红砂(*Reaumuria soongorica*)、珍珠(*Salsola passerine*)蒸腾耗水规律的尺度整合

金艳霞[1,2], 王新平[1], 张亚峰[1], 潘颜霞[1], 虎 瑞[1], 徐浩杰[1,2], 石 薇[1,2]

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院 沙坡头沙漠研究试验站, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 利用 LI-6400XT 便携式光合仪和大型称重式蒸渗仪研究红砂(*Reaumuria soongorica*)、珍珠(*Salsola passerina*)灌丛在干旱和湿润条件下的蒸腾耗水特征,并探讨从叶片到灌丛尺度转换中,在非破损状态下植物叶面积的可靠测定方法。结果表明:用图像法获得非破损状态下植物叶面积是可行的,基于植物叶面积通过尺度转换得到灌丛尺度的蒸腾量与蒸渗仪测定的蒸腾量具有较高一致性($r=0.9752$, $P<0.01$)。干旱条件下,红砂蒸腾速率的日变化呈单峰曲线,主要影响因素为气孔导度($P<0.01$);湿润条件下,红砂和珍珠蒸腾速率的日变化均呈单峰曲线,主要的影响因素为气孔导度、空气相对湿度、饱和蒸汽压亏缺和光合有效辐射($P<0.01$)。珍珠水分利用效率和气孔限制值均高于红砂。此外,干旱条件下红砂的水分利用效率和气孔限制均高于湿润条件。通过尺度转换得到的灌丛尺度的蒸腾量和蒸渗仪测定的蒸腾量的结果均表明,红砂的蒸腾量始终大于珍珠,且随土壤湿润状况的改善而增大。红砂灌丛蒸腾量与蒸散量之比在干旱条件下($T/ET=21\%$)较湿润条件下高(约 2%)。同时,红砂灌丛 T/ET 高于珍珠灌丛。因此,基于图像法获得的叶面积参数可用于从叶片(便携式光合仪法)到植株及灌丛水平(称重式蒸渗仪法)的植物蒸腾耗水尺度转换研究。

关键词: 红砂(*Reaumuria soongorica*); 珍珠(*Salsola passerine*); 蒸腾

文章编号: 1000-694X(2018)02-0286-08 **DOI**: 10.7522/j.issn.1000-694X.2017.00071

中图分类号: Q945.79 **文献标志码**: A

0 引言

蒸散是全球水循环的重要组成部分,陆地生态系统的年蒸散量约为 672 mm[1]。在 85%的陆地区域,蒸腾量占地表蒸散量的 2/3 以上,蒸腾主导陆地生态系统蒸散过程。从水资源预测的角度来看,基于生物过程的蒸腾研究比基于物理过程的蒸发研究更重要[2]。目前,国内外在森林植被、草地植被、荒漠植被不同尺度的蒸腾耗水特征和研究方法方面已取得了较多进展[3-5]。荒漠地区因水分限制极为明显,植被斑块分布、下垫面不均一使得准确估算荒漠植被的蒸腾耗水在方法上有局限性,影响因子主要包括环境因子和植物生理特性[6-7]。当前蒸渗仪(Lysimeter)法被认为是研究干旱沙漠地区实际蒸散的可靠研究方法[8]。蒸渗仪测得的蒸散量常被视为实际测量蒸散的标准,可为其他测量技术的开发、校准和验证提供基准信息[9-10]。LI-6400XT 便携式光合仪法是通过短时间内较精确地测定植物叶片实际蒸腾速率、进而在时空尺度上扩展研究植物蒸腾量的主要方法之一[11]。已有研究表明,定量研究优势植物的蒸腾量及其主要影响因素是准确研究区域蒸散状况和生态需水的基础,对预测水分受限的荒漠地区的水分平衡和气候响应尤为重要[12]。

红砂(*Reaumuria soongorica*)为柽柳科(Tamaricacea)多年生小灌木,是荒漠灌丛植被的主要优势种和建群种,生境为荒漠和半荒漠的山麓淤积平原、山地丘陵、山前砂砾质和砾质洪积扇、剥蚀残丘、戈壁等[13]。珍珠(*Salsola passerina*)为藜科(Chenopodiaceae)猪毛菜属半灌木,常生长在山坡或砾质滩地[14]。两种植物的光合强度和蒸腾强度低,属于超旱生植物[15-16]。红砂和珍珠群落是腾格里沙漠东南缘草原化荒漠的气候性顶级群落[17-18]。但目前对草原化荒漠优势灌木种红砂和珍珠生态耗水研究较少,且多数研究仅针对植物水分参数的描述和比较,无法揭示荒漠灌丛蒸腾耗水规律[19-21]。因此,本研究以红砂和珍珠为对象,测定红砂和珍珠叶片

收稿日期: 2017-04-19; **改回日期**: 2017-08-28

资助项目: 国家自然科学基金项目(41530750, 41371101)

作者简介: 金艳霞(1986—),女,甘肃陇西人,博士研究生,主要进行荒漠植被蒸散耗水研究。E-mail: jinyanx526@163.com

通信作者: 王新平(E-mail: xpwang@lzb.ac.cn)

到植株及灌丛尺度的耗水量，分析不同土壤干湿条件下红砂和珍珠灌丛的蒸腾耗水规律，为植物叶片与灌丛尺度蒸腾量的研究奠定基础，也为区域尺度的水分平衡和生态需水研究提供重要的数据支撑和方法参考。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

试验在位于腾格里沙漠东南缘的中国科学院沙坡头沙漠研究试验站进行。本区属草原化荒漠，属于中温带荒漠大陆性气候区，年平均气温 9.6 ℃，低温极值 −25.1 ℃，高温极值 38.1 ℃，全年日照 3 264.7 h，年降水量 186 mm，降水量变率高达 45.7%，年潜在蒸发量3 000 mm[22]。腾格里沙漠东南缘地带性植被的主要成分是红砂和珍珠，由其组成的植物群落的自然分布区域是孟家湾至小红山一带的低山顶、山坡和山前洪积扇[23]。本试验将天然分布于小红山生长状况良好的红砂和珍珠移栽到沙坡头试验站 Lysimter 中，两种植物的生长状况如表 1 所列。红砂灌丛的平均冠幅投影较大，但叶片密度低于珍珠灌丛，红砂灌丛盖度为 7.9%，珍珠灌丛的盖度为 6.9%。

表 1　Lysimeter 中红砂和珍珠生长状况

Table1　Growth situation of xerophyte *R. soongorica* and *S. passerina* in Lysimeter

灌丛	株高/cm	冠幅/100 cm²	新枝长/cm	叶片密度*
红砂	19.6±2.2	10.3±0.01	2.4±0.3	9.0±1.4
珍珠	20.4±1.2	7.5±0.01	1.9±0.1	12.7±2.1*

*：植物冠层体积除以叶片面积，单位为 m^{-1}。

试验中不同干湿条件的区分是基于 5 月 20 日高达 24.8 mm 一次大降雨事件。降雨前的 2015 年 5 月 18 干旱，降雨后的 2015 年 5 月 23—24 日湿润。

1.2　研究方法

1.2.1　叶面积和叶片密度的测定

为了保证红砂和珍珠蒸腾和灌丛蒸散实验连续监测的准确性，本研究没有对 Lysimeter 中红砂和珍珠叶面积进行常规的离体测定，而是采用图像处理的方法转换得到。植物叶片尺度的光合速率(P_n)、蒸腾速率(Tr)由 LI-6400XT 便携式光合作用测量系统(Li-COR Inc.，Lincoln NE，美国)测定。计算 P_n、Tr 所需的叶面积参数根据肖强等[24]提出的方法获得。由于红砂和珍珠具有独特的叶片形态，在叶面积测定过程中，以一个小簇的叶面积为测定基准，在叶片图像的处理过程中，不通过测定叶片选区的像素值来计算叶面积，而是通过选择 Photoshop 软件中的“魔棒”和“磁性套索”工具直接选取图片中叶片和枝干的部分，进而移动选取到没有叶片和枝干的区域，通过菜单栏“选择”选项的下拉菜单选择“调整边缘”属性选项，获得叶片所占网格数图像，类似于传统方法中的网格法，直接对网格计数即可得到测定叶片选区的叶面积值。为了验证这一方法的可靠性，试验期间，在小红山地区剪取红砂和珍珠的小枝各 40 枝，分别用 photoshop 软件和叶面仪(LI-3000，LI-COR Co.，美国)测定叶面积。

叶片面积密度(或简单叶片密度，LAD)法是测量单株植物或植丛叶片数量的有效方法，就是植物冠层体积除以叶片面积，单位为 m^{-1}。利用 LAI-2000 植物冠层分析仪(LI-COR Inc.，美国)测定 Lysimeter 中每株红砂和珍珠的 LAD，测定时需将 DISTS 值设定为该株植物最长分枝的长度。

1.2.2　叶片及植株尺度蒸腾耗水量测定与估算

2015 年 5 月底晴朗天气采用 LI-6400XT 便携式光合作用测量系统簇状叶室(6400-05)测定 Lysimeter 中红砂、珍珠 P_n、Tr、相对湿度(RH)等参数。分别在 2015 年 5 月 18、24 日测定红砂的光合生理参数，在 5 月 23 日测定珍珠的光合生理参数。测定时尽量保持植物正常生长的状态。植物光合作用日变化动态的测定每 2 h 进行一次(07:00—19:00)，所测定的叶片为冠层中上部新生枝上的成熟叶片，每株测定 3 小簇叶片，每簇叶片重复测定 3 次。植物水分利用效率(WUE)采用公式 $WUE=P_n/Tr$ 计算[25]，气孔限制值(L_s)采用公式 $L_s=1-C_i/C_a$ 计算，C_a 为大气 CO_2 浓度，C_i 为胞间 CO_2 浓度[26]。

利用 LI-6400XT 测定叶片蒸腾速率变化的时间间隔为 2 h，假定该时段内叶片蒸腾速率保持恒定，那么，可以选取 3 个标准样枝蒸腾速率的平均值作为植株冠层尺度的蒸腾速率。由于 LI-6400XT 测定的 Tr 的单位为 mmol·m^{-2} s^{-1}，为了便于估算植株冠层尺度的蒸腾耗水量，冠层尺度蒸腾速率(T_c)的单位换算为 kg·m^{-2}·h^{-1}。用公式表示即 $T_c=0.0648Tr$。据此计算 2 h 内红砂和珍珠灌丛的蒸腾耗水量 T_s(kg)。

$$T_s=\sum_{i=1}^{n}T_{ci}A_i t \quad (n=1,2,3,4) \qquad (1)$$

式中：T_{ci} 为植株 i 的蒸腾速率(mmol·m^{-2}·s^{-1})；A_i 为植株 i 的叶面积(m^2)；t=2 h 为测定间隔；n 为植株的个数。

$$T = \sum_{i=1}^{n} T_{si}/\rho A \quad (n = 1,2,\cdots,6) \qquad (2)$$

式中：T 为 07:00—19:00 时段内灌丛蒸腾耗水量(mm)；T_{si} 为每 2 h 灌丛蒸腾耗水量(kg)；A 为蒸渗仪表面积(m^2)；ρ 为水的密度(10^3 kg·m^{-3})；n 为蒸腾速率的测定次数。

1.2.3 灌丛蒸散量测定

试验中采用的自动称重式蒸渗仪表面积为 4 m^2，称重系统采用 3 个 Sartorius 称重传感器 PR6241/53(德国 Sartorius 公司，分辨率 1/10000，精度 0.100 kg)构成，蒸渗仪精度为 0.025 mm 降水量。3 个蒸渗仪分别为无植被裸地(测定土壤蒸发)、栽植 4 株红砂、栽植 4 株珍珠。本文分析的数据资料时段为 2015 年 5 月 LI-6400XT 测定相应时段前后 3 天数据。计算过程中通过 Lysimeter 的表面积和水的密度将重量变化单位由 Kg 转化 mm。沙坡头地区水量平衡方程为[27]：

$$P + C_W = ET + R + D + \Delta S \qquad (3)$$

式中：P 为降水量，mm；C_W 为凝结水量，mm；ET 为蒸散量，mm；R 为地表径流，mm；D 为深沙层水分补给量，mm；ΔS 为计算时段内蒸渗仪土壤水分变化量，mm。由于全年观测到的凝结水数量非常有限，且对半灌木没有明显的生态意义[28]。因此，本研究中忽略凝结水的影响。此外研究时段也没有观测到地表径流和深层渗漏。据此，本研究中水量平衡的公式可简化为：

$$P = ET + \Delta S \qquad (4)$$

$$T = ET - E \qquad (5)$$

式中：ET 为灌丛蒸散量，mm；E 为裸地蒸发量，mm；T 为灌丛蒸腾量，mm。

1.3 数据处理

原始数据使用 Excel 整理，之后用 SAS 9.2 统计软件进行方差分析，采用 Origin8.1 作图。

2 结果与分析

2.1 叶面积

为了验证图像处理方法获取叶面积的可靠性，用叶面积仪和图像处理两种方法同时测定野外采取红砂和珍珠叶片的叶面积(样本量，红砂和珍珠各 40)，并做相关分析。图像处理方法得到的红砂和珍珠叶片叶面积与叶面积仪测定结果极显著相关(图 1)，表明通过图像处理获取红砂和珍珠叶面积的方法是可靠的。

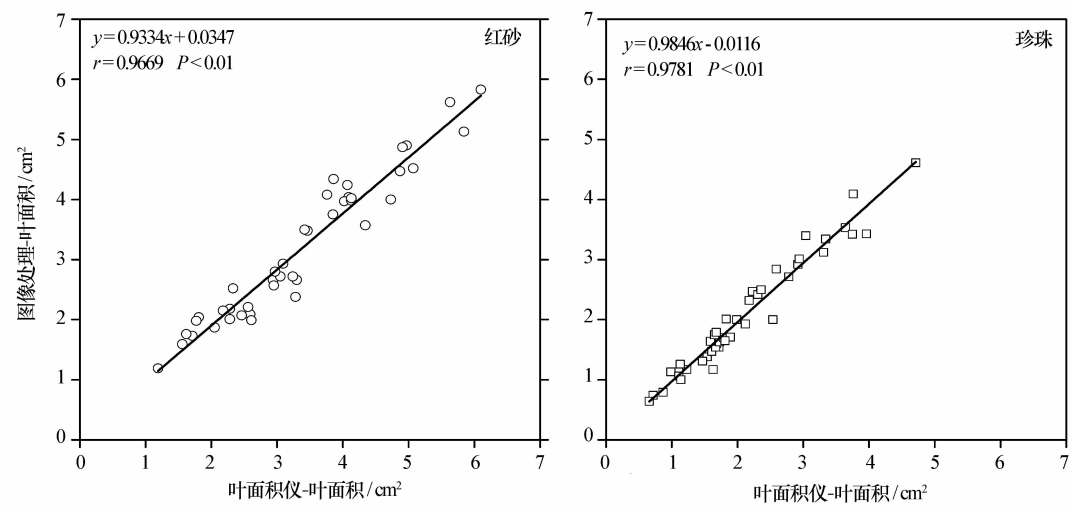


图 1 图像处理法与叶面积仪法测定的叶面积之间的相关关系

Fig. 1 Correlation between leaf area measured by image processing method and leaf area meter method

2.2 红砂和珍珠灌丛蒸腾速率

干旱条件下红砂 Tr 的日均值为(4.71±0.46) mmol·m^{-2}·s^{-1}，湿润条件下红砂 Tr 的日均值为(7.84±1.05)mmol·m^{-2}·s^{-1}(图 2)。湿润条件下红砂的 Tr 明显高于干旱条件，且 Tr 峰值出现的时间由14:00((6.59±1.49)mmol·m^{-2}·s^{-1})提前到12:00((10.52±0.95)mmol·m^{-2}·s^{-1})。这说明同一物种在干湿条件不同情况下，Tr 会有明显差异。湿润条件下珍珠的 Tr 在12:00和14:00较高，分别为(12.09±1.55) mmol·m^{-2}·s^{-1} 和(12.38±1.97)mmol·m^{-2}·s^{-1}。珍珠 Tr 的日均

值为(7.25±1.54)mmol·m^{-2}·s^{-1}。可见，C_3植物红砂和C_4植物珍珠具有不同的水分利用策略和生理生化适应[29-30]，在同一湿润条件下，二者 *Tr* 的日均值和峰值均有明显不同。

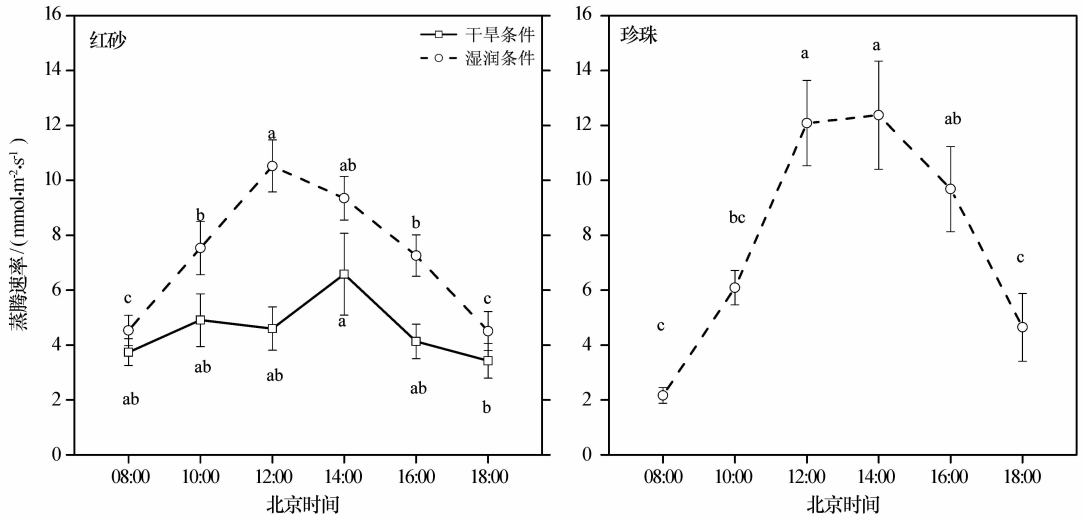


图 2　红砂和珍珠蒸腾速率的日变化

Fig. 2　Diurnal vitiations of transpiration rate of *R. soongorica* and *S. passerina*

干旱和湿润条件下红砂 *Tr* 与C_s均呈极显著正相关($P<0.01$，图 3)。红砂 *Tr* 与 *RH* 的正相关关系在干旱条件下显著($P<0.05$)，湿润条件下未达到显著水平($P>0.05$)。干旱条件下红砂 *Tr* 与饱和蒸汽压差(*VPD*)、光和有效辐射(*PAR*)的正相关关系均不显著($P>0.05$)，而湿润条件下红砂 *Tr* 与 *VPD*、*PAR* 呈极显著的正相关($P<0.01$)。这说明在由干旱向湿润条件转变过程中，红砂 *Tr* 的变化由气孔调控为主转变为气孔调控、*VPD*、*PAR* 综合作用。湿润条件下，珍珠 *Tr* 与C_s、*VPD*、*PAR* 均呈极显著的正相关($P<0.01$)。而与 *RH* 呈极显著负相关($P<0.01$)。珍珠 *Tr* 与C_s、*VPD*、*PAR*、*RH* 的关系进一步证实了干湿条件变化后红砂和珍珠 *Tr* 的调控机制的变化。

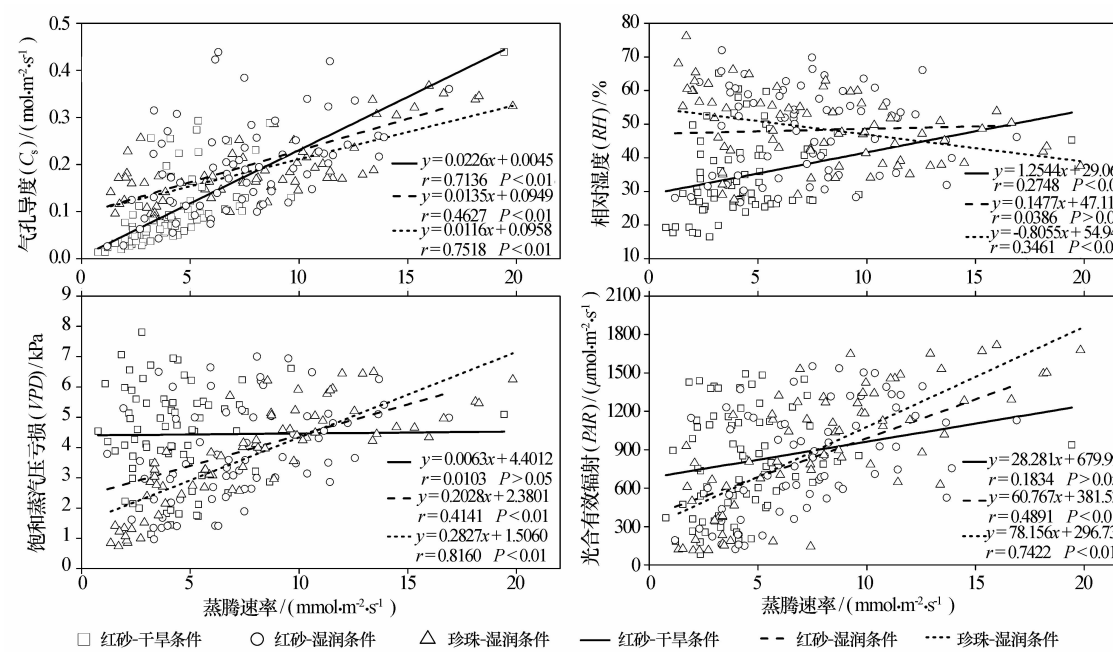


图 3　红砂和珍珠蒸腾速率与气孔导度、相对湿度、饱和蒸汽压亏损以及光合有效辐射间的关系

Fig. 3　Relationships between transpiration rate of *R. soongorica* and *S. passerina* and stomatal conductance, relative humidity, vapor pressure deficit, photosynthetic radiation

2.3 红砂和珍珠水分利用效率和气孔限制的变化

图 4 为红砂和珍珠 *WUE* 和 L_s 的日变化。干旱和湿润条件下红砂和珍珠的 *WUE* 均是早晨最高，随着时间的推移逐渐降低，之后又略有升高。红砂在干旱条件下的 *WUE* 高于湿润条件，说明在干旱条件下，红砂通过提高水分利用效率的方式适应干旱。从 L_s 的日变化也可以看出，干旱条件下红砂的 L_s 明显高于湿润条件，并且在12:00和16:00有两个明显的 L_s 峰值。而湿润条件下仅在16:00有明显的 L_s 峰值。就同一物种红砂而言，气孔调节在相对干旱的条件下发挥更大的作用。在湿润条件下，珍珠的 *WUE* 和 L_s 均明显高于红砂。珍珠 L_s 峰值的出现时间为10:00和16:00。可以看出，湿润条件下，珍珠和红砂在水分利用效率和气孔调节方面表现出明显的物种间差异，进而使两个物种呈现出不同的水分交换变化(图 2)。

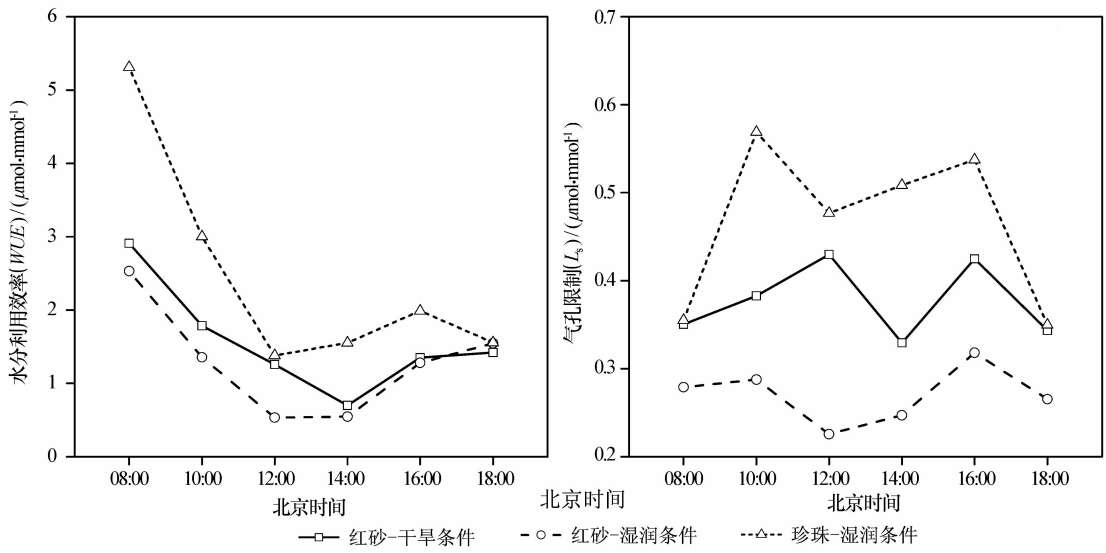


图 4 红砂和珍珠水分利用效率和气孔限制的日变化

Fig. 4 Diurnal vitiations of water use efficiency and Stomatic limitation of *R. soongorica* and *S. passerina*

2.4 红砂和珍珠灌丛蒸腾量

由图 5 可知，蒸渗仪法和 LI-6400XT 便携式光合仪法测定的红砂和珍珠灌丛的蒸腾量呈极显著的正相关关系。可见蒸渗仪测定的红砂和珍珠灌丛尺度蒸腾量与基于其叶面积通过尺度转换得到灌丛尺度的蒸腾量具有较高一致性($r = 0.9752$，$P < 0.01$)。

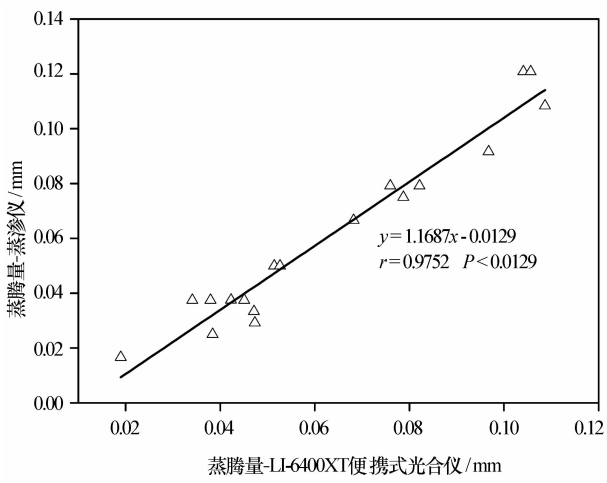


图 5 蒸渗仪法与 LI-6400XT 便携式光合仪法测定的蒸腾量之间的相关关系

Fig. 5 Correlation between transpiration measured by Lysimeter method and LI-6400XT portable photosynthesis method

由公式(1)和(2)估算 LI-6400XT 测定的红砂和珍珠灌丛在07:00—19:00的蒸腾量如表 2 所列。干旱条件下红砂灌丛蒸腾量在13:00—15:00最高，为 0.07 mm。湿润条件下11:00—13:00红砂灌丛蒸腾量最高，为 0.11 mm，比干旱条件下增加 57%。而湿润条件珍珠灌丛的蒸腾量在13:00—15:00最高，为 0.11 mm。红砂灌丛干旱和湿润条件下，07:00—19:00的总蒸腾量分别为 0.28 mm 和 0.45 mm，小时平均蒸腾量分别为 0.02 mm 和 0.04 mm。湿润条件下，珍珠灌丛07:00—19:00的总蒸腾量为 0.40 mm，小时平均蒸腾量为 0.03 mm。

由公式(4)和(5)计算 Lysimeter 测定的红砂和珍珠灌丛在07:00—19:00时段的蒸腾量，结果如表 3 所列。结合表 2 可知，LI-6400XT 和 Lysimeter 测定的07:00—19:00时段的蒸腾总量和小时平均蒸腾量都很接近，更进一步说明在日时间尺度上用

表 2　LI-6400XT 测定的红砂和珍珠灌丛蒸腾量(mm)

Table 2　Amount of transpiration (mm) of *R. soongorica* and *S. passerina* measured by LI-6400XT

时间	红砂灌丛(干旱条件)	红砂灌丛(湿润条件)	珍珠灌丛(湿润条件)
07:00—9:00	0.04	0.05	0.02
09:00—11:00	0.05	0.08	0.05
11:00—13:00	0.05	0.11	0.10
13:00—15:00	0.07	0.10	0.11
15:00—17:00	0.04	0.08	0.08
17:00—19:00	0.03	0.05	0.04
总计	0.28	0.45	0.40
小时平均值	0.02	0.04	0.03

LI-6400XT 测定红砂和珍珠灌丛的蒸腾量的可行性。由表 3 可知，干旱条件下红砂灌丛、湿润条件下红砂灌丛、湿润条件下珍珠灌丛蒸腾量占蒸散量的比例(T/ET)分别 21%、19%、8%。

表 3　Lysimeter 测定的红砂和珍珠灌丛的蒸散量、土壤蒸发量和蒸腾量(17:00—19:00,mm)

Table 3　Amount of evapotranspiration, soil evaporation and transpiration of *R. soongorica* and *S. passerina* measured by Lysimeter

	红砂灌丛(干旱条件)	红砂灌丛(湿润条件)	珍珠灌丛(湿润条件)
蒸腾蒸发(ET)/mm	1.07±0.11	1.75±0.12	1.44±0.06
蒸发(E)/mm	0.84±0.08	1.42±0.05	1.18±0.02
蒸腾(T)/mm	0.23±0.01	0.33±0.07	0.26±0.05
小时平均蒸发量/mm	0.02	0.03	0.02
T/ET/%	21	19	18

3　结论与讨论

叶片的水分传输是土壤-植物-大气连续体(SPAC)中水分迁移的重要环节[31]。叶片是植物进行光合、呼吸、蒸腾作用，即植物碳水耦合权衡的主要器官，也是研究植物与气候之间的相互关系以及植物对气候变化的响应与适应对策的重要媒介[32-33]。叶片面积的大小影响着植物的生长发育、抗逆性等生理功能，是评价环境因子效应的重要生长指标。动态测定和比较研究叶面积变化，可以为胁迫效应研究提供重要参考[24]。随着数码照相技术和图像处理软件的不断改进，利用计算机系统建立简便、快速准确、成本低廉而又非破坏性的叶面积测定方法成为可能[34]。本研究对叶面积的测定证明了用图像处理法获得红砂和珍珠的叶面积是可靠的。

钱多[35]认为，影响杨柴、油蒿和沙柳混交灌木林地生长季蒸腾量的主要因子是叶面积指数，而影响蒸腾蒸散比(T/ET)的主要因子是空气温度，并且 3 种灌木茎流变化均呈单峰曲线，日动态与太阳辐射日动态一致性最好。Huang 等[36]认为，短时间尺度上，太阳辐射、相对湿度和饱和水汽压差决定了油蒿的蒸腾量。吕扬[37]认为，黄柳和小叶锦鸡儿蒸腾速率的日变化主要表现为单峰型和多峰型，并且多峰型居多。不同天气条件下两种灌木蒸腾速率的影响因素不同，但均主要受太阳辐射的影响。赵春彦等[38]研究胡杨蒸腾速率对小降水事件的响应表明，小降水事件对降水发生后 4 h 胡杨蒸腾速率的影响最大，降水后 1 h 蒸腾速率影响最小。此外，种培芳等[39]的研究表明，降水增加将显著增加红砂的蒸腾速率，对气孔导度有明显的促进作用，而降水减少会显著提高红砂的水分利用效率。本研究对荒漠灌木红砂和珍珠光合生理特征研究结果与严巧娣等[29]对河西走廊中部张掖地区干旱条件、极端干旱条件和雨后湿润条件，以及周海燕等[23]对腾格里沙漠东南缘孟家湾-长流水-小红山一带极端环境下红砂和珍珠光合生理特征的研究一致，红砂蒸腾速率高于珍珠，而水分利用效率低于珍珠，进一步证明红砂属于避旱型半灌木，珍珠属于耐旱型半灌木。有研究认为植物的光合作用受到气孔和非气孔多种因素的影响[26,29]。气孔是调节植物碳水平衡的主要因子[40]。而光合作用是水气耦合过程。因此，红砂和珍珠的蒸腾耗水量及其速率变化也是气孔调节和非气孔因素共同作用的结果。珍珠的蒸腾速率变化是 C_s、VPD、PAR、RH 共同作用的结果(图 3)。干旱条件下，红砂蒸腾速率变化以气孔调节为主。湿润条件下，红砂的蒸腾速率变化由气孔和非气孔因素共同调节。在不同的干湿条件下，调节红砂和珍珠蒸腾速率的主导因素会发生变化。综上可知，荒漠植物蒸腾耗水的日变化主要表现为单峰型和多峰型。当研究所选取的空间和时间尺度不同时，荒漠植物蒸腾耗水过程对环境因素的响应不同。

定量研究荒漠生态系统的蒸腾对于准确预测其长期的水分通量至关重要，也可为全球陆地生态系统的水循环研究提供基础资料[41]。本研究采用蒸渗仪法和 LI-6400XT 便携式光合仪法对灌丛盖度为 7.9%的红砂和灌丛盖度为 6.9%的珍珠蒸腾量的研究表明，两种研究方法的研究结果具有较高一致性($r=0.9752$, $P<0.01$)。因此，可以认为在该盖度下，4 m^2 范围内红砂和珍珠灌丛 7:00－19:00 的实际蒸腾量如表 2、3 所列。进而可以估算更大空间尺度红砂和珍珠灌丛的实际蒸腾量。在沙漠地区

流域，模型估算结果认为 T/ET 范围为 35%～95%，平均 75%[2]。而基于实测数据的模型预测研究表明，长期的年蒸散量与降雨量高度相关，T/ET 变异性很大，为 1%～60%。年降雨量的变化是 T/ET 变异性较高的原因之一，T/ET 在湿润年份会增加。然而，对于特定的年降雨量，由于降雨量在季节内分布差异以及不同植物功能类型的利用，T/ET 可能有相当不同响应。例如，在连续两年几乎相同降雨量的情况下，灌木为优势种群落的 T/ET 高于草本植物为优势种的群落[6]。在湿润条件下，T/ET 在不同灌丛间的差异不明显，红砂灌丛 T/ET为 19%，而珍珠植丛 T/ET 为 18%（表 3）。在干湿条件不同情况下，同一灌丛 T/ET 不同，红砂灌丛干旱条件 T/ET 比湿润条件高 2%。这说明同在湿润条件下，对不同灌丛红砂和珍珠而言，植物本身的水分利用策略主导 T/ET 变化。而在干湿条件不同情况下，红砂灌丛湿润条件下 T/ET 降低是因为土壤蒸发对蒸散的相对贡献增加。

参考文献：

[1] Trenberth K E, Smith L, Qian T T, et al. Estimates of the global water budget and its annual cycle using observational and model data[J]. Journal of Hydrometeorology, 2007(8): 758－769.

[2] Jasechko S, Sharp Z D, Gibson J J, et al. Terrestrial water fluxes dominated by transpiration[J]. Nature, 2013, 496: 347－351.

[3] 石磊，盛后财，满秀玲，等. 不同尺度林木蒸腾耗水测算方法述评[J]. 南京林业大学学报：自然科学版，2016，40(4)：149－156.

[4] Moran M S, Scott R L, Keefer T O, et al. Partitioning evapotranspiration in semiarid grassland and shrubland ecosystems using time series of soil surface temperature[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149(1): 59－72.

[5] Shuttleworth W J. Evapotranspiration measurement methods [J]. Southwest Hydrology, 2008, 7(1): 22－23.

[6] Reynolds J F, Kemp P R, Tenhunen J D. Effects of long-term rainfall variability on evapotranspiration and soil water distribution in the Chihuahuan Desert: a modeling analysis[J]. Plant Ecology, 2000, 150: 145－159.

[7] Xu H, Li Y. Water-use strategy of three central Asian desert shrubs and their responses to rain pulse events[J]. Plant and Soil, 2006, 285(1): 5－17.

[8] Gee G W, Newman B D, Green S R, et al. Passive wick fluxmeters: design considerations and field applications[J]. Water Resources Research, 2009, 45: 1－18.

[9] Yang G J, Pu R L, Zhao C J, et al. Estimating high spatiotemporal resolution evapotranspiration over a winter wheat field using an IKONOS image based complementary relationship and Lysimeter observations[J]. Agricultural Water Management, 2014, 133: 34－43.

[10] Marek G, Gowda P, Marek T, et al. Estimating preseason irrigation losses by characterizing evaporation of effective precipitation under bare soil conditions using large weighing lysimeters[J]. Agricultural Water Management, 2016, 169: 115－128.

[11] 张志山，李新荣，何明珠，等. 沙漠人工植被蒸渗池测定及蒸腾量推算[J]. 草业学报，2006，15(6)：32－37.

[12] 冯起，司建华，席海洋，等. 极端干旱区天然植被耗水规律试验研究[J]. 中国沙漠，2008，28(6)：1095－1103.

[13] 刘家琼，邱明新，蒲锦春，等. 我国荒漠典型超旱生植物——红砂[J]. 植物学报，1982，24(5)：485－488.

[14] 丘明新，刘家琼. 珍珠植物群落的研究[J]. 生态学报，1982，2(4)：311－318.

[15] 刘家琼，蒲锦春，刘新民. 我国沙漠中部地区主要不同生态类型植物的水分关系和旱生结构比较研究[J]. 植物学报，1987，29(6)：662－673.

[16] 刘家琼，黎志坚，蒲锦春. 我国沙漠中部地区主要不同生态类型植物脯氨酸的累积、光合、呼吸和叶绿素含量[J]. 植物学报，1988，30(1)：85－95.

[17] 梁学功，王刚. 沙坡头人工固沙区种子库动态及其对植被演替方向的预测[M]//沙坡头沙漠试验研究站年报. 兰州：甘肃科学技术出版社，1993：108－119.

[18] 王刚，梁学功. 沙坡头人工固沙区的种子库动态[J]. 植物学报，1995，37(3)：231－237.

[19] 司建华，冯起，张小由，等. 植物蒸散耗水量测定方法研究进展[J]. 水科学进展，2005，16(3)：450－459.

[20] 李骁，王迎春，征荣. 西鄂尔多斯地区强旱生小灌木水分参数的研究(Ⅰ)[J]. 中国沙漠，2005，25(4)：581－586.

[21] 李骁，王迎春，征荣. 西鄂尔多斯地区强旱生小灌木的水分参数[J]. 应用生态学报，2007，18(5)：963－967.

[22] 李新荣，周海燕，王新平，等. 中国干旱沙区的生态重建与恢复：沙坡头站 60 年重要研究进展综述[J]. 中国沙漠，2016，36(2)：247－264.

[23] 周海燕，谭会娟，张志山，等. 红砂和珍珠对极端环境的生理响应与调节机制[J]. 中国沙漠，2012，32 (1)：24－32.

[24] 肖强，叶文景，朱珠，等. 利用数码相机和 Photoshop 软件非破坏性测定叶面积的简便方法[J]. 生态学杂志，2005，24(6)：711－714.

[25] 贾荣亮，周海燕，谭会娟，等. 超旱生植物红砂与珍珠光合生理生态日变化特征初探[J]. 中国沙漠，2006，26(4)：631－636.

[26] Youssef T., Awad M. A. Mechanisms of enhancing photosynthetic gas exchange in date palm seedlings (*Phoenix dactylifera* L.) under salinity stress by a 5-aminolevulinic acid-based fertilizer[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2008, 27: 1－9.

[27] 王新平，李新荣，康尔泗，等. 沙坡头地区固沙植物油蒿、柠条蒸散状况的研究[J]. 中国沙漠，2002，22(4)：363－367.

[28] 潘颜霞，王新平，张亚峰，等. 沙坡头地区地形对凝结水形成特征的影响[J]. 中国沙漠，2014，34(1)：118－124.

[29] 严巧娣，苏培玺，高松. 干旱程度对 C_3 植物红砂和 C_4 植物珍珠光合生理参数的影响[J]. 中国沙漠，2012，32(2)：364－371.

[30] 周紫鹃，苏培玺，解婷婷，等. 不同生境下红砂(*Reaumuria soongorica*)的生理生化特征及适应性[J]. 中国沙漠，2014，34(4)：1007－1014.

[31] 金鹰，王传宽. 植物叶片水力与经济性状权衡关系的研究进展[J]. 植物生态学报，2015，39(10)：1021－1032.

[32] 龚容，高琼. 叶片结构的水力学特性对植物生理功能影响的研究进展[J]. 植物生态学报，2015，39(3)：300－308.

[33] 王常顺，汪诗平. 植物叶片性状对气候变化的响应研究进展[J]. 植物生态学报，2015，39(2)：206 - 216.

[34] 杨劲峰，陈清，韩晓日，等. 数字图像处理技术在蔬菜叶面积测量中的应用[J]. 农业工程学报，2002，18(4)：155－158.

[35] 钱多. 毛乌素沙地混交灌木林蒸腾耗水与水量平衡特征[D]. 北京：北京林业大学，2016.

[36] Huang L，Zhang Z S，Li X R. Sap flow of *Artemisia ordosica* and the influence of environmental factors in a revegetated desert area：Tengger Desert，China[J]. Hydrological Processes，2010，24：1248－1253.

[37] 吕扬. 科尔沁沙丘-草甸相间地区黄柳和小叶锦鸡儿光合、耗水特性研究[D]. 呼和浩特：内蒙古农业大学，2016.

[38] 赵春彦，司建华，冯起，等. 胡杨(*Populus euphratica*)蒸腾耗水对小降雨事件的响应[J]. 中国沙漠，2017，37(5)：942－949.

[39] 种培芳，姬江丽，李毅，等. 红砂(*Reaumuria soongorica*)对大气 CO_2 浓度升高及降水变化的光合生理响应[J]. 中国沙漠，2017，37(4)：714－723.

[40] Wolf A，Anderegg W R L，Pacala S W. Optimal stomatal behavior with competition for water and risk of hydraulic impairment[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America，2016：113(46)：E7222－E7230.

[41] Jin J，Wang Q. Hyperspectral indices based on first derivative spectra closely trace canopy transpiration in a desert plant [J]. Ecological Informatics，2016，35：1－8.

Transpiration of *Reaumuria soongorica* and *Salsola passerine* at Different Scales

Jin Yanxia[1,2], Wang Xinping[1], Zhang Yafeng[1], Pan Yanxia[1], Hu Rui[1], Xu Haojie[1,2], Shi Wei[1,2]

(1.Shapotou Desert Research and Experiment Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The transpiration (T) characteristics of *Reaumuria soongorica* and *Salsola passerine* under drought and wet conditions were studied by LI-6400XT portable photosynthesis system combined with large lysimeter. The reliable determination method of leaf area of plant during switching of transpiration from leaf scale to shrub scale under non-destructive state was discussed in the study. The results showed that: it is feasible to obtain the leaf area of plant by image method under the condition of ensuring the normal growth of them. The transpiration obtained by switching from leaf scale to shrub scale based on the leaf area was higher consistency with lysimeter measurement ($r=0.9752$, $P<0.01$). Under the drought condition, transpiration rate diurnal changes of *R. soongorica* was unimodal and the main influencing factor was stomatal conductance ($P<0.01$). Under the wet condition, transpiration rate diurnal changes of *R. soongorica* and *S. passerine* were all unimodal and the main influencing factors were stomatal conductance, relative humidity, vapor pressure deficit and Photosynthetic radiation ($P<0.01$). In addittion, the water use efficiency and stomatic limitation of *S. passerine* were higher than that of *R. soongorica*. Moreover, the water use efficiency and stomatic limitation of *R. soongorica* under the drought condition were higher than those under the wet condition. The amount of shrub level transpiration measured by scale conversion and by weighing lysimeter were all indicated that the transpiration of *R. soongorica* was always greater than that of *S. passerine* at the leaf or shrub scale, and increased with the improvement of soil wetness. Under the drought condition, the ratio of transpiration to evapotranspiration ($T/ET=21\%$) of *R. soongorica* was higher about 2% than that under the wet condition. Therefore, the leaf area parameters obtained by the image method can be used to study the conversion of plant transpiration from leaf (portable photosynthesis method) to plant and shrub level (lysimeter method).

Key words: *Reaumuria soongorica; Salsola passerine*; transpiration