

# 采煤沉陷区生态修复树种蒸腾特征及能量收支

徐立杰<sup>1</sup>, 党晓宏<sup>1,2</sup>, 高永<sup>1,3</sup>, 冯亚亚<sup>1</sup>, 李传福<sup>1</sup>

(1.内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 内蒙古 呼和浩特 010018; 2.内蒙古杭锦荒漠生态系统国家定位观测研究站, 内蒙古 鄂尔多斯 017400; 3.中央与地方共建风沙物理重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010018)

**摘要:** [目的] 在改进蒸腾观测方法的基础上,对采煤沉陷区常见生态修复树种蒸腾特征及能量收支状况进行研究,为矿区生态修复工作中树种的选择和水分调控提供理论依据。[方法] 选择采用“三温模型”+热红外遥感的方法在野外环境应用时的参考叶片类型,并对沙柳(*Salix psammophila*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、柠条(*Caragana korshinskii*)3种植物的蒸腾特征进行测定,分析其蒸腾特征和蒸腾过程中的能量收支状况。[结果] ①绿色卡纸可以在9:00—15:00时代替烘干植物叶片作为植物蒸腾测定时的参考叶片。②沙柳、沙棘、柠条的蒸腾速率日变化规律均为单峰曲线,最高瞬时蒸腾速率分别为0.57, 0.61和0.71 mm/h,日蒸腾量分别为3.24, 3.27和3.80 mm。③沙柳的 $h_{st}$ 值(植物蒸腾扩散系数,用于评价植物水分亏缺状况)日变化规律为“单峰型”,柠条和沙棘则为“双峰型”, $h_{st}$ 日均值从大到小依次为:沙柳(0.18)>沙棘(0.11)>柠条(0.03)。④沙柳、柠条的显热通量( $H$ )在15:00时小于0。[结论] 沙柳、沙棘、柠条均可以通过冷岛效应向周围环境吸热用于蒸腾作用,降低环境温度。沙柳适合栽植于地势平坦,水分较为充足的地区。沙棘和柠条可以通过飞播的方式在人力难以到达和水分状况较差的地区进行生态修复。

**关键词:** 参考叶片; 三温模型; 热红外技术; 蒸腾速率; 能量收支

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)06-0113-06

中图分类号: S718.51

**文献参数:** 徐立杰, 党晓宏, 高永, 等.采煤沉陷区生态修复树种蒸腾特征及能量收支[J].水土保持通报, 2021,41(6):113-118.DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2021.06.016; Xu Lijie, Dang Xiaohong, Gao Yong, et al. Transpiration characteristics and energy budget of ecological restoration tree species in coal mining subsidence area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021,41(6):113-118.

## Transpiration Characteristics and Energy Budget of Ecological Restoration Tree Species in Coal Mining Subsidence Area

Xu Lijie<sup>1</sup>, Dang Xiaohong<sup>1,2</sup>, Gao Yong<sup>1,3</sup>, Feng Yaya<sup>1</sup>, Li Chuanfu<sup>1</sup>

(1.College of Desert Science and Engineering, Inner Mongolia Agriculture University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China; 2. Inner Mongolia Hangjin Desert Ecological Position Research Station, Erdos, Inner Mongolia 017400, China; 3.Wind Erosion Key Laboratory of Central and Local Government, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China)

**Abstract:** [Objective] Based on the improved transpiration observation method, the transpiration characteristics and energy budget of common ecological restoration tree species in coal mining subsidence areas were studied in order to provide a theoretical basis for the selection of tree species and water regulation in ecological restoration in mining areas. [Methods] The reference leaf type was selected, and transpiration of *Salix psammophila*, *Hippophae rhamnoides* and *Caragana korshinskii* were determined by “three-temperature model” + thermal infrared remote sensing method in the field environment. The transpiration characteristics and the energy budget during the transpiration process were analyzed. [Results] ① Green cardboard could replace dried plant leaves at 9:00—15:00 as a reference leaf for plant transpiration determination. ② The diurnal changes of transpiration rate of *Salix psammophila*, *Hippophae rhamnoides*, and *Caragana korshinskii* were all single-peak curves. The highest instantaneous transpiration rate were 0.57, 0.61, 0.71 mm/h,

收稿日期:2021-05-28

修回日期:2021-06-10

资助项目:内蒙古自治区科技重大专项“重点区域荒漠化过程与生态修复研究示范”(zdzx2018058);中央引导地方科技发展专项资金:内蒙古荒漠化防治创新研究中心

第一作者:徐立杰(1996—),男(汉族),内蒙古自治区阿拉善盟人,硕士研究生,研究方向为荒漠化防治。Email:xlj152922@163.com。

通讯作者:高永(1962—),男(汉族),内蒙古自治区包头市人,教授,博士生导师,主要从事荒漠化防治研究。Email:13948815709@163.com。

respectively. And the daily transpiration rate was 3.24, 3.27, 3.80 mm, respectively. ③ The daily variation of the  $\Delta T$  (which meant plant transpiration diffusion coefficient, used to evaluate plant water deficit status) value of *Hippophae rhamnoides* was “single-peak type”, while that of *Caragana korshinskii* and *Salix psammophila* was a “double-peak type”. The daily average value of transpiration diffusion coefficient was in descending order: *Salix psammophila* (0.18) > *Hippophae rhamnoides* (0.11) > *Caragana korshinskii* (0.03). ④ The sensible heat flux ( $H$ ) of *Salix psammophila*, and *Caragana korshinskii* were less than 0 at 15:00. [Conclusion] *Salix psammophila*, *Hippophae rhamnoides* and *Caragana korshinskii* can all absorb heat from the surrounding environment through the cold island effect for transpiration and reduce the environmental temperature. *Salix psammophila* is suitable for planting in areas with flat terrain and abundant water. *Hippophae rhamnoides* and *Caragana korshinskii* can be used for ecological restoration by aerial seeding in areas hard to reach by humans and with water deficit.

**Keywords:** reference leaf; three-temperature model; thermal infrared remote sensing; transpiration rate; energy balance

柠条 (*Caragana korshinskii*)、沙柳 (*Salix psammophila*)、沙棘 (*Hippophae rhamnoides*) 是半干旱地区主要的乡土树种,因其具备良好的防风固沙能力,同时也具有较高的经济价值,因此成为该地区主要的生态修复树种,研究其蒸腾耗水量及树种对环境的改善能力对于半干旱区水分调控及生态修复具有重要意义。目前对于 3 种植物的蒸腾特征的研究已有较多研究<sup>[1-2]</sup>。植物蒸腾是干旱、半干旱地区水分散失的主要途径,但常见的测量单株植物蒸腾的方法在测定沉陷区植物蒸腾速率时具有一定的局限性,称重法和光合仪容易对植物叶片造成损伤,影响植物正常生长;茎流计测得的茎流量不完全等于蒸腾耗水量;蒸渗仪测定结果最准确但昂贵的价格和笨重的体型导致其难以在野外中应用<sup>[3]</sup>。探索一种能够在野外条件下测定植株实际蒸腾耗水的方法对研究荒漠地区植物蒸腾具有重要意义。“三温模型”是邱国玉等人提出的测算蒸散发的方法,由于该模型的核心参数是植被表面温度、参考表面温度和气温,故被称为“三温模型”,具有参数少、计算简单、应用范围广、结果精准等特点<sup>[4-6]</sup>,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<sup>[7]</sup>,具有高通量性、非接触性、高分辨等特征<sup>[8]</sup>。本试验以毛乌素沙地采煤沉陷区常见生态修复树种为研究对象,探究热红外遥感+“三温模型”的方法在半干旱地区应用过程中,适合采煤沉陷区植物蒸腾测量的参考叶片,并确定 3 种主要树种的蒸腾特征以及在蒸腾过程中能量收支情况,为沙区植被恢复提供理论依据和技术支持。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区鄂尔多斯市伊金霍洛

旗(38°50′—39°50′N, 109°30′—110°30′E)。该区域为典型的大陆性季风气候,多年平均气温 7.3 °C,全年温差巨大,风沙天气频发,年均降水量 362 mm,年均潜在蒸发量 2 297.4~2 838.7 mm。土壤主要以风沙土为主,有机质含量低,氮、磷、钾元素十分缺乏。该区域由于采矿活动导致野生植物退化严重,植被以柠条、沙柳、沙棘等人工植被为主,零星生长有油蒿 (*Artemisia desertorum*) 和沙米 (*Agriophyllum pungens*) 等灌草。

### 1.2 试验设计

1.2.1 研究对象选择 本试验在 2019 年 9 月 25 日(晴朗无云的天气)进行,选择毛乌素沙地东北缘采煤沉陷区生态恢复示范区作为试验区,面积约为 1 762.85 m<sup>2</sup>,海拔 1 228 m。依据树冠不受遮蔽原则,在试验区内选择 7 株不受其他植株遮蔽,生长健康的柠条作为试验对象,用于参考叶片的筛选。同时在该区域选择株高冠幅相似的柠条(高 120 cm 左右)、沙棘(高 110 cm 左右)、沙柳(高 250 cm 左右)各三株作为试验对象,用于植物蒸腾特征的研究(参考叶片为绿色卡纸),沙柳为人工种植,沙棘和柠条为飞播种植。

1.2.2 参考叶片布设 卡纸和便签纸是研究区容易获得的绿色纸张,因此使用上述两种纸张和烘干植物叶片(校本部烘干带至研究区)作为参考叶片,两种纸张均购买于当地文具品店。将两种纸张裁剪为长约 5 cm,宽约 2 cm 的矩形参考叶片。将参考叶片布设于无蒸腾冠层上方,参考叶片布设的倾斜角度、方位参数尽量和同时观测的植物叶片保持一致,为保证参考叶片和植物叶片受到相同的温度和光照,拍摄前半小时将参考叶片布设于试验样地。

1.2.3 表面温度拍摄及提取 使用 Fluke TiR4 FT 热成像仪获取植物叶片及各参考叶片的温度,该仪器配备 320×240 焦平面阵列(FPA)探测器,选用标准红外镜头,视场为 23°×17°,热敏度为 ≤0.05 °C,发射

率设定为 0.95。测量时段为 9:00—17:00,步长 2 h,相邻的两次拍摄顺序相反<sup>[9]</sup>,镜头垂直于冠层且冠层顶端距镜头 1 m 以上<sup>[10]</sup>。将拍摄的图像导入电脑端,在 FLUKE 中国官网下载 Fluke Smart View 4.3 软件对图像中冠层范围进行识别,并对其冠层温度进行提取(温度单位修改为摄氏度),重复提取 15 次,以 15 次的均值作为该时刻柠条灌丛的叶温。

1.2.4 气象因子测定 使用 Vaisala WXT520 移动气象站同步测定研究区气温、太阳辐射、空气湿度、风速等气象因素,气象数据 10 min 的平均值由 CR200X 数据采集器计算和记录。

1.2.5 基于“三温模型”的植物蒸腾计算 当地表被植被覆盖时,可以忽略土壤热通量,植被表面的能量平衡方程可以表示为:

$$LE_c = R_{n,c} - H_c \quad (1)$$

式中:  $LE_c$  为植被的潜热通量( $W/m^2$ ),即植物蒸腾;  $R_{n,c}$  是植被吸收的太阳净辐射( $W/m^2$ );  $H_c$  是显热通量( $W/m^2$ )。  $H_c$  可表示为

$$H_c = \rho C_p (T_c - T_a) / r_a \quad (2)$$

式中:  $\rho$  是空气密度,为  $1.39 \text{ kg/m}^3$ ;  $C_p$  是空气定压比热(在平均空气状况下,其值约为  $1.013 \times 10^{-3} \text{ MJ/(kg} \cdot \text{K)}$ );  $T_c$  植被冠层温度;  $T_a$  是空气温度,单位均为 K;  $r_a$  是空气动力学阻抗( $s/m$ )。其值可通过参考叶片计算,参考叶片无蒸腾作用,且不会导致周围环境发生显著改变, $r_a$  计算公式为:

$$r_a = \rho C_p (T_{c,p} - T_a) / R_{n,cp} \quad (3)$$

式中:  $T_{c,p}$  是参考植被的冠层温度(K);  $R_{n,cp}$  是参考植被吸收的净辐射( $W/m^2$ )。

结合上述公式即可得到植被蒸腾的计算公式:

$$LE_c = R_{n,c} - R_{n,cp} [(T_c - T_a) / (T_{c,p} - T_a)] \quad (4)$$

式中:  $(T_c - T_a) / (T_{c,p} - T_a)$  即为植物蒸腾扩散系数( $h_{at}$ ),可用于反映植物水分状况。

净辐射可用以下公式推算:

$$R_n = (1 - \alpha) R_s + \Delta R_1 \quad (5)$$

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

$$\Delta R_1 = (0.4 + 0.6 R_s / R_{s0}) (\epsilon_a \sigma T_a^4 - \epsilon_s \sigma T_c^4) \quad (7)$$

$$\epsilon_a = 0.92 \times 10^{-5} T_a^2 \quad (8)$$

式中:  $R_n$  太阳辐射( $W/m^2$ );  $R_s$  是太阳辐射( $W/m^2$ );  $\alpha$  是地表反照率,(本试验中, $\alpha$  取值为 0.22);  $\Delta R_1$  是净长波辐射( $W/m^2$ );  $R_{s0}$  是晴天太阳辐射量( $W/m^2$ ),本研究在晴朗无云的典型晴天进行,因此认为  $R_{s0}$  与  $R_s$  相等;  $\epsilon_a$  是大气发射率;  $\epsilon_s$  是地表放射率(植被地表放射率取 0.98);  $\sigma$  是斯蒂芬—玻尔兹曼常数 [ $\sigma = 5.675 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ]。

## 2 结果与分析

### 2.1 研究区气象因子日变化

在“三温模型”中,气温和太阳辐射是测量植物蒸腾速率的关键因子。由图 1 可知,气温和太阳辐射均呈现先增加后减小的趋势;气温日变化类似“钟罩”形,波动范围较小,早上 9:00 气温最低,13:00 时气温有最大值  $23.63 \text{ }^\circ\text{C}$ ;太阳辐射在 13:00 时达到峰值  $741.07 \text{ W/m}^2$ ,13:00 后太阳辐射变化幅度加快近于线性变化,17:00 达到最小值  $123.16 \text{ W/m}^2$ 。风速日变化同气温及太阳辐射日变化规律一致,13:00 时风速最大为  $2.61 \text{ m/s}$ ,17:00 时风速最小为  $0.81 \text{ m/s}$ ;空气湿度日变化趋势同气温及太阳辐射相反,9:00 时太阳辐射和气温较低,空气中水分较多,湿度最高,为 39.21%。随着气温和太阳辐射的上升,空气中的水分蒸发,空气湿度开始降低,在 13:00 处达到最低值 22.94%,13:00—15:00 间,相对湿度和气温变化幅度一致,15:00 后湿度上升幅度加快,在 17:00 时湿度达到测定时间内第二峰值 30.49%。

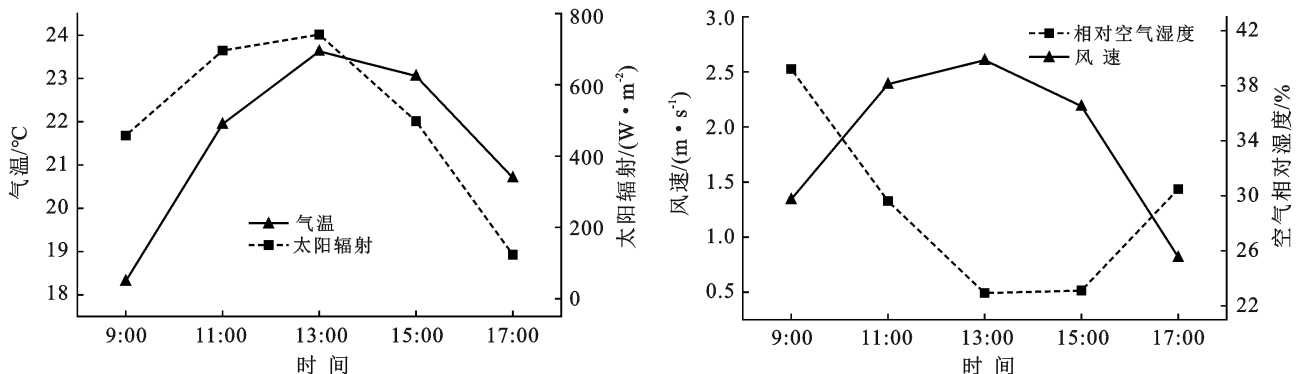


图 1 研究区气象因子日变化

## 2.2 参考叶片的筛选

由图 2 可知,各参考叶片温度日变化为“单峰型”,且均在 13:00 时达到峰值,但便签纸温度在太阳辐射较高时远低于其他两种参考叶片,与植物叶片温度的差值较小,卡纸与干叶片温度变化在 15:00 之前有较高的拟合度,但是 15:00 以后随着太阳辐射的降低速度加快,卡纸与干叶片间的温差开始变大,17:00 时各叶片温度大小关系为:干叶片 > 植物叶片 > 便签纸 ≈ 卡纸。经计算,当便签纸作为参考叶片时,柠条在 9:00 时的瞬时蒸腾速率为 4.95 mm/h,远大于其余两种参考叶片同时刻的植物瞬时蒸腾速率,由图 3 可知,当以卡纸为参考叶片时,其计算结果与干叶片作为参考叶片的计算结果在 9:00—15:00 时有较高的吻合度,在 13:00 时达到最大值 0.71 mm/h,在 17:00 时二者吻合程度较低。综上所述,以表面温度和计算结果作为选择参考叶片的指标发现绿色便签纸不适合作为采煤沉陷区柠条的参考叶片,绿色卡纸可以在 9:00—15:00 间替代干叶片作为植物蒸腾测量的参考叶片。

## 2.3 三种植物蒸腾特征

2.3.1 三种植物蒸腾速日变化规律及日蒸腾量 图 4 是 3 种植物 11:00—15:00 间瞬时蒸腾速率日内变化规律,3 种植物蒸腾速率日内变化趋势均为“单峰型”,沙棘蒸腾速率在 11:00 时达到峰值 0.61 mm/h,日蒸腾量为 3.27 mm,柠条和沙柳瞬时蒸腾速率则在 15:00 时达到最大值,最大值分别为 0.71 和 0.57 mm/h。日

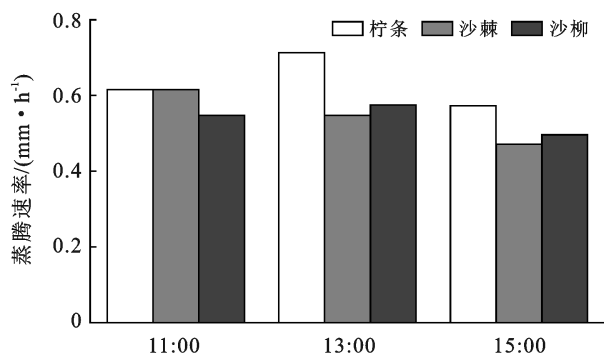


图 4 3 种植物瞬时蒸腾速率变化规律及日蒸腾量

2.3.2 三种植物蒸腾扩散系数变化规律 植被蒸腾扩散系数( $h_{at}$ )是衡量植被蒸散量并评价其水分利用状况的一种模型指标,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  $h_{at} \leq 1$ ,  $h_{at}$  越小,说明植被无水分亏缺或不受环境胁迫;  $h_{at}$  越大则表明植被受到最大水分亏缺或环境胁迫。由图 5 可知,3 种植物的  $h_{at}$  最大值在 0.20 左右,说明植

蒸腾量则为柠条 3.80 mm,沙柳 3.24 mm。和柠条相比,沙柳和沙棘蒸腾速率变化较为平缓,柠条在太阳辐射和温度高时蒸腾水平高于其他两种植物。

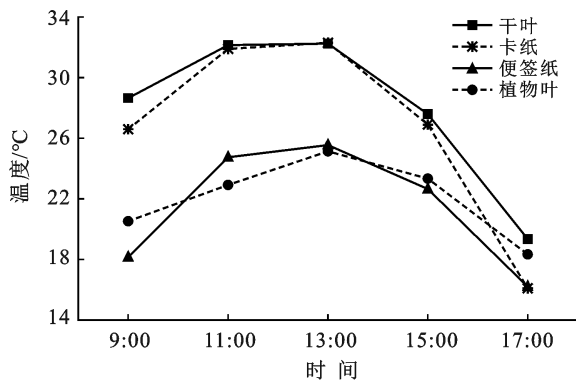


图 2 各参考叶片温度日变化

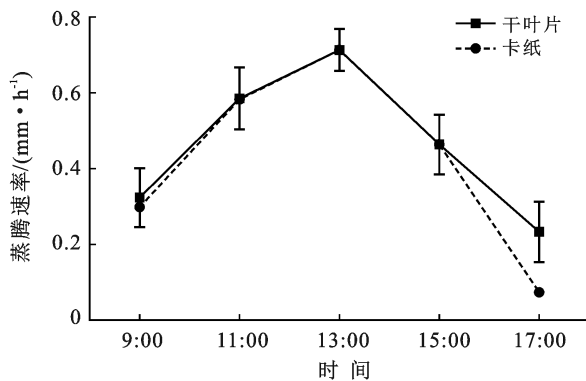
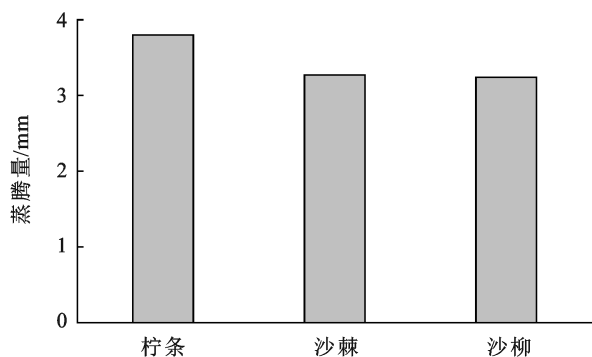
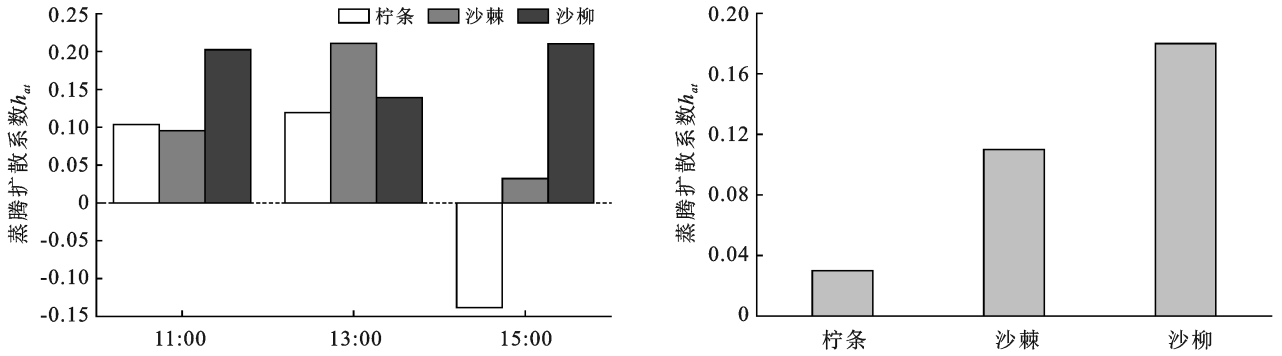


图 3 柠条蒸腾速率日变化



物在测量时间内受到的水分胁迫程度轻微,主要原因是在测量前研究区经历了两天的降雨过程,土壤水分较为充足。其中,柠条和沙柳的  $h_{at}$  值日变化规律为“单峰型”,沙柳则为“双峰型”。3 种植物的  $h_{at}$  日均值从大到小依次为:沙柳(0.18) > 沙棘(0.11) > 柠条(0.03)。说明柠条抵抗胁迫的能力最强,沙柳抵抗胁迫的能力最差。

图5 植物蒸腾扩散系数( $h_a$ )变化规律及日均值

## 2.4 常见荒漠植物能量收支特征

地表能量收支是一种陆面过程,包括太阳能和地球内能在地表物质之间的传递输送以及存在形式的转变等。在本研究中能量收支指的是针对植物的能量收支情况,净辐射通量( $R_n$ )是指地表净得的短波辐射和长波辐射的和,是地表能量、动量、水分输送与交换过程中的主要能源。对于植物的蒸腾耗能需求具有重要意义。本研究中净辐射依据太阳辐射计算得到。显热通量( $H$ )是物体或热系统之间的热量交换,不会发生相变,唯一改变的是温度。单位时间内,大气与地表间沿铅直向通过单位面积流过的热量即

为显热通量,又称感热通量。对于本研究,显热通量指的是植株向周围环境释放的能量,正值为朝空气中释放热量,负值为吸收空气中热量。本研究显热通量通过能量平衡公式反推得到。由图6可知,柠条净辐射通量在13:00时最高,为463.62 W/m<sup>2</sup>;沙棘的净辐射通量在11:00,13:00时较高,在456~460 W/m<sup>2</sup>之间,沙柳的净辐射通量则在11:00最高,为450.24 W/m<sup>2</sup>。柠条和沙柳的显热通量存在小于0的情况,说明该时刻净辐射通量无法满足植物蒸腾的需要,植物开始从空气中吸收能量来保证蒸腾的正常进行,柠条从外界吸收的热量高于其他两种植物。

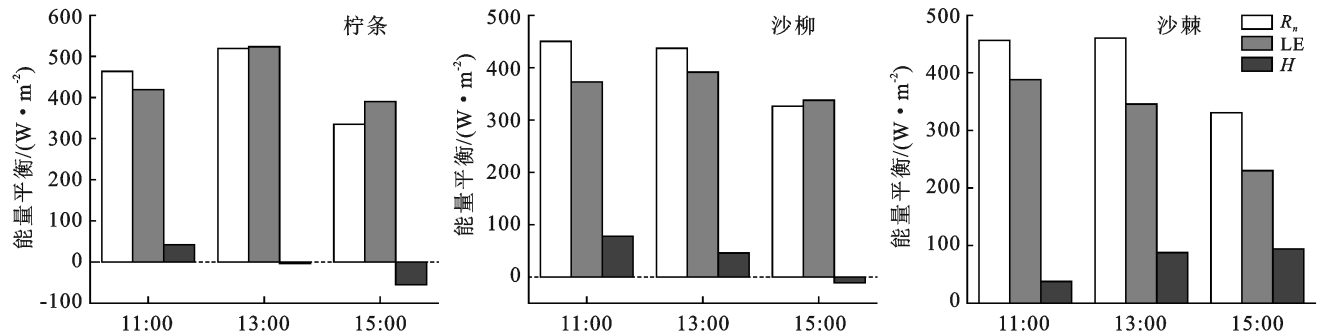


图6 3种植物能量收支状况

## 3 讨论

不同地区的植物叶片在长期进化的过程中形成了不同的结构来适应当地环境,因此在选择参考叶片时应该因地制宜,选择适合该地区植物的参考叶片。在选取参考叶片时应同时考虑获取的简单性和结果的准确性两大特点,本着获取简单的原则,选择绿色卡纸和便签纸作为参考叶片进行植物蒸腾的计算,但和柠条叶片相比,便签纸厚度较薄,卡纸的厚度和柠条叶片类似。由于参考叶片不具备蒸腾降温作用,其温度变化主要受太阳辐射的影响,当辐射强度较高时,其温度远高于植物叶片。不同厚度的参考叶吸收太阳辐射的能力不同,便签纸温度在正午时分仅略高

于叶片温度,和卡纸和干叶片温度相差极大,这一结果和 Qiu、凌军等人<sup>[11-12]</sup>测得的在强太阳辐射下干叶温度高于植物叶的情况不符。而卡纸叶片与干叶片温度在太阳辐射较高时温度变化极为吻合,随着太阳辐射的减小吻合度略有降低但计算结果不存在显著性差异,结合 Zhou 等人<sup>[13]</sup>发现的三温模型在9:00—16:00时具有较高的精确度的研究结果,说明当太阳辐射强度较高时卡纸可以替代干叶片进行荒漠地区植物蒸腾速率的计算。

植物在绿化环境的同时也可以降低环境温度。苏从先的研究表明,西北干旱荒漠地区的植物相较于周围环境是一个冷源,形成冷岛效应<sup>[14]</sup>,植物的冷岛效应可以进一步改善城市热环境,提高生活质量<sup>[15]</sup>。

本试验中 3 种植物的显热通量存在接近零甚至小于零的情况,表明植物为满足植物蒸腾的需要,从外界环境中吸收热量以满足植物蒸腾的消耗,从而达到降低外界环境温度的目的,与于小惠研究发现草坪净辐射通量低于潜热通量的结果一致<sup>[16]</sup>。但不同植物的蒸腾水平不同,对水分的消耗和抵御胁迫的程度也有所不同。高永等人研究发现植物蒸腾同株高冠幅间具有很大关系<sup>[17]</sup>。本研究中沙柳株高及冠幅大于柠条和沙棘,但日蒸腾量和沙棘相仿,低于柠条,表明同水平下沙柳的蒸腾耗水量低于其他两种植物。同时柠条累计蒸腾耗水量最高,说明柠条的吸水能力更强,其适应性也最强。邱国玉等人<sup>[18]</sup>在温室通过对番茄、甜瓜等作物进行的水分控制试验研究表明, $h_{at}$ 值可以反映植物根系水分状况, $h_{at}$ 值越接近 1 受到的水分胁迫越大,本试验中沙柳的  $h_{at}$  值平均值高于沙棘和柠条,说明其抵御胁迫的能力最低,柠条抵抗胁迫的能力最强。

## 4 结论

(1) 综合参考叶片表面温度变化规律和蒸腾计算结果表明绿色便签纸不适合作为参考叶片进行荒漠植物蒸腾的计算。绿色卡纸可以在 9:00—15:00 时作为参考叶片进行植物蒸腾的测定。

(2) 沙柳、沙棘、柠条的蒸腾速率日变化规律为单峰曲线,最高瞬时蒸腾速率分别为 0.57, 0.61 和 0.71 mm/h,日蒸腾量大小为:柠条>沙棘>沙柳。3 种植物蒸腾扩散系数日均值从大到小依次为:沙柳(0.18)>沙棘(0.11)>柠条(0.03)。

(3) 植物可以从外界吸收热量用于蒸腾从而达到降低环境温度的目的,综合 3 种植物蒸腾量和  $h_{at}$  值,在进行生态修复工作时,地势平坦,水分状况较好的地区应优先考虑沙柳;在地势险要、水分状况较差的区域应优先考虑沙棘和柠条。

### [参 考 文 献]

- [1] 孙龙. 4 种沙地灌木能源树种幼苗耗水特性研究[D]. 北京:北京林业大学, 2014.
- [2] 刘龙. 砒砂岩区 3 种林地持水性能与林木耗水规律研究[D]. 内蒙古呼和浩特:内蒙古农业大学, 2019.
- [3] 苏建平, 康博文. 我国树木蒸腾耗水研究进展[J]. 水土保持研究, 2004, 11(2): 177-179.
- [4] Qiu Guoyu. A new method for estimation of evapotranspiration [D]. Japan: Tottori University, 1996.
- [5] Qiu Guoyu, Miyamoto K, Sase S, et al. Comparison of the three-temperature model and conventional models for estimating transpiration [J]. Japan Agricultural Research Quarterly: JARQ, 2002, 36(2): 73-82.
- [6] 邱国玉, 熊育久. 水与能: 蒸散发、热环境及其能量收支[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [7] Leinonen I, Jones H G. Combining thermal and visible imagery for estimating canopy temperature and identifying plant stress [J]. Journal of Experimental Botany, 2004, 55(401): 1423-1431.
- [8] 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[J]. 中国油料作物学报, 2011, 33(6): 632-636.
- [9] 党晓宏, 潘霞, 刘阳, 等. 基于红外热成像技术的沙冬青衰退等级划分[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(4): 109-116.
- [10] 赵云霞, 李瑞利, 邱国玉. 基于热红外遥感的沙冬青 (*Ammopi ptaanthus Mongolicus*) 健康状况诊断[J]. 中国沙漠, 2016, 36(4): 997-1006.
- [11] Qiu Guoyu, Omasa K, Sase S. An infrared-based coefficient to screen plant environmental stress: concept, test and applications [J]. Functional Plant Biology, 2009, 36(11): 990-997.
- [12] 凌军, 张拴勤, 潘家亮, 等. 植物蒸腾作用对红外辐射特征的影响研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(7): 1775-1779.
- [13] Zhou Xinyao, Bi Shaojie, Yang Yonghui, et al. Comparison of ET estimations by the three-temperature model, SEBAL model and eddy covariance observations [J]. Journal of Hydrology, 2014, 519(11): 769-776.
- [14] 苏从先, 胡隐樵. 绿洲和湖泊的冷岛效应[J]. 科学通报, 1987, 32(10): 756-758.
- [15] 唐罗忠, 李职奇, 严春风, 等. 不同类型绿地对南京热岛效应的缓解作用[J]. 生态环境学报, 2009, 18(1): 23-28.
- [16] 于小惠, 杨雅君, 谭圣林, 等. 绿色屋顶蒸散发及其降温效果[J]. 环境工程学报, 2017, 11(9): 5333-5340.
- [17] 高永, 张瀚文, 虞毅, 等. 基于“三温模型”的珍稀濒危荒漠植物半日花蒸腾速率研究[J]. 生态学报, 2014, 34(20): 5721-5727.
- [18] 邱国玉, 吴晓, 王帅, 等. 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[J]. 植物生态学报, 2006, 30(5): 852-860.