beijing: China Statistics Press, 2008 (in Chinese)
- [9] Wei Y-C (魏彦昌), Miao H (苗 鸿), Ouyang Z-Y (欧阳志云), et al. Assessment method of ecological water demand in urban and its application. *Urban Environment & Urban Ecology (城市环境与城市生态)*, 2003, **16** (suppl.): 18–20 (in Chinese)
- [10] van Bavel CHM, Fritschen LJ, Reeves WE. Transpiration by Sudangrass as an externally controlled process. *Science*, 1962, **141**: 269–270
- [11] Granier A, Huc R, Barigah ST. Transpiration of natural rain forest and its dependence on climatic factors. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1996, **78**: 16–29
- [12] Burgess SSO. Measuring transpiration responses to summer precipitation in a Mediterranean climate: A simple screening tool for identifying plant water-use strategies. *Physiologia Plantarum*, 2006, **127**: 404–412
- [13] Mellander PE, Bishop K, Lundmark T. The influence of soil temperature on transpiration: A plot scale manipulation in a young Scots pine stand. *Forest Ecology and Management*, 2004, **195**: 15–28
- [14] Huang YQ, Zhao P, Zhang ZF, et al. Transpiration of *Cyclobalanopsis glauca* (syn. *Quercus glauca*) stand measured by sap-flow method in a karst rocky terrain during dry season. *Ecological Research*, 2009, **24**: 791–801
- [15] Oguntunde PG. Whole-plant water use and canopy conductance of cassava under limited available soil water and varying evaporative demand. *Plant and Soil*, 2005, **278**: 371–383
- [16] Kjelgren R, Montague T. Urban tree transpiration over turf and asphalt surfaces. *Atmospheric Environment*, 1998, **32**: 35–41
- [17] Montague T, Kjelgren R. Energy balance of six common landscape surfaces and the influence of surface properties on gas exchange of four containerized tree species. *Scientia Horticulturae*, 2004, **100**: 229–249
- [18] Heilman JL, Brittin CL, Zajicek JM. Water use by shrubs as affected by energy exchange with building walls. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1989, **48**: 345–357
- [19] Neighbour EA, Cottam DA, Mansfield TA. Effects of sulphur dioxide and nitrogen dioxide on the control of water loss by birch (*Betula* spp.). *New Phytologist*, 1988, **108**: 149–157
- [20] McLaughlin SB, Wullschlegel SD, Sun G, et al. Interactive effects of ozone and climate on water use, soil moisture content and streamflow in a southern Appalachian forest in the USA. *New Phytologist*, 2007, **174**: 125–136
- [21] Hagishima A, Narita K, Tanimoto J. Field experiment on transpiration from isolated urban plants. *Hydrological Processes*, 2007, **21**: 1217–1222
- [22] Martin CA, Stabler LB. Plant gas exchange and water status in urban desert landscapes. *Journal of Arid Environments*, 2002, **51**: 235–254
- [23] O'Brien JJ, Oberbauer SF, Clark DB. Whole tree xylem sap flow responses to multiple environmental variables in a wet tropical forest. *Plant, Cell & Environment*, 2004, **27**: 551–567
- [24] Lu P, Urban L, Zhao P. Granier's thermal dissipation probe (TDP) method for measuring sap flow in trees: Theory and practice. *Acta Botanica Sinica*, 2004, **46**: 631–646
- [25] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. *Tree Physiology*, 1987, **3**: 309–320

- [26] Zhao P (赵平), Rao X-Q (饶兴权), Ma L (马玲), *et al.* Application of Granier's sap flow system in water use of *Acacia mangium* forest. *Journal of Tropical and Subtropical Botany* (热带亚热带植物学报), 2005, **13**(6): 457-468 (in Chinese)
- [27] Campbell GS, Norman JM. An Introduction to Environmental Biophysics. New York: Springer-Verlag, 1998
- [28] Wang H (王华), Ouyang Z-Y (欧阳志云), Zheng H (郑华), *et al.* Time lag characteristics of stem sap flow of common tree species during the growth season in Beijing Downtown. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2009, **20**(9): 2111-2117 (in Chinese)
- [29] Meinzer FC, Goldstein G, Jackson P, *et al.* Environmental and physiological regulation of transpiration in tropical forest gap species: The influence of boundary layer and hydraulic properties. *Oecologia*, 1995, **101**: 514-522
- [30] Opijah F, Mukabana J. On the influence of urbanization on the water budget in Nairobi city: A numerical study. *GeoJournal*, 2004, **61**: 121-129
- [31] Daley M, Phillips N. Interspecific variation in nighttime transpiration and stomatal conductance in a mixed New England deciduous forest. *Tree Physiology*, 2006, **26**: 411-419
- [32] Song Y-C (宋永昌), You W-H (由文辉), Wang X-R (王祥荣). Urban Ecology. Shanghai: East China Normal University Press, 2000 (in Chinese)
- [33] Turunen M, Huttunen S. A review of the response of epicuticular wax of conifer needles to air pollution. *Journal Environment Quality*, 1990, **19**: 35-45
- [34] Temple PJ. Stomatal conductance and transpirational responses of field-grown cotton to ozone. *Plant, Cell & Environment*, 1986, **9**: 315-321

作者简介 王华,女,1983年生,博士研究生.主要从事城市生态学和树木生理学研究. E-mail: huawang_st@rcees.ac.cn

责任编辑 李凤琴
