

塔里木沙漠公路防护林植物水分状况

许浩^{①②}, 张希明^①, 闫海龙^①, 梁少民^①, 单立山^{①③}

① 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011;

② 宁夏农林科学院荒漠化治理研究所, 银川 750002;

③ 甘肃农业大学林学院, 兰州 730070

E-mail: xu-hao@tom.com

2007-09-02 收稿, 2008-06-02 接受

中国科学院知识创新工程重要方向项目(编号: KZCX3-SW-342-02)和国家科技部“西部开发科技行动”重大项目(编号: 2004BA901A21-1)资助

摘要 塔里木沙漠公路防护林生长于极端干旱的塔克拉玛干沙漠中, 防护林植物的蒸腾耗水和灌溉管理是防护林可持续的核心问题. 利用茎流计测定了塔里木沙漠公路塔中段 3 种防护林植物的茎干液流, 研究了防护林植物茎干液流规律、水分状况和现行灌溉模式下植物的耗水量, 探讨了防护林灌溉管理中的节水问题. 对茎干液流测定结果表明, 防护林植物茎干液流具有明显昼夜节律性, 液流的高峰值出现在白天 10:00~15:00, 最小值出现在 00:00~03:00, 夜间也保持较小的液流. 3 株直径 1.9~2.0 cm 乔木状沙拐枣(*Calligonum arborescens*)、多枝怪柳(*Tamarix ramosissima*)、梭梭(*Haloxylon ammodendron*)在生长季的日平均茎干液流速率分别为 67.2, 77.05 和 61.54 g·h⁻¹; 茎干液流受环境因子影响而波动, 太阳辐射、风速、气温、相对湿度和植物茎干液流有显著相关性. 8 年生沙拐枣、怪柳、梭梭植株年耗水量分别为 1937.80, 1253.39 和 1026.96 kg, 日平均耗水量分别为 9.69, 6.27 和 5.13 kg. 滴灌条件下, 防护林带内土壤含水量在各个月份变化不大, 土壤含水量充足, 防护林植物清晨和午后水势变化反映出其水分状况良好. 如对现行灌溉管理模式进行优化, 实现防护性能与水资源节约的有机结合, 防护林还存在一定的节水空间.

关键词

塔里木
沙漠公路
防护林
茎干液流
耗水
水分状况

干旱半干旱区属于典型的生态脆弱带, 在农林牧业综合发展和人工植被建设中, 如何根据区域不同地形、土壤和水分条件的特点, 对不同类型植物合理布局, 达到生态效益与经济效益、防护性与开发性的有机结合, 以提高资源的利用率等问题至今没有得到很好的解决. 通过比较不同类型植物的水分利用特点及其适应性差异, 探明不同植物的水分生态适应特征及其生理生态学机理, 是针对该区不同立地条件, 科学合理地选择和配置植物类型的基础^[1]. 目前在中国广大干旱缺水地区生态建设中广泛存在一种两难现象, 即造林和简单增加森林可能因过量耗水而激化林业生态用水与其他用水的矛盾, 也可能造成土壤干化反过来不利于植被稳定, 如何合理设计和调控植被与水的关系, 对生态建设和区域发展有重要意义^[2].

塔里木沙漠公路防护林横穿塔克拉玛干沙漠,

是世界上第一条建设在大沙漠中的绿色长城. 沙漠公路防护林的建成, 不仅保障了沙漠公路的畅通无阻, 也改变了沙漠生态系统的原有特征. 塔里木沙漠公路防护林自建成以来, 一直采用地下水进行滴灌, 1.8×10⁷ 株的防护林植物耗水在沙漠公路沿线乃至塔里木盆地水资源损失中占有重要的份额. 但沙漠公路的畅通依赖于防护林的保护, 而防护林功能的发挥又决定于水资源的支撑. 因此, 防护林植物的耗水研究就成为防护林管理及其可持续存在的基础, 分析和研究防护林植物耗水与需水规律, 对合理搭配、科学灌溉现有防护林, 对更有效地发挥防护林的防护功能, 解决水分供需矛盾有重要的意义. 本文通过测定现行灌溉模式下防护林植物水势、茎干液流、林带土壤含水量, 研究了防护林植物的水分状况、气象因素对植物耗水的影响、同时探讨了防护林节水的可能性, 这对沙漠公路防护林的管理及了解灌溉条件

下荒漠植物耗水有重要意义。

1 研究区域概况和研究方法

1.1 研究区域概况

实验在中国科学院新疆生态与地理研究所塔克拉玛干沙漠研究站、塔中植物园(39°06'N, 83°40'E)公路防护林内进行。该区地处塔克拉玛干沙漠腹地, 年平均气温 12.4℃, 一年中最热月为 7 月份, 平均气温 28.2℃, 最冷月为 12 月份, 平均气温-8.1℃; 极端最高气温 45.6℃, 极端最低气温-22.2℃, 全年 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温 4621.8℃, 无霜期为 283 天, 年日照时数 2571.3 h; 多年平均年降水量 36.6 mm, 平均相对湿度 29.4%, 潜在蒸发量为 3638.6 mm; 平均风速 $2.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 最大瞬时风速为 $24.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 4~8 月为风季, 平均风速为 $3.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 大风频繁, 风热同期, 浮尘扬沙天气十分常见, 这种气候特点导致高温低湿型与大风低湿型干热风并发危害, 对天然植物的成活与生长极为不利。地面景观为流动性高大复合沙垄, 土壤特征随地貌不同而有所差异, 绝大部分为流动风沙土, 盐分含量为 $1.26\sim 1.63\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 在下层偶尔出现亚黏土, 夹杂在风沙土中间, 一般只有 $20\sim 60\text{ cm}^{1,2}$ 。

实验地选择 1997 年定植的人工防护林带, 主要构成植物种为怪柳、梭梭、沙拐枣, 林带为 $1\text{ m}\times 2\text{ m}$ 行状配置, 平均郁闭度 0.5 左右。沙拐枣平均基径(3.6 ± 0.19) cm, 平均高(268.67 ± 6.3) cm; 怪柳平均基径(2.4 ± 0.09) cm, 平均高(265 ± 8.7) cm; 梭梭平均基径(3.9 ± 0.19) cm, 平均高(233.7 ± 5.8) cm。防护林采用滴灌方式灌溉, 通过水井抽取地下水, 地下水盐分含量为 $4\sim 5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$; 每年共灌溉 20 次, 每月灌溉次数为 3~4 次, 每次持续灌溉时间 8~10 h, 每个滴头出水量为 $3.5\text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$, 每次灌溉量约为 $35\text{ kg}\cdot\text{株}^{-1}$, 灌溉根据生长状况进行。

1.2 研究方法

(i) 实验材料选择及茎干液流的测定。通过林分调查明确各种植物的径阶分布, 测定选择生长正常, 植株大小适中, 具有代表性的沙拐枣 3 株(直径为 1.9, 3.2 和 3.6 cm)、梭梭 3 株(直径为 2.0, 2.8 和 3.4 cm)和怪柳 2 株(直径为 2.0 和 3.5 cm), 测定其茎干液流。

茎干液流采用美国 Dynamax 公司的 Flow32 茎流

系统测定, 其测定原理是热平衡法。热平衡法原理及仪器的安装调试见参考文献[3~5]。本实验设置数据采集器每 15 min 记录一次液流速率读数, 每 15 min 记录一次液流累积量, 从 2005 年 4 月 11 日开始进行连续不间断测量直至 10 月 20 日结束。

(ii) 植物水势的测定。植物水势采用压力室(PMS Instrument Co. Model 1000, USA)测定。主要测定带叶小枝和同化枝的水势, 3 种植物每种各取 6 株, 每株重复 3 次。5~10 月每月中旬分别于 07:00 和 14:00 测定一次清晨和午后水势。

(iii) 气象因子及土壤含水量的测定。在茎测定干液流的同时, 对气象因子也进行了同步测定, 气象因子采用环境监测仪测定(Campbell Co. LTD, USA)数据, 环境监测仪是塔中沙漠研究站于 2002 年设立, 可连续采集环境及气象数据。监测仪采集设定的记录数据时间间隔为 30 min。本文采用了近地面 2m 内对蒸腾有影响的主要气象因子太阳辐射、气温、空气湿度、近地面风速进行分析。

土壤含水量采用土钻取样烘干称重法测定, 钻取深度为 400 cm 土层测定其含水量的长期变化, 取样间隔为 20 cm, 5~10 月每月中旬采样一次。

2 研究结果

2.1 3 种防护林植物茎干液流特性

植物的茎干液流受自身生理活动和环境的影响有明显的昼夜节律性, 白天太阳辐射强烈、温度高时蒸腾速率大, 晚上光合作用停止, 蒸腾速率减小。图 1 是 3 种植物(怪柳直径为 2.0 cm, 梭梭直径为 2.0 cm, 沙拐枣直径为 1.9 cm)茎干液流的连续 4 日变化曲线图。由图 1 可以看出, 3 种植物茎干液流日变化呈明显的周期性。茎干液流速率在 08:00 开始有明显的升高趋势, 并在 11:00~15:00 期间出现高峰值。大多数情况下, 液流在上午日出后就开始快速上升, 高峰值一般出现在上午而不是中午, 出现所谓的“早高峰”(morning peak)现象^[6]; 在 17:30 以后液流开始有明显的下降趋势, 液流速率最小值出现在 00:00~03:00 期间; 夜间的液流速率一般维持在 $50\sim 70\text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$, 液流 0 值出现在 4 月份生长初期, 在生长旺季 5~7 月, 夜间液流一般都维持在 $60\text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$; 液流速率最大值出

1) 周智彬. 塔里木沙漠公路防护林对极端环境胁迫的生理生态响应. 博士学位论文. 北京: 中国科学院研究生院, 2003

2) 雷加强. 塔里木沙漠公路风沙危害及其防治研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院研究生院, 2003

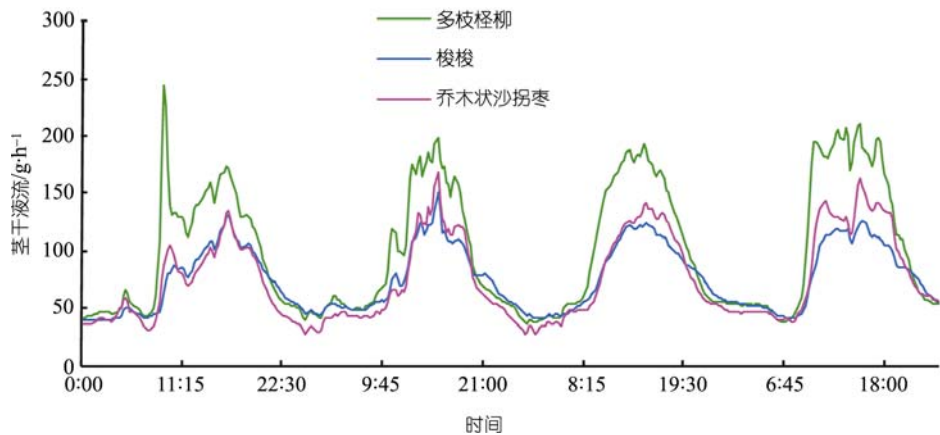


图 1 3种植物茎干液流日变化(晴天: 2005-06-25~28)

现在7月上旬, 怪柳茎干液流最大值可达 $1500\text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$. 不同直径的同一植物茎干液流表现出共同的波动趋势, 直径较大者波动幅度较大, 直径与茎干液流速率平均值成正比关系^[7]. 很多研究都表明植物的蒸腾存在着以双峰型为特征的“蒸腾午休”现象, 但在本实验中没有发现这种现象.

对比3种植物的茎干液流, 首先要排除环境的影响, 在同一实验地, 土壤水分、气象因子是相同的, 因此可以排除这些因子的影响对3种植物的茎干液流和蒸腾耗水进行比较. 如图1所示, 对于直径相近

的3种植物而言, 怪柳茎干液流是最大的, 连续4日的茎干液流平均值比梭梭和沙拐枣分别高出32.3%和33.8%. 表1和表2分别列出了生长季日平均茎干液流和测定植株茎干液流的特征值. 生长季怪柳、梭梭、沙拐枣的平均液流通量(本文基于基径截面积计算)分别为 25.7 , 15.0 和 $24.9\text{ g}\cdot(\text{h}\cdot\text{cm}^2)^{-1}$. 怪柳和沙拐枣茎干液流通量明显大于梭梭($P < 0.01$), 而怪柳和沙拐枣的差异不是很显著. 计算出同一年龄的3种植物的总的茎干液流和耗水量后发现, 对于相同年龄的8年生植株(植株包括了若干分株), 沙拐枣单株耗

表 1 生长季3种植物平均液流速率和日平均耗水量(怪柳直径 2.0 cm, 梭梭直径 2.0 cm, 沙拐枣直径 1.9 cm)

月份	沙拐枣		怪柳		梭梭	
	液流速率/ $\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$	日耗水量/ $\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$	液流速率/ $\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$	日耗水量/ $\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$	液流速率/ $\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$	日耗水量/ $\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$
4	51.59	1238.08	57.53	1380.63	40.96	983.06
5	56.72	1358.21	62.21	1489.05	69.50	1662.52
6	87.23	2101.61	86.83	2083.86	78.04	1872.96
7	101.66	2438.92	110.03	2639.72	74.05	1776.56
8	69.88	1823.32	101.86	2444.72	67.75	1626.02
9	76.01	1677.12	79.84	1914.93	64.53	1547.67
10	26.03	624.69	41.04	978.25	35.94	860.55
平均	67.02	1608.85	77.05	1847.31	61.54	1475.62

表 2 单株日平均液流速率和液流最大值

植物种	直径/cm	液流速率日平均值/ $\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$	液流速率日最大值/ $\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$
沙拐枣	1.9	67.017	129.34
沙拐枣	3.2	202.60	447.35
沙拐枣	3.6	263.60	595.93
梭梭	2.0	61.54	99.74
梭梭	2.8	91.16	208.13
梭梭	3.4	128.46	244.12
怪柳	2.0	77.05	134.46
怪柳	3.5	258.77	430.59

水量最大, 其次为怪柳, 梭梭最小.

2.2 林带内土壤水分条件和防护林植物水分状况

滴灌条件下防护林内土壤水分条件较好, 保证了植物的成活和良好的生长. 图 2 是实验地林带内 400 cm 深土层 4~10 月的土壤含水量, 可以看出, 各层次的含水量的月变化不是很大, 各月土壤含水量基本保持了相对稳定的水平, 而且平均含水量维持在 8%左右, 土壤水分比较充足. 在 340 cm 深处, 有一黏土层, 黏土的持水力较强, 所以该层土壤含水量一直较高. 在土壤含水量比较稳定的情况下, 茎干液流不随土壤含水量的变化而变动. 在 SPAC 系统中, 土壤是水分运动的起点, 土壤含水量充足的条件下, 植物耗水量也必然比较高.

清晨水势和午后水势反映了植物在两个时间段

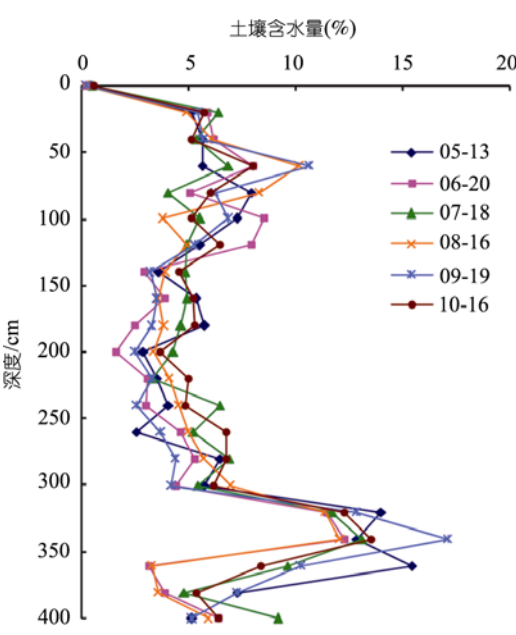


图 2 表层(400 cm 深)土壤水分的月变化

的水分状况, 进而可以表明植物体内的水分状况差异. 表 3 是 3 种防护林植物在 5~9 月份各月清晨和午后水势变化值, 可以看出, 3 种植物清晨和午后水势值相差较大, 这说明了在清晨植物水分状况良好, 午后水分损失较多, 导致水势值相差达到近 2 MPa. 清晨水势值高, 表明植物在通过一夜的吸收以后, 体内水分状况得到了很好的恢复, 水势较高, 而通过几个小时的蒸腾以后, 体内水分损失较多, 水势降低. 夜间能够保持一定的液流速率也说明了在夜间根系的吸收活动并没有结束, 而是通过夜间的吸收来补充白天植物体内水分的损失, 满足白天蒸腾的需要.

2.3 气象因子与茎干液流的关系

植物的蒸腾除了与自身的生理生态特性相关以外, 还受一些环境因子影响. 由于沙漠公路防护林现行的灌溉方式, 使土壤水分保持在一个较为稳定的水平, 为植物提供了较为充足的水分供应. 因此, 蒸腾主要受到气象因子的影响. 图 3(连续 3 日, 从 00:00 开始至第 4 天 00:00 止, 共用 72 h. 测定时间间隔为 30 min)是梭梭茎干液流变化与主要气象因子变化的趋势图, 由图可以看出茎干液流的波动和总辐射、温度、风速的波动趋势十分相似, 尤其是总辐射和温度的波动与梭梭茎干液流的波动趋于一致. 表 4 是梭梭茎干液流和一些主要环境因子的相关性分析结果(共 145 对数据), 可以看出, 梭梭茎干液流速率依次和太阳辐射、气温、相对湿度、风速有显著相关性($\alpha = 0.01$), 茎干液流与总辐射的相关关系最强, 相关性系数 0.885, 与气温和风速也有明显的正相关性, 茎干液流与空气相对湿度呈明显的负相关性. 利用多元回归的方法建立了梭梭茎干液流和气象因子的相关性回归模型, 通过逐步回归确定了梭梭茎干液流和两个主要的气象因子太阳辐射和空气相对湿度的模型.

表 3 3 种植物各月清晨和午后水势(单位: MPa)

		月份				
		5	6	7	8	9
怪柳	清晨水势	0.77	1.08	0.92	1.33	1.28
	午后水势	1.92	2.33	2.85	2.60	1.84
梭梭	清晨水势	1.77	3.14	2.14	2.52	3.18
	午后水势	3.27	4.24	3.98	4.49	3.99
沙拐枣	清晨水势	0.61	1.00	0.79	0.90	1.25
	午后水势	1.18	1.71	1.52	1.72	1.49

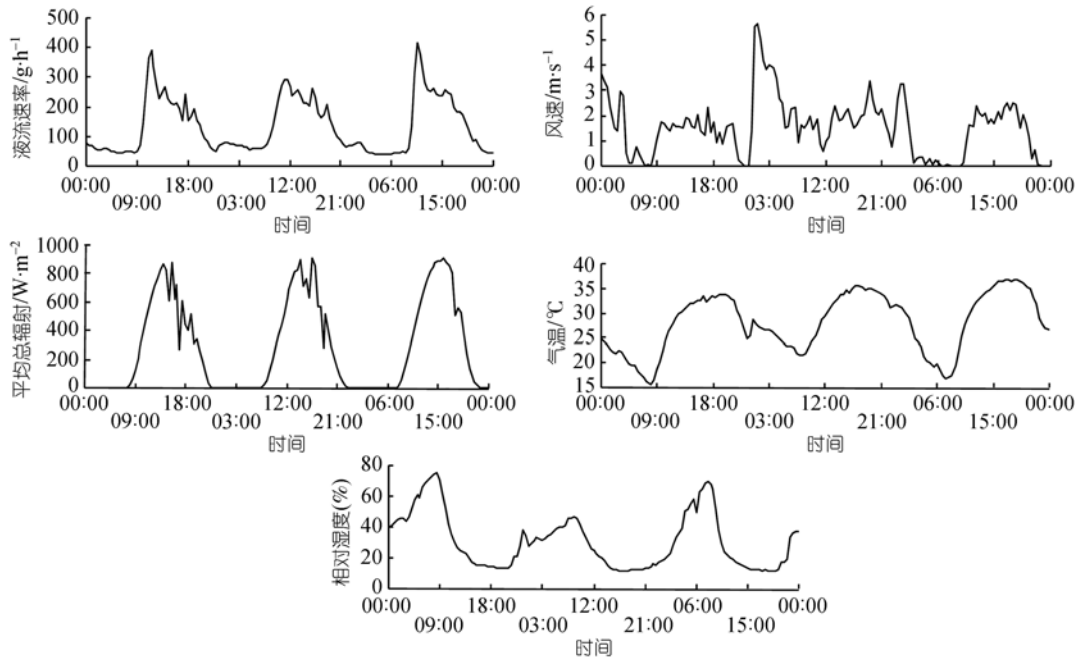


图3 气象因子与梭梭茎干液流的变化

$$S_f = 145.705 + 0.211X_1 - 1.07X_2, \quad R^2 = 0.905,$$

或茎干液流和总辐射的回归模型

$$S_f = 107.086 + 0.237X_1, \quad R^2 = 0.885.$$

以上两式中, S_f 为茎干液流速率, X_1 为总辐射, X_2 为相对湿度。

用同样的方法分析了柽柳蒸腾过程对环境因子变化的响应, 得出了不完全相同的结果。多枝柽柳茎干液流速率与气象因子相关性大小依次为总辐射、温度、风速、相对湿度; 茎干液流与总辐射、温度和风速呈正相关关系, 达到了极显著水平, 其中与总辐射的相关性最高, 相关系数为 0.963; 而与空气相对湿度为负相关关系, 并且达到了显著水平。在相关分析的基础上利用多元线性回归确定茎干液流和几个主要环境因子的关系, 通过逐步回归的筛选, 确定了多枝柽柳的茎干液流与总辐射和风速之间关系模型

$$Y = 39.686 + 0.173X_1 + 3.833X_2, \quad R^2 = 0.969,$$

其中, Y 为茎干液流速率, X_1 为总辐射, X_2 为风速。

方差分析检验表明, 该方程回归显著。用总辐射和风速可以预测多枝柽柳的茎干液流。可见, 由于梭梭和柽柳茎干液流速率大小的差异, 导致其对气象因子的响应有所不同, 柽柳茎干液流速率大, 受到风速的影响较大; 梭梭茎干液流速率相对较小, 更易受到空气湿度变化影响。

2.4 3 种防护林植物的耗水量

3 种植物的耗水过程是随着生长而变化的, 在 4 月初生长萌动, 10 月生长开始衰退, 整个生长季的耗水过程是单峰型, 这是由其生长节律所决定的(表 5)。图 4 是 8 株防护林植物在生长季各月日平均耗水量曲线图, 由图 4 可以看出, 对柽柳和沙拐枣而言, 耗水量最大月份为 7 月, 基径为 3.5 cm 的柽柳在 7 月日耗水量有时高达 13 kg; 梭梭在 6 月和 8 月是耗水量最大的季节, 在 7 月耗水量略低。如表 5, 在一个生长季 3 株沙拐枣、2 株柽柳和 3 株梭梭日平均耗水量分别为 4.27, 4.02 和 2.24 kg, 沙拐枣和柽柳耗水量较高, 梭梭相对较低。计算得出 8 年生沙拐枣、柽柳、梭梭植株年耗水量分别为 1937.80, 1253.39 和 1026.96 kg, 日平均耗水量分别为 9.69, 6.27 和 5.13 kg。

3 讨论

(i) 茎干液流是指通过茎干的水分养分流动, 液流的主要成分是水。茎干液流具有特定的时空变化规律, 并受多种因素的影响。Fredrik 等人^[7]总结了国际上对茎干液流和蒸腾量关系的研究成果, 指出正常情况下一天的蒸腾耗水量与茎干液流总量相等。因此在日时间尺度上, 可以用茎干液流量表征蒸腾耗水量, 茎干液流能够准确反映单株植物的蒸腾作用和水分的利用状况。研究茎干液流的变化, 可以直接

表 4 梭梭茎干液流和气象因子的相关关系^{a)}

	茎干液流/ $\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$	总辐射/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	温度/ $^{\circ}\text{C}$	风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	相对湿度(%)
茎干液流	1.000	0.885**	0.686**	-0.577**	0.379**
总辐射	0.885**	1.000	0.614**	-0.464**	0.371**
温度	0.686**	0.614**	1.000	-0.944**	0.425**
风速	-0.577**	-0.464**	-0.944**	1.000	-0.493**
相对湿度	0.379**	0.371**	0.425**	-0.493**	1.000

a) **在 0.01 水平显著相关

表 5 生长季 3 种植物的耗水量

植物种	直径/cm	最大日耗水量/kg	平均日耗水量/kg
沙拐枣	1.9	3.104	1.61
沙拐枣	3.2	9.527	4.89
沙拐枣	3.6	10.527	6.32
梭梭	2.0	2.393	1.48
梭梭	2.8	4.348	2.18
梭梭	3.4	4.995	3.08
怪柳	2.0	3.227	1.85
怪柳	3.5	13.694	6.19

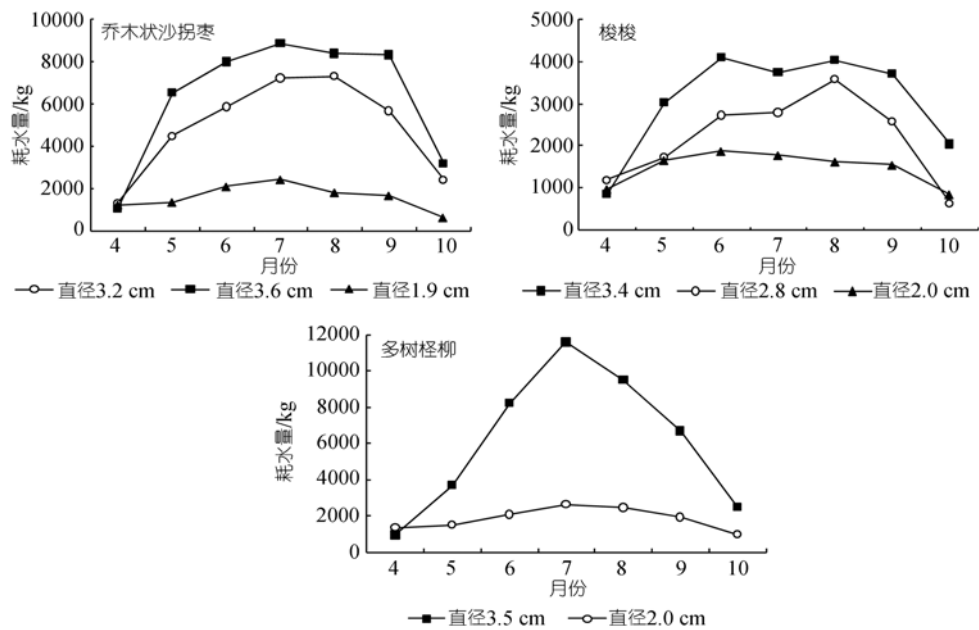


图 4 植物耗水量的月份变化

的反映出植物的蒸腾耗水状况和环境因子对蒸腾的影响。茎干液流大小和植物本身的遗传特性和生理特征有关,还与个体大小(直径、叶面积等)和环境要素密切相关^[8,9]。植物蒸腾的规律性在任何环境条件下都表现为白天高夜间低,在干燥的沙漠地带,这些荒漠植物都有较大的茎干液流,植物通过大量的蒸腾可以避免过分的干化和高温灼烧;同时,如果有充足的水分供应,荒漠植物是不会限制自身的蒸腾。

夜间存在上升液流,部分原因可能是由于白昼的蒸腾作用,导致植株地上部位水势较低——根据“蒸腾拉力-内聚力”学说^[10]。白天树冠蒸腾主要是由于气孔开放,形成了叶片-冠-根的水势差,日落后气孔关闭,此时水势梯度并不立即消失,由于水势差的存在,仍会有部分水分在一段时间内被动地通过根部进入树干及叶,形成夜间补偿流,使树干部位的水分储存得以恢复^[11],对油松液流进行研究后得到过

相似结论^[12]。在沙漠极端干旱的气候条件,白天失去的水分无法及时补充,在夜间仍然有一定的液流以补充植物体白天的水分消耗,而且由于夜间气温较高、空气流动速度快、空气干燥也可能是夜间蒸腾的一个重要原因。张锦春等人^[13]认为梭梭蒸腾速率及其日变化进程呈单峰型,杨文斌等人^[14]认为梭梭蒸腾速率及其日变化进程趋于双峰型。茎干液流是受诸多环境因子影响,有时会出现双峰或者多峰,如果环境条件比较稳定,例如无风的晴天茎干液流曲线波动也就不明显,蒸腾过程为较平滑的单峰曲线。从一个生长季的蒸腾日变化过程可以看出,蒸腾日变化的长期趋势是稳定的单峰型占据了主导地位。

(ii) 多数研究表明,太阳辐射、风速、温度和土壤含水量是影响树干液流的主要环境因子^[15~20]。在塔克拉玛干沙漠腹地,太阳辐射、温度、风速、相对湿度都和茎干液流速率有很强的相关性,这些气象因子都会影响到植物的茎干液流和耗水。茎干液流和太阳总辐射、气温、风速呈明显正相关,与空气相对湿度呈负相关关系,其中太阳总辐射与茎干液流的相关性最大。

在干旱的沙漠腹地,太阳辐射强烈、温度高、风大、空气干燥,这些气象因子在很大程度上影响了植物的蒸腾,如果水分充足,植物必然会充分利用已有的水分条件。

(iii) 植物耗水量大小差异很大,单株日耗水量从法国东部栎林(*Quercus petraea*)的 10 kg,到亚马逊雨林林冠上层木(*Euperua purpurea*)的 1180 kg,35 个属 65 个树种中的 90%(平均树高 21m)日耗水量在 10~200 kg 范围内^[21,22]。周平等人^[23]对 9 种植物幼苗蒸腾耗水状况进行比较,认为日蒸腾速率从小到大依次为油松(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、黄栌(*Cotinus coggygria*)、柠条(*Caragana korshinskii kom*)、臭椿(*Ailanthus altissima Swingleh*)、火炬树(*Rhus typhina*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、毛白杨(*Populus tomentosa Carr.*)和枸杞(*Lycium chinense Mill.*)。5 年生油松和侧柏晴天的日耗水量分别为(61.7±9.6)和(39.8±6.8) g;1 年生毛白杨、臭椿、火炬树和黄栌的日耗水量分别为(44.8±8.1), (53.4±8.8), (63.1±14.4)和(38.4±17.0) g;枸杞、沙棘和柠条的日耗水量分别为(18.8±5.6), (4.8±1.1)和(33.1±5.0) g^[24]。在甘肃石羊河流域,基径约为 6~7 cm 的长穗怪柳茎干

液流平均值为 4.1798 L·d⁻¹^[24]。在黑河流域下游额济纳绿洲实验表明:基径为 4 和 5 cm 的 20 年生怪柳日平均液流量为 0.37 和 0.62 L·d⁻¹^[25];黑河流域基径 6.5~14.5 cm 的梭梭平均日耗水量为(0.3±0.2) mm,生长季节单株木耗水量达 49.4 mm^[26]。在古尔班通古特沙漠,2 龄、3 龄和 4 龄梭梭,年均蒸腾耗水分别为 33.603, 98.827 和 132.232 kg^[27]。对额济纳绿洲梭梭的蒸腾测定表明,直径为 5.5 cm 的梭梭 5~10 月日平均耗水量约为 1.87 kg^[28]。在防护林带的测定结果表明,梭梭和怪柳的耗水量要高于其他地方的测定结果,由于还没有沙拐枣耗水的相关报道,因此无法对沙拐枣的耗水量高低进行对比。一个生长季 2 株多枝怪柳日平均耗水量分别为 6.19 和 1.85 kg;3 株梭梭的耗水量分别为 3.08, 2.08 和 1.48 kg;3 株沙拐枣的耗水量分别为 6.32, 4.89 和 1.61 kg。可见,干旱环境中生长的植物不一定是节水的,这些植物有较小的叶片,发达的根系等形态特征去适应干旱的环境,尽管其抗旱性较强,但是在充足水分供应条件下,它会充分利用可利用的水资源,干旱的环境和较为充足的水分供应必然导致较高的耗水量。

(iv) 虽然植物水势并未直接影响其生理代谢过程^[29,30],但它是植物水分状况的重要指标之一,它的高低表明植物从土壤或相邻细胞中吸收水分以确保其进行正常的生理活动的的能力^[31,32]。对不同植物水势的比较分析表明,不同类型的植物水势不同,一般来说,旱生植物比较忍受干旱,水势最低^[33]。清晨水势可以反映植物水分的恢复状况,从而可以用来判断植物水分亏缺的程度^[34]。Sobrado 等人^[35]认为,受到水分胁迫的植物,其清晨水势会发生明显下降。3 种防护林植物在清晨水势较高,这说明,在清晨植物水分并不亏缺,相反其水分状况在夜间得到了很好的恢复;而午后水势较低则表明在白天的蒸腾损失很大,导致清晨和午后水势的差距较大。

通过防护林植物耗水量和水势可以看出,其水分供应充足,体内水分状况较好,不存在水分亏缺,相反,夜间恢复较好的水分在白天大量损失,导致植物耗水量较高,同时也表明现行灌溉提供了充足的水分。

(v) 蒸腾是植物耗水的主要途径,其大小受控于土壤湿度和气象条件^[7],土壤湿度对茎干液流速率影响很大^[34~36]。荒漠环境中,土壤含水量很低,在黑河荒漠绿洲区,梭梭林地土壤湿度一直低于 2.0%^[26]。

在额济纳绿洲梭梭和怪柳根部土壤含水量分别为 0.436% 和 0.469%^[35]; 在古尔班通古特沙漠, 夏季梭梭林土壤 1~200 cm 深平均土壤水分 < 1.0%^[27]; 在乌兰布和沙漠, 乔木状沙拐枣在沙层含水量大于 3% 时造林成活率在 90% 以上^[37]. 沙漠公路防护林现行的灌溉制度(灌溉周期为 10 天, 灌溉量为 $1000 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) 能保证植物的成活和良好的生长状况^[38], 在防护林带内, 400 cm 深土壤平均含水量稳定在 8%, 对防护林植物而言, 这是一个水分优裕的环境. 依据现行的灌溉制度和林带土壤含水量, 对比自然环境下荒漠区土壤含水量可以判断, 防护林现行的灌溉模式是一种足量灌溉.

4 结论

在沙漠特殊的环境条件中, 防护林植物的蒸腾有明显的规律性, 蒸腾呈现昼高夜低的过程, 夜间保持较低水平的液流.

依据植物水势和土壤含水量, 目前的灌溉条件提供了较充足的水分, 土壤含水量维持在 8% 左右. 植物生长于一个水分条件相对较好的环境, 相对于其他地区的同种植物, 防护林带的植物蒸腾耗水量较高.

干旱的沙漠腹地, 太阳辐射强烈、温度高、风大、空气干燥, 这些气象因子在很大程度上影响了植物的蒸腾, 太阳辐射和茎干液流的相关性最强. 可以用茎干液流和太阳辐射的回归方程预测茎干液流大小.

对一个生长季的测定表明, 2 株多枝怪柳日平均耗水量分别为 6.19 和 1.85 kg; 3 株梭梭的耗水量分别为 3.08, 2.08 和 1.48 kg; 3 株沙拐枣的耗水量分别为 6.32, 4.89 和 1.61 kg.

防护林现行的灌溉管理制度不仅确保了成活率, 也保证了植物的旺盛生长. 现行灌溉制度下大量的水资源用来维持防护林的生长, 依据防护林植物的耗水量、植物的水分状况、林带内土壤水分分析, 这种灌溉为植物提供了大量充足的水分. 从干旱区脆弱的生态条件考虑, 节约水资源、提高水资源利用效率是我们所关心的问题. 提高水资源利用效率必需要求防护林的防护效益和水资源合理配置相结合. 从防护林植物的构成来看, 主要的 3 种防护林植物都是耐旱的荒漠植物, 对于荒漠植物而言, 其有很强的适应干旱的能力, 耗水量小只是对干旱环境的适应, 很少的水分消耗, 即可满足其生存发展的需要. 但是当环境能够提供充足的水分时, 植物并不会拒绝, 相反, 其必然会充分利用可利用的水资源. 所以说, 荒漠植物并不必然是节水的, 节水只是对缺水环境的无奈选择. 如前所述, 与自然条件下相比, 防护林植物的水分条件优越, 3 种植物的耗水量都较高. 但是防护林功能的发挥并不一定是在优越水分条件下, 可能一般的或者较差的水分条件就能维持生长、发挥防护效益. 所以, 现行灌溉管理模式还存在进行优化的可能性, 还有较大的节水空间. 实现防护功能和水资源节约的最优组合, 应是沙漠公路防护林后续研究的焦点.

在防护林管理方面, 应该以节水和防护为出发点, 依据目前 3 种植物的生长状况和土壤水分状况进行灌溉制度的优化, 实现最小灌溉量前提下的防护功能.

参考文献

- 徐炳成, 山仑, 李凤民. 半干旱黄土丘陵区五种植物的生理生态特征比较. 应用生态学报, 2007, 18(5): 990—996
- 王彦辉, 熊伟, 于澎涛, 等. 干旱缺水地区森林植被蒸散耗水研究. 中国水土保持科学, 2006, 4(4): 19—25
- Steinberg S L, Van Bavel C H M, McFarland M J. A gauge to measure mass flow of sap flow in stem and trunk of woody plants. J Am Soc Hortic Sci, 1989, 114: 466—472
- 严昌荣, Downey A, 韩兴国, 等. 北京山区落叶阔叶林中核桃楸在生长中期的树干液流研究. 生态学报, 1999, 19(6): 793—797
- 许浩, 张希明, 闫海龙, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地多枝怪柳茎干液流及耗水量. 应用生态学报, 2007, 18(4): 735—741
- Lu P, Laurent U, Zhao P. Granier's Thermal Dissipation Probe (TDP) method for flow in Trees: Theory and practice. Acta Bot Sin, 2004, 46(6): 631—646
- Fredrik L, Anders L. Transpiration response to soil moisture in pine and spruce trees in Sweden. Agr Forest Meteorol, 2002, 112: 67—85

- 8 Thomas J H, Stephen J M, Peter H R. Estimating stands transpiration in a *Eucalyptus populnea* woodland with the heat pulse method: Measurement errors and sampling strategies. *Tree Physiol*, 1994, 15: 219—227
- 9 Vertessy R A, Benyon R G, O'Sullivan S K, et al. Relationships between stem diameter, sapwood area, leaf area and transpiration in a young mountain ash forest. *Tree Physiol*, 1995, 15: 559—567
- 10 Krfnler P J, Koflowski T T. *Physiology of Woody Plants*. New York: Academic Press, 1979
- 11 李海涛, 向乐, 夏军. 应用热扩散技术对亚热带红壤区湿地松人工林树干边材液流的研究. *林业科学*, 2006, 42(10): 31—38
- 12 王华田, 马履一, 孙鹏森. 油松、侧柏深秋边材木质部液流变化规律的研究. *林业科学*, 2002, 38(5): 31—33
- 13 张锦春, 赵明, 张应昌, 等. 灌溉植被梭梭、白刺光合蒸腾特性及影响因素研究. *西北植物学报*, 2005, 25(1): 70—76
- 14 杨文斌, 包雪峰, 杨茂仁, 等. 梭梭抗旱的生理生态水分关系研究. *生态学报*, 1991, 11(4): 318—323
- 15 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. *林业科学*, 2003, 39(2): 1—7
- 16 岳广阳, 张铜会, 赵哈林, 等. 科尔沁沙地黄柳和小叶锦鸡儿茎流及蒸腾特征. *生态学报*, 2006, 26(10): 3205—3213
- 17 张友焱, 周泽福, 党宏忠, 等. 利用 TDP 茎流计研究沙地樟子松的树干液流. *水土保持研究*, 2006, 13(4): 78—80
- 18 曹云, 黄志刚, 欧阳志云. 南方红壤区杜仲(*Eucommia ulmoides*)树干液流动态. *生态学报*, 2006, 26(9): 2887—2895
- 19 张刚华, 陈步峰, 聂洁珠, 等. 热带山地雨林尖峰栲边材液流及其与环境因子的关系. *应用生态学报*, 2007, 4(18): 742—748
- 20 张小由, 康尔泗, 张智慧, 等. 沙枣树干液流的动态研究. *中国沙漠*, 2006, 26(1): 146—151
- 21 Wullschlegel S D, Hanson P J, Todd D E. Transpiration from a multi-species deciduous forest as estimated by xylem sap flow techniques. *Forest Ecol Manag*, 2001, 143: 205—213
- 22 Wullschlegel S D, Meinzer F C, Vertessy R A. Review of whole-plant water use studies in trees. *Tree Physiol*, 1998, 18(8-9): 499—512
- 23 周平, 李吉跃, 招礼军. 北方主要造林树种苗木蒸腾耗水特性研究. *北京林业大学学报*, 2002, 24(5,6): 49—55
- 24 屈艳萍, 康绍忠, 夏桂敏. 甘肃石羊河流域人工种植长穗柽柳树干液流量变化规律研究. *西北植物学报*, 2005, 25(11): 2259—2265
- 25 张小由, 冀家栋. 应用热脉冲技术对胡杨和柽柳树干液流的研究. *冰川冻土*, 2003, 25(5): 584—590
- 26 常学向, 赵文智, 张智慧. 荒漠区固沙植物梭梭(*Haloxylon ammodendron*)耗水特征. *生态学报*, 2007, 5(27): 1826—1837
- 27 赵从举, 康慕谊, 徐广才, 等. 非灌溉条件下不同年龄梭梭蒸腾耗水比较. *干旱区研究*, 2006, 23(2): 295—301
- 28 张小由, 冀家栋. 利用热脉冲技术对梭梭液流的研究. *西北植物学报*, 2004, 24(12): 2250—2254
- 29 Li C Y, Wang K Y. Differences in drought responses of three contrasting *Eucalyptus microtheca* F. *Muell* Populations. *Forest Ecol Manag*, 2003, 179: 377—385
- 30 Schtz W, Milberg P, Lamont B B. Germination requirements and seedling responses to water availability and soil type in four eucalypt species. *Acta Oecol*, 2002, 23: 23—30
- 31 曾凡江, 张希明, 李小明. 柽柳的水分生理特性研究进展. *应用生态学报*, 2002, 13(5): 611—614
- 32 张道远, 尹林克, 潘伯荣. 柽柳属植物抗旱性能研究及其应用潜力评价. *中国沙漠*, 2003, 23(3): 252—256
- 33 宋耀选, 周茂先, 张小由, 等. 额济纳绿洲主要植物的水势与环境因子的关系. *中国沙漠*, 2005, 25(4): 496—499
- 34 Pelaez D V, Boo R M. Plant water potential for shrubs in Argentina. *J Range Manage*, 1987, 40(1): 6—9
- 35 Sobrado M A, Turner N C. Comparison of the water relations characteristics of *Heilianthus annuus* and *Heilianthus petiolaris* when subjected to water deficits. *Oecologia*, 1983, 58: 309—313
- 36 Stewart J B. Modeling surface conductance of pine forest. *Agr Forest Meteorol*, 1988, 43: 19—35
- 37 李秉荣, 闫艳霞, 李钢铁, 等. 流沙上乔木状沙拐枣的造林实验研究. *干旱区资源与环境*, 2005, 19(5): 190—194
- 38 胡玉昆, 徐新文, 潘伯荣. 塔克拉玛干沙漠腹地不同灌溉形式(投入)生物防护林建设效果分析. *干旱区资源与环境*, 2002, 16(2): 45—49