

文章编号: 1001-1498(2008)04-0475-06

华北石质山区杜仲人工林蒸腾特征及水分供求关系

王鹤松¹, 张劲松^{1*}, 孟平¹, 高峻¹, 任庆福¹, 贾长荣²

(1. 中国林业科学研究院林业研究所, 国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091; 2. 济源市国有大沟河林场, 河南 济源 454650)

摘要:采用由热扩散树干液流技术测算得到的、周期为 2 个主要生长季节(4—9 月)杜仲人工林蒸腾数据, 结合同步观测得到降雨量以及冠层微气象数据, 分析了华北石质山区 10 年生杜仲人工林耗水规律及水分供求关系, 旨在为该地区杜仲的发展提供必要的水分生态理论依据。结果表明: (1) 杜仲人工林蒸腾量(TR)呈现出明显的日内变化和日际变化特征, 在晴天条件下, 杜仲人工林蒸腾呈现单峰变化趋势, 在多云及阴天条件下, 呈现多峰变化趋势; 阴天日蒸腾值明显低于晴天及多云日; 杜仲蒸腾的日际变化表现为: 4—5 月逐渐升高, 6 月份左右达到高峰值, 7 月份逐渐降低, 2005 年及 2006 年 4—9 月蒸腾总量分别为 268.5、212.0 mm, 4—9 月各月蒸腾总量所占总蒸腾量的比例在 2005 年分别为 12.3%、20.4%、20.2%、18.2%、15.9%和 13.0%, 在 2006 年分别为 10.6%、21.7%、23.3%、17.4%、14.6%和 12.4%; (2) TR 与冠层太阳总辐射(Ra)、空气温度、湿度及风速等微气象要素有很好的复相关性($r=0.01$), 各月影响 TR 的最主要微气象因子都是 Ra ; (3) 4—9 月降雨总量(P)与 TR 的比值(P/TR)都大于 1.0, 且除 4 月份外, 各月 P/TR 也大于或接近于 1.0, 说明降水可以满足杜仲人工林蒸腾耗水的需要。

关键词:杜仲人工林; 蒸腾; 水分供求关系

中图分类号: Q948.11

文献标识码: A

Transpiration Variation and Relationship between Supply and Demand of Water for *Eucommia ulmoides* Plantations in the Rocky Mountainous Area of North China

WANG He-song¹, ZHANG Jin-song¹, MENG Ping¹, GAO Jun¹, REN Qing-fu¹, JIA Chang-rong²

(1. Research Institute of Forestry, CAF; Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry Administration, Beijing 100091, China;

2. Daguohu National Forest Farm of Jiyuan, Jiyuan 454650, He'nan, China)

Abstract: The transpiration variation and relationship between supply and demand of water for the *Eucommia ulmoides* plantations in the rocky mountainous area of North China were analyzed based on the experimental data of tree sap flow, canopy, micrometeorological factors and rainfall. The trees were 10 years old. The experiment was conducted in April-September of 2005 and 2006. The aim of this study is to provide the essential evidence about water ecology for developing *E. ulmoides* plantations in the area. The main results are as follows: (1) The diurnal variations of *E. ulmoides* plantations transpiration (TR) were demonstrated as a single-peak curve in clear day. In cloudy day, it was demonstrated as a multi-peak curve. In overcast and rain day, it was demonstrated as a multi-peak curve and much less than that in clear or cloudy day. The daily variations of transpiration (TR) was characterized with that TR rose gradually in April, and reached a peak in June, fell down readily in July. In 2005

收稿日期: 2007-05-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30471371)、科技部公益性项目(2003D B4J142)及国家“十一五”攻关课题(2006BAD03A11)部分研究内容

作者简介: 王鹤松(1981—),男,硕士生,主要研究方向:农林气象。

*通讯作者:张劲松(1968—),男,博士、研究员,主要研究方向:农林气象、复合农林业。

and 2006, the total TRs ($ToTR$) were 268.5 mm, 212.0 mm in the main season (April-September), respectively. In Apr, May, Jun, Jul, Aug and Sep, the ratio of the monthly TR to $ToTR$ were 12.3%, 20.4%, 20.2%, 18.2%, 15.9% and 13.0% in 2005, 10.6%, 21.7%, 23.3%, 17.4%, 14.6% and 12.4% in 2006. (2) In all months during the main growth season of 2005 and 2006, TR showed significantly compound correlated with the solar radiation (Ra), air temperature, humidity, and wind speed over the canopy ($r = 0.01$), and Ra was the most important micro-meteorological factor effecting on TR through comparing the partial coefficient; (3) In terms of the whole growth season, the ratio of rainfall to transpiration (P/TR) was higher than 1.0 except in April. So, there was no water supply and demand conflict, or water shortage and water stress as for the main growth season in the experiment area.

Key words: *Eucammia ulmoides* plantations; transpiration; relationship between supply and demand of water

植被蒸腾既是热量平衡和水量平衡的重要组成部分,受土壤、大气及植物本身因素的综合影响,是一个复杂的物理过程和生理过程,在土壤-植物-大气连续体 (SPAC) 水热传输过程中占有极为重要的地位。蒸腾问题的研究一直是农学、林学、气象、水文、土壤、地理等相关学科及领域共同关注的重要课题。随着水资源紧缺问题的日益严重,有关蒸腾问题的研究已受国际社会的愈加重视^[1]。揭示林木蒸腾耗水特征及水分供求关系,对水资源紧缺地区林业生产实践等具有重要的理论指导意义。杜仲 (*Eucammia ulmoides* Oliv.) 是第三纪孑遗珍贵树种及贵重药材,属国家二级保护植物,生态适应性强,种植范围和面积广^[2],是林业生态建设中主要造林树种之一,具有重要的经济和生态价值。我国华北山区将该树种作为生态经济型树种,纳入退耕还林建设模式,且部分村庄将其纳入农业产业结构调整的重要内容;但华北山区地处干旱半干旱季风气候带,干旱特别是春旱现象比较严重,且土层贫瘠、土壤保水能力差,水资源紧缺是制约该地区林业生产和植被建设最根本的生态要素问题。研究华北石质山区杜仲人工林蒸腾特征及水分供求关系,具有重要的理论及实践意义。

有关杜仲生物学特性的研究多见于药理分析,有关其蒸腾问题的研究,尽管谈峰等^[3]、张劲松等^[4]分析了杜仲叶片蒸腾及气孔变化规律,曹云等^[5]基于 1 年内 7-9 月份非连续性日观测数据,从植株 (个体) 尺度分析了南方红壤区杜仲树干蒸腾变化规律以及与形态特征、微气象因子的关系,但有关林分尺度上杜仲蒸腾耗水问题研究仍缺少系统性,有待进一步深入。本研究将采用 2 个连续主要生长季节的实测蒸腾数据及其冠层微气象数据,分析华北石质山区 10 a 杜仲人工林蒸腾耗水特征及水分供求关系的研究,以补充和丰富杜仲等药用树

种水分生理生态研究内容,为当地发展杜仲人工林提供必要的理论依据,并望进一步丰富药用树种水分生理生态研究内容。

1 试验设计

1.1 试验区概况

试验区地处太行山南段南麓,黄河流域北缘,属暖温带大陆性季风气候。全年日照时数 2 367.7 h, 年日照率 54%, 稳定通过 0 的多年平均积温 5 282, 大于等于 10 的多年平均积温达 4 847。历年平均降水量 641.7 mm, 但由于受季风气候的影响, 年内季节性分布不均匀。6—9 月份多年平均降水量为 438.0 mm, 占全年的 68.3%。试验区土壤以石灰岩风化母质淋溶性褐土、棕壤土为主, 土层厚度 50~80 cm, pH 值 6.8~8.5, 石砾含量为 100~180 g·kg⁻¹, 有机质含量在 10 g·kg⁻¹ 左右, 速效 N 21.4~80.0 mg·kg⁻¹, 速效 P 5.4~16 mg·kg⁻¹, 速效 K 60~103 mg·kg⁻¹。

1.2 试验材料及方法

本研究的具体对象是水平梯田杜仲人工林, 梯田南北宽 20 m, 东西长 120 m, 株行距 2 m × 3 m, 平均株高 6.5 m, 南北冠幅 1.5 m, 郁闭度 0.47, 土层厚度 95 cm。1996 年栽植, 带行向为东西行。经每木检尺, 在试验地中部选择 6 棵相近样株。

1.2.1 冠层小气候观测 2005 年和 2006 年 4 月 1 日—9 月 30 日, 在 6 株样株中心处冠层活动面上 1.5 m 高度处, 用小气候自动监测系统连续观测空气温度 (T_a)、相对湿度 (RH)、风速 (V)、太阳总辐射 (R_a)、降雨量 (P)。 R_a 、 V 、 T_a 及 RH 、 P 所采用的传感器 (探头) 分别为 LD200X、05103、HMP45C、TE525M。数据采集器为 CR10X, 每 2 min 采集 1 次, 每 10 min 输出 1 组平均值。

1.2.2 树干液流与蒸腾观测 在 6 棵树的东、南、

西、北 4 个方向处,采用热扩散树干液流技术测定树干液流,液流测算公式^[6-8]如下:

$$F_s = 0.0119 K^{1.231} \times SA \times 3.6 \quad (1)$$

$$K = \frac{dT_M - dT}{dT} \quad (2)$$

式(1)、(2)中: F_s 为树干液流速率($L \cdot h^{-1}$),可近似为蒸腾速率^[9-10]; SA 为边材面积(cm^2)。 dT 为某时刻温差值, dT_M 为一日内最大温差值。取 6 棵树的液流平均值为单株林木蒸腾最终测定值,经尺度转换,可得到林分尺度上的蒸腾值。传感器规格:30 mm 探针,下部探针距离地面 120 cm 左右。数据采集器为 CR10X,观测时间与小气候同步。

2 结果与分析

2.1 杜仲蒸腾日内变化规律

在晴天日(2005年 5 月 11 日、2006 年 7 月 20 日)

和 2006 年 7 月 23 日),杜仲人工林蒸腾速率(TR)的日内变化呈单峰趋势(图 1);在多云日(2005 年 5 月 12 日、2005 年 5 月 14 日和 2006 年 7 月 21 日), TR 呈现多峰波动变化趋势;在阴天日(2005 年 5 月 13 日、2006 年 7 月 22 日), TR 很低,表现为小幅波动特征,其液流值明显比晴天及多云天气下的低。相邻几天内,因叶面积差异小,根系所在的深层土壤含水量变化不大,故不同天气蒸腾速率的日内变化特征的差异主要是由冠层微气象因子变化差异引起的。在晴天天气下,蒸腾速率随着太阳辐射、空气温度的升高而增大,随着相对湿度的升高而减小,因此表现出明显的昼夜节律变化特征;在多云天气下,由于太阳辐射、空气温湿度等气象因子的波动,蒸腾速率表现出多峰的变化特征;阴天由于太阳辐射、空气温度很低,而相对湿度较高,蒸腾明显受到抑制,因而远低于在晴或多云天气的值,在很低幅度内波动。

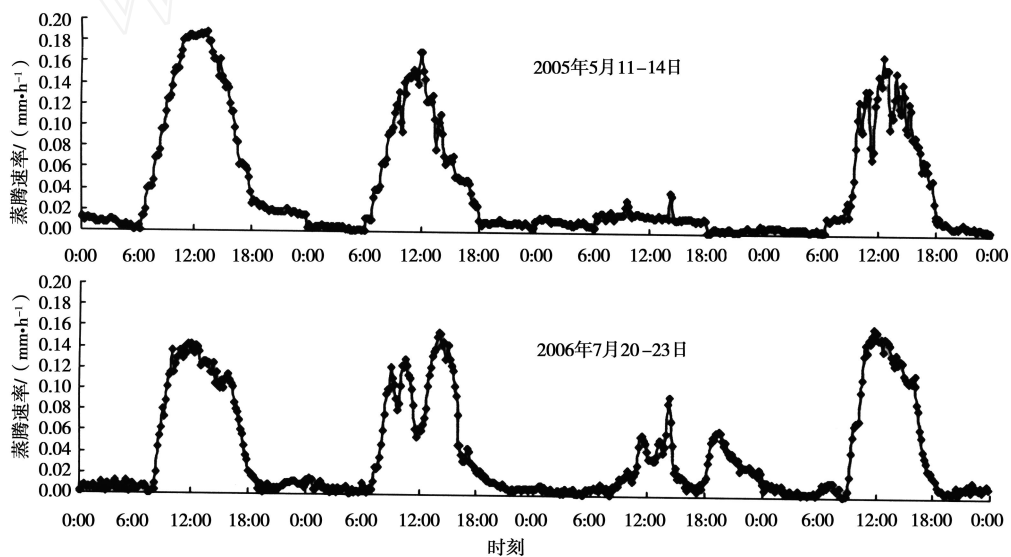


图 1 2005 年和 2006 年杜仲人工林主要生长季节蒸腾速率日内变化规律

2.2 杜仲蒸腾日际变化规律

按 $1.667 \text{株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的密度将单株蒸腾速率转换为群体或单位土地面积蒸腾速率,并将 4—9 月内各日的

蒸腾速率进行积分,得到了杜仲人工林 2005 年和 2006 年主要生长季节的蒸腾量日际变化曲线(图 2),并统计得出各月蒸腾量及所占全年的比例(表 1)。

表 1 年内各月蒸腾量(TR)及其所占主要生长时期蒸腾总量的比例(RA)

年份	蒸腾量	4月	5月	6月	7月	8月	9月	合计
2005	TR/mm	33.0	54.8	54.1	48.9	42.7	35.0	268.5
	$RA/\%$	12.3	20.4	20.2	18.2	15.9	13.0	100.0
2006	TR/mm	22.5	46.0	49.5	36.8	31.0	26.2	212.0
	$RA/\%$	10.6	21.7	23.3	17.4	14.6	12.4	100.0

从图 2 及表 1 可以看出:杜仲日蒸腾量 (TR) 呈现出明显的日际变化或月变化特征。从 4 月份起,随着气温的升高以及叶片的生长、叶面积指数的增加, TR 逐渐增加,在 6 月左右达到最高值,7 月以后逐渐下降。2005 年及 2006 年杜仲人工林在主要生长期 (4—9 月) 的 TR 总值分别为 268.5、212.0 mm,二者相差 56.5 mm。可见,不同年份间蒸腾量相差较大,但各月 TR 总量所占主要生长期 (4—9 月) TR 总值的比例在不同年份间的相差量较小 (表 1),均不及 3.1 个百分点。前者由于不同年

份在气候上存在差异性,特别是降水量及太阳辐射总量或日照时数的差异,如 2005 年 5、6、7 月份太阳辐射总量及降水量分别为 $209.12 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 22.3 mm; $208.36 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 21.6 mm; $145.63 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 21.2 mm; 而 2006 年同期该值分别为 $192.12 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 20.2 mm; $206.08 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 20.3 mm; $137.18 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 17.9 mm。后者说明因树木自身特性的存在,即便外部条件发生变化,如气候年型的不同,但植物蒸腾作用自身生理生态特征规律不会出现本质变化。

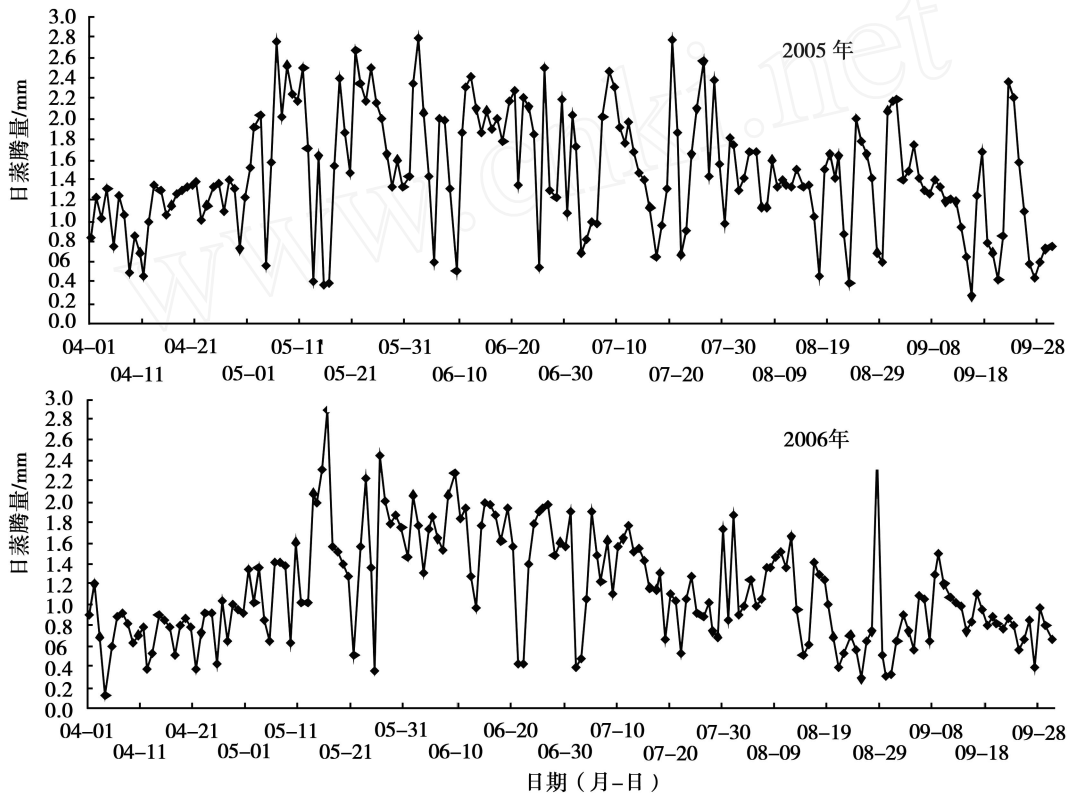


图 2 2005 年和 2006 年杜仲人工林蒸腾量 (TR) 日际变化规律

2.3 水分供求关系

蒸腾是植物耗水的主要方式,一般认为可将蒸腾视为植物的总耗水。在华北石质山地大都没有地下水灌溉条件,降水是林地水分的唯一供水来源。从表 2 可知:就整个主要生长期而言,2005 年和 2006 年降雨 (P) 总量与杜仲人工林蒸腾量 (TR) 的比值均 > 1.0 。除 4 月份外,其余各月 P 与 TR 的比值也均 > 1.0 。由于本研究杜仲人工林的立地条件是水平梯田,梯田宽度 20 m,且土层厚度可达 95 cm,故就当地降雨强度而言,一般不存在地表径流及渗漏现象。另外,华北山区土壤含水量较低,当

地土壤日蒸发量在蒸散量中所占比例不会大于 10%,且本研究人工林郁闭度已接近 0.5,故土壤蒸发强度会更低。这说明除 4 月份外,降水可以满足杜仲人工林蒸腾耗水的需要,即不存在水分供求关系矛盾问题。从表 2 还可知:尽管在 2005 年主要生长期 (4—9 月),杜仲的蒸腾总量及降水总量与 2006 年同期值的差异均较大,差值分别为 56.5、149.1 mm,但该时期降雨总量与蒸腾总量的比值在 2005 年和 2006 年之间差异却很小,仅为 0.1。这说明杜仲人工林主要生长季节的蒸腾总量与降水量总量存在一定的正相关关系。

表 2 不同年份各月降水量 (P)、蒸腾量 (TR)及二者之比 (P/TR)

月份	2005年			2006年		
	TR/mm	P/mm	P/TR	TR/mm	P/mm	P/TR
4	33.0	12.7	0.4	22.5	21.1	0.9
5	54.8	64.7	1.2	46.0	68.7	1.5
6	54.1	52.3	1.0	49.5	57.0	1.2
7	48.9	241.3	4.9	36.8	180.9	4.9
8	42.7	110.7	2.6	31.0	65.4	2.1
9	35.0	132.2	3.8	26.2	71.7	2.7
全时段	268.5	613.9	2.3	212.0	464.8	2.2

2.4 蒸腾速率与冠层微气象因子的关系

冠层微气象因子对植物蒸腾具有重要的影响作用。本研究引入风速 ($V, m \cdot s^{-1}$)、大气温度 ($T_a, ^\circ C$)、大气相对湿度 ($RH, \%$)、冠层太阳总辐射 ($R_a, W \cdot m^{-2}$)，分析了主要生长期树木蒸腾与冠层微气象因子的关系。结果表明：各月 TR 与 V 、

T_a 、 RH 、 R_a 有较好的复相关关系 (表 3)，复相关系数均大于 0.826， F 计算值均大于理论值，可通过 0.01 水平上的显著性检验 ($\alpha = 0.01$)。比较 TR 与 V 、 T_a 、 RH 、 R_a 的偏相关系数表明 (表 3)：各月都是 TR 与 R_a 的偏相关系数最大。说明主要生长期，影响杜仲人工林 TR 最主要微气象因子为 R_a 。

表 3 杜仲生长期蒸腾速率 (TR)与冠层气象因子的回归方程

年份	月份	回归方程	复相 关系数	偏相关系数				F 计算值	
				T_a	RH	R_a	V		
2005	4	$TR = 0.00045 + 0.00035T_a - 0.00008RH + 0.00011R_a + 0.00336V$	0.826	0.224	-0.074	0.649	0.047	3.925.5	
	5	$TR = -0.00202 + 0.00067T_a - 0.00011RH + 0.0002R_a + 0.00234V$	0.876	0.190	-0.043	0.795	0.165	4.529.5	
	6	$TR = -0.02293 + 0.00159T_a - 0.00003RH + 0.00028R_a - 0.00484V$	0.894	0.144	-0.066	0.832	-0.195	3.571.2	
	7	$TR = -0.09589 + 0.00404T_a - 0.00022RH + 0.00031R_a - 0.00825V$	0.912	0.230	-0.049	0.849	-0.200	5.518.5	
	8	$TR = 0.0131 + 0.00082T_a - 0.0002RH + 0.00025R_a + 0.0009V$	0.893	0.094	-0.073	0.867	0.021	4.408.1	
	9	$TR = 0.03922 + 0.00075T_a - 0.00008RH + 0.00023R_a - 0.001V$	0.833	0.073	-0.053	0.785	-0.029	2.441.9	
	2006	4	$TR = -0.00422 + 0.00088T_a - 0.00006RH + 0.0001R_a + 0.004V$	0.897	0.261	-0.076	0.842	0.243	4.443.7
		5	$TR = 0.00746 + 0.00119T_a - 0.00019RH + 0.00019R_a + 0.00286V$	0.844	0.120	-0.089	0.781	0.067	2.749.3
		6	$TR = -0.00175 + 0.00233T_a - 0.00083RH + 0.00022T_a + 0.001V$	0.956	0.131	-0.047	0.939	0.038	11.462.8
7		$TR = -0.08576 + 0.0009T_a - 0.00006RH + 0.00025R_a - 0.0019V$	0.915	0.279	-0.086	0.859	-0.075	5.751.5	
8		$TR = 0.0077 + 0.00328T_a - 0.0003RH + 0.00022R_a + 0.00678V$	0.839	0.014	-0.023	0.834	0.198	2.641.6	
9		$TR = -0.01669 + 0.00198T_a - 0.00005RH + 0.00014R_a - 0.0014V$	0.839	0.247	-0.036	0.760	-0.049	2.555.9	

3 结论与讨论

杜仲人工林蒸腾量 (TR) 呈现出明显的日内变化特征和日际变化特征。在晴天条件下，TR 呈现单峰变化趋势；多云条件下，TR 在白天呈现多峰波动变化趋势；在阴天、雨天条件下，TR 很低，表现为小幅波动特征，其值明显比晴天或多云天气下的低。杜仲 TR 的日际变化表现为：4—5 月逐渐升高、6 月份左右达到高值、7 月份逐渐降低。尽管主要生长季节 (4—9 月) 总蒸腾量在不同年份间相差较大，但各月 TR 总量所占主要生长期总蒸腾量的比例在不同年份间的差值很小，前者由于不同年份在气候上存在差异性，后者说明因树木自身特性的存在，即便外部条件发生变化，如气候年型的不同，但植物蒸腾作用等自身生理生态特征规律不会出现本质

变化。

蒸腾是植物耗水的主要方式，降水是本研究林地水分的唯一供水来源。由于立地条件及林分结构、降雨强度、土壤水分状况等因素的限制，杜仲人工林一般不会发生雨后渗漏及地表径流，且土壤蒸发强度低。分析降雨量和蒸腾量的比例关系表明：除 4 月份外，降水可以满足杜仲人工林蒸腾耗水的需要。就整个主要生长季而言，杜仲人工林不存在水分供求关系矛盾问题。

TR 与冠层 R_a 、 T_a 、 RH 及 V 等微气象要素有很好的复相关性 ($\alpha = 0.01$)，且各月影响 TR 的最主要微气象因子都是 R_a 。

本研究从植株及林分尺度，系统地研究了杜仲蒸腾特征及水分供求关系等水分生理生态问题，不仅可为试验所在地发展提供重要的理论依据，并丰

富和补充了药用树木的生理生态内容。

参考文献:

- [1] 张劲松,孟平,孙惠民,等.毛乌素沙地樟子松蒸腾变化规律及其与微气象因子的关系[J].林业科学研究,2006,19(1):45-50
- [2] 周政贤,谢双喜.杜仲人工林生物量及生产力研究[J].林业科学研究,1994,7(6):646-651
- [3] 谈峰,梁莉,周彦兵.杜仲叶片蒸腾速率的因子分析[J].西南师范大学学报,1996,21(2):162-167
- [4] 张劲松,孟平,尹昌君.杜仲蒸腾强度和气孔行为的初步研究[J].林业科学,2002,38(3):34-37
- [5] 曹云,黄志刚,欧阳志云,等.南方红壤区杜仲(*Eucammia utmoides*)树干液流动态[J].生态学报,2006,26(9):2887-2895
- [6] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas fir stand by means of sap flow measurements[J]. Tree Physiology, 1987, 3: 309-320
- [7] Granier A, Huc R, Barigah S. Transpiration of natural rain forest and its dependence on climatic factors[J]. Agricultural and forest meteorology, 1996, 78: 19-29
- [8] Ping Lu, Lauren U, ZHAO Ping. Granier's Thermal Dissipation Probe (TDP) method for measuring sap flow in trees: theory and practice [J]. Acta Botanica Sinica, 2004, 46(6): 631-646
- [9] Fredrik L, Anders L. Transpiration response to soil moisture in pine and spruce trees in Sweden [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2002, 112: 67-85
- [10] 陈仁升,康尔泗,赵文智,等.中国西北干旱区树木蒸腾对气象因子的响应[J].生态学报,2004,24(3):477-485

《植物遗传资源学报》征订启事

《植物遗传资源学报》是中国农业科学院作物科学研究所和中国农学会主办的学术期刊,为中国科技核心期刊、全国优秀农业期刊。该刊为中国科技论文统计源期刊、中国科学引文数据库来源期刊(核心期刊)、中国核心期刊(遴选)数据库收录期刊、中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊,又被《中国生物学文摘》和中国生物学文献数据库、中文科技期刊数据库收录。据中国期刊引证研究报告统计,2007年度《植物遗传资源学报》影响因子达 0.914。

报道内容为大田、园艺作物,观赏、药用植物,林用植物、草类植物及其一切经济植物的有关植物遗传资源基础理论研究、应用研究方面的研究成果、创新性学术论文和高水平综述或评论。诸如,种质资源的考察、收集、保存、评价、利用、创新,信息学、管理学等;起源、演化、分类等系统学;基因发掘、鉴定、克隆、基因文库建立、遗传多样性研究。

季刊,大 16 开本,128 页。定价 20 元,全年 80 元。各地邮局发行,邮发代号:82-643。国内刊号 CN11-4996/S,国际统一刊号 ISSN1672-1810。

本刊编辑部常年办理订阅手续,如需邮挂每期另加 3 元。

地 址:北京市中关村南大街 12 号 中国农业科学院《植物遗传资源学报》编辑部

邮 编:100081 电 话:010-62180257 62180279(兼传真)

E-mail: zwyczyxb2003@163.com zwyczyxb2003@sina.com