

DOI: 10.5846/stxb201301210126

高永,张瀚文,虞毅,王淮亮,王震,董雪,张燕.基于“三温模型”的珍稀濒危荒漠植物半日花蒸腾速率研究.生态学报,2014,34(20):5721-5727.

Gao Y, Zhang H W, Yu Y, Wang H L, Wang Z, Dong X, Zhang Y. Transpiration rate change in the rare and endangered eremophyte *Helianthemum Songaricum* schrenk based on the “Three-Temperature Model”. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(20): 5721-5727.

基于“三温模型”的珍稀濒危荒漠植物 半日花蒸腾速率研究

高 永^{1,*}, 张瀚文¹, 虞 毅², 王淮亮¹, 王 震³, 董 雪⁴, 张 燕⁵

(1. 内蒙古农业大学生态环境学院, 呼和浩特 010019; 2. 国际竹藤中心, 北京 100102;

3. 三亚市水利水电勘测设计院, 三亚 572000; 4. 中国林业科学院沙漠林业实验中心, 内蒙古 磴口 015200;

5. 北京林业大学, 北京 100083)

摘要:利用远红外热成像技术获取半日花叶温,并根据“三温模型”原理测定半日花的蒸腾速率,结果表明:在晴朗天气条件下,测定时间段内半日花蒸腾速率的日变化曲线呈“单峰型”,且峰值出现在 15:00,最低值出现在 17:00;叶温在测定时间内均高于气温,叶温与气温差最大为 9.58 K,最小为 0.71 K;在半日花所测冠幅范围内,冠幅越大,其蒸腾速率越大,蒸腾扩散系数越小。样本中,最大冠幅半日花测定时间内的蒸腾速率均值最高,为 $9.42 \times 10^{-6} \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$,蒸腾扩散系数最低,为 0.41;最小冠幅半日花测定时间内的蒸腾速率均值最低,为 $4.18 \times 10^{-6} \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$,蒸腾扩散系数最高,为 0.76。试验测定结果与传统测定技术结果相比较表明:利用远红外热成像技术非接触无损测定半日花蒸腾速率具有可行性。

关键词:三温模型;远红外热成像技术;叶温;植物蒸腾;半日花

Transpiration rate change in the rare and endangered eremophyte *Helianthemum Songaricum* schrenk based on the “Three-Temperature Model”

GAO Yong^{1,*}, ZHANG Hanwen¹, YU Yi², WANG Huailiang¹, WANG Zhen³, DONG Xue⁴, ZHANG Yan⁵

1 College of Ecology and Environment Science, Inner Mongolian Agricultural University, Hohhot 010019, China

2 International Center for Bamboo and Rattan, Beijing 100102, China

3 Sanya Survey and Design Institute of Water Conservancy and Hydropower, Sanya 572000, China

4 Desert Forestry Experimental Center of China Academy of Forestry Sciences, Inner Mongolia, Dengkou 01520, China

5 Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: *Helianthemum songaricum* Schrenk is an ancient relic plant mainly distributed in the Dzungaria of Xinjiang Uygur Autonomous Region and the western Ordos of Inner Mongolia Autonomous Region. *H. songaricum* Schrenk is an important source of scientific information to study the origin and migration of desert plants in central Asia. However, due to environmental degradation caused by human activities, such as overgrazing during the past decades, its population and distribution area has declined rapidly, with substantial changes in the plant community structure. In order to gather information on its transpiration rate through contactless and non-invasive methods, we measured *H. songaricum* Schrenk leaf temperature using infrared thermal imaging technology and assessed the transpiration rate of the species by applying the “Three-temperature model”. The sample area was set up at a typical *H. songaricum* Schrenk community, covering an area of about 1106.857 m² in the Western Ordos National Nature Reserve. In this sample area, we selected three plant sizes (large,

基金项目:国家科技支撑计划项目(2011BAC07B02-03);鄂尔多斯市林业局项目资助

收稿日期:2013-01-21; **网络出版日期:**2014-03-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 13948815709@163.com

medium and small), with five strains per plant size, making a total of fifteen plants as the sample group. The FLUKE-Ti55 far infrared thermal imager has been applied to the determination of *H. songaricum* Schrenk leaf temperature. The experimental results were summarized as follows: the diurnal variation pattern of transpiration rate (Tr) was a one-peak curve with the maximum Tr value at 15:00 and the minimum at 17:00. Different crown breadths of *H. songaricum* Schrenk had different Tr values, but followed the same pattern. The Tr value was smaller for the smaller *H. songaricum* Schrenk plants. The Tr value of the larger *H. songaricum* Schrenk was greater than the smaller one, with an increase of 125.37%. The leaf temperature was higher than the ambient air temperature with the difference reaching a maximum of 9.58 K and a minimum of 0.71 K. The leaf temperature with treatments of large, medium and small *H. songaricum* Schrenk was 306.14, 306.58, and 308.62, respectively. The leaf temperature of the smaller *H. songaricum* Schrenk is greater than the larger plant by 2.48 K. The transpiration transfer coefficient of the different canopy plant *H. songaricum* Schrenk were different showing it was inversely proportional to its crown size, with transpiration transfer coefficient decreasing with increasing canopy. The transpiration transfer coefficient of the large, medium and small *H. songaricum* Schrenk were 0.41, 0.48, and 0.76, respectively, with the transpiration transfer coefficient of the smaller plant recording higher levels than the larger one, with an increase of 85%; There was an inverse relationship between the diurnal variation pattern of the transpiration rate and the transpiration transfer coefficient. The smaller the crown breadth of *H. songaricum* Schrenk, the worse the root area water condition was, and the harder the water stress. The highest transpiration rate was recorded as $9.42 \times 10^{-6} \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ when the plant's crown size was the largest and at 15:00, its Tr value reached a maximum of $1.42 \times 10^{-5} \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. In addition, the lowest transpiration transfer coefficient was 0.41. To summarize, this paper proved that non-invasive and contactless measurement techniques for determination of transpiration rates of *H. songaricum* Schrenk are feasible.

Key Words: three-temperature model; infrared thermal imaging technology; leaf temperature; plant transpiration; *Helianthemum songaricum* Schrenk

半日花(*Helianthemum songaricum* Schrenk)属于半日花科半日花属^[1],是第三纪古地中海孑遗植物^[2],中国二级保护植物^[3],并被列入中国生物多样性保护行动计划植物种优先保护名录。全球半日花属半日花科约 100 种,主要分布于地中海地区和南北美^[4],在我国仅一属一种,分布在新疆的准噶尔和内蒙古的西鄂尔多斯,半日花是研究亚洲中部荒漠植物的起源和迁移的重要科学资料^[5],对研究我国荒漠地区植物区系与地中海植物区系的关系具有科学价值。但近年来由于过度放牧等人为干扰,半日花种群受到较严重的破坏,天然更新困难,导致其分布面积与种群数量减少,渐趋濒危^[6]。

蒸腾作用在植物生命活动中具有重要的生理作用,研究其蒸腾速率是揭示植物对环境生态适应性机制的有效途径,植物处于干旱环境时,常以降低蒸腾速率,增加水分利用为对策,适应生态环境^[7],土壤水分可利用性及大气降水等水分可利用性的降低会使植物蒸腾作用减弱导致植物的水分利用效率增加^[8]。目前,针对半日花蒸腾速率的测定多采用 CI-

301PS 便携式光合测定仪,虽可测得蒸腾速率,但需将植物的叶片夹入叶室内持续一段时间来进行测量,若操作不当将会导致植株叶片受到损伤,对植株实际蒸腾的获取有一定的影响。

近年来邱国玉等人提出以叶表面温度、参考表面温度和气温为核心的“三温模型”估算植物蒸腾速率,该模型包括 5 个基本模型,即土壤蒸发模型、土壤蒸发扩散系数、植被蒸腾模型、植被蒸发扩散系数和作物水分亏缺系数^[9],具有参数少、计算简单、容易遥感观测等优点^[10]。热成像技术(红外热成像技术)能观测人体肉眼不可见的红外波段的光谱,将其转变为可见的热图像^[11],利用远红外热成像仪能够快速反映出植株叶片温度的微小变化,对植株无损伤,具有高通量、非接触性、高分辨率等特征,可提供良好的无损检测材料^[12]。这些方法和研究成果为实现非接触式无损的半日花蒸腾作用观测提供了可靠的手段和思路。

本试验通过对远红外热成像仪图像的分析,研究自然条件下半日花叶片温度的变化,并根据“三温

模型”得出其蒸腾速率的日变化规律,以此探究基于远红外热成像系统半日花蒸腾速率判定的可行性,探索其生长状态,为今后旱生植物蒸腾作用的测定提供借鉴。

1 材料和方法

1.1 研究地概况和样地描述

研究区位于内蒙古鄂尔多斯市鄂托克旗的西鄂尔多斯国家级自然保护区,该区为波浪状高原,属草原化荒漠地带,气候属暖温带大陆性季风气候,其大陆度达 70% 以上。年平均降水量 162.4—271.6 mm,潜在蒸发量 2470.5—3481.0 mm,年内降水分配极不均匀,7、8 月降水占全年降水的 60% 以上。具有高原寒暑剧变,昼夜温差大,气候干燥,日照时间长,太阳辐射强,风沙大等特点。半日花生长在该区起伏高差 10—15 m 的山麓碎石质丘陵坡地,地带性土壤为砾石质灰漠土。主要伴生植物种为红砂 (*Reaumuria songarica*)、绵刺 (*Potania mongolica*)、四合木 (*Tetraena mongolica*)、珍珠猪毛菜 (*Salsola passerina*)、松叶猪毛菜 (*Salsola laricifolia*) 等,种类贫乏,并伴生一定数量的强旱生多年生草本植物。半日花群落较为稀疏,不能郁闭。

1.2 试验设计和样本采集

观测试验于 2012 年 8 月 28 日的晴朗天气进

行,选择有代表性的半日花种群作为试验区,面积约为 1106.86 m²,地理坐标为 106°55′ E, 40°03′ N,海拔约为 1217.50 m,在试验区阳坡处按株高冠幅选取大中小 3 级,每级 5 株,共 15 株生长正常,密度为 0.77 株/m²,互不相邻无植物遮阴且正在开花的半日花为研究对象,对采集数据的每株半日花用直尺和盒尺进行株高冠幅的测量,3 次重复(表 1)。利用美国 FLUKE-Ti55 远红外热成像仪测定半日花的叶温信息,对每株半日花每隔 2 h 采集 3 次图像数据(2 h 后快速采集 3 组数据),对每个图像提取每株叶温时重复 15 次,以 3 组数据的均值作为该株半日花该时间点的数据。该仪器配备 320×240 焦平面阵列(FPA)探测器,红外光探测波段为 8.0—14.0 mm,选用标准红外镜头,视场为 23°×17°,热敏度为≤0.05℃,发射率设定为 0.95。为确保精度,测定时间为 9:00—17:00,植株顶端与热成像仪的距离为 1 m,采集的图像传至 PC 机后,通过热成像仪自带软件(Fluke Smart View)提取半日花叶片的平均温度。

利用 TYD-ZS2 型全自动便携式气象站同步测量气温、太阳辐射量等气象指标,然后利用“三温模型”换算蒸腾速率。最后对不同级别半日花植株的蒸腾速率日变化进行分析。测定数据采用 Microsoft Excel 和 SAS 9.0 软件进行统计分析。

表 1 试验选取半日花的生长指标统计分析

Table 1 Statistical analysis of the growth index for *Helianthemum songaricum* Schrenk in the experiment

统计数据 Statistical data	半日花(大) <i>Helianthemum songaricum</i> Schrenk (Large)			半日花(中) <i>H. songaricum</i> Schrenk (Medium)			半日花(小) <i>H. songaricum</i> Schrenk (Small)		
	株高		冠幅	株高		冠幅	株高		冠幅
	Hight / cm	Canopy/cm×cm		Hight / cm	Canopy/cm×cm		Hight / cm	Canopy/cm×cm	
均值 Mean/cm	18.96	38.48	41.42	15.44	29.72	30.76	7.54	15.90	16.18
最大值 Maximum/cm	23.30	42.20	52.20	17.30	32.80	34.20	8.70	21.60	19.70
最小值 Minimum/cm	16.20	36.30	31.70	13.70	24.60	25.80	6.10	11.50	10.30
标准偏差 Standard Deviation	3.61	2.27	7.83	1.49	3.33	3.55	1.04	3.83	4.34

植被蒸腾速率用“三温模型”计算公式^[9,10,13-14]:

$$Tr = R_n - R_{np} (T_c - T_a) / (T_p - T_a)$$

$$h_{at} = (T_c - T_a) / (T_p - T_a)$$

$$R_n = (1 - \alpha) R_s + \Delta R_1$$

$$R_{np} = (1 - \alpha) R_s + 5.675 \times 10^{-8} (0.92 \times 10^{-5} T_a^6 - 0.98 T_p^4)$$

$$\Delta R_1 = (0.4 + 0.6 R_s / R_{so}) (\varepsilon_a \sigma T_a^4 - \varepsilon_s \sigma T_c^4)$$

$$\varepsilon_a = 0.92 \times 10^{-5} T_a^2$$

式中, Tr 是蒸腾速率 (MJ m⁻² d⁻¹), R_n 和 R_{np} 是冠层和没有蒸腾的参考冠层的净辐射 (MJ m⁻² d⁻¹), T_c 是冠层温度, T_p 是没有蒸腾的参考冠层温度 (用与植物叶片颜色一致的无蒸腾纸片获得温度), T_a 是气温 (绝对温度), h_{at} 是植被蒸腾扩散系数, R_s 是太阳辐射 (J m⁻² s⁻¹), α 是地表反照率, 通过测量可得 ($\alpha =$

0.22), ΔR_1 是净长波辐射 ($\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1}$), 通常是用太阳辐射和表面温度计算, R_{so} 是晴天太阳辐射量 ($\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1}$), ε_a 是大气放射率, ε_s 是地表放射率 (植被地表放射率取 0.98), σ 是斯蒂芬-玻尔兹曼常数 ($\sigma = 5.675 \times 10^{-8} \text{J m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{K}^{-4}$)。模型中除太阳辐射量与气温外, 其他因子可由常数、固定取值等方法得出。

2 结果与分析

2.1 试验地基本环境因子的日动态变化

影响植物蒸腾速率的因素分为内因和外因两种^[15]。“三温模型”涉及的外因有太阳辐射量与气温, 因此本研究列出以上 2 因子, 并分析其测定时间内的动态变化。

试验地 2012 年 8 月 28 日太阳辐射量与气温的日变化如图 1 所示。太阳辐射量在 8:00—18:00 的变化呈现出明显的钟罩型, 从 8:00 的 $205 \text{ J m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 开始逐渐增加, 在 13:00 达到其峰值, 为 $903 \text{ J m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 随后逐渐降低。在测定时间段内的, 气温最低值出现在 8:00, 为 296.35 K, 随后逐渐增加, 在 15:00 时达到峰值, 为 305.55 K, 随后气温平稳变化, 17:00 后气温急剧下降。

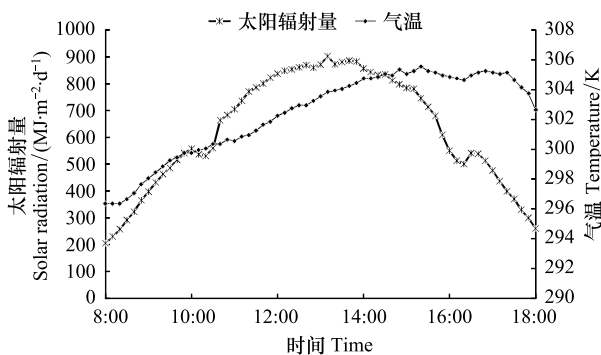
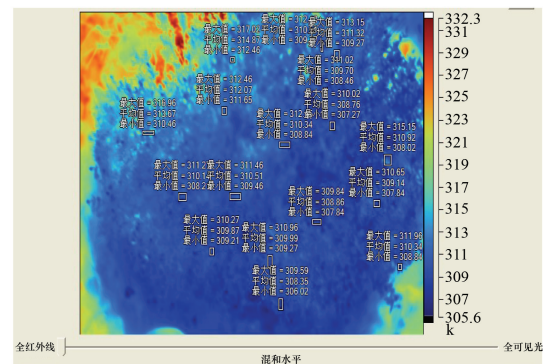


图 1 测定时间内试验地太阳辐射量与气温的日变化

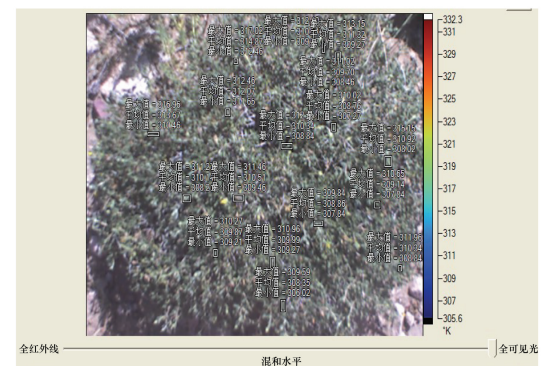
Fig.1 Diurnal variation of solar radiation and temperature in the experimental farm

2.2 半日花叶温日动态变化

利用远红外热成像图提取半日花的叶温示意图 (图 2), 其中图 2(a) 为全红外线图像, 由颜色辅助判定温度的大小, 红色区域 (地表) 温度较蓝色区域 (植物) 温度高; 图 2(b) 为全可见光下的图像, 二者对应, 加之自带软件 (Fluke Smart View), 准确判断半日花叶温的大小。通过提取不同时间不同图像半日花的叶温, 确定测定时间内半日花的叶温随时间变化的规律。



a 半日花全红外线示意图



b 半日花全可见光示意图

图 2 远红外热成像仪 FLUKE-Ti55 拍摄的半日花热成像温度提取示意图

Fig.2 Thermal images of *Helianthemum songaricum* Schrenk taken by FLUKE-Ti55

根据图 2 得出的叶温变化, 做出半日花叶温随时间的变化图 (图 3)。由图 3 可得, 在 9:00—13:00, 半日花叶温随气温的升高而升高, 不同冠幅半日花的叶温不同, 在所测冠幅的范围内, 冠幅越小, 与其对应的叶温越大, 这意味着半日花植株越小, 其叶温越高; 半日花的叶温随株高冠幅的增大而变小, 大、中、小半日花的叶温一天均值分别为 306.14, 306.58, 308.62 K, 小冠幅半日花的平均叶温比大冠幅的高 2.48 K。小冠幅半日花叶温在 13:00 即达其峰值, 而对于冠幅较大的而言, 其峰值出现在 15:00, 表现出滞后性, 与气温的峰值出现时间一致。

植株的叶温大于相应时刻的气温, 尤其在阳光直射下^[15]。图 3 所示, 气温与半日花叶温差最大可为 9.58 K, 最小为 0.71 K, 叶温日变化随气温的变化而变化, 呈单峰型。气温升高时, 叶片内外的蒸汽压增加, 水分从叶内逸出, 进而加速蒸腾^[15]。通过单因素方差分析 (ANOVA) 可以看出, 测定时间内, 不同冠幅的半日花叶温存在极显著差异 ($P < 0.0001$)。

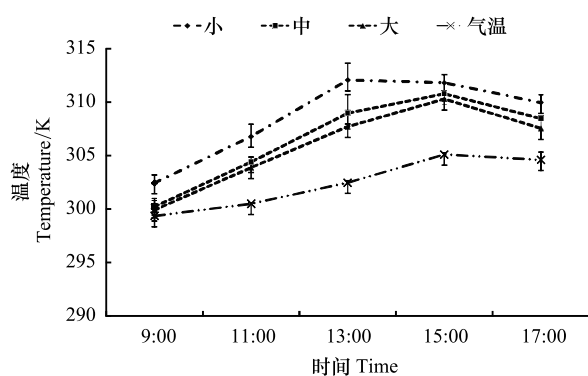


图3 不同冠幅半日花的叶温与气温的日变化

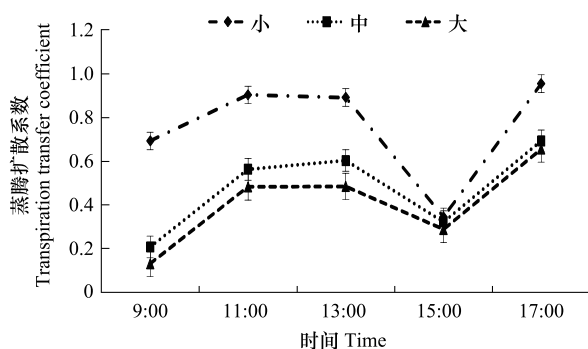
Fig.3 Diurnal variation of leaf temperature and temperature for different crown breadths *Helianthemum songaricum* Schrenk

图4 不同冠幅半日花的蒸腾扩散系数日变化

Fig.4 Diurnal variation of transpiration transfer coefficient for different crown breadths of *Helianthemum songaricum* Schrenk

2.3 半日花蒸腾扩散系数的日动态变化

蒸腾扩散系数(h_{at})是衡量植物蒸散量并评价其水分利用状况的一种模型指标,其测量简便,对不同环境均适用,且考虑了大气与冠层间的温度关系,可反映植物根系土壤水分状况,进而指示作物水分亏缺。 h_{at} 取值范围为 $h_{at} \leq 1$; h_{at} 最小值时,说明植被无水分亏缺或不受环境胁迫; h_{at} 最大值表明植被受到最大水分亏缺或环境胁迫。 h_{at} 越大,蒸腾速率越小,且在缺水条件下,植物根部区域的水分状况主要影响 h_{at} 的变化^[10]。

图4所示为半日花蒸腾扩散系数的日变化。测定时间内,不同级别半日花 h_{at} 的变化规律相似,均出现两次低谷,分别为9:00和15:00,说明半日花在此时内所受的水分胁迫较小;在17:00达到测定时间段内最大值,即此时所受环境胁迫最大。测定时间内,大、中、小半日花的 h_{at} 均值依次为:0.41, 0.48, 0.76, 蒸腾扩散系数随冠幅增加而降低。植株越小,对应的 h_{at} 越大,其中小冠幅的半日花比大冠幅的高

了0.35,增幅为85%。通过单因素方差分析(ANOVA)可以看出,测定时间内,不同冠幅的半日花蒸腾扩散系数存在极显著差异($P < 0.0001$)。

2.4 半日花蒸腾速率的日动态变化

半日花蒸腾速率(T_r)日变化进程曲线如图5所示。可以看出,不同级别半日花一天中蒸腾速率的变化均呈单峰型,从早晨开始逐渐增加,直至在下午15:00达到一天中的最大值,为 $1.42 \times 10^{-5} \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (大冠幅半日花),随后蒸腾速率迅速降低,傍晚降到测定时间段内的最低值。

3种不同大小半日花的蒸腾速率也不相同,半日花植株越小,其 T_r 值也越小。其中大冠幅的半日花蒸腾速率最大,均值比小冠幅的高 $5.24 \times 10^{-6} \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$,增幅为125.37%。通过单因素方差分析(ANOVA)可以看出,测定时间内,不同冠幅的半日花蒸腾速率存在极显著差异($P < 0.0001$)。

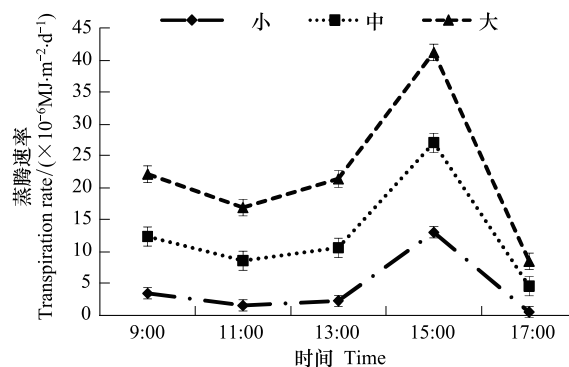


图5 不同冠幅半日花的蒸腾速率日变化

Fig.5 Diurnal variation of transpiration rate for different crown breadths *Helianthemum songaricum* Schrenk

3 讨论

本文运用远红外热成像技术研究了自然条件下阳坡半日花的蒸腾速率及其相关因子的日动态变化。

传统测定植物蒸腾的仪器常为CI-301 PS等光合测定仪,可在测得蒸腾速率的同时测定其他气体交换参数,但需将植物的叶片夹入叶室内持续一段时间来进行测量,对于干旱荒漠地区植物而言,其叶片较小,对叶室及研究人员的操作要求较高,若操作不当将会导致植株叶片受到损伤,对植株实际蒸腾的测定有一定影响。本试验利用的远红外热成像技术则可在不接触植株的前提下,获取植物叶温,并运

用“三温模型”对其蒸腾速率进行准确分析。“三温模型”的相关研究在国际上发表多篇论文,得到广泛认可,为实现非接触无损伤的半日花生长状况的可靠观测提供了新思路。

植株的年龄与冠幅有较好的相关关系,而且植株的冠幅对于繁殖影响极大,因此本文用冠幅作为指标反映半日花种群的大小结构^[16]。不同冠幅半日花的叶温、蒸腾速率、蒸腾扩散系数也不同。小冠幅的半日花植株叶温较高,蒸腾速率较低,相应的蒸腾扩散系数较高,这可能是由于其根系尚不发达,对干旱环境适应性不强,因此供给根系的水分不充足,使其蒸腾速率减弱,进而叶温较高。不同级别大小半日花通过调节其蒸腾速率降低高温缺水等恶劣环境对植株造成的伤害,环境条件作用于不同冠幅半日花蒸腾速率改变的机理还需深入研究。

邱国玉等人研究表明,在灌水 3d 后,甜瓜的蒸腾扩散系数 h_{at} 由 -0.2 升至 0.8,番茄的 h_{at} 为 -0.4 升至 0.6,说明 h_{at} 随水分亏缺而上升,当植被受到最大水分亏缺或环境胁迫时,蒸腾扩散系数最大^[10]。本试验中得到的不同冠幅半日花的蒸腾扩散系数不同,小冠幅半日花的 h_{at} 高于大冠幅的,且在测得的数据中, h_{at} 最大值出现在小半日花的 17:00 时,达 0.95,说明此时小冠幅半日花的水分亏缺最严重。植物冠幅与其年龄有较好相关性,半日花的冠幅越小,其年龄也愈小,蒸腾扩散系数却愈大,表明半日花年龄越小,抵御外界胁迫环境的能力越低。测得数据中 h_{at} 最小值出现在 9:00 大冠幅半日花处,仅为 0.13,这表明此时半日花的年龄越大,其根部区域的水分状况越好,受水分胁迫越小。

同一冠幅半日花的叶温随气温的变化而变化,气温越高,叶温也越高,在 15:00 叶温达测定时间内的最高值。有研究表明,蒸腾作用不但能够促进植物体对矿质元素的吸收和传导,使溶于水的盐类迅速地输送到植物体的各个部位,同时也能够降低叶片的温度^[17]。蒸腾强度的改变通常会改变叶片表面热量损失程度的大小,继而反应在叶温的改变上^[18]。15:00 时蒸腾速率达到一天中的最大,蒸腾扩散系数降低到测定时间段内的第二低谷值,说明此时叶温较高,植物通过加快自身的蒸腾速率,使其不断从根部土壤吸取水分以尽量降低植株所受的水分亏缺。

本试验中,使用远红外热成像仪测得的蒸腾速率日变化呈“单峰型”,峰值出现在 15:00 时,这与目前对半日花蒸腾速率的研究仅有的谭会娟等人用 CI-301PS 便携式光合测定仪研究半日花光合作用日变化时提出的蒸腾速率的变化趋势一致^[19]。研究学者大多利用远红外热成像仪对植物进行温度的采集,尚未与其蒸腾速率建立数量联系,故有关这方面的文献较少。

4 结论

本文利用远红外热成像技术,对不同冠幅半日花蒸腾速率的日变化进行测定,结果表明:

(1)测定时间内半日花的冠幅与其蒸腾速率成正比:冠幅越大,蒸腾速率越大。半日花的冠幅为 38.48 cm×41.42 cm 时,测定时间内的蒸腾速率均值最高,为 $9.42 \times 10^{-6} \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 15:00 达最大值,为 $1.42 \times 10^{-5} \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 。通过单因素方差分析 (ANOVA) 可以看出,测定时间内,不同冠幅的半日花蒸腾速率存在极显著差异 ($P < 0.0001$);半日花的蒸腾速率日变化呈单峰型,峰值出现在 15:00。

(2)不同冠幅的半日花的叶温不同,叶温与冠幅呈反比。半日花的叶温随气温的变化而变化,气温越高,叶温也相应升高。冠幅小的半日花在 11:00 即达其峰值,而对于大冠幅的半日花而言,其峰值出现在 15:00,与气温的峰值出现时间一致。通过单因素方差分析 (ANOVA) 发现,测定时间内,不同冠幅的半日花叶温存在极显著差异 ($P < 0.0001$)。

(3)不同冠幅半日花的蒸腾扩散系数不同,蒸腾扩散系数与冠幅呈反比。通过单因素方差分析 (ANOVA) 可以看出,不同冠幅的半日花蒸腾扩散系数存在极显著差异 ($P < 0.0001$);半日花的蒸腾扩散系数的日变化规律与蒸腾速率相反。半日花植株越小,其根部区域的水分状况越差,所受水分胁迫越大。

本研究证明无损伤非接触式半日花蒸腾速率测定技术是可行的。

致谢:本文数据采集得到西鄂尔多斯国家级自然保护区局区管理人员的支持,特此致谢。

References:

- [1] Flora of China Editorial Committee, Chinese Academy of Sciences.

- Flora Reipublicae Popularis Sinicae (Tomus 50(2)). Beijing: Science Press, 1990: 178-178.
- [2] Li Q H, Gao T T, Liu J F, Xin Z M, Xu J. The age structure and life table of rare eremophyte *Helianthemum ordosicum* population. Bulletin of Botanical Research, 2009, 29(2): 176-181.
- [3] Yang A L. National key protected wild plants list (Agricultural Part) through the expert argumentation. Pratacultural Science, 1996, 13(4): 68-72.
- [4] Hou K Z. A Dictionary of the Families and Genera of Chinese Seed Plants. 2nd ed. Beijing: Science Press, 1982: 225-225.
- [5] Zhao Y Z, Cao R, Zhu Z Y. A new species of *Helianthemum* Mill. (Cistaceae). Acta Phytotaxonomica Sinica, 2000, 38(3): 294-296.
- [6] Li X R. A study of climatic suitable ecotopes for introduction of Chinese rare desertific shrub *Helinthemum soongoricum*. Chinese Journal of Ecology, 1998, 17(2): 16-19.
- [7] Gao L, Yang J, Liu L X. Effects of soil moisture levels on photosynthesis, transpiration, and moisture use efficiency of female and male plants of *Hippophae rhamnoides* ssp. Sinensis. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(11): 6025-6034.
- [8] Cao S K, Feng Q, Si J H, Chang Z Q, Zhuo M C, Xi H Y, Su Y H. Summary on the plant water use efficiency at leaf level. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(7): 3883-3892.
- [9] Qiu G Y, Sase S, Shi P J, Ding G D. Theoretical analysis and experimental verification of a remotely measurable plant transpiration transfer coefficient. Japan Agricultural Research Quarterly. 2003, 37(3): 141-149.
- [10] Qiu G Y, Wu X, Wang S, Song X F. Three Temperature (3T) Model—A method to estimate evapo-transpiration and evaluate environmental quality based on surface temperature. IV. Plant transpiration transfer coefficient. Journal of Plant Ecology, 2006, 30(5): 852-860.
- [11] Leinonen I, Jones H G. Combining thermal and visible imagery for estimating canopy temperature and identifying plant stress. Journal of Experimental Botany, 2004, 55(401): 1423-1431.
- [12] Wang B, Cui R X, Wang Y F. Identification of peanut drought-tolerance at seedling stage using infrared thermography. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2011, 33(6): 632-636.
- [13] Xiong Y J, Qiu G Y. Estimation of evapotranspiration using remotely sensed land surface temperature and the revised three-temperature model. International Journal of Remote Sensing, 2011, 32(20): 5853-5874.
- [14] Xiong Y J, Qiu G Y, Chen X H, Zhao S H, Tian F. Estimation of evapotranspiration using three-temperature model based on MODIS data. Journal of Remote Sensing, 2012, 16(5): 969-976.
- [15] Li H S. Modern Plant Physiology. 2nd ed. Beijing: China Higher Education Press, 2006: 55-63.
- [16] Qing H, Yang J, Zhang P J, Chen Y, Zhang L, Zhao L Q, Song B Y. Ecological adaptability of *Helianthemum songaricum* roots in west Ordos. Arid Zone Research, 2011, 28(5): 832-838.
- [17] Liu Y, Ding J Q, Su B Q D, Liao D Q, Zhao J R, Li J S. Identification of maize drought-tolerance at seedling stage based on leaf temperature using infrared Thermography. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(6): 2192-2201.
- [18] Lourtie E, Bonnet M, Bosschaert L. New glyphosate screening technique by infrared thermometry // Fourth International Symposium on Adjuvants for Agrochemicals. Australia, 1995: 297-302.
- [19] Tan H J, Zhou H Y, Li X R, Zhang Z S. Primary studies on daily photosynthetic changes of rare and endangered plant *Helianthemum soongoricum*. Journal of Desert Research, 2005, 25(2): 262-267.

参考文献:

- [1] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志(50(2)). 北京: 科学出版社, 1990: 178-178.
- [2] 李清河, 高婷婷, 刘建锋, 辛智鸣, 徐军. 荒漠珍稀灌木半日花种群的年龄结构与生命表分析. 植物研究, 2009, 29(2): 176-181.
- [3] 杨爱莲. 国家重点保护野生植物名录(农业部分)通过专家论证. 草业科学, 1996, 13(4): 68-72.
- [4] 侯宽昭. 中国种子植物科属词典(修订版). 北京: 科学出版社, 1982: 225-225.
- [5] 赵一之, 曹瑞, 朱宗元. 半日花属一新种. 植物分类学报, 2000, 38(3): 294-296.
- [6] 李新荣. 我国珍稀荒漠灌木半日花的适宜气候生态引种区的研究. 生态学杂志, 1998, 17(2): 16-19.
- [7] 高丽, 杨劼, 刘瑞香. 不同土壤水分条件下中国沙棘雌雄株光合作用、蒸腾作用及水分利用效率特征. 生态学报, 2009, 29(11): 6025-6034.
- [8] 曹生奎, 冯起, 司建华, 常宗强, 卓玛措, 席海洋, 苏永红. 植物叶片水分利用效率研究综述. 生态学报, 2009, 29(7): 3883-3892.
- [10] 邱国玉, 吴晓, 王帅, 宋献方. 三温模型——基于表面温度测算蒸散和评价环境质量的方法IV. 植被蒸腾扩散系数. 植物生态学报, 2006, 30(5): 852-860.
- [12] 王冰, 崔日鲜, 王月福. 基于远红外成像技术的花生苗期抗旱性鉴定. 中国油料作物学报, 2011, 33(6): 632-636.
- [15] 李合生. 现代植物生理学(第二版). 北京: 高等教育出版社, 2006: 55-63.
- [16] 清华, 杨劼, 张璞进, 陈育, 张雷, 赵利清, 宋炳煜. 半日花(*Helianthemum songaricum*)根系生态适应特征. 干旱区研究, 2011, 28(5): 832-838.
- [17] 刘亚, 丁俊强, 苏巴钱德, 廖登群, 赵久然, 李建生. 基于远红外热成像的叶温变化与玉米苗期耐旱性的研究. 中国农业科学, 2009, 42(6): 2192-2201.
- [19] 谭会娟, 周海燕, 李新荣, 张志山. 珍稀濒危植物半日花光合作用日动态变化的初步研究. 中国沙漠, 2005, 25(2): 262-267.