

# 中国沙棘、俄罗斯沙棘和俄罗斯沙棘 × 中国沙棘光合特性及影响因子

杜社妮<sup>1,2</sup>, 白岗栓<sup>1,2</sup>, 李代琼<sup>1,2</sup>

(1. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 在陕北黄土丘陵沟壑区用 LF6400 光合仪对中国沙棘、俄罗斯沙棘和俄罗斯沙棘 × 中国沙棘光合特性及影响因子进行了测定。测定结果表明三者的光合速率、气孔导度、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度、蒸腾速率日变化均为“双峰”曲线。中国沙棘光合“午休”现象较轻, 日光合速率和午后光合速率、气孔导度、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度、蒸腾速率极显著 ( $p < 0.01$ ) 高于俄罗斯沙棘和俄罗斯沙棘 × 中国沙棘。中国沙棘光合作用最适气孔导度、大气 CO<sub>2</sub> 浓度、空气相对湿度比俄罗斯沙棘小, 最适胞间 CO<sub>2</sub> 浓度、蒸腾速率、气温、光合有效辐射比俄罗斯沙棘高。中国沙棘在最适气孔导度、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度、蒸腾速率和大气 CO<sub>2</sub> 浓度下的光合速率比俄罗斯沙棘高; 在最适气温、空气相对湿度、光合有效辐射下的光合速率比俄罗斯沙棘低。俄罗斯沙棘 × 中国沙棘光合“午休”现象比中国沙棘强, 比俄罗斯沙棘弱, 午后光合速率与俄罗斯沙棘相近; 俄罗斯沙棘 × 中国沙棘最适气孔导度、大气 CO<sub>2</sub> 浓度高于中国沙棘和俄罗斯沙棘, 最适胞间 CO<sub>2</sub> 浓度低于中国沙棘和俄罗斯沙棘, 最适蒸腾速率、气温、空气相对湿度、光合有效辐射居于中国沙棘和俄罗斯沙棘之间。俄罗斯沙棘 × 中国沙棘在最适气孔导度下的光合速率高于中国沙棘和俄罗斯沙棘; 在最适胞间 CO<sub>2</sub> 浓度、蒸腾速率、气温、大气 CO<sub>2</sub> 浓度、空气相对湿度、光合有效辐射下的光合速率低于中国沙棘和俄罗斯沙棘。中国沙棘、俄罗斯沙棘和俄罗斯沙棘 × 中国沙棘的光合速率均与上午的气孔导度、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度、蒸腾速率、气温、大气 CO<sub>2</sub> 浓度、空气相对湿度、光合有效辐射显著相关, 均为“抛物线”关系。

**关键词:** 中国沙棘; 俄罗斯沙棘; 俄罗斯沙棘 × 中国沙棘; 光合特性; 植物因子; 环境因子

**文献标识码:** A      **文章编号:** 1000—288X(2008)04—0026—07      **中图分类号:** S793.6, Q945.11

## Photosynthetic Characteristics of Chinese Seabuckthorn, Russian Seabuckthorn, Russian Seabuckthorn × Chinese Seabuckthorn and Their Influence Factors

DU She-mi<sup>1,2</sup>, BAI Gang-shuan<sup>1,2</sup>, LI Dai-qiong<sup>2</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** In order to understand the photosynthetic characteristics of Chinese seabuckthorn, Russian seabuckthorn, and Russian seabuckthorn × Chinese seabuckthorn, research on the 3 species and their influence factors were conducted with Portable LF6400 Photosynthesis System in the loess hilly and gully region of Northern Shaanxi Province. Results showed that diurnal courses of photosynthetic rates, stomatal conductance, intercellular CO<sub>2</sub> concentration, and transpiration rate of the 3 species were the double-peak type curves. Midday depression of Chinese seabuckthorn was light, and diurnal photosynthetic rates and afternoon photosynthetic rates were significantly higher than Russian seabuckthorn and Russian seabuckthorn × Chinese seabuckthorn ( $p < 0.01$ ). Stomatal conductance, intercellular CO<sub>2</sub> concentration, and transpiration rate in afternoon for Chinese seabuckthorn were significantly higher than Russian seabuckthorn and Russian seabuckthorn × Chinese seabuckthorn ( $p < 0.01$ ). Optimum stomatal conductance, air CO<sub>2</sub> concentration, and air relative humidity for photosynthesis of Chinese seabuckthorn were lower than Russian seabuckthorn, and optimum intercellular CO<sub>2</sub> concentration, transpiration rate, air temperature, and photosynthetic active

收稿日期: 2008-03-04

修回日期: 2008-04-04

资助项目: 国家“十一五”科技攻关项目 (2006BAJ10B06; 2006BAD09B07)

作者简介: 杜社妮 (1966—), 女 (汉族), 陕西省杨陵区人, 助理研究员, 主要从事蔬菜栽培方面的研究。E-mail: dusn@cern.ac.cn; sнду@nw-suaf.edu.cn.

radiation were higher than Russian seabuckthorn. Under the conditions of optimum stomatal conductance, intercellular CO<sub>2</sub> concentration, transpiration rate, and air CO<sub>2</sub> concentration, photosynthetic rates of Chinese seabuckthorn were higher than Russian seabuckthorn. Under the conditions of optimum air temperature, air relative humidity, and photosynthetic active radiation, photosynthetic rates of Chinese seabuckthorn were lower than Russian seabuckthorn. Midday depression of Russian seabuckthorn × Chinese seabuckthorn was lower than Chinese seabuckthorn and higher than Russian seabuckthorn, and photosynthetic rates were similar to Russian seabuckthorn in afternoon. Optimums stomatal conductance and air CO<sub>2</sub> concentration for photosynthesis of Russian seabuckthorn × Chinese seabuckthorn were higher than Chinese seabuckthorn and Russian seabuckthorn; its optimum intercellular CO<sub>2</sub> concentration was lower than Chinese seabuckthorn and Russian seabuckthorn; and its optimum transpiration rate, air temperature, air relative humidity, and photosynthetic active radiation were between Chinese seabuckthorn and Russian seabuckthorn. Under the condition of optimum stomatal conductance, photosynthetic rates of Russian seabuckthorn × Chinese seabuckthorn were higher than Chinese seabuckthorn and Russian seabuckthorn. Under the condition of optimum intercellular CO<sub>2</sub> concentration, transpiration rate, air temperature, air CO<sub>2</sub> concentration, air relative humidity, and photosynthetic active radiation, photosynthetic rates of Russian seabuckthorn × Chinese seabuckthorn were lower than Chinese seabuckthorn and Russian seabuckthorn. Photosynthetic rates of the 3 species had significantly correlations with stomatal conductance, intercellular CO<sub>2</sub> concentration, transpiration rate, air temperature, air CO<sub>2</sub> concentration, air relative humidity, and photosynthetic active radiation in forenoon, and their relationships might be described by a parabola.

**Keywords:** Chinese seabuckthorn; Russian seabuckthorn; Russian seabuckthorn × Chinese seabuckthorn; photosynthetic characteristic; plant factor; environment factor

沙棘 (*Hippophae rhamnoides* Linn.) 为胡颓子科 (*Elaeagnaceae*) 沙棘属 (*Hippophae* L.) 落叶灌木或小乔木, 分布于欧亚大陆温带、寒温带及亚热带高山区。我国西北地区和黄土高原分布着大量的中国沙棘 (*H. rhamnoides* Linn. subsp. *sinensis* Rousi)。中国沙棘适应性强, 生长迅速, 是保持水土, 防风固沙, 改良土壤的优良树种, 且具有较高的医疗保健作用。俄罗斯沙棘 (*Hippophae rhamnoides*) 是以蒙古沙棘 (*H. rhamnoides* Linn. subsp. *mongolica*) 和海滨沙棘 (*H. rhamnoides* Linn. subsp. *rhamnoides*) 为基础选育的优良品种群, 果大, 刺少或无刺, 产量高, 便于经济栽培。俄罗斯沙棘在我国西北、华北地区适应性差, 俄罗斯沙棘与中国沙棘杂交选育适应性强的优良品种成为研究的热点<sup>[1-2]</sup>。阮成江、徐炳成、杨劼对中国沙棘光合速率与气象因子、地形、土壤水分和沙棘自身因子进行了测定, 表明中国沙棘光合速率与气温、相对湿度、光合有效辐射、CO<sub>2</sub> 浓度、林地土壤水分、地形、叶片气孔导度及细胞间 CO<sub>2</sub> 浓度有非常显著的关系<sup>[3-5]</sup>; 刘瑞香对中国沙棘和俄罗斯沙棘光合日进程研究后发现俄罗斯沙棘的光合能力优于中国沙棘<sup>[6]</sup>; 塔依尔对中亚沙棘 (*H. rhamnoides* Linn. subsp. *Turkestanica* Rousi) 的光合特性进行了测定, 表明中亚沙棘光合速率与气象因子密切相

关<sup>[7-8]</sup>。有关俄罗斯沙棘 × 中国沙棘光合特性报道未见报道。同时同地开展中国沙棘、俄罗斯沙棘和俄罗斯沙棘 × 中国沙棘光合特性变化规律及与影响因子研究, 分析其光合作用对环境的响应程度和生态适应性, 可为沙棘优良品种的选育与栽培, 提高沙棘生产力提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地的自然概况

试验地位于中国科学院安塞水土保持综合试验站川地试验场。该站地处陕北黄土丘陵沟壑区的安塞县, 年均气温为 8.8℃, 10℃ 的活动积温为 3 171.2℃, 年太阳辐射为 528.6 kJ/cm<sup>2</sup>, 日照时数为 2 415.6 h, 年降水量为 530 mm, 无霜期 159 d。该区植被属森林草原区, 土壤为黄绵土。

### 1.2 试验材料

试材均为 1998 年春季定植的沙棘, 测试植株均为雌株。中国沙棘为果形较大的陕西黄龙沙棘, 俄罗斯沙棘为从俄罗斯引进的优良品种泽梁, 俄罗斯沙棘 × 中国沙棘为从内蒙古磴口中国林科院引进的楚伊 (俄罗斯沙棘优良品种) × 中国沙棘。

### 1.3 测定方法

2006 年 7 月 10—20 日, 在 3 个树种内各选 1 株作为测定株, 在测定株树冠外围中部东南部选择下部

结有果实的新生枝作为测定枝,在测定枝上选择 2 片较靠顶端的完整叶片作为测定叶,选择晴天用 LI-6400 便携式光合仪,从早晨 8 时到下午 6 时,在自然条件下对沙棘光合速率进行活体测定,每小时测定 1 次,每个叶片重复 1 次。测定气源引自沙棘林地上空 3 m 处。净光合速率 ( $P_n$ )、气孔导度 ( $G_s$ )、胞间  $CO_2$  浓度 ( $C_i$ )、蒸腾速率 ( $T_r$ )、气温 ( $T_a$ )、大气  $CO_2$  浓度 ( $C_a$ )、空气相对湿度 ( $R_H$ )、光合有效辐射 (PAR) 等参数均由 LI-6400 便携式光合系统同步测出。叶面积用 LI-3000A 便携式叶面积仪测定。

#### 1.4 数据分析

用新复极差法检验不同树种间的差异显著性;用 Excel 软件处理分析不同因子间的相关性。

## 2 结果与分析

### 2.1 光合速率日变化

清晨随着光照增强,气温升高,俄罗斯沙棘、中国沙棘、俄罗斯沙棘 × 中国沙棘的光合速率逐渐增大,其中中国沙棘在 9:00—12:00 时出现第一次高峰,峰值出现在 11:00 时左右,为  $24.20 \mu\text{molCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;俄罗斯沙棘在 8:00—11:00 时出现第一次高峰,峰值出现在 10:00 时左右,为  $22.66 \mu\text{molCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;俄罗斯沙棘 × 中国沙棘在 9:00—11:00 时出现第一次高峰,峰值出现在 10:00 时左右,为  $23.70 \mu\text{molCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。中国沙棘 9:00—16:00 时光合速率较高,其第二个峰值出现在 15:00 时左右,为  $20.84 \mu\text{molCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;俄罗斯沙棘、俄罗斯沙棘 × 中国沙棘光合速率第二次高峰均出现在 14:30—16:00 时,峰值在 15:00 左右,分别为  $11.48 \mu\text{molCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  和  $11.52 \mu\text{molCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  (图 1)。中国沙棘日光合速率平均为  $15.86 \mu\text{molCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,俄罗斯沙棘为  $12.15 \mu\text{molCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,俄罗斯沙棘 × 中国沙棘为  $12.24 \mu\text{molCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。中国沙棘日光合速率极显著 ( $p < 0.01$ ) 高于俄罗斯沙棘和俄罗斯沙棘 × 中国沙棘,俄罗斯沙棘 × 中国沙棘基本与俄罗斯沙棘相同。下午 13:00—18:00 时中国沙棘光合速率平均为  $13.80 \mu\text{molCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,俄罗斯沙棘为  $7.76 \mu\text{molCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,俄罗斯沙棘 × 中国沙棘为  $8.81 \mu\text{molCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,中国沙棘午后光合速率亦极显著高于俄罗斯沙棘和俄罗斯沙棘 × 中国沙棘。

### 2.2 植物因素对光合速率的影响

植物因素对光合速率有影响的主要有气孔导度、胞间  $CO_2$  浓度和蒸腾强度。

#### 2.2.1 气孔导度 俄罗斯沙棘、中国沙棘、俄罗斯沙

棘 × 中国沙棘的气孔导度日变化均为双峰曲线 (图 2),第一个高峰中国沙棘、俄罗斯沙棘在 7:30—10:00 时,俄罗斯沙棘 × 中国沙棘在 7:30—11:00 时,峰值均在 8:00 时左右。第二个高峰中国沙棘在 13:00—16:00 时,峰值在 14:00 左右;俄罗斯沙棘在 14:30—16:00 时,峰值在 15:00 时左右;俄罗斯沙棘 × 中国沙棘在 15:00—17:00 时,峰值在 16:00 时左右。第一个高峰中国沙棘最低,为  $0.2745 \text{ molH}_2\text{O}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,俄罗斯沙棘最高,为  $0.3832 \text{ molH}_2\text{O}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;第二个高峰中国沙棘最高,为  $0.2231 \text{ molH}_2\text{O}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,俄罗斯沙棘 × 中国沙棘最低,为  $0.1067 \text{ molH}_2\text{O}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。午后中国沙棘的气孔导度极显著高于俄罗斯沙棘和俄罗斯沙棘 × 中国沙棘。

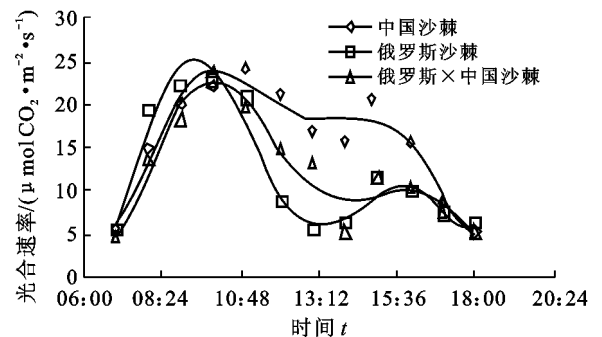


图 1 3 种沙棘光合速率日变化状况

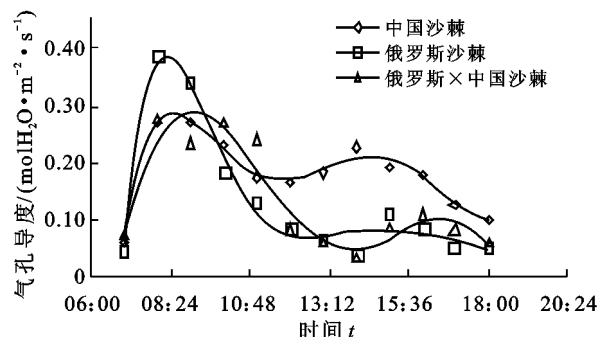


图 2 3 种沙棘气孔导度日变化状况

中国沙棘光合速率与 8:00—12:00 时气孔导度相关,俄罗斯沙棘、俄罗斯沙棘 × 中国沙棘光合速率与 8:00—11:00 时气孔导度相关。3 种沙棘光合速率与气孔导度的关系均为“抛物线”关系,即光合速率均随气孔导度的增大而提高,当气孔导度增加到一定值后,光合速率随气孔导度的增大而降低 (图 3)。中国沙棘当气孔导度为  $0.2024 \text{ molH}_2\text{O}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  时,光合速率最大值为  $24.20 \mu\text{molCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。俄罗斯沙棘当气孔导度为  $0.2462 \text{ molH}_2\text{O}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  时,光合速率最大值为  $23.90 \mu\text{molCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。俄罗斯沙棘 × 中国沙棘当气孔导度为  $0.2530 \text{ molH}_2\text{O}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  时,光合速率最大值为  $25.71 \mu\text{molCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

·s)。俄罗斯沙棘 × 中国沙棘光合速率随气孔导度变化程度比中国沙棘、俄罗斯沙棘剧烈。

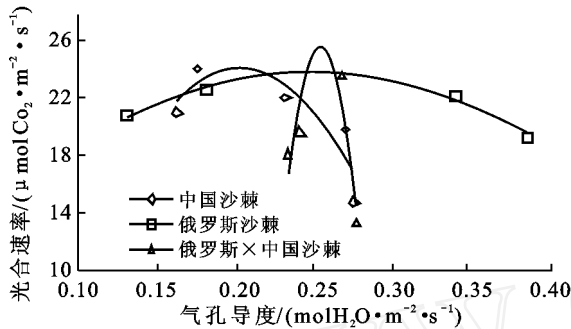


图 3 3 种沙棘光合速率与气孔导度的关系

中国沙棘光合速率与气孔导度的回归方程为

$$P_n = -147.8 C_s^2 + 598.33 C_s - 36.355$$

$$R^2 = 0.7712$$

俄罗斯沙棘光合速率与气孔导度的回归方程为

$$P_n = -233.61 C_s^2 + 115.01 C_s + 9.7459$$

$$R^2 = 0.9775$$

俄罗斯沙棘 × 中国沙棘光合速率与气孔导度的回归方程为

$$P_n = -21.967 C_s^2 + 1.115 C_s - 1.380.3$$

$$R^2 = 0.7721$$

式中:  $P_n$  ——光合速率 [ $\mu\text{molCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ];  $C_s$  ——气孔导度 [ $\text{molH}_2\text{O}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ];  $R^2$  ——复相关系数。

2.2.2 胞间  $\text{CO}_2$  浓度 俄罗斯沙棘、中国沙棘、俄罗斯沙棘 × 中国沙棘胞间  $\text{CO}_2$  浓度日变化均为双峰曲线,第一次高峰及峰值均在 8:00 时左右,胞间  $\text{CO}_2$  浓度较相近。第二次高峰中国沙棘在 16:00—18:00 时,峰值在 17:00 时左右;俄罗斯沙棘、俄罗斯沙棘 × 中国沙棘在 15:00—17:00 时,峰值在 16:00 时左右。第二次高峰中国沙棘最高,俄罗斯沙棘最低(图 4)。午后中国沙棘胞间  $\text{CO}_2$  浓度极显著高于俄罗斯沙棘 × 中国沙棘,俄罗斯沙棘 × 中国沙棘极显著高于俄罗斯沙棘。

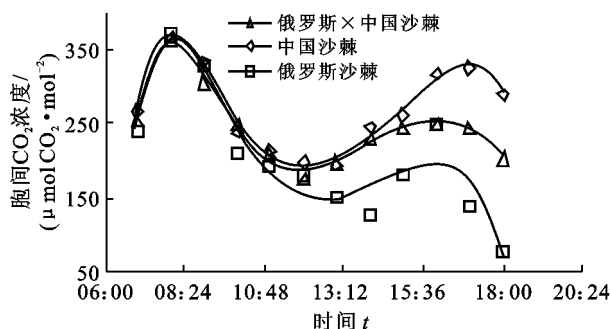


图 4 3 种沙棘细胞间隙  $\text{CO}_2$  日变化状况

中国沙棘、俄罗斯沙棘、俄罗斯沙棘 × 中国沙棘的光合速率均与 8:00—11:00 时胞间  $\text{CO}_2$  浓度相关,三者光合速率与胞间  $\text{CO}_2$  浓度的关系均为“抛物线”关系(图 5)。中国沙棘当胞间  $\text{CO}_2$  浓度为  $263 \mu\text{molCO}_2/\text{mol}$ ,光合速率最大值为  $23.86 \mu\text{molCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。俄罗斯沙棘当胞间  $\text{CO}_2$  浓度为  $257 \mu\text{molCO}_2/\text{mol}$ ,光合速率最大值为  $22.18 \mu\text{molCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。俄罗斯沙棘 × 中国沙棘当胞间  $\text{CO}_2$  浓度为  $251 \mu\text{molCO}_2/\text{mol}$ ,光合速率最大值为  $21.49 \mu\text{molCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

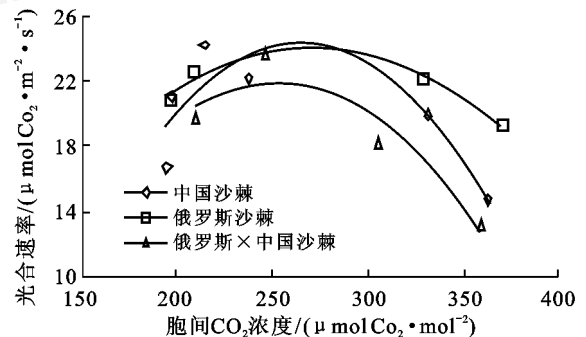


图 5 3 种沙棘光合速率与细胞间隙  $\text{CO}_2$  浓度的关系

中国沙棘光合速率与胞间  $\text{CO}_2$  浓度回归方程为

$$P_n = -0.001 C_i^2 + 0.5269 C_i - 45.545$$

$$R^2 = 0.7343$$

俄罗斯沙棘光合速率与胞间  $\text{CO}_2$  浓度的回归方程为

$$P_n = -0.0005 C_i^2 + 0.2567 C_i - 10.765$$

$$R^2 = 0.9287$$

俄罗斯沙棘 × 中国沙棘光合速率与胞间  $\text{CO}_2$  浓度的回归方程为

$$P_n = -0.0008 C_i^2 + 0.4009 C_i - 28.733$$

$$R^2 = 0.8889$$

式中:  $C_i$  ——胞间  $\text{CO}_2$  浓度 [ $\mu\text{molCO}_2/\text{mol}$ ]。

2.2.3 蒸腾速率 俄罗斯沙棘、中国沙棘、俄罗斯沙棘 × 中国沙棘蒸腾速率日变化均为双峰曲线。中国沙棘 10:00—17:00 时蒸腾速率均较高,变化幅度较小,第一个峰值在 12:00 时左右,第二个峰值在 16:00 时左右。俄罗斯沙棘、俄罗斯沙棘 × 中国沙棘第一个高峰在 9:00—12:00 时,峰值在 11:00 时左右;俄罗斯沙棘第二个高峰在 14:30—16:00 时,峰值在 15:00 时左右;俄罗斯沙棘 × 中国沙棘第二个高峰在 15:00—17:00 时,峰值在 16:00 时左右。无论是第一个高峰还是第二个高峰,均是中国沙棘最高,俄罗斯沙棘最低(图 6)。午后中国沙棘的蒸腾速率极显著高于俄罗斯沙棘和俄罗斯沙棘 × 中国沙棘。

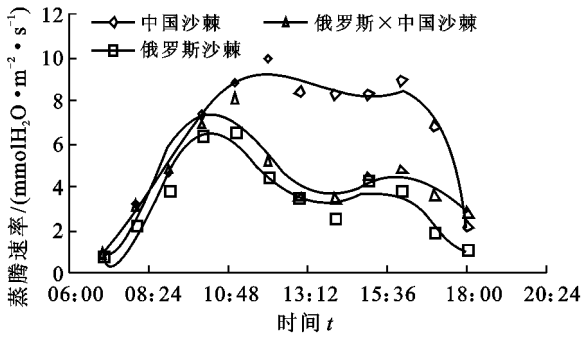


图 6 3种沙棘蒸腾速率日变化

中国沙棘光合速率与 8:00—12:00 时蒸腾速率较相关,俄罗斯沙棘、俄罗斯沙棘 x 中国沙棘的光合速率与 8:00—11:00 时蒸腾速率较相关,三者光合速率与蒸腾速率关系均为“抛物线”关系(图 7)。中国沙棘当蒸腾速率为 7.88 mmolH<sub>2</sub>O/(m<sup>2</sup>·s),光合速率最大值为 23.25 μmolCO<sub>2</sub>/(m<sup>2</sup>·s)。俄罗斯沙棘当蒸腾速率为 4.93 mmolH<sub>2</sub>O/(m<sup>2</sup>·s),光合速率最大值为 22.99 μmolCO<sub>2</sub>/(m<sup>2</sup>·s)。俄罗斯沙棘 x 中国沙棘当蒸腾速率为 6.66 mmolH<sub>2</sub>O/(m<sup>2</sup>·s),光合速率最大值为 22.11 μmolCO<sub>2</sub>/(m<sup>2</sup>·s)。

中国沙棘光合速率与蒸腾速率的回归方程为

$$P_n = -0.3878 T_r^2 + 6.1136 T_r - 0.8473$$

$$R^2 = 0.9327$$

俄罗斯沙棘光合速率与蒸腾速率的回归方程为

$$P_n = -0.5255 T_r^2 + 5.1764 T_r + 10.243$$

$$R^2 = 0.8528$$

俄罗斯沙棘 x 中国沙棘光合速率与蒸腾速率的回归方程为

$$P_n = -0.7617 T_r^2 + 10.145 T_r - 11.669$$

$$R^2 = 0.9015$$

式中:  $T_r$  ——蒸腾速率 [mmolH<sub>2</sub>O/(m<sup>2</sup>·s)]。

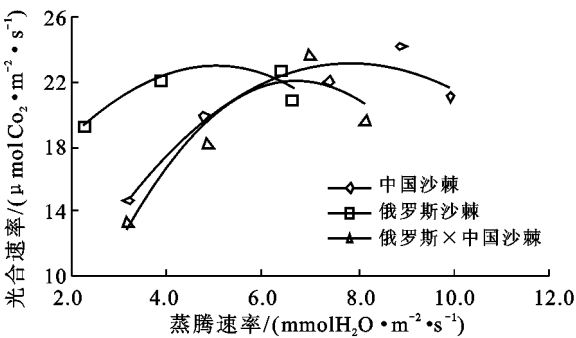


图 7 3种沙棘光合速率与蒸腾速率的关系

### 2.3 环境因素对光合速率的影响

对光合速率有影响的环境因素主要有气温、大气 CO<sub>2</sub> 浓度、空气相对湿度和光合有效辐射。

#### 2.3.1 气温 俄罗斯沙棘、中国沙棘、俄罗斯沙棘 x

中国沙棘林地气温变化在 11:00 时之前基本相同。由于不同林地的树高、郁闭度、蒸腾强度的不同,11:00—18:00 时中国沙棘较高,11:00—14:00 时俄罗斯沙棘 x 中国沙棘较低,14:00 时以后俄罗斯沙棘较低(图 8)。

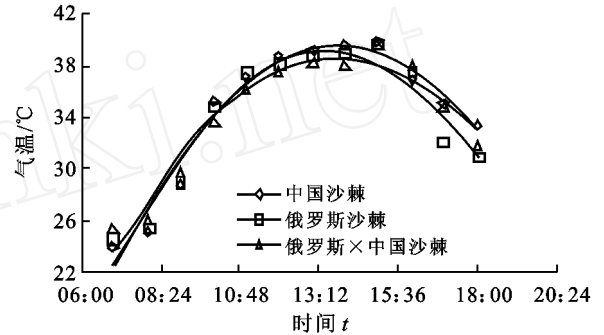


图 8 测定日的气温日变化

俄罗斯沙棘、中国沙棘、俄罗斯沙棘 x 中国沙棘的光合速率与 7:00—13:00 时气温相关性较好,均与气温为“抛物线”关系(图 9)。中国沙棘当气温为 33.49,光合速率最大值为 24.64 μmolCO<sub>2</sub>/(m<sup>2</sup>·s)。俄罗斯沙棘当气温为 31.52,光合速率最大值为 27.69 μmolCO<sub>2</sub>/(m<sup>2</sup>·s)。俄罗斯沙棘 x 中国沙棘当气温为 32.59,光合速率最大值为 23.21 μmolCO<sub>2</sub>/(m<sup>2</sup>·s)。

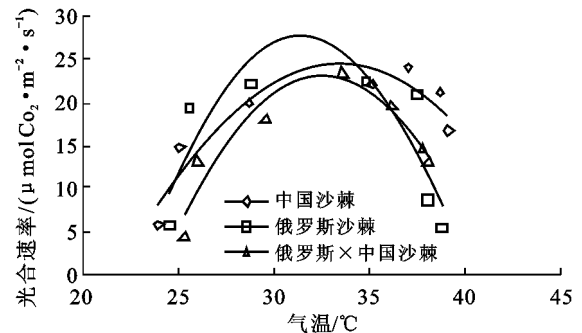


图 9 3种沙棘光合速率与气温的关系

中国沙棘光合速率与气温的回归方程为

$$P_n = -0.1849 T_a^2 + 12.384 T_a - 182.72$$

$$R^2 = 0.8791$$

俄罗斯沙棘光合速率与气温的回归方程为

$$P_n = -0.385 T_a^2 + 24.271 T_a - 354.83$$

$$R^2 = 0.7263$$

俄罗斯沙棘 x 中国沙棘光合速率与气温的回归方程为

$$P_n = -0.312 T_a^2 + 20.337 T_a - 308.2$$

$$R^2 = 0.8985$$

式中:  $T_a$  ——气温( )

#### 2.3.2 林地大气 CO<sub>2</sub> 浓度 俄罗斯沙棘、中国沙

棘、俄罗斯沙棘 × 中国沙棘林地 CO<sub>2</sub> 浓度日变化均为双峰曲线,第一次高峰均在 7:00—10:00 时左右,第二次高峰在 14:00—17:00 时(图 10)。8:00—12:00 时俄罗斯沙棘 × 中国沙棘林地 CO<sub>2</sub> 浓度较高,俄罗斯沙棘较低。12:00—18:00 时中国沙棘林地 CO<sub>2</sub> 浓度较高,13:00—15:00 时俄罗斯沙棘 × 中国沙棘较低,15:00—18:00 时俄罗斯沙棘和俄罗斯沙棘 × 中国沙棘林地 CO<sub>2</sub> 浓度基本相同。

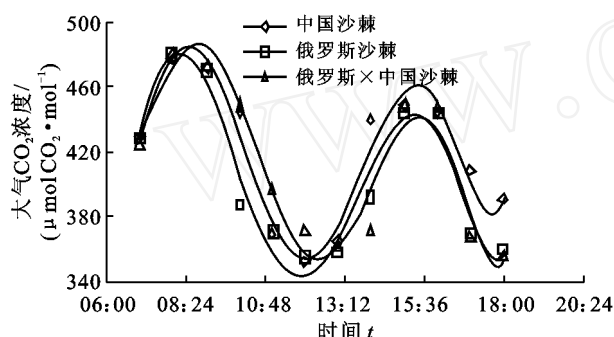


图 10 测定日的大气 CO<sub>2</sub> 浓度日变化

中国沙棘、俄罗斯沙棘 × 中国沙棘光合速率与 8:00—12:00 时林地 CO<sub>2</sub> 浓度较相关,俄罗斯沙棘光合速率与 8:00—11:00 时林地 CO<sub>2</sub> 浓度较相关,三者光合速率与林地 CO<sub>2</sub> 浓度为“抛物线”关系。

2.3.3 林地空气相对湿度 俄罗斯沙棘、中国沙棘、俄罗斯沙棘 × 中国沙棘林地空气相对湿度均为早晚高,中午低,3 者差异不明显。

俄罗斯沙棘、中国沙棘、俄罗斯沙棘 × 中国沙棘光合速率均与 8:00—13:00 时林地空气相对湿度较相关,均为“抛物线”关系。中国沙棘当空气相对湿度为 48.75%,光合速率最大值为 24.03 μmolCO<sub>2</sub>/ (m<sup>2</sup> · s)。俄罗斯沙棘当空气相对湿度为 59.63%,光合速率最大值为 25.47 μmolCO<sub>2</sub>/ (m<sup>2</sup> · s)。俄罗斯沙棘 × 中国沙棘当空气相对湿度为 51.74%,光合速率最大值为 21.87 μmolCO<sub>2</sub>/ (m<sup>2</sup> · s)。

2.3.4 林地光合有效辐射 俄罗斯沙棘、中国沙棘、俄罗斯沙棘 × 中国沙棘林地光合有效辐射均为早晚低,中午高,3 者差异不明显。中国沙棘的光合速率与 8:00—12:00 时林地光合有效辐射较相关,俄罗斯沙棘、俄罗斯沙棘 × 中国沙棘与 8:00—11:00 时林地光合有效辐射较相关,均与林地光合有效辐射为“抛物线”关系。

中国沙棘当林地光合有效辐射为 1 698 μmol/ (m<sup>2</sup> · s),光合速率最大值为 22.37 μmolCO<sub>2</sub>/ (m<sup>2</sup> · s)。俄罗斯沙棘当林地光合有效辐射为 1 559 μmol/ (m<sup>2</sup> · s),光合速率最大值为 22.46 μmolCO<sub>2</sub>/ (m<sup>2</sup> · s)。

俄罗斯沙棘 × 中国沙棘当林地光合有效辐射为 1 651 μmol/ (m<sup>2</sup> · s),光合速率最大值为 20.67 μmolCO<sub>2</sub>/ (m<sup>2</sup> · s)。

### 3 讨论

中国沙棘、俄罗斯沙棘、俄罗斯沙棘 × 中国沙棘光合速率日变化均为“双峰”曲线,这与阮成江测定的中国沙棘、刘瑞香测定的俄罗斯沙棘、塔依尔测定的中亚沙棘日变化规律相同。中国沙棘日光合速率、午后光合速率显著高于俄罗斯沙棘。而刘瑞香的测定结果为俄罗斯沙棘高于中国沙棘,可能是测定地点不同引起的。刘瑞香测定地点为黄甫川流域,夏季气候冷凉,午后无高温,较适宜俄罗斯沙棘生长。而黄土丘陵区夏季较炎热,午后有高温,较适宜中国沙棘生长。受俄罗斯沙棘、中国沙棘的影响,俄罗斯沙棘 × 中国沙棘“午休”现象比中国沙棘强,比俄罗斯沙棘弱,午后光合速率与俄罗斯沙棘相近。

中国沙棘、俄罗斯沙棘的气孔导度、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度、蒸腾速率日变化均为“双峰”曲线,这与阮成江、徐炳成等测定结果相同。中国沙棘午后的气孔导度、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度、蒸腾速率极显著高于俄罗斯沙棘,说明中国沙棘对午后高温的适应性比俄罗斯沙棘强。俄罗斯沙棘 × 中国沙棘午后气孔导度与俄罗斯沙棘基本相近,蒸腾速率略高于俄罗斯沙棘,胞间 CO<sub>2</sub> 浓度高于俄罗斯沙棘而低于中国沙棘,说明俄罗斯沙棘 × 中国沙棘继承了俄罗斯沙棘与中国沙棘的性状,且母系遗传多于父系遗传。中国沙棘光合速率与 8:00—12:00 时气孔导度、蒸腾速率和 8:00—11:00 时胞间 CO<sub>2</sub> 浓度相关,俄罗斯沙棘、俄罗斯沙棘 × 中国沙棘与 8:00—11:00 时气孔导度、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度、蒸腾速率相关,这与阮成江测定的与全日气孔导度、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度相关显著不同,这可能是由于测定时间、测定叶片不同引起的。中国沙棘、俄罗斯沙棘、俄罗斯沙棘 × 中国沙棘的光合速率与气孔导度、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度、蒸腾速率关系均为“抛物线”关系,这与阮成江测定光合速率与气孔导度之间为对数关系,与胞间 CO<sub>2</sub> 浓度为直线关系不同,这可能是与测定时期和参与分析的数值时段有关。中国沙棘光合作用最适气孔导度比俄罗斯沙棘小,最适气孔导度下光合速率比俄罗斯沙棘高;俄罗斯沙棘、中国沙棘对俄罗斯沙棘 × 中国沙棘最适光合作用气孔导度和最适气孔导度下的光合速率影响为正叠加效应。中国沙棘光合作用最适胞间 CO<sub>2</sub> 浓度、最适胞间 CO<sub>2</sub> 浓度下的光合速率比俄罗斯沙棘高;俄罗斯沙棘、中国沙棘对俄罗斯沙棘 × 中国沙棘最适光合作用胞间 CO<sub>2</sub> 浓度和

最适胞间  $\text{CO}_2$  浓度下的光合速率影响为负叠加效应。中国沙棘光合作用最适蒸腾速率、最适蒸腾速率下的光合速率比俄罗斯沙棘高;俄罗斯沙棘、中国沙棘对俄罗斯沙棘  $\times$  中国沙棘最适光合作用蒸腾速率影响为折中效应,最适蒸腾速率下的光合速率影响为负叠加效应。

中国沙棘、俄罗斯沙棘、俄罗斯沙棘  $\times$  中国沙棘的光合速率均与 7:00—13:00 时的气温,8:00—13:00 时林地空气相对湿度相关;中国沙棘、俄罗斯沙棘  $\times$  中国沙棘光合速率与 8:00—12:00 时林地大气  $\text{CO}_2$  浓度相关,俄罗斯沙棘与 8:00—11:00 时林地大气  $\text{CO}_2$  浓度相关;中国沙棘光合速率与 8:00—12:00 时林地光合有效辐射较相关,俄罗斯沙棘、俄罗斯沙棘  $\times$  中国沙棘与 8:00—11:00 时林地光合有效辐射较相关。中国沙棘的光合速率与林地大气  $\text{CO}_2$  浓度、林地光合有效辐射相关时段比俄罗斯沙棘略长。中国沙棘最适宜光合作用气温高于俄罗斯沙棘,俄罗斯沙棘、中国沙棘对俄罗斯沙棘  $\times$  中国沙棘最适宜光合作用气温影响为折中效应;在最适宜温度下,俄罗斯沙棘光合速率高于中国沙棘,俄罗斯沙棘、中国沙棘对俄罗斯沙棘  $\times$  中国沙棘最适宜光合作用气温影响为折中效应。中国沙棘最适宜光合作用林地大气  $\text{CO}_2$  浓度低于俄罗斯沙棘,俄罗斯沙棘、中国沙棘对俄罗斯沙棘  $\times$  中国沙棘光合作用最适林地大气  $\text{CO}_2$  浓度影响为正叠加效应;在最适宜林地大气  $\text{CO}_2$  浓度下,中国沙棘的光合速率高于俄罗斯沙棘,俄罗斯沙棘、中国沙棘对俄罗斯沙棘  $\times$  中国沙棘最适林地  $\text{CO}_2$  浓度光合速率影响为负叠加效应。中国沙棘最适宜光合作用林地空气相对湿度低于俄罗斯沙棘,俄罗斯沙棘、中国沙棘对俄罗斯沙棘  $\times$  中国沙棘最适光合作用林地空气相对湿度影响为折中效应;在最适林地空气相对湿度下,俄罗斯沙棘光合速率高于中国沙棘,俄罗斯沙棘、中国沙棘对俄罗斯沙棘  $\times$  中国沙棘最适林地空气相对湿度下光合速率影响为负叠加效应。中国沙棘最适光合作用林地光合有效辐射高于俄罗斯沙棘,俄罗斯沙棘、中国沙棘对俄罗斯沙棘  $\times$  中国沙棘最适光合作用林地光合有效辐射影响为折中效应;在最适林地光合有效辐射下,俄罗斯沙棘光

合速率略高于中国沙棘,俄罗斯沙棘、中国沙棘对俄罗斯沙棘  $\times$  中国沙棘最适林地光合有效辐射光合速率影响为负叠加效应。

中国沙棘、俄罗斯沙棘由于产地、生态类型不同,光合速率和植物因子对光合速率的影响有着各自的特征。中国沙棘光合“午休”现象较轻,日光合速率和午后光合速率极显著高于俄罗斯沙棘和俄罗斯沙棘  $\times$  中国沙棘;中国沙棘午后气孔导度、胞间  $\text{CO}_2$  浓度、蒸腾速率显著高于俄罗斯沙棘;光合作用最适气孔导度比俄罗斯沙棘小,最适胞间  $\text{CO}_2$  浓度、蒸腾速率比俄罗斯沙棘高。中国沙棘光合作用需求的温度、光合有效辐射比俄罗斯沙棘高,林地大气  $\text{CO}_2$  浓度、林地空气相对湿度比俄罗斯沙棘低。俄罗斯沙棘、中国沙棘对俄罗斯沙棘  $\times$  中国沙棘日光合速率影响为折中效应,对植物因子、环境因子影响有的为正效应,有的为折中效应,有的为负效应。俄罗斯沙棘  $\times$  中国沙棘光合作用特征及影响因子多与俄罗斯沙棘相近。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 李代琼,黄瑾,姜峻,等. 半干旱黄土丘陵区沙棘优良品种引种栽培试验研究[J]. 国际沙棘研究与开发, 2003, 1(2): 23—27.
- [2] 李代琼,白岗栓,姜峻,等. 黄土丘陵区沙棘优良品种引种试验研究[J]. 沙棘, 2005, 18(2): 6—10.
- [3] 阮成江,李代琼. 半干旱黄土丘陵区沙棘的光合特征及其影响因子[J]. 植物资源与环境学报, 2000, 9(1): 16—21.
- [4] 徐炳成,山仑,黄瑾. 黄土丘陵沟壑区不同立地条件下沙棘光合生理日变化特征比较[J]. 西北植物学报, 2003, 23(6): 949—953.
- [5] 杨劫,李国强,曹云. 皇甫川流域中国沙棘光合特征分析[J]. 水土保持学报, 2004, 18(2): 148—151.
- [6] 刘瑞香. 不同土壤水分条件对中国沙棘和俄罗斯沙棘的光合和蒸腾作用的影响[J]. 水土保持通报, 2006, 26(1): 1—5, 15.
- [7] 塔依尔,宋于洋,周源. 沙棘光合速率与气象因子变化规律的研究[J]. 湖北农业科学, 2006, 45(5): 634—637.
- [8] 塔依尔,宋于洋,周源. 气象因子变化对沙棘速生期和果实成熟期光合速率的影响[J]. 西北林学院学报, 2006, 21(5): 37—39.