

雷州半岛尾叶桉人工林耗水量研究^{*}

张宁南¹, 徐大平¹, Jim Morris², 周光益¹, 白嘉雨¹, 周涛¹

(1 中国林业科学研究院热带林业研究所, 广东 广州 510520 2 Forest Science Centre, Heidelberg Victoria Australia 3084)

摘要: 利用热脉冲技术对雷州半岛 2 种主要土壤类型下的 4 年生尾叶桉人工林林分耗水量进行了为期 1 a 的观测, 并对林分耗水与林分生长特性、气象因子及 4 m 深土壤有效水关系进行研究。研究结果表明: 尾叶桉人工林边材面积与胸径具有显著的相关性, 利用边材面积进行单株向林分尺度耗水的转换可行; 河头、纪家尾叶桉人工林日平均茎流密度分别为 $2\ 772\ 1\ 839\ \text{L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; 日平均耗水量分别为 $1.49\ 1.53\ \text{mm}$; 河头与纪家尾叶桉人工林林分的年耗水量分别为 $542\ 559\ \text{mm}$, 分别占年降水量的 35%、36%; 开阔的林冠及较小的叶面积指数、旱季时土壤有效水的减少及较低的饱和蒸汽压差等在不同程度上都限制了桉树的耗水量。

关键词: 尾叶桉; 蒸腾作用; 茎流密度; 边材; 热脉冲技术

中图分类号: S715.4 文献标识码: A

Water Consumption of *Eucalyptus urophylla* Plantations on the Leizhou Peninsula

ZHANG Ning-nan¹, XU Daping¹, JIM Morris², ZHOU Guang-yi¹, BAI Jia-yu¹, ZHOU Tao¹

(1 Research Institute of Tropical Forestry CAF, Guangzhou 510520 Guangdong China

2 Forest Science Centre, Heidelberg Victoria Australia 3084)

Abstract Tree growth, water consumption, climate factors, available water in soil profile as deep as 4 meters were monitored for 1 year in 4-year-old *Eucalyptus urophylla* trees grown in contrasting soil types at the Leizhou peninsula, southeastern China. The present experimental results indicated that the sapwood area in *Eucalyptus urophylla* trees was closely related to diameter at breast height (DBH) and it was possible to use the sapwood area in scaling up estimation of water consumption from an individual tree to stand level. The mean daily sap flow density (SFD) in Hetou and Jijia, the study sites, were respectively $2\ 772\ 1\ 839\ \text{L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; mean daily water use were $1.49\ 1.53\ \text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$. Annual water use of Hetou and Jijia plantations were $542\ 559\ \text{mm}$, respectively, which were equivalent to 35% and 36% of annual rainfall. Low water use may have resulted from combined effects of several factors, including open canopy and low leaf area index, soil water decline in the dry season, and low vapor pressure deficit, which limited water consumption of the trees.

Key words *Eucalyptus urophylla*; transpiration; sap flow density; sapwood; heat pulse method

桉树 (*Eucalyptus* L'Hérit.) 现已成为华南地区重要的速生用材树种之一, 大面积造林是 20 世纪 80 年代后期和 90 年代初期开始的, 目前种植面积已超过

100 万 hm^2 以上, 仅次于巴西和印度, 居世界第 3 位^[1]。然而, 桉树人工林生态环境问题一直受到人们普遍关注, 尤其桉树人工林水分问题是人们争论和关

收稿日期: 2006-04-25

基金项目: 中澳合作项目“桉树与水”ACIAR FST(1997/77)、国家科技部专项“热带林对水资源供需调节的监测研究”(191)、广东省自然科学基金“广东主要树种人工林水分利用的比较研究”(0113931)的部分研究内容

作者简介: 张宁南(1974—), 湖南会同人, 助理研究员, 在职博士生。

* John Collopy, 杨曾奖、杨国清、申卫军、余勇、陈明远参加了试验设备安装或部分实验数据收集, 在此一并表示衷心感谢!

注的焦点^[2,3]。过去在国外,桉树人工林经常被指责大量耗水及破坏当地生态环境,我国也有一些学者担心大面积种植桉树会对环境造成负面影响。桉树及其它一些外来树种大面积种植后的耗水情况及对当地水文学过程的影响已成为人们关注的焦点之一,研究结果表明:科学的经营管理方法能减少人工林对环境的负面影响^[4]。热脉冲法是基本不破坏树木在自然生长环境条件下的正常生长状态,可以长期自动监测树干茎流的动态变化;Huber(1932)首次将热作为示踪器测量树干茎流,Edwards等^[5]总结成系统的理论技术,后经Olbrich^[6]进一步完善。刘奉觉^[7]在我国最早使用热脉冲技术对杨树树干液流的时空动态进行了研究。

雷州半岛地势平坦,土层深厚,目前已种植桉树人工林 20 万 hm^2 ,是我国重要纸浆材生产基地。尽管地处热带,降水丰富,但降水主要集中在雨季(5—9月),且主要以大、暴雨出现并以径流形式流失,工农业生产及生活用水主要来源于雨季降水对地表、地下水的补充,因此,人们普遍关心雷州半岛大面积种植桉树人工林是否会过多消耗水分而导致地下水水位下降。本文利用热脉冲技术对尾叶桉(*Eucalyptus urophylla* S. T. Blake)树木茎流密度进行测定,以边材面积为耦合因子经尺度转换推算出林分水平耗水量;着重分析了林分耗水与林木生长特性、气象因子及土壤水分特性的关系,为今后桉树人工林在生产和生态效应的研究上提供科学依据。

1 试验地概况

试验地概况详见参考文献[8]。

2 研究方法

2.1 气象因子测定

详见参考文献[8]。

2.2 土壤水分特性测定

对河头与纪家不同深度土层(50、150、250、350 cm)土壤含水量自动监测详见参考文献[8]。1999年9月(雨季结束后)及2000年4月(旱季开始前),用土钻在两样地内对土深390 cm的土壤进行分层(每层30 cm)取样,对土壤机械组成及土壤含水量进行分析测定,通过滤纸法测定样品的水势^[9]。土壤有效水是指土壤保持介于饱和含水量与萎蔫含水量之间的水量。根据所测定土壤样品含水量与水

势的关系建立土壤水分特征曲线,并确定土壤萎蔫含水量(基质势为 $-1\ 500\ \text{kPa}$)^[10]。

2.3 林木生长特性测定

每半年对河头、纪家点的固定样地进行每木检尺,利用Vertex测高仪(Forestor Instrument 瑞士)对选取的一定数量样木(每个点34株)树高进行测定,利用树高(H)与胸径(DBH)的回归方程($H = 1.5584DBH - 0.0257DBH^2, R^2 = 0.88$)测算出整个林分树高、优势木高(即每公顷最大200株树的平均高)、蓄积量($V = DBH^2 \times H / 30\ 000\ \text{m}^3$)及年平均生长量(MAI)。利用生长锥在两样地中钻取38株树,每株树2~3个树芯,测定出边材长度。使用Accupar ceptometer叶面积测定仪(Decagon Devices, Pullman 美国)对样地的叶面积指数进行测定。

2.4 林分耗水量测定

热脉冲技术具体的测定及计算方法详见参考文献[8]。根据1999年9月河头、纪家点样地调查结果,按各径阶实际分布状况按比例从中随机选出18株样木,每次对2株样木树干茎流密度进行测定。日茎流密度($L \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)为一天内每30 min平均茎流密度的累加值^[8]。以边材面积为耦合基础进行单木耗水向林分耗水尺度的转换^[11],即林分日茎流密度为被测样木日茎流密度的平均值。胸径与边材面积显著相关,可通过胸径推算边材面积,林分边材总面积则为各单木边材面积的总和。林分日耗水量为林分日茎流密度乘以边材总面积,而林分年耗水量则为观测期间(1999年9月15日至2000年9月23日)林分所有日耗水量的平均值乘以365。

3 结果与分析

3.1 气象因子变化特征

雷州半岛地处我国东南沿海,受季风环流影响,降水量比较丰富,但季节分配不均。1999年9月至2000年9月,河头、纪家的降水量分别为1531、1539 mm,相差不大,但月降水量存在差异;雨季(5—9月)降水量分别为1289、1217 mm,占年降水量的84%、79%(图1a);最大日降水量河头出现在2000年6月26日,为162.6 mm,纪家出现在2000年6月27日为125.8 mm。两地相距较近,太阳辐射变化相似,全年总太阳辐射量为3962.9 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$;由于地处热带北缘北回归线,受太阳高度角随季节变化的影响较小;受云量变化的影响,日太阳辐射量波动较大(图1b)。河头、纪家空气较潮湿,全年饱和蒸汽压差(VPD)较低,很少超过2.5 kPa(图

1c), 旱季(10月至翌年4月)气温较低, VPD 基本在 1.5 kPa 以下; 在雨季时气温较高, VPD 并不高。两地全年气候温暖, 月最高气温河头在 8 月 (36.9 °C), 纪家在 6 月 (34.6 °C), 月最低气温河头、纪家均在 12 月, 分别为 8.7 10.0 °C, 1999 年 12 月 22 日受寒潮影响河头与纪家出现 -2.1 0 °C 的年最低气温。根据两地气象观测结果显示, 河头气温普遍较纪家高 2~3 °C, VPD 也较高。

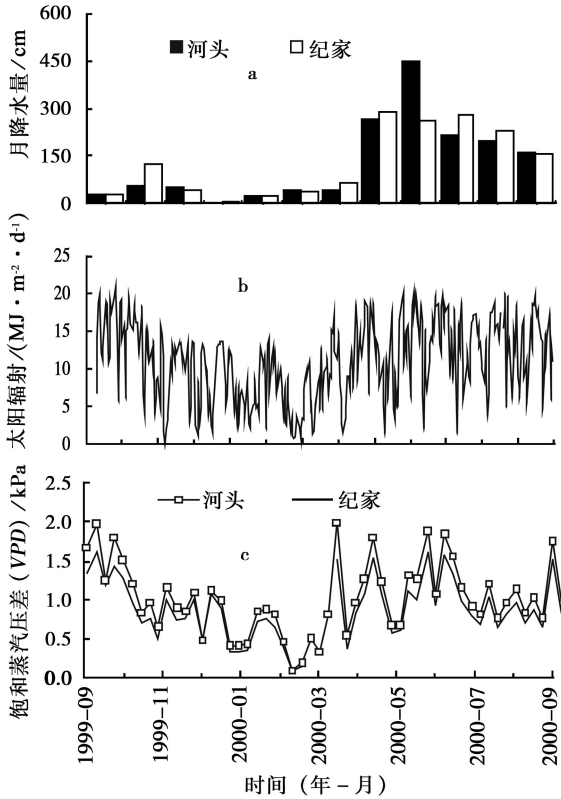
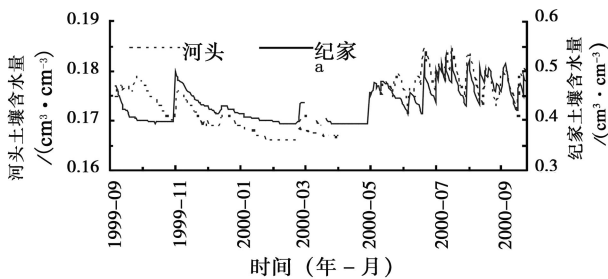


图 1 河头与纪家月降水量、日太阳辐射、周平均 VPD 变化过程

3.2 土壤水分特性及土壤有效水

河头、纪家均是遭受严重侵蚀的红壤, 由于发育的母岩不同 (河头属浅海沉积物, 纪家属玄武岩), 导致其土壤质地结构及持水特性有很大差别 (图 2 3)。土壤



水分特征曲线受土壤质地影响明显, 以砂粒为主的河头砖红壤较黏粒含量高的纪家持水能力差, 河头、纪家土壤萎蔫含水量分别为 0.16 0.38 cm³·cm⁻³。

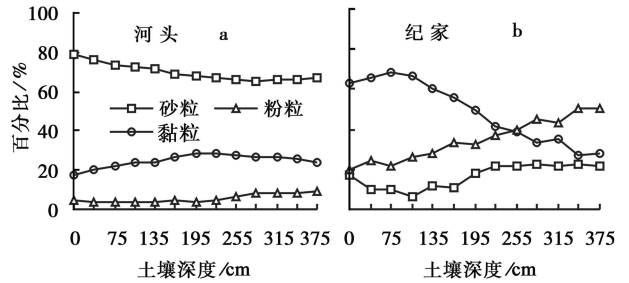


图 2 河头与纪家土壤机械组成随深度的变化

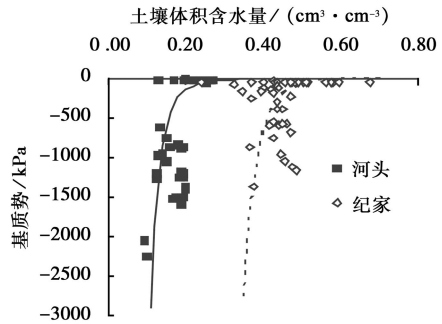


图 3 河头与纪家土壤水分特征曲线

河头、纪家 50 cm 深土壤含水量日变幅分别为 0.166~0.185 0.395~0.532 cm³·cm⁻³; 0~4 m 土壤有效水变幅分别为 133~220 156~478 mm (图 4a b)。河头为砂质壤土, 结构疏松, 水力传导度高, 降水后水分快速下渗至土壤深层, 土壤持水性差; 纪家黏粒含量高, 持水性强, 但透水性差。两地属热带北缘海洋性气候, 旱季降水少, 土壤水分补充少, 因此各层土壤含水量均呈下降的趋势, 其中以近地表层 (50 cm 深) 土壤含水量下降最快, 最低值接近萎蔫含水量, 这与雷州半岛砖红壤有机质含量低、持水性差有关 [12]。

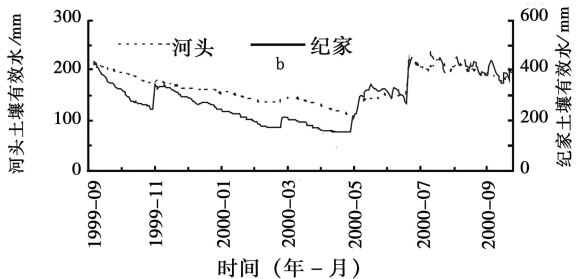


图 4 河头与纪家 50 cm 深土壤含水量及 0~400 cm 深土壤有效水动态变化

3.3 林木生长特征

玄武岩发育的砖红壤较浅海沉积物保水保肥能力

强, 因而, 纪家林分生长较河头好。从表 1 看出, 纪家点因种植密度大, 林木平均胸径较河头小, 但 MAI 边材面

积及叶面积指数均较河头大; 4 年生尾叶桉林由于对光、养分的竞争加剧, 受压木自然淘汰率高, *MAI* 增长放缓, 林分高速增长缓慢。1999 年 9 月至 2000 年 8 月期间, 河头与纪家尾叶桉胸径分别增加了 16% 和 12%, 边材面积分别增加了 33% 和 15%。2 个样地林分的叶面积指数均较低, 且较为空旷, 雨季后均有所增加。

表 1 1999—2000 年河头与纪家 4 年生尾叶桉人工林生长特征

项目	河头 (年-月)			纪家 (年-月)		
	1999-09	2000-03	2000-08	1999-09	2000-05	2000-08
立木度 / (株 · hm ⁻²)	1 356	1 331	1 330	1 994	1 974	1 894
平均胸径 / cm	8.5	9.5	9.9	8.5	9.3	9.5
平均树高 / m	11.1	11.5	11.4	11.1	11.9	11.9
优势树高 / m	16.7	18.0	18.5	16.3	17.5	17.9
<i>MAI</i> / (m ³ · hm ⁻² · a ⁻¹)	16.3	17.9	19.7	22.6	24.7	22.8
边材面积 / (m ² · hm ⁻²)	4.55	5.38	6.03	7.65	8.71	8.77
叶面积指数		1.14	1.53		1.89	2.98

河头、纪家 38 株树 (胸径测定范围为 4 ~ 16 cm) 胸径 (*DBH*, cm) 与边材面积 (*SA*, cm²) 的回归方程如下:

$$\text{河头: } SA = 0.359DBH^2 + 0.537DBH \\ R^2 = 0.96, n = 20, F = 219.85$$

$$\text{纪家: } SA = 0.331DBH^2 + 1.298DBH \\ R^2 = 0.92, n = 18, F = 188.39$$

两点胸径与边材面积相关性显著 ($P < 0.05$), 纪家林分总边材面积大于河头, 这与其种植密度大、立地条件好有关。

3.4 林分茎流密度与耗水量

1999 年 9 月至 2000 年 9 月期间, 采用热脉冲技

术分别对河头 (观测 291 d) 和纪家 (266 d) 4 年生尾叶桉林茎流密度进行测定, 河头桉树单株平均耗水量为 $13.9 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1}$, 日最大耗水量为 $49 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1}$, 纪家则分别为 $8.627 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1}$; 林分水平河头与纪家日茎流密度变幅分别为 $439 \sim 4900$, $362 \sim 3789 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 日耗水量变幅分别为 $0.22 \sim 2.79$, $0.32 \sim 2.92 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。河头、纪家尾叶桉人工林日平均茎流密度分别为 2.772 , $1.839 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 日平均耗水量分别为 1.49 , 1.53 mm , 年耗水量分别为 542 , 559 mm , 分别占同期年降水量的 35%、36% (图 5a b)。河头林内气温及 *VPD* 较纪家点高, 同时, 河头土壤透水性好, 但土壤持水性要比纪家差, 河头土壤水分从土壤渗入到根系和水分由根系进入到导管的阻力可能要小于纪家; 而河头桉树林的水分输导面积 (边材面积) 要小于纪家, 这都可导致河头茎流密度较纪家高, 但纪家种植密度大导致林分边材总面积大, 林分耗水量反而高。旱季随着气温的降低、土壤有效水的减少, 林分茎流密度呈逐渐下降趋势; 11 月期间纪家点因降雨土壤水分得到补充后茎流密度有所回升; 1—3 月土壤有效水、气温及 *VPD* 均降到最低值, 茎流流速缓慢; 雨季时虽然土壤水分供应充足, 但受林木自身的调节作用 (如午间气温较高时导致气孔关闭, 树干茎流密度会明显减缓) 及近海空气潮湿、*VPD* 不高都影响树木耗水。

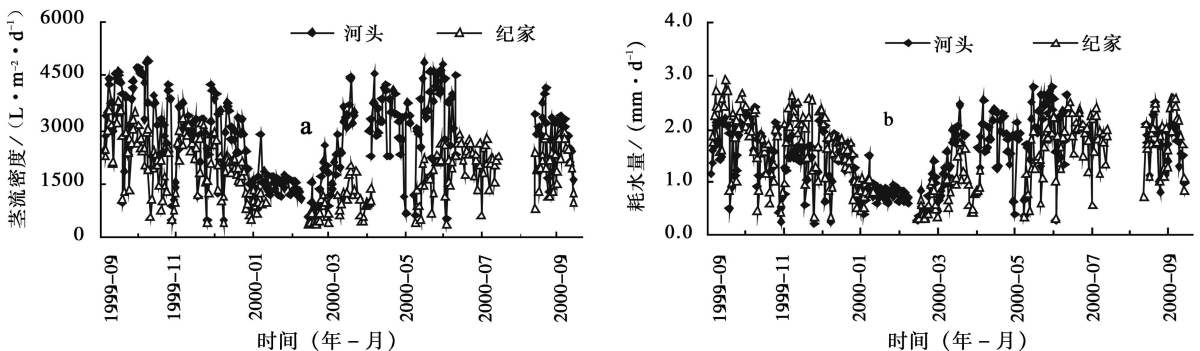


图 5 1999 年 9 月至 2000 年 9 月河头与纪家尾叶桉人工林日茎流密度与耗水量

4 结论与讨论

(1) 对纯人工林, 通过不同径阶样株耗水转换到样地耗水, 再转换为林分耗水, 结合时间尺度获得全年蒸腾耗水是科学合理的。在单株、样地到林分

耗水的尺度转换中, 可借助于叶面积、边材面积、林冠投影面积、胸径等^[13, 14]。热脉冲技术是通过测定树干茎流密度并乘以输导面积 (边材面积) 来推算蒸腾耗水量。因此, 通过不同径阶多样组长期测定, 尺度转化为样地蒸腾比较准确。在林木分布均匀、

生长环境相似的人工林中, 可按照每木占地面积来分配耗水份额, 而在同一时刻, 气象因子、土壤水分对于林分内的每一棵树都是同质的, 且同一径阶树木之间相同高度断面的输水能力是相同的^[15]。基于边材面积进行单株到林分耗水尺度转换过程中, 可将每个茎流密度的观测值看成整个林分平均茎流密度的一个瞬间估测值, 因此只需保证有足够的林分边材的测定样本数和无偏差抽样, 就能得到有效的平均数测定值^[16], 也就是说测定的样本数越大, 林分平均茎流密度值与林分耗水量估计就越精确。当然在测定期间, 应尽量减少因仪器故障(如热敏探针、热源针损坏及电池电压不足等因素)造成数据上的断点。

(2) 雷州半岛河头、纪家 4 年生尾叶桉人工林年耗水量为 542~559 mm, 分别占同期全年降水量的 35%、36%, 与国外桉树人工林耗水研究结果相比较。国外的研究人员对桉树林蒸腾耗水也进行了广泛的研究: 在澳大利亚 Victoria 州北部, 对非灌溉区 5~8 年生 *E. camaldulensis* Dehnh 人工林连续 2 年的年耗水量测定结果分别为 320~358 mm, 而同期降雨量为 368~338 mm, 这主要与其地下水位较浅有关^[16]; 在印度热带 Karnataka 地区, 桉树林的耗水量为 3~8 mm·d⁻¹, 在季风雨后耗水量为 6 mm·d⁻¹, 而季风雨前干旱时小于 1 mm·d⁻¹, 导致旱季蒸腾耗水少, 这与土壤有效水分供应量少有关^[17]; 在巴基斯坦 Indus 平原灌溉区种植的 *E. camaldulensis* Dehnh. 最大日茎流密度达到 12 000 L·m⁻²·d⁻¹, 而其最大日 VPD 超过 5.0^[18]; 在巴西如果不受水分限制时桉树耗水量达到 8 mm·d⁻¹^[19]。在我国华南地区受土壤水分、肥力及光等环境因素限制, 桉树人工林种植 3~4 年后生长速度减慢, 叶面积迅速下降, 林冠比较开阔。雷州半岛农作物一般种植于缓坡或洼地, 桉树人工林则多种植在地势较高的台地, 这影响桉树根系直接吸收浅层地下水; 同时由于近海空气比较潮湿, 全年 VPD 较低, 很少超过 2.5 kPa 这些因素都导致了桉树林分较低的耗水量。

参考文献:

[1] 祁述雄. 中国桉树(第二版)[M]. 北京: 中国林业出版社, 2002: 22
 [2] 白嘉雨, 甘四明. 桉树人工林的社会、经济和生态问题[J]. 世界林业研究, 1996, 9(2): 63~68

[3] White K, Ball J, Kashi M. Proceedings of the regional expert consultation on Eucalyptus October 1993 [C]. FAO Regional Office for Asia and the Pacific, Bangkok RAPA Publication 1996: 196
 [4] Cakler I. Water use of Eucalyptus—a review [A]. Growth and water use of forest plantation [C]. England: Chichester: John Wiley and Sons, 1992: 167~179
 [5] Edwards W R N, Wawick N W M. Transpiration from a kiwifruit vine as estimated by the heat pulse technique and the Penman-Monteith equation [J]. New Zealand Journal of Agriculture, 1984, 27: 537~543
 [6] Olbrich B W. The verification of the heat pulse velocity technique for estimating sap flow in *Eucalyptus grandis* [J]. Canadian Journal of Forest Research, 1991, 21: 836~841
 [7] 刘奉觉, Edwards W R N. 杨树树干液流动态研究 [J]. 林业科学研究, 1993, 6(4): 368~372
 [8] 张宁南, 徐大平, Jim Morris 等. 雷州半岛尾叶桉人工林树液茎流特征的研究 [J]. 林业科学研究, 2003, 16(6): 661~667
 [9] Greacen E L, Walker G R, Cook P G. Procedure for the filter paper method of measuring soil water suction [C]. CSIRO Division of Soils Divisional Report No. 108 CSIRO Australia, 1989: 7
 [10] Kramer P J. Water relations of plants [M]. San Diego: Academic Press, 1983
 [11] Khanzad A N, Morris J D, Ansari R, et al. Groundwater uptake and sustainability of *Acacia* and *Prosopis* plantations in Southern Pakistan [J]. Agricultural Water Management, 1998, 36: 121~139
 [12] 钟继洪, 郭庆荣, 谭军. 桉林砖红壤水分性能特征研究 [J]. 土壤与环境, 2002, 11(2): 136~139
 [13] Demeade O T. Plant physiological methods for studying evapotranspiration: problems of telling the forest from the trees [J]. Agricultural Water Management, 1984, 8: 167~189
 [14] Hatton T J, Wu H. Scaling theory to extrapolate individual tree water use to stand water use [J]. Hydrology Processes, 1995, 9: 527~540
 [15] 孙鹏森. 京北水源保护林格局及不同尺度树种耗水特性研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2002
 [16] Morris J D, Colby J J. Water use and salt accumulation by *Eucalyptus camaldulensis* and *Casuarina cunninghamiana* on a site with shallow saline groundwater [J]. Agricultural Water Management, 1999, 39: 205~227
 [17] Kallarackal J, Somen C K. Water use by *Eucalyptus tereticomis* stands of differing density in Southern India [J]. Tree Physiology, 1997, 17: 195~203
 [18] Mahmood K, Morris J D, Colby J J, et al. Groundwater uptake and sustainability of farm plantation on saline sites in Punjab province, Pakistan [J]. Agricultural Water Management, 2001, 48: 1~20
 [19] Soares J V, Almeida A C. Modeling the water balance and soil water fluxes in a fast growing *Eucalyptus* plantation in Brazil [J]. Journal of Hydrology, 2001, 253: 130~147