

文章编号: 1001-1498(2008)02-0222-05

黄土丘陵区土壤水分对山桃光合及蒸腾等生理参数的影响

张淑勇¹, 刘致远², 周泽福^{1*}, 张光灿³

(1. 中国林业科学研究院林业研究所, 国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091;

2. 山西省吕梁山国有林管理局车鸣峪林场, 山西 吕梁 033400; 3. 山东农业大学林学院水保系, 山东 泰安 271018)

摘要:应用英国 PPS公司生产的 CRAS-2型光合作用系统,在半干旱黄土丘陵沟壑区,测定了3年生山桃苗在不同土壤水分条件下叶片光合及蒸腾等生理参数的日变化特征。结果表明:不同土壤水分条件下,光合速率、蒸腾速率及水分利用效率的日变化过程呈现不同的变化规律。土壤相对含水量为57.3%、70.1%、80.2%时,光合速率的日最大值分别出现在13:00、9:00、13:00,分别为 10.51 、 12.52 、 $9.25 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,日均值分别为 6.83 ± 4.92 、 6.40 ± 4.43 、 $5.66 \pm 3.44 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;在其它水分条件下,光合速率有明显午休现象。蒸腾速率的日变化过程与光合速率相似,土壤相对含水量为57.3%、70.1%、80.2%时,最大值均出现在13:00,日均值分别为 1.91 ± 1.03 、 3.27 ± 2.09 、 $2.90 \pm 1.70 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。在所测水分范围内水分利用效率上午时段的最大值大部分出现在7:00或9:00,下午时段最大值出现的时间相差较大。当土壤相对含水量大于57.3%时,山桃光合速率下降的主要原因是气孔限制引起的,在其它土壤水分条件下,山桃在上午时段(13:00以前)以气孔限制为主,而下午时段(13:00以后)转变为以非气孔限制为主。依据光合速率、蒸腾速率和水分利用效率与土壤水分的定量关系,在半干旱黄土丘陵沟壑区,维持山桃正常生长的适宜水分范围是土壤相对含水量为30.9%~57.3%,应选择阴坡或半阴坡进行栽培。

关键词:黄土丘陵区;山桃;水分利用效率;土壤水分

中图分类号: S718.43

文献标识码: A

Effects of Soil Moisture on Photosynthesis and Transpiration Parameters of *Amgdalus davidiana* Franch in Loess Hilly Plateau

ZHANG Shu-yong¹, LIU Zhi-yuan², ZHOU Ze-fu¹, ZHANG Guang-can³

(1. Research Institute of Forestry, CAF; Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry Administration, Beijing 100091, China;

2. Chengygu Forestry Centre, Forestry Management Bureau of Luliang Mountain, Luliang 033400, Shanxi, China;

3. Forestry College of Shandong Agricultural University, Taian 271018, Shandong, China)

Abstract: Diurnal variations of leaf-air interface physiological parameters in leaves of three-year-old *Amgdalus davidiana* were studied under different soil moisture conditions with CRAS-2 portable photosynthesis system in the loess hilly plateau. The results indicated that the diurnal variation process of photosynthesis, transpiration and water use efficiency under different soil moisture conditions took on different regulations. When soil relative water content was 57.3%, 70.1%, 80.2%, the time that maximum display was at 13:00, 9:00 and 15:00, respectively, and

收稿日期: 2007-04-02

基金项目: 国家“十一五”科技攻关子课题“黄土高原丘陵沟壑半干旱区水土保持抗旱造林及径流林业技术试验示范(2006BAD3A1205)”和国家“十一五”科技攻关课题“京津风沙源区南部退化植被修复技术与沙区产业开发技术研究与试验示范(2006BAD26B0601)”

作者简介: 张淑勇(1980—),男,山东泰安人,在读博士生. E-mail: zhsyong@126.com

*通讯作者: 周泽福, 研究员, 博士生导师.

the maximum values of photosynthetic rate were 10.51, 12.52, 9.25 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, respectively, the daily average values were 6.83 \pm 4.92, 6.40 \pm 4.43 and 6.32 \pm 3.90 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, respectively. In other soil moisture conditions, all the photosynthetic rate followed a two-peak pattern; The style of diurnal variation curves of transpiration rate was similar with that of photosynthetic rate, when soil relative water contents were 57.3%, 70.1%, 80.2%, the time that maximum display was always at 13:00, and the daily average values of transpiration rate were 1.91 \pm 1.03, 3.27 \pm 2.09, 2.90 \pm 1.70 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, respectively; The maximum of water use efficiency before 13:00 appeared at 7:00 or 9:00, but it was very distinct after 13:00. Analysis showed the dominating reason causing the photosynthetic rate fall was stoma limitation when relative water content was over 57.3%. In other soil moisture conditions, stoma limitation was the dominating reason before 13:00, while non-stoma limitation became dominant after 13:00. According to the connections between the photosynthetic rate, transpiration rate, water use efficiency and soil moisture, in loess hilly plateau, the fitting soil relative water content maintaining *Amygdalus davidiana* natural growth was between 39.7% and 57.3%. At the same time, it should be planted in shady slope or semi-shady slope in site design.

Key words: Loess hilly plateau; *Amygdalus davidiana*; water use efficiency; soil moisture

山桃 (*Amygdalus davidiana* Franch) 是黄土丘陵沟壑区天然次生林中广泛散生的灌木树种, 可用作桃、杏、李等果树的砧木, 具有一定的观赏价值、药用价值和生态功能。山桃在黄土高原退耕还林与植被恢复工程中具有较大的开发潜力。目前有关山桃的研究, 多集中于栽培技术、解剖结构、林地水分动态及耗水性能方面^[1-5]。关于土壤水分对农作物光合作用、蒸腾作用及水分利用效率的影响研究较多^[6-9], 但有关山桃生长与水分关系的研究很少。人们对黄土高原地区山桃生长适宜的土壤水分条件和光照条件并不清楚, 而这恰恰是区域树种选择及其合理配置所要解决的重要问题。本文在半干旱黄土丘陵区, 研究了土壤干旱胁迫与强光胁迫对 3 年生山桃光合速率、蒸腾速率和水分利用效率的影响, 以便为山桃在半干旱黄土丘陵区植被恢复中的开发与推广利用提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于山西省中阳县的车鸣峪林场, 属黄河流域典型的黄土丘陵沟壑区, 地处 111°04' ~ 111°21' E, 37°03' ~ 37°20' N。该区属暖温带亚干旱大陆季风气候, 多年平均降水量为 500 ~ 550 mm, 多集中在 7—9 月份 (占全年降水量的 70% 以上), 年平均蒸发量为 1019.7 mm, 年平均气温 6℃, 极端最高气温 35.6℃, 极端最低气温 -24.3℃, 无霜期 125 ~ 150 d, 10℃ 年积温为 2500 ~ 3000℃。土壤以褐土为主, 其次是棕壤, 发育差, 水土流失严重。属于森林草原灌丛植被区, 现有树种少, 林地大部分是疏

林地, 林分稳定性差。

2 材料与方法

2.1 试验材料与水分处理

选用 3 年生天然次生山桃苗进行盆栽试验, 布设 6 个重复 (布设 6 盆), 盆内土壤为褐土, 盆钵直径 30 cm, 深 40 cm。2006 年 3 月份进行苗木盆植, 每盆 1 株, 2006 年 9 月份进行观测研究。用环刀法测得盆内实验土壤的田间持水量为 28.8%, 土壤密度为 1.23 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

采用田间环境条件下 (盆长期埋于土壤中, 使盆内土壤与田间土壤同温) 人为控制水分的方法以获取盆内土壤不同的水分胁迫程度。具体方法是: 选取生长健壮的山桃苗 3 株 (3 盆), 浇水 2 d 后进行观测, 利用铝盒烘干法测定盆内土壤水分的质量含水量 (MWC), 每次重复测定 3 次, 取平均值。2 d 后, 获得初期水分梯度, 并进行第 1 次测定, 质量含水量为 231 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 相对含水量 (RWC) 为 80.2%。以后通过自然耗水, 产生多个水分梯度。分别在质量含水量为 202、165、143、114、89、58 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (即相对含水量为 70.1%、57.3%、49.7%、39.6%、30.9%、20.1%) 时进行观测。

2.2 试验方法

从每株试验树 (共 3 株) 的林冠中部, 选 3 片成熟叶片, 每个叶片重复 3 次, 取平均值。在不同的水分梯度下, 应用英国 PPS 公司生产的 CRAS-2 型光合作用系统, 在完全晴朗的天气下进行观测, 即 9 月 3、5、8、10、11、13、15 日。每天的测定时间为 7:00—19:00, 每 2 h

测定 1 次。仪器自动记录净光合速率 (P_n ; $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、光合有效辐射 (PAR ; $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、蒸腾速率 (T_r ; $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、气孔导度 (G_s ; $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、胞间 CO_2 浓度 (C_i ; $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$) 等生理参数。叶片水分利用效率 (WUE ; $\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$)、气孔限制值 (L_s) 分别用公式计算^[10], 即:

$$WUE = P_n / T_r$$

$$L_s = 1 - C_i / C_a \quad (C_a \text{ 为大气 } \text{CO}_2 \text{ 浓度})$$

3 结果与分析

3.1 光合速率和蒸腾速率的日变化

由表 1 可以看出: 山桃光合速率的日变化与土壤水分密切相关, 而且具有明确的阈值, 在水分条件相对较高的条件下, 即土壤相对含水量为 57.3%、70.1%、80.2% 时, 光合速率最大值分别出现在 13:00、9:00、13:00 (表 1), 分别为 10.51、12.52、9.25 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 之后随着时间的推移逐渐下降, 光合速率日均值分别为 6.83 \pm 4.92、6.40 \pm 4.43、5.66 \pm 3.44 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (表 2); 在其它水分条件下, 光合速率有明显午休现象。在土壤相对含水量为 30.9~49.7% 时, 光合速率最大值出现在 11:00, 土壤相对含水量为 20.1% 时最大值出现在 9:00。这种变化与一天中气温、相对湿度及蒸腾速率 (表 3) 的变化有关, 这表明山桃光合作用受较多因素的影响, 其中既有气孔因素, 也有非气孔因素。

表 1 不同土壤水分条件下山桃光合速率的日变化

相对含水量 / %	时刻							
	7:00	9:00	11:00	13:00	15:00	17:00	19:00	
80.2	5.95	6.80	8.00	9.25	7.10	3.58	-1.03	
70.1	4.50	12.52	8.71	8.14	7.53	5.08	-1.67	
57.3	0.70	9.98	10.20	10.51	10.18	7.28	-1.03	
49.7	2.40	4.12	11.70	7.60	8.60	6.67	-0.82	
39.6	1.48	4.15	8.76	5.73	6.48	4.07	-0.87	
30.9	2.23	5.84	6.27	3.13	5.60	3.23	-0.90	
20.1	1.90	2.00	1.90	1.85	1.95	1.30	0.10	

表 2 不同土壤水分条件下山桃光合速率、蒸腾速率及水分利用效率日均值

相对含水量 / %	光合速率 / ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	蒸腾速率 / ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	水分利用效率 / ($\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$)
80.2	5.66 \pm 4.4	2.90 \pm 0.70	1.65 \pm 0.40
70.1	6.40 \pm 4.3	3.27 \pm 0.9	2.11 \pm 0.63
57.3	6.83 \pm 4.92	1.91 \pm 0.3	3.22 \pm 0.58
49.7	5.75 \pm 4.18	1.72 \pm 0.3	3.16 \pm 0.91
39.6	4.26 \pm 3.20	1.48 \pm 0.8	3.15 \pm 0.40
30.9	3.63 \pm 2.53	1.33 \pm 0.49	2.63 \pm 0.71
20.1	1.57 \pm 0.69	0.59 \pm 0.19	2.74 \pm 0.91

注: 平均值 \pm 标准差

当土壤相对含水量高于 57.3% 时, 随着土壤水分增加 (至 80.2% 时), 光合速率反而有所下降 (表 2), 表明过高的土壤水分不利于光合作用的提高, 对光合作用起到一定的抑制作用。当土壤相对含水量降低至 20.1% 时, 全天中各时段的光合速率一直处于很低的水平, 光合速率的日均值为 1.57 \pm 0.69 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (表 2), 与土壤相对含水量 30.9% 相比, 光合速率下降幅度为 57% 左右, 光合速率表现为一降不起型, 这与杨朝翰等^[11]的研究一致。表明土壤相对含水量低于 30.9% 以后, 会发生严重的水分胁迫, 对光合作用产生严重的不良影响^[12]。因此可以认为维持山桃较高光合速率的水分范围是土壤相对含水量为 30.9%~80.2%。

从表 3 可以看出, 土壤水分的变化对蒸腾速率有明显的影响。土壤相对含水量为 70.1%, 蒸腾速率最大值出现在 13:00, 为 6.42 $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。蒸腾速率的变化趋势与光合速率的变化趋势基本一致, 即在土壤相对含水量为 57.3%、70.1%、80.2% 时, 蒸腾速率的最大值均出现在 13:00, 蒸腾速率的日均值分别为 1.91 \pm 1.03、3.27 \pm 2.09、2.90 \pm 1.70 $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在其它水分条件下, 蒸腾速率在上午和下午时段各出现 1 个最大值, 上午时段最大值出现在 9:00—11:00, 下午时段出现在 13:00—15:00, 但这 2 个值相差不大。当土壤相对含水量为 20.1% 时, 全天各时段的蒸腾速率均较低, 蒸腾速率日均值为 0.59 \pm 0.19 $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (表 2), 与土壤相对含水量 30.9% 相比, 蒸腾速率下降幅度为 56% 左右, 此时山桃叶片出现萎焉失水现象, 表明水分胁迫已经严重影响了山桃正常的水分代谢功能。

表 3 不同土壤水分条件下山桃的蒸腾速率的日变化

相对含水量 / %	时刻							
	7:00	9:00	11:00	13:00	15:00	17:00	19:00	
80.2	2.03	2.88	4.70	5.42	3.05	1.60	0.60	
70.1	0.76	4.26	4.91	6.42	3.25	2.29	0.97	
57.3	1.18	1.61	3.28	3.30	2.66	1.31	0.86	
49.7	0.84	1.02	3.72	2.00	2.17	1.26	0.87	
39.6	0.34	2.47	1.96	2.77	1.31	0.72	0.76	
30.9	1.13	1.57	1.96	1.31	1.81	0.64	0.86	
20.1	0.42	0.74	0.60	0.51	0.63	0.69	0.54	

3.2 水分利用效率的日变化

由表 4 可以看出, 在不同土壤水分条件下, 水分利用效率的日变化过程上午和下午时段各出现一个最大值, 上午时段最大值大部分出现在 7:00 或

9:00;下午时段最大值出现的时间差距较大,土壤相对含水量为 80.2%、70.1%时,最大值均出现在 15:00,并且明显比上午时段的小,分别小 0.61、3.63 $\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$;土壤相对含水量为 30.9%~57.3%时,下午时段最大值均出现在 17:00,与上午时段的最大值相差不大;土壤相对含水量为 20.1%时,下午时段最大值出现在 13:00,这可能是在严重水分胁迫下,山桃为防止蒸腾失水,关闭气孔的缘故^[12]。表明山桃在一天中对水分的有效利用有明显时段性。

表 4 不同土壤水分条件下山桃水分利用效率的日变化

土壤相对含水量 / %	时刻						
	7:00	9:00	11:00	13:00	15:00	17:00	19:00
80.2	2.94	2.36	1.70	1.71	2.33	2.25	-1.73
70.1	5.95	2.94	1.77	1.27	2.32	2.22	-1.71
57.3	1.83	6.21	3.11	3.19	3.82	5.55	-1.20
49.7	2.86	4.04	3.15	3.80	3.96	5.28	-0.94
39.6	4.38	1.68	4.47	2.07	4.95	5.62	-1.14
30.9	1.97	3.72	3.20	2.40	3.09	5.09	-1.04
20.1	4.52	2.70	3.17	3.63	3.10	1.88	0.19

土壤水分对山桃水分利用效率的日变化影响较大。土壤相对含水量为 57.3%时,全天中水分利用效率水平最高,最大值为 6.21 $\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$ (表 4),日均值为 3.22 $\pm 2.58 \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$ (表 2);其次在土壤含水量为 39.6%时,最大值为 5.62 $\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$ (表 4),日均值为 3.15 $\pm 2.40 \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$ (表 2);当土壤相对含水量高于 57.3%,水分利用效率明显下降,表明土壤水分过高反而不利于水分利用效率的提高。当土壤相对含水量低于 30.9%(达到 20.1%),水分利用效率虽然能维持在较高的水平,但由于严重的水分胁迫导致了光合生产力的下降,影响山桃正常的蒸腾耗水功能^[12],据此可以认为此水分点为维持山桃正常生长的土壤水分下限(或称之为所允许土壤水分最大亏缺程度)。

水分利用效率是深入研究植物高效利用水资源、评价植物生长适宜程度的综合指标^[13-17]。在半干旱黄土丘陵沟壑区,土壤相对含水量为 30.9%~57.3%是适合山桃生长的适宜水分范围。

3.3 气孔导度 (G_s)、胞间 CO_2 浓度 (C_i) 和气孔限制值 (L_s) 的日变化

由表 5~7 得出:不同土壤水分条件下,气孔导度的变化规律与光合速率和蒸腾速率的日变化基本一致(表 5、1、3)。当土壤相对含水量为 57.3%~

80.2%时,气孔导度在早上 7:00 达到最大值,之后气孔导度随时间的变化而逐渐减小;相对含水量为 57.3%时,气孔导度在 7:00—13:00 较高,平均值为 229.3 $\pm 15.2 \text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,分别比相对含水量为 70.1%、80.2%时高出 40.8、56.0 $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,说明过高的土壤水分影响了叶片的气孔导度。当相对含水量低于 57.3%时,气孔导度的变化较为复杂,下午时段气孔导度随胞间 CO_2 浓度的升高而下降,说明干旱条件下气孔在控制 CO_2 出入叶片方面发挥着重要作用,气孔限制是光合速率下降的主要原因。当土壤相对含水量为 30.9%~49.7%时,上午时段(7:00—13:00)气孔导度和胞间 CO_2 浓度明显下降(表 5、6),气孔限制值明显升高(表 7);但下午时段(15:00—19:00)气孔导度和气孔限制值下降,胞间 CO_2 浓度明显升高。根据气孔限制理论^[18-19]可以推断:限制山桃光合作用的原因,在上午时段(13:00 以前)以气孔限制为主(由于气孔因素造成的 CO_2 供应不足);而下午时段(13:00 以后)转变为以非气孔限制为主(环境因子的胁迫已导致叶肉细胞光合机构的光合能力下降)。

表 5 不同土壤水分条件下山桃的气孔导度的日变化

相对含水量 / %	时刻						
	7:00	9:00	11:00	13:00	15:00	17:00	19:00
80.2	208	180	166	139	138	92	87
70.1	217	208	165	164	96	83	57
57.3	247	232	228	210	83	31	31
49.7	97	92	81	67	110	73	72
39.6	89	82	61	69	41	27	19
30.9	151	99	74	49	87	50	43
20.1	104	60	45	42	34	33	24

表 6 不同土壤水分条件下山桃的胞间 CO_2 浓度的日变化

相对含水量 / %	时刻						
	7:00	9:00	11:00	13:00	15:00	17:00	19:00
80.2	364	293	250	252	200	174	151
70.1	379	370	359	356	278	239	222
57.3	389	284	263	250	248	234	194
49.7	363	280	276	257	290	317	397
39.6	361	340	211	172	188	392	430
30.9	365	223	189	200	159	333	402
20.1	195	196	197	206	219	253	415

当土壤相对含水量小于 30.9%(降至 20.1%)时,从上午 7:00 开始,便呈现胞间 CO_2 浓度明显上升,而气孔限制值明显下降的趋势(表 6、7),即山桃

全天的光合作用一直处于非气孔限制状态。表明严重的水分胁迫,已导致叶肉细胞光合能力下降,光合生产力受到严重影响^[20-21]。

表 7 不同土壤水分条件下山桃气孔限制值的日变化

相对含水量 /%	时刻						
	7:00	9:00	11:00	13:00	15:00	17:00	19:00
80.2	0.074	0.214	0.310	0.309	0.446	0.259	0.259
70.1	0.275	0.265	0.291	0.292	0.501	0.336	0.077
57.3	0.010	0.389	0.313	0.369	0.346	0.381	-0.026
49.7	0.079	0.219	0.243	0.339	0.256	0.166	-0.022
39.6	0.305	0.313	0.573	0.616	0.610	-0.023	-0.075
30.9	0.079	0.426	0.506	0.675	0.610	0.157	0.032
20.1	0.497	0.487	0.489	0.464	0.425	0.419	-0.043

4 结论

不同土壤水分条件下,山桃光合及蒸腾等生理参数的日变化表现出不同的变化规律,与土壤水分具有明显的阈值响应。山桃作为在黄土丘陵区植被恢复中具有较大开发利用前途的优良经济灌木树种,由于其对土壤水分的适应范围较窄,适合山桃生长的适宜水分范围为 30.9% ~ 57.3%,并且干旱、高温和强光在半干旱黄土丘陵区是经常出现的环境胁迫因子。水资源缺乏的现实不可能通过浇水增加土壤水分来满足山桃生长的需要,同时山桃并非是抗干旱能力和耐强光胁迫能力很强的树种,在立地配置上应选择土壤水分条件较好、光照强度和温度较低的阴坡或半阴坡栽培,以尽量减少水分胁迫和强光胁迫造成的不良影响,以获得较大的生产力。

参考文献:

- [1] 程积民,万惠娥,王静.黄土丘陵区山桃灌木林地土壤水分消耗与调控恢复[J].土壤学报,2003,40(5):691-696
- [2] Wang Q C, Sun Z H, Zhang Y D. Adaptive responses of *Acer ginnala*, *Pynus ussuriensis* and *Pnunu davidiana* seedlings to soil moisture stress [J]. Journal of Forestry Research, 2003, 14 (4): 280 - 284
- [3] 张源润,蒋奇,蔡进军,等.山桃沙棘混交林养分状况研究[J].水土保持通报,2006,26(4):60-63
- [4] 韩蕊莲,侯庆春.山桃山杏苗木耗水特性研究[J].西北植物学报,1996,16(6):92-94
- [5] Ohta S, Nishttant C, Yamamoto T. Chloroplast microsatellites in *Pninus*, Rosaceae [J]. Molecular Ecology Notes, 2005, 5 (4): 837 - 840
- [6] 王会肖,刘昌明.作物光合、蒸腾与水分高效利用的试验研究[J].应用生态学报,2003,14(10):1632-1636
- [7] 王强,张其德,卢从明,等.超高产杂交稻不同生育期的光合色素含量、净光合速率和水分利用效率[J].植物生态学报,2002,26(6):647-651
- [8] 王磊,张彤,丁圣彦.干旱和复水对大豆光合生理生态特性的影响[J].生态学报,2006,26(7):2073-2078
- [9] 廖建雄,王根轩.干旱、CO₂和温度升高对春小麦光合、蒸发蒸腾及水分利用效率的影响[J].应用生态学报,2002,13(5):547-550
- [10] Long S P, Baker N R, Raines C A. Analyzing the responses of photosynthetic CO₂ assimilation to long-term elevation of atmospheric CO₂ concentration [J]. Vegetation, 1993, 104/105:33-45
- [11] 杨朝翰,王艳云,周泽福,等.黄土丘陵区杠柳叶片气体交换过程对土壤水分的响应[J].林业科学研究,2006,19(2):231-234
- [12] Hsiao T C. Plant responses to water stress [J]. Ann Rev Plant Physiol, 1973, 24: 519 - 570
- [13] 山仑.植物水分利用效率与半干旱地区农业节水[J].植物生理学通讯,1994,30(1):61-66
- [14] Hanks R J. Limitations to efficient water use crop production [J]. American Society of Agronomy Inc, 1983: 393 - 411
- [15] 山仑,徐萌.节水农业及其生理基础[J].应用生态学报,1991,2(1):70-76
- [16] Tearl D. Crop Water Relations [M]. New York: A Wiley-Interscience Publication, 1982
- [17] Eck H V. Effect of water deficits on yield, yield components, and water use efficiency of irrigated corn [J]. Agron J, 2002, 78: 1034 - 1040
- [18] Aroe M, Virgin I, Ersson B. Photoinhibition of photosystem . Inactive, protein damage and turnover [J]. Biochim Biophys Acta, 1993 (1143): 113
- [19] Xu D Q, Zhang Y Z, Zhang R X. Photoinhibition of photosynthesis [J]. Acta Phytophysiological Sinica, 1992, 28(4): 237
- [20] Vu J C V, Allen L H, Bowes G. Drought stress and elevated CO₂ effects on soybean ribulose biphosphate carboxylase activity and canopy photosynthetic rates [J]. Plant Physiol, 1987, 83: 573 - 578
- [21] Evans J R, Seemann J R. Differences between wheat geotypes in specific activity of ribulose-1, 5 - biphosphate carbosylase and the relationship to photosynthesis [J]. Plant Physiol, 1984, 74: 759 - 765