

不同水分处理对地黄光合特性的影响

贾媛媛^a,何玉杰^a,梁宗锁^a,董芳^a,房林^b
(西北农林科技大学 a 生命科学学院, b 葡萄酒学院,陕西 杨凌 712100)

【摘要】 【目的】研究不同水分处理对地黄光合生理特性的影响,为其生长期间的水分管理提供理论依据。【方法】以地黄品种‘北京 1 号’为供试材料,采用盆栽试验研究不同水分胁迫下(处理 I ~ III 土壤含水量分别为田间持水量的 65%,50%和 35%)地黄叶片光合特性及叶绿素含量的变化。【结果】在地黄苗期、花期及根系膨大期,随着光合有效辐射的增加,3 个水分处理的净光合速率呈增加趋势;处理 I 和处理 II 的光饱和点均在 1 600 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 左右,处理 III 的光饱和点在 1 400 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 左右;随着地黄生育进程(苗期-花期-根系膨大期)的推进,3 个水分处理地黄的净光合速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度、蒸腾速率及叶绿素含量逐渐增加,且处理 I > 处理 II > 处理 III。【结论】地黄苗期土壤含水量维持在田间持水量的 50%,花期及根系膨大期维持在田间持水量的 65%,是最适宜地黄叶片进行光合作用的水分管理措施。

【关键词】 光合特性;地黄;水分胁迫

【中图分类号】 S567.23+9.01 【文献标识码】 A 【文章编号】 1671-9387(2009)08-0182-05

Effect of different moisture treatments on photosynthetic characteristics of *Rehmannia glutinosa* Libosch

JIA Yuan-yuan^a, HE Yu-jie^a, LIANG Zong-suo^a, DONG Fang^a, FANG Lin^b
(a College of Life Sciences; b College of Enology, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】 Study on the photosynthetic characteristics of *Rehmannia glutinosa* Libosch was done under different moisture treatments to provide theoretical basis for their water supply during growing. 【Method】 Beijing No. 1 as experiments material, the changes of photosynthetic characteristics and chlorophyll content in *R. glutinosa* Libosch under manmade conditions (the treatments of soil moisture I — III were 65%, 50% and 35% of field capacity) were studied. 【Result】 The results were as follows: the net photosynthetic rate of three moisture treatments increased with the increase of photosynthetically active radiation during the seedling, anthesis and root enlargement stage. Under treatment I and treatment II, light compensation point of the *R. glutinosa* Libosch was about 1 600 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, while under treatment III, light compensation point of the *R. glutinosa* Libosch was about 1 400 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. With the growing, the net photosynthetic rate, stomatal conductance, intercellular CO_2 concentration, transpiration rate and chlorophyll content increased obviously. The sequence from the highest to the lowest was treatment I > treatment II > treatment III. 【Conclusion】 Keeping the soil moisture to 50% of field capacity during the seeding period but 65% during the flowering period and storage root thickening period is the best irrigation arrangement for the leaves of *R. glutinosa* Libosch to make photosynthesis.

Key words: photosynthetic characteristic; *Rehmannia glutinosa* Libosch; water stress

* [收稿日期] 2008-12-03
[基金项目] 中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB2-05-01);西北农林科技大学学科带头人支持计划项目
[作者简介] 贾媛媛(1984—),女,陕西西安人,在读硕士,主要从事药用植物学研究。E-mail:jiajingling@126.com
[通信作者] 梁宗锁(1965—),男,陕西扶风人,教授,博士生导师,主要从事中草药规范化栽培理论与技术研究。
E-mail:liangzs@ms.iswc.ac.cn

地黄(*Rehmannia glutinosa* Libosch.)是玄参科(Scrophulariaceae)多年生草本植物,其块根可入药,在我国有悠久的药用历史,是传统的大宗中药材,据统计,它在中药处方中的使用频率排名处于前 10 位^[1]。在《中华人民共和国药典》2005 年版收载的中药成分制剂中,有近 1/4 含有地黄。随着中药走向世界,对地黄已开展了多方面的研究,近年来的研究主要集中在化学成分、药理作用、炮制方法等方面^[2-4],而对其光合特性的研究还未见报道。本试验研究不同水分处理对地黄光合作用的影响,探讨适宜地黄进行光合的供水量,以提高地黄的光能利用率,为地黄生产的水肥运筹和生理特性研究提供依据。

1 研究区自然概况

试验地位于西北农林科技大学植物科学试验园温室内。该园位于北纬 34°16'18",东经 108°04'59",平均海拔 500.4 m;属于暖温带半湿润半干旱气候,夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥,1 月平均气温 -1.4℃,7 月平均气温 26.2℃,年平均气温 12.9℃,绝对最高气温 42.0℃,绝对最低气温 -9.4℃,年降水量 637.0 mm;土壤类型主要为娄土。

2 材料与方法

2.1 材料

供试地黄品种为‘北京 1 号’,种根取自汉中中成绿色农业有限公司。2008-04-10 于西北农林科技大学植物科学试验园大田内播种育苗,5 月中旬挑选生物量基本一致的幼苗移栽进温室盆内,共 30 盆,每盆留苗 2 株,缓苗,06-10 起控水。盆直径 25 cm,高 23 cm,定植土为风干娄土、沙、腐熟牛粪按 3:1:1 质量比混匀而成,测得田间持水量为 20.29%。

2.2 试验设计

试验设 3 种水分处理,每种处理 10 个重复。处理 I、II、III 的土壤含水量分别为田间持水量的 65%,50%和 35%。采用称重控水法,每 2 d 称重补水 1 次,分别于地黄苗期(06-27)、花期(07-19)和根系膨大期(08-18),选择晴朗天气于上午 09:00~11:00 测定光合参数和叶片叶绿素含量。

2.3 方法

本研究在测定叶片光合-光响应曲线以及净光合速率(P_n)时,使用人工光源、叶室温度控制装置以及装有新鲜碱石灰的调气管,将环境影响因子设定在同一水平。

2.3.1 光合-光响应曲线的测定 各处理选取长势

基本相同的地黄植株 6~8 株作为供试材料,随机选择无病虫害及机械损伤的地黄成熟叶(自顶端起第二轮叶),用 LI-6400 便携式光合作用仪进行测定,利用红蓝光源设定叶室中光合有效辐射(PAR)分别为 1 800,1 600,1 400,1 200,1 000,800,600,400,300,200,100,50,20,0 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,观测地黄叶片对不同强度光合有效辐射的响应特征,通过该曲线可得到相关光合参数。

2.3.2 光合特征值的测定 利用红蓝光源设定叶室中光合有效辐射为 1 600 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,叶温 30~32℃。随机选择无病虫害及机械损伤的地黄成熟叶(自顶端起第二轮叶),采用 LI-6400 便携式光合作用测定仪分别测定地黄叶片的净光合速率(P_n)、胞间 CO_2 浓度(C_i)、气孔导度($Cond$)、蒸腾速率(Tr)等参数,每个处理选 3 片叶,每个叶片记录相对恒定的数值 3~5 个。

2.3.3 叶绿素含量的测定^[5] 各处理选取长势基本相同的植株 6~8 株作为供试材料,每处理随机选择无病虫害及机械损伤的地黄成熟叶(自顶端起第二轮叶)3 片,洗净擦干,剪碎混匀称质量,用丙酮法提取叶绿素,721 型分光光度计测定,最后取 3 次测定的平均值。

3 结果与分析

3.1 不同水分处理对地黄叶片光响应特征的影响

光响应(P_n - PAR)曲线可反映出植物光合作用与光合有效辐射的关系^[6],植物开始达到光饱和时的光照强度称为光饱和点(LSP),此时的光合速率达到最大值;当光强弱到某一值时,光合作用吸收的 CO_2 与呼吸作用释放的 CO_2 处于动态平衡, P_n 为 0,这时的光照强度称为光补偿点(LCP)。植物叶片的光饱和点(LSP)与光补偿点(LCP)反映了植物对光照条件的要求,分别体现了对强光和弱光的利用能力^[7]。

图 1 为不同时期不同水分处理地黄叶片的 P_n - PAR 响应曲线,从中可以看出,在光照强度达到光饱和点前,叶片的净光合速率随着光照强度的增加而增加,两者之间具有明显的正相关性;当光照强度超过光饱和点后,光合速率趋于下降。

在地黄苗期,处理 I 的 LCP 为 30 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, LSP 为 1 599 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;处理 II 的 LCP 为 25 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, LSP 为 1 599 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;处理 III 的 LCP 为 29 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, LSP 为 1 401 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。总体而言,苗期 3 种水分处理间地

黄叶片的 LSP 和 LCP 差异较小。

在地黄花期,处理Ⅰ的 LCP 为 37 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, LSP 为 1 599 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;处理Ⅱ的 LCP 为 33 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,LSP 为 1 599 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;处理Ⅲ的

LCP 为 34 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,LSP 为 1 401 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

花期 3 种水分处理地黄叶片的 LSP、LCP 与苗期相比差异不显著;但与苗期相比,处理Ⅰ的光合能力正在逐渐提高,并超过处理Ⅱ。

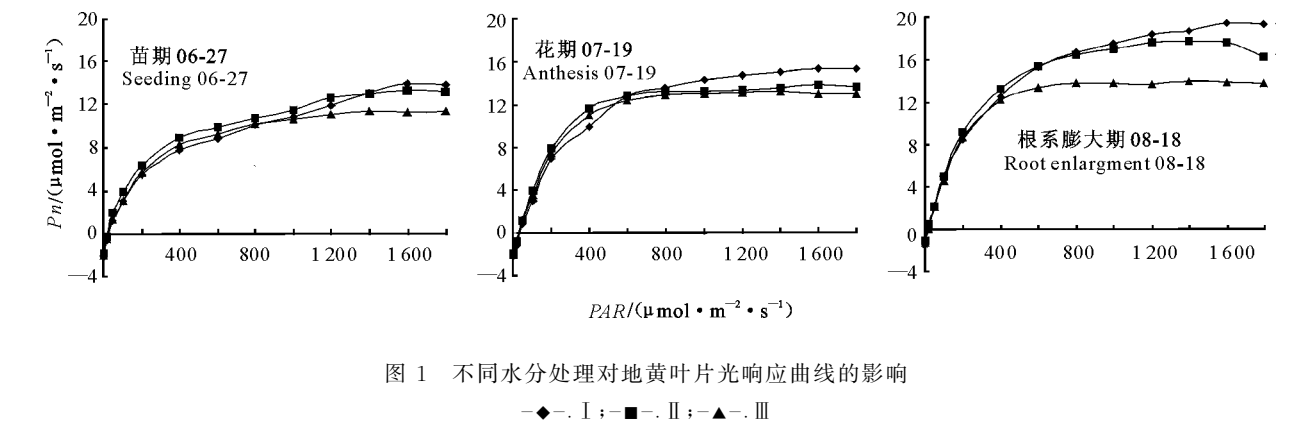


图 1 不同水分处理对地黄叶片光响应曲线的影响
—◆— Ⅰ; —■— Ⅱ; —▲— Ⅲ

Fig. 1 Light response of photosynthetic rate of *R. glutinosa* Libosch. leaves under different moisture treatments

在地黄根系膨大期,处理Ⅰ的 LCP 为 16 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,LSP 为 1 599 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;处理Ⅱ的 LCP 为 14 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,LSP 为 1 401 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;处理Ⅲ的 LCP 为 18 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,LSP 为 1 401 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。在根系膨大期,各处理间地黄叶片光合能力已经出现明显差异,处理Ⅲ的光合能力较处理Ⅰ、Ⅱ显著下降。

3. 2 不同水分处理对地黄叶片光合特性的影响

3.2.1 净光合速率(P_n) P_n 是植物光合生理特性的综合反映,也是体现其光合效能的直接指标^[8]。由表 1 可知,各水分处理的地黄叶片 P_n 与叶绿素含量的变化趋势基本一致,即随着地黄生育

进程推进,不同水分处理的 P_n 呈升高趋势,其中根系膨大期地黄 P_n 较苗期和花期有较大幅度提高。处理Ⅰ的 P_n 在各生育期均最高,处理Ⅱ次之,处理Ⅲ的最低,各处理间也均呈极显著差异。

3.2.2 气孔导度($Cond$) $Cond$ 是反映气孔阻力的一个参数, $Cond$ 大则气孔阻力小,因此大的 $Cond$ 有利于气体交换,光合所需的 CO_2 易于进入气孔^[9]。由表 1 可知, $Cond$ 的变化与 P_n 十分相似,随着地黄生育期的推进,3 个水分处理的 $Cond$ 呈升高趋势;且在同一生育期,地黄 $Cond$ 的变化均为:处理Ⅰ>处理Ⅱ>处理Ⅲ,除花期处理Ⅱ与处理Ⅲ间呈显著差异外,其余各处理间均呈极显著差异。

表 1 不同水分处理对地黄叶片光合特性的影响						
Table 1 Photosynthetic characteristics of <i>R. glutinosa</i> Libosch leaves under different moisture treatments						
处 理 Treatment	P_n			$Cond$		
	苗期 Seedling	花期 Anthesis	根系膨大期 Root enlargement	苗期 Seedling	花期 Anthesis	根系膨大期 Root enlargement
Ⅰ	14.00 aA	15.40 aA	19.50 aA	0.168 aA	0.229 aA	0.300 aA
Ⅱ	13.32 bB	13.90 bB	17.60 bB	0.150 bB	0.150 bB	0.246 bB
Ⅲ	11.33 cC	13.00 cC	13.90 cC	0.105 cC	0.147 cB	0.160 cC
处 理 Treatment	C_i			Tr		
	苗期 Seedling	花期 Anthesis	根系膨大期 Root enlargement	苗期 Seedling	花期 Anthesis	根系膨大期 Root enlargement
Ⅰ	287 aA	301 aA	304 aA	3.05 aA	3.15 aA	3.88 aA
Ⅱ	253 bB	264 bB	296 bB	1.89 bB	2.07 bB	2.49 bB
Ⅲ	189 cC	242 cC	260 cC	1.37 cC	1.93 cC	2.03 cC

注:同列数据后标不同小写字母者表示差异显著($P<0.05$),标大写字母者表示差异极显著($P<0.01$)。下表同。
Note: Different small letters mean they are significantly different ($P<0.05$) in the same row, different capital letters mean they are greatly significantly different ($P<0.01$) in the same row. They are the same as below.

3.2.3 胞间 CO_2 浓度(C_i) 由表 1 可知, C_i 的变化与 P_n 、 $Cond$ 基本一致。随着地黄生育期的推进,3 个水分处理地黄的 C_i 一直呈升高趋势,且同一时期地黄的 C_i 变化趋势均为处理Ⅰ>处理Ⅱ>处理

Ⅲ,各处理间也均呈极显著差异。

3.2.4 蒸腾速率(Tr) 蒸腾是一个生理过程,叶片的蒸腾能力反映植物体内水分代谢的状况或植物对水分利用的效率^[10],与植物的多种生理过程有关,对光合作用起到间接调节作用。由表 1 可知,随着地黄生育期的推进,3 个水分处理的地黄 Tr 呈上升趋势;在同一生育期内处理Ⅰ的 Tr 最高,处理Ⅱ次之,处理Ⅲ最低,且各处理间呈极显著差异。

3.3 不同水分处理对地黄叶片叶绿素含量的影响

叶绿素是地黄叶片进行光合作用的重要物质因子之一,在光合作用中直接参与光能吸收和能量转化过程,在一定范围内,叶绿素含量高,其光合作用强度一般也较高。由表 2 可知,不同水分处理地黄叶片的叶绿素含量随生育进程均呈上升趋势。除了苗期,处理Ⅰ的叶绿素含量均极显著高于处理Ⅱ;在同一时期,处理Ⅲ叶绿素含量均低于处理Ⅰ和处理Ⅱ,且呈极显著差异,说明随着水分胁迫的加剧,地黄叶片叶绿素含量降低。

表 2 不同水分处理对地黄叶片叶绿素含量的影响
Table 2 Chlorophyll content of *R. glutinosa* Libosch leaves under different moisture treatments mg/g

处理 Treatment	苗期 Seedling	花期 Anthesis	根系膨大期 Root enlargement
Ⅰ	1.56 aA	1.78 aA	1.99 aA
Ⅱ	1.58 bA	1.74 bB	1.92 bB
Ⅲ	1.47 cB	1.60 cC	1.75 cC

4 讨 论

光合作用是植物最重要的生理过程之一,也是地黄产量形成的重要因素,而水分对光合作用的影响很大,因此,探讨适宜地黄进行光合的供水量,提高地黄的光能利用率,对优化地黄栽培技术、进而调控地黄产量和品质具有十分重要的意义。

本试验中,处理Ⅰ及处理Ⅱ的 LSP 较处理Ⅲ高,说明中度水分胁迫明显抑制了地黄的光合作用。由地黄叶片光响应曲线可以看出,在苗期,处理Ⅱ的 Pn 基本高于处理Ⅰ;随着地黄叶片不断发育伸展、耗水量逐渐增加,花期处理Ⅰ的 Pn 高于其他处理;到了根系膨大期,地上叶片达到最大程度伸展,耗水量较前两个时期多,处理Ⅱ对地黄已经造成胁迫,光合作用相关因子均受到了影响,从而导致处理Ⅱ的 Pn 较处理Ⅰ降低。因此,从花期开始用处理Ⅰ的水分管理措施对地黄光合最为有利。

LCP 和 LSP 是植物利用光强能力的重要指标^[11]。本试验中,从苗期到花期,随着叶龄增长和

叶片成熟,地黄的光合能力逐渐增强;从花期到根系膨大期,3 个水分处理 Pn 明显增加。Lenz 等^[12]曾提出果实作为“库”可加速叶片中的光合产物向外运输,减少同化物对 RuBisco 羧化酶等的反馈抑制,有助于 Pn 提高。地黄进入根系膨大期后,正是块根的迅速膨大造成叶片 Pn 较苗期与花期明显升高。

本试验结果表明,不同梯度水分处理对地黄的光合影响非常明显,水分既影响了地黄叶片的叶绿素合成,也影响了叶片气孔的开闭和细胞内 CO_2 浓度的变化,这与前人的研究结果基本一致^[13-15]。对于水分胁迫引起光合抑制的主要原因有多种报道,因作物品种、水分胁迫程度的不同,结果也不一致。有人认为水分亏缺导致光合速率降低,主要原因在于气孔导度降低,气孔阻力增加,影响 CO_2 进入叶片内,因此光合速率降低^[16];也有研究发现,水分胁迫对许多光合作用相关酶产生影响,如水分胁迫使碳同化过程中的关键酶 RuBP 羧化酶活性降低,使得光合速率减慢^[17];还有报道认为,水分胁迫明显降低了叶绿素含量,叶绿素 a 和 b 的含量同步降低^[18]。在本试验中,不同水分处理地黄叶片的 Pn 、 Tr 、 G_s 和 C_i 等生理指标的协同变化,体现了不同梯度水分处理对地黄光合特性影响的显著差异性。

植物叶片光合色素参与光合作用中光能的吸收、传递和转化,其含量直接影响植物的光合能力,其中叶绿素与光合作用的关系最密切^[19]。罗华建等研究了干旱胁迫对枇杷 (*Eriobotrya japonica* (Thunb.) Lindl.) 光合特性的影响,结果发现,干旱胁迫使叶片光合色素含量下降^[20]。许多研究也表明,植物遭受干旱胁迫时,叶片叶绿素含量大幅度降低。本试验中,随着土壤含水量的降低,地黄叶片叶绿素含量亦显著降低。

5 结 论

在地黄苗期、花期及根系膨大期,随着 PAR 的增加,3 个水分处理的 Pn 呈上升趋势。处理Ⅰ和处理Ⅱ的 LSP 均在 $1\ 600\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 左右,处理Ⅲ的 LSP 在 $1\ 400\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 左右。随着地黄生育期推进,3 个水分处理地黄的光合作用相关因子及叶绿素含量逐渐增加,且处理Ⅰ>处理Ⅱ>处理Ⅲ。综合来看,地黄苗期土壤含水量维持在田间持水量的 50%,花期及根系膨大期维持在田间持水量的 65%,是最适宜地黄叶片进行光合作用的水分管理措施。

[参考文献]

- [1] Cheng Q L,Liang L Y. ¹H-NMR and ¹³C-NMR rules of the iridoids from *Rehmannia glutinosa* Libosch. [J]. Strait Pharm J, 2001,13(1):1-6.
- [2] 王太霞,李景原,胡正海.地黄的形态结构与化学成分研究进展 [J]. 中草药,2004,35(5):585-587.
Wang T X,Li J Y,Hu Z H. Advances in studies on morphology and main chemical constituents of *Rehmannia glutinosa* [J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs,2004,35(5):585-587. (in Chinese)
- [3] 李 军,张丽萍,张振凌.地黄研究进展 [J]. 河南中医学院学报,2005,11(6):79-82.
Li J,Zhang L P,Zhang Z L. Recent development of *Radix rehmanniae* [J]. Journal of Henan University of Chinese Medicine,2005,11(6):79-82. (in Chinese)
- [4] 杜红光.地黄不同炮制品中梓醇的含量测定研究 [J]. 时珍国医国药,2004,15(9):582-583.
Du H G. Determination of catalpol in the different prepared medical materials of *Rehmannia glutinosa* by TLCS [J]. Li Shi-zhen Medicine and Materia medica Research,2004,15(9):582-583. (in Chinese)
- [5] 高俊凤.植物生理学实验技术 [M]. 西安:世界图书出版公司,2000:101-103.
Gao J F. The laboratorial technology of plant physiology [M]. Xi'an: World Book Publishing Company, 2000: 101-103. (in Chinese)
- [6] 滕建国,高长启,林玉梅,等.加拿大黄桦幼苗光合特性的研究 [J]. 吉林林业科技,2006,35(2):5-7.
Teng J G,Gao C Q,Lin Y M,et al. Photosynthetic characteristics of seedlings of *Betula alleghaniensis* [J]. Jilin Forestry Science and Technology,2006,35(2):5-7. (in Chinese)
- [7] 师生波,李惠梅,王学英,等.青藏高原几种典型高山植物的光合特性比较 [J]. 植物生态学报,2006,30(1):40-46.
Shi S B,Li H M,Wang X Y,et al. Comparative studies of photosynthetic characteristics in typical alpine plants of the Qinghai-Tibet plateau [J]. Journal of Plant Ecology,2006,30(1):40-46. (in Chinese)
- [8] 张玲丽,王 辉,孙道杰,等.两种不同穗型小麦品种光合生理特性研究 [J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2003,31(3):51-53.
Zhang L L,Wang H,Sun D J,et al. A comparative study on the photo-biological characters of two different spike-type cultivars in wheat [J]. Jour of Northwest Sci-Tech Univ of Agri and For;Nat Sci Ed,2003,31(3):51-53. (in Chinese)
- [9] 唐仕云,陆国盈,韩世健,等.不同水分处理对甘蔗光合作用的影响 [J]. 广西蔗糖,2005,40(3):6-9.
Tang S Y,Lu G Y,Han S J,et al. Effect of different moisture treatment on sugarcane photosynthesis [J]. Guangxi Sugarcane & Canesugar,2005,40(3):6-9. (in Chinese)
- [10] 王 忠.植物生理学 [M]. 北京:中国农业技术出版社,2000:65-70.
Wang Z. Plant physiology [M]. Beiijing:Chinese Agricultural Technology Publishing Company,2000:65-70. (in Chinese)
- [11] 孙存华,李 扬,杜 伟,等.干旱胁迫下藜的光合特性研究 [J]. 植物研究,2007,27(6):715-720.
Sun C H,Li Y,Du W,et al. Photosynthetic characteristics of *Chenopodium album* L. grew under drought-stress condition [J]. Bulletin of Botanical Research,2007,27(6):715-720. (in Chinese)
- [12] Lenz F,Marcelle R,Clijsters H. Fruit effects on photosynthesis,light and dark respiration [J]. Photosynthesis and Plant Development,1979,18(5):271-281.
- [13] 刘友接,蔡世英,张泽煌,等.水分胁迫对油梨幼苗光合作用的抑制效应 [J]. 福建农业学报,1999,14(增刊):110-114.
Liu Y J,Cai S Y,Zhang Z H,et al. The inhibition of water stress on photosynthesis in avocado [J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences,1999,14(Supplement):110-114. (in Chinese)
- [14] 叶燕萍,李杨瑞,黄诚梅,等.下种方式和水分胁迫对甘蔗叶片光合特性的影响 [J]. 甘蔗,2003,10(3):1-4.
Ye Y P,Li Y R,Huang C M,et al. Effects of water stress on the photosynthetic characteristics of sugarcane leaves [J]. Sugarcane,2003,10(3):1-4. (in Chinese)
- [15] 李世清,田霄鸿,李生秀.养分对旱地小麦水分胁迫的生理补偿效应 [J]. 西北植物学报,2000,20(1):22-28.
Li S Q,Tian X H,Li S X. Physiological compensation effects of nutrient on winter wheat in dryland [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2000,20(1):22-28. (in Chinese)
- [16] 牛洪斌,白润娥,张 宪.水分胁迫对欧李光合速率日变化的影响 [J]. 湖北民族学院学报,2000,18(2):15-17.
Niu H B,Bai R E,Zhang X. Effect of water stress on the diurnal change of photosynthetic rate of Chinese dwarf cherry [J]. Journal of Hubei Institute for Nationalities,2000,18(2):15-17. (in Chinese)
- [17] 曹 慧,许雪峰,韩振海,等.水分胁迫下抗旱性不同的两种苹果属植物光合特性的变化 [J]. 园艺学报,2004,31(3):285-290.
Cao H,Xu X F,Han Z H,et al. Changes of physiological characteristic on photosynthesis in *Malus* seedling leaves during water stress [J]. Acta Horticulturae Sinica,2004,31(3):285-290. (in Chinese)
- [18] 苏培玺,杜明武,张立新,等.日光温室草莓光合特性及对CO₂浓度升高的响应 [J]. 园艺学报,2002,29(5):423-426.
Su P X,Du M W,Zhang L X,et al. Changes of photosynthetic characteristics and response to rising CO₂ concentration in strawberry in solar greenhouse [J]. Acta Horticulturae Sinica,2002,29(5):423-426. (in Chinese)
- [19] Nijs I,Ferris R,Blum H. Stomatal regulation in a changing climate: A field study using free air temperature increase (FA-TD) and free air CO₂ enrichment [J]. Plant Cell and Environment,1997,20(3):1041-1050.
- [20] 罗华建,刘星辉.水分胁迫对枇杷光合特性的影响 [J]. 果树科学,1999,16(2):126-130.
Luo H J,Liu X H. Effects of water stress on photosynthesis in loquat trees [J]. Journal of Fruit Science,1999,16(2):126-130. (in Chinese)