

滨海沙地木麻黄蒸腾速率及其影响因子

吴锡麟¹, 叶功富², 吴文英¹, 殷亮³, 张立华⁴

(1. 闽江学院地理科学系, 福建 福州 350108; 2. 福建省林业科学研究院, 福建 福州 350012;
3. 广西防城港市水利水电勘测设计院, 广西 防城港 538001;
4. 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003)

摘要: 对福建省东山县赤山林场滨海沙地木麻黄的蒸腾速率及其影响因子进行了为期 1 a 的研究。结果表明: (1) 木麻黄小枝蒸腾速率(Tr) 全年日变化均呈单峰曲线, 峰值通常出现在 12:00-14:00 时, 并在 16:00 时后急剧下降。蒸腾速率日变化在各月间差异较大, 峰值在 1.08-3.43 $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间, 最大值出现在 8 月份, 最小值出现在 12 月份。蒸腾速率日变化趋势与温度日变化趋势一致。(2) 小枝蒸腾速率的季节变化明显, 呈“单峰型”, 7-9 月蒸腾速率较高, 5、6、10 月份蒸腾速率相对较低, 11-4 月蒸腾速率最低。(3) 相对湿度、大气温度、水蒸汽压亏缺等气象因子是影响小枝蒸腾速率季节变化的主要环境因子, 其中大气温度(Ta) 是最主要的环境因子。经逐步回归分析, 可用二次函数 $Tr = 4.603 - 0.372Ta + 0.009Ta^2$ ($R^2 = 0.855$, $P < 0.01$) 表达。土壤含水量(Wc) 与蒸腾速率呈显著的相关关系, 可用指数函数 $Tr = 0.665e^{0.09Wc}$ ($R^2 = 0.848$, $P < 0.01$) 表达。

关键词: 滨海沙地; 木麻黄; 蒸腾速率; 相对湿度; 大气温度; 水蒸汽压亏缺

中图分类号: S792.93 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-389X(2013)01-0001-06

Transpiration rate and influencing environmental factors of *Casuarina equisetifolia* on coastal sand

WU Xi-lin¹, YE Gong-fu², WU Wen-ying¹, YIN Liang³, ZHANG Li-hua⁴

(1. Department of Geography, Minjiang University, Fuzhou, Fujian 350108, China;
2. Fujian Academy of Forestry, Fuzhou, Fujian 350012, China; 3. Fangchenggang Design
Institute of Water Conservancy and Hydropower Power, Fangchenggang, Guangxi 538001, China;
4. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai, Shandong 264003, China)

Abstract: The transpiration rate and its influencing factors of *Casuarina equisetifolia* on the coastal sands of Chishan Forest Center in Dongshan, Fujian were investigated for 1 year. The results showed as follows. (1) The diurnal variation of transpiration rate (Tr) in branchlet appeared as a single-peak curve. The transpiration rate peaked at 12:00-14:00 and sharply dropped after 16:00. The diurnal variation of transpiration rate varied among different months, of which the daily peak was the highest in August and the lowest in December, 3.43 and 1.08 $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, respectively. The diurnal variation of transpiration rate presented similar trend with that of atmospheric temperature (Ta). (2) The transpiration rate in branchlet varied obviously in a season, which was higher from July to September, lower in May, June and October, and the lowest from November to the next April. (3) The relative humidity, atmospheric temperature, and vapor pressure deficit were environmental factors that mainly influenced the transpiration rate in branchlet, among which atmospheric temperature was the most important. The correlation between the transpiration rate and atmospheric temperature could be simulated by the quadratic function of $Tr = 4.603 - 0.372Ta + 0.009Ta^2$ ($R^2 = 0.855$, $P < 0.01$). The correlation between the transpiration rate and soil moisture (Wc) could be simulated by the exponential function of $Tr = 0.665e^{0.09Wc}$ ($R^2 = 0.848$, $P < 0.01$).

Key words: coastal sand; *Casuarina equisetifolia*; transpiration rate; relative humidity; atmospheric temperature; vapor pressure deficit

水分条件是森林生态系统中重要生态因子之一,它在植物生命活动中起着极其重要的作用。在干旱、

收稿日期: 2012-09-03 修回日期: 2012-10-15

基金项目: 国家“十一五”重大科技支撑计划资助项目(2009BADB2B0302); 福建省教育厅科技资助项目(JB11152); 2010年福建省高校服务海西建设项目专项计划资助项目(YHZ10002)。

作者简介: 吴锡麟(1969-),男,教授,从事森林培育和水土保持学研究。E-mail: xilinwu629@163.com。通讯作者叶功富(1966-),男,教授,高级工程师,从事森林培育、森林生态和水土保持学研究。E-mail: yegongfu@126.com。

半干旱区,水分条件已成为林木生长的限制因子^[1-2]。林木对环境的适应取决于环境水分供应状况,由林木组成的森林对土壤的水分条件也造成一定的影响^[3]。一方面森林通过根系从土壤中吸收水分维持生长,另一方面森林通过林冠截留、树冠蒸腾、林地蒸发等对水分进行重新分配,改善数量和质量^[4]。蒸腾作用是植物以蒸汽的形式散失水分的过程,是植物水分利用的关键^[5]。植物根系吸收土壤的水分,约有95%通过蒸腾作用散失到大气中^[6],蒸腾作用还与光合作用息息相关^[7]。开展对干旱、半干旱地区森林生态系统水分生理生态的研究,不仅对人工林的营造、低产林分改造、林木良种选育以及林分的管护等方面有重要的指导作用^[8],而且对维护森林生态系统健康稳定,增强林地生长力,增加生物多样性和森林可持续经营都具有重要的意义。

国内外有关森林生态系统水分生态的研究主要集中在土壤水分及其在林木生长、林地蒸发、林木蒸腾和其它生理过程中的作用,以及森林生态系统水量平衡等方面。国外对植物蒸腾的研究可以追溯到1914年,Dixon最早设计制造出空气压力室,用以确定植物蒸腾和萎蔫时所能承受的水分胁迫。1932年Huber第一个利用热脉冲技术测量树木的蒸腾^[9]。20世纪30-50年代,英、美、德、俄等国学者开始用离体称重法研究植物学的蒸腾作用^[10]。国内对植物蒸腾的研究相对较迟,始于对旱生植物的研究^[10],从20世纪90年代开始,周海燕等^[11]、高丽等^[12]、桑玉强等^[13]对西北地区,孙慧珍等^[14]、王力刚等^[15]对东北东部山区,张劲松等^[16]、国琳等^[17]、赵勇等^[18]、元玉飞等^[19]对华北地区,曾小平等^[3]、王华等^[20]、莫凌等^[21]对华南地区主要造林树种的水分蒸腾进行了研究。对木麻黄水分生理生态的研究主要是开展了室内苗木的水分生理生态研究及干旱胁迫对木麻黄蒸腾作用和渗透调节的研究^[22-23],对木麻黄防护林的蒸腾作用没有深入研究。

木麻黄(*Casuarina equisetifolia*)属木麻黄科(Casuarinaceae)木麻黄属(*Casuarina* Adans.),常绿乔木。木麻黄原产澳大利亚,小枝绿色,针叶状,代替叶的功能,叶退化呈鳞片状。木麻黄主根较深,侧根发达,水平分布常为树冠幅数倍,主根深入沙中常年地下水位以上,须根多集中在40 cm以上土层。木麻黄具抗风固沙、耐盐碱、耐干旱和耐贫瘠等特性。木麻黄自20世纪50年代大规模引种到我国东南沿海营造防护林以来,以其优良特性成为我国东南沿海防护林的主要造林树种,在防御沿海自然灾害、改善生态环境等方面发挥着巨大作用。在福建东南沿海地区,干旱少雨,雨量不均,干湿季节明显,降雨主要集中在台风季节,且风沙土持水保肥差,水分亏缺严重,严重影响植物的生长发育。木麻黄长期适应干旱缺水的滨海沙地环境,使其形态结构特征发生了一系列的变化,叶片严重退化成鳞片状,由小枝(叶状枝)代替叶片行使光合、蒸腾等生理功能。研究木麻黄的蒸腾作用、水分利用特征及其影响因素,有利于进一步了解木麻黄生长发育与环境因子之间的关系,对沿海防护林的可持续经营具有重要意义。鉴于此,笔者从森林生态系统管理的角度出发,采取生态系统定位研究的方法,在福建沿海南部东山县赤山林场选择有代表性的中龄林,对滨海沙地木麻黄林地蒸腾动态进行研究,从水分角度探讨林木生长与环境因子的关系,为沿海防护林的合理经营提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本研究在福建东山县赤山国有防护林场进行,该林场位于福建南部沿海,北纬23°40',东经117°18',属南亚热带海洋性季风气候,年平均降水量1 164 mm,年均蒸发量2 028 mm,全年干湿季节明显,每年的11月至翌年的2月为旱季,大部分降水集中在5-9月份,全年无积雪,极少霜冻天,年平均气温20.8℃,极端最高气温36.6℃,极端最低气温3.8℃,年平均台风5.1次。该区土壤主要是沙土,保水肥的能力差,全年海风大,立地干旱。

研究对象为1988年造林的木麻黄纯林,距海岸线800 m,平均树高12.4 m,平均胸径19.6 cm,密度1 500株·hm⁻²。

1.2 研究方法

蒸腾速率和环境因子采用定位、定时观测。在林分内设置有代表性的标准地(10 m×10 m)3块,每块标准地内选取3株标准株。分别在标准株上部、中部、下部选择生长良好的成熟小枝3枝,做好标记。从

2008 年 5 月到 2009 年 4 月, 每月测定其蒸腾速率及环境因子的日进程。在每月中旬晴朗无云的天气, 采用 Li-6400 便携式光合测定系统仪, 在针叶叶室进行活体测定。每天从 8:00 - 18:00, 每隔 2 h 测定 1 次, 每次测 3 个重复, 连续测 2 - 3 d。测定参数有: 蒸腾速率(transpiration rate, T_r)、光合有效辐射(photosynthetically active radiation, PAR)、气孔导度(stomatal conductance, $Cond$)、叶面温度(Foliage temperature, T_l)、大气温度(atmospheric temperature, T_a)、大气相对湿度(relative humidity, RH)、水蒸汽压亏缺(vapor pressure deficit, Vpd) 等。土壤含水量采用土钻烘干称重法, 定位监测, 测深 2 m。1 m 土层内, 用土钻每 10 cm 采集土样; 1 m 以下, 每 20 cm 采集土样。在蒸腾测定日前(或后) 1 d 测定土壤含水量, 每月 1 次。

1.3 数据处理与计算

蒸腾速率日变化值取测定日中各个时间点对应的 T_r 值(剔除异常值后) 的平均值。以每月测定日 8:00 - 18:00 时测得的 T_r 的平均值代表该月的平均蒸腾速率^[24]。将采集的土样放入铝盒, 立即称铝盒 + 鲜土的重量, 然后在 103 - 105 °C 下烘干至恒重, 再称铝盒 + 干土的重量, 3 次重复, 取平均值, 最后计算土壤含水量。

$$\text{土壤含水量}/\% = (\text{鲜土重量} - \text{干土重量}) / \text{干土重量} \times 100$$

数据统计分析使用 Excel 与 SPSS 统计软件, 对实验所得数据进行回归分析及相关分析。对 T_r 、 RH 、 T_a 、 Vpd 和 PAR 进行相关分析; 对 T_r 与 T_a 及 Wc 进行逐步回归分析, 建立回归模型。对 RH 、 T_a 、 Vpd 、 PAR 和 Wc 进行相关分析。

2 结果与分析

2.1 蒸腾速率的日变化

不同月份木麻黄小枝蒸腾速率日变化均呈现“单峰型”(图 1), 3 - 7 月峰值出现在午后 14:00 时, 8 - 10 月峰值出现在 12:00 时, 11 月之后峰值出现在 14:00 时。5 - 10 月日蒸腾速率较高, 全天的蒸腾速率(8:00 - 18:00) 均高于 11 - 3 月, 其中 8 月份的最高, 峰值为 $3.43 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 12 月份的最低, 峰值仅 $1.08 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 为 8 月份的 31.5%。各月蒸腾速率均在下午 16:00 时后急剧下降。

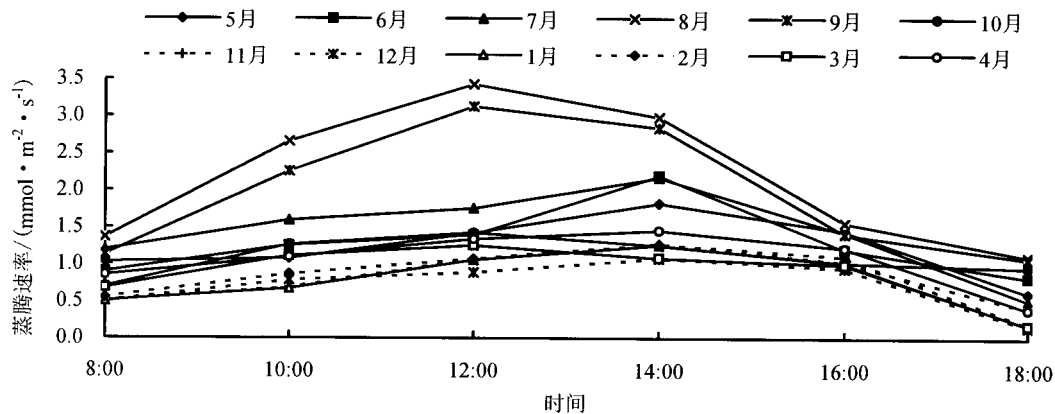


图 1 木麻黄小枝蒸腾速率日变化

Figure 1 Diurnal variation of transpiration rate in branchlets of *C. equisetifolia*

2.2 蒸腾速率的季节变化

从表 1 可以看出, 小枝蒸腾速率的季节变化明显, 呈明显的“单峰型”, 8 月份的蒸腾速率最高, 达到 $2.19 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 12 月份的最低, 为 $0.73 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 仅为 8 月份的 33.3%。5 - 10 月蒸腾作用相对较强, 11 - 4 月蒸腾速率较低。

2.3 蒸腾速率与环境因子的关系

对蒸腾速率与相对湿度、大气温度、水蒸汽压亏缺和光合有效辐射进行相关分析(表 2)。由表 2 可知, 相对湿度、大气温度及水蒸汽压亏缺与木麻黄小枝蒸腾速率的季节变化之间存在显著的线性相关, 光合有效辐射与蒸腾速率季节变化的相关性不显著; 水蒸汽压亏缺与大气温度呈显著的正相关, 与大气相对

湿度、光合有效辐射则不显著。相对湿度与大气温度之间呈显著的正相关,与光合有效辐射相关性不显著。由此可知,相对湿度、大气温度、水蒸汽压亏缺是影响木麻黄小枝蒸腾速率季节变化的主要环境因子。通过逐步回归模拟出影响蒸腾速率的主要因子为大气温度,可用方程 $Tr = -0.150 + 0.053Ta$ ($R^2 = 0.656$, $P < 0.01$) 表达,对蒸腾速率与大气温度进行曲线拟合,二者呈二次函数 [$Tr = 4.603 - 0.372Ta + 0.009Ta^2$ ($R^2 = 0.855$, $P < 0.01$)] 关系。

表1 木麻黄蒸腾速率与影响因子的季节变化

Table 1 The seasonal variation of transpiration rate in branchlets of *C. equisetifolia* and their affecting factors

月份	蒸腾速率 $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	气孔导度 $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	相对湿度 %	大气温度 °C	水蒸汽压亏缺 kPa	光合有效辐射 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	土壤含水量 %
5	1.24	0.08	68.05	31.92	1.28	788.11	6.70
6	1.30	0.09	67.55	31.06	1.77	797.71	9.04
7	1.44	0.09	67.52	30.86	1.73	921.60	8.83
8	2.19	0.09	61.79	33.79	1.98	587.76	8.87
9	1.97	0.09	65.15	33.52	1.89	601.46	12.06
10	1.10	0.06	62.73	30.79	1.67	398.00	4.70
11	0.83	0.04	44.89	24.77	1.65	747.36	1.25
12	0.73	0.03	51.11	16.55	0.92	660.53	2.49
1	0.78	0.03	52.48	15.33	0.96	621.87	2.70
2	0.84	0.04	50.94	17.15	0.99	623.25	2.58
3	0.89	0.05	49.70	18.17	1.22	824.84	2.48
4	1.06	0.06	58.88	25.05	1.25	806.48	4.59

表2 木麻黄蒸腾速率的季节变化与环境因子的相关分析¹⁾

Table 2 Correlations between the seasonal variation of transpiration rate in branchlets of *C. equisetifolia* and their affecting factors

因子	蒸腾速率(<i>Tr</i>)	相对湿度(<i>Rh</i>)	大气温度(<i>Ta</i>)	水蒸汽压亏缺(<i>Vpd</i>)
<i>Rh</i>	0.662*			
<i>Ta</i>	0.810**	0.816**		
<i>Vpd</i>	0.800**	0.562	0.886**	
<i>Par</i>	-0.095	0.081	-0.013	-0.024

¹⁾ * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$ 。

2.4 蒸腾速率与土壤含水量的关系

从表1可知,土壤含水量在1.25% - 12.06%之间,季节变化幅度很大,最大值出现在9月份。而蒸腾速率在0.73 - 2.19 $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间。经相关分析,蒸腾速率与土壤含水量呈显著正相关($R^2 = 0.885$, $P < 0.01$)。对二者进行曲线拟合,呈指数函数 [$Tr = 0.665e^{0.09Wc}$ ($R^2 = 0.848$, $P < 0.01$)] 关系。

3 讨论

植物长期适应环境变化,在蒸腾等生理上形成了对环境的适应机制。植物蒸腾作用日变化进程表现为单峰型(含准双峰型)^[25-26]、双峰型^[27]、抛物线型^[5]、旗帜型^[7]等类型,还有植物在不同水分条件和不同天气条件下,呈现出单峰或双峰型,如杨劫等^[28]认为,沙枣蒸腾日变化在水分较好条件下呈单峰曲线,在较干旱条件下呈双峰曲线。张劲松等^[16]认为,杜仲在晴朗和晴一多云天气日呈双峰型,在阴天天气呈单峰型。此外,山杨等10多种树木在长白山则表现出了蒸腾作用与常规不同的日进程模式,即清晨和傍晚树木蒸腾速率有回升现象。说明蒸腾速率日进程峰型这一植物的生物学特性并非一成不变,而是随着环境条件的改变会发生相应的变化。本研究中,木麻黄蒸腾速率表现为典型单峰曲线,没有光合“午休”现象,反映出阳性植物的特征,这与肖生鸿等^[29]的研究结论相似,木麻黄可归入非蒸腾午休型^[30]。蒸腾速率日变化在各月间差异较大,其影响因素是多方面的。周文杰等^[31]认为,2月份的华南地区阴、雨、雾季节,叶片上通常附有雨水或露水,一方面干扰了气孔的张开,另一方面叶片上附着的水分蒸发时降低叶温,会使气孔水分扩散动力降低。苏文华等^[32]认为,2月份大气温度比较低,对水分向上运输有负面的影响。马玲等^[33]认为,土壤温度相对较低会抑制根系吸水的动力。本文研究结论基本相似,木麻黄夏季的蒸腾速率与秋冬季相差较大,5-9月,主要受相对湿度、大气温度、水蒸汽压亏缺影响,气孔导度与光合有效辐射对其影响较小;秋冬季节,主要受大气温度影响,其它因子对其影响较小。总体来说,大气温度是影

响木麻黄小枝蒸腾速率的主要因子,蒸腾速率峰值与当日温度峰值同步出现。其次为相对湿度与叶面水蒸汽压亏缺。

木麻黄蒸腾速率的季节变化明显,7-9月蒸腾速率较高,5、6、10月份蒸腾作用相对较弱,11-3月蒸腾速率最低。这种现象与植物发育期和生长条件的季节变化有关^[34]。5月份为生长初期,小枝功能发育未完全;6-9月木麻黄生长状况最为良好,小枝功能完善,高温与强光也促进了蒸腾速率的提高;10月初到12月中旬,沿海地区进入旱季,几乎没有降雨,大气温度和空气相对湿度都开始下降,至11月空气相对湿度已经下降至全年最低水平。12月中旬开始,进入春雨季节,随着少量降雨的出现,相对湿度开始回升,但是影响蒸腾速率最主要的因子温度持续下降,导致小枝蒸腾速率持续降低。张国盛等^[35]、杨劼等^[28]对沙地几种植物蒸腾速率季节变化的研究也表明,温度升高促进植物蒸腾,干旱则抑制蒸腾。Meinzer et al^[36]对巴西稀树草原木本植物蒸腾作用进行研究,也得出相似结论。

植物蒸腾作用主要受种类遗传因素、土壤水分和外界气象因素(温度、湿度、光照、风等)影响,此外,还受种植密度、冠层结构和土壤盐分等因素影响。当种类相同,种植密度、林分结构及土壤状况相同时,蒸腾主要受气象因素的影响。本文中,通过相关分析,相对湿度($P < 0.05$)、大气温度($P < 0.01$)及水蒸汽压亏缺($P < 0.01$)与木麻黄小枝蒸腾速率的季节变化之间存在显著的线性相关,光合有效辐射与蒸腾速率季节变化的相关性不显著。Waisel^[37]和Anderson^[38]发现相对湿度对植物的蒸腾作用有直接的影响,在水分亏缺情况下,通过关闭气孔可能是植物适应胁迫的重要机理之一。这与本研究的结果相符。连玉武等^[39]研究也认为,不同季节中,生态因子对赤枝栲的蒸腾作用的影响明显不同,春季温度成为制约赤枝栲叶片蒸腾强度的主导因子,相对湿度影响则较小,其余因子作用均不显著,夏季和秋季相对湿度则是主要因子,大气温度影响次之,而植物体本身的水分亏缺也是制约蒸腾作用的重要因子。只有到了冬季,光照强度才上升为主导因子。该结论与本文相似。本研究用偏最小二乘回归法建立了木麻黄小枝蒸腾速率的气象因子响应模型,拟合效果满意,可以用该模型做简化替代计算,具有实际应用意义。不同季节,土壤含水量对蒸腾速率影响也很显著,木麻黄蒸腾速率与土壤含水量呈显著相关($P < 0.01$),表现在生长季节,土壤含水量较高,蒸腾速率也较高,在土壤含水量较低的秋冬季节,蒸腾速率也较低。我们认为这是由于,木麻黄对土壤水分的适应性很强,木麻黄的叶片鳞片状,小枝行光合功能,在受到水分胁迫时以降低蒸腾、节约用水的策略来适应干旱环境,当水分条件改善时,便大量蒸腾,以加速生长。夏季土壤含水量相对蒸腾耗水来说已经很高,对植物的蒸腾作用没造成威胁或胁迫程度较小,此时蒸腾速率主要受其它因素的影响。

蒸腾作用是植物生命活动的关键点,在植物生理活动过程中具有重要的意义,在沿海地区较为恶劣的环境中,对木麻黄防护林加以合理的结构配置、水分管理,使之既能完成必须的生理活动,维系自身的正常生长,又能保持极低的蒸腾,尽量减少对当地有限水资源的消耗。在深入研究木麻黄林的蒸腾动态及环境因子相关性的基础上,建立蒸腾—环境耦合模型,探讨蒸腾耗水的季节变化模式,提出最优的水分管理模式及协同管理配套技术,是木麻黄防护林生态系统经营管理的关键所在。建议今后加强沿海防护林水分管理的研究,通过人为调控改善林木的水分状况,充分利用沙地有限的水分资源,提高林分生产力及防护效能,促进水分的合理循环,维持长期稳定的土壤含水量和林地的持续利用。

参考文献

- [1] 何其华,何永华,包维楷. 干旱半干旱区山地土壤水分动态变化[J]. 山地学报, 2003, 21(2): 149-156.
- [2] 宋维民,周海燕,贾荣亮,等. 土壤逐渐干旱对4种荒漠植物光合作用和海藻糖含量的影响[J]. 中国沙漠, 2008, 28(3): 449-454.
- [3] 曾小平,赵平,彭少麟. 鹤山人工马占相思林水分生态研究[J]. 植物生态学报, 2000, 24(1): 69-73.
- [4] 陈步峰,曾庆波,黄全,等. 热带山地雨林生态系统的水分效应——冠层淋溶,水化学贮滤[J]. 生态学报, 1998, 18(4): 364-370.
- [5] 赵明,李爱德,王耀琳,等. 沙生植物的蒸腾耗水与气象因素的关系研究[J]. 干旱区资源与环境, 2003, 17(6): 131-137.
- [6] Kozlowski T T, Pallardy S G. Physiology of Woody Plants[M]. US: Academic Press, 1996: 270-286.
- [7] 王孟本,李洪建,柴宝峰,等. 树种蒸腾作用、光合作用和蒸腾效率的比较研究[J]. 植物生态学报, 1999, 23(5): 401-410.
- [8] 张宁南,徐大平,Jim Morris,等. 雷州半岛尾叶桉人工林耗水量研究[J]. 林业科学研究, 2007, 20(1): 1-5.

- [9] 陈永金, 陈亚宁, 薛燕. 干旱区植物耗水量的研究与进展[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(6): 152-157.
- [10] 李海涛, 陈灵芝. 用于测定树干木质部蒸腾液流的热脉冲技术研究概况[J]. 植物学通报, 1997, 14(4): 517-534.
- [11] 周海燕, 李新荣, 樊恒文, 等. 极端条件下几种锦鸡儿属灌木的生理特性[J]. 中国沙漠, 2005, 25(2): 182-190.
- [12] 高丽, 杨劫, 刘瑞香. 不同土壤水分条件下中国沙棘雌雄株光合作用、蒸腾作用及水分利用效率特征[J]. 生态学报, 2009, 29(11): 6 025-6 034.
- [13] 桑玉强, 郭芳, 张劲松, 等. 毛乌素沙地新疆杨蒸腾变化规律及其影响因素[J]. 林业科学, 2009, 45(9): 65-71.
- [14] 孙慧珍, 孙龙, 王传宽, 等. 东北东部山区主要树种树干液流研究[J]. 林业科学, 2005, 41(3): 36-42.
- [15] 王力刚, 赵岭, 许成启, 等. 黑龙江省本部半干旱区8种阔叶乔木主要生理参数的特征分析[J]. 防护林科技, 2011, 104(5): 5-9.
- [16] 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.
- [17] 国琳, 张劲松, 孟平, 等. 山茱萸光合及水分利用特征对土壤水分胁迫的响应[J]. 河北农业大学学报, 2010, 33(1): 21-26.
- [18] 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.
- [19] 元玉飞, 尹伟伦, 夏新莉, 等. 修枝对欧美杨107杨水分生理的影响[J]. 林业科学, 2011, 47(3): 33-39.
- [20] 王华, 赵平, 蔡锡安, 等. 马占相思夜间树干液流的分配及其对整树蒸腾估算的影响[J]. 植物生态学报, 2007, 31(5): 777-786.
- [21] 莫凌, 唐文秀, 毛世忠, 等. 珍稀濒危植物狭叶坡垒的光合特性[J]. 福建林学院学报, 2009, 29(4): 357-361.
- [22] 叶功富, 吴寿德, 陈清森, 等. 木麻黄苗木的水分生理生态特性的试验研究[J]. 防护林科技, 2000(专刊1): 148-150.
- [23] 陈如凯, 叶功富, 吴寿德, 等. 干旱胁迫对木麻黄蒸腾作用和渗透调节的影响[J]. 防护林科技, 2000(专刊1): 155-159.
- [24] 廖盛厦, 李军伟, 杨红兰, 等. 龙须藤光合速率日变化及其主要影响因子[J]. 广西师范大学学报: 自然科学版, 2010, 28(3): 61-65.
- [25] 郑本暖, 叶功富, 卢昌义. 干旱胁迫对4种植物蒸腾特性的影响[J]. 亚热带植物科学, 2007, 36(1): 36-38.
- [26] 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.
- [27] 李志辉, 杨模华, 黄丽群, 等. 桉树等速生树种光合速率测定分析[J]. 中南林学院学报, 2005, 25(2): 7-11.
- [28] 杨劫, 高清竹, 乌力吉, 等. 库布齐沙地油蒿蒸腾作用特征及其与环境因子的关系[J]. 内蒙古大学学报: 自然科学版, 1999, 30(3): 372-376.
- [29] 肖生鸿, 刘金祥. 热研8号坚尼草的光合特性研究[J]. 亚热带植物科学, 2007, 36(1): 39-42.
- [30] 董学军, 杨宝珍, 郭柯, 等. 几种沙生植物水分生理生态特征的研究[J]. 植物生态学报, 1994, 18(1): 86-94.
- [31] 周文杰, 芦站根, 魏淑珍. 曼地来红豆杉蒸腾速率日变化及因子分析[J]. 植物研究, 2004, 24(4): 425-427.
- [32] 苏文华, 张光飞. 土壤温度与气温对紫花雪山报春光合作用和蒸腾作用的影响[J]. 西北植物学报, 2002, 22(4): 824-830.
- [33] 马玲, 赵平, 饶兴权, 等. 马占相思树干液流特征期与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2005, 25(9): 2 145-2 151.
- [34] 吴锡麟, 叶功富, 范少辉. 滨海沙地土壤水分季节变化与木麻黄生长的关系[J]. 林业勘察设计, 2005(1): 7-11.
- [35] 张国盛, 王林和, 董智, 等. 毛乌素沙地几种植物蒸腾速率的季节变化特征[J]. 内蒙古林学院学报: 自然科学版, 1998, 10(1): 7-12.
- [36] Meinzer F C, Goldstein G, Franco A C, et al. Atmospheric and hydraulic limitations on transpiration in Brazilian cerrado woody species[J]. Functional Ecology, 1999, 13(2): 273-282.
- [37] Waisel Y. The glands of *Tamarix aphylla*: a system for salt secretion or for carbon concentration[J]. Physiologia Plantarum, 1991, 83: 506-510.
- [38] Anderson J E. Transpiration and photosynthesis in saltcedar[J]. Hydrology and Water Resources in Arizona and the Southwest, 1977, 7: 125-131.
- [39] 连玉武, 苏祖荣. 赤枝栲的蒸腾特性与生态因子相关性[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 1997, 36(5): 781-786.

(责任编辑: 卢凤美)