

水分胁迫下细子龙的生长及光合特征研究

莫雅芳¹, 吕曼芳², 秦武明³, 邱鹏光³, 吴方成³

(1. 广西国有高峰林场, 广西 南宁 530002; 2. 广西国有维都林场, 广西 来宾 546100; 3. 广西大学 林学院, 广西 南宁 530005)

摘要:对细子龙(*Amesiodendron chinense*)在不同水分梯度胁迫下的生长及光合生理特征进行研究。结果表明:细子龙的地径、苗高相对增长率、叶片相对含水量随着土壤水分减少而减少,差异达到显著水平;20%水分处理的叶绿素含量最低,与其他处理差异显著;光合速率 P_n 、蒸腾速率 T_r 、气孔导度 G_s 、水分利用率 WUE 随着土壤水分的减少而降低,细胞间 CO_2 浓度随着土壤水分的减少而增加;水分胁迫引起细子龙光合速率下降是非气孔限制因素的影响。

关键词:细子龙;水分胁迫;生长率;光合特征

中图分类号:S718.45

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2014)01-0021-04

Growth and Photosynthetic Characteristics of *Amesiodendron chinense* under Water Stress

MO Ya-fang¹, LYU Man-fang², QIN Wu-ming³, QIU Peng-guang³, WU Fang-cheng³

(1. Gaofeng Forest Farm of Guangxi, Nanning, Guangxi 530002, China; 2. Weidu Forest Farm of Guangxi, Laibin, Guangxi 546100, China; 3. Forestry College of Guangxi University, Nanning, Guangxi 530005, China)

Abstract: Growth and photosynthetic characteristics of *Amesiodendron chinense* under different levels of water stress were examined. The relative growth of diameter and height, relative water content of leaf decreased with the decrease of soil water. The differences were significant. The chlorophyll content was the lowest at 20% water treatment, and different with others. With the reduction of soil water, the photosynthetic rate, transpiration rate, stomatal conductance and water use efficiency all decreased. Inter-cellular CO_2 concentration decreased with the increase of soil water. The falling of photosynthetic rate was affected by non-stomatal limitation factors.

Key words: *Amesiodendron chinense*; water stress; growth rate; photosynthetic characteristic

细子龙(*Amesiodendron chinense*), 无患子科细子龙属常绿乔木, 又名荔枝公(广东)、瑶果、假龙眼(广西)、唛瑶(广西壮语)等, 喜生于石灰岩山区湿润低谷中, 主要分布于贵州、广西、广东及海南, 越南亦有分布。细子龙是广西珍贵树种, 其中田林细子龙(*Amesiodendron tienlinensis*)为国家三级保护植物, 细子龙种子富含油和淀粉, 油不能食, 可供工业用, 淀粉可作饲料和酿酒; 木材致密坚韧, 可供雕刻, 做家具, 建筑和造船^[1]。由于细子龙树种用途较广泛, 极具栽培价值。关于细子龙的研究较少, 主要出现在海南、闽南地区引种栽培抗寒力、森林景观恢复树种中^[2-3], 深入研究的只有该树种营养贮藏蛋白质

的分离鉴定^[4], 对细子龙抗逆性研究尚少。因此, 开展细子龙树种在水分胁迫下的光合生理反应探究试验, 掌握细子龙应对水分胁迫中的光合特征, 为该珍贵树种引种保存以及推广栽培提供理论依据具有重要实践意义。

1 材料与方法

1.1 材料与试验设计

试验地设在广西大学林学院苗圃遮雨大棚中, 试验苗木为广西国有维都林场培育的细子龙1年生实生苗, 苗木生长均匀, 高约30 cm。盆栽土壤用黄心土和河沙按3:1的比例混合, 每盆重约2 kg。将

苗木移栽到花盆中,每盆 1 株苗木,恢复培养 1 个月后进行试验。将苗木等分为 5 组,每组 15 盆,设置 5 个水分胁迫梯度,土壤含水量分别为田间持水量(23.6%)的 20%、35%、50%、70%、90%(CK)(分别对应处理 1~处理 5),试验采用盆栽控水法和土壤相对含水量测定法相结合,通过测定所设定土壤含水量下的盆苗重量,在试验过程中每日 17:00 用称重法控制土壤含水量(下午水分蒸发较强,因此该时段土壤含水量可能有 $\pm 5\%$ 变化)。试验从 2012 年 9 月 18 日开始,2012 年 10 月 8 日结束,10 月 9 日测定光合指标。

1.2 指标测定

处理前测定细子龙地径、苗高生长指标,试验过程每日记录苗木生长情况,处理 20 d 再次测定苗木地径、苗木指标,并于试验结束的次日(天气晴朗)9:00—11:00 使用便携式光合测定系统 CI-340 测定苗木净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度和细胞间 CO_2 浓度等光合指标参数,每个处理随机选择 3 株苗木,每株随机选择 3 片成熟叶进行测定,最后取平均值;使用 SPAD-502 叶绿素测定仪测定叶片叶绿素含量,每处理随机选择 10 片叶片测定,取均值代表该处理含量;并采集不同处理的成熟功能叶回到实验室测定叶片相对含水量。指标计算公式^[5-7]如下:

相对生长率=

$$\frac{\text{最后生长量}-\text{初始生长量}}{\text{初始生长量}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{相对含水量} = \frac{\text{外业鲜重}-\text{烘干重量}}{\text{饱和鲜重}-\text{烘干重量}} \times 100\% \quad (2)$$

$$WUE = \frac{P_n}{T_r} \quad (3)$$

气孔限制值

$$L_s = \frac{1 - \text{胞间 } \text{CO}_2 \text{ 浓度 } C_i}{\text{大气 } \text{CO}_2 \text{ 浓度 } C_a} \times 100\% \quad (4)$$

2 结果与分析

2.1 水分胁迫对细子龙苗木生长的影响

2.1.1 不同水分胁迫条件下细子龙苗木生长 细子龙在水分胁迫处理 20 d 过程中的生长表现见表 1。水分胁迫程度不同,细子龙生长表现也有差异。处理 1 在第 3 天苗木就开始轻度萎蔫,随着处理时间的增加萎蔫程度越严重,处理结束后苗木枯萎,落叶严重,挖掘根系发现已枯死;随着土壤含水量的增加,苗木萎蔫程度递减,落叶现象减少,但处理 5 因为长时间土壤含水量较高而出现板结情况,可能由于处理时间仅为 20 d,苗木生长还未受土壤板结影

响太大,苗木生长表现正常。细子龙在水分亏缺从轻微到严重过程中,叶片表现为萎蔫、枯死、脱落等系列反应,处理 1 因水分严重亏缺,苗木达到了永久性萎蔫而枯死;而其他处理的萎蔫则属于暂时性萎蔫,因此通过恢复水分供应,苗木可恢复正常生长。细子龙产生的系列反应,是该植物对水分胁迫的适应性反应。

表 1 细子龙在不同水分胁迫下的生长情况

Table 1 Growth of *A. chinense* under drought stress

处理	生长情况
1	第 3 天轻度萎蔫,第 15 天重度萎蔫,第 20 天全株枯萎,老叶脱落,根系枯死
2	第 5 天轻度萎蔫,第 10 天中度萎蔫,第 20 天轻微落叶,细根褐色,短小
3	第 10 天前生长正常,第 20 天有 5 株轻度萎蔫,根系正常
4	生长正常,第 10 天后下午叶片下垂,傍晚补充土壤水分后恢复活力
5	生长正常,第 15 天后土壤出现板结现象

2.1.2 不同水分胁迫条件下细子龙地径、苗高相对生长率 不同水分胁迫下细子龙地径、苗高相对生长率差异均达到显著差异(表 2),说明水分对细子龙生长影响较大。细子龙苗木在生长过程中,根系从土壤中吸收水分以供应生长需要,由于人为的控制土壤中的含水量,不同水分胁迫处理会导致苗木能够吸收的水分不同,从地径生长可以看随着土壤相对含水量的增加地径相对生长率逐渐提高,土壤含水量在 50%~70%之间生长差异较大,土壤含水量在 20%以下地径生长明显很缓慢;水分对细子龙苗高生长影响与地径生长一致,虽然生长率低于地径,但土壤含水量在 35%以下苗高生长也极缓慢,生长差异则出现在 70%~90%之间,综合地径、苗高生长可以看出细子龙随土壤水分的增加而生长得到提高,70%以上土壤含水量条件细子龙生长效果比较好。

表 2 不同水分胁迫下细子龙地径、苗高相对生长率

Table 2 Growth rate of ground diamete and seeding high

of *A. chinense* under drought stress

处理	地径相对生长率	苗高相对生长率
5	21.1a	15.9a
4	17.0ab	8.6b
3	9.1bc	7.8b
2	8.8bc	2.0c
1	2.8c	1.4c

注:字母不同表示差异显著($p < 0.05$),表 3 同。

2.2 水分胁迫对细子龙叶片相对含水量及叶绿素含量的影响

苗木维持体内生理生化的运转必须要有水分的参与,而叶片相对含水量越高则说明植物保水能力越强,适应干旱的能力越强。细子龙叶片相对含水

量随土壤含水量的减少而降低,不同处理差异达到显著水平(表 3),土壤含水量在 90%时处理的细子龙叶片相对含水量为 65.3%,而土壤含水量在 20%时叶片的相对含水量只有 19.8%。在对胁迫环境下,为适应环境而调整体内水分分布,因此叶片表现不同的含水量。在采集叶片测定含水量发现,处理 1 的叶片基本干枯,挤压叶片就会碎裂,但叶色并未退黄,依旧保持绿色,说明在这一土壤水分处理下已经超过植物生理极限,叶片细胞组织干旱致死亡。

细子龙随着土壤含水量的增加,叶片的叶绿素含量递增(表 3),20%土壤含水量处理的苗木叶绿素含量与其他处理差异显著,其余处理叶绿素含量均在 35.8 以上,叶绿素含量的的变化与叶片相对含水量变化一致。细子龙在生长过程中,土壤水分供应不足,细胞中的叶绿体、线粒体等细胞器因为水分亏缺而受到伤害,光合色素发生降解,水分胁迫程度

越重,叶绿素含量则越低;处理 1 植株叶片干枯脱落,但仍具有一定叶绿素含量,这可能是细子龙对干旱胁迫的一种反应,若能及时复水,还能恢复生长。

表 3 不同水分胁迫下细子龙叶片相对含水量及叶绿素含量
Table 3 Leaf relative water content and chlorophyll content of *A. chinense* under drought stress

处理	相对含水量%	叶绿素含量
5	65.3a	41.0a
4	60.3a	37.8a
3	48.7b	37.6a
2	38.0b	35.8a
1	19.8c	21.3b

2.3 水分胁迫对细子龙光合生理的影响

2.3.1 净光合速率 P_n 与蒸腾速率 T_r 的变化 不同水分胁迫下细子龙光合生理指标随之变化(表 4),测定时空气温度 34℃,空气湿度 42%,大气 CO₂ 浓度 540×10^{-6} ,大气压强为 100.13 kPa。

表 4 不同水分胁迫下细子龙光合生理

Table 4 Photosynthetic physiology of *A. chinense* under drought strees

处理	净光合速率 P_n /($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	蒸腾速率 T_r /($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	气孔导度 G_s /($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	胞间 CO ₂ 浓度 C_i / $\times10^{-6}$	水分利用率 (WUE)	气孔限制值 L_s /%
1	0.14	0.08	42.21	530.50	1.84	1.76
2	0.76	0.38	103.30	525.78	2.01	2.63
3	0.82	0.40	124.32	522.77	2.08	3.19
4	2.53	0.86	256.56	519.13	2.94	3.86
5	2.66	0.74	227.70	488.48	3.61	9.54

从表 4 可知,随着土壤水分的增加,细子龙净光合速率随之增加,大致分为 3 个阶段,20%土壤水分净光合速率极低,仅有 $0.14\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,这一指标也进一步证明该处理下苗木濒临枯死;35%~50%土壤含水量处理时细子龙净光合速率略高,但也处于低水平,说明水分亏缺对细子龙光合作用影响非常明显;当土壤含水量在 70%以上,净光合速率达到 $2.53\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上,远高于其他处理,净光合速率越大,苗木光合积累的物质越多,因此对应的与细子龙地径苗高较高的生长水平变化一致。

蒸腾速率是植物水分状况重要的指标,研究发现不同水分胁迫处理后细子龙蒸腾速率差异并不大,但处理 1 的蒸腾速率接近 0,与叶片相对含水量测定结果相一致,极度萎蔫甚至枯死的苗木蒸腾作用极小。土壤水分胁迫情况下,苗木为了维持自身生理生化运转,通过降低蒸腾速率,为减少植物体内水分的损失来应对胁迫环境。处理 2、3 中土壤含水量从 50%下降到 35%,细子龙净光合速率降低,蒸腾速率保持在 0.40 到 0.38 较低水平,与孔艳菊^[8]等研究的元宝枫干旱胁迫结果类似,说明细子龙具有一定的延迟脱水能力(即避旱能力)。经对比发

现,虽然土壤含水量不同,细子龙蒸腾速率总体均低于净光合速率,并且变化趋势一致。

2.3.2 气孔导度 G_s 变化与细胞间 CO₂ 浓度 C_i 变化 气孔是植物 CO₂ 和水汽交换的主要通道,气孔导度则是反映这种交换能力的重要生理指标^[9]。从表 4 可以看出,土壤水分亏缺越严重,细子龙叶片气孔导度越低,当土壤含水量为 20%处理时,细子龙气孔导度仅有 $42.21\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,土壤含水量 90%时气孔导度值为 $227.70\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,是最低处理的 5.4 倍之多。细子龙通过减小气孔开度以防止植物体内水分的过度散失,以维持植株正常生长,因此细子龙的蒸腾速率与气孔导度变化一致。

细子龙细胞间 CO₂ 浓度随着土壤水分的增加而减少,土壤水分胁迫程度加剧,导致植物对 CO₂ 利用效率降低,土壤含水量为 90%时胞间 CO₂ 为 488.48×10^{-6} ,当土壤水分为 20%时,胞间 CO₂ 高达为 530.50×10^{-6} 。细胞间 CO₂ 浓度升高,受气孔对水分限制的影响,光合作用合成受阻,最终细子龙净光合速率降低。细子龙在土壤水分胁迫条件下的气孔导度与细胞间 CO₂ 浓度变化规律相反。

2.3.3 水分利用效率 WUE 和气孔限制值 L_s 的变化 水分利用效率是植物光合速率与蒸腾速率的

比值,其大小反映植物对逆境适应能力的强弱^[10]。从表 4 可知,20%土壤水分处理下细子龙对水分的利用效率只有 1.84,随着土壤水分的增加,细子龙对水分的利益效率值也增加,35%~50%水分处理的细子龙 WUE 值接近,而与 70%、90%水分胁迫梯度处理的细子龙 WUE 值相差较大,说明土壤水分减少,植物水分利用率被迫降低。

在胁迫过程中,光合作用的影响分为气孔限制和非气孔限制,本研究随着土壤水分胁迫程度的增加,细子龙的净光合速率 P_n 与蒸腾速率 G_s 下降,气孔限制值 L_s 减小,细胞间 CO_2 浓度 C_i 增大,属于非气孔限制,说明细子龙受土壤水分亏缺影响其光合能力下降是非气孔因素的限制,这与张成军^[11]等研究的 4 种木本植物光合下降是受非气孔因素限制的结果一致。

3 结论与讨论

不同水分胁迫处理对细子龙的生长影响较大,水分胁迫程度超过细子龙生长极限(土壤含水量 20%)时,细子龙出现永久性萎蔫而死亡;而 CK 对照(土壤含水量 90%左右)处理时,土壤出现板结现象,根系生长也会因此受到抑制,也可能会影响到苗木的生长。土壤过干或过湿都会对植物造成伤害,对植株生长产生直接或间接的抑制作用^[12]。因此在细子龙栽培过程中,注意根据林地土壤水分情况,适当的采取松土、施肥等营林抚育措施,保障细子龙正常生长。

土壤水分对细子龙净光合速率 P_n 、蒸腾速率 T_r 、气孔导度 G_s 和细胞间 CO_2 浓度 C_i 等光合指标影响明显,随着土壤含水量的变化, P_n 、 T_r 和 G_s 变化趋势一致,细胞间 CO_2 浓度 C_i 则出现相反的变化规律。细子龙受到水分胁迫时,植株为了保证生理生化运转正常,会关闭气孔,降低蒸腾速率以防止水分过分蒸发,这同时也会影响细胞间 CO_2 的交换,水分亏缺越严重,细胞伤害程度加深,光合作用受到制约, CO_2 利用率降低而大量积累,最终出现 CO_2 浓度随着土壤水分减少而增加。细子龙水分胁迫下的光合生理反应与王晓冬^[13]等研究真桦应对干旱胁迫时后期的变化相同。综合生长和光合指标,细子龙在 70%的土壤含水量状态下生长较为适宜。

细子龙在水分胁迫下光合反应下降是非气孔限制因素的影响,据付士磊^[14]等对杨树胁迫研究的划分,胁迫初期光合反应下降原因的气孔限制,中间过程是气孔限制和非气孔限制共同作用,到后期非气孔限制是主要因子,说明细子龙受水分胁迫已经达到一定程度。植物受水分胁迫后体内水分亏缺会造

成细胞结构被伤害,生理生化运转受阻,也会导致光合速率下降。因此细子龙水分胁迫的影响机制还应该从生理指标进一步探索。

参考文献:

- [1] 刘玉壶,罗献瑞. 中国植物志(无患子科)[M]. 北京:科学出版社,1985:50-51.
- [2] 叶功富,朱世威,罗幼宁,等. 闽南丘陵山地引种栽培树木的物候期与抗寒力调查[J]. 亚热带植物科学,2004,33(1):31-36.
YE G F, ZHU S W, LUO Y N, et al. Phenological phase and cold resistance of introduced tree species in hill mountains in Southern Fujian[J]. Subtropical Plant Science, 2004, 33(1): 31-36. (in Chinese)
- [3] 张晓红,邵景安,张超,等. 海南省大敢森林景观恢复示范区退化原始林特征[J]. 山地学报,2011,29(1):62-69.
ZHANG X H, SHAO J A, ZHANG C, et al. Characteristics of degraded primary forests in Dagan Demonstration Area of forest landscape restoration, Hainan[J]. Journal of Mountain Science, 2011, 29(1): 62-69. (in Chinese)
- [4] 王旭初,史敏晶,陈月昇,等. 无患子科树木细子龙营养贮藏蛋白质的分离鉴定[J]. 热带作物学报,2004,25(4):78-83.
WANG X C, SHI M J, CHEN Y Y, et al. Identification and distribution of vegetative storage proteins in a Sapindaceae tree *Amesiodendron chinense* (Merr.) Hu [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2004, 25(4): 78-83. (in Chinese)
- [5] 芮雯奕,田云录,张纪林,等. 干旱胁迫对 6 个树种叶片光合特性的影响[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2012,36(1):68-72.
RUI W Y, TIAN Y L, ZHANG J L, et al. Effect of drought stress on photosynthetic characteristic of six tree species [J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition, 2012, 36(1): 68-72. (in Chinese)
- [6] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京:高等教育出版社,2006:221-223.
- [7] 关义新,戴俊英,林艳. 水分胁迫下植物叶片光合的气孔和非气孔限制[J]. 植物生理学通讯,1995,31(4):293-297.
GUAN X Y, DAI J Y, LIN Y. The photosynthetic stomatal and nonstomatal limitation of plant leaves under water stress[J]. Plant Physiology Communications, 1995, 31(4): 293-297. (in Chinese)
- [8] 孔艳菊,孙明高,苗海霞,等. 干旱胁迫下元宝枫生长性状及生理特性研究[J]. 西北林学院学报,2006,21(5):26-31.
KONG Y J, SUN M G, MIAO H X, et al. Growth properties and physiological characteristics of *Acer truncatum* under drought stress[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2006, 21(5): 26-31. (in Chinese)
- [9] 马钦彦,蔺琛,韩海荣,等. 山西太岳山核桃楸光合特性的研究[J]. 北京林业大学学报,2003,25(1):14-18.
MA Q Y, LIN C, HAN H R, et al. Photosynthesis characteristics of *Juglans mandshurica* Maxim in Taiyue Mountain region, Shanxi Province[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2003, 25(1): 14-18. (in Chinese)

(下转第 29 页)

- Conservation, 2000, 7(3): 219-221. (in Chinese)
- [11] 王兴祥, 张桃林, 张斌, 等. 低丘红壤花生南酸枣间作系统研究 II. 氮素竞争[J]. 土壤, 2003, 35(1): 66-68.
WANG X X, ZHANG T L, ZHANG B, *et al.* Choerospondias axillaris and peanut (*Archishypogaea*) alley cropping on udic ferrosol in subtropical China II. Competition of N[J]. Soils, 2003, 35(1): 66-68. (in Chinese)
- [12] 云雷, 毕华兴, 田晓玲, 等. 晋西黄土区果农间作的种间主要竞争关系及土地生产力[J]. 应用生态学报, 2011, 22(5): 1225-1232.
YUN L, BI H X, TIAN X L, *et al.* Main interspecific competition and land productivity of fruit-crop intercropping in Loess Region of West Shanxi[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(5): 1225-1232. (in Chinese)
- [13] 彭晓邦, 蔡靖, 姜在民, 等. 光能竞争对农林复合生态系统生产力的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(1): 545-552.
PENG X B, CAI J, JIANG Z M, *et al.* Effects of light competition on crop productivity in an intercropping agroforestry ecosystem[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(1): 545-552. (in Chinese)
- [14] 翟进升, 王明珠, 张斌, 等. 低山红壤南酸枣与花生复合系统种间水肥光竞争的研究——IV. 南酸枣与花生利用 N 素养分探析[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(2): 82-84.
ZHAI J S, WANG M Z, ZHANG B, *et al.* Competition of water, fertilizer and light between *Choerospondias axillaries* trees and peanut in the low hilly land of red soil-analysis on using rate of N of *Choerospondias axillaries* trees and peanut[J]. Chinese Journal of Eco-agriculture, 2006, 14(2): 82-84. (in Chinese)
- [15] 史晓丽, 郭小平, 毕华兴, 等. 晋西果农间作光竞争及产量研究[J]. 北京林业大学学报, 2009, 31(Supp. 2): 115-118.
SHI X L, GUO X P, BI H X, *et al.* Light competition and yield of fruit-crop intercropping system in Western Shanxi Province[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2009, 31(Supp. 2): 115-118. (in Chinese)
- [16] RAO M R, NAIR P K R, ONG C K. Biophysical interactions in tropical agroforestry systems[J]. Agroforestry Systems, 1998, 38: 3-50.
- [17] THEVATHASAN N V, GORDON A M. Ecology of tree intercropping systems in the North temperate region: Experiences from southern Ontario, Canada[J]. Agroforestry Systems, 2004, 61: 257-268.
- [18] 赵英, 张斌, 王明珠. 农林复合系统中物种间水肥光竞争机理分析与评价[J]. 生态学报, 2006, 26(6): 1792-1801.
ZHAO Y, ZHANG B, WANG M Z. Assessment of competition for water, fertilizer and light between components in the alley cropping system[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(6): 1792-1801. (in Chinese)
- [19] 樊巍, 张劲松, 孟平, 等. 苹果-平菇复合系统生态经济效益研究[J]. 林业科学, 2002, 38(5): 152-155.
FAN W, ZHANG J S, MENG P, *et al.* Economic and ecological effects of the apple-pleurotus ostreatus system[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2002, 38(5): 152-155. (in Chinese)
- [20] ONG C K, WILSON J, DEANS J D, *et al.* Tree-crop interactions: manipulation of water use and root function[J]. Agricultural Water Management, 2002, 53: 171-186.
- [21] 高国治, 王明珠, 张斌. 低山红壤南酸枣-花生间作系统物种间水肥光竞争的研究——II. 南酸枣与花生利用光能分析[J]. 中国生态农业学报, 2004, 12(2): 92-94.
GAO G Z, WANG M Z, ZHANG B, *et al.* Competition of the light, fertilizer and water between *Choerospondias axillaris* trees and peanut in the red soil low hilly land——II. analysis of using light energy of *Choerospondias axillaris* trees and peanut[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2004, 12(2): 92-94. (in Chinese)

(上接第 24 页)

- [10] 张玲玲, 苏印泉, 何德飞, 杜仲不同栽培模式的光合、水分生理及负离子效应对比[J]. 中南林业科技大学学报, 2012, 32(10): 24-28.
ZHANG L L, SU Y Q, HE D F. Effects of different cultivation patterns of *Eucommia ulmoides* on photosynthetic, water physiology and negative oxygenion content[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2012, 32(10): 24-28. (in Chinese)
- [11] 张成军, 郭佳秋, 解恒才, 等. 干旱对北京东灵山 4 种木本植物生理特性的影响[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2004, 28(6): 23-26.
ZHANG C J, GUO J Q, XIE H C, *et al.* Effects of drought on ecophysiological characteristics of four woody species in Beijing Dongling Mountain[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition, 2004, 28(6): 23-26. (in Chinese)
- [12] 蔡马, 韩蕊莲, 靳淑静, 等. 土壤干旱对黄土高原 2 种半灌木植物生长与耗水规律的影响[J]. 西北林学院学报, 2012, 27(6): 26-32.
CAI M, HAN R L, JIN X J, *et al.* Effect of soil drought on growth and water consumption of two subshrub species in Loess Plateau[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(6): 26-32. (in Chinese)
- [13] 王晓冬, 李蕴峰, 刘宇明. 干旱胁迫对真桦光合特性及渗透调节物质含量的影响[J]. 防护林科技, 2012(1): 25-27.
- [14] 付士磊, 周永斌, 何兴元, 等. 干旱胁迫对杨树光合生理指标的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(11): 2016-2019.
FU S L, ZHOU Y B, HE X Y, *et al.* Effects of drought stress on photosynthesis physiology of *Populus pseudo-simonii*[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(11): 2016-2019. (in Chinese)