

内蒙古乌兰布和沙漠主要灌木光合日变化特征比较研究

刘芳¹, 黄雅茹¹, 陈海玲¹, 马迎宾¹, 葛根巴图¹, 董雪¹, 张晓燕²

(1. 中国林业科学研究院 沙漠林业实验中心, 内蒙古 磴口 015200;

2. 内蒙古自治区乌兰察布市四子王旗水利局, 内蒙古 乌兰察布 011800)

摘要:对乌兰布和沙漠耐旱植物沙拐枣属、柽柳属、锦鸡儿属的 14 种植物进行光合日变化特征研究。结果表明: (1) 14 种沙生灌木净光合速率日变化呈双峰型, 峰值均出现在 10:00 与 16:00, 有明显的光合“午休”现象, 且主要是由气孔因素引起的。净光合速率日均值排序为: 柠条锦鸡儿>中间锦鸡儿>乔木状沙拐枣>多花柽柳>细穗柽柳>白皮沙拐枣>东疆沙拐枣>甘蒙柽柳>荒漠锦鸡儿>多枝柽柳>头状沙拐枣>长穗柽柳>狭叶锦鸡儿>红皮沙拐枣; (2) 沙拐枣属、柽柳属蒸腾速率日变化呈单峰型, 峰值分别出现在 10:00, 14:00, 锦鸡儿属植物蒸腾速率日变化呈双峰型, 峰值出现在 10:00, 16:00。蒸腾速率日均值排序为: 多花柽柳>细穗柽柳>甘蒙柽柳>柠条锦鸡儿>荒漠锦鸡儿>中间锦鸡儿>多枝柽柳>白皮沙拐枣>长穗柽柳>乔木状沙拐枣>狭叶锦鸡儿>头状沙拐枣>东疆沙拐枣>红皮沙拐枣; (3) 14 种沙生灌木水分利用效率日变化均为双峰型, 上午的水分利用效率高于下午, 最高值出现在 10:00, 水分利用效率日均值排序为: 乔木状沙拐枣>红皮沙拐枣>长穗柽柳>柠条锦鸡儿>白皮沙拐枣>头状沙拐枣>东疆沙拐枣>中间锦鸡儿>多枝柽柳>狭叶锦鸡儿>甘蒙柽柳>荒漠锦鸡儿>细穗柽柳>多花柽柳; (4) 在相同的环境条件下, 乔木状沙拐枣、长穗柽柳、柠条锦鸡儿对该区的干旱环境有相对较强的适应能力。

关键词: 乌兰布和沙漠; 灌木; 光合特性; 日变化

中图分类号: Q945.11

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2015)03-0155-08

Comparative Study on Diurnal Variation Characteristics of Photosynthesis of Main Shrubs in Ulanbuh Desert in Inner Mongolia

LIU Fang¹, HUANG Yaru¹, CHEN Hailing¹, MA Yingbin¹, GE Genba Tu¹, DONG Xue¹, ZHANG Xiaoyan²

(1. Experimental Center of Desert Forestry, CAF, Dengkou, Inner Mongolia 015200, China;

2. Water Resources Bureau of Siziwang County, Wulanchabu, Inner Mongolia 011800, China)

Abstract: The diurnal variations of photosynthetic characteristics of 14 species of drought-tolerant plants including *Calligonum* L., *Tamarix* and *Caragana* Fabr. were studied in Ulanbuh Desert. The results showed that: (1) diurnal variations of net photosynthesis rates of 14 plants were double-peak curves, the peaks were at 10:00 and 16:00, respectively, and had obvious siesta phenomena of photosynthesis, and the impact factor was mainly stomatal change. Net photosynthesis rates decreased in the order of *Caragana korshinskii* Kom>*Caragana intermedia* Kuang et H. C. Fu>*Calligonum arborescens* Litv.>*Tamarix hohenackeri* Bunge>*Tamarix leptostachys* Bunge>*Calligonum leucocladum* (Schrenk) Bunge>*calligonum east*>*Tamarix austromongolica* Nakai>*Caragana roborovskyi* Kom.>*Tamarix ramosissima* Ledeb.>*Calligonum caput-medusae* Schrenk>*Tamarix elongata* Ledeb.>*Caragana stenophylla* Pojark.>*Calligonum rubicundum* Bge; (2) *Calligonum* L. and *Tamarix* transpiration rate changes were single-peak curves, the peaks were at 10:00 and 14:00, respectively, the species of the *Caragana* Fabr. transpiration rate was double-peak curves, the peaks were at 10:00 and 16:00, respectively. Transpiration rates decreased in the sequence of *Tamarix hohenackeri* Bunge>*Tamarix leptostachys* Bunge>*Tamarix austromongolica* Nakai>*Caragana korshinskii* Kom>*Caragana roborovskyi* Kom.>*Caragana intermedia* Kuang et H. C. Fu>*Tamarix ramosissima* Ledeb.>*Calligonum leucocladum* (Schrenk) Bunge>*Tamarix elongata* Ledeb.>*Calligonum arborescens* Litv.>*Caragana stenophylla* Pojark.>*Calligonum caput-medusae* Schrenk>*calligonum east*>*Calligonum rubicundum* Bge; (3) diurnal variations of water use efficiency were double-

收稿日期: 2014-06-30

修回日期: 2014-07-30

资助项目: 中央级院所基本科研业务专项(CAFYBB2011005-6); 国家林业科技推广项目([2012]31号); 中央级院所基本科研业务专项(CAFYBB2012003)

第一作者: 刘芳(1974—), 女, 内蒙古临河人, 硕士, 高级工程师, 主要从事荒漠化防治技术与干旱区抗逆植物资源筛选研究。E-mail: liuf98@126.com

peak curves, water use efficiency in the morning was higher than in the afternoon, the peak appeared at 10:00, water use efficiency decreased in the order of *Calligonum arborescens* Litv. > *Calligonum rubicundum* Bge > *Tamarix elongata* Ledeb. > *Caragana korshinskii* Kom > *Calligonum leucocladum* (Schrenk) Bunge > *Calligonum caput-medusae* Schrenk > *calligonum east* > *Caragana intermedia* Kuang et H. C. Fu > *Tamarix ramosissima* Ledeb. > *Caragana stenophylla* Pojark. > *Tamarix austromongolica* Nakai > *Caragana roborovskyi* Kom. > *Tamarix leptostachys* Bunge > *Tamarix hohenackeri* Bunge; (4) under the same environment conditions, *Calligonum arborescens* Litv., *Tamarix elongata* Ledeb. and *Caragana korshinskii* Kom had relatively strong ability to adapt the arid environment.

Keywords: Ulanbuh Desert; shrub; photosynthetic characteristics; diurnal variations

乌兰布和沙漠位于内蒙古西部,是华北、西北的接合部,地处我国西北地区荒漠半荒漠前沿地带。自然生态环境十分脆弱,气候属温带大陆性荒漠气候,终年受西风环流控制,气候极端干旱,降水稀少,风势强劲,风沙尘暴、干热风、冰雹和霜冻等灾害性天气较频繁^[1-2]。该区人工植被主要是沙拐枣(*Calligonum mongolicum* Turcz.)、怪柳(*Tamarix chinensis* Lour.)、锦鸡儿[*Caragana sinica* (Buc'hoz) Rehd.]、旱柳(*Salix matsudana*)等灌木。沙拐枣属、怪柳属、锦鸡儿属植物均为固沙造林先锋树种,分布范围广泛,适应性强,对气候土壤要求不高,耐干旱、耐盐碱,在沙漠地区根系发达,萌生力强,耐风蚀、耐贫瘠,是乌兰布和沙漠重要的灌木植被。

在干旱半干旱区,由于降水稀少,蒸发强烈,沙区植被常常会面临不同程度的土壤干旱环境。水分是影响植物生长和水分利用效率的关键因子^[3],并与温度、光照、CO₂浓度等环境因子共同决定了植物对环境的响应与适应^[4]。不同植被适应干旱的方式不同,目前大多学者通过测定植物的光合速率,蒸腾速率等相关生理指标,可以不同程度评估植物的抗旱性,进一步评价其适应性。Kramer^[5]对影响树木光合作用的光照、温度、土壤含水量、养分含量、CO₂浓度等环境因子的研究进行了综述。吴雁雯^[6]对风阳山一百山祖国家级自然保护区阔叶混交林中两种常见木本植物尖萼紫茎(*Stewartia acutisepala*)和小叶白辛树(*Pterostyrax corymbosus*)的光合蒸腾特性进行了研究,并应用相关性分析与逐步回归分析法就上述植物各生理生态因子对净光合速率和蒸腾速率的影响进行了分析。苏培玺^[7-8]研究得出水分胁迫导致 C₄ 荒漠植物梭梭和沙拐枣出现光抑制,提高空气湿度或者土壤湿度,都能避免光抑制,提高光能利用率。他还研究了梭梭和沙拐枣的净光合速率、蒸腾速率及水分利用效率特征,结果表明水分条件好时净光合速率明显增大,光能利用率提高。朱军涛^[9]通过对不同海拔高度塔里木沙拐枣光合生理参数与光、温等生态因子关系的对比分析,得出塔里木沙拐枣对山地荒漠草地自然环境变化的温度和光

照有很好的生态适应性。吉小敏^[10]对不同水分条件下大田栽植的梭梭和多花怪柳苗期的净光合速率、蒸腾速率、水分利用效率、气孔导度和胞间 CO₂ 浓度等光合生理指标进行了测定,表明梭梭的抗旱性强于多花怪柳。张利刚^[11]对绿洲—荒漠过渡带多枝怪柳、梭梭、头状沙拐枣和沙枣的光合特性、水势以及生理指标进行了研究,运用平均隶属函数法对这 4 种植物进行抗旱性排序,依次是梭梭 > 多枝怪柳 > 沙枣 > 头状沙拐枣。李清河^[12-13]对乌兰布和沙漠东北部的甘蒙怪柳、沙木蓼、霸王、沙冬青、花棒、白刺、梭梭和柠条 8 种沙生灌木生长季末期的光合生理特性进行了研究,还对不同种源白刺幼苗生理生长对水分的响应进行了研究。周海燕^[14]对几种锦鸡儿属的灌木进行了研究,表明水分充足时柠条、中间锦鸡儿和小叶锦鸡儿的净光合速率与蒸腾速率大幅度提高。学者们对乌兰布和沙漠植物的光合特性研究较少,对主要灌木的光合日动态特性研究更少,因此,本试验主要针对内蒙古乌兰布和沙漠沙拐枣属、怪柳属、锦鸡儿属的 14 种主要灌木植物进行光合日变化特征进行研究,为进一步评价其抗旱性、适应性提供基础,为乌兰布和沙漠植物筛选及其适应性提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区磴口县中国林业科学研究院沙漠林业试验中心第一试验场内。该区是河套平原与乌兰布和沙漠的接合部,属于温带大陆性干旱气候,年平均气温 7.8℃,多年平均降水量约 145 mm,降雨集中在 6—9 月份,年蒸发量约 2 327 mm,年日照时数约 3 210 h,占全年可照时数的 72%,无霜期 136 d,土壤类型为风沙土,主要植被为沙地灌木植被。

1.2 研究方法

以荒漠植被沙拐枣属、怪柳属、锦鸡儿属的 14 种植物为研究对象,试验材料如表 1 所示。选择全天晴朗无云的天气,选择完整、生长健康的植株,采用 Li-6400xt 便携式光合测定系统分析仪(USA,

LICOR)对植被进行叶片净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)和胞间 CO_2 浓度(C_i)等的测定,同时对主要气象因子光合有效辐射(PAR)、气温(T_a)、相对湿度(RH)、大气 CO_2 浓度(C_a)进行测定,叶片水分利用效率 $\text{WUE} = P_n/T_r$,气孔限制值 $L_s = 1 - C_i/C_a^{[15]}$ 。各材料随机选择 6 个叶片进行测定,

测定时间为 2013 年 8 月 20 日到 22 日,连续测定 3 天,每天测定时间为 8:00—20:00,每 2 h 观测 1 次,并取其平均值为该植物的日均值。

测定完成后,将叶片做好标记,装入自封袋,带回实验室内,用扫描仪扫描后存入电脑,用 Ipp 6.0 图像分析软件计算叶片面积。

表 1 试验材料

树种	树高/m	冠幅/(m×m)	生长年限/a	株行距/(m×m)	土壤条件
乔木状沙拐枣	5.3	1.2×0.8	5	2×3	风沙土
白皮沙拐枣	4.2	2.0×2.4	5	2×3	风沙土
头状沙拐枣	5.5	0.9×1.1	5	2×3	风沙土
红皮沙拐枣	4.6	1.3×1.5	5	2×3	风沙土
东疆沙拐枣	4.9	0.9×0.9	5	2×3	风沙土
多花怪柳	5.3	1.5×1.8	7	2×3	风沙土
长穗怪柳	5.6	1.4×1.5	7	2×3	风沙土
多枝怪柳	5.8	1.6×1.8	7	2×3	风沙土
细穗怪柳	5.4	1.5×1.5	7	2×3	风沙土
甘蒙怪柳	5.5	1.6×1.5	7	2×3	风沙土
柠条锦鸡儿	3.5	1.6×1.4	6	2×3	风沙土
荒漠锦鸡儿	4.1	1.2×1.5	6	2×3	风沙土
中间锦鸡儿	4.3	1.6×1.7	6	2×3	风沙土
狭叶锦鸡儿	3.9	1.1×1.2	6	2×3	风沙土

2 结果与分析

2.1 主要气象因子日变化特征

由图 1 可知,光合有效辐射在 14:00 达到最大值,为 $796.36 \mu\text{mol}/\text{m}^2$,之后逐渐下降,日变化呈典型的钟罩型。在强烈的光照下,空气温度也随

之变化,最高气温出现在 14:00,为 34.09°C 。在光照与温度的变化下,RH 和 C_a 呈现出相反的日变化特征,早晨和傍晚较高,有利于光合作用,而中午较低,不利于光合作用。RH 最低值出现在 16:00,为 16.36% , C_a 最低值出现在 14:00,为 $380.59 \mu\text{mol}/\text{mol}$ 。

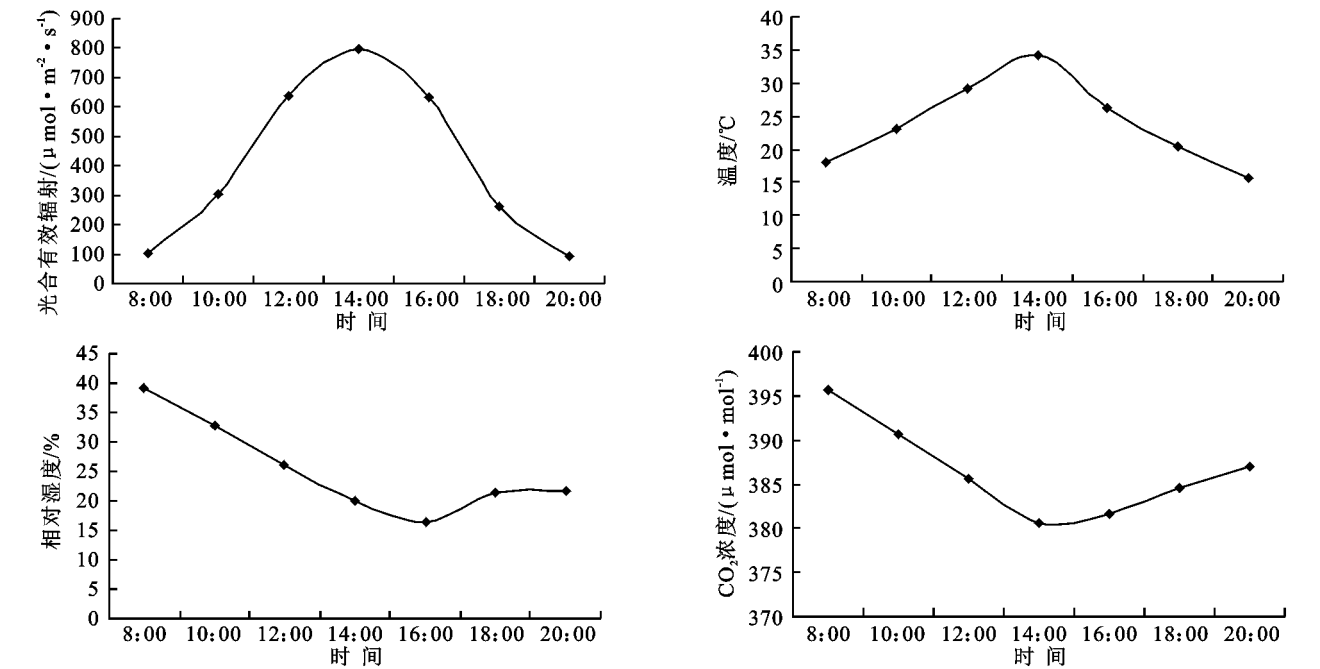


图 1 主要气象因子日变化特征

2.2 净光合速率日动态

由图 2 可知,5 种沙拐枣净光合速率日变化过程均表现出双峰型,且峰值均分别出现在 10:00 和

16:00,12:00 左右都出现明显的光合“午休”现象;5 种沙拐枣植物 10:00 的净光合速率峰值均高于 16:00 的峰值,其中白皮沙拐枣 10:00 峰值 $14.32 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 于

高 16:00 峰值 $7.96 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 乔木状沙拐枣 10:00 峰值 $16.57 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 高于 16:00 峰值 $6.98 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 红皮沙拐枣 10:00 峰值 $5.95 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 高于 16:00 峰值 $3.35 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 头状沙拐枣 10:00 峰值 $11.26 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 高于 16:00 峰值 $6.79 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 东疆沙拐枣 10:00 峰值 9.21

$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 高于 16:00 峰值 $7.63 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 且差异显著 ($p < 0.05$)。5 种沙拐枣的净光合速率日均值大小顺序为乔木状沙拐枣 [$7.40 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] > 白皮沙拐枣 [$5.52 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] > 东疆沙拐枣 [$4.63 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] > 头状沙拐枣 [$4.33 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] > 红皮沙拐枣 [$2.59 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]。

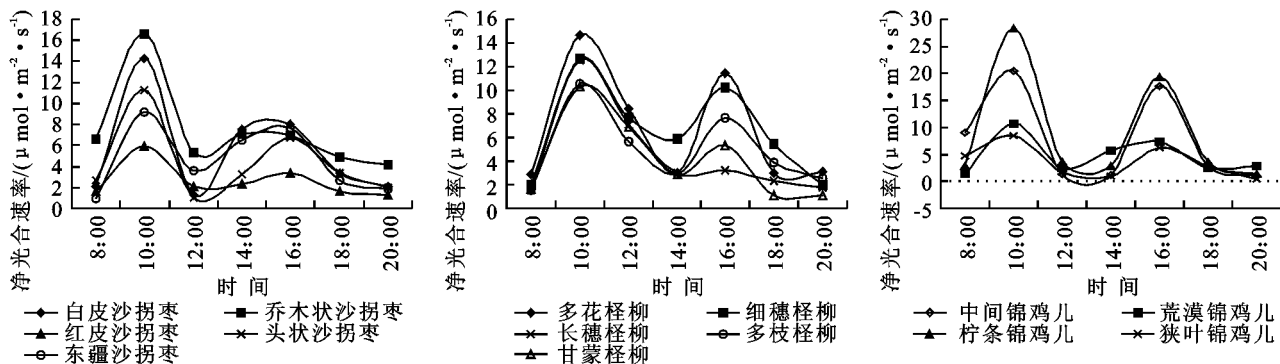


图2 净光合速率日动态

5 种怪柳净光合速率日变化过程均表现出双峰型, 且峰值均分别出现在 10:00, 16:00。14:00 左右都出现明显的光合“午休”现象, 其光合值分别为: 多花怪柳 $3.03 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 细穗怪柳 $5.93 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 长穗怪柳 $2.87 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 多枝怪柳 $3.02 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 甘蒙怪柳 $2.88 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。5 种怪柳植物 10:00 的净光合速率峰值高于 16:00 峰值, 多花怪柳 10:00 峰值 $14.63 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 高于 16:00 峰值 $11.39 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 细穗怪柳 10:00 峰值 $12.63 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 高于 16:00 峰值 $10.21 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 长穗怪柳 10:00 峰值 $10.29 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 高于 16:00 峰值 $5.29 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 多枝怪柳 10:00 峰值 $12.57 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 高于 16:00 峰值 $3.26 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 甘蒙怪柳 10:00 峰值 $10.53 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 高于 16:00 峰值 $7.63 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 且差异显著 ($p < 0.05$)。5 种怪柳的净光合速率日均值大小顺序为多花怪柳 [$6.63 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] > 细穗怪柳 [$6.54 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] > 甘蒙怪柳 [$4.96 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] > 多枝怪柳 [$4.51 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] > 长穗怪柳 [$4.18 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]。

4 种锦鸡儿属植物净光合速率日变化过程均表现出双峰型, 且峰值均出现在 10:00, 16:00。14:00 左右都出现明显的光合“午休”现象, 其光合值分别为: 中间锦鸡儿 $1.12 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 荒漠锦鸡儿 $2.54 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 柠条锦鸡儿 $2.88 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 狭叶锦鸡儿 $1.05 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。4 种锦鸡儿属植物 10:00 的净光合速率峰值高于 16:00 的峰值, 中间锦鸡儿 10:00 峰值 $20.44 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 高于 16:00 峰值 $17.65 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 荒漠锦鸡儿 10:00 峰值

$10.77 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 高于 16:00 峰值 $7.44 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 柠条锦鸡儿 10:00 峰值 $28.39 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 高于 16:00 峰值 $19.28 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 狭叶锦鸡儿 10:00 峰值 $8.56 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 高于 16:00 峰值 $6.24 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 差异不显著 ($p > 0.1$)。4 种锦鸡儿的净光合速率日均值大小顺序为柠条锦鸡儿 [$8.84 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] > 中间锦鸡儿 [$7.65 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] > 荒漠锦鸡儿 [$4.74 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] > 狭叶锦鸡儿 [$3.60 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]。

总体来看, 14 种植物净光合速率日均值排序为: 柠条锦鸡儿 > 中间锦鸡儿 > 乔木状沙拐枣 > 多花怪柳 > 细穗怪柳 > 白皮沙拐枣 > 东疆沙拐枣 > 甘蒙怪柳 > 荒漠锦鸡儿 > 多枝怪柳 > 头状沙拐枣 > 长穗怪柳 > 狭叶锦鸡儿 > 红皮沙拐枣, 日最高值排序为: 柠条锦鸡儿 > 中间锦鸡儿 > 乔木状沙拐枣 > 多花怪柳 > 白皮沙拐枣 > 细穗怪柳 > 多枝怪柳 > 头状沙拐枣 > 荒漠锦鸡儿 > 甘蒙怪柳 > 长穗怪柳 > 东疆沙拐枣 > 狭叶锦鸡儿 > 红皮沙拐枣。

2.3 蒸腾速率日动态

如图 3 所示, 5 种沙拐枣蒸腾速率日变化均呈单峰型变化, 且峰值均出现在 10:00, 从早晨 8:00 开始蒸腾速率逐渐上升, 到 10:00 后逐渐下降。白皮沙拐枣、乔木状沙拐枣、红皮沙拐枣、头状沙拐枣、东疆沙拐枣的峰值分别为 $2.91, 3.51, 1.30, 3.67, 2.31 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。5 种沙拐枣的蒸腾速率日均值大小顺序为白皮沙拐枣 [$1.90 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] > 乔木状沙拐枣 [$1.86 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] > 头状沙拐枣 [$1.65 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] > 东疆沙拐枣 [$1.63 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] > 红皮沙拐枣 [$0.60 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]。

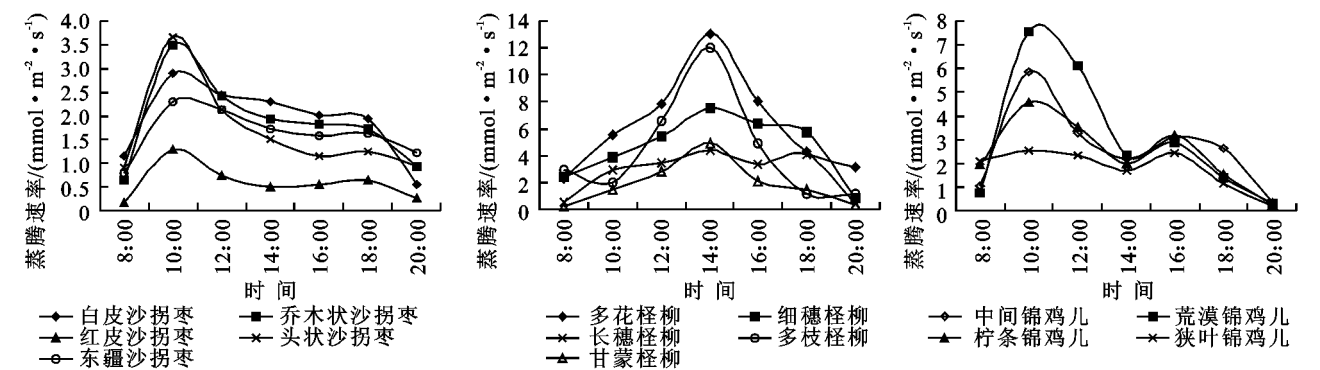


图 3 蒸腾速率日动态

5 种怪柳蒸腾速率日变化均呈单峰型变化,且峰值均出现在 14:00,多花怪柳、甘蒙怪柳从早晨 8:00 开始蒸腾速率逐渐上升,而细穗怪柳、长穗怪柳、多枝怪柳变化不明显。多花怪柳、细穗怪柳、长穗怪柳、多枝怪柳、甘蒙怪柳的峰值分别为 13.09,7.57,4.88,4.38,12.04 mmol/(m²·s)。5 种怪柳的蒸腾速率日均值大小顺序为多花怪柳[6.33 mmol/(m²·s)]>细穗怪柳[4.59 mmol/(m²·s)]>甘蒙怪柳[4.40 mmol/(m²·s)]>多枝怪柳[2.72 mmol/(m²·s)]>长穗怪柳[1.89 mmol/(m²·s)]。

4 种锦鸡儿蒸腾速率日变化均呈双峰型变化,峰值出现在 10:00 和 16:00。中间锦鸡儿 10:00 峰值 5.87 mmol/(m²·s) 高于 16:00 峰值 3.10 mmol/(m²·s),荒漠锦鸡儿 10:00 峰值 7.53 mmol/(m²·s) 高于 16:00 峰值 2.89 mmol/(m²·s),柠条锦鸡儿 10:00 峰值 4.57 mmol/(m²·s) 高于 16:00 峰值 3.18 mmol/(m²·s),狭叶锦鸡儿 10:00 峰值 2.54 mmol/(m²·s) 高于 16:00 峰值 2.45 mmol/(m²·s),差异显著($p<0.1$)。4 种锦鸡儿的蒸腾速率日均值大小顺序为柠条锦鸡儿[3.02 mmol/(m²·s)]>荒漠锦鸡儿[2.84 mmol/(m²·s)]>中间锦鸡儿[2.78 mmol/

(m²·s)]>狭叶锦鸡儿[1.78 mmol/(m²·s)]。

总体来看,14 种植物蒸腾速率日均值排序为:多花怪柳>细穗怪柳>甘蒙怪柳>柠条锦鸡儿>荒漠锦鸡儿>中间锦鸡儿>多枝怪柳>白皮沙拐枣>长穗怪柳>乔木状沙拐枣>狭叶锦鸡儿>头状沙拐枣>东疆沙拐枣>红皮沙拐枣;日最高值排序为:多花怪柳>甘蒙怪柳>细穗怪柳>荒漠锦鸡儿>中间锦鸡儿>长穗怪柳>柠条锦鸡儿>多枝怪柳>头状沙拐枣>乔木状沙拐枣>白皮沙拐枣>狭叶锦鸡儿>东疆沙拐枣>红皮沙拐枣。

2.4 水分利用效率日动态

如图 4 所示,5 种沙拐枣水分利用效率日变化均呈双峰型变化,且峰值均出现在 10:00,16:00。乔木状沙拐枣、白皮沙拐枣、红皮沙拐枣在 10:00 的水分利用效率高于 16:00,而头状沙拐枣与东疆沙拐枣 16:00 的水分利用效率高于 10:00。在 12:00 水分利用效率均呈现不同程度的降低。5 种沙拐枣的水分利用效率日均值大小顺序为乔木状沙拐枣(4.58 μmol/mmol)>红皮沙拐枣(4.51 μmol/mmol)>白皮沙拐枣(2.85 μmol/mmol)>头状沙拐枣(2.76 μmol/mmol)>东疆沙拐枣(2.66 μmol/mmol)。

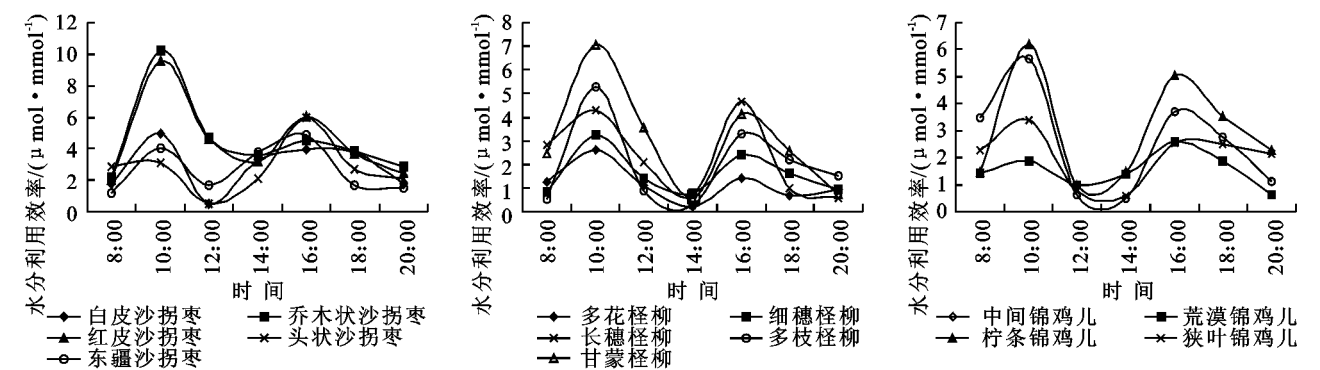


图 4 水分利用效率日动态

5 种怪柳水分利用效率日变化均呈双峰型变化,且峰值均出现在 10:00,16:00。水分利用效率(WUE)日均值大小顺序为长穗怪柳(3.02 μmol/mmol)>多枝怪柳(2.30 μmol/mmol)>甘蒙怪柳

(1.99 μmol/mmol)>细穗怪柳(1.60 μmol/mmol)>多花怪柳(1.18 μmol/mmol)。

4 种锦鸡儿水分利用效率日变化均呈双峰型变化,峰值出现在 10:00,16:00。水分利用效率日均值

大小顺序为柠条锦鸡儿($3.00 \mu\text{mol}/\text{mmol}$)>中间锦鸡儿($2.55 \mu\text{mol}/\text{mmol}$)>狭叶锦鸡儿($2.02 \mu\text{mol}/\text{mmol}$)>荒漠锦鸡儿($1.53 \mu\text{mol}/\text{mmol}$)。

总体来看,14种植物水分利用效率日均值排序为:乔木状沙拐枣>红皮沙拐枣>长穗柽柳>柠条锦鸡儿>白皮沙拐枣>头状沙拐枣>东疆沙拐枣>中间锦鸡儿>多枝柽柳>狭叶锦鸡儿>甘蒙柽柳>荒漠锦鸡儿>细穗柽柳>多花柽柳。

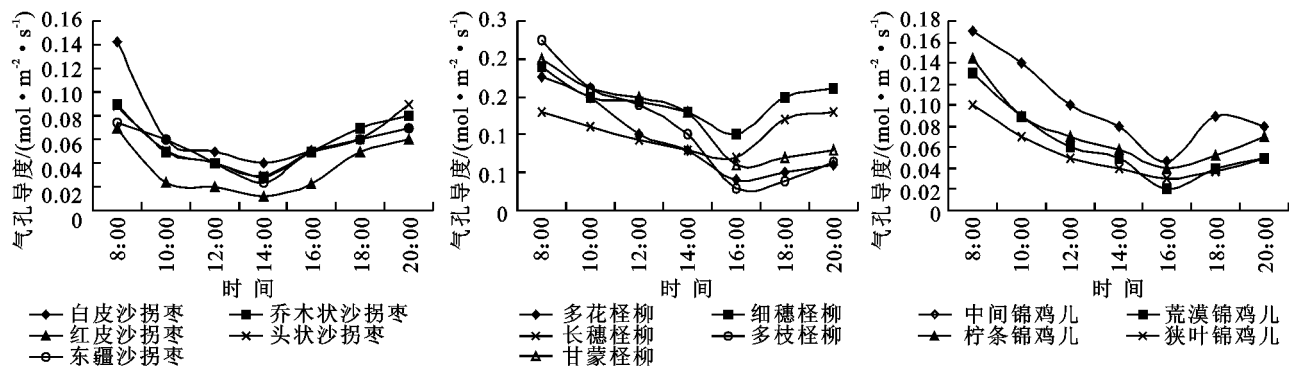


图5 气孔导度日动态

柽柳属5种植物的气孔导度由清晨的最大值逐渐降低,降低到最小值后,又逐渐升高。最小值都出现在16:00左右。多花柽柳、细穗柽柳、长穗柽柳、多枝柽柳、甘蒙柽柳的日最小值分别为 $0.04, 0.10, 0.06, 0.07, 0.03 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。气孔导度日均值大小顺序为:细穗柽柳>长穗柽柳>甘蒙柽柳>多枝柽柳>多花柽柳。锦鸡儿属4种植物的气孔导度也是由清晨的最大值逐渐降低,降低到最小值后,又逐渐升高。最小值都出现在16:00左右。柠条锦鸡儿、中间锦鸡儿、荒漠锦鸡儿、狭叶锦鸡儿的日最小值分别

2.5 气孔导度日动态

气孔导度反映气孔的开放程度。由图5可知,沙拐枣属的5种植物气孔导度都是由清晨的最大值逐渐降低,降低到最小值后,又逐渐升高。最小值都出现在14:00左右。白皮沙拐枣、乔木状沙拐枣、红皮沙拐枣、头状沙拐枣、东疆沙拐枣的日最小值分别为 $0.04, 0.03, 0.01, 0.03, 0.02 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。气孔导度日均值大小顺序为:白皮沙拐枣>乔木状沙拐枣>头状沙拐枣>东疆沙拐枣>红皮沙拐枣。

为: $0.05, 0.02, 0.04, 0.03 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。气孔导度日均值大小顺序为:中间锦鸡儿>柠条锦鸡儿>荒漠锦鸡儿>狭叶锦鸡儿。

2.6 胞间CO₂浓度日动态

由图6可知,沙拐枣属5种植物的胞间CO₂浓度随着时间变化逐渐下降。白皮沙拐枣、乔木状沙拐枣、红皮沙拐枣、头状沙拐枣、东疆沙拐枣的日最小值分别为 $265.39, 315.2, 200.1, 252.63, 245.69 \mu\text{mol}/\text{mol}$ 。日均值大小顺序为:乔木状沙拐枣>白皮沙拐枣>东疆沙拐枣>头状沙拐枣>红皮沙拐枣。

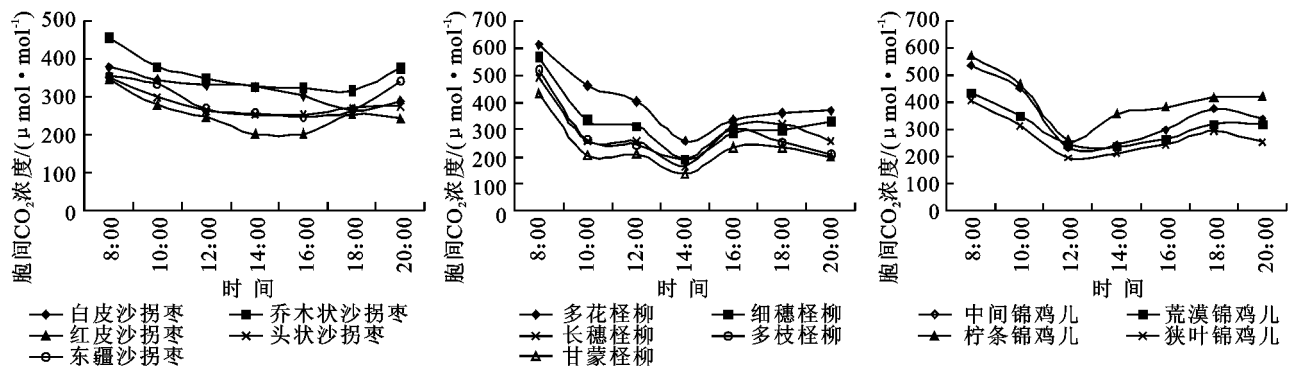


图6 胞间CO₂浓度日动态

柽柳属5种植物的胞间CO₂浓度随着时间变化逐渐减小,到14:00后逐渐上升,但幅度较小。最小值都出现在14:00左右。多花柽柳、细穗柽柳、长穗柽柳、多枝柽柳、甘蒙柽柳的日最小值分别为 $255.4, 188.07, 135.44, 166.89, 188.6 \mu\text{mol}/\text{mol}$ 。日均值大小顺序为:多花柽柳>细穗柽柳>多枝柽柳>甘蒙

柽柳>长穗柽柳。

锦鸡儿属4种植物的胞间CO₂浓度随着时间变化逐渐减小,下降到12:00后又逐渐上升。最小值都出现在12:00左右。柠条锦鸡儿、中间锦鸡儿、荒漠锦鸡儿、狭叶锦鸡儿的日最小值分别为 $259.3, 233.5, 246.3, 195.2 \mu\text{mol}/\text{mol}$ 。日均值大小顺序

为:柠条锦鸡儿>中间锦鸡儿>荒漠锦鸡儿>狭叶锦鸡儿。

2.7 气孔限制值

如图 7 所示,沙拐枣属 5 种植物的气孔限制值在 8:00 时最小,随着时间的变化逐渐升高,随后逐渐下降。日均值大小顺序为:乔木状沙拐枣>东疆沙拐枣>红皮沙拐枣>头状沙拐枣>白皮沙拐枣。柽柳属

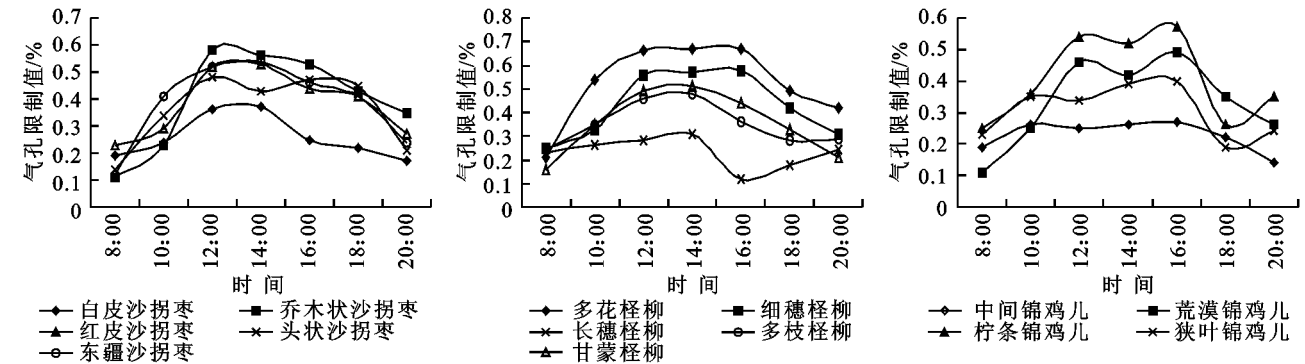


图 7 气孔限制值日动态

3 结论

光合作用是植物生长与发育的基础,同时也是植物生产力构成的最主要影响因素。气孔是植物与外界环境进行气体和水分交换的门户和通道,对水分变化十分敏感,几乎所有的中生和旱生植物都可以通过关闭气孔来适应无间叶片过度蒸腾或低水势的土壤环境^[16]。从植物本身来说,光合作用的限制因素大致可分为气孔因素和非气孔因素。Farquhar 等^[17]的研究表明,当净光合速率和胞间 CO₂ 浓度的变化方向相同(同时减小)且气孔限制值增大时,净光合速率减少的主要原因是由气孔因素引起的;否则净光合速率下降的原因是由非气孔因素引起的^[17-18]。本研究中,14 种沙旱生灌木净光合速率日变化曲线均存在不同程度的光合“午休”现象。沙拐枣属的植物在 10:00—12:00 时间段内净光合速率下降,胞间 CO₂ 浓度下降,且气孔限制值增大,可以推断沙拐枣属植物的光合“午休”现象是由气孔因素引起的。柽柳属植物在 10:00—14:00 时间段内净光合速率下降,胞间 CO₂ 浓度下降,且气孔限制值增大,柽柳属植物的光合“午休”现象是由气孔因素引起的。锦鸡儿属植物在 10:00—12:00 时间段内净光合速率下降,胞间 CO₂ 浓度下降,且气孔限制值增大,锦鸡儿属植物的光合“午休”现象同样也是由气孔因素引起的。

植物蒸腾是植物生理特性之一,植物蒸腾速率不仅受气候和土壤水分的影响,而且还受植物种类等多种因素的制约,因此导致了不同的植物表现出不同的蒸腾速率变化。植物的气孔多分布于叶片表面,既能

5 种植物的气孔限制值随着时间变化逐渐升高,到 14:00 达到一天中的最大值,随后逐渐下降。日均值大小顺序为:多花柽柳>细穗柽柳>长穗柽柳>甘蒙柽柳>多枝柽柳。锦鸡儿属 4 种植物的气孔限制值随着时间变化逐渐升高,到 16:00 达到最大值,随后逐渐下降。日均值大小顺序为:柠条锦鸡儿>荒漠锦鸡儿>狭叶锦鸡儿>中间锦鸡儿。

保证植物与外界环境进行气体交换,又能适当抑制蒸腾作用^[19]。本研究中,锦鸡儿属植物在 8:00—10:00 间,呈上升趋势,到 10:00 蒸腾速率达到一天中的峰值,此后随温度的升高而下降,到 16:00 达到第二个峰值,但明显低于第一个峰值,蒸腾速率呈双峰型。由于中午光照强度最大,气温最高,蒸腾速率逐渐增大,然而水分供应不足,为了保护叶片不被灼伤,减少水分的损耗,气孔会自动调节,开度明显减小或部分关闭一段时间,蒸腾速率大幅降低。当光强和气温在午后逐渐减弱时,蒸腾作用又逐渐增强,蒸腾速率值有所回升,最后随着光合有效辐射,气温等气象因素的下降以及气孔的逐渐关闭,蒸腾速率又趋于减弱^[20]。蒸腾作用午间降低是中生和旱生植物通过关闭气孔来适应午间高温或防止叶片过度蒸腾失水的一种生态适应对策^[21]。沙拐枣属、柽柳属植物蒸腾速率日变化曲线均呈单峰曲线,中午并没有出现蒸腾速率降低趋势,这可能是由于植物本身需要通过较强的蒸腾作用来维持体温,同时提高了小环境中的空气湿度,这是植物对环境的一种适应。

水分利用效率是指植物消耗单位重量的水所固定二氧化碳的量,是评价植物耗水量多少或适应干旱胁迫能力的一个重要的生理生态指标,其值越大,说明植物对水分的利用效率越高^[22],植物对环境的适应性就可能发生改变^[23]。植物水分利用效率受净光合速率与蒸腾速率的共同影响。本试验中,沙拐枣属、柽柳属、锦鸡儿属植物水分利用效率均呈双峰型,在上午时段的水分利用效率高于下午,这与丁晓纲^[24]的研究结果一致,最高值出现在 10:00 左右,此

时光合有效辐射较强,气孔开度较大,空气相对湿度较大,净光合速率增加较快,而蒸腾速率相对较低,水分利用效率较高,10:00以后由于光照增强、气温上升、空气相对湿度明显下降,部分气孔关闭,光合速率降低的幅度小,蒸腾速率降低的幅度大,水分利用效率减小。 C_i/C_a (胞间 CO_2 浓度/大气 CO_2 浓度)是一个抗旱性指标,表征植物对水分变化的响应, C_i/C_a 越小,抗旱性越强^[25], $L_s = 1 - C_i/C_a$,即气孔限制值越大,一定程度上说明抗旱性越强,在相同的环境条件下,5种沙拐枣中,乔木状沙拐枣的 L_s 最大,净光合速率最大,蒸腾速率较高,且水分利用效率日均值最高,说明乔木状沙拐枣对该区的干旱环境有较强的适应能力。柽柳属的5种植物中,多花柽柳的净光合速率较高,但水分利用效率不高,气孔限制值也较低,而长穗柽柳的净光合速率最小,但水分利用效率最高,且气孔限制值较高,因此一定程度上长穗柽柳具有相对较强的适应性。锦鸡儿属中柠条锦鸡儿的净光合速率较高,水分利用效率最高,且气孔限制值最大,柠条锦鸡儿具有相对较强的抗旱性与适应性。

参考文献:

- [1] 吴鸿宾. 内蒙古主要气象灾害分析[M]. 北京:气象出版社,1990.
- [2] 陈炳浩,郝玉光. 乌兰布和沙区区域性防护林体系气候生态效益评价的研究[J]. 林业科学研究,2003,16(1):63-68.
- [3] O'Connor T G, Haines L M, Snyman H A. Influence of precipitation and species composition on phytomass of a semi-arid African grassland[J]. Journal of Ecology, 2001,89(5):850-860.
- [4] De Villalobos A E, Peláez D V. Influence of temperature and water stress on germination and establishment of *Prosopis caldenia* burk[J]. Journal of Arid Environments, 2001,49(2):321-328.
- [5] Bowman W D, Conant R T. Shoot growth dynamics and photosynthetic response to increased nitrogen availability in the alpine willow *Salix glauca*[J]. Oecologia, 1994, 97(1):93-99.
- [6] 吴雁雯,张金池,顾哲衍. 百山祖两种阔叶木本植物的光合蒸腾作用特性研究[J]. 水土保持研究,2014,21(6):204-210.
- [7] 苏培玺,严巧娣. C_i 荒漠植物梭梭和沙拐枣在不同水分条件下的光合作用特征[J]. 生态学报,2006,26(1):75-82.
- [8] 苏培玺,赵爱芬,张立新,等. 荒漠植物梭梭和沙拐枣光合作用,蒸腾作用及水分利用效率特征[J]. 西北植物学报,2003,23(1):11-17.
- [9] 朱军涛,李向义,张希明,等. 昆仑山北坡不同海拔塔里木沙拐枣的光合生理生态特性[J]. 生态学报,2011,31(3):611-619.
- [10] 吉小敏,宁虎森,梁继业,等. 不同水分条件下梭梭和多花柽柳苗期光合特性及抗旱性比较[J]. 中国沙漠,2012,32(2):399-406.
- [11] 张利刚,曾凡江,刘波,等. 绿洲—荒漠过渡带四种植物光合及生理特征的研究[J]. 草业学报,2012,21(1):103-111.
- [12] 李清河,刘建锋,张景波,等. 乌兰布和沙漠东北部8种沙生灌木生长季末期的光合生理特性[J]. 西北植物学报,2007,26(11):2318-2323.
- [13] 李清河,张景波,李慧卿,等. 不同种源白刺幼苗生理生长对水分梯度的响应差异[J]. 林业科学,2008,44(1):52-56.
- [14] 周海燕,张景光,赵亮,等. 湿润条件下几种锦鸡儿属灌木的气体交换特征及调节机制[J]. 中国沙漠,2002,22(4):316-320.
- [15] 陈海玲,吴立伟,石凤翎,等. 苜蓿雄性不育系杂交组合光合特性及杂种优势分析[J]. 种子,2013,32(3):64-69.
- [16] 孙伟,王德利,王立,等. 模拟光条件下禾本科植物和藜科植物蒸腾特性与水分利用效率比较[J]. 生态学报,2003,23(4):814-819.
- [17] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. Annual review of plant physiology, 1982,33(1):317-345.
- [18] Sharkey T D. Estimating the rate of photorespiration in leaves[J]. Physiologia Plantarum, 1988,73(1):147-152.
- [19] Sam O, Jerez E, Dell'Amico J, et al. Water stress induced changes in anatomy of tomato leaf epidermes[J]. Biologia Plantarum, 2000,43(2):275-277.
- [20] 廖行,王百田,武晶,等. 不同水分条件下核桃蒸腾速率与光合速率的研究[J]. 水土保持研究,2007,14(4):30-34.
- [21] 张淑勇,周泽福,张光灿. 半干旱黄土丘陵区天然次生灌木山桃与山杏叶片气体交换参数日动态差异[J]. 生态学报,2009,29(1):499-507.
- [22] 樊卫国,李迎春. 梨属4个重要种的光合特性及水分利用率[J]. 西南农业学报,2007,19(6):1144-1146.
- [23] 孙惠玲,马剑英,王绍明,等. 准噶尔盆地荒漠植物碳同位素组成研究[J]. 中国沙漠,2007,27(6):972-976.
- [24] 丁晓纲,何茜,李吉跃,等. 毛乌素沙地樟子松和油松人工林光合生理特性[J]. 水土保持研究,2011,18(1):215-219.
- [25] Terashima I, Hikosaka K. Comparative ecophysiology of leaf and canopy photosynthesis[J]. Plant, Cell & Environment, 1995,18(10):1111-1128.