

南京近郊麻栎林冠层蒸腾时间变化及降温效应

刘 鑫¹, 张金池¹, 谢德晋¹, 庄家尧¹, 邵永昌¹, 张水锋^{1,2}

(1. 南京林业大学 水土保持与生态修复重点实验室, 江苏 南京 210037; 2. 南京森林警察学院, 江苏 南京 210023)

摘要: 2012年9月和10月及2013年5-8月, 利用树干液流仪和小气象站对南京近郊东善桥林场的麻栎 *Quercus acutissima* 树干液流速率及环境因子进行连续观测, 分析麻栎林冠层蒸腾量及其对周边环境的降温效应。结果表明: ①各月麻栎液流密度均在13:00左右达到最大值, 其中8月峰值最高($18.78 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$), 6月峰值最低($13.49 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$); ②5-10月麻栎林冠层蒸腾总量为237.52 mm, 7月冠层蒸腾量最高(50.46 mm), 10月冠层蒸腾量最低(29.86 mm); ③7月的蒸腾耗能与太阳辐射能量值最高, 分别为 $154.97 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$, $489.65 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$, 8月冠层蒸腾耗能系数最高(35.82%), 10月的冠层蒸腾耗能系数最低(25.76%); ④麻栎林7月冠层蒸腾降温值最高($3.07 \text{ }^{\circ}\text{C}$), 生长期平均可降温(2.35 ± 0.53) $^{\circ}\text{C}$ 。图6表1参28

关键词: 森林水文学; 麻栎林; 冠层蒸腾; 降温

中图分类号: S715.4

文献标志码: A

文章编号: 2097-0756(2015)04-0529-08

Temporal variation for canopy transpiration and its cooling properties in a *Quercus acutissima* forest of suburban Nanjing

LIU Xin¹, ZHANG Jinchi¹, XIE Dejin¹, ZHUANG Jiayao¹, SHAO Yongchang¹, ZHANG Shuifeng^{1,2}

(1. Jiangsu Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Ecological Restoration, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China; 2. Nanjing Forest Police College, Nanjing 210023, Jiangsu, China)

Abstract: Global warming and regional water resources shortage have become the focus of the global. Climate warming affects global hydrological cycles, and tree transpiration also affects climate warming. This study was conducted to analyze canopy transpiration of *Quercus acutissima* and to determine its cooling effect on surrounding environments. Continuous observation of the sap flow density and environmental factors, such as solar radiation, air temperature, air relative humidity, soil temperature, soil water content, used a sap flow meter and a mini weather station in Nanjing Dongshanqiao Forest Farm. Maximum sap flux density, peak daily sap flux density, transpiration heat flux, solar energy, consumed-energy coefficient, and canopy transpiration cooling was conducted according these data. Six trees of different diameter grade were observed. Results indicated that 1) the maximum sap flux density appeared at 13:00; the greatest peak daily sap flux density was $18.78 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ in August, and the lowest was $13.49 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ in June. 2) Canopy transpiration summed from May to October was 237.52 mm with the highest month being July. 3) July also had the greatest transpiration heat flux ($154.97 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$) and solar energy ($489.65 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$). The coefficient of consumed-energy for canopy transpiration was highest in August (35.8%) and lowest in October (25.8%). 4) Canopy transpiration cooling from *Q. acutissima* was highest in July ($3.07 \text{ }^{\circ}\text{C}$), and during the growing season, canopy transpiration reduced the av-

收稿日期: 2014-11-20; 修回日期: 2014-12-24

基金项目: 长三角水源区面源污染林业生态修复技术研究项目(201104055-1); 国家林业公益性行业重大专项(201104005); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

作者简介: 刘鑫, 博士, 从事森林水文研究。E-mail: 731845212@qq.com。通信作者: 张金池, 教授, 博士, 博士生导师, 从事林业生态工程、水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: zhang8811@njfu.edu.cn

erage temperature $(2.35 \pm 0.53) ^\circ\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ per 10 m^3 air. According to the transpiration and its cooling effect, we could choose suitable afforestation design in order to alleviate global warming and heat island effect [Ch, 6 fig. 1 tab. 28 ref.]

Key words: forest hydrology; *Quercus acutissima* forest; canopy transpiration; cooling

森林具有显著的调控水源与调节气候的作用，森林植被通过蒸腾作用向大气中输送大量的水分，增加空气湿度，同时吸收周围空气中的热量以降低空气温度。随着社会发展，全球变暖一直都是人们广泛关注的热点^[1-2]，从 1990 年至今政府间气候变化专门委员会(IPCC)已经发布了 4 次气候变化问题的综合性评估报告^[3-6]，城市热岛效应是全球变暖内容中的重要部分，而植被在调节热岛效应里扮演着重要角色^[7-9]。目前，热技术被广泛应用于研究植被蒸腾作用，多数学者通过热技术测定树干液流来研究植被对水资源的输出调控，如 Falko 等^[10]，Liu 等^[11]和 Hentschel 等^[12]分别研究了挪威云杉 *Picea abies*，砂梨 *Pyrus pyrifolia* 与山毛榉 *Fagus sylvatica* 的液流变化特征。植被在蒸腾的同时吸收了热能，降低了空气温度。Zhu 等^[13]得出木荷 *Schima superba* 通过蒸腾作用可以降低 10 m^3 空气柱 $4.5\text{ }^\circ\text{C}$ 左右的温度，Nakazato 等^[14]研究得出黄金葛 *Epipremnum aureum* 通过蒸腾可以降低约 $1.0\text{ }^\circ\text{C}$ 。本研究采用热扩散探针，对南京城郊典型树种麻栎 *Quercus acutissima* 林树干液流速率进行连续定位观测，并结合各环境因子的同步观测，实现对各月冠层蒸腾量的准确估算，并分析对周边环境的降温效应，为该区域树种选择及缓解城市热岛效应提供基础资料。

1 试验区概况

试验区位于南京市近郊国有东善桥林场铜山分场($31^\circ35'\sim31^\circ39'\text{N}$, $118^\circ50'\sim118^\circ52'\text{E}$)，属亚热带季风气候区，生长季节日间平均气温为 $18.06\text{ }^\circ\text{C}$ ，无霜期 229.0 d ，年日照时间 $2\,199.5\text{ h}$ 。区内气候温和湿润，四季分明，雨热资源比较丰富，生长季长，年平均降水量为 $1\,100.0\text{ mm}$ ，时间分布上多存在 2 个多雨期：一是春夏之交的梅雨，二是夏季的台风雨，为中国雨期最长的地区之一，十分有利于农作物和林木的生长。地形以丘陵为主，海拔为 $38\sim388\text{ m}$ ，森林类型以杉木 *Cunninghamia lanceolata*，马尾松 *Pinus massoniana*，麻栎和毛竹 *Phyllostachys edulis* 为主。

2 材料与方法

2.1 试验材料

试验区的麻栎林，平均树高为 13.8 m ，平均胸径为 25.8 cm ，郁闭度为 0.81 ，林分密度为 $425\text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。平均坡度为 18° 。土壤类型均为黄棕壤。麻栎林林下植被为悬钩子 *Rubus corchorifolius* 和山胡椒 *Lindera glauca*。选择 6 株干形通直，冠型良好，生长健康的样木。具体特征见表 1。

表 1 麻栎样树的基本特征
Table 1 Features of *Quercus acutissima* sample trees

样树编号	胸径/cm	树高/m	冠幅半径/m	边材面积/cm ²
1	18.7	13.0	2.30	154.64
2	20.0	13.8	3.00	167.74
3	24.2	14.6	2.80	273.36
4	26.7	14.5	3.30	357.89
5	27.8	14.8	4.50	374.44
6	31.8	14.5	4.60	467.44

2.2 试验方法

2.2.1 探针式树干液流仪安装与测定 首先，在树干距地 1.3 m 处用刀将树皮清除掉，形成 1 个宽 4 cm ，高 10 cm 的矩形框，将钻模平放在矩形框上，使用电钻打 2 个圆孔，其距离为 4 cm ，然后将 FLGS-TDP 热扩散探针安装进去，用橡皮泥封住接口处，并用固定泡沫和胶带固定探针。之后，用防辐射护罩将探针所在位置完全包裹，最后将探针与主机相连。隔 10 s 获取 1 次数据，并存储 1 h 的平均

值。比较 6 株样木液流速率变化特征, 可以明显看出其变化趋势基本相同, 主要差异在于其值的大小。这主要是由于胸径等因素的影响, 因此, 此次对 6 株样树测定的液流速率数据进行加权平均处理。

树干液流速率计算公式^[15-16]如下:

$$\alpha = \frac{d_{TM} - d_T}{d_T}, \quad (1)$$

$$v = 0.0119 a^{1.231}, \quad (2)$$

$$v_s = 3.6 A_s v. \quad (3)$$

式(1)~式(3)中: α 为参数; d_{TM} 为上下探针之间的最大昼夜温差, $^{\circ}\text{C}$; d_T 为瞬时温差, $^{\circ}\text{C}$; v 为平均液流速率, $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$; A_s 为树干边材面积, cm^2 ; v_s 为树干液流速率, $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

每个样地选择除测定样木之外的 20 株树木进行边材面积的直接读取, 利用生长锥和胸径尺获取心材、边材与树皮的厚度, 进而求出边材面积。通过相关性分析得出, 麻栎胸径与边材面积存在着显著的幂函数关系。公式如下:

$$A_s = 0.1032 D_{lm}^{2.4484} (n=20, R^2=0.969). \quad (4)$$

式(4)中: D_{lm} 为胸径, cm 。

2.2.2 各环境因子测定 使用小气象站进行各环境因子的连续测定, 存储 30 min 的均值。此次测定的环境因子有太阳辐射(R_s , $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$), 空气相对湿度(R_{H_a} , %), 空气温度(T_a , $^{\circ}\text{C}$), 土壤体积含水率(S_{MC} , %), 土壤温度(T_s , $^{\circ}\text{C}$)。其中空气温湿度分别测定了林内和林外值, 土壤体积含水率、土壤温度为林内土壤测定值, 太阳辐射为林外测定值。饱和水汽压差(V_{PD})是当时温度下空气中的饱和水汽压(e_s)与实际水汽压(e_a)之间的差值, 由以下公式^[17]计算得出:

$$V_{PD} = e_s - e_a = 1 - (R_{H_a}) \times e_s, \quad (5)$$

$$e_s = 0.6108 \times e^{\frac{17.502T_a}{T_a + 240.97}}. \quad (6)$$

式(5)~式(6)中: V_{PD} 为饱和水汽压差, kPa ; R_{H_a} 为空气相对湿度, %; T_a 为空气温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

2.2.3 能量计算 蒸腾耗能量是指单位面积白天冠层蒸腾作用所消耗的能量, 计算时段为太阳辐射不为 0 时段, 由以下公式计算得出:

$$E_{tr} = \frac{\lambda \rho Q}{10\,000}. \quad (7)$$

式(7)中: E_{tr} 为单位面积蒸腾耗能量, $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$; Q 为液流量, kg ; λ 为汽化潜热, 气温为 T_a 时, $\lambda = 2\,498.9 - 2.33T_a$, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$; ρ 为麻栎林林分密度, 值为 $425 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。太阳辐射能量是指单位面积太阳辐射所释放的能量, 由以下公式计算:

$$E_{sr} = \frac{R_s t}{1\,000}. \quad (8)$$

式(8)中: E_{sr} 为单位面积太阳辐射能量, $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$; R_s 为太阳辐射, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$; t 为时间, s 。耗能系数是指麻栎林日间蒸腾耗能量占太阳辐射能量的百分比, 计算公式如下:

$$K = E_{tr} / E_{sr}. \quad (9)$$

2.2.4 蒸腾降温计算 考虑到空气的湍流、对流和辐射作用, 空气与叶面之间及空气微气团之间不断地进行热量扩散和交换, 取底面积为 10 m^2 , 厚度为 100 m 的空气柱^[13]作为计算单元, 在此空气柱体中, 因植物蒸腾消耗热量是取自于周围 $1\,000 \text{ m}^3$ 的空气柱体, 故使气柱温度下降。气温下降值用下式^[13]表示:

$$T = 10^4 E_{tr} / \rho_{air} c V. \quad (10)$$

式(10)中: T 为蒸腾所降低的温度, $^{\circ}\text{C}$; ρ_{air} 为空气密度($\rho = 1.2837 - 0.0039T_a$, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); c 为空气的比热容, $1\,005 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$; V 为 $1\,000 \text{ m}^3$ 空气柱体体积。

2.2.5 数据处理 使用 Excel 2007 和 SPSS 19.0 进行数据处理和统计分析。

3 结果与分析

3.1 研究区环境因子

图 1 描述了 2012 年 9–10 月及 2013 年 5–8 月麻栎生长期环境因子的月变化。图 1A 显示 7 月降水

量较大, 10月降水量较低, 生长期总降水量为 778.6 mm。图 1C 显示了生长期林外空气温度与空气相对湿度的月变化。8月空气温度较高, 10月空气温度较低, 分别为 30.3 °C 和 17.0 °C; 6月的空气相对湿度较大, 8月的空气相对湿度较低, 分别为 89.4 % 和 79.0 %, 生长期平均空气温湿度分别为 23.7 °C 和 82.7 %。图 1B 显示 8月饱和水汽压差较大, 值为 0.854 kPa, 6月饱和水汽压差较低, 值为 0.319 kPa, 平均饱和水汽压差为 0.524 kPa。土壤含水率变化与雨量变化较一致, 6月平均土壤含水率较高, 值为 17.6 %, 8月平均土壤含水率较低。主要是因为空气温度高, 土壤蒸发与植被蒸腾消耗水量较高, 因此即使雨量高于10月, 但土壤含水率则较低。

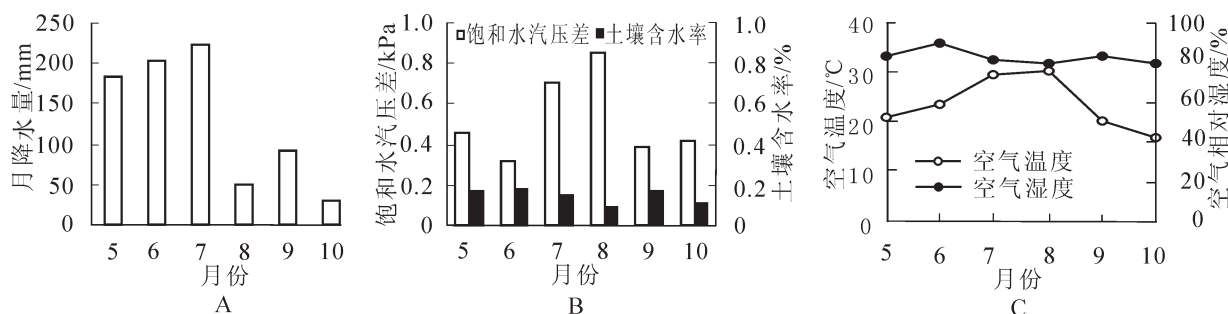
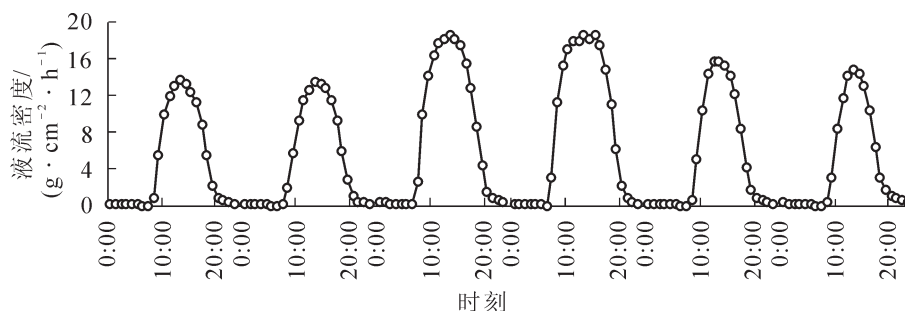


图1 环境因子月变化

Figure 1 Monthly variations of environment factors

3.2 液流密度日变化

如图 2 所示: 各月麻栎液流密度具有显著的昼夜变化规律, 各月均在 13:00 左右达到最大值, 5月至 10月最大值分别为 13.69, 13.49, 18.71, 18.78, 15.86, 14.99 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 其中 8月峰值最高, 6月峰值最低。6月降水量仅次于 7月份, 但其降水历时长, 空气相对湿度高于其他月份, 而 7月降水历时较短, 降水量集中, 因此 6月虽然降水量小于 7月, 但液流密度最低。6月与 7月液流密度在 6:00 开始增加, 其他月份从 7:00 开始增加。



数据分别收集于 2012 年 9 月、10 月, 2013 年 5-8 月, 每个点值为月均值。

图2 液流密度日变化

Figure 2 Daily change of sap flux density

3.3 冠层蒸腾量月变化

图 3 描述了麻栎林冠层蒸腾量月变化特征。7月冠层蒸腾量较高, 值为 50.46 mm, 10月冠层蒸腾量较低, 值为 29.86 mm。8月虽然饱和水汽压差、空气温度均高于 7月, 但其冠层蒸腾量低于 7月。分析环境因素可以得出其可能是因为 7月降水量和土壤含水率高于 8月份。5-10月麻栎林冠层蒸腾量为 237.52 mm, 日均蒸腾量为 1.29 mm。

3.4 冠层蒸腾降温效应

通过公式(6)~式(8)分别计算了麻栎林冠层蒸腾耗能量、太阳辐射能量及冠层蒸腾耗能系数。图 4 描述了 2012 年 9 月和 10 月及 2013 年 5-8 月的麻栎林单位面积冠层蒸腾耗能量、太阳辐射能量与耗能系数的月变化。由图 4 可以看出: 7月的蒸腾耗能量与太阳辐射能量值较高, 分别为 154.97 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 489.65 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$, 其次是 8月, 10月的蒸腾耗能量较低, 值为 84.74 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$, 6月的太阳辐射能较低, 值

为 $0.69 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。从 5–10 月，耗能系数先升后降，在 8 月达到峰值，值为 35.82%，10 月的耗能系数最低，为 25.76%，平均冠层蒸腾耗能系数为 30.13%。

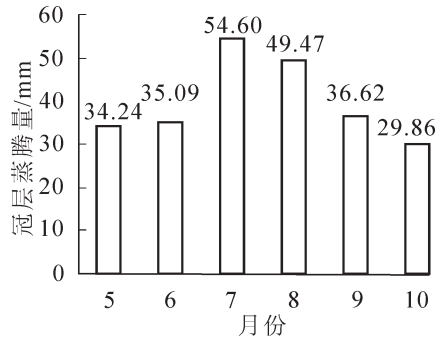


图 3 林分冠层蒸腾量月变化

Figure 3 Monthly change of stand canopy transpiration

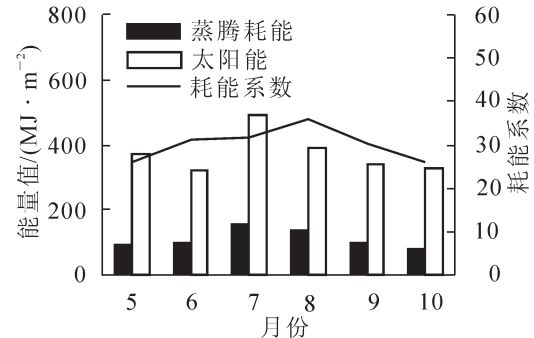
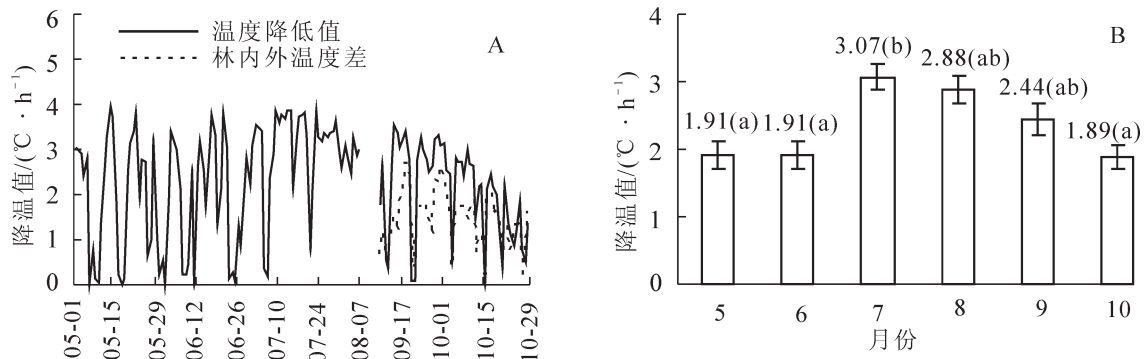


图 4 月尺度下蒸腾耗能、太阳能及耗能系数变化特征

Figure 4 Changes of transpiration heat flux, total solar radiation and consume energy coefficient at the temporal scale of a month

通过式(6)和式(9)算出日间麻栎林冠层 $1\,000 \text{ m}^3$ 空气柱内每小时可以降低的空气温度。图 5 分别描述了 2012 年 9 月、10 月与 2013 年 5–8 月日尺度(图 5A)与月尺度(图 5B)的麻栎林冠层日间蒸腾平均每小时降低的空气温度。另外，由于数据缺乏，仅分析了 2012 年 9 月和 10 月麻栎林林内与林外的温度差值。

随着冠层蒸腾量增加，麻栎林冠层每天约在 6:00–7:00 左右发挥其降温效应。由图 5A 可以看出：5 月 13 日的冠层蒸腾降温最高，达到 $3.95 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ，其次是 7 月 13 日，降温 $3.88 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ，9 月与 10 月冠层蒸腾降温与麻栎林内外温差之间变化较一致，相关性达到 0.70 ($F=105.9$, $P=0.000<0.01$)。由图 5B 可以得出，7 月的降温最高($3.07 \text{ }^{\circ}\text{C}$)，显著高于 5 月、6 月、10 月降温值，与 8 月、9 月降温值之间差异不显著，其次是 8 月($2.88 \text{ }^{\circ}\text{C}$)，10 月的降温最低($1.89 \text{ }^{\circ}\text{C}$)，5 月、6 月、8 月、9 月、10 月蒸腾降温值之间差异不显著。在此次的试验区内，麻栎林生长期通过冠层蒸腾作用日间平均降温为 $(2.35 \pm 0.53) \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}^{-1}$ 。



A. 日尺度；B. 月尺度，不同英文字母表示差异达 5% 水平上显著。

图 5 麻栎林冠层 $1\,000 \text{ m}^3$ 空气柱蒸腾降温效应Figure 5 Cooling effect of canopy transpiration of *Quercus acutissima*

3.5 冠层蒸腾降温影响因素分析

冠层蒸腾降温效应随各月份蒸腾量大小而变化，同时受到各月份环境因子的影响，如图 6 所示，同时可以说明蒸腾量与各环境因子的关系。比较蒸腾降温值与各环境因子的关系可以看出：其与空气温度 ($P=0.04<0.05$)、饱和水汽压差 ($P=0.04<0.05$) 具有显著的正相关关系，与叶面积指数存在正相关关系，但不显著 ($P=0.09>0.05$)，与土壤含水率、空气相对湿度和降雨之间的关系不显著。

4 讨论

众所周知，森林具有涵养水源、保持水土的作用，但森林同时通过蒸腾作用消耗大量的水分，不合

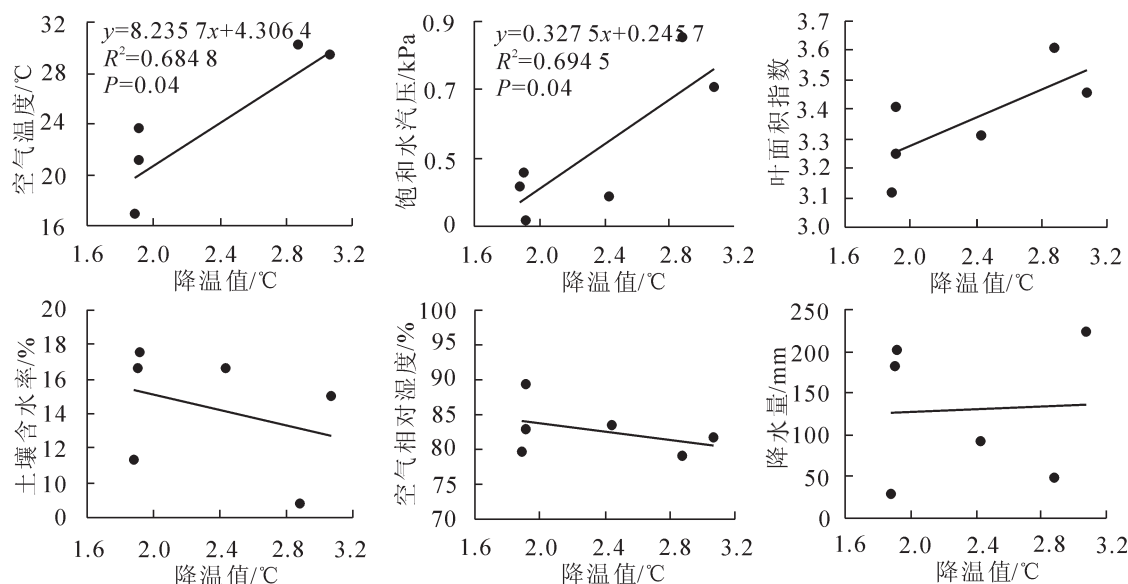


图 6 蒸腾降温值与环境因子的关系

Figure 6 The relationship between temperature reduction value and environment factors

理的造林设计将会对地区的水资源利用造成威胁。本研究得出 5–10 月期间南京城郊麻栎林冠层蒸腾总量为 237.52 mm, 约占该时段降水量的 43.53%, 其中, 7 月冠层蒸腾量较高(50.46 mm), 10 月冠层蒸腾量较低, 日均蒸腾量为 1.29 mm, 略低于阮宏华等^[18]估算的苏南区域 6–8 月次生栓皮栎 *Quercus variabilis* 日均蒸腾量, 其结果为 1.69 mm。另外, 分别总结中国华北、西北、华南、西南区域关于林分蒸腾耗水量的研究进展得出, 不同区域不同林分蒸腾耗水存在一定的差异性, 如: 肖辉杰等^[19]测定得出 6–9 月北京山区侧柏 *Platycladus orientalis* 林、油松 *Pinus tabulaeformis* 林日均蒸腾量分别为 2.63 和 1.58 mm; 王鹤松等^[20]测定华北石质山区杜仲 *Eucommia ulmoides* 人工林 4–9 月日均蒸腾量约为 1.31 mm; 刘彩凤等^[21]研究山西黄土丘陵沟壑区油松、刺槐 *Robinia pseudoacacia* 混交林蒸腾耗水情况得出 7–10 月日均蒸腾量为 0.81 mm; 田风霞等^[22]利用改进的 Penman-Monteith 修正式估算出祁连山区云杉 *Picea asperata* 5–9 月平均日蒸腾量为 0.97 mm; 赵平等^[23]测定华南丘陵区成熟马占相思 *Acacia mangium* 林 6–7 月日均蒸腾量约为 1.26 mm; Huang 等^[24]研究广西桂林青冈栎 *Cyclobalanopsis glauca* 林蒸腾量得出 7 月日均值 5.1 mm。比较以上各区域的林分蒸腾量可以看出, 西北区域的降水量为 365~600 mm, 并且多集中在 6–8 月, 日均蒸腾量普遍低于 1.00 mm, 降水严重影响该区域的蒸腾特征; 降水较为充分的华北地区, 降水量为 600~700 mm, 蒸腾耗水量显著高于西北区域, 而降水丰沛的华南地区各林分的蒸腾量差异性较大, 年均降水量为 1 500~1 900 mm, 各月最高日蒸腾量为 1.26~5.10 mm, 间接可以说明在该区域蒸腾耗水不受到降水量的限制。本研究区域位于华东范围内, 降水较为充沛, 但降水量是否限制其蒸腾量还不能通过此阶段的比较得出。

图 6 得出蒸腾降温值与土壤含水率、空气相对湿度和降水之间的关系不显著, 说明降水量不是限制该区麻栎蒸腾及降温的环境因子, 同华南地区的分析结论一致。蒸腾量与土壤含水率、空气相对湿度之间大致呈现负相关关系, 主要因为其随着降水而增加, 降水时期由于太阳辐射、空气温度降低, 蒸腾量显著下降。另外, 比较 6 月和 7 月各环境因子与耗水量变化特征得出, 6 月空气温度、降水量与 7 月相差较小, 如图 1, 但其蒸腾量及其降温值却显著低于 7 月, 如图 5, 分析其主要原因是由于 6 月降水次数显著多于 7 月, 7 月降水较集中导致的, 这与赵平等^[23]关于马占相思林的研究结果相一致。综合以上比较分析得出, 降水量虽然不限制该区域麻栎蒸腾耗水, 但降水过程历时较长, 会直接影响饱和水汽压差、太阳辐射、空气温度等因素, 进而降低某一时间段的蒸腾耗水量。

生长的树木是天然的冷却器, 而水则就是冷却剂^[25]。苏泳娴等^[26]利用遥感影像广州城区对周边公园降温效应指出城市绿地通过植被的蒸腾、蒸散、光合作用降低温度增加湿度, 以缓解城市热岛效应, 张艳丽等^[27]利用光合测定系统测定叶片蒸腾速率进而研究成都市主要绿化树种的降温效应, 研究指出垂柳 *Salix babylonica* 的降温能力最强, 日均降温 0.33 °C, 其次是水杉 *Metasequoia glyptostroboides* 和山杜英

Elaeocarpus sylvestris。欧阳旭等^[28]通过观测林内外小气候变化特征得出混交林内年均气温与地温分别比空旷地低 2.3 °C 和 4.0 °C, 表现出良好的降温效应, Zhu 等^[13]通过测定蒸腾速率得出木荷通过蒸腾作用可以降低 10 m³ 空气柱 4.5 °C 左右的温度, 比较不同方法及不同地区及树种均得出蒸腾作用具有显著的降温生态效应, 但定量研究森林蒸腾对周围环境的降温效应还是很少的, 而且随着全球气候变暖、城市热岛效应及地区水资源紧缺等问题的加剧, 如何定量准确地评价地区森林蒸腾的降温值及其对城市环境的影响将变得更加重要。本研究通过准确测定冠层蒸腾量, 分析得出南京城郊麻栎林冠层 7 月份日间蒸腾降温值最高, 达到 3.07 °C, 生长期平均可降温 (2.35 ± 0.53) °C。

本研究目前只针对麻栎进行了为期 1 a 的研究, 在未来还需增加研究树种, 并选择不同密度、不同林龄样地的测定, 并进行多年的持续观测, 最终实现对该区域林木冠层蒸腾量及其降温效应的准确估测与评价。

5 参考文献

- [1] LOBELL D B, HAMMER G L, McLEAN G, *et al.* The critical role of extreme heat for maize production in the United States [J]. *Nat Clim Change*, 2013, **3**(5): 497 – 501.
- [2] GAO Xuejie, ZHAO Zongci, DING Yihui, *et al.* Climate change due to greenhouse effects in China as simulated by a regional climate model [J]. *Adv Atmos Sci*, 2001, **18**(6): 1224 – 1230.
- [3] IPCC. *Climate Change 1990: the IPCC Scientific Assessment* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- [4] IPCC. *Climate Change 1995: the Science of Climate Change: Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Inter Governmental Panel on Climate Change* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
- [5] IPCC. *Climate Change 2001: the Scientific Basis: Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [6] IPCC. *Climate Change 2007: the Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [7] OKE T R, CROWTHER J M, McNAUGHTON K G, *et al.* The micrometeorology of the urban forest [J]. *Philos Trans Royal Soc Ser B Biol Sci*, 1989, **324**(223): 335 – 349.
- [8] PETERS E B, McFADDEN J P, MONTGOMERY R A. Biological and environmental controls on tree transpiration in a suburban landscape [J]. *J Geophys Res Biogeosci*, 2010, **115**(G4): G04006. DOI: 10.1029/2009JG001266.
- [9] GILLA S E, RAHMANB M A, HANADLEY J F, *et al.* Modeling water stress to urban amenity grass in Manchester UK under climate change and its potential impacts in reducing urban cooling [J]. *Urban For & Urban Green*, 2013, **12**(3): 350 – 358.
- [10] CLAUSNITZER F, KÖSTNER B, SCHWÄRZEL K, *et al.* Relationships between canopy transpiration, atmospheric conditions and soil water availability: analyses of long-term sap-flow measurements in an old Norway spruce forest at the Ore Mountains/Germany [J]. *Agric For Meteorol*, 2011, **151**(8): 1023 – 1034.
- [11] LIU Xiaozhi, KANG Shaozhong, LI Fusheng. Simulation of artificial neural network model for trunk sap flow of *Pyrus pyrifolia* and its comparison with multiple-linear regression [J]. *Agric Water Manage*, 2009, **96**(6): 939 – 945.
- [12] HENTSCHEL R, BITTNERB S, JANOTT M, *et al.* Simulation of stand transpiration based on a xylem water flow model for individual trees [J]. *Agric For Meteorol*, 2013, **182**: 31 – 42.
- [13] ZHU Liwei, ZHAO Ping. Temporal variation in sap-flux-scaled transpiration and cooling effect of a subtropical *Schima superba* plantation in the urban Area of Guangzhou [J]. *J Integr Agric*, 2013, **12**(8): 1350 – 1356.
- [14] NAKAZATO T, INAGAKI T. Analysis of plant function as bio-thermal-conditioner using Pothos (*Epipremnum aureum*) [J]. *Thermochimica Acta*, 2012, **532**: 49 – 55.
- [15] GRANIER A. A new method of sap flow measurement in tree stems [J]. *Ann For Sci*, **42**(2): 193 – 200.
- [16] GRANIER A. Evaluation of transpiration in a Douglas fir stand by means of sap flow measurements [J]. *Tree Physiology*, 1987, **3**(4): 309 – 320.
- [17] CAMPBELL G S, NORMAN J M. *An Introduction to Environmental Biophysics* [M]. 2nd ed. New York: Springer-Verlag, 1998: 5 – 9.
- [18] 阮宏华, 郑阿宝, 钟育谦. 次生栎林蒸腾强度与蒸腾量的研究[J]. 南京林业大学学报, 1999, **23** (4): 32 – 35.

- RUAN Honghua, ZHENG Abao, ZHONG Yuqian. A study on the transpiration intensity and total transpiration calculation of the secondary oak forest [J]. *J Nanjing For Univ*, 1999, **23**(4): 32 – 35.
- [19] 肖辉杰, 余新晓, 贾瑞燕, 等. 北京山区典型人工林的耗水规律[J]. 中国水土保持科学, 2014, **12**(2): 72 – 77.
XIAO Huijie, YU Xinxiao, JIA Ruiyan, *et al.* Water consumption of typical artificial forests in Beijing mountainous area [J]. *Sci Soil Water Conserv*, 2014, **12**(2): 72 – 77.
- [20] 王鹤松, 张劲松, 孟平, 等. 华北石质山区杜仲人工林蒸腾特征及水分供求关系[J]. 林业科学研究, 2008, **21**(4): 475 – 480.
WANG Hesong, ZHANG Jinsong, MENG Ping, *et al.* Transpiration variation and relationship between supply and demand of water for *Eucommia ulmoides* plantations in the rocky mountainous area of north China [J]. *For Res*, 2008, **21**(4): 475 – 480.
- [21] 刘彩凤, 张志强, 郭军庭, 等. 晋西黄土丘陵沟壑区油松刺槐混交林蒸腾耗水[J]. 中国水土保持科学, 2010, **8**(5): 42 – 48.
LIU Caifeng, ZHANG Zhiqiang, GUO Juntao, *et al.* Transpiration of a *Pinus tabulaeformis* and *Robinia pseudoacacia* mixed forest in hilly-gully region of the Loess Plateau, West Shanxi Province [J]. *Sci Soil Water Conserv*, 2010, **8**(5): 42 – 48.
- [22] 田凤霞, 赵传燕, 冯兆东. 祁连山区青海云杉林蒸腾耗水估算[J]. 生态学报, 2011, **31**(9): 2383 – 2391.
TIAN Fengxia, ZHAO Chuanyan, FENG Zhaodong. Model-based estimation of the canopy transpiration of Qinghai spruce (*Picea crassifolia*) forest in the Qilian Mountains [J]. *Acta Ecol Sin*, 2011, **31**(9): 2383 – 2391.
- [23] 赵平, 邹绿柳, 饶兴权, 等. 成熟马占相思林的蒸腾耗水及年际变化[J]. 生态学报, 2011, **31**(20): 6038 – 6048.
ZHAO Ping, ZOU Liliu, RAO Xingquan, *et al.* Water consumption and annual variation of transpiration in mature *Acacia mangium* plantation [J]. *Acta Ecol Sin*, 2011, **31**(20): 6038 – 6048.
- [24] HUANG Yuqing, LI Xiankun, ZHANG Zhongfeng, *et al.* Seasonal changes in *Cyclobalanopsis glauca* transpiration and canopy stomatal conductance and their dependence on subterranean water and climatic factors in rocky karst terrain [J]. *J Hydrol*, 2011, **402**(1/2): 135 – 143.
- [25] PRAŽÁK J, ŠÍR M, TESARČ M. Estimation of plant transpiration from meteorological data under conditions of sufficient soil moisture [J]. *J Hydrol*, 1994, **162**(3): 409 – 427.
- [26] 苏泳娴, 黄光庆, 陈修治, 等. 广州市城区公园对周边环境的降温效应[J]. 生态学报, 2010, **30**(18): 4905 – 4918.
SU Yongxian, HUANG Guangqing, CHEN Xiuzhi, *et al.* The cooling effect of Guangzhou City parks to surrounding environments [J]. *Acta Ecol Sin*, 2010, **30**(18): 4905 – 4918.
- [27] 张艳丽, 费世民, 李智勇, 等. 成都市沙河主要绿化树种固碳释氧和降温增湿效益[J]. 生态学报, 2013, **33**(12): 3878 – 3887.
ZHANG Yanli, FEI Shimin, LI Zhiyong, *et al.* Carbon sequestration and oxygen release as well as cooling and humidification efficiency of the main greening tree species of Sha River, Chengdu [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, **33**(12): 3878 – 3887.
- [28] 欧阳旭, 李跃林, 张倩媚. 鼎湖山针阔叶混交林小气候调节效应[J]. 生态学杂志, 2014, **33**(3): 575 – 582.
OUYANG Xu, LI Yuelin, ZHANG Qianmei. Characteristics of microclimate in a mixed coniferous and broadleaf forest in Dinghushan Biosphere Reserve [J]. *Chin J Ecol*, 2014, **33**(3): 575 – 582.