

刺槐耗水研究进展

茹桃勤<sup>1</sup>, 李吉跃<sup>1</sup>, 孔令省<sup>2</sup>, 朱延林<sup>3</sup>

(1. 北京林业大学资源与环境学院, 北京 100083;  
2. 河南省林业厅, 郑州 450003; 3. 河南省林科院, 郑州 450008)

摘要: 刺槐是干旱半干旱地区的多用途造林树种, 水分生理研究是抗旱造林和林分管理的基础, 从苗木、单木和林分三个层面论述了刺槐耗水特性及其研究进展。苗木耗水是林木水分生理研究的基础, 刺槐苗木耗水量和耗水速率的日变化均呈单峰型, 峰值出现在中午 12:00 左右。苗木耗水速率除与自身遗传特性有关外, 还与土壤水分条件密切相关, 随着土壤水分亏缺的加重, 耗水速率呈下降趋势。单木耗水除表现与苗木相似的日动态外, 其耗水量和蒸腾强度还表现季节动态, 生长季节初期和末期耗水量和蒸腾强度较低, 生长盛期较强, 此外蒸腾耗水还与光照、气温和风速等环境因子呈显著相关关系。林分蒸腾耗水占林分总耗水量的 57.7% ~ 60.2%, 季节变化与单木相同, 一般阴坡耗水大于阳坡, 高密度林分耗水量大于低密度林分。

关键词: 刺槐; 苗木; 林分; 水分参数; 耗水量; 水分利用效率; 液流量; 蒸腾强度; 研究进展  
中图分类号: S 792.27.01      文献标识码: A      文章编号: 1005-3409(2005)02-0135-06

Review on the Research of Water Consumption  
Characteristic of *Robinia pseduoacia*

RU Tao-qin<sup>1</sup>, LI Ji-yue<sup>1</sup>, KONG Ling-sheng<sup>2</sup>, ZHU Yan-lin<sup>3</sup>

(1. School of Resources and Environment, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;  
2. Henan Forestry Department, Zhengzhou 450003, China;  
3. Forestry Academy of Henan Province, Zhengzhou 450008, China)

**Abstract:** Black locust is one of the multi-purpose afforestation tree species in arid or semi-arid regions. Based on abundant literature, the research advance and present development about the water consumption characteristics of black locust was discussed. Water consumption of seedling is the base of tree water physiological research. The daily dynamic of water consumption of seedling shows single peak style, the peak value appears about at 12:00 in noon. Besides depending on its genetic speciality, the water consumption rate has a close relation with soil water status too. The water consumption rate will decrease when the water stress gets severe. Beside the similar daily water consumption dynamic with the seedlings', the water consumption and transpiration intensity of single tree show season changes, and they are much low in the initial and late growing stage, but are very high relatively in fast-growing period. Meanwhile they are related to light intensity, air temperature, wind velocity and other environment factor. Stands water consumption of transpiration share 57.7% ~ 60.2% of the total. The season change of stands water consumption is similar to its single tree. Generally, the stands water consumption in south-facing sloping is higher than that in north-facing sloping, and higher in the stands of high density than that of low density.

**Key words:** *Robinia pseduoacia* L; seedling; forest stands; water parameter; water use efficiency; sap flux; transpiration intensity; research development

刺槐(*Robinia pseduoacia* L.)原产于美洲,后传入欧洲,20世纪初期引入我国。由于其适应性强,生长速度快,材质优良,易繁殖,已成为我国干旱半干旱地区的主要造林树种。在我国华北和西北地区,周期和非周期性干旱常造成水

<sup>1</sup> 收稿日期: 2004-06-20  
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30070637)  
作者简介: 茹桃勤(1964-),男,高级工程师,在读博士,主要研究方向:树木水分生理。

分亏缺,引起刺槐大量落叶甚至干梢死亡<sup>[1,2]</sup>,抑制了林木生长,水分因子已成为影响刺槐林木生长的关键因子<sup>[31,32,42]</sup>。上世纪80年代以来,在刺槐水分生理和耐旱机理做了大量研究,为刺槐的科学造林与经营管理提供了科学依据。本文从苗木、单木和林分三个层次面对刺槐的耗水特性方面的研究成果进行了阐述。

## 1 苗木耗水特性

### 1.1 刺槐水分参数及其变化

(1) 膨压。膨压是一个重要的生理指标,对细胞的伸长、树木生长及许多有关的生理生化和形态过程都极为重要。在正常水分条件下树木最大膨压都保持在1.4~2.10 MPa范围内,刺槐的为1.4±0.4 MPa。当植物受到干旱胁迫时,树木具有提高一定幅度膨压的能力,刺槐的调节能力相对较大,幅度为:0.4~0.7 MPa。树木的膨压随着叶水势的下降而下降,两者呈线形关系<sup>[21,16]</sup>。

(2) 渗透调节。据水势、渗透势和压力势三者间的关系,在水势降低时要保持一定膨压必须降低渗透势,渗透势的这种变化被称为渗透调节。当植物受到水分胁迫时,许多树种是通过降低渗透势来维持膨压的,这是植物能够忍耐脱水的最主要机理之一。不同植物渗透调节能力大小不同,也并不是所有的树木都具有渗透调节能力。木本植物的渗透调节能力相对较小,仅限于0.5~0.8 MPa,并且常常在几天内即可消失。 $\Psi^{100}$ 值的大小表示树木维持最大膨压的能力, $\Psi_0$ 则表示树木维持最低膨压的极限渗透势,当树木的渗透势在 $\Psi^{100}$ 和 $\Psi_0$ 之间变动时,树木才具有渗透调节能力,当变动超出这一范围时渗透调节功能即消失。 $\Psi_0$ 值的大小表示植物维持膨压能力的强弱,在正常水分管理条件下,刺槐的 $\Psi_0$ 值较高,为-1.93±0.21 MPa,维持膨压能力最弱;油松、侧柏和栓皮栎 $\Psi_0$ 值最低,为-3.09~-3.28 MPa,维持膨压能力最强。在水分胁迫条件下, $\Psi^{100}$ 和 $\Psi_0$ 的下降趋势和 $\Psi_p$ 一致,刺槐的下降幅度最大,为0.9~1.2 MPa,渗透调节能力最强;栓皮栎、油松和侧柏的下降幅度最小,仅为0.4 MPa,渗透调节能力相对较弱<sup>[21,16]</sup>。

(3) 细胞弹性模量:在无论是在正常水分管理还是干旱胁迫条件下,针叶树的 $\epsilon^{Max}$ 均小于阔叶树,说明针叶树的细胞弹性比阔叶树大。在正常水分管理条件下,华北地区阔叶树中刺槐的 $\epsilon^{Max}$ 最高,为28.17±2.7 MPa,细胞弹性最差,保持膨压能力最弱。当遇到干旱胁迫时,刺槐的 $\epsilon^{Max}$ 将迅速升高,细胞弹性变小,细胞壁更加坚硬厚实,叶子不断老化<sup>[21,16]</sup>。

### 1.2 刺槐耗水量与耗水速率

苗木耗水量是反映树种耗水潜力的最直接的指标。耗水量的测定方法主要由快速称重法、稳态气孔计法、热脉冲法和整树容器法<sup>[3,4,5]</sup>。快速称重法为目前最常用的方法,具有快速、直接简便的特点。刺槐苗木耗水量日变化呈“单峰型”,峰值出现在10:00~14:00之间,其间耗水量占全天耗水量的50%以上。因此,这一段时间是潜在的最大耗水时期,根据

这一时间段的耗水量可以推断刺槐的全天的耗水量。根据孙鹏森(2002)的研究,在正常条件下,5月份刺槐的日平均耗水量为377.28 g/(m·d),晴天为765.81 g/(m·d),阴天为221.86 g/(m·d),低于元宝枫、侧柏、白皮松、油松、火炬树等,高于栓皮栎、樟子松和黄栌<sup>[41,43]</sup>。不同方法测定结果不同,稳态气孔计法测定值一般大于其它方法的测定结果和自然蒸腾值,需要对其进行校正;但对不同时间段的耗水动态趋势的测定,各种测定方法的结果是一致的<sup>[3~5]</sup>。韩蕊莲(1994)等对刺槐苗木的年耗水量(6~10月)进行了研究,在正常水分管理条件下(土壤含水量15%),刺槐地年耗水量为9 962.5±235 g;当遭受干旱胁迫时耗水量下降,持续遭受中程度干旱胁迫(含水量11%)时年耗水量为7 430.8±194 g,严重干旱胁迫时(含水量7%)耗水量下降到5 078.4±163 g<sup>[27]</sup>。

苗木耗水量除与树种自身生理特性有关外,还受苗木叶量和生物量的影响,由于树种之间和同一树种不同苗龄之间叶量与生物量均有较大差异,耗水量大小并不能反映树种耗水能力的大小。耗水速率为单位时间段内耗水量与苗木叶面积的比值,是树木固有的生理特性,具有遗传上的稳定性,是衡量树种耗水能力的重要指标。刺槐耗水速率日动态变化呈相对平缓的“单峰型”,14:00左右达到峰值,其时耗水速率低于油松、元宝枫、火炬松、侧柏和白皮松,而高于黄栌、樟子松和栓皮栎,与耗水量排序结果完全相同<sup>[41,43]</sup>。

### 1.3 刺槐的叶水势与土壤含水量之间关系

在林木水分生理研究中,水势是一个研究相对较多和普遍接受的植物水分生理指标。李吉跃(1991)对太行山区主要造林树种的耐旱特性进行了研究,在水分供应良好的条件下,和其它树种一样刺槐苗木叶水势的日变化呈单峰型,即早晨气温较低、空气湿度较大,苗木水势最大。随着太阳辐射的提高,气温升高,空气湿度变小,苗木水势开始下降,一般早上9:00左右下降幅度最大,然后趋于平缓;13:00至15:00时气温最高,光照最强,相对湿度最小,苗木水势降到最低;随着气温降低,太阳辐射减弱,相对湿度的增加,水势逐渐恢复。在阔叶树中,刺槐水势日变幅比栓皮栎、沙棘小,比白蜡变幅大。天气状况对水势有显著影响,阴天气温降低,湿度增大,水势变幅变小,下降趋势平缓,并提前达到最低点。苗木不同部位水势变化趋势有所不同,根水势变幅相对小于叶水势,同时下降趋势也滞后于叶水势<sup>[20]</sup>。

植物水势是一个反映林木水分状况的生理指标,同时也是一个说明土壤水分对林木生长有效性的指示指标。据李吉跃研究,土壤水势对林木叶水势产生直接影响,两者之间有着密切相关关系,不同年龄的不同树种均有着相似的变化趋势,即都可以用指数方程 $Y = A E^{BX}$ 或直线方程 $Y = A + BX$ 来表示,土壤水势较低时指数方程相关性较高,而土壤水势较高时直线方程则相关性较好。在指数方程中, $A$ 表示水分正常条件下的叶水势, $B$ 说明了土壤对叶水势的影响程度, $B$ 越大表明叶水势随土壤水势变化的幅度也大,反之越

小。刺槐叶水势和土壤水势的相关关系为:  $Y = 0.526e^{0.476 - 4X}$ ,  $r = 0.9458$ 。水分正常条件下,植物水势一般大于土壤水势,因而夜里至黎明前植物不能从土壤中吸水,黎明后随着太阳辐射的增强、气温的升高、空气湿度的降低,植物水势随之降低,开始从土壤中吸水。在干旱条件下,各树种都存在一个黎明前土壤水势开始低于叶水势而不能吸水的特定临界值 ( $\Psi^ws = p$ ),一般针叶树临界值较低,阔叶树相对较高。这一临界值在生理上具有重要意义,临界值较低说明树木受旱初期遭受水分亏缺严重,与此同时表明树木水分吸收的能力较强。刺槐的临界值为  $-0.72 \pm 0.18$  MPa, 高于侧柏、油松、沙棘、黄栌和栓皮李, 低于紫穗槐。对侧柏和阔叶树来讲,当土壤水势继续降低时,又产生一个新的临界值 ( $\Psi^ws = p$ ), 树木的水势又低于土壤水势, 树木又重新获得在黎明前和夜间的吸水能力, 这一数值的大小表明树木在严重干旱土壤条件下恢复吸收水分的能力。这一临界值越高, 表明树木严重干旱时恢复其吸收能力越强, 因而维持其生存能力也越强。侧柏的 ( $\Psi^ws = p$ ) 最高 ( $-3.50 \pm 0.35$  MPa), 恢复吸收能最强; 刺槐为  $-4.00 \pm 0.10$  MPa, 低于侧柏, 而高于油松和栓皮栎, 说明遇到严重干旱时刺槐恢复其吸水、维持生存能力低于侧柏, 而相对高于栓皮栎。在反映土壤水分状况和叶水势关系方面, 土壤含水量和叶水势之间也有着密切关系, 两者之间成双曲线关系:  $Y = A + BX^{-1}$ ; 刺槐土壤含水量和叶水势之间关系为:  $Y = -0.8177 + 17.1749X^{-1}$ ,  $r = 0.9345$ 。李吉跃 (1991) 在 Levitt (1972)、Turner (1976) 和 Kramer (1979) 的基础上, 将干旱地区植物按耐旱性及其机理分为四类: 高水势延迟脱水耐旱树种、亚高水势延迟脱水耐旱树种、低水势忍耐脱水耐旱树种和亚低水势忍耐脱水耐旱树种; 1993 年又建立了分类中心模型和模糊判别模型, 根据中心模型和判别模型, 刺槐属于低水势忍耐脱水耐旱树种<sup>[20, 25, 26]</sup>。

#### 1.4 刺槐水分释放曲线与抗脱水能力

植物的叶水势与水分饱和和亏缺有密切关系, 这种关系被称为水分释放曲线, 呈线形关系 ( $Y = A + BX$ , 其中:  $Y$ ——水势;  $X$ ——水分饱和和亏缺), 其斜率  $B$  表示树木的吸水能力,  $B$  值越大表明树木吸水抗旱能力越强。刺槐水分释放曲线为:  $Y = 0.4639 + 0.0577X$ , 其斜率低于侧柏 (0.1289) 栓皮栎 (0.1359)、黄栌 (0.0953)、油松 (0.0885)、元宝枫 (0.0771)、紫穗槐 (0.0957), 和白蜡 (0.0658) 差不多, 说明刺槐吸水能力相对较弱, 与  $\Psi^ws = s$  和  $\Psi^ws = s$  所反映的规律基本一致<sup>[20]</sup>。

抗脱水能力也是反映树木抗旱性的一个重要指标, 通常以叶保水力来表示。单位时间内脱水越多表明保水力越差, 反之保水力越强。刺槐在失水 48 h 左右基本达到恒重, 和栓皮栎、沙棘差不多。保水力低于油松、侧柏、黄栌、元宝枫等, 而高于白蜡和紫穗槐。树木的保水能力一方面与苗木的叶肉质化程度及比叶面积有关, 另一方面与组织中自由水、束缚水的组成机构比例有关。叶子的肉质化程度越高, 单位叶组

织中贮存的水分就越多, 抗脱水能力就越强。比叶面积反映了叶组织贮备水分蒸发接口的大小, 比叶面积大则丧失水分速度就快, 保持水分能力就差。正常水分条件下, 刺槐的叶组织肉质化程度为  $0.88 \pm 0.05$  g/dm<sup>2</sup>, 比叶面积为  $0.87$  dm<sup>2</sup>/g。肉质化程度与栓皮栎和白蜡树相似, 高于紫穗槐, 低于沙棘、元宝枫和黄栌等树种, 而比叶面积则与肉质化程度规律相反<sup>[20, 38]</sup>。

自由水  $V_a$  和束缚水  $V_s$  的含量及结构比例反映了树木的不同水分状况特点。束缚水含量比例越高, 表明细胞原生质黏滞性及亲水性强, 有利于将更多的水分保持在体内, 可以忍耐较强的干旱, 因此, 束缚水通常也是一个重要的旱生指标。此外, 束/自比值的变化对植物水分的释放速率和细胞的渗透调节作用也有一定的影响。一般阔叶树的叶组织的绝对含水量均高于针叶树种, 但束缚水比例却低于针叶树。刺槐的的束缚水含量和束/自比值大约在 18.64% ~ 30.51% 和 0.23 ~ 0.44 之间, 8 月份相对较高, 而其它月份则较低。和其它树种相比, 束缚含水量和束/自比值与元宝枫、刺槐接近, 低于针叶束和黄栌, 而高于白蜡和沙棘, 其变化趋势与前述各树种叶组织肉质化程度及保水力基本一致<sup>[20]</sup>。

#### 1.5 最适水分环境与刺槐的水分利用效率

植物的耗水量与蒸腾强度密切相关, 因此具有相似的变化趋势。据王斌瑞 (1988) 研究, 在土壤水分状况较好 (12%) 的情况下, 苗木的蒸腾强度一天当中随气温的变化而变化, 蒸腾强度的峰值发生在 14:00 左右, 以后蒸腾逐渐减弱。刺槐蒸腾强度的峰值为  $205$  mg/(dm<sup>2</sup> · h), 高于油松  $97$  mg/(dm<sup>2</sup> · h)、低于沙棘  $216$  mg/(dm<sup>2</sup> · h) 和北京杨  $223$  mg/(dm<sup>2</sup> · h), 和华北落叶松相同。苗木蒸腾速率与土壤含水量密切相关, 维持刺槐蒸腾的最适含水量为 18.82%, 而侧柏则为 19.70%。当土壤含水量降低时, 植物代谢失常, 呼吸变弱, 蒸腾曲线变幅逐渐变小; 刺槐土壤水合补偿点为 4.55%, 侧柏为 3.91%, 明显低于刺槐<sup>[12]</sup>。据王瑞斌研究, 刺槐一年生苗木的凋萎湿度为 4.52%, 华北落叶松和沙棘 2 年生苗分别为 5.29% 和 3.65%, 刺槐的抗旱能力高于华北落叶松, 低于沙棘, 研究结果与前述基本相同, 土壤水和补偿点与凋萎湿度是同一概念, 只是叫法不同而已。植物蒸腾作用最强, 并不表明光合作用最强, 因此蒸腾作用最适含水量也不同于光合作用最适含水量, 刺槐光合作用最适含水量为 17.13%, 高于侧柏最适光合含水量 15.9%, 略低于自身蒸腾最适含水量 18.82%。刺槐维持较高叶片水分利用效率的土壤含水量为 10% ~ 13%, 而侧柏则为 9.5% ~ 11%, 明显低于刺槐<sup>[13]</sup>。

刺槐水分利用效率也可用蒸腾系数表示, 蒸腾系数越大表示水分利用效率越低。刺槐的蒸腾系数为 316, 相对较高。当遭遇干旱胁迫时, 各树种的水分利用效率都有不同程度提高, 刺槐的水分利用效率可以提高 1.43 倍 (蒸腾系数降为 130)。刺槐主要是以落叶方式抑制水分消失, 在减少水分丧失的同时还保持相当的光合作用能力, 有利于其增强抵御干

旱的能力(李吉跃,2001)。耗水系数是表示水分利用效率的另一个指标,刺槐的耗水系数为 754.7,低于杨树、柠条、侧柏和油松,而高于沙棘。当遭受轻度干旱时,刺槐的耗水系数下降,随着干旱的加重,刺槐的耗水系数又呈现上升趋势<sup>[27]</sup>。

2 单木耗水动态

树木单木耗水是研究林分耗水的基础,根据单木耗水研究结果,通过空间和时间尺度的扩大可以用来研究林分水平的蒸腾耗水。目前,研究单木耗水的方法主要有:①快速称重法;④稳态气孔计法;④热脉冲法;¼整树容器法;½微气象法<sup>[4]</sup>。

2.1 刺槐时间液流特征

关于刺槐单木尺度的耗水状况,国内研究相对较少。孙鹏森(2002)利用热脉冲法对包括刺槐在内的北京及华北主要造林树种的耗水特性进行了研究。按照林木的液流时间进程,其日动态可分为三个阶段:启动阶段、高峰阶段和停止阶段。树种液流启动与光照关系密切,主要是受光照控制。早上,太阳辐射逐渐增加,气温逐渐升高,当光照达到一定强度即光补偿点以上时,气孔开始光合和蒸腾生理活动。大部分树种液流启动时间在早上 5:00~6:00 之间,与日出季节规律基本相符,阴天气孔开放时间较晚,且液流通量也较低。不同树种液流启动时间差异较大,5 月份晴天刺槐的液流启动时间为 6:06 左右,晚于油松的启动时间,而早于侧柏(6:15)、火炬(6:17)、元宝枫(6:45)、白皮松(6:15)的启动时间。阴天各树种启动时间将有不同程度的推迟,液流通量也变小。边材不同位点启动时间也有所不同,刺槐边材厚度相对较小,内外层间性质差异也较小,启动时间相差也较短,大约为半小时左右,其它树种如油松、栓皮栎、白皮松等相差 1 h 以上。

液流启动以后,由于光照加强、气温上升,液流速度也逐渐上升,9:00~12:00 达到峰值,刺槐达到峰值需要时间很短,9:00 左右即达到峰值。刺槐是典型的宽峰树种,即液流达到峰值后,变动幅度较小,较长时间维持在较高水平,出现一个“高峰平台”,一直持续到 20:00 液流速度才不断下降。刺槐的另一个特点是夜间液流不停止,保持一定的液流速度。油松、元宝枫、侧柏是明显的单峰树种,液流速度达到峰之后,持续时间较短,很快就下降;而白皮松、火炬树则与刺槐相似属“宽峰”树种。在遭受干旱胁迫时,液流峰值可能提前出现,也可能呈现“双峰”现象。

刺槐液流停止时间大约为 20:00,春天、秋天稍早一些,夏天则可能更晚一些。液流停止并不是液流速度为 0,而是稳定的保持在较低水平。刺槐夜间具有相对较强的液流活动,元宝枫、油松液流活动则基本停止<sup>[41,43]</sup>。

2.2 液流通量与环境的关系

2.2.1 与土壤含水量之间关系

土壤含水量决定液流的整体水平。在十分干旱地区,土壤供水本身可以决定实际蒸发速率,而其气象因子影响较小。一般情况下,当土壤含水量较低时,树木液流通量也较

低;土壤含水量不断增加时,液流通量也会相应提高;当土壤含水量升高到某一临界值时,液流通量增长速度变缓,甚至不再增加。二者之间呈指数关系:  $Y = A e^{BX}$ 。树干木质部的液质比也受土壤含水量的影响,两者之间呈线形关系。

2.2.2 气象因子与液流通之间关系

树干液流速度( $V_s$ )为横断面上各位点液流速度得平均值,是树木水分运动规律的重要参数,反映了液流的瞬时变动规律。 $V_s$ 和太阳总辐射之间呈二次曲线线相关关系:  $V_s = B_0 + B_1 \cdot ESR + B_2 \cdot ESR^2$ 。当太阳辐射( $ESR$ )较低时, $V_s$ 随  $ESR$  的增加而增加,当  $ESR$  大于某个极值时, $V_s$ 随  $ESR$  的增加而降低。 $ESR$  极值点具有重要的现实意义,当辐射强度超过这个极值点时,高强度辐射伴随着气温升高,叶面也随之升高温度,气孔大量关闭,液流速度随之下降。

除辐射强度外,气温也是对液流影响较大的环境因子, $V_s$ 和气温之间关系呈“S”型关系:  $V_s = e^{(a_0 + b_1 T_a)}$ 。该表达式只适合一定的温度范围,即 20~35℃,超过这个范围拟和偏差就较大。从二者关系曲线看来,在一定范围内液流速度随着气温的上升而缓慢上升,气温高于 30℃时液流速度明显加快,因近表面蒸发区为水分蒸发提供了更多的潜能。

风速的增加会加快水气蒸发过程,与液流的关系用 Cubic 模拟效果较好。当风速较低时,液流随风速的增加而增加较快,很小的风速变化就引起液流较大的波动。但大风会导致气孔张开度降低甚至关闭,因而降低液流。

相对湿度增加,将导致液流速度降低。因相对湿度提高,空气中水汽增大,使边界层水汽压与叶片气孔腔水汽梯度减小,水汽化过程变慢液流速度降低。

除了以上气象因子外,土壤温度对树木液流速度也有影响,但土壤温度对液流的影响不像其它气象因子有较强的规律性。由于受多方面因素的影响,土壤温度日变化规律和液流的变化动态并不一致,有时甚至出现反向变动结果,很难用数学模拟的方法描述二者间的关系。

2.2.3 刺槐潜在液流通量

独立的气象因子与液流之间有不同的关系模型,最佳拟和模型都不一定是线形关系,但用线形模型分析也具有较高的相关性,因此,可以利用多元线形回归的方法构建液流通量和环境因子的关系模型。孙鹏森(2001)研究了华北主要造林树种的潜在液流通量的预测模型,刺槐的预测模型为:  $Q_p = 32.568 - 7.725W_s + 1.093T_a - 0.464R_h + 47.625ESR - 1.470T_s$  ( $R = 0.884$ ,  $W_s$ ——风速;  $T_a$ ——气温;  $R_h$ ——相对湿度;  $ESR$ ——辐射强度;  $T_s$ ——土壤温度)。从预测模型可以看出,液流量与气温和辐射强度成正相关,而与风速、相对湿度和土温呈负相关。与液流量关系最密切的为辐射强度,其次为风速、气温、相对湿度和土温,风向则与液流相关性较差,在逐步回归中被剔除。主分量分析结果表明,辐射强度、风速和空气温度为第一主分量,空气湿度和土温则为第二主分量。根据预测模型,代入当地的气象参数,即可推算出树种的液流通量。各树种液流通量也存在着季节变化,刺槐 6、7、

8 月份的液流通量相对较高,5 和 9 月份则较低。各树种间液流通量也有较大差异,刺槐的年平均值为  $0.040\ 98\ \text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ , 低于火炬树和元宝枫,而高于白皮松、侧柏、栓皮栎和油松。

### 2.3 刺槐的蒸腾作用

#### 2.3.1 蒸腾强度的动态变化

蒸腾强度的动态包括日动态和季节动态。蒸腾强度日变化规律为:清晨较小,随着气温、光照等的升高,蒸腾强度逐渐增大,至 13:00 时达到最高值,下午随气温下降,光照减弱,蒸腾强度又逐渐降低,整个日变化呈单峰型。刺槐蒸腾强度季节变化也呈单峰型。但阴坡和阳坡蒸腾强度达到峰值时间不同,一般阴坡 8 月份达到最高值,而阳坡则在 7 月份达到峰值(贾志清,1999)。

#### 2.3.2 蒸腾强度与环境因子的关系

光照、气温、相对湿度、风速和地温等环境因子对蒸腾强度均有影响,蒸腾强度的日变化规律与这些因子呈显著相关关系。拟合方程为:  $Y = 0.009\ 5X_1^{-0.205\ 5} \cdot X_2^{-0.558} \cdot X_3^{-0.326\ 8} \cdot X_4^{0.078\ 8} \cdot X_5^{0.584\ 9}$  (阴坡)或  $Y = 0.009\ 6X_1^{-0.160\ 2} \cdot X_2^{-0.120\ 8} \cdot X_3^{-0.209\ 3} \cdot X_4^{0.415\ 4} \cdot X_5^{0.318\ 6}$  (阳坡) ( $X_1$ ——地温; $X_2$ ——风速; $X_3$ ——气温; $X_4$ ——湿度; $X_5$ ——光照)。

#### 2.3.3 蒸腾耗水量

不同树种蒸腾耗水量季节变化趋势基本相同,生长季节初期叶量较小,气温较低,蒸腾强度叶较小,蒸腾耗水量也较小;随着植株的生长,叶量逐渐增加,蒸腾强度也较大,因而蒸腾耗水也逐渐增加,8 月份达到峰值,以后由于环境因子的变化蒸腾强度逐渐减弱。一般阴坡耗水量高出阳坡 10% 左右(贾志清,1999)。

## 3 林分耗水动态

林分耗水包括林地土面蒸发、树冠蒸腾和林冠截留三部分,其与外界环境密切相关,还表现出一定的地域特征。魏天兴(1998)等利用水量平衡和波文比-能量平衡法对晋西黄土区刺槐林的耗水规律进行了研究,林地土面蒸发、树冠蒸腾和林冠截留三部分所占的比例分别为:林木蒸腾量为 57.7%~60.2%,林地土面蒸发量为 13.2%~22.8%,林冠截留量为 17.0%~28.2%。林分蒸腾耗水量表现明显的季节变化,夏季(6~8 月)蒸散量(ET)占生长季节蒸散耗水量的比例 80%;林分蒸腾耗水量除表现季节差异外,其它条件对其也有影响,其一般规律为:丰水年大于少水年,阴坡耗水大于阳坡,密度大的林分耗水量大于低密度林分。

李洪建(1996)等对西北黄土沟壑区刺槐林的水分生态

进行了研究,生长期刺槐林的蒸腾强度为  $0.114\ 0\ \text{g}/(\text{g} \cdot \text{h}) \pm 0.058\ 6$ ,光照强度对蒸腾强度影响最为明显,气温影响次之,相对湿度影响不明显。刺槐生长季节的水势为  $1.759 - \text{MPa} \pm 0.457$ 。刺槐蒸腾季节变化与土壤水分季节变化关系不密切,但刺槐水势变化受土壤水分变化影响显著。刺槐总蒸散量和蒸腾耗水量分别占同期降水量的 68% 和 16.3%。

根据刺槐林分的年耗水动态,不同季节供求平衡上也表现出一定差异。在干旱半干旱地区,每年 4~6 月份由于降雨量较小,林分水分消耗量大于供给量,供耗矛盾突出;进入雨季后,供耗矛盾缓解,丰水年供水量基本能满足林分生长的需求,欠水年还表现出一定的水分亏损。在干旱季节或干旱年份,密度大的林分耗水量大,有效供给减少,林地水分亏损较严重;一般情况下,不同坡向水分亏损表现为:阳坡 > 半阳坡 > 阴坡(魏天兴,2001)。

林地土壤含水量受降水量及其分配的影响。林分水分耗供的年动态变化,使林地土壤水分也表现出相应的周年变化特征。在干旱半干旱地区,土壤水分的补充主要靠当年的降水,偏涝的年份年生长末期的土壤水分对翌年生长初期的土壤水分有一定的影响,每年 6 月份以前主要消耗上一年的水分,土壤水含水量下降;6 月份以后,随着雨季的来临土壤含水量增加,但在欠水年耗水大于供水,也存在着土壤贮水量减少现象。生长季节末期林地储水量与生长季节降水量呈正相关,同时也受降雨量年分配的影响。林地土壤水分动态空间上表现也有所不同,土壤水分含量和年动态变幅随深度增加而减小,李洪建(1995)等根据含水量年动态变化将土壤自上而下依次划分为活跃层、次活跃层和稳定层,刺槐林地水分循环主要在活跃层和次活跃层,0~100 cm 土层含水量季节动态变化较大,100~200 cm 土层含水量季节动态变化相对较小,200~300 cm 土层储水量基本稳定,个别降雨量特大年份也受到影响。

总体来讲,我国在刺槐水分生理和抗旱机理方面做了大量卓有成效的基础性研究工作,但大部分研究侧重于苗木耗水及抗旱生理特性,由于野外环境条件的复杂性及难控制性,对单木和林分耗水研究相对较少。同时我国地域广阔,自然条件多变,因此不同地理种源在其耗水特性和抗旱生理特性表现也有所不同,国内很少对此研究。此外,以前的研究多以实生苗为主,自上世纪 80 年代以来,我国选育了大量的刺槐无性系,但这些无性系的选育主要以生长量为依据,缺乏水分生理方面的基础研究。开展不同无性系的水分生理和抗旱特性研究,对选育节水型高生产力刺槐无性系良种具有重要意义。

#### 参考文献:

[1] 王九龄,陈义,李荫秀.北京西山树木耐旱能力的初步观察[J].北京林业,1981,(2):10-21.  
[2] 马履一,等.北京西山试验林场洋槐人工林干梢死亡原因初探[J].北京林业,1984,(2):1-11.  
[3] 巨关升,刘奉觉,郑世锴,等.稳态气孔计与其它三种方法蒸腾测值的比较研究[J].林业科学研究,2000,13(4):360-365.  
[4] 巨关升,刘奉觉,郑世锴,等.选择树木蒸腾耗水测定方法的研究[J].林业科技通讯,1998,(10):12-14.

- [ 5] 刘奉觉,郑世锴,巨关升,等. 树木蒸腾耗水测算技术的比较研究[J]. 林业科学, 1997, 33(2): 117– 125.
- [ 6] 袁 瀛,惠养瑜,吴永麟,等. 黄土丘陵区刺槐生长影响因子研究[J]. 水土保持研究, 1996, 3(3): 146– 154.
- [ 7] 李洪建,等. 刺槐林地土壤水分的周年变化特征[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(6): 6– 10.
- [ 8] 李洪建,王孟本,陈良富,等. 刺槐林水分生态研究[J]. 植物生态学报, 1996, 20(2): 151– 158.
- [ 9] 柴宝峰,王孟本,李洪健,等. 晋西人工防护林乡土树种抗旱性研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(1): 28– 32.
- [ 10] 魏天兴,等. 西南南部黄土区林地枯落物截持降水的研究[J]. 北京林业大学学报, 1998, 20(6): 1– 6.
- [ 11] 魏天兴,等. 晋西南黄土区刺槐油松林地耗水规律研究[J]. 北京林业大学学报, 1998, 20(4): 36– 40.
- [ 12] 魏天兴,余新晓,朱金兆,等. 黄土区防护林主要造林树种水分供需关系研究[J]. 应用生态学报, 2001, 12(2): 185– 189.
- [ 13] 王斌瑞. 晋西黄土高原主要造林树种凋萎湿度的研究[J]. 北京林业大学学报, 1988, 10(4): 17– 23.
- [ 14] 沈国舫,李吉跃,武康生. 京西山区主要造林树种抗旱特性研究( ) [A]. 造林论文集[C]. 北京: 中国林业出版社, 1990. 3– 12.
- [ 15] 张建国,等. 京西人工林水分参数的研究( ) [J]. 北京林业大学学报, 1994, 16(1): 1– 12.
- [ 16] 李吉跃,张建国,姜金璞. 京西人工林水分参数的研究( ) [J]. 北京林业大学学报, 1994, 16(2): 1– 9.
- [ 17] 张建国,等. 京西人工林水分参数的研究( ) [J]. 北京林业大学学报, 1994, 16(4): 46– 54.
- [ 18] 李吉跃. 植物耐旱性及其机理[J]. 北京林业大学学报, 1991, 13(3): 92– 100.
- [ 19] 李吉跃. 太行山区主要造林树种耐旱性的研究( ) [J]. 北京林业大学学报, 1991, 13(Supp. 1): 1– 9.
- [ 20] 李吉跃. 太行山区主要造林树种耐旱性的研究( ) [J]. 北京林业大学学报, 1991, 13(Supp. 1): 10– 21.
- [ 21] 李吉跃. 太行山区主要造林树种耐旱性的研究( ) [J]. 北京林业大学学报, 1991, 13(Supp. 2): 230– 239.
- [ 22] 李吉跃. 太行山区主要造林树种耐旱性的研究( ) [J]. 北京林业大学学报, 1991, 13(Supp. 1): 240– 240.
- [ 23] 李吉跃. 太行山区主要造林树种耐旱性的研究( ) [J]. 北京林业大学学报, 1991, 13(Supp. 1): 251– 265.
- [ 24] 李吉跃. 太行山区主要造林树种耐旱性的研究( ) [J]. 北京林业大学学报, 1991, 13(Supp. 1): 266– 279.
- [ 25] 李吉跃,张建国. 北方主要造林树种耐旱机理及其分类模型的研究( ) [J]. 北京林业大学学报, 1993, 15(3): 1– 10.
- [ 26] 李吉跃. 植物耐旱性及其机理[J]. 北京林业大学学报, 1991, 13(3): 92– 100.
- [ 27] 韩蕊莲,等. 黄土高原原生树种苗木的耗水特性[J]. 应用生态学报, 1994, 5(2): 210– 213.
- [ 28] 郭连生,田有亮. 9种针阔叶幼树的蒸腾速率、叶水势和环境因子关系的研究[J]. 生态学报, 1992, 12(1): 47– 52.
- [ 29] 郭连生,田有亮. 运用 PV 技术对华北常见造林树种耐旱性评价的研究[J]. 内蒙古林学院学报(自然科学版), 1998, 20(3): 1– 8.
- [ 30] 郭连生,田有亮. 4种针叶幼树光合速率、蒸腾速率与土壤含水量的关系及其抗旱性研究[J]. 应用生态学报, 1994, 5(1): 32– 36.
- [ 31] 田有亮. 几种阔叶树种水势和膨压的关系及其在抗旱性研究中的应用[J]. 内蒙古林学院学报, 1992, 2: 49– 53.
- [ 32] 王孟本,等. 树种蒸腾作用、光合作用和蒸腾效率的比较[J]. 植物生态学报, 1999, 23(5): 401– 410.
- [ 33] 马延庆,等. 黄土高原地区刺槐生长主要因子的灰色优势分析[J]. 水土保持通报, 1995, 16(2): 50– 54.
- [ 34] 杨新民,等. 纸坊沟流域人工刺槐林生长状况与土壤水分条件研究[J]. 水土保持研究, 1994, 1(3): 31– 45.
- [ 35] 王彦辉. 几个树种的林冠降雨特征[J]. 林业科学, 2001, 37(4): 2– 9.
- [ 36] 贾志青,孙保平,刘涛,等. 黄家二岔小流域不同树种蒸腾作用研究[J]. 水土保持通报, 1999, 19(5): 12– 15.
- [ 37] 余新晓,陈丽华. 黄土地区防护林生态系统水量平衡研究[J]. 生态学报, 1996, 16(3): 238– 245.
- [ 38] 谢寅峰,沈惠娟,罗爱珍,等. 南方7个造林树种幼苗抗旱生理指标的比较[J]. 南京林业大学学报, 1999, 23(4): 13– 16.
- [ 39] 乔勇进,龙庄如. 4个刺槐无性系扦插光和呼吸特性的测定[J]. 山东林业科技, 1996, (1): 29– 32.
- [ 40] 张敦论,乔进勇,郝金标,等. 水分胁迫下8个树种几项生理指标的分析[J]. 山东林业科技, 2000, (3): 5– 9.
- [ 41] 孙鹏森,等. 油松、刺槐林潜在耗水量的预测及其与造林密度的关系[J]. 北京林业大学学报, 2001, 23(2): 1– 6.
- [ 42] 徐化成,易宗文. 华北低山区土壤水分季节变化与林分生长关系[J]. 林业科学, 1979, (2): 97– 104.
- [ 43] 孙鹏森. 水源保护树种耗水特性研究及应用[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [ 44] 王沙生,高荣孚. 植物生理学(第二版)[M]. 北京: 中国林业出版社, 1991.