

沙木蓼蒸腾耗水特性及环境影响因子研究

乌日娜¹, 丁国栋^{1,2}, 吴斌^{1,2}, 张宇清^{1,2},
肖辉杰^{1,2}, 樊文会¹, 高广磊¹, 石慧书³, 赵进宏³

(1. 北京林业大学 水土保持学院 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083;
2. 宁夏盐池荒漠生态系统定位研究站, 宁夏 盐池 751500; 3. 宁夏盐池县环境保护和林业局, 宁夏 盐池 751500)

摘要: 为探讨毛乌素沙地固沙树种选择和植被水分管理, 2009 和 2010 年 5—9 月在宁夏回族自治区盐池县利用热包裹式树干液流仪测定沙木蓼(*Atraphaxis bracteata*)茎干液流, 并同步观测环境影响因子。研究表明: (1) 沙木蓼茎干液流日变化呈显著规律性, 液流速率呈多峰曲线, 且昼夜变化明显。 (2) 沙木蓼生长季液流变化具有节律性。 5—6 月植物处于生长初期, 液流量较小; 7—8 月雨季到来, 植物生长旺盛, 液流速率也达到生长季的最大值; 9 月植物生理过程减慢, 沙木蓼液流量逐减降低。 (3) 采用偏相关分析法分析各环境因子对于沙木蓼茎干液流的影响, 结果表明, 太阳辐射是影响沙木蓼茎干液流的最主要环境因子, 其次是大气温度、大气相对湿度和风速。

关键词: 沙木蓼; 茎干液流; 蒸腾; 耗水; 环境影响因子

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)03-0068-05

中图分类号: Q948.1

Characteristics of Water Consumption of *Atraphaxis Bracteata* Through Transpiration and Its Environmental Impacting Factors

WU Ri-na¹, DING Guo-dong^{1,2}, WU Bin^{1,2}, ZHANG Yu-qing^{1,2},
XIAO Hui-jie^{1,2}, FAN Wen-hui¹, GAO Guang-lei¹, SHI Hui-shu³, ZHAO Jin-hong³

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, and Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating, Ministry of Education, Beijing 100083, China; 2. Yanchi Research Station, Yanchi, Ningxia 751500, China; 3. Environmental Protection and Forestry Bureau of Yanchi County, Yanchi, Ningxia 751500, China)

Abstract: In order to choose proper sand-fixing shrub species and vegetation water management in Mu Us sandy land, stem sap flow of *Atraphaxis bracteata* was measured by using heat-balance packaged stem sap flow measuring system and simultaneously, related environmental impact factors were observed with automatic weather station system in Yanchi County, Ningxia Hui Autonomous Region from May to September in 2009 and 2010. Results showed that: (1) Diurnal dynamics of the sap flow of *Atraphaxis bracteata* presented a significant regularity. Changing course of the sap flow velocity presented a multi-peak curve with obvious diurnal change. (2) In the growing season, the sap flow velocity of *Atraphaxis bracteata* changed with its growth stage. In the early growth period of *Atraphaxis bracteata* in May and June, the sap flow velocity was relatively low because of low soil moisture; in the vigorous growth period of *Atraphaxis bracteata* after rainy season in July and August, the sap flow velocity reached its maximum due to the increased cumulative soil water content; and in September, physiological process of *Atraphaxis bracteata* slowed down and consequently, the sap flow velocity decreased gradually. (3) The effects of environmental factors on the sap flow velocity were analyzed by using partial correlation method. Solar radiation was found to be the most important factor for the sap flow of *Atraphaxis bractea*, followed by atmospheric temperature, air relative humidity and wind speed.

Keywords: *Atraphaxis bracteata*; sap flow; transpiration; water consumption; environmental factor

收稿日期: 2011-11-01

修回日期: 2011-12-01

资助项目: “十二五”国家科技支撑计划项目“荒漠化地区退化土地治理与植被保育技术集成与示范”(2012BAD16B02); 教育部博士点基金项目“基于生态足迹的沙区人居环境安全评价与预测”(20090014110003)

作者简介: 乌日娜(1986—), 女(蒙古族), 辽宁省凌源市人, 硕士研究生, 主要从事荒漠化防治研究。E-mail: wurina_2009@163.com。

通信作者: 丁国栋(1963—), 男(满族), 内蒙古赤峰市人, 博士, 教授, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: dch1999@263.net。

植物的水分特性决定了植物的蒸腾耗水及对干旱环境的适应性^[1]。在生态条件恶劣,水资源短缺的西北荒漠区,选择耐旱节水型树种,科学布局造林密度和配置方式对持续发挥固沙灌木生态防护功能具有重要的指导意义。在国内外学者的研究中,植物茎干液流有多种方法进行测量,如蒸渗仪法^[2],快速称重法^[3]以及热技术包括热脉冲法^[4]、热平衡法^[5]和热扩散法^[6]。其中,利用热技术来测量林木活体蒸腾耗水量的方法具有数据测量准确,野外测量方便等优点。该方法由 Huber^[7]首先提出使用,以后由 Marshall^[8],Swanson 等^[9]和 Edwards^[10]改进完善,现已趋于成熟。徐先英等^[11]利用热平衡法测量了不同地径下的梭梭,柽柳和白刺的液流日季变化;严昌荣等^[12],许浩等^[13]利用 Dynamax 茎流仪分别对北京山区胡杨和核桃楸和塔克拉玛干沙漠腹地多枝柽柳树干液流进行了测定;赵奎等^[14]也利用 EGSF 茎流系统对毛乌素沙地白榆树干液流进行了研究。

沙木蓼(*Atraphaxis bracteata*)属于蓼科灌木,根系比较发达,且吸水力强,喜沙埋,并能长出许多不定根,形成稠密的根系网,使其在流动沙地上能稳定生长,有很好的固沙作用;沙木蓼适宜生长于低位浅山地区,耐旱性强,生长迅速,适宜营造水土保持林,是荒漠地区优良的固沙灌木树种。本文自 2009—2010 年,采用热平衡包裹法,利用 Dynamax 茎流测量系统,对宁夏盐池毛乌素沙地沙木蓼茎干液流进行连续观测,并同步测量其环境影响因子,分析日、季茎流变化规律和与环境影响因子的关联性,以期恢复和治理干旱荒漠区生态环境提供科学理论依据。

1 研究区概况及试验方法

1.1 研究区概况

研究区位于毛乌素沙地南缘的宁夏回族自治区东部盐池县,属陕、甘、宁、蒙 4 省(区)交界地带,地理坐标为北纬 37°48',东经 107°23',海拔约 1 354 m,属典型中温带大陆性季风气候区,晴天多,降雨少,光能丰富,日照充足,年平均气温 7.8℃,冬夏两季气候迥异,平均温差 28℃左右,秋冬交节之际,昼夜温差可达 20℃。年均降水量 287 mm,年平均风速 2.6 m/s,年平均相对湿度 51%,无霜期 128 d,绝对无霜期 100 d。

1.2 试验方法

2009—2010 年,在相同立地条件样地内分别选择地径分别为 12.2,21.2 和 35.3 mm,生长状况良好,无疤无结沙木蓼植株,采用澳大利亚 Dynamax 公司生产的热平衡(stem heat balance,SHB)包裹式茎流计观测茎干液流动态变化。其原理是茎流计热源以恒定的功

率将热量传输给茎干,并通过能量的消耗来计算通过茎干的液流量。将馈线与数采器(DT50)连接,每 10 min 采集一次数据并自动记录保存,定期下载。

在样地附近旷野处布设 Vantage 自动气象站同步测量大气辐射、空气相对湿度、空气温度和风速等气象因子。土壤含水量采用烘干法,土钻取样深度 200 cm,每隔 20 cm 取样一个,每样重复 3 次,并进行室内称重烘干,计算含水量。每月取土样 2 次,降雨加测 1 次。

1.3 数据处理

采用 SPSS 软件和 Excel 软件处理数据并做图,利用测量系统自带软件处理 5—10 月连续的茎干液流数据。

2 结果与分析

2.1 茎干液流日变化规律

植物茎干液流日变化具有明显节律性。图 1 表明,沙木蓼的茎干液流通量密度呈现多峰型,分析比较 2009 年和 2010 年 6 月 1 日(均为晴天)数据可知,沙木蓼茎干液流变化规律比较稳定。清晨 6:00 左右开始启动,并迅速上升,8:00 第 1 次达到峰值,2009 年为 312.57 g/h,2010 年为 221.39 g/h,随后峰值处于上下连续波动状态,持续时间保持在 10 h。此后液流速率开始迅速下降,21:00 下降到最低值,2009 年为 0.70 g/h,2010 年为 6.04 g/h,夜间仍有液流,虽没有白天明显,但也仍处于上下波动状态。这是因为清晨太阳辐射弱,气温低,空气相对湿度高,植物液流上升缓慢;随后,太阳辐射逐渐增加,气温逐渐升高,空气相对湿度下降,气孔导度不断升高,液流速度逐渐增强;而后,随着光照强度减弱,温度降低,空气相对湿度增高,叶内外水汽压差减少,液流速度减小,到日落时,液流速度降为最低值。沙木蓼茎干在夜间仍有液流流动,这是因为白天植物消耗水分较多,植物体内处于缺水状态,夜间蒸腾作用较弱,同时植物体内与大气之间存在一定的水汽压差,使根部仍能吸水,并补充白天失水,所以在夜间仍有部分液流存在。

从图 1 可以看出,2010 年的沙木蓼平均液流速率高于 2009 年,2010 年最大峰值为 223.9 g/h,一天内液流累积量达到 4 248 g,2009 年最大峰值则为 95.9 g/h,一天内液流累积量为 3 220 g。其中最为突出的是 2 a 的夜间液流速率,2010 年夜间液流在 20:10 时达到 0.1 g/h 为最低值后,会有明显的迅速上升现象,并在 23:50 时上升到了 353.6 g/h,大于白天最大峰值 10:20 时的 255.3 g/h,这是因为 2010 年土壤水分较充足,夜间根系从土壤中吸收足够的水分

来补给白天的蒸腾失水;2009 年在 21:00 后只有微弱的夜间液流流动,从 21:00 至次日 6:00 启动前的平均液流量为 261 g,占全天总量的 12.34%。但是在国外的液流研究中,出现了夜间零液流(zero sap-flow point)的情况,并且夜间液流量也比本文中数值略小,这是与研究地带有关。本研究是在毛乌素沙地进行,属于半干旱荒漠地带,是植物为了适应缺水环境下的耐旱表现。郭卫华等^[1]研究沙棘和中间锦鸡儿的干旱胁迫表明,这 2 种灌木夜间蒸腾占全天蒸腾的比例相大,夜间蒸腾在不同物种之间、不同供水量之间存在明显差异,而且越干旱的环境比例越大,这与本文研究的沙木蓼相吻合。这也能充分说明沙木蓼的耐旱特性以及作为一种耐旱灌木的优势所在。

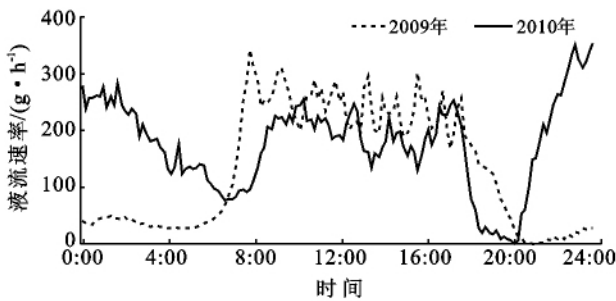


图 1 2009 年和 2010 年沙木蓼茎干液流日变化(6 月 1 日)

2.2 茎干液流季变化规律

沙木蓼茎干液流随季节变化呈现出相应的规律性。图 2 为 2010 年和 2009 年沙木蓼茎干叶流的季变化规律,分别为 2 a 内 5—8 月每日的液流量,其变化规律有所不同。由图 2 可以看出,由于 5 月植物处于生长初期,叶子还未完全发芽,蒸腾速率较小,又受到土壤水分限制,因而这段时间树木液流累积量较小,2009 年 5 月液流日累积量为 2 342.72 g,2010 年则为 4 003.56 g;进入 6 月后,植物叶片迅速展开,进入快速生长期,液流速度明显提升,特别是 2010 年 6 月降雨增加,土壤含水量急剧升高,液流累积量也在 6 月 8 日达到了最大值 6 369 g;7—8 月进入雨季,土壤含水量增加,植物液流速率增大,2009 年 7 月平均日累积量为 3 165.79 g,比 5 月增加了 35%;8 月液流速率达到整个生长季的峰值,但累积量却小于 6 月展叶期,2009 年 8 月为 2 546.16 g 明显小于 6 月 3 451.82 g,2010 年 8 月(3 345.90 g)与 6 月(4 521.05 g)日平均累积量差值为 1 175.16 g,这是 2 a 不同时间内环境影响因子共同作用的结果。2009 年每月液流累积量均达到一个峰值,其中,2009 年 5—6 月季累积液流量小于 2010 年;但进入 7 月以

后,2009 年数值稳定升高,且在 7 月 26 日液流通量达到最大峰值 7 388.8 g,高于 2010 年 7 月 10 的最大值 5 454.3 g,并且在 8 月迅速升高,这是由于 8 月处于植物生长旺盛期,需水较多同时由于此期土壤含水量增加,所以液流累积量也出现较大值。由图 2 可知,虽然 2009 年最大液流通量值高于 2010 年,但平均日液流通量 2010 年要明显高于 2009 年,因为 2 a 测量均在同一植株上,随着植株的生长,2010 年树干直径大于 2009 年,因此,随着叶片的增加,蒸腾量有所增大,并且树干中木质部导管也随着生长,2010 年的平均日液流通量要明显高于 2009 年。

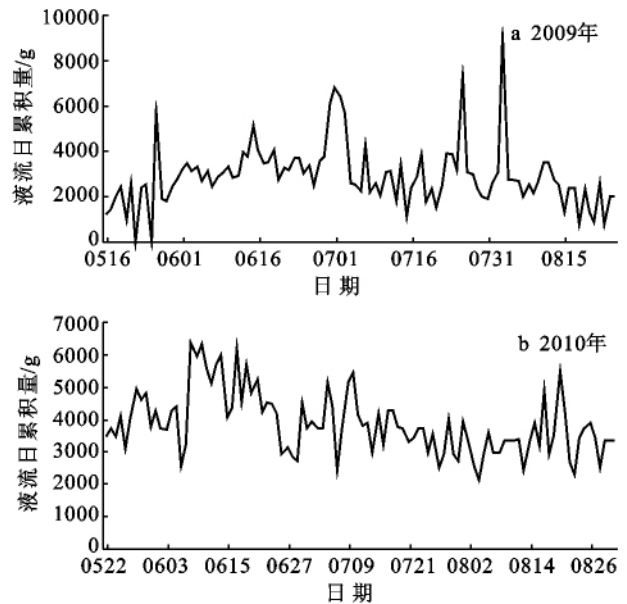


图 2 2009 年和 2010 年沙木蓼茎流季变化规律

2.3 环境因子对茎干液流的影响

植物在生长过程中,除水分是重要的限制因子外,环境因子也对其生长有重要影响。本文对 2009 年同步测定的影响沙木蓼茎干液流的气象因子包括太阳辐射、温度、大气相对湿度以及风速进行相关性分析,找出茎干液流日变化与各环境因子间的规律性。分析 7 月 1—4 日的液流与环境因子相关性得出,液流与太阳辐射、温度、大气相对湿度、风速的偏相关系数分别为 0.832,0.493,-0.474,-0.571,进而可知在环境因子中,太阳辐射是影响沙木蓼茎干液流最主要的因素,其次是空气温度,大气相对湿度和风速对液流影响较弱如图 3 所示。太阳辐射和空气温度与液流的变化是同步的,太阳辐射一是影响大气温度以及植物体温度。在清晨随着太阳辐射的升高,温度逐渐上升,沙木蓼体内外水汽压差增大,在蒸腾拉力的影响下,根部开始吸水,液流有了明显的上升。午后随着太阳辐射的减弱,温度下降,液流在 21:00

也开始迅速下降,这种作用机理与清晨正好相反,是由于主要环境因子的影响下,植物体内和大气之间的水汽压差值减小,导致液流减小。二是可以诱导叶片气孔的开合进而影响蒸腾^[9],在中午由于太阳辐射较强,沙木蓼为了避免蒸腾失水,叶片气孔就会暂时关闭,图1中显示沙木蓼在中午有暂时的“午休”现象;在一定范围内,大气温度升高促进蒸腾作用,当温度升高时,就会增大细胞间隙与外界的水汽压差,从而促进植物的蒸腾作用,当然温度过高会引起植物过度失水,此时蒸腾会降低,这也是植物对外界环境适应

的一种表现^[15]。空气相对湿度则是影响植物内和外界之间的水汽压差进而影响液流的,图3反映了大气相对湿度与液流速度的变化规律,在中午由于空气相对湿度较低,植物体内外水汽压差值大,所以液流在中午能达到一天中的最大值;反之,在傍晚,空气相对湿度恢复,植物体内外水汽压差减小,植物没有足够的根压使水分运输,表现为液流量显著减小,由此表明,空气相对湿度与茎干液流的变化趋势相反。风速与液流的变化也具有负相关性,风主要是靠影响叶表温度来影响蒸腾的。

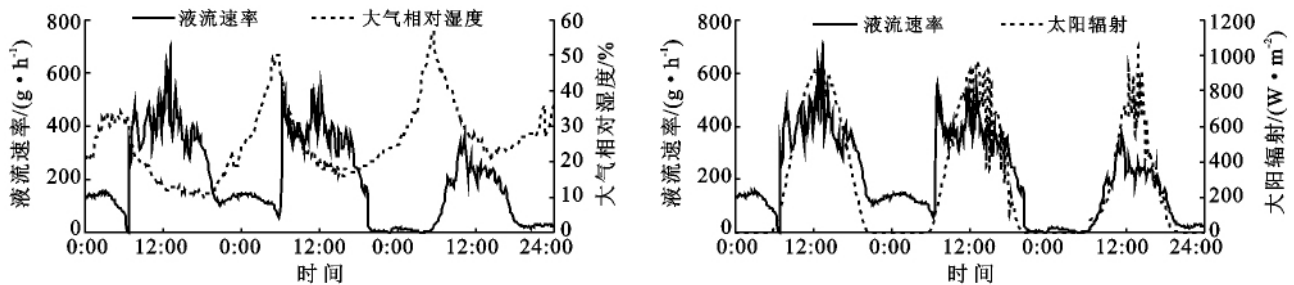


图3 2009年7月2—4日液流速率与太阳辐射和大气相对湿度的日变化

环境因素作用于植物蒸腾是一个十分复杂的过程。将以上4种环境因子作为自变量,液流速率作为因变量,利用逐步法作回归分析,得出沙木蓼液流速率与各因子的多元回归方程:

$$Y = 408.613 + 0.374S + 21.313W - 4.627H - 8.284T$$

式中: Y ——液流速率 (g/h); S ——太阳辐射 (W/m^2); H ——大气相对湿度 (%); T ——空气温度 ($^{\circ}C$); W ——风速 (m/s)。回归方程中显著性概率均为 0.000, $R^2 = 0.748$, 可以很好地反映各环境因子与液流间的关系。

由上面的回归方程可知,太阳辐射是影响沙木蓼最主要的因子。将2009年和2010年7月太阳辐射日均值进行比较(2009年7月仅为21 d),2 a中7月最大辐射量变化差异不明显,其中2010年为 $333.4 W/m^2$,2009年为 $326.9 W/m^2$,但是2010年辐射量日均值较平稳,变化幅度不大,而2009年则波动明显,这就解释了图2液流通量变化幅度的原因。

2.4 土壤水分动态分析

在半干旱荒漠中,有效的大气降水是土壤补给植物水分最有效的来源。图4为2010年随土层深度沙木蓼林下土壤含水量的变化规律。由图4可以看出,土壤含水量呈垂直分布规律,其规律为随着土层深度的增加,含水量呈先增大,再减小,最后逐渐达到稳定

状态。5—6月由于气温较低,还未形成大气降水,土壤中水分比较稳定;随着雨季的到来,7—8月降雨逐渐增加,土层含水量也有明显的升高;9月则随着降雨的减少,土层水分也相应地呈现下降趋势,但仍高于5—6月。从土层含水量的变化规律可以分析植物茎干液流在生长季节中的需水要求,6月中旬,沙木蓼开始全面生长,而此时大气无降雨,5—6月土壤含水量较低,由于受到土壤水分的限制,沙木蓼的茎干液流也比较低。但到了8月,土壤含水量达到了峰值,此时液流也达到了生长季节的最大值;随着9月土壤水分的减少,沙木蓼的液流也出现明显的下降。这时植物也处于生长后期,叶子衰老变黄,生理活动减慢,所以液流也较少。

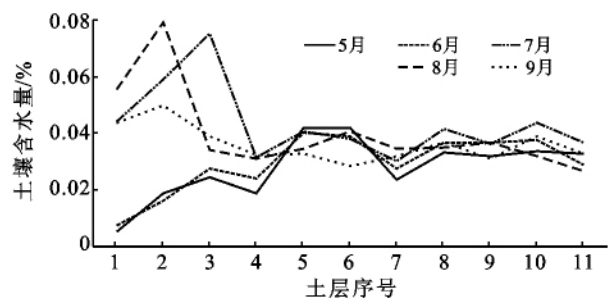


图4 不同土层深度含水量变化

注:土层序号1为0—10 cm土层;2为10—20 cm土层;3为20—40 cm土层;4为40—60 cm土层;5为60—80 cm土层;6为80—100 cm土层;7为100—120 cm土层;8为120—140 cm土层;9为140—160 cm土层;10为160—180 cm土层;11为180—200 cm土层。

3 讨论

在对 2009—2010 年 5—8 月同株沙木蓼茎干液流的连续观测后发现,沙木蓼茎干液流日、季变化规律一致,均成单峰曲线,并且随着季节的变化,液流速率表现出 5,8 月较低,6,7 月较高的特点,这与郭跃等^[15]对毛乌素沙地沙木蓼耗水特性的研究一致。但是,2a 的研究发现,沙木蓼液流速率及液流累积量以及夜间液流流速均有差异,这主要是环境因子作用的结果。图 1 表明,2009 年 6 月 1 日,沙木蓼液流速率表现为 21:00—6:00 较低,平均液流速率为 28.6 g/h,占全天平均液流速率的 9.96%,2010 年表现出夜间有较高液流速率,甚至最大值高于白天峰值,21:00—6:00 平均液流速率 218.7 g/h,高于白天 151.2 g/h。李海涛等对五角枫(*Acer mono*)、棘皮桦(*Betula davurica*)等阔叶树种及湿地松(*Pinus elliottii*)等进行研究后,认为夜间上升液流的动力可能是由于根压的存在。

2009 年沙木蓼日平均耗水量 5 月 4 003.56 g,高于 8 月 3 345.90 g,2010 年则是 8 月 2 546.16 g,高于 5 月 2 342.72 g 日平均耗水量。由图 4 可知,2010 年 8 月各层土壤含水量均高于 5 月,使得沙木蓼在 8 月仍有足够的水分补给给植株进行生理活动,同时这也可能与生长周期和生长速率有关。樊敏等认为刺槐在春季树干液流流速和日耗水量均高于夏季,这与刺槐为春季速生型树种有密切的关系。因此在植被配置时,应考虑当地的环境因素和降水的季节分配以及树种耗水的季节变化进行合理种植,这对充分利用当地有限水资源和提高水分利用率具有重要意义。

4 结论

(1) 沙木蓼茎干液流日变化有显著规律性,液流速率呈多峰曲线,昼夜变化明显。清晨 6:00 开始启动,8:00 第 1 次达到峰值,在环境因子的作用下,陆续出现多个峰值,并处于连续波动状态,持续时间保持在 10 h,并在 21:00 后迅速下降。夜间液流缓慢流动,虽没有白天明显,但仍有液流。

(2) 在整个生长季中,沙木蓼的液流也具有节律性。5 月植物处于生长初期,受到土壤水分的限制,液流累积量较小;进入 6 月,植物叶片迅速展开,进入快速生长期,液流速度显著提升;7—8 月进入雨季,土壤含水量增加,植物生长旺盛,液流速率达到生长季最大值;9 月随着植物叶子衰老脱落,生理作用减慢,沙木蓼的液流量也逐减降低。

(3) 太阳辐射、空气温度、大气相对湿度以及风速是影响沙木蓼液流速率的因子,其中太阳辐射、空气温度与液流速率呈正相关,大气相对湿度和风速则与液流变化呈负相关。沙木蓼液流速率与各因子的多元回归方程为 $Y = 408.613 + 0.374S + 21.313W - 4.627H - 8.284T$ 。

[参 考 文 献]

- [1] 郭卫华,李波,张新时,等. 水分胁迫对沙棘(*Hippophae rhamnoides*)和中间锦鸡儿(*Caragana intermedia*)蒸腾作用影响的比较[J]. 生态学报, 2007, 27(10): 4132-4140.
- [2] Xu Xiangying, Zhang Renduo, Xue Xuzhang, et al. Determination of evapotranspiration in the desert area using lysimeters[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 1998, 29(1/2): 1-15.
- [3] 刘奉觉,郑世错,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): 117-126.
- [4] 刘奉觉. 用快速称重法测定杨树蒸腾速率的技术研究[J]. 林业科学研究, 1990, 3(2): 162-165.
- [5] 岳广阳,张铜会,刘新平,等. 热技术方法测算树木茎流的发展及应用[J]. 林业科学, 2006, 42(8): 102-108.
- [6] 孙慧珍,周晓峰,赵慧勋. 白桦树干液流的动态研究[J]. 生态学报, 2002, 22(9): 1387-1391.
- [7] Huber B. Observation and measurements of sap flow in plant[J]. Berichte der Deutscher Botanischen Gesellschaft, 1932, 50: 89-109.
- [8] Marshall D C. Measurement of sap flow in conifers by heat transport[J]. Plant Physiology, 1958, 33(6): 385-396.
- [9] Swanson R H, Whitfield D W A. A numerical analysis of heat pulse velocity theory and practice[J]. Journal of Experimental Botany, 1981, 32(1): 221-239.
- [10] Edwards W R N. Operator's manual of custom heat velocity data logger[J]. Background Theory Chapter, 1991, 2: 3-4.
- [11] 徐先英,孙保平,丁国栋,等. 干旱荒漠区典型固沙灌木液流动态变化及其对环境因子的响应[J]. 生态学报, 2008, 28(3): 895-905.
- [12] 严昌荣, Alec Downey, 陈兴国, 等. 北京山区落叶阔叶林中核桃楸在生长中期的干流研究[J]. 生态学报, 1999, 19(6): 793-797.
- [13] 许浩,张希明,闫海龙,等. 塔克拉玛干沙漠腹地多枝柽柳茎干液流及耗水量[J]. 应用生态学报, 2007, 18(4): 735-741.
- [14] 赵奎,丁国栋,原鹏飞,等. 盐池毛乌素沙地白榆树干液流研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(6): 85-88.
- [15] 郭跃,丁国栋,吴斌,等. 毛乌素沙地沙木蓼茎干液流规律研究[J]. 水土保持通报, 2010, 30(5): 22-26.