

## 合肥市 5 种主要绿化树种的蒸腾速率及吸热散水效应

高 健<sup>1</sup>, 彭镇华<sup>1,2\*</sup>, 于一苏<sup>3</sup>

(1. 国际竹藤网络中心, 北京 100102; 2. 中国林业科学研究院林业研究所, 北京 100091;

3. 安徽省林业科学研究院, 合肥 230031)

**摘 要:** 选择合肥市 5 种主要绿化树种 三角枫 (*Acer buergerianum*)、悬铃木 (*Platanus acerifolia*)、女贞 (*Ligustrum lucidum*)、香樟 (*Cinnamomum camphora*)、广玉兰 (*Magnolia grandiflora*), 测定蒸腾速率、气孔导度等生理生态因子, 计算吸热散水效应。结果表明, 5 树种蒸腾速率日变化呈双峰曲线, 峰值分别出现在 12:00-13:00 和 15:00-16:00, 5 树种间日均蒸腾速率大小存在明显差异, 依次为广玉兰、女贞、香樟、悬铃木和三角枫, 具体量值分别为 2.342、1.838、1.420、1.334 和 1.034  $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。经一元和多元回归分析, 蒸腾速率 ( $Tr$ ) 与气孔导度 ( $G_s$ ) 变化趋势一致, 且对 4 种主要生态因子—气温 ( $T_c$ )、叶温 ( $T_l$ )、光量子通量密度 ( $PAR$ )、相对湿度 ( $RH$ ) 响应明显。进一步计算各树种单株蒸腾吸热能值及散水量大小, 依次为广玉兰、女贞、悬铃木、香樟和三角枫, 蒸腾吸热能值分别为 37.0、29.2、22.5、21.1 和 15.3 kJ, 蒸腾散水量值分别为 15.1、11.9、9.2、8.6 和 6.2 kg。而从合肥市的树木株数总量上看, 则蒸腾吸热能值和散水量值总量大小依次为女贞、广玉兰、悬铃木、香樟和三角枫。

**关键词:** 蒸腾速率; 蒸腾吸热; 蒸腾散水; 树种; 小气候效应

中图分类号: S718.43; Q945.172 文献标识码: A 文章编号: 1672-352X(2006)04-0445-05

### Transpiration rates and effects for energy absorbed and water given off through transpiration of main afforestation tree species in Hefei city

GAO Jian<sup>1</sup>, PENG Zhen-hua<sup>2</sup>, YU Yi-shu<sup>3</sup>

(1. International Centre for Bamboo and Rattan, Beijing 100102;

2. Institute of Forestry Research, China Academy of Forestry, Beijing 100091;

3. Anhui Academy of Forestry, Hefei 230031)

**Abstract:** The transpiration rates ( $Tr$ ) and stomatal conductance ( $G_s$ ) of five tree species which were selected in advance were measured in Hefei city constantly for two days in the shine day in spring and in summer. The results showed that the  $Tr$  appeared double peaks diurnal pattern, with the peaks presented during 12:00-13:00 and 15:00-16:00. The  $Tr$  rates were different among different species of the tested trees, which showed that *Magnolia grandiflora* > *Ligustrum lucidum* > *Platanus acerifolia* > *Cinnamomum camphora* > *Acer buergerianum*, and the transpiration rates were 2.342, 1.838, 1.420, 1.334 and 1.034  $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , respectively. The tendency of the change of the  $Tr$  and the  $G_s$  is the same, and the  $Tr$  and the  $G_s$  were affected obviously by four main ecological factors that were atmosphere temperature ( $T_c$ ), leaf temperature ( $T_l$ ),  $PAR$  and relative humidity ( $RH$ ) by analyses of linear regression and multiple regression. According to the  $Tr$ , the index of leaf area of the tested trees, the effect for energy absorbed and the effect for water given off through transpiration of the tested trees were evaluated, respectively. For single plant, effect for energy absorbed and effect for water given off through transpiration were *Magnolia grandiflora* > *Ligustrum lucidum* > *Platanus acerifolia* > *Cinnamomum camphora* > *Acer buergerianum*. The a-

收稿日期: 2006-05-22

基金项目: 科技部资助项目(98-11-10-13)。

作者简介: 高健(1966-), 女, 博士。E-mail: jiangaocn@yahoo.com.cn \* 通讯作者(Corresponding author)

mounts of energy absorbed by transpiration per single plant of the tested trees were 37.0, 29.2, 22.5, 21.1 and 15.3 kJ, respectively. The amounts of water given off through transpiration per single plant of the tested trees were 15.1, 11.9, 9.2, 8.6 and 6.2 kg, respectively. But for the total amount in Hefei city, the effect for energy absorbed and effect for water given off through transpiration were *Ligustrum lucidum* > *Magnolia grandiflora* > *Platanus acerifolia* > *Cinnamomum camphora* > *Acer buergerianum*.

**Key words:** transpiration rate; energy absorbed by transpiration; water given off through transpiration; tree species; microclimate effect

城市化是人类社会发展的必然趋势。城市化发展给社会带来了长足进步,同时也带来了一系列的城市问题,如城市热岛效应、有害气体、噪声等,严重损害了人类的健康<sup>[1,2]</sup>。城市森林可有效改善城市生态环境,城市森林通过改善城市空气环境而直接和间接的影响本地和区域空气质量。城市树木影响空气质量的主要途径是吸收污染物,改变城市小气候,改变能量利用,释放各种挥发性有机物<sup>[3]</sup>。表现在绿色植物的降温增湿、吸收 CO<sub>2</sub> 及有毒气体、释放 O<sub>2</sub>、抗污、滞尘、杀菌和减低环境噪音等方面<sup>[4-7]</sup>。20世纪60年代以来城市森林的生态效益得到广泛研究,70年代德国著名生态学家贝尔纳茨基认为各种树丛和树木覆盖区,是减少城市过热的唯一可行的办法,城市森林对城市生态平衡的维持有着极其重要的作用<sup>[4]</sup>。90年代美国对城市树木生态效应进一步深入研究,作了大量基础性工作。如 Myrup<sup>[8]</sup>分析了城市郊区小气候的变化,Heisler等<sup>[9]</sup>研究了城市森林对社区的降温效应,Simpson等<sup>[10]</sup>研究了美国萨卡拉曼多市城市森林对城市供暖和夏季空调降温所使用能源消耗的影响,Souch等<sup>[11]</sup>研究了美国印第安那州布卢明顿市的城市森林的林冠在夏季对城市气候的影响,而近年 Nowak<sup>[12]</sup>更进一步指出由于树木的遮荫使得一日内每增加一个百分点的遮荫率,空气日均温度便下降 0.04~0.2℃,个别情况下,在距地面 1.5 m 处空气温度下降 0.7~1.3℃。我国对城市森林结构与生态效益的研究还处于零散阶段<sup>[7]</sup>,缺乏对城市绿化树种的基本生理生态特性的研究和在城市环境中生长表现及其生态效应的研究。

国内目前的城市森林建设发展速度很快,但有关城市绿化树木的生理生态特性研究却很缺乏,常导致树种选择的盲目性。城市绿化规划时,缺乏对树木生态效应的总体把握,难以给出合理的绿化定额指标。作者就合肥市几种主要绿化树种的生理指标和生态效应进行定量研究,试图给出树木对城市小气候的反馈调节效能的具体量值,为城市绿化规划、树种选择提供一定的理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验对象的选择

根据已有资料<sup>[13]</sup>和对合肥市的广泛实地调查,确定试验对象为合肥市主要绿化树种——三角枫 (*Acer buergerianum* Miq)、悬铃木 (*Platanus acerifolia* (Ait.) Willd)、女贞 (*Ligustrum lucidum* Ait)、香樟 (*Cinnamomum camphora* (Linn.) Presl)、广玉兰 (*Magnolia grandiflora* Linn)。

### 1.2 测定方法

用美制 Li-1600 稳态气孔计测定叶片蒸腾速率 ( $Tr$ )、气孔导度 ( $G_s$ )、气温 ( $T_c$ )、叶温 ( $T_l$ )、光量子通量密度 ( $PAR$ ) 和相对湿度 ( $RH$ )。

测定部位:选同龄树中冠层外缘功能叶片,东南西北 4 个方向各 2 片样叶。

测定方法:在春季和夏季各选晴朗稳定天气,每 1 个树种连续观测 2 d,每天从 8:00-18:00 每隔 1 h 观测 1 次。

## 2 结果与分析

### 2.1 蒸腾速率日变化

由图 1 可以看出三角枫、悬铃木、女贞、香樟、广玉兰都是阳性树种,5 树种蒸腾速率日变化规律皆明显呈双峰曲线状。早上 8:00 至中午 12:00 蒸腾速率都呈上升趋势,然后开始呈下降趋势,至下午 14:00 后又有回升趋势,到 15:00 再次出现高峰,随后随着时间逐渐下降。

5 树种蒸腾速率日变化规律总体趋势基本一致,但从图 1 中可以看出各树种蒸腾速率峰值并不相同,峰高大小依此为女贞、广玉兰、香樟、悬铃木、三角枫,经计算日平均蒸腾速率大小依此为广玉兰、女贞、香樟、悬铃木、三角枫。各树种曲线平缓度不同,女贞最陡峭,三角枫最平缓。

### 2.2 蒸腾速率 ( $Tr$ ) 与气孔导度 ( $G_s$ ) 之间的关系

蒸腾实际就是植物体内水分以气体状态向外界散失的过程,而蒸腾的主要形式就是气孔蒸腾。植物可以通过调节气孔开张度来控制蒸腾强度。从蒸

腾速率与气孔导度一元回归方程中(表 1)可以看出,5 树种的气孔导度与蒸腾速率皆呈显著正相关,其中  $Y_1$  为蒸腾速率, $Y_2$  为气孔导度。经  $F$  检验,方程高度显著。

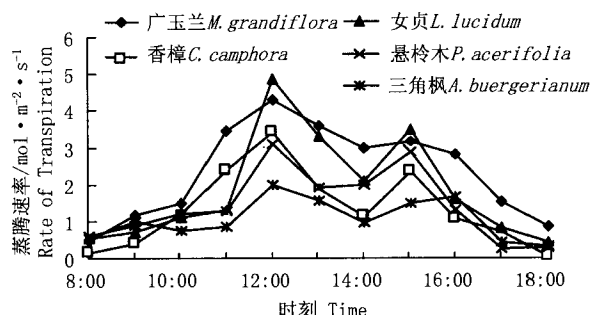


图 1 5 树种叶片蒸腾速率日变化

Figure 1 The diurnal change of transpiration rates of leaves of five tree species

### 2.3 蒸腾速率对生态因子的响应

气孔导度直接影响蒸腾速率,而气孔导度取决于树种对光、温、水汽等生态因子的响应,因此生态因子直接影响树木的蒸腾。利用同步测定数据分别进行多元回归分析,所得蒸腾速率、气孔导度与生态因子的回归方程列于下表 2,其中  $Y_1$  为蒸腾速率、 $Y_2$  为气孔导度、 $X_1$  为气温、 $X_2$  为叶温、 $X_3$  为光量子通量密度、 $X_4$  为相对湿度。较高的复相关系数表明蒸腾速率、气孔导度与各生态因子的变化密切相关。从各回归方程偏回归系数可知 5 树种叶温对蒸腾速率影响最大,相对湿度次之、光量子通量密度最小。这与已报道的多个树种的观测结果相一致<sup>[10,14,15]</sup>。表 2 中,显著性检验  $F > F_{0.05}(4,6)$ ,各回归方程回归高度显著。

表 1  $Tr$  和  $G_s$  关系的回归方程

Table 1 Regression equations of the relation between  $Tr$  and  $G_s$

树种 Tree species	一元回归方程 Regression equation	$F$	$R$
广玉兰 <i>Magnolia grandiflora</i>	$Y_2 = 0.195 + 0.715Y_1$	4.612	0.962
香樟 <i>Cinnamomum camphora</i>	$Y_2 = 1.135 + 0.985Y_1$	3.896	0.865
女贞 <i>Ligustrum lucidum</i>	$Y_2 = 0.398 + 1.236Y_1$	4.352	0.957
悬铃木 <i>Platanus acerifolia</i>	$Y_2 = 1.365 + 0.785Y_1$	5.231	0.896
三角枫 <i>Acer buergerianum</i>	$Y_2 = 0.987 + 0.857Y_1$	4.132	0.842

表 2 蒸腾速率与生态因子的多元回归方程

Table 2 Multiple regression equations among transpiration, stomatal conductance and ecological factors

树种 Tree species	多元回归方程 Multi-regression equation	$F$	$R$
广玉兰 <i>Magnolia grandiflora</i>	$Y_1 = 30.257 - 0.498X_1 + 1.949X_2 + 0.027X_3 - 0.843X_4$	5.601	0.823
	$Y_2 = 1432.563 - 52.398X_1 + 2.872X_2 + 0.318X_3 - 1.1234X_4$	7.349	0.912
香樟 <i>Cinnamomum camphora</i>	$Y_1 = -89.832 + 1.681X_1 - 8.209X_2 + 0.045X_3 - 0.092X_4$	6.318	0.789
	$Y_2 = -378.912 + 54.721X_1 - 25.302X_2 + 0.932X_3 - 0.854X_4$	7.043	0.772
女贞 <i>Ligustrum lucidum</i>	$Y_1 = 10.389 + 0.459X_1 - 2.599X_2 + 0.235X_3 - 1.349X_4$	8.314	0.918
	$Y_2 = 359.678 + 10.318X_1 - 32.671X_2 + 11.284X_3 - 9.349X_4$	3.194	0.803
悬铃木 <i>Platanus acerifolia</i>	$Y_1 = -100.579 - 0.851X_1 + 1.406X_2 + 0.029X_3 - 0.357X_4$	4.213	0.893
	$Y_2 = -593.487 - 10.349X_1 + 31.573X_2 + 0.374X_3 - 4.672X_4$	5.679	0.783
三角枫 <i>Acer buergerianum</i>	$Y_1 = 85.972 - 1.092X_1 + 11.371X_2 + 0.078X_3 - 0.834X_4$	4.839	0.679
	$Y_2 = 739.832 - 22.032X_1 + 89.371X_2 + 0.954X_3 - 8.792X_4$	3.918	0.798

### 2.4 不同树种蒸腾散水效应

由图 1 可知,5 种绿化树种日平均蒸腾速率大小差异明显,依次为广玉兰、女贞、香樟、悬铃木、三角枫。本试验样树的选择注意了尽量以合肥市各树种的平均径阶为观测对象,以期获得更有代表性的数据。由于蒸腾速率的差异,在每株树叶片数和叶

面积相同情况下,每个树种单株一天蒸腾散水量也不同。如果每天以 10 h 蒸腾时间,单株树木叶面积按公式(1)计算<sup>[6]</sup>:

$$Y = e^{0.6031+0.2375H+0.6906D-0.0123S} \quad (1)$$

式中, $Y$  为叶面积, $H$  为树高, $D$  为胸径, $S$  按  $D(H+D)/2$ 。

$$\text{散水量} = \frac{\text{蒸腾速率} \times \text{叶面积} \times \text{时间} \times M_{H_2O}}{1000} \quad (2)$$

根据式(2)计算出5树种单株日散水量。从表3中易看出,广玉兰每天散水量最大,增湿效应最明显。5树种单株散水量大小依此为广玉兰、女贞、悬铃木、香樟、三角枫。蒸腾速率高的树木,树木散失的水分较多,增加的空气相对湿度和水汽压相应也较大。

### 2.5 不同树种蒸腾吸热效应

研究表明,叶片的光合作用和蒸腾作用等生理

活动能大量地吸收热能<sup>[16]</sup>。表4是根据表3中数据和每千克蒸腾散水需吸收2.4518 kJ热能值计算出来的<sup>[2,17,18]</sup>。表4给出了树体在蒸腾时吸收的热能值。5树种单株吸收热能值大小依此为广玉兰、女贞、悬铃木、香樟、三角枫。蒸腾速率高的树木,消耗热量多,导致周围空气降温明显<sup>[19,20]</sup>。毫无疑问,从降温效应来讲,5树种的排序为广玉兰、女贞、悬铃木、香樟、三角枫。

表3 5树种日均蒸腾速率、蒸腾散水量

Table 3 Diurnal mean transpiration rates and amount of water given off through transpiration of five tree species

测定指标 Tested indices	树种 Tree species				
	广玉兰 <i>M. grandiflora</i>	香樟 <i>C. camphora</i>	悬铃木 <i>P. acerifolia</i>	女贞 <i>L. lucidum</i>	三角枫 <i>A. buergerianum</i>
日均蒸腾速率 $Tr$ /mmol·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup>	2.342	1.334	1.420	1.838	1.034
单株散水量/kg Single plant moisture given off through transpiration	15.1	8.6	9.2	11.9	6.2
总株数散水量/10 <sup>5</sup> kg Total plant moisture given off through transpiration	2.1	1.5	0.6	11.3	0.3

注:总株数散水量的计算是按在树木年龄和叶面积基本一致下,由株数乘单株散水量来计算的。

Note: The total amount of water given off was obtained by multiplying the amount given off from one single plant by the number of plants of roughly the same age and the same leaf area.

表4 5树种日均吸收热能值

Table 4 The diurnal energy absorbed through transpiration of five tree species

测定指标 Tested indices	树种 Tree species				
	广玉兰 <i>M. grandiflora</i>	香樟 <i>C. camphora</i>	悬铃木 <i>P. acerifolia</i>	女贞 <i>L. lucidum</i>	三角枫 <i>A. buergerianum</i>
单株吸收热能/kJ Energy absorbed per single plant	37.0	21.1	22.5	29.2	15.3
总株数吸收热能/10 <sup>5</sup> kJ Energy absorbed by total plants	5.2	3.7	1.6	27.7	0.8

### 3 小结与讨论

5树种蒸腾速率具有明显的日变化。其变化都呈明显的双峰曲线,其中女贞曲线最陡峭,三角枫最平缓。气温( $T_c$ )、叶温( $T_l$ )、光量子通量密度( $PAR$ )、相对湿度( $RH$ )4种生态因子对三角枫、悬铃木、女贞、香樟、广玉兰5种树的蒸腾速率影响显著,叶温最为突出。 $G_s$ 直接影响 $Tr$ ,两者呈正相关。广玉兰的日均蒸腾速率最高,单株日散水量达15.1 kg,单株日吸收热能达37.0 kJ,女贞次之。但由于5树种在合肥市内的株数不同,女贞的总株数最多,占

总树木株数的27%,远远高于其他树种的株数<sup>[13]</sup>,因此,每一树种的日总散水量、日总吸收热能值却是女贞最高,分别达 $11.3 \times 10^5$  kg、 $27.7 \times 10^5$  kJ。由于树木蒸腾耗热能值、散水量值不同使得周围大气降温增湿数值大小发生变化<sup>[20]</sup>,树木明显改善小气候状况,降温增湿效应明显<sup>[21]</sup>,本研究表明从单株水平上来说,在生长季节,广玉兰每日改善小气候效应最显著。若以总株数而论,以同样的生长时期计算,则女贞的小气候效应最显著。

植物蒸腾对众多生态因子综合作用所产生的反应是十分复杂的。单因子相关分析可以初步判断各

生态因子对蒸腾强度的作用性质,但是每个因子并不是独立存在和起作用的,其间还存在着相互制约和相互作用。为了更准确分析各生态因子与蒸腾强度的关系要进行多因子综合分析,本文讨论了蒸腾速率与叶温、气温、大气相对湿度、光量子通量密度 4 个生态因子综合关系,没有分析  $T_r$  与各单因子之间关系。但实际上蒸腾速率还受其它因子影响,如土壤热流通量和风速等<sup>[15,22]</sup>。因此还应进一步作更全面的因子综合分析。由于树木生长的环境以及自身形成的森林环境对上述生态因子的影响,在实际的城市森林建设过程中应综合考虑森林结构对树种蒸腾的影响。

本研究在计算散水量与吸收热能值时采用的叶面积公式,是对 300 多种大小不一的阔叶树种的调查之后拟合的经验公式,具有较广泛的适应性。本次试验测定的数据主要集中在 5、6、7 月份,即亚热带植物的主要生长期,得出的结论在其它时间是否适用,还有待进一步试验验证,但据目前已测定树种的全年蒸腾速率的季节变化来看,一般的规律为夏季高于秋季和春季<sup>[14,18]</sup>。因此,所选择的时间段应能基本代表全年的平均值。

林木的蒸腾散水、吸热能力是随着植物年龄大小、生长状况、生长季节及林分郁闭度等林分结构的变化而变化的,对于单株树木散水吸热能力的估算值并不能代替对于林分整体生态效能的评判。因此,在城市林业建设中对于树种选择应综合考虑树木的多种生态功能和多种环境因子,而在林分的结构上更加注意树种选择与配置。

## 参考文献:

- [ 1 ] 杨士弘. 城市生态环境研究 [ M ]. 广州: 广东出版社, 1991: 15-36.
- [ 2 ] 周景贞. 上海城市热岛效应 [ J ]. 地理学报, 1984 ( 2 ): 34-42.
- [ 3 ] 吴泽民, Joe R Mebride, David J, 等. 合肥城市森林对空气污染的影响 [ J ]. 中国城市林业, 2003, 1 ( 1 ): 39-43.
- [ 4 ] Bernatzky A. 树木生态与养护 [ M ]. 陈自新, 许慈安译. 北京: 中国建筑出版社, 1987: 98-130.
- [ 5 ] Bueno-Bartholomei C L, Labaki L C. How much does the change of species of trees affect their solar radiation attenuation [ C ] // Fifth International Conference on Urban Climate. Lodz, Poland. 2003.
- [ 6 ] Gregory E M, Nowak D J, Rowan A. Chicago's urban forest ecosystem: results of the Chicago urban forest climate project [ R ]. USDA Forest Service Gen Tech Rep, 1984: 5-7.
- [ 7 ] 胡志斌, 何兴元, 陈玮. 沈阳城区城市森林的结构和生态效益 [ J ]. 应用生态学报, 2003, 14 ( 12 ): 2108-2112.
- [ 8 ] Myrup L O, McGinn C E, Floccchini R G. An analysis of microclimate variation in a suburban environment [ C ] // Seventh Conference of Applied Climatology, American Meteorological Society, Boston, MA, 1991: 172-179.
- [ 9 ] Heisler G M, Grant R H, Grimmond S, et al. Urban forests-cooling our communities [ C ] // Inside Urban Ecosystems, Proc 7th Nat. Urban Forest Conf, American Forests, Washington, DC. 1995.
- [ 10 ] Simpson J R. Urban forest impacts on regional cooling and heating energy use: Sacramento County case study [ J ]. J Arboric, 1998, 24 ( 4 ): 201-214.
- [ 11 ] Souch C A, Souch C. The effect of trees on summer time below canopy urban climates: a case study [ J ]. Bloomington, Indiana, 1993, 19 ( 5 ): 303-312.
- [ 12 ] Nowak D J. The effects of urban trees on air quality [ R ]. General Technical Report NE-18. DC: USDA. 2004.
- [ 13 ] 吴泽民, 黄成林, 白林波, 等. 合肥城市森林结构 [ J ]. 林业科学, 2002, 38 ( 4 ): 7-13.
- [ 14 ] 高健, 侯成林, 吴泽民. 淹水胁迫对 I-69/55 杨蒸腾作用的影响 [ J ]. 应用生态学报, 2000, 11 ( 4 ): 519-522.
- [ 15 ] 阮宏华, 郑阿宝, 钟育谦, 等. 次生橡树林蒸腾强度和总蒸腾量计算 [ J ]. 南京林业大学学报, 1999, 23 ( 4 ): 32-34.
- [ 16 ] 王沙生, 高荣浮. 植物生理学 [ M ]. 北京: 中国林业出版社, 1984.
- [ 17 ] 吴力立, 董家文. 林分蒸散研究 [ J ]. 南京林业大学学报, 1999, 23 ( 3 ): 55-59.
- [ 18 ] 钟育谦, 郑阿宝, 阮宏华, 等. 江苏南方山地次生橡树林蒸腾强度的季节和空间变化研究 [ J ]. 南京林业大学学报, 1999, 23 ( 1 ): 61-64.
- [ 19 ] 符气浩. 城市绿化的生态效益 [ M ]. 北京: 中国林业出版社, 1992: 32-46.
- [ 20 ] 杨士弘. 城市树木增湿降温效应研究 [ J ]. 地理研究, 1994, 13 ( 4 ): 74-80.
- [ 21 ] 吴力立. 南京城市森林下的空气湿度研究 [ J ]. 南京林业大学学报, 2005, 29 ( 1 ): 41-45.
- [ 22 ] 闫俊华, 周国逸, 黄忠良. 广东鼎湖山季风常绿阔叶林蒸散 [ J ]. 林业科学, 2001, 37 ( 1 ): 37-45.