

# 长江三角洲地区麻栎和栓皮栎蒸腾规律及其对气候因子的响应

阮存鑫<sup>1,2</sup>, 胡海波<sup>1,2</sup>, 季婧<sup>1</sup>, 马冰<sup>1</sup>, 刘新亮<sup>1</sup>

(1.南京林业大学南方现代林业协同创新中心,南京 210037;2.江苏省水土保持与生态修复重点实验室,南京 210037)

**摘要:** 森林蒸腾在维系森林生态系统水量平衡上起着重要作用,研究麻栎和栓皮栎的蒸腾耗水规律,有助于了解栎林的水文过程和水量平衡。采用热扩散探针法,对江苏省句容市麻栎和栓皮栎林蒸腾速率进行连续观测,研究蒸腾速率在晴天、阴天和雨天的日变化特征,以及不同天气下气候因子对蒸腾速率的影响机制。结果表明,麻栎和栓皮栎蒸腾速率日变化在晴天、阴天均为单峰型,而雨天峰型波动较大。晴天峰值出现在 11:30—12:30,阴天峰值出现在 13:30—14:00。不同天气下,麻栎、栓皮栎日均蒸腾速率表现为麻栎>栓皮栎,晴天>阴天>雨天。总辐射、气温、饱和水汽压差与麻栎、栓皮栎蒸腾速率呈极显著正相关。总辐射对麻栎、栓皮栎蒸腾速率的贡献最大,在晴天其贡献度分别为 91.7%和 85.5%,而在阴天为 71.0%和 80.1%,在雨天为 50.4%和 57.9%。总辐射是影响麻栎和栓皮栎蒸腾速率最大的气候因子,其次是饱和水汽压差、气温和土壤含水量。

**关键词:** 麻栎; 栓皮栎; 蒸腾速率; 气候因子

**中图分类号:** S715.4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-2242(2021)02-0338-07

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.02.045

## Transpiration Regulations and Responses to Climate Factors of *Quercus acutissima* and *Quercus variabilis* in the Changjiang River Delta Area

RUAN Cunxin<sup>1,2</sup>, HU Haibo<sup>1,2</sup>, JI Jing<sup>1</sup>, MA Bing<sup>1</sup>, LIU Xinliang<sup>1</sup>

(1.Co-Innovation Center for the Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037;

2.Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Ecological Restoration in Jiangsu Province, Nanjing 210037)

**Abstract:** Forest transpiration plays an important role in maintaining the water balance of forest ecosystem. Studying transpiration regulations of *Quercus acutissima* and *Quercus variabilis* is helpful to understand the hydrology process and water balance of *Quercus* spp. forest. In this study, the transpirations of *Q. acutissima* and *Q. variabilis* were observed continually by the thermal diffusion probe method in Jurong City, Jiangsu Province. Meanwhile, the daily dynamic characters of transpiration and the impact mechanism of climatic factors on transpiration rate under different weather circumstances were studied. The results showed that the daily variation of transpiration rate showed single peak curve in sunny days and cloudy days, and fluctuate peak pattern in rainy days. The peak value was appeared in 11:30—12:30 in sunny days and 13:30—14:00 in cloudy days. The daily mean transpiration for *Q. acutissima* and *Q. variabilis* under different weathers were showed as follow: *Q. acutissima*>*Q. variabilis*, sunny day>cloudy day>rainy day. The transpiration rate of *Q. acutissima* and *Q. variabilis* were significantly positive correlated to the total solar radiation, the atmospheric temperature, and the vapor pressure deficiency. The total solar radiation had the greatest contribution to the transpiration rate of *Q. acutissima* and *Q. variabilis*. The contribution rate were 91.7% and 85.5% in sunny days, 71.0% and 80.1% in cloudy days, 50.4% and 57.9% in rainy days. The total solar radiation among climatic factors had the most important influence on the transpiration rate of *Q. acutissima* and *Q. variabilis*, followed by vapour pressure deficit, air temperature, and soil water content.

**Keywords:** *Quercus acutissima*; *Quercus variabilis*; transpiration rate; climatic factors

收稿日期:2020-10-28

资助项目:国家林业和草原局长江三角洲森林生态系统定位研究项目(2020132077);江苏省高等学校林学优势学科建设项目(164010641);江苏省高校研究生科研创新计划项目(CX2213\_0555)

第一作者:阮存鑫(1983—),男,博士研究生,主要从事森林生态、城市水文研究。E-mail:625914253@qq.com

通信作者:胡海波(1964—),男,博士,教授,主要从事水土保持、林业生态工程和城市生态研究。E-mail:huhb2000@aliyun.com

森林蒸腾在维系森林水分平衡上起着重要作用。蒸腾作用是森林耗水最主要的形式,森林蒸腾量约占森林蒸发散的 76%<sup>[1]</sup>。同时,森林蒸腾是森林向大气输送水分的重要环节,全球陆地表面约 39% 的降水通过蒸腾作用返还大气<sup>[2]</sup>。除此之外,森林蒸腾在提高水分利用率上也具有重要作用<sup>[3]</sup>。在我国北方干旱地区和半干旱地区,开展了大量森林蒸腾耗水研究<sup>[4-6]</sup>,而降水量较为充沛的长江三角洲地区研究较少。然而,由于水质污染以及季节性干旱,长江三角洲地区也面临水资源短缺的困境<sup>[7-9]</sup>,严重制约当地社会经济可持续发展<sup>[10]</sup>。因此,弄清该地区森林的蒸腾耗水规律具有重要的现实意义。麻栎(*Quercus acutissima*)、栓皮栎(*Quercus variabilis*)树干高大,材质坚硬,根系发达,具有良好的水源涵养功能<sup>[11]</sup>,在长江三角洲地区广泛分布。本文通过热扩散探针法连续测定麻栎、栓皮栎蒸腾速率,分析不同天气条件下麻栎、栓皮栎的蒸腾规律及其对气候因子的响应特征,研究结果对维持该地区栎林生态系统健康和森林经营具有重要的指导意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地位于江苏句容市下蜀镇国家林业和草原局长三角森林生态站(119°14'44"E,31°59'11"N),海拔 332.6 m,属北亚热带季风气候,年平均气温 16.48 °C,平均无霜期 233 d,年平均降水量 1 055.6 mm。试验地位于空青山中坡,平均坡度 20°,坡向东南。土壤为黄棕壤,质地为粉壤土,pH 为 4.76,有机质含量 30.1 g/kg,全氮含量 1.39 g/kg,速效磷含量 15.7 mg/kg,速效钾含量 150.9 mg/kg。

试验地林分优势树种为麻栎和栓皮栎,另外还有少量的枫香(*Liquidambar formosana*)、黄连木(*Pistacia chiensis*)等。试验样地面积 20 m×20 m,林相整齐,长势良好,林龄 60 年,林分郁闭度 0.9。麻栎林密度为 175 株/hm<sup>2</sup>,平均树高 19.24 m,平均胸径 26.64 cm;栓皮栎林密度为 250 株/hm<sup>2</sup>,平均树高 17.78 m,平均胸径 25.08 cm。

### 1.2 研究方法

野外观测时期从 2016 年 7—12 月,连续观测 6 个月。本文从中选择植物生长旺盛的夏季以及由盛转衰的秋季这段时期,根据天气状况各选择 10 个晴天、10 个阴天以及 10 个雨天的数据并将在同一时刻的蒸腾速率与气象数据作算术平均,以此研究麻栎、栓皮栎的蒸腾规律及其对气候因子变化的响应。

1.2.1 气象数据观测 试验地观测的气象因素主要有总辐射(W/m<sup>2</sup>)、气温(°C)、空气相对湿度(%)、饱和水汽压差(kPa)、风速(m/s)、土壤含水量(%)和土壤温度(°C)。总辐射值在离地表 20 m 高度(林分冠层高度)由

太阳辐射计 EQ08 (Middleton Solar, Australia)测得,气温和空气相对湿度值在 20 m 高处由温湿度计 HMP155A (Vaisala, Finland)测得,饱和水汽压差值由气温和空气相对湿度的经验函数计算获得<sup>[12]</sup>。风速由 20 m 高处二维超声风速计 Windsonic (Gill, UK)测得。土壤温度和土壤含水量分别由 10 cm 深的土壤温度传感器 109 (Campbell, USA)和土壤湿度传感器 CS616 (Campbell, USA)测得。

饱和水汽压差计算为:

$$V_{PD} = (1 - RH) \times 0.6108 \times \exp\left(\frac{17.27 \times T_a}{T_a + 273.3}\right) \quad (1)$$

式中: $V_{PD}$ 为饱和水汽压差(kPa); $RH$ 为空气相对湿度(%); $T_a$ 为大气温度(°C)。

1.2.2 边材面积测定 为避免影响样树生长,在试验地外另取 12 株不同胸径的麻栎和 11 株不同胸径的栓皮栎,于胸高 1.3 m 处用生长锥钻取 1/2 胸径长度的木栓,记录木栓长度。由于麻栎与栓皮栎的心材呈红棕色,而边材呈浅黄色,因此木栓上边材与心材边界明显,用游标卡尺测量边材厚度,计算边材面积  $A$ 。

$$A = \pi d(2r - d) \quad (2)$$

式中: $A$ 为边材面积(cm<sup>2</sup>); $d$ 为边材厚度(cm); $r$ 为树木去皮后的半径(cm)。

通过非线性回归分析,得到边材面积的非线性幂函数方程:

$$\text{麻栎的边材面积}(A_1): A_1 = 2.047x^{1.521} \quad (3)$$

$$\text{栓皮栎的边材面积}(A_2): A_2 = 2.064x^{1.441} \quad (4)$$

式中: $x$ 为胸径(cm)。

根据试验地麻栎林、栓皮栎林密度,通过公式(3)和公式(4),分别计算得到样地麻栎、栓皮栎的总边材面积分别为 2 173.17,2 162.94 cm<sup>2</sup>。

1.2.3 树干液流测定 根据林分状况,选取 4 个径级(20~25,25~30,30~35,35~40 cm)的麻栎和 4 个径级(15~20,20~25,25~30,30~35 cm)的栓皮栎为研究对象,采用热扩散探针法测定树干液流速率。具体操作步骤为:将热扩散植物径流计(Dynamax, USA)分 2 个方向(西北、东南)分别插入离地表 1.3 m 高处的样树木质部,深度为 30 mm,在外面包裹太阳膜并用玻璃胶密封固定,以防止太阳辐射和雨水淋入。径流计每隔 30 s 测定 1 次数据,每隔 30 min 进行平均,并将结果记录到数据采集器 CR1000 (Compbell, USA)中。

由 Granier 经验公式<sup>[13]</sup>,求得液流速率  $J_s$ :

$$J_s = 119 \times 10^{-4} \times \left(\frac{\Delta T_m - \Delta T_i}{\Delta T_i}\right)^{1.231} \quad (5)$$

式中: $J_s$ 为单株树木液流速率(cm/s); $\Delta T_m$ 为液流速率为 0 时加热探针与参考探针的温差,即最大温差值(°C); $\Delta T_i$ 为加热探针与参考探针温差的瞬时值(°C)。

1.2.4 麻栎、栓皮栎蒸腾速率计算 在获得麻栎、栓

皮栎单木液流速率的基础上,根据样树边材面积在林分的分布情况,实现单株到林分蒸腾尺度的扩展。栎林中麻栎和栓皮栎的蒸腾速率计算公式<sup>[14]</sup>为:

$$E_k = \frac{A_k}{S_g} \times \frac{\sum_{i=1}^n J_i A_i}{A_k} = \frac{\sum_{i=1}^n J_i A_i}{S_g} \quad (6)$$

式中: $E_k$ 为样地树种 $k$ 的蒸腾速率( $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})\text{H}_2\text{O}$ ); $J_i$ 为树种 $k$ 在 $i$ 径级的平均液流速率( $\text{cm}/\text{s}$ ); $A_i$ 为树种 $k$ 在 $i$ 径级的总边材面积( $\text{cm}^2$ ); $A_k$ 为树种 $k$ 的总边材面积( $\text{m}^2$ ); $S_g$ 为样地面积( $\text{m}^2$ )。

### 1.3 数据统计与分析

利用 Excel 2013 软件对全文数据进行整理,麻栎、栓皮栎蒸腾日变化特征分析以半小时为尺度在 Origin 软件上完成,麻栎、栓皮栎蒸腾与气候因子的 Pearson 相关性分析和逐步回归模型利用 SPSS 19.0 软件完成,增强回归树分析利用 R 语言软件完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 气候特征

由图 1 可知,在 7—9 月的夏季,日均总辐射为

21.88~334.80  $\text{W}/\text{m}^2$ ,最高值出现在 8 月;日均气温为 17.4~31.24  $^{\circ}\text{C}$ ,平均气温 24.04  $^{\circ}\text{C}$ ;日均饱和水汽压差为 0.40 kPa,最高值和最低值均出现在 8 月;空气相对湿度平均为 85.29%,日均最低值出现在 8 月为 68.22%;总降水量为 654.9 mm,占全年降水总量的 50.20%,7 月的降水量最高为 277.00 mm。日均饱和水汽压差的变化趋势与日均气温一致,均随总辐射的增加而增加。

土壤含水量变化范围为 37.23%~44.08%,平均为 41.41%(图 1)。土壤含水量在降雨时显著增加,经过连续晴天后迅速下降。将总辐射与饱和水汽压差、气温、空气相对湿度、土壤温度、土壤含水量作相关性分析发现,总辐射与饱和水汽压差、气温、土壤温度呈显著正相关( $P < 0.05$ ),气温与空气相对湿度呈显著负相关( $P < 0.05$ )。土壤含水量与空气相对湿度呈显著正相关( $P < 0.05$ ),与总辐射、气温、饱和水汽压差、土壤温度呈显著负相关( $P < 0.05$ )。从图 1 可以发现,土壤含水量在降雨时及降雨后 2 日都有大幅增加。

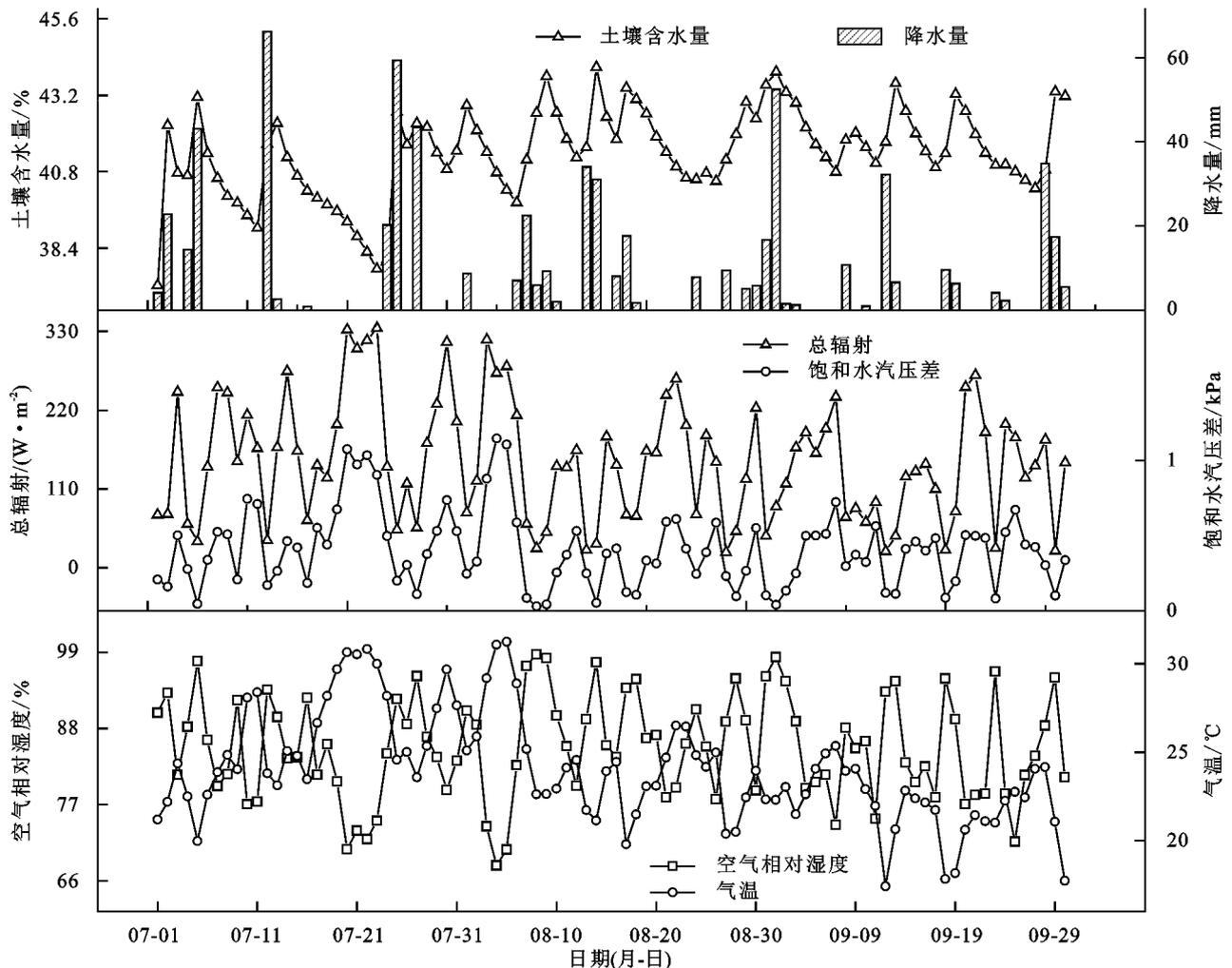


图 1 夏季栎林的气候特征

### 2.2 麻栎和栓皮栎蒸腾速率日变化特征

从图 2 可以看出,麻栎、栓皮栎蒸腾速率日变化

趋势在晴天和阴天均表现为单峰型,在雨天其峰型的变化波动较大。在晴天,麻栎蒸腾速率从 6:00—6:

30 开始启动,11:30—12:30 达到峰值,峰值为 35.72  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}) \text{H}_2\text{O}$ ,然后随着太阳辐射减弱和温度的降低而逐渐下降;栓皮栎蒸腾速率从 6:00—6:30 开始启动,11:30—12:30 达到峰值,峰值为 29.18  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}) \text{H}_2\text{O}$ ,其变化趋势与麻栎一致。在阴天,麻栎蒸腾速率从 7:00—7:30 开始启动,13:30—14:00 达到峰值,峰值为 31.20  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}) \text{H}_2\text{O}$ ;栓皮栎蒸腾速率从 7:00—7:30 开始启动,13:30—14:00 达到峰值,峰值为 23.86  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}) \text{H}_2\text{O}$ ,栓皮栎蒸腾速率的日变化趋势与麻栎一致。雨天,麻栎蒸腾速率从 7:00—7:30 开始启动,分别在 12:00—12:30,14:00—14:30 达到峰值,峰值分别为 15.06,15.88  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}) \text{H}_2\text{O}$ ,栓皮栎从 7:00—7:30 开始启动,分

别在 10:00—10:30,12:00—12:30,14:00—14:30 达到峰值,峰值分别为 11.77,11.84,11.82  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}) \text{H}_2\text{O}$ ,栓皮栎蒸腾速率日变化趋势与麻栎一致。虽然栓皮栎在晴天、阴天和雨天的蒸腾速率日变化趋势与麻栎一致(图 2b),但栓皮栎的蒸腾速率显著小于麻栎的蒸腾速率( $P < 0.01$ )。晴天麻栎、栓皮栎的日均蒸腾速率分别为 31.9,25.3  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}) \text{H}_2\text{O}$ ,阴天日均蒸腾速率分别为 24.3,18.6  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}) \text{H}_2\text{O}$ ,雨天分别为 16.8,13.6  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}) \text{H}_2\text{O}$ 。可知麻栎和栓皮栎蒸腾速率的强弱顺序依次是麻栎 > 栓皮栎,晴天 > 阴天 > 雨天,这是由于从晴天、阴天到雨天,辐射、气温等气候因子发生变化,而蒸腾速率也随之改变。

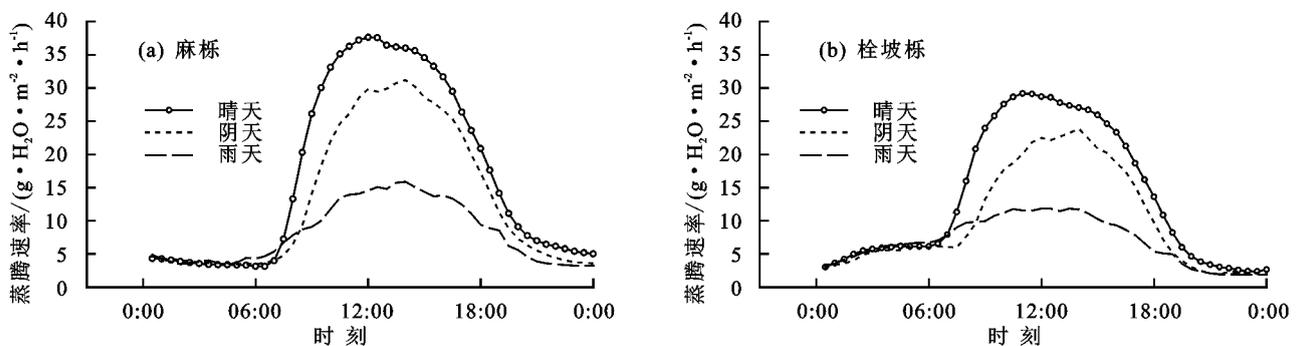


图 2 不同天气麻栎和栓皮栎蒸腾速率日变化

## 2.3 麻栎、栓皮栎蒸腾与气候因子的关系

2.3.1 蒸腾速率与气候因子的相关性分析 为研究麻栎、栓皮栎蒸腾速率与气候因子的关系,分别对晴天、阴天和雨天下的麻栎、栓皮栎蒸腾速率与气候因子作相关性分析(表 1)。结果表明,麻栎、栓皮栎蒸腾速率不论晴天、阴天和雨天都与总辐射、气温、饱和水汽压差呈极显著正相关,其中不同天气下麻栎蒸腾速率与总辐射的相关系数分别为 0.92,0.83 和 0.70 ( $P < 0.01$ ),与风速只有在晴天和阴天呈极显著正相关,相关系数分别为 0.17 和 0.47。同一天气条件下,

麻栎的蒸腾速率较栓皮栎对气候因子变化的响应更敏感。分别将 1 个时间序列的蒸腾与同一时间的气温、总辐射和饱和水汽压差进行灵敏度分析结果显示,在晴天,麻栎蒸腾对气温、总辐射和饱和水汽压差变化的灵敏度系数分别为 0.98,0.03 和 12.80,而栓皮栎对这 3 种气候因子变化的灵敏度系数分别为 0.66,0.02 和 8.42。Hu 等<sup>[15]</sup>也研究发现,麻栎蒸腾对光合有效辐射及饱和水汽压差的敏感度显著大于栓皮栎,这是由于麻栎根系生物量显著大于栓皮栎,而生物量越大,说明其生理活性旺盛,对外界环境变化也越敏感。

表 1 麻栎、栓皮栎蒸腾速率与气候因子相关性分析

蒸腾速率	天气状况	气温	总辐射	饱和水汽压差	风速	土壤温度	土壤含水量
麻栎	晴天	0.473**	0.924**	0.668**	0.171**	0.097*	0.095*
	阴天	0.635**	0.838**	0.744**	0.474**	0.018	0.080
	雨天	0.393**	0.703**	0.468**	0.080	0.263**	0.070
	观测期 <sup>#</sup>	0.511**	0.878**	0.636**	0.105**	0.197**	0.117**
栓皮栎	晴天	0.482**	0.933**	0.655**	0.160**	0.128**	0.146**
	阴天	0.658**	0.870**	0.677**	0.285**	0.043	0.144
	雨天	0.377**	0.754**	0.508**	0.087	0.208**	0.162**
	观测期 <sup>#</sup>	0.509**	0.898**	0.625**	0.080**	0.198**	0.183**

注: \* 表示在 0.05 水平显著相关; \*\* 表示在 0.01 水平极显著相关; # 为连续 3 个月的数据,包含晴天、阴天和雨天。

2.3.2 蒸腾速率与气候因子的逐步回归 由于单相关分析只能表达两两独立变量间的关系,而气候因子对蒸腾速率的影响是综合性的,因此采用逐步回归分析,以 5% 和 10% 的可靠性作为气候因子优先入选和

剔除的临界值,构建方程拟合麻栎、栓皮栎蒸腾速率与气候因子的变化特征(表 2)。由表 2 可知,在晴天,总辐射( $R_a$ )和饱和水汽压差( $V_{PD}$ )入选回归方程,且达到 0.01 显著性水平,回归方程均能够解释 2

个树种 89% 蒸腾速率的变化;在阴天,总辐射( $R_a$ )和饱和水汽压差( $V_{PD}$ )入选回归方程,且达到 0.01 显著性水平,回归方程分别能够解释麻栎和栓皮栎蒸腾速率 83% 和 81% 的变化;在雨天,仅总辐射( $R_a$ )入选回归方程,且达 0.01 显著性水平,回归方程分别能够解释麻栎和栓皮栎蒸腾速率 59% 和 57% 的变化。从晴天、阴天到雨天,回归方程所能解释的数据量在下降,这表明栎林蒸腾对气候因子变化响应的敏感度逐渐降低。雨天由于空气湿度大,气温偏低,叶片与空气之间的水势差减小,使得水分子扩散速率减慢,导致植物蒸腾对饱和水汽压差的敏感度下降<sup>[16]</sup>;其次蒸腾对饱和水汽压差的响应还受土壤水分影响<sup>[17]</sup>。因此,饱和水汽压差在晴天和阴天能入选回归方程,而在雨天只有总辐射入选。由图 1 可知,气候因子之间是相互作用的,气温和饱和水汽压差随着太阳辐射的增加而增加,总辐射在峰值时土壤含水量往往均在低谷。总辐射不仅诱导叶片气孔开合直接影响树木的蒸腾,而且通过气温间接影响蒸腾,而气温为树木蒸腾提供所需的热能<sup>[18]</sup>。饱和水汽压差也是如此,它是蒸腾的驱动力,不仅直接影响蒸腾,而且通过气温与空气相对湿度间接影响蒸腾。

表 2 麻栎、栓皮栎蒸腾速率与气候因子的逐步回归分析

天气状况	逐步回归方程	决定系数 $R^2$
晴天	$E_a = 1.38 + 0.030R_a + 9.56V_{PD}$	0.89
	$E_v = 3.27 + 0.025R_a + 4.41V_{PD}$	0.89
阴天	$E_a = -1.09 + 0.036R_a + 26.75V_{PD}$	0.83
	$E_v = 1.55 + 0.032R_a + 11.73V_{PD}$	0.81
雨天	$E_a = 4.55 + 0.038R_a$	0.59
	$E_v = 5.70 + 0.027R_a$	0.57

注: $E_a$ 为麻栎蒸腾速率( $g/(m^2 \cdot h)H_2O$ ); $E_v$ 为栓皮栎蒸腾速率( $g/(m^2 \cdot h)H_2O$ ); $R_a$ 为总辐射( $W/m^2$ ); $V_{PD}$ 为饱和水汽压差(kPa)。

2.3.3 蒸腾与气候因子的增强回归树分析 尽管通过逐步回归分析选出与蒸腾速率关系较密切的气候因子,但还是无法界定其在蒸腾速率变化过程中所起作用的程度。因此,本文以麻栎、栓皮栎蒸腾速率为因变量、气候因子为自变量,作增强回归树分析(BRT)验证逐步回归结果,量化气候因子的影响大小(表 3)。

由表 3 可知,在晴天,总辐射是影响蒸腾速率最大的气候因子,对麻栎和栓皮栎蒸腾速率的贡献度分别达到 91.7%,85.5%。饱和水汽压差是影响蒸腾速率的第二大因子,对麻栎、栓皮栎蒸腾速率的贡献度分别为 3.1% 和 9.8%。在阴天,影响麻栎、栓皮栎蒸腾速率程度最大的气候因子依然是总辐射,但是第二大影响因子为饱和水汽压差。在雨天,影响两者蒸腾速率最大的气候因子仍是总辐射,第二大影响因子为土壤含水量。通过 BRT 分析,总辐射是最主要的影

响因子,这与逐步回归分析结果(表 2)一致。但是随着天气由晴天向雨天转变,作为最大影响因子的总辐射的贡献度逐渐减小;其他气候因子如饱和水汽压差、气温、土壤含水量等的贡献度逐渐增加。这说明在总辐射较弱的天气,麻栎和栓皮栎的蒸腾速率对其他气候因子的响应有所增强。

表 3 不同天气下气候因子对麻栎和栓皮栎蒸腾速率的贡献度 单位:%

气候因子	晴天		阴天		雨天	
	麻栎	栓皮栎	麻栎	栓皮栎	麻栎	栓皮栎
总辐射	91.7	85.5	71.0	80.1	50.4	57.9
饱和水汽压差	3.1	9.8	21.8	5.6	11.8	6.9
土温	1.5	0.6	2.1	1.5	7.9	10.3
气温	1.2	1.2	2.8	8.2	4.5	10.8
土壤含水量	2.1	2.7	0.7	4.0	21.2	11.0
风速	0.4	0.2	1.6	0.6	4.2	3.1

## 3 讨论

### 3.1 麻栎、栓皮栎的蒸腾规律

本研究中麻栎、栓皮栎蒸腾日变化都是单峰型,未出现“午休”现象,这与杨良辰等<sup>[19]</sup>的研究结果一致,其研究发现,华北土石山区栓皮栎蒸腾日变化曲线为单峰型,峰值出现在 11:00;而赵勇等<sup>[20]</sup>研究发现,太行山低山丘陵区栓皮栎蒸腾日变化曲线为双峰型;贾国栋等<sup>[21]</sup>连续 3 天研究栓皮栎的蒸腾日变化发现,在前 2 日蒸腾日变化为双峰型,而在第 3 日蒸腾日变化曲线为单峰型。因此,相同树种的蒸腾日变化曲线并不固定,即使是同地区的同一树种在不同的时间其日变化曲线也不固定。这是因为蒸腾速率与当时的气候状况尤其是辐射因子有关,当光照过强,植物为了避免水分过度流失而收缩甚至关闭气孔,使得植物蒸腾作用下降;当外界环境恢复到适宜状态,植物蒸腾才逐渐增强。另外,土壤水分状况也是产生午休现象的重要原因,午间土壤水分蒸发强烈,土壤水势下降,植物根系吸水阻力增加,导致植物蒸腾作用下降。在本研究中,虽然光照强烈,但不足以使得气孔关闭,而且土壤水分充足,能较好维持林分蒸腾的需要,故没有“午休”现象。

在不同天气条件下,麻栎、栓皮栎的蒸腾速率表现为晴天>阴天>雨天。Konarska 等<sup>[22]</sup>研究认为,这是由于在晴朗干燥的环境下叶片气孔导度较阴暗潮湿环境下大;杨良辰等<sup>[19]</sup>也发现,在华北土石山区,栓皮栎、侧柏、刺槐等树木的蒸腾量表现为晴天>半晴天>阴天。不仅在温带、亚热带地区如此,在热带地区树种也表现出同样的变化趋势。赵玮等<sup>[23]</sup>研究发现,橡胶晴天的平均蒸腾速率、蒸腾量是雨天的 4 倍之多。综上所述,晴天的光照强烈,麻栎、栓皮栎

生理活动旺盛,蒸腾作用强,而阴天和雨天的光照减弱,空气湿度高,叶片与大气的水势差也随之减小,使得蒸腾速率降低。

### 3.2 蒸腾对气候因子变化的响应

大量研究<sup>[24-27]</sup>表明,植物蒸腾与总辐射、气温、饱和水汽压差以及土壤含水量等密切相关。本文研究表明,麻栎、栓皮栎蒸腾速率与总辐射、气温以及饱和水汽压差呈显著正相关。总辐射中的可见光影响叶片气孔的开合,气孔随着光量子密度的增加而增加,但当光照达到一定程度时,气孔导度便不再增加,这时光照增强反而使气孔收缩,产生“光合午休”现象,导致蒸腾降低。刘崑艳等<sup>[28]</sup>研究发现,当光照强度超过  $500 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  时,三叶青蒸腾速率迅速降低。同样,饱和水汽压差过大也会抑制植物蒸腾,莫康乐等<sup>[29]</sup>研究发现,当饱和水汽压差超过  $1 \text{ kPa}$  时,杨树蒸腾量迅速下降。

麻栎、栓皮栎蒸腾对气候因子的响应随天气变化而改变。晴天影响蒸腾的主要因子是总辐射和饱和水汽压差,而雨天影响因子主要为总辐射。在气候因子中,总辐射是影响蒸腾的最主要因子,太阳辐射不仅参与植物生理活动,诱导叶片气孔打开,还通过与气温、空气相对湿度等气候因子的协同作用共同影响气孔运动,从而直接影响蒸腾。雨天,气温低,空气湿度大,叶片与空气的水势差减小,土壤通气性降低,树木生理活动下降<sup>[30]</sup>。因此,雨天的主要影响因子与晴天、阴天不同,饱和水汽压差对树木蒸腾的影响减弱,而土壤含水量对蒸腾的影响明显增强,这从表 1 可以得到验证,从晴天到雨天,土壤含水量与麻栎、栓皮栎蒸腾速率的相关性系数逐渐增加,栓皮栎蒸腾速率与土壤含水量的相关系数从晴天的 0.14 增加到雨天的 0.16。从表 3 也可以发现,雨天土壤含水量对蒸腾的影响力有所增强,其对栓皮栎蒸腾速率的贡献度从晴天的 2.7% 增加到阴天的 4.0%,再到雨天上升至 11.0%。

蒸腾在时间尺度上对气候因子变化响应的研究较多,莫康乐等<sup>[29]</sup>研究认为,在较短时间尺度,气候因子对蒸腾影响较大,而在长时间尺度降雨量是影响蒸腾的主要因素。这与李蓝君等<sup>[31]</sup>的研究结果一致,其研究发现,黄土高原树木蒸腾量表现为丰水年 > 平水年 > 枯水年,降水量对蒸腾年际变化具有重要影响。赵平等<sup>[32]</sup>从 2004—2007 年连续 4 年研究成熟的马占相思林蒸腾耗水的年际变化发现,降雨量对蒸腾活动没有显著影响,降水对森林蒸腾的影响不在于降雨量的大小,而是降雨频次,频繁的降雨降低植物蒸腾强度。降水量还影响植物蒸腾对气候因子响应的敏感性,何秋月等<sup>[33]</sup>研究发现,在降雨截留后,刺槐蒸腾速率对饱和水汽压差的敏感性小于对照区。

然而,也有研究表明,不论是短时间尺度还是长时间尺度,气候因子对树木蒸腾的影响都占主导。马玲等<sup>[34]</sup>研究发现,不论是日变化还是季节变化,光合有效辐射、气温和饱和水汽压差都是影响马占相思蒸腾的主要因素;赵玮等<sup>[23]</sup>研究发现,干季对橡胶蒸腾速率影响最大的是气温,而雨季对橡胶树蒸腾速率影响最大的是光合有效辐射。综上所述,树木蒸腾在时间尺度对气候变化的响应取决于其所处地区的水热状况。在南方水热丰富地区,降雨量对树木蒸腾的影响较小,气候因子如辐射、饱和水汽压差、气温等对树木蒸腾的影响较大;在北方干旱半干旱地区,降雨量对树木长时间尺度蒸腾的影响较大。本研究所处的长江三角洲地区属于亚热带海洋性季风气候,年降雨量和年平均气温较高,水热状况较好,因此不论在短时间尺度还是在长时间尺度上麻栎、栓皮栎蒸腾对气候因子变化的响应都比较敏感,尤其是对总辐射、饱和水汽压差、气温以及土壤水分。

## 4 结论

(1) 在晴天、阴天,麻栎和栓皮栎蒸腾速率日变化均为单峰型,而雨天的蒸腾速率日变化波动较大。晴天麻栎、栓皮栎的日均蒸腾速率分别为  $31.9, 25.3 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}) \text{ H}_2\text{O}$ , 大于阴天 ( $24.3, 18.6 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}) \text{ H}_2\text{O}$ ) 和雨天 ( $16.8, 13.6 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}) \text{ H}_2\text{O}$ )。麻栎的日均蒸腾速率显著大于栓皮栎。

(2) 在晴天、阴天和雨天,总辐射、气温、饱和水汽压差与蒸腾速率呈极显著正相关。在同一天气条件,麻栎的蒸腾速率较栓皮栎对气候因子的响应更敏感。雨天,土壤含水量对麻栎、栓皮栎蒸腾的影响有所增强。

(3) 总辐射是影响麻栎和栓皮栎蒸腾速率的最大气候因子,其贡献度在晴天分别为 91.7% 和 85.5%。从晴天、阴天到雨天,其他气候因子如饱和水汽压差、气温、土壤含水量等对蒸腾速率的贡献度逐渐增加。

### 参考文献:

- [1] Paço T A, David T S, Henriques M O, et al. Evapotranspiration from a Mediterranean evergreen oak savannah: The role of trees and pasture[J]. Journal of Hydrology, 2009, 369(1/2): 98-106.
- [2] Schlesinger W H, Jasechko S. Transpiration in the global water cycle[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 189/190: 115-117.
- [3] Miyazawa Y, Tateishi M, Komatsu H, et al. Implications of leaf-scale physiology for whole tree transpiration under seasonal flooding and drought in central Cambodia [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 198/199: 221-231.
- [4] Chang X X, Zhao W Z, Liu H, et al. Qinghai spruce (*Picea crassifolia*) forest transpiration and canopy con-

- ductance in the upper Heihe River Basin of arid north-western China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 198/199: 209-220.
- [5] Zhang G H, Liu G B, Zhang P C, et al. Influence of vegetation parameters on runoff and sediment characteristics in patterned *Artemisia capillaris* plots[J]. *Journal of Arid Land*, 2014, 6(3): 352-360.
- [6] Zheng C L, Wang Q. Seasonal and annual variation in transpiration of a dominant desert species, *Haloxylon ammodendron*, in Central Asia up-scaled from sap flow measurement[J]. *Ecohydrology*, 2015, 8(5): 948-960.
- [7] 朱大奎, 王颖, 王栋, 等. 长江三角洲水环境水资源研究[J]. 第四纪研究, 2004, 24(5): 486-494.
- [8] Dai Z J, Du J Z, Li J F, et al. Runoff characteristics of the Changjiang River during 2006: Effect of extreme drought and the impounding of the Three Gorges Dam[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(7): 406-411.
- [9] Xu K H, Milliman J D, Yang Z S. Climatic and anthropogenic impacts on the water and sediment discharge from the Yangtze River (Changjiang), 1950—2005[M]. Hoboken: John Wiley, 2007.
- [10] 夏江江, 杨庆, 郑子彦, 等. 土地利用变化对 20 世纪中国地区气候干湿变化的影响[J]. 气候与环境研究, 2015, 20(2): 154-166.
- [11] Pausas J G, Pereira J S, Aronson J. Cork oak trees woodlands on the edge[M]. Washington D C: Island Press, 2009.
- [12] Jones H G. Plants and microclimate: A quantitative approach to environmental plant physiology[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [13] Granier A. A new method of sap flow measurement in tree stems[J]. *Annales Des Sciences Forestieres*, 1985, 42: 193-200.
- [14] Lundblad M, Lindroth A. Stand transpiration and sap-flow density in relation to weather, soil moisture and stand characteristics[J]. *Basic and Applied Ecology*, 2002, 3(3): 229-243.
- [15] Hu Y T, Zhao P, Zhu L W, et al. Responses of sap flux and intrinsic water use efficiency to canopy and understory nitrogen addition in a temperate broad-leaved deciduous forest[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 648: 325-336.
- [16] Fuchs M, Stanghellini C. The functional dependence of canopy conductance on water vapor pressure deficit revisited[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2018, 62: 1211-1220.
- [17] Chen L X, Zhang Z Q, Zha T G, et al. Soil water affects transpiration response to rainfall and vapor pressure deficit in poplar plantation[J]. *New Forests*, 2014, 45: 235-250.
- [18] 熊伟, 王彦辉, 徐德应. 宁南山区华北落叶松人工林蒸腾耗水规律及其对环境因子的响应[J]. 林业科学, 2003, 29(2): 1-7.
- [19] 杨良辰, 张健强, 杨新兵, 等. 华北土石山区 7 种优势乔木树种耗水分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(3): 69-75.
- [20] 赵勇, 陈桢, 樊巍, 等. 太行山低山丘陵区 7 种典型植物水分利用特征[J]. 中国水土保持科学, 2010, 8(5): 61-66.
- [21] 贾国栋, 余新晓, 朱建刚, 等. 北京山区刺槐、栓皮栎生长旺季液流特性及影响因子[J]. 水土保持通报, 2010, 30(5): 50-56.
- [22] Konarska J, Uddling J, Holmer B, et al. Transpiration of urban trees and its cooling effect in a high latitude city[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2016, 60(1): 159-172.
- [23] 赵玮, 张一平, 宋清海, 等. 橡胶树蒸腾特征及其与环境因子的关系[J]. 生态学杂志, 2014, 33(7): 1803-1810.
- [24] Ungar E D, Rotenberg E, Raz-Yaseef N, et al. Transpiration and annual water balance of Aleppo pine in a semiarid region: Implications for forest management[J]. *Forest Ecology and Management*, 2013, 298: 39-51.
- [25] Valipour M. Importance of solar radiation, temperature, relative humidity, and wind speed for calculation of reference evapotranspiration[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2015, 61(2): 239-255.
- [26] Li W, Si J H, Yu T F, et al. Response of *Populus euphratica* Oliv. sap flow to environmental variables for a desert riparian forest in the Heihe River Basin, Northwest China[J]. *Journal of Arid Land*, 2016, 8(4): 591-603.
- [27] Gazal R M, Scott R L, Goodrich D C, et al. Controls on transpiration in a semiarid riparian cottonwood forest[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 137(1/2): 56-67.
- [28] 刘崑艳, 周以飞, 李清, 等. 三叶青的蒸腾作用与气孔结构研究[J]. 中草药, 2015, 46(17): 2610-2617.
- [29] 莫康乐, 陈立欣, 周洁, 等. 永定河沿河沙地杨树人工林蒸腾耗水特征及其环境响应[J]. 生态学报, 2014, 34(20): 5812-5822.
- [30] 朱秀群, 侯士田, 蓝芙宁, 等. 土壤水分对玉米蒸腾特性的影响[J]. 水利水电技术, 2019, 50(9): 44-52.
- [31] 李蓝君, 宋孝玉, 夏露, 等. 黄土高原沟壑区典型造林树种蒸散发对气候变化的响应[J]. 农业工程学报, 2018, 34(20): 148-159.
- [32] 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.
- [33] 何秋月, 闫美杰, 张建国, 等. 黄土高原半湿润区刺槐树干液流对人工截留降雨输入及环境因子的响应[J]. 植物生态学报, 2018, 42(4): 466-474.
- [34] 马玲, 饶兴权, 赵平, 等. 马占相思整树蒸腾的日变化和季节变化特征[J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(1): 67-73.