

黄土高原水蚀风蚀区林木光合特征研究

周海光¹, 刘广全^{1,2*}, 焦 醒¹, 王鸿²

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100044; 2. 西北农林科技大学, 陕西 杨陵 712100)

摘 要:使用 Li-6400Q 光合仪对黄土高原水蚀风蚀复合区河北杨、小叶杨、山杏、山桃、柠条、沙棘 6 树种光合生理生态指标及环境因子进行了测定。结果表明,所测定树种光饱和点均较高,较适应当地高光强环境,乔木光补偿点低于灌木,乔木对光能利用率较高。所测定树种净光合速率日变化沙棘呈双峰曲线,其他为单峰型曲线,日变化受自身和环境因素综合或交错控制。所测定树种日均净光合速率分别为 14.21 ± 1.78 、 14.55 ± 2.18 、 12.12 ± 2.15 、 12.75 ± 3.36 、 12.32 ± 2.79 、 $12.46 \pm 3.85 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,杨树的较高,日变化幅度较小。气孔导度和胞间 CO_2 浓度日变化规律性明显,乔木的较灌木的高,且日变化相对稳定。所测定树种蒸腾速率日变化节律明显,日平均蒸腾速率分别为 5.37 ± 1.85 、 5.50 ± 1.95 、 2.96 ± 0.97 、 3.29 ± 1.06 、 4.11 ± 1.17 、 $3.41 \pm 1.23 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。测定树种日平均水分利用效率分别为 2.99 ± 1.37 、 3.09 ± 1.76 、 4.61 ± 2.15 、 4.10 ± 1.35 、 3.09 ± 0.65 、 $3.80 \pm 0.58 \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$,河北杨、小叶杨和柠条的较低。

关键词:黄土高原;水蚀风蚀区;人工植被;光合生理特性

中图分类号:S718.45 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-7461(2008)05-0012-06

Photosynthetic Characteristics of Some Tree Species in Wind-water Erosion Crisscross Region in the Loess Plateau

ZHOU Hai-guang¹, LIU Guang-quan^{1,2*}, JIAO Xing¹, WANG Hong-zhe²

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China;

2. Northwest A&F University, Shaanxi, Yangling 712100, China)

Abstract: Characteristics of photosynthetic rate, the transpiration rate and their correlations with the environmental factors were investigated of *Populus hopeiensis*, *P. simonii*, *Prunus davidiana*, *Armeniaca ansu*, *Caragana* spp., and *Hippophae rhamnoides* in the mixed area with both water and wind erosion in the Loess Plateau by using Li-6400Q photosynthesis system. The results indicated that the light saturation points of the 6 species were so high that they could adapt to the local high lighted climate. The light compensation points of trees were lower than those of the shrubs. The light use efficiencies of trees were higher. The diurnal course of net photosynthetic rate of *H. rhamnoides* exhibited a double-peak curve, while other species were single-peak curves. And the process was dominated by environmental factors and their physiological functions. The averages of diurnal net photosynthetic rates of 6 species studied were 14.21 ± 1.78 , 14.55 ± 2.18 , 12.12 ± 2.15 , 12.75 ± 3.36 , 12.32 ± 2.79 , $12.46 \pm 3.85 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ respectively, among them, two poplar species was 13.8% higher than those of others. The diurnal course of stomatal conductance and intercellular CO_2 concentration for 6 tree species significantly changed. The stomatal conductance and intercellular CO_2 concentration of trees were higher than shrubs. And the change was relatively stable. The transpiration rate of 6 species changed significantly. Diurnal transpiration rate were

(2) 收稿日期:2008-05-06 修回日期:2008-06-10
基金项目:“十一五”国家科技支撑计划(2006BAD09B06);水利部“948”项目(200207)。
作者简介:周海光,男,硕士研究生,从事生态水文及植被水分生理研究。E-mail:02134213@163.com
* 通讯作者:刘广全,男,教授,博士生导师,从事水土资源和生态系统管理技术研究。E-mail: gqliu@iwhr.com

5.37±1.85, 5.50±1.95, 2.96±0.97, 3.29±1.06, 4.11±1.17, 3.41±1.23 mmol·m⁻²·s⁻¹ respectively. The transpiration rates of two poplar trees were significantly higher than those of othes. The water use efficiencies of 6 species were 2.99±1.37, 3.09±1.76, 4.61±2.15, 4.10±1.35, 3.09±0.65, 3.80±0.58 μmol·mmol⁻¹ respectively. The water use efficiencies of *P. hopeiensis*, *P. simonii* and *C. spp.* were lower than those of others.

Key words:Loess Plateau; wind-water erosion region; artificial vegetations; photosynthetic characteristics

干旱缺水一直是我国西北地区产业发展的瓶颈。黄土高原北部水蚀风蚀复合区,干旱、多风沙、严重水土流失等限制了当地的环境保护和生态建设,而且长期以来,黄土高原植被建设存在成活率低、保存率低、生态效益低、重林轻草、林草布局不合理等现象^[1],严重减缓了整个生态建设工程的进度。该区生物材料的科学选择和配置是植被建设至关重要的前提和保证后期工程质量的关键^[2]。本文旨在针对该区的气候环境,从树木光合、蒸腾和水分利用效率等视角,讨论该区主要造林树种应对环境胁迫表现出的生理生态特征,为今后该区植被恢复,生物材料的选择、配置、管理和利用等提供科学依据。

1 研究区自然概况

研究区位于陕西吴起县西北部的毛乌素沙地南缘,地理坐标 108°23′09″~108°23′20″E、37°21′09″~37°21′20″N,海拔 1 500~1 600 m。该区属半干旱温带大陆性季风气候,年均气温 7.8℃,极端最低气

温-25.1℃,极端最高气温 37.1℃,≥10℃有效积温 3 086℃。年均降水量 395.4 mm,集中于 7、8、9 月,年平均蒸发量为 1 595.2 mm,年无霜期 130 d;土壤为黄绵土,轻砂壤质地,凋萎湿度3.5%,田间持水量 15.3%。该区处于森林草原向典型草原过渡地带,由于气候、地质地貌、土壤肥力等的制约,以及人为活动的影响,天然植被已破坏殆尽,现存植被均系人工营造,主要造林树种有河北杨、小叶杨、白榆、山杏、山桃、柠条、沙棘、紫穗槐、沙柳等,以灌木为主,小乔木林比例低,呈片断零星分布。

2 材料与方法

2.1 材料

本研究的观测点为缓坡地,坡度 11°,坡向西至西北,海拔 1 520 m。研究材料为河北杨(*Populus hopeiensis*)、小叶杨(*P. simonii*)、山杏(*Armeniaca ansu*)、山桃(*Prunus davidiana*)、柠条(*Caragana*)和沙棘(*Hippophae rhamnoides*)(表 1)。

表 1 样树基本特征

Table 1 The fundamental characteristics of the trees measured

树 种	年龄/a	密度/(株·hm ⁻²)	树高/m	胸径(地径)/cm	冠幅/(m×m)
河北杨	48	240	15.5	23.5	6.2×5.8
小叶杨	48	800	3.6	13.2	3.3×3.5
山杏	48	900	3.2	13.6	4.1×3.8
山桃	48	混交林	2.1	3.7	2.7×2.0
柠条	48	混交比例为 1:1:2	1.4	2.0	1.4×1.6
沙棘	9	4 200	1.8	3.1	1.3×1.2

2.2 研究方法

2.2.1 测定样树的选择 采用标准地—标准木方法确定样树,选择能够代表当地生产力水平的林分,乔木和灌木分别设置 20 m×20 m、10 m×10 m 的标准地,进行每木检尺,确定标准木,作为待测样树。在植株向阳面选择长势良好的 3 片叶子作为待测样叶。

2.2.2 光合指标参数的测定 使用 Li-6400Q 便携式光合测定系统测定树木各种光合生理生态参数,采用 2 cm×3 cm 的标准叶室测定,对于诸如柠条这样的小叶,则在光合测定完成后用方格纸测量样叶面积,然后输入 Li-6400Q 光合测定系统得到校正后

的光合参数。测定时间为树木生长旺盛季节的典型天气日。

光响应曲线 在 0~2 000 μmol·m⁻²·s⁻¹ 光强之间,设定 12 个水平,每隔 2~4 min 采集 1 次数据。测定地大气 CO₂ 浓度 368 μmol·mol⁻¹,温度 23~25℃,相对湿度 50% 左右;用光合助手计算树木光饱和点(*LSP*, μmol·m⁻²·s⁻¹)、光补偿点(*LCP*, μmol·m⁻²·s⁻¹)、最大净光合速率(*P_{msp}*, μmol·m⁻²·s⁻¹)、表观量子效率(*AQE*, mol·mol⁻¹)[3-7]。

气体交换参数 选择典型天气,在 8:00~18:00 时间内,每隔 2 h 用光合系统测定各样树的气体交

换参数,为减少误差,每次测定在 30 min 内完成,使用 Li-190SA 量子传感器测定每个时段的光合有效辐射值作为该时段的光强。

该研究获得的主要光合参数有净光合速率($P_n, \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、蒸腾速率($Tr, \text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、气孔导度($G_s, \text{mmol} \cdot \text{s}^{-1}$)、胞间 CO_2 浓度($C_i, \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)和水分利用效率($WUE, \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$),光合有效辐射($PAR, \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、大气温度($T_a, ^\circ\text{C}$)、大气相对湿度($RHa, \%$)和大气 CO_2 浓度($Ca, \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$),等。

2.3 数据分析

应用 Office Excel 2003 及 SPSS13.0 统计软件对数据进行处理、图表制作及回归、相关性分析。

3 结果与分析

3.1 光强响应曲线

光强响应曲线可直接表征植物净光合速率随光照强度增减的变化规律。所测定 6 树种随着光照强度从 $0 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 不断增加,净光合速率迅速增大;光照强度达到约 $800 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,净光合速率增幅趋于缓慢;当光照强度接近光饱和点时,净光合速率趋于稳定。在相同的光照强度下,不同树种的净光合速率不同,其中,河北杨、小叶杨相

对较高,而其他树种相对较低,所以,杨树利用光能进行光合作用的效率较高,积累的干物质相对较多,生长也较快(图 1)。

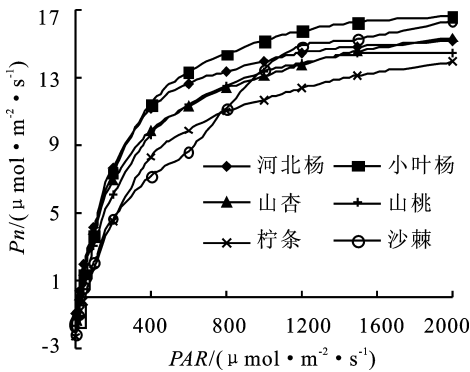


图 1 6 树种光响应曲线

Fig. 1 Light response curves of 6 trees

将所测定树种光响应曲线进行拟合,得出净光合速率对光强的二次函数方程。6 树种光饱和点在 $1\,500 \sim 1\,700 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,大小排序为:小叶杨<河北杨<山桃<山杏<柠条=沙棘;灌木光饱和点相对较高,光合作用不易受到强光的抑制,对高光强能表现出较强的适应性;乔木相对较弱。测定树种在光饱和点时的净光合速率,乔木树种较灌木高。

表 2 6 树种的光合响应曲线特征参数

Table 2 Characteristic parameters of light response curves of 6 trees

树种	光响应曲线 拟合方程	R^2	光饱和点	光补偿点	光饱和点时	光补偿点时	表观量子效率
					净光合速率	净光合速率	
/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)							
河北杨	$P_n = -7E-06PAR^2 + 0.021PAR + 1.404$	0.93	1 507	15.2	17.30	1.72	0.051
小叶杨	$P_n = -8E-06PAR^2 + 0.022PAR + 0.894$	0.95	1 494	28.1	18.51	1.33	0.053
山杏	$P_n = -6E-06PAR^2 + 0.019PAR + 1.119$	0.94	1 600	19.2	16.48	1.49	0.050
山桃	$P_n = -7E-06PAR^2 + 0.021PAR + 0.222$	0.95	1 521	34.4	16.43	0.95	0.039
柠条	$P_n = -6E-06PAR^2 + 0.020PAR - 0.721$	0.96	1 650	61.2	15.61	0.47	0.034
沙棘	$P_n = -6E-06PAR^2 + 0.020PAR - 0.622$	0.98	1 650	48.6	15.71	0.33	0.033

测定树种光补偿点差异较大,乔木树种的光补偿点明显低于灌木树种,说明乔木树种对弱光的利用能力较强,具有在较弱光强下达到物质正积累的能力。从光补偿点时的净光合速率水平来看,虽然乔木树种的光补偿点较低,但是其净光合速率明显高于灌木树种,测定树种的表观量子效率可明显看出,光补偿点较低的乔木树种均具有较大的表观量子效率,而光补偿点较高的灌木树种其表观量子效率却较低,说明测定树种对光能的利用效率存在一定的差别,乔木的光能利用率较高(表 2)。

短时内,随光强逐渐增大,所测定 6 个树种气孔导度变化规律不尽相同,其中,河北杨和小叶杨光强在 $0 \sim 50 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,气孔导度迅速增大

继而达到峰值,之后处于逐渐降低趋势;其他 4 个树种在光强 $0 \sim 200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,气孔导度迅速增大,在 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以后逐渐趋于平稳(图 2a)。

随着光照强度的逐渐增大,所测定树种净光合速率迅速升高,叶肉细胞间 CO_2 迅速被消耗,致使胞间 CO_2 浓度逐渐降低,当光照强度达到 $600 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右时,胞间 CO_2 浓度降到一定值,并逐渐趋于稳定,而且短时内得不到及时的补充,在较低的浓度下,胞间 CO_2 不能满足光合作用在即时光强下的正常消耗,限制了光合速率的继续升高(图 2b)。

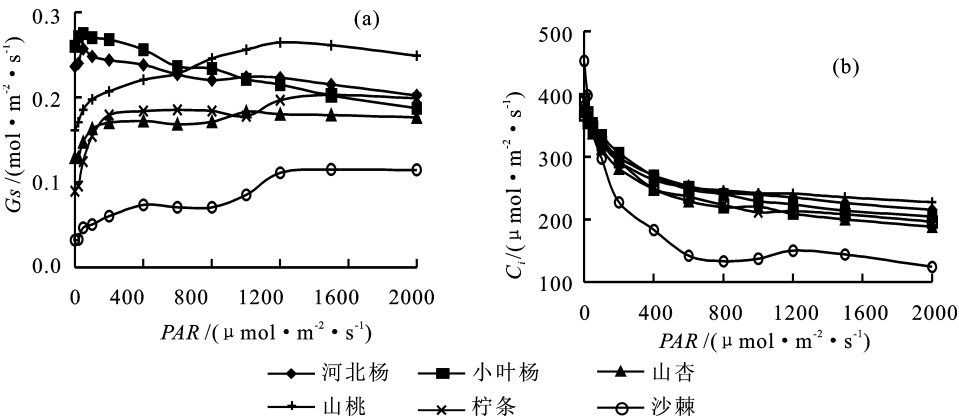


图 2 气孔导度(a)、胞间 CO₂ 浓度(b)与光合有效辐射强度的关系

Fig. 2 Relationships among stomatal conductance or intercellular CO₂ concentration and effective radiation intensity for 6 trees

3. 2 气体交换参数变化

3.2.1 环境因子日变化 光合有效辐射是植物进行光合作用的能量来源。2 个观测日光合有效辐射日平均强度分别为 $1\,579 \pm 419$ 、 $1\,465 \pm 510 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ，日最大值分别为 $2\,229$ 、 $1\,999 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ，均出现在 12:00。大气温度日平均值分别为 $28.2 \pm 3.2^\circ\text{C}$ 、 $28.8 \pm 3.0^\circ\text{C}$ ，气温从日出后不断升高，14:00 出现峰值，之后逐渐下降。大气相对

湿度对植物叶片的气孔运动影响显著，其变化趋势为先下降后升高，日平均值分别为 $44.5\% \pm 11.8\%$ 、 $49.4\% \pm 10.8\%$ ，在 14:00 左右降到最低值，之后又有不同幅度的升高；大气 CO₂ 浓度在上午均呈现波动性降低，12:00 时以后有所升高并逐渐趋于稳定，其日平均值分别为 370.0 ± 1.4 、 $366.5 \pm 4.3 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ (图 3)。

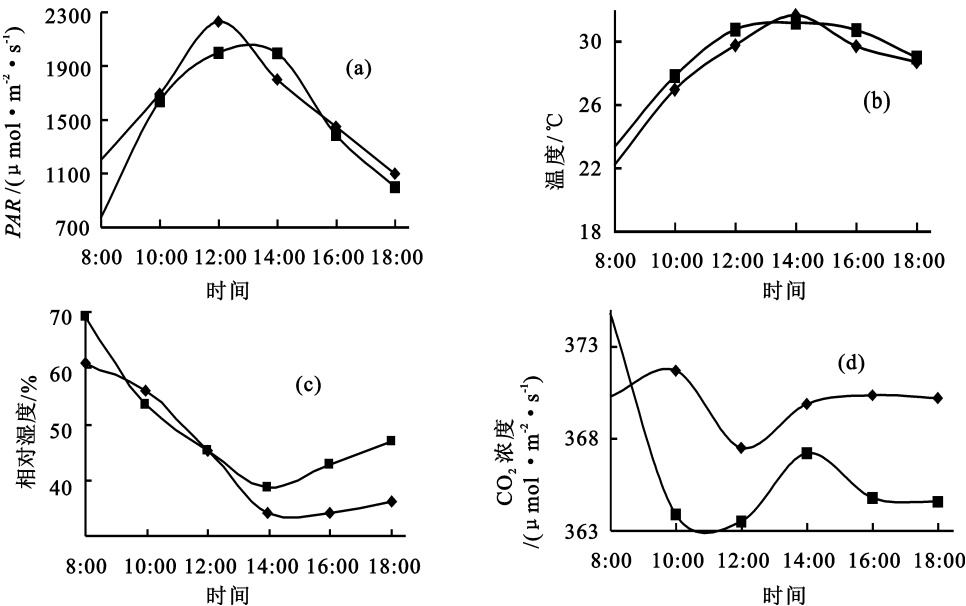


图 3 光合有效辐射强度(a)、大气温度(b)、相对湿度(c)和 CO₂ 浓度(d)日变化

Fig. 3 Relationships among diurnal changes of effective radiation intensity and air temperature, relative humidity or CO₂ concentration for 6 trees

3.2.2 净光合速率日变化 所测定 6 树种净光合速率日变化总体趋势基本相同，即早晚低，中午高 (表 3)。在 8:00~10:00，随着光合有效辐射的增强，各树种气孔导度增大，净光合速率迅速升高，此阶段净光合速率主要影响因素为气孔导度，此阶段由于光合作用的消耗，胞间 CO₂ 浓度持续降低；在 10:00~14:00，光合有效辐射已达到一天中最高值，随着大气湿度的降低，诱导叶表气孔关闭，气孔导度

减小，胞间 CO₂ 浓度降低到一天中最低值，净光合速率达到峰值后呈渐降趋势，此时段叶片的光合作用受气孔导度与叶肉细胞的光合活性综合控制；14:00~18:00，光合有效辐射逐渐降低，大气相对湿度持续处于较低值，气孔导度波动性减小，叶片经过长时间的强光照射，蒸腾失水过多，自身代谢机能有所下降，虽然胞间 CO₂ 浓度不断升高，但是各树种净光合速率呈波动性降低的趋势，此时段光合作用的

主要控制因素为叶肉细胞的光合活性,这与 Farquhar^[9]的研究结果一致。

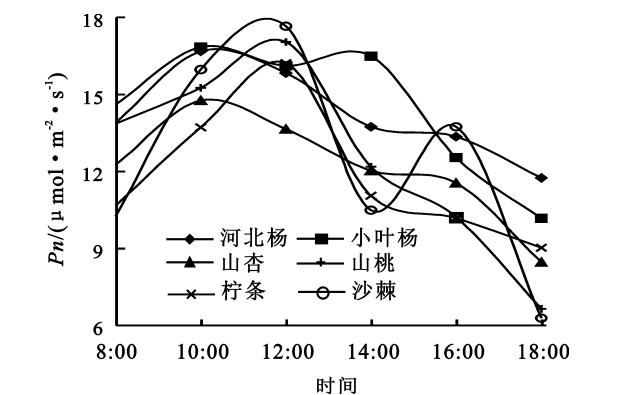


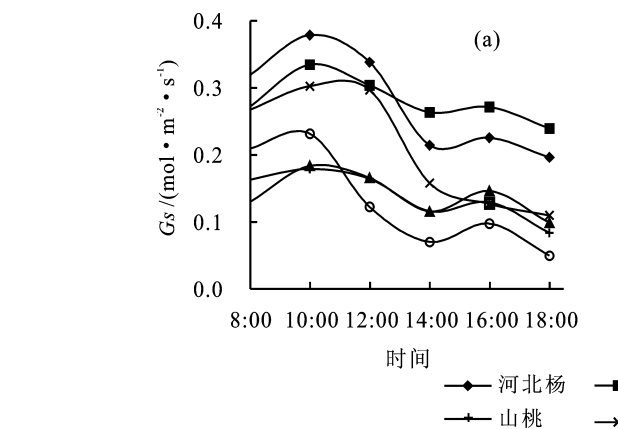
图 4 6 树种净光合速率(Pn)日变化

Fig. 4 Diurnal changes of net photosynthetic rate of 6 trees

表 3 6 树种净光合速率日变化特征值

树 种	峰值/($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	峰值时刻	日均值/($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	变异系数 C_v
河北杨	16.67 ± 2.30	10:00	14.21 ± 1.78	0.13
小叶杨	16.84 ± 0.45	10:00	14.55 ± 2.18	0.15
山 杏	14.77 ± 1.70	10:00	12.12 ± 2.15	0.18
山 桃	17.04 ± 0.37	12:00	12.75 ± 3.36	0.26
柠 条	16.21 ± 0.21	12:00	12.32 ± 2.79	0.23
沙 棘	16.71 ± 1.01	12:00	12.46 ± 3.85	0.31

3.2.3 气孔导度和胞间 CO₂ 浓度日变化 各树种气孔导度与其净光合速率日变化相关性显著。早晨随着光合有效辐射强度的升高,气孔逐渐打开,到 10:00 以后,大气相对湿度降到一定值时,诱导气孔逐渐关闭,气孔导度由高转低,到 14:00 以后,虽然大气相对湿度达到最低值以后有小幅升高,但气孔导度仍呈波动性降低,日变化幅度较大。各树种胞间 CO₂ 浓度与其净光合速率的日变化,呈负相关;



6 树种净光合速率日变化曲线,沙棘为双峰型,第二次峰值相对较低,为 $13.27\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$;其他 5 树种均为单峰型,树种净光合速率日变化曲线峰型特征受树木所处微环境因子及其自身生理生态适应性综合控制^[8-9](图 4)。

6 树种净光合速率峰值大体出现在 2 个时刻,净光合速率峰值山杏较低。乔木树种净光合速率日平均值相对较高,平均高于其他树种 13.8%,乔木树种净光合速率日变化幅度也较小,其变异系数平均为 0.14,其他 4 树种净光合速率日变化幅度较大,平均达到 0.25,说明河北杨和小叶杨光合作用日内能在相对较高的净光合速率水平上稳定进行,积累的干物质相对于其他树种较多。

随着净光合速率从早晨不断升高,细胞间 CO₂ 迅速被消耗,其浓度逐渐降低;12:00 左右,由于气孔的逐渐关闭,细胞间 CO₂ 得不到及时补充,而降到一天中最低值;12:00 以后,由于受强光、高温、低湿度等逆境条件的影响,叶肉细胞的光合活性受到抑制,CO₂ 消耗量降低,加之细胞呼吸作用对 CO₂ 的补充,胞间 CO₂ 浓度又有所升高,灌木树种胞间 CO₂ 浓度日变幅较大,其他树种相对较小(图 5、表 4)。

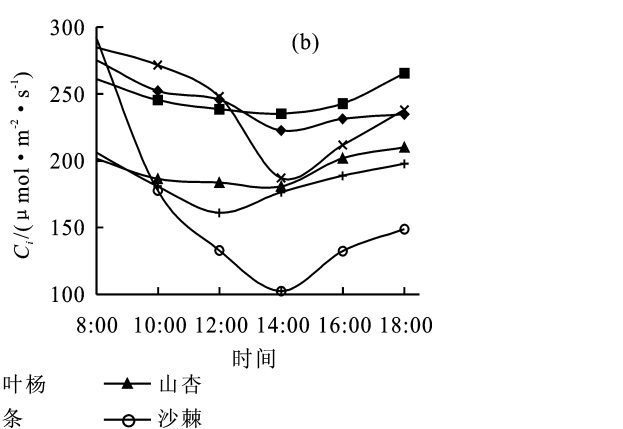


图 5 6 树种气孔导度(a)和胞间 CO₂ 浓度(b)日变化

Fig. 5 Diurnal changes of stomatal conductance and intercellular CO₂ concentration of 6 trees

3.3 蒸腾速率和水分利用效率日变化

在早晨,所测定树种蒸腾速率随着气孔导度的增大而升高,12:00~14:00 左右,受气孔导度和叶内外蒸汽压差的影响,蒸腾速率达到一定值后开始下降。河北杨、小叶杨、山杏、山桃、柠条、沙棘日平

均蒸腾速率分别为 5.37 ± 1.85 、 5.50 ± 1.95 、 2.96 ± 0.97 、 3.29 ± 1.06 、 4.11 ± 1.17 、 $3.41\pm1.23\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,大小排序为河北杨>小叶杨>柠条>沙棘>山桃>山杏。可见,乔木的较高,沙棘蒸腾速率日变化曲线也呈双峰型(图 6a)。

表 4 6 树种气孔导度和胞间 CO₂ 浓度日变化特征值

Table 4 Diurnal changes of characteristic values for stomatal conductance and intercellular CO₂ concentration of 6 trees

树种	项目	极值	峰值时刻	日均值	变异系数 C _v
河北杨	G _s	0.38	10:00	0.28±0.08	0.27
	C _i	223	14:00	244±19	0.08
小叶杨	G _s	0.33	10:00	0.28±0.03	0.12
	C _i	235	14:00	248±12	0.05
山杏	G _s	0.18	10:00	0.14±0.03	0.23
	C _i	181	14:00	194±12	0.06
山桃	G _s	0.18	10:00	0.14±0.04	0.26
	C _i	161	12:00	185±16	0.09
柠条	G _s	0.30	10:00	0.21±0.09	0.42
	C _i	187	14:00	240±37	0.15
沙棘	G _s	0.23	10:00	0.13±0.07	0.57
	C _i	103	14:00	164±67	0.41

注：气孔导度(G_s)单位：mmol·m⁻²·s⁻¹，胞间 CO₂ 浓度(C_i)单位：μmol·mol⁻¹。

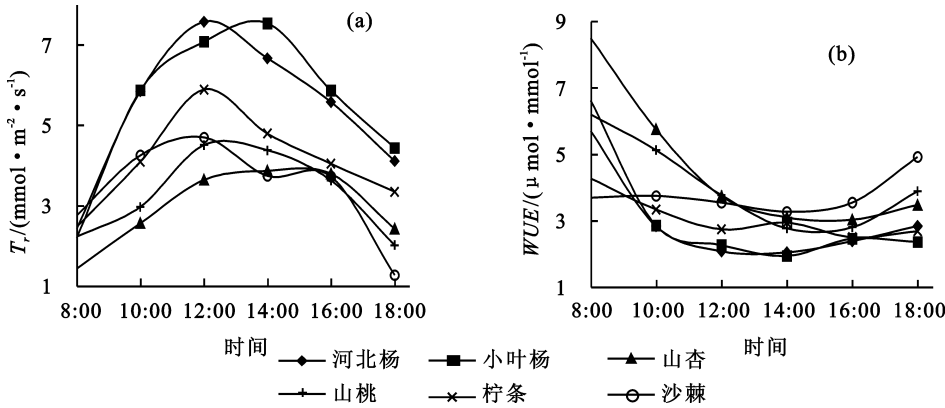


图 6 蒸腾速率(a)和水分利用效率(b)日变化

Fig. 6 Diurnal changes of transpiration rate and water use efficiency of 6 trees

水分利用效率是反映树种利用有限的水资源同化有机物能力大小的综合指标。所测定河北杨、小叶杨、山杏、山桃、柠条、沙棘日平均水分利用效率分别为 2.99 ± 1.37 、 3.09 ± 1.76 、 4.61 ± 2.15 、 4.10 ± 1.35 、 3.09 ± 0.65 、 $3.80 \pm 0.58 \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$ 。虽然乔木树种具有高光合速率，但是其蒸腾速率也是较高的，致使其水分利用效率较低；柠条的蒸腾速率较高，其水分利用效率则较低；山杏、山桃和沙棘蒸腾速率较低，则水分利用效率较高，其中沙棘水分利用效率一天中变幅很小，一直处于稳定状态，较适合在极端天气下生长(图 6b)。

4 结论与讨论

黄土高原水蚀风蚀复合区所测定 6 个树种光饱和点均较高，均属喜阳性植物，灌木对高光强有较强的适应性；河北杨、小叶杨、山杏不仅光能利用率较高，而且对弱光的利用能力也较强，能相对较多的利用光能，达到物质积累。

所测定 6 树种日均净光合速率为小叶杨>河北杨>山桃>沙棘>柠条>山杏，沙棘为双峰曲线，其他为单峰曲线；净光合速率与气孔导度变化相关性显著，中午以后树木叶肉细胞自身的光合活性也是影响其光合机能的重要因素。

树木叶肉细胞间 CO₂ 浓度受气孔导度、光合作

用吸收和呼吸作用补充共同影响，且胞间 CO₂ 浓度与净光合速率一天内呈交互性作用。

所测定 6 树种日均蒸腾速率为河北杨>小叶杨>柠条>沙棘>山桃>山杏。2 种杨树蒸腾速率较高。水分利用效率为山杏>山桃>沙棘>柠条=小叶杨>河北杨，山杏和山桃的水分利用效率较高的，杨树积累了较多的干物质，耗水量也较多。

参考文献：

[1] 孟新华, 祁有祥. 关于生物措施治理黄土高原水土流失的思考[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(4): 81-84.

[2] 刘广全. 黄土高原植被构建效应[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2005: 44-68.

[3] 徐炳成, 山仑. 半干旱黄土丘陵区沙棘和柠条水分利用与适应性特征比较[J]. 应用生态学报, 2004, 15(11): 2 025-2 028.

[4] 许红梅, 高琼, 黄永梅, 等. 黄土高原森林草原区 6 种植物光合特性研究[J]. 植物生态学报, 2004, 28(2): 157-163.

[5] 曹军胜, 刘广全. 刺槐光合特性的研究[J]. 西北农业学报, 2005, 14 (3): 118-122; 136.

[6] 曹军胜, 刘广全. 油松光合特性的研究[J]. 安徽农业科学, 2005, 33 (4): 608-609; 718.

[7] 赛春蕊, 李文华, 吴万兴, 等. 黄土高原地区 3 个大扁杏品种的光合特性日变化研究[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(6): 93-98.

[8] 刘广全, 郭孟华, 王鸿. 沙棘干物质形成的光合作用机制[J]. 国际沙棘研究与开发, 2008, 6(1): 21-26.

[9] FARQUHAR G D, SHARKEY T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. Ann Rev Plant Physiol, 1982, 33: 317-345.