

基于同化枝生长的民勤荒漠梭梭固沙林耗水量估算

张锦春^{1,2,3}, 孙学兵⁴, 郭树江^{1,4}, 闫沛迎^{1,3}, 赵艳丽³, 段晓峰^{1,4}, 强玉泉³,
柳小平⁴, 马福元⁴

(1. 甘肃民勤荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站, 甘肃 民勤 733300;

2. 甘肃省荒漠化与风沙灾害防治国家重点实验室, 甘肃 武威 733000;

3. 甘肃省治沙研究所, 甘肃 兰州 730070; 4. 甘肃省民勤治沙综合试验站, 甘肃 民勤 733300)

摘要: 为准确估算民勤荒漠梭梭固沙林耗水量, 运用热平衡茎流测量技术, 对民勤荒漠梭梭茎干液流动态进行监测, 选择同化枝生长指标为扩展纯量, 对梭梭单株耗水量与单株同化枝表面积和同化枝干重进行相关性拟合, 推算梭梭固沙林耗水量。结果表明, 梭梭同化枝生长与其耗水量月变化过程同步, 梭梭快速生长期(7月)同化枝生长及耗水量明显高于展叶(5月)和落叶期(10月), 经相关性分析确定梭梭同化枝表面积、同化枝干重与其耗水量存在线性函数关系; 模拟推算梭梭固沙林耗水量受林分密度及分枝构型的影响较大, 且不同龄林梭梭同化枝生长模拟均略小于实测值, 相对而言同化枝表面积模拟值平均相对误差更小(8.92%)。因此, 以同化枝表面积和同化枝干重推算梭梭固沙林耗水可行, 可实现梭梭林耗水量的可靠估算, 为荒漠植被固沙造林及其生态用水管理等提供参考。

关键词: 梭梭固沙林; 茎干液流; 耗水量; 民勤荒漠

中图分类号: S727.23

文献标志码: A

文章编号: 1001-7461(2023)06-0103-07

Estimation of Water Consumption of *Haloxylon ammodendron* Sand-Fixation Forest in Minqin Desert Based on the Growth of Assimilating Shoots

ZHANG Jin-chun^{1,2,3}, SUN Xue-bing⁴, GUO Shu-jiang^{1,4}, YAN Pei-ying^{1,3}, ZHAO Yan-li³, DUAN Xiao-feng^{1,4},
QIANG Yu-quan³, LIU Xiao-ping⁴, MA Fu-yuan⁴

(1. Minqin National Research Station for Desert Steppe Ecosystem, Minqin 733300, Gansu, China; 2. State Key Laboratory Breeding Base of Desertification and Aeolian Sand Disaster Combating, Wuwei 733000, Gansu, China; 3. Gansu Desert Control Research Institute, Lanzhou 730070, Gansu, China; 4. Gansu Minqin Desert Control Experimental Station, Minqin 730070, Gansu, China)

Abstract: In order to accurately estimate water consumption of *Haloxylon ammodendron* sand-fixation forest in Minqin desert, the stem flow dynamics of the assimilating shoots of *H. ammodendron* was monitored by using heat balance stem flow measurement technology. The growth of assimilating shoots was taken as the upscaling index, the water consumption of *H. ammodendron* stand was calculated by fitting the correlations between the individual water consumption and the surface area and the dry weight of assimilating shoots. The results showed that the growth of *H. ammodendron* was synchronous to the water consumption. The growth and water consumption were significantly higher in the rapid growth stage (July) than those in the leaf opening stage (May) and the defoliation stage (October). The correlation analysis demonstrated that there existed linear function relationships between the water consumption and surface area, dry weight of assimilating shoots. The simulated water consumption of *H. ammodendron* was significantly af-

收稿日期: 2022-08-21 修回日期: 2022-10-07

基金项目: 国家自然科学基金(32260425, 31860238)。

第一作者: 张锦春, 博士, 研究员。研究方向: 荒漠化及荒漠水文。E-mail: zhangjcg@126.com

ected by stand density and shoot configuration, and the simulated water consumption of assimilating shoots with different ages was slightly less than the measured value, while the average relative error of simulated values of assimilating shoot surface area was smaller (8.92%). Therefore, it is feasible to calculate water consumption of *H. ammodendron* sand-fixing forest based on assimilating shoot surface area and shoot weight, which can achieve reliable estimation of water consumption of *H. ammodendron* forest, and to provide reference for desert vegetation sand-fixing afforestation and ecological water management.

Key words: *Haloxylon ammodendron* sand-fixation forest; stem sap flow; water consumption; Minqin desert

梭梭(*Haloxylon ammodendron*)是中亚荒漠中分布最广的荒漠植被类型,也是干旱区固沙造林面积最大的树种,为荒漠典型固沙植物^[1]。民勤县有人工梭梭固沙林近 3.5 万 hm^2 ,占人工林总面积的 51.5%,在固沙林中占主导地位^[2]。早在 20 世纪 50 年代末,民勤引进梭梭在沙丘上造林获得成功,并进行大面积推广,但随着地表水资源减少和地下水位的下降,梭梭生长也随着年龄的增加需要更多的水分,土壤水分已经无法支撑初期梭梭林生长,必然出现梭梭大面积衰亡。因此,梭梭耗水量准确估算是维持干旱区固沙林生存和生长的关键环节。

梭梭耗水在荒漠生态系统水分循环中占有极为重要的地位,了解荒漠区人工梭梭林有限水资源的消耗量,更需要林分水平的耗水信息。利用微气象手段可获得林分水平的水分耗散,但很难分清林木准确蒸腾量^[3],另外,借助一定的尺度转换纯量可将梭梭单株耗水推求到林分尺度上,而如何选择尺度转换纯量将是精准估算林分耗水的关键所在。目前已有研究通过茎流与胸径^[4-5]、茎干横截面积^[6]、边材面积^[7-8]、边材密度^[9]、叶面积指数^[10-12]等函数关系推算植物水量,取得了较好的试验结果,但也存在不足,如通过边材面积估算林分耗水量的前提是假设所有单木蒸腾速率相同,但客观现实中不同胸径单木液流速率是否相同需要进一步验证^[13];胸径及茎干横截面积等生长量相对缓慢,精准估算林分年耗水量变化显得力不能及。而荒漠区梭梭林分布稀疏,阳光照射时同化枝之间相互遮挡程度不高,同化枝生长季节性变化特别明显,其同化枝生长指标的获取较为容易,可作为林分耗水尺度转换的敏感性纯量。假设梭梭单株耗水与同化枝生长之间存在着较强的相关性,可根据已测同化枝生长指标的梭梭液流观测数据推算梭梭林分尺度耗水量。

为了验证这种假设,本研究以民勤荒漠不同年龄梭梭固沙林为研究对象,基于林分同化枝生长调查数据和生长季单株梭梭液流观测数据,对梭梭固沙林耗水量进行估算和尺度转换,以期梭梭林耗水量化、分析和模拟预测提供理论支持,最终为荒漠

植被固沙造林及其生态用水管理提供科学指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

民勤位于甘肃河西走廊东北部石羊河下游,水资源匮乏,风沙危害严重,生态环境脆弱。区域属于典型的温带大陆性荒漠气候,年均气温 $7.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温 $3\,248.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,年均降水量 113 mm,年均蒸发量 2 644 mm,常年盛行西北风,年均风速 2.1 m/s ,最大风速 23.0 m/s 。区域用水需要石羊河上游水的补给,地下水过度利用导致地下水位不断下降,地下水位由 1961 年的 2.24 m 下降至 2013 年的 21.53 m,再上升至 2017 年的 20.47 m。地带性土壤为灰棕漠土,非地带性土壤多风沙土。典型植被主要有梭梭、沙拐枣(*Calligonum arborescens*)、白刺(*Nitraria tangutorum*)等。梭梭为民勤荒漠典型人工固沙林植被,由于造林年限不同而形成不同龄林结构的梭梭林分,其中衰退严重的梭梭林均在 20 龄段以上,林分分布稀疏,林木出现大面积死亡,随后进行补植造林,梭梭龄林结构较为复杂,20 龄段以下梭梭林分结构整齐,林木生长均匀,受林地土壤水分影响,各龄段梭梭林密度、盖度及生长存在一定的差异。

1.2 研究方法

2020—2021 年,在民勤荒漠区平坦的半固定沙地上选择 5、10、15 龄和 20 龄人工梭梭林分试验样地($300\text{ m}\times 300\text{ m}$),样地均匀布设 3 个样方($30\text{ m}\times 30\text{ m}$)进行梭梭林分调查,统计梭梭林地径频率分布,选择 4 株标准木进行树干梭梭茎干液流监测,样方内选取 3 株梭梭样株进行梭梭分枝构型调查,同步进行梭梭标准木和梭梭样株生长调查和同化枝表面积及叶重量取样测定。

1.2.1 梭梭单株耗水量测定 在标准木上安装 TDP-30 插针式传感器,并与 CR1000 数采器连接后通电,设置数据采集间隔设为 10 min,根据热脉冲接发温度差计算液流速率^[14]。液流速率公式即 Granier 经验公式^[15]为

$$V_h = \alpha K \beta = 3\ 600 \times 0.011\ 9 \times ((\Delta T_{\max} - \Delta T) / \Delta T)^{1.231} \quad (1)$$

式中: V_h 茎干液流流速 ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$); ΔT_{\max} 零通量时两探针间最大温差 ($^{\circ}\text{C}$); ΔT 具体通量时两探针间温差 ($^{\circ}\text{C}$); K 无量纲单位; α 和 β 依赖于热量系数。

依据茎干液流流速推算单株液流质量, 计算公式为

$$Q = V_h \times A_s \times T / 1\ 000 \quad (2)$$

式中: Q 为茎干液流质量 (kg); A_s 为边材面积 (cm^2); T 为时间 (h)。

梭梭茎干液流监测结束后, 量测梭梭样株基径及树皮厚度, 采用生长锥测定梭梭样株的边材厚度, 计算边材面积公式为

$$A_s = \pi(r - r_b)^2 - \pi(r - r_b - r_s)^2 \quad (3)$$

式中: A_s 为边材面积 (cm^2); r 为基径 (cm); r_b 为树皮厚度 (cm); r_s 为边材厚度 (cm)。

将监测的梭梭茎干液流质量 (10 min) 累加获得日液流量, 统计不同天气条件下日耗水量, 并进行不同天气条件日耗水量加权累加得到月耗水量, 每月耗水量累计得到梭梭年度耗水量。

1.2.2 梭梭同化枝生长测定 对梭梭标准木和梭梭样株进行同化枝生长测定, 梭梭标准木每月中旬取样, 进行梭梭耗水量与同化枝生长关系拟合分析, 梭梭样株 9 月中旬取样, 可进行梭梭同化枝生长模型优化。依据植株东南西北 4 个方位和上下 2 个部位选取 8 个标准枝分别取样, 每份样采集 50 个同化枝。对采集的梭梭同化枝进行总表面积扫描, 再称取同化枝干重。同步测量标准木冠幅大小 (东西、南北长)、株高、地径及标准枝基径、枝长, 统计标准木分枝构型及标准枝着生当年生同化枝数量, 并依据标准枝同化枝生长参数推算被测梭梭单株同化枝生长参数。

基于标准枝基径和长度, 用线性、幂、对数和指数 4 种函数形式分别建立梭梭标准枝同化枝表面积、同化枝干重估算模型, 并用决定系数 R^2 对拟合的回归方程进行评判, 从中选出最优估算函数。

$$A_z = a(d^2 h) + b \quad (4)$$

$$A_z = a(d^2 h)^b \quad (5)$$

$$A_z = a \ln(d^2 h) + b \quad (6)$$

$$A_z = a_e(d^2 h) \quad (7)$$

式中: A_z 为梭梭标准枝同化枝表面积 (cm^2) 或同化枝干重 (g); d 为标准枝基径 (mm^2); h 为标准枝长度 (cm); a 、 b 为拟合方程的参数。

根据标准木梭梭分枝构型统计分析, 利用式 (4)

一式 (7) 中选出的最优标准枝同化枝表面积或同化枝干重估算模型获得标准木单株梭梭同化枝表面积或同化枝干重。其表达式为

$$A_i = n_i A_{zi} \quad (i=1, 2, \dots, 12) \quad (8)$$

式中: A_i 为第 i 株同化枝表面积 (cm^2) 或同化枝干重 (g); n_i 为第 i 株枝条总数; A_{zi} 为由第 i 株枝条基径的平方与长度乘积的平均值 $d^2 h$ 计算得到的标准枝平均同化枝表面积 (cm^2) 或同化枝干重 (g)。

统计标准木月耗水量, 并与同月求算的标准木同化枝表面积或同化枝干重进行曲线拟合。拟合方程 Q_s 为

$$Q_s = a A_s + b \quad (9)$$

式中: Q_s 为标准木月耗水量 (kg); A_s 为标准木同化枝表面积 (cm^2) 或同化枝干重 (g); a 、 b 为拟合方程的参数。

标准木单株耗水量与其同化枝表面积比值推导同化枝表面积比导率, 同理由标准木单株耗水量与其同化枝干重比值推导同化枝干重比导率。

1.2.3 梭梭林分耗水量耦合模拟 基于梭梭林分生长及分枝构型调查, 统计梭梭林分密度、盖度、分枝数量、分枝长度和分枝粗度。结合梭梭林分样株标准枝生长及取样调查, 统计梭梭林分样株基径截面积、标准枝数量, 测定同化枝表面积, 利用式 (8) 获取梭梭林分样株同化枝表面积和同化枝干重, 结合梭梭林分调查地径和株高, 分别建立梭梭林单株同化枝表面积或同化枝干重与基径截面积和株高之间的线性函数关系式。其表达式为

$$Q_y = a(S h) + b \quad (10)$$

$$S = \sum_{k=1}^n \left(\frac{n}{k} \right) \Pi d_k^2 / 4 \quad (11)$$

式中: Q_y 为梭梭林分调查梭梭同化枝表面积 (cm^2) 或同化枝干重 (g); S 为调查梭梭基径截面积 (cm^2); h 调查梭梭株高 (cm); d_k 为调查梭梭第 k 个灌丛枝基径 (cm); a 和 b 均为系数。

通过式 (10) 计算梭梭样方内每株梭梭单株同化枝表面积或同化枝干重, 对样方内所有调查梭梭单株同化枝表面积或同化枝干重进行累加后同调查样方面积相除得到梭梭林分单位面积同化枝表面积或同化枝干重。其表达式为

$$Q_l = \sum_{k=1}^n \left(\frac{n}{k} \right) Q_k / S \quad (12)$$

式中: Q_l 为单位面积梭梭林分同化枝表面积 ($\text{cm}^2 \cdot \text{m}^{-2}$) 或同化枝干重 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$); n 为样方内总株数; Q_k 为第 k 株梭梭单株同化枝表面积 (cm^2); S 为样方面积 (m^2)。

以单位面积梭梭单株同化枝表面积乘以标准木

同化枝表面积比导率得到梭梭林分单位面积耗水量。同理,以单位面积梭梭单株同化枝干重乘以标准木同化枝干重比导率也可得到梭梭林分单位面积耗水量。

2 结果与分析

2.1 梭梭单株耗水与同化枝生长关系

对不同龄林梭梭同化枝表面积和同化枝干重估测回归模型(表 1)发现,梭梭标准枝基径平方与长度乘积拟合的 4 种标准枝同化枝拟合函数中,指数函数拟合性最好,同化枝表面积指数函数 R^2 介于 0.940 6~0.963 5,同化枝干重指数函数 R^2 介于 0.922 0~0.968 0,利用指数函数对梭梭单株同化枝表面积和同化枝干重进行估算(图 1),优化结果显示,7 月为梭梭快速生长季,统计梭梭单株同化枝表面积、同化枝干重和月耗水量最大,分别介于

5 259.99~1 3387.87 cm^2 、333.68~2 483.21 g 和 119.70~250.03 kg;5 月份梭梭萌发嫩枝,耗水量小,同化枝干重更小,分别在 164.63~317.86 g 和 28.73~118.67 kg;10 月梭梭同化枝干枯,耗水量及同化枝表面积更小,分别介于 10.10~108.06 kg 和 316.94~3 189.49 cm^2 。梭梭同化枝生长与其耗水量月变化过程同步,说明梭梭同化枝生长与其耗水量存在一定的相关性。

对不同龄林梭梭标准木月耗水量与同化枝生长之间关系进行分析发现,梭梭月耗水量与同化枝干重和同化枝表面积之间均存在典型的线性关系(表 2),同化枝表面积线性函数拟合度 R^2 介于 0.831 4~0.874 0,同化枝干重线性函数拟合度 R^2 介于 0.830 2~0.881 7。因此可利用梭梭单株同化枝生长与耗水量的线性关系,并基于同化枝生长的标准木液流观测数据进行梭梭林分尺度蒸腾耗水量推算。

表 1 4 种函数拟合梭梭标准枝同化枝生长回归方程

Table 1 Four kinds of growth regression equations of *Haloxylon ammodendron*

年龄	5 龄	10 龄	15 龄	20 龄
同化枝表面积拟合函数	$y=12.216(d^2h)+23.662$	$y=7.2467(d^2h)-18.343$	$y=3.1377(d^2h)-18.476$	$y=6.3084(d^2h)+26.629$
	$R^2=0.9550$	$R^2=0.9041$	$R^2=0.8986$	$R^2=0.9382$
	$y=36.745e^{0.1589(d^2h)}$	$y=14.734e^{0.1139(d^2h)}$	$y=5.8495e^{0.0736(d^2h)}$	$y=38.223e^{0.0827(d^2h)}$
	$R^2=0.9635$	$R^2=0.9509$	$R^2=0.9469$	$R^2=0.9406$
	$y=32.234(d^2h)^{0.6005}$	$y=3.3979(d^2h)^{1.1801}$	$y=0.5095(d^2h)^{1.4025}$	$y=23.235(d^2h)^{0.583}$
	$R^2=0.9291$	$R^2=0.9173$	$R^2=0.9215$	$R^2=0.9172$
同化枝干重拟合函数	$y=44.456\ln(d^2h)+15.837$	$y=70.214\ln(d^2h)-100.92$	$y=57.175\ln(d^2h)-115.78$	$y=43.622\ln(d^2h)-9.7331$
	$R^2=0.8559$	$R^2=0.769$	$R^2=0.7763$	$R^2=0.8694$
	$y=0.096(d^2h)+1.6707$	$y=1.7691(d^2h)-6.298$	$y=0.5499(d^2h)-1.9631$	$y=0.6214(d^2h)+1.7231$
	$R^2=0.9492$	$R^2=0.8588$	$R^2=0.9397$	$R^2=0.8896$
	$y=1.709e^{0.00451(d^2h)}$	$y=2.514e^{0.1305(d^2h)}$	$y=2.0082e^{0.0616(d^2h)}$	$y=3.307e^{0.0834(d^2h)}$
	$R^2=0.9601$	$R^2=0.9243$	$R^2=0.9680$	$R^2=0.9220$
同化枝干重拟合函数	$y=1.6643(d^2h)^{0.1649}$	$y=0.4639(d^2h)^{1.3482}$	$y=0.3606(d^2h)^{1.043}$	$y=1.788(d^2h)^{0.642}$
	$R^2=0.8552$	$R^2=0.8874$	$R^2=0.9416$	$R^2=0.8558$
	$y=-0.3489\ln(d^2h)+1.6174$	$y=16.847\ln(d^2h)-26.078$	$y=8.8827\ln(d^2h)-16.146$	$y=4.6152\ln(d^2h)-2.5109$
	$R^2=0.8273$	$R^2=0.7110$	$R^2=0.7744$	$R^2=0.7744$

表 2 不同龄林梭梭标准木月耗水量与同化枝生长线性关系

Table 2 The relations between monthly water consumption and specific conductivity for assimilating shoot growth of standard wood for *Haloxylon ammodendron* with different ages

林龄	同化枝表面积	同化枝干重
5 龄	$y=0.0109x+18.767$ $R^2=0.8324$	$y=0.5578x-33.139$ $R^2=0.8302$
10 龄	$y=-0.0106x-15.514$ $R^2=0.8314$	$y=0.0493x+4.5864$ $R^2=0.8817$
15 龄	$y=0.0298x+108.44$ $R^2=0.8405$	$y=0.1485x+94.616$ $R^2=0.8618$
20 龄	$y=0.0214x+10.373$ $R^2=0.8740$	$y=0.0590x+15.03$ $R^2=0.8595$

2.2 梭梭林分耗水量推算

统计梭梭样株标准枝 d^2h 及标准枝数,利用同化枝生长优化模型(4)折算梭梭林单株同化枝表面积和单株同化枝干重(表 3)。统计结果表明,梭梭

林标准枝 d^2h 以 5~10 龄级梭梭较小,而 15~20 龄级梭梭较大,统计标准枝数则以 10~15 龄段的中龄级梭梭林较多,而幼林梭梭和老龄梭梭林较少;折算单株同化枝表面积以 5~10 龄级梭梭较大,在

5 737.277~6 491.469 cm²,15~20 龄级梭梭较小,介于 2 899.145~3 248.967 cm²,折算单株同化枝干重以 5 龄段幼林梭梭最小,只有 249.053 g,而 20 龄段老龄梭梭最大,高达 1 952.042 g。

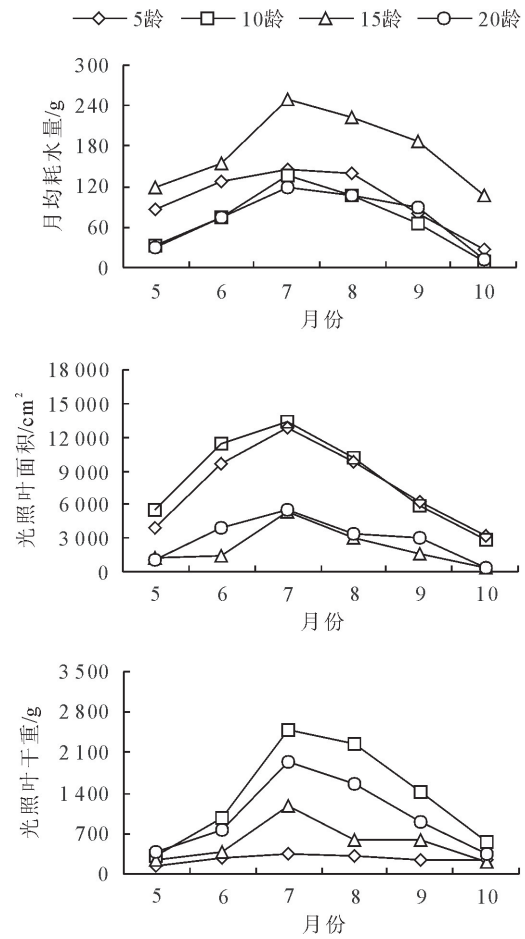


图 1 不同龄林梭梭单株耗水量及同化枝生长月变化
Fig. 1 The monthly variation of water consumption and assimilating twig growth of *Haloxylon ammodendron* with different ages

表 3 不同龄林梭梭单株同化枝生长参数统计

Table 3 Statistics of assimilating shoot growth parameters of individual <i>H. ammodendron</i> with different ages				
参数	5 龄	10 龄	15 龄	20 龄
标准枝 d^2h/cm^3	3.450 ± 1.681	4.990 ± 1.791	9.094 ± 1.697	8.044 ± 1.666
标准枝数/枝	112 ± 24	230 ± 71	326 ± 57	89 ± 18
折算单株同化枝面积/ cm^2	$6\,491.469\pm1\,852.363$	$5\,737.277\pm1\,045.728$	$2\,899.145\pm2\,072.725$	$3\,248.967\pm1\,886.417$
折算单株同化枝干重/g	249.053 ± 175.879	$1\,077.618\pm241.376$	$1\,155.736\pm875.207$	$1\,952.042\pm710.798$

表 4 不同年龄梭梭林分耗水量模拟估算

Table 4 The simulated estimation of water consumption in <i>H. ammodendron</i> stands with different ages							
林龄/a	密度	同化枝表面积纯量		同化枝干重纯量			
		拟合函数	样方耗水量/kg	拟合函数	样方耗水量/kg		
5	0.138±0.020	$y=0.520\ 0x+5\ 497.6$	$R^2=0.919\ 7$	9 464.870	$y=0.075\ 2x+119.33$	$R^2=0.926\ 2$	8 698.020
10	0.088±0.013	$y=0.516\ 7x+4\ 412.3$	$R^2=0.954\ 1$	4 860.396	$y=0.135\ 4x+819.87$	$R^2=0.931\ 2$	4 039.296
15	0.085±0.014	$y=0.140\ 0x+151.45$	$R^2=0.955\ 2$	12 400.947	$y=0.055\ 9x+1.543$	$R^2=0.976\ 6$	12 646.365
20	0.046±0.020	$y=0.141\ 2x+1\ 369.7$	$R^2=0.935\ 7$	5 310.830	$y=0.074\ 2x+68.907$	$R^2=0.945\ 9$	3 098.733

利用梭梭林株高及地径截面积,构建梭梭林单株同化枝表面积、单株同化枝干重与地径截面积和株高之间的线性关系发现,不同龄林梭梭样株同化枝表面积与基径截面积和株高之间线性拟合程度较高, R^2 均在 0.91 以上,相对而言梭梭样株同化枝干重线性相关性更高, R^2 介于 0.926 2~0.976 6。可利用同化枝生长线性拟合函数求算梭梭林样方耗水量(表 4)。5 龄梭梭林分密度大,求算样方耗水量在 8 698.020~9 464.870 kg;20 龄梭梭林分密度小,样方耗水量介于 3 098.733~5 310.830 kg;10 龄、15 龄梭梭林密度相近,但分枝构型差异大,折算样方耗水量差异较大,分别介于 4 039.296~4 860.496 kg 和 12 400.947~12 646.365 kg。

2.2.3 梭梭林分耗水量验证 统计推求不同月份林地梭梭单株同化枝生长面积和同化枝干重及其对应的同化枝生长比导率,最终求算林地梭梭单株耗水量,并用标准木实测的单株梭梭耗水量进行模拟值验证(图 2)。模拟结果显示,不同龄林梭梭同化枝生长模拟值均略小于实测值,5 龄梭梭单株生长季耗水量模拟值平均相对误差小,为 6.68%,10 龄、15 龄梭梭模拟值误差分别为 12.80%和 12.61%,20 龄梭梭模拟值误差更大、平均为 14.94%;不同同化枝生长参数模拟值存在一定的差异,同化枝干重模拟差异较大,模拟值平均相对误差 14.60%,同化枝表面积模拟更接近于实测值,模拟值平均误差只有 8.92%。

3 结论与讨论

梭梭同化枝生长与其耗水量月变化过程明显,梭梭快速生长期(7月)同化枝生长及耗水量明显

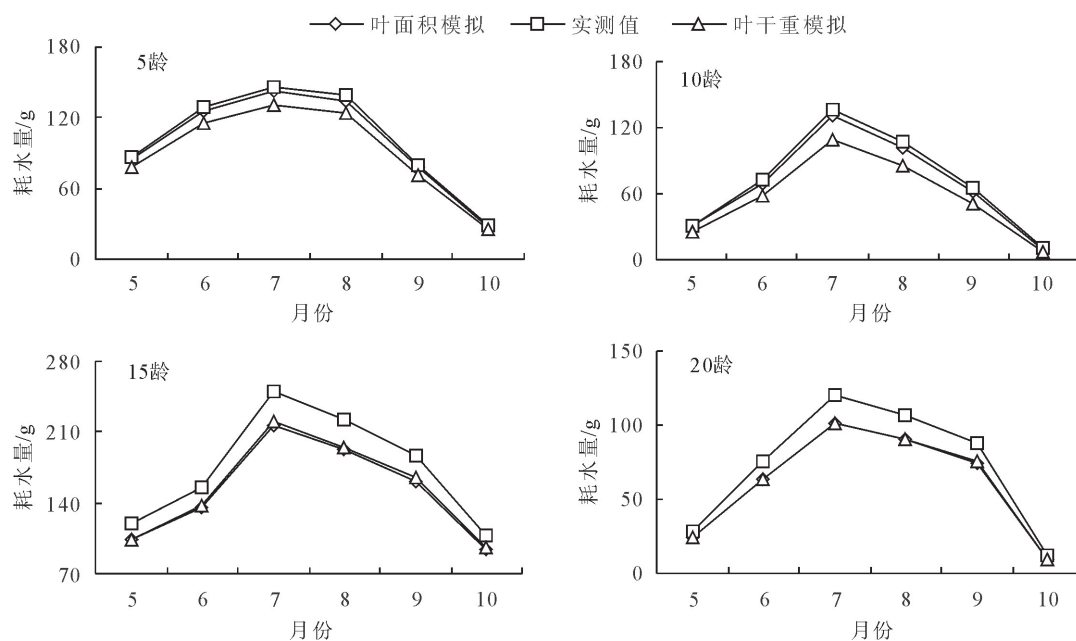


图2 不同龄林梭梭单株耗水量实测值与模拟值比较

Fig. 2 The comparison of measured and simulated water consumption of individual *H. ammodendron* with different ages

高于展叶(5月)和落叶期(10月),表明梭梭单株耗水与同化枝生长之间存在一定的相关性;选择梭梭同化枝生长推算梭梭固沙林耗水量可行,经模拟推算梭梭固沙林耗水量受林分密度及分枝构型的影响较大,且不同龄林梭梭同化枝生长模拟均略小于实测值,相对而言同化枝干重模拟平均相对误差偏大(14.60%),同化枝表面积模拟更接近于实测值(8.92%)。

目前利用热技术测定林木耗水量,常通过边材面积、底面积或胸径等空间纯量等进行尺度转换。Fu等^[16]选用边材面积作为空间纯量推算了新疆绿洲农田防护林蒸腾耗水量;Lüttschwager等^[17]运用底面积作为空间纯量,提出了德国北部干旱地区山毛榉林分节水策略;岳广阳等^[11]以叶面积为扩展纯量,对科尔沁沙地人工小叶锦鸡儿灌丛群落耗水量进行尺度转换;李双等^[18]基于叶干重建景泰退耕还林地柽柳单枝、个体耗水模型准确估算柽柳耗水量。本研究以荒漠梭梭为研究对象,选用了季节生长量变化较大的同化枝表面积和同化枝干重为扩展纯量,通过对不同龄林梭梭单木液流生长季动态监测,耦合模拟梭梭林分耗水量,发现梭梭同化枝表面积、同化枝干重与其耗水量存在很强的线性相关性,将同化枝表面积和同化枝干重作为尺度扩展纯量行之有效,可实现梭梭林分耗水量的可靠估算,为荒漠植被固沙造林及其生态用水管理等提供参考。

参考文献:

- [1] 张晓艳,褚建民,孟平,等. 民勤绿洲荒漠过渡带梭梭树干液流特征及其对环境因子的响应[J]. 生态学报, 2017, 37(5): 1525-1536.

- ZHANG X Y, CHU J M, MENG P, et al. The effect of environmental factors on stem sap flow characteristics of *Haloxylon ammodendron* Bunge in Minqin oasis-desert[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(5): 1525-1536. (in Chinese)
- [2] 赵鹏,徐先英,屈建军,等. 民勤绿洲荒漠过渡带人工梭梭群落与水土因子的关系[J]. 生态学报, 2017, 37(5): 1496-1505.
- ZHAO P, XU X Y, QU J J, et al. Relationships between artificial *Haloxylon ammodendron* communities and soil-water factors in Minqin oasis-desert ecotone[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(5): 1496-1505. (in Chinese)
- [3] 张小由,康尔泗,司建华,等. 胡杨蒸腾耗水的单木测定与林分转换研究[J]. 林业科学, 2006, 42(7): 28-32.
- ZHANG X Y, KANG E S, SI J H, et al. Stem sap flow of individual plant of *Populus euphratica* and its conversion to forest water consumption[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2006, 42(7): 28-32. (in Chinese)
- [4] FISHER R A, WILLIAMS M, DA COSTA A, et al. The response of an Eastern Amazonian rain forest to drought stress: results and modeling analyses from a through exclusion experiment[J]. Global Change Biology, 2007, 13(11): 2361-2378.
- [5] 张毓涛,梁凤超,常顺利,等. 基于 8 hm² 样地的天山云杉林蒸腾耗水从单株到林分的转换[J]. 生态学报, 2011, 31(12): 3330-3339.
- ZHANG Y T, LIANG F C, CHANG S L, et al. Scaling up for transpiration of *Picea schrenkiana* stands based on 8 hm² permanent plots in Tianshan Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(12): 3330-3339. (in Chinese)
- [6] 曹晓明,陈曦,王卷乐,等. 古尔班通古特沙漠南缘非灌溉条件下梭梭蒸腾耗水特征[J]. 干旱区地理, 2013, 36(2): 292-302.
- CAO X M, CHEN X, WANG J L, et al. Water consumption and transpiration of non-irrigated *Haloxylon ammodendron* in hinterland of Taklimakan desert[J]. Arid Land Geography, 2013, 36(2): 292-302. (in Chinese)
- [7] 白云岗,张江辉,王新友,等. 塔里木盆地胡杨单木与林分耗水

- 量的尺度转换研究[J]. 中国水利, 2008, (5): 24-25.
- BAI Y G, ZHANG J H, WANG X Y, *et al.* Studies on scale convention of individual *Populus euphratica* and forest water consumption in Tarim Basin [J]. China Water Resources, 2008, (5): 24-25. (in Chinese)
- [8] 孙龙, 王传宽, 杨国亭, 等. 应用热扩散技术对红松人工林树干液流通量的研究[J]. 林业科学, 2007, 43(11): 8-14.
- SUN L, WANG C K, YANG G T, *et al.* Sapflow flux of *Pinus koraiensis* plantation measured by thermal dissipation probes [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2007, 43(11): 8-14. (in Chinese)
- [9] BARBOUR M M, HUNT J E, WALCROFT A S, *et al.* Components of ecosystem evaporation in a temperate coniferous rainforest, with canopy transpiration scaled using sapwood density[J]. New Phytologist, 2005, 165(2): 549-558.
- [10] CHABOT R, BOUARFA S, ZIMMER D, *et al.* Evaluation of the sap flow determined with a heat balance method to measure the transpiration of a sugarcane canopy [J]. Agricultural Water Management, 2005, 75(1): 10-24.
- [11] 岳广阳, 赵哈林, 张铜会, 等. 小叶锦鸡儿灌丛群落蒸腾耗水估算方法[J]. 植物生态学报, 2009, 33(3): 508-515.
- YUE G Y, ZHAO H L, ZHANG T H, *et al.* Estimation of transpiration in communities dominated by shrub *Caragana microphylla* [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2009, 33(3): 508-515. (in Chinese)
- [12] FIORA A, CESCATTI A. Vertical foliage distribution determines the radial pattern of sap flux density in *Picea abies* [J]. Tree Physiology, 2008, 28, 1317-1323.
- [13] 杨军军, 封建民, 何志斌. 基于热比率法的青海云杉林蒸腾量估算[J]. 植物生态学报, 2018, 42(2): 195-201.
- YANG J J, FENG J M, HE Z B. Estimating whole-tree water use of *Picea crassifolia* based on heat ratio method [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2018, 42(2): 195-201. (in Chinese)
- [14] 李浩, 胡顺军, 朱海, 等. 基于热扩散技术的梭梭树干液流特征研究[J]. 生态学报, 2017, 37(21): 7187-7196.
- LI H, HU S J, ZHU H, *et al.* Characterization of stem sap flow *Haloxylon ammodendron* by using thermal dissipation technology [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(21): 7187-7196. (in Chinese)
- [15] GRANIER A. Sap flow measurements in douglas-fir tree trunks by means of a new thermal method [J]. Annals of Forest Science, 1987, 44(1): 1-14.
- [16] FU S, SUN L, LUO Y. Combining sap flow measurements and modelling to assess water needs in an oasis farmland shelterbelt of *Populus simonii* Carr. in Northwest China [J]. Agricultural Water Management, 2016, 177: 172-180.
- [17] LÜTTSCWAGER D, JOCHHEIM H. The potential of remote sensing-based models on global water-use efficiency estimation: an evaluation and intercomparison of an ecosystem model (BESS) and algorithm (MODIS) using site level and upscaled eddy covariance data [J]. Forests, 2020, 11: 537.
- [18] 李双, 杜建括. 基于植物生物学参数的多枝桧柳耗水量估算方法[J]. 节水灌溉, 2018(7): 98-103.
- LI S, DU J K. An estimation method for water consumption of *Tamarix ramosissima* ledeb based on plant biological parameters [J]. Water Saving Irrigation, 2018(7): 98-103. (in Chinese)
- (上接第 88 页)
- [24] 迟清华, 鄯明才. 应用地球化学元素丰度数据手册 [M]. 北京: 地质出版社, 2007: 80-96.
- [25] 苏维词, 朱文孝. 贵州喀斯特山区生态环境脆弱性分析 [J]. 山地学报, 2000, 18(5): 429-434.
- SU W C, ZHU W X. The eco-environmental fragility in Karst mountain regions of Guizhou Province [J]. Mountain Research, 2000, 18(5): 429-434. (in Chinese)
- [26] 韩春梅, 王林山, 巩宗强, 等. 土壤中重金属形态分析及其环境学意义 [J]. 生态学杂志, 2005, 24(12): 1499-1502.
- HAN C M, WANG L S, GONG Z Q, *et al.* Chemical forms of soil heavy metals and their environmental significance [J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(12): 1499-1502. (in Chinese)
- [27] 钱学诗, 钱壮壮, 王波, 等. 森林生态系统对降水过程中的重金属影响研究综述 [J]. 世界林业研究, 2022, 35(3): 8-13.
- QIAN X S, QIAN Z Z, WANG B, *et al.* A review of the effect of forest ecosystems on heavy metals in precipitation [J]. World Forestry Research, 2022, 35(3): 8-13. (in Chinese)
- [28] 李林, 周启星. 我国典型城市大气汞污染及对人体健康的影响 [J]. 生态毒理学报, 2014, 9(5): 832-842.
- LI L, ZHOU Q X. Atmospheric mercury pollution in typical cities of china and its influences on human health [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2014, 9(5): 832-842. (in Chinese)
- [29] 曾昭婵, 李本云. 万山汞矿区土壤汞污染及其防治研究 [J]. 环境科学与管理, 2016, 41(5): 115-118.
- ZENG Z C, LI B Y. Preliminary study on soil mercury pollution and its prevention and control in Wanshan mercury mine area [J]. Environmental Science and Management, 2016, 41(5): 115-118. (in Chinese)
- [30] 康希睿, 张涵丹, 王小明, 等. 北亚热带 3 种森林群落对大气湿沉降重金属的调控 [J]. 生态学报, 2021, 41(6): 2107-2117.
- KANG X R, ZHANG H D, WANG X M, *et al.* Distribution of heavy metals in precipitation by three forest communities in northern subtropical region of China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(6): 2107-2117. (in Chinese)
- [31] 僮祥英, 邓锋, 文竹. 毕节煤矸石污染地优势木本植物土壤修复能力研究 [J]. 环境科学与技术, 2016, 39(12): 173-177, 193.
- TONG X Y, DENG F, WEN Z. Study on phytoremediation potential of dominant woody plants for the soil contaminated by coal gangue in Bijie [J]. Environmental Science & Technology, 2016, 39(12): 173-177, 193. (in Chinese)
- [32] 魏星宇. 贵州草海流域不同土地类型重金属污染下的景观修复设计探究 [D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2021.
- [33] BING H, WU Y, ZHOU J, *et al.* Biomonitoring trace metal contamination by seven sympatric alpine species in Eastern Tibetan Plateau [J]. Chemosphere, 2016, 165: 388-398.
- [34] BING H, ZHOU J, WU Y, *et al.* Barrier effects of remote high mountain on atmospheric metal transport in the Eastern Tibetan Plateau [J]. Sci. Total Environ, 2018, 628-629: 687-696.