

金荞麦叶片光合响应特征及光合参数日变化

安衍茹, 胡本祥, 彭亮*, 王媛媛, 黄涛, 赵停, 李洁, 罗露, 曹福麟
(陕西中医药大学, 陕西 咸阳 712046)

[摘要] **目的:**研究金荞麦叶片光合响应特征及光合参数日变化与环境因子之间的相互关系。**方法:**利用便携式光合测定仪测定金荞麦叶片光合参数日变化和光响应曲线。**结果:**金荞麦叶片净光合速率日变化、气孔导度日变化均呈双峰曲线,有明显的光合午休现象;净光合速率数值分别为 19.13, 16.54 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 谷底出现在 14:00 左右,净光合速率值为 15.04 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 约为最大峰值的 78.62%, 此时出现了较为明显的光合午休现象。净光合速率(Pn)与主要影响因子光合有效辐射(PAR), 蒸腾速率(Tr), 气孔导度(Gs)呈正相关, 与大气CO₂浓度(Ca), 胞间CO₂浓度(Ci)呈负相关。**结论:**金荞麦为气孔限制型植物, Pn存在明显的光合午休现象, 光合有效辐射、蒸腾速率、气孔导度、大气温度是影响金荞麦叶片Pn的主要影响因子。

[关键词] 金荞麦; 净光合速率; 日变化; 环境因子; 清热解毒

[中图分类号] R282.2; R282.5; R289; R2-031 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-9903(2018)19-0068-05

[doi] 10.13422/j.cnki.syfjx.20181109

[网络出版地址] <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3495.R.20180316.1411.004.html>

[网络出版时间] 2018-03-16 15:15

Photosynthetic Response Characteristics and Diurnal Variation of Photosynthetic Parameters in Leaves of *Fagopyrum dibotrys*

AN Yan-ru, HU Ben-xiang, PENG Liang*, WANG Yuan-yuan, HUANG Tao, ZHAO Ting, LI Jie, LUO Lu, CAO Fu-lin
(Shaanxi University of Chinese Medicine, Xi'an 712046, China)

[Abstract] **Objective:** To investigate the relationship between the photosynthetic response characteristics, daily variation of photosynthetic parameters and environmental factors in leaves of *Fagopyrum dibotrys*. **Method:** The daily variation of photosynthetic parameters and light response curves of leaves of *F. dibotrys* were measured by portable photosynthesis apparatus. **Result:** Both diurnal variation of net photosynthetic rate (Pn) and the diurnal variation of stomatal conductance (Gs) in leaves of *F. dibotrys* showed a double peak curve, with an obvious midday depression phenomenon. Their net photosynthetic rate was 19.13 and 16.54 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ respectively, and bottom was at 14:00 with a net photosynthetic rate of 15.04 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, about 78.62% of the maximum peak value, showing a phenomenon of midday depression of photosynthesis. The net photosynthetic rate was positively correlated with the main influencing factors including photosynthetically active radiation (PAR), transpiration rate (Tr), stomatal conductance, and negatively correlated with atmospheric CO₂ concentration (Ca) and intercellular CO₂ concentration (Ci). **Conclusion:** *F. dibotrys* is a stomatal limiting plant, and Pn has obvious midday depression of photosynthesis phenomenon. Photosynthetic active radiation, transpiration rate, stomatal conductance and atmospheric temperature are the main

[收稿日期] 20171021(002)

[基金项目] 国家中医药行业科研专项(201507002-1-08); 国家中药标准化项目(ZYBZH-Y-QIN-36; 202410001)

[第一作者] 安衍茹, 在读硕士, 从事中药质量控制标准研究, E-mail: 735771879@qq.com

[通信作者] * 彭亮, 博士, 讲师, 从事中药资源与评价及中药材质量控制标准研究, E-mail: ppengliang@126.com

influencing factors for Pn in leaves of *F. dibotrys*.

[Key words] *Fagopyrum dibotrys*; net photosynthetic rate; daily variation; environmental factors; clearing away heat and toxic material

金荞麦为蓼科植物金荞麦的干燥根茎。冬季采挖,除去茎和须根,洗净,晒干。性凉,味微辛、涩。归肺经。具有清热解毒,排脓祛瘀的功效。用于肺痈吐脓,肺热喘咳,乳蛾肿痛^[1]。金荞麦中最重要的活性成分是多酚类,从金荞麦中已提取分离出黄酮类^[2]、三萜类及酚酸类^[3]、甾体类^[4]等化合物,其中酚酸类和黄酮类化合物具有抗菌作用^[5]。据报道,金荞麦还具有镇咳、祛痰、抗炎、抗肿瘤、抗氧化等药理作用^[6-8]。

目前对金荞麦的化学成分、药理作用、基因^[9]等方面的研究较多,未见有关光合作用研究报道,光是植物生存和生长发育最重要的环境因子之一,而光合作用既是植物干物质累积的基础,又是决定生产力高低的重要因素,也是分析环境因素影响植物生长和发育的重要生理过程^[10]。因此,研究金荞麦叶片的光合作用,有利于了解其生长发育规律。本文以金荞麦的叶片为研究材料,通过对金荞麦光合响应特征及光合参数日变化研究,旨在揭示环境因子对金荞麦叶片光合特性的日变化规律,为充分发挥其叶片光合能力和生产潜力提供生物学依据,对优化金荞麦栽培技术、提高药材质量和产量具有重要意义。

1 材料

试验材料选择上层功能叶片,经陕西中医药大学中药鉴定学教研室胡本祥教授鉴定为蓼科植物金荞麦 *Fagopyrum dibotrys*。2017 年 9 月连续晴天之后,进行相关光合试验。TARGAS-1 型便携式光合测定仪(美国 PPSsystems)。

2 方法

2.1 光合参数日变化测定 采用便携式光合测定仪,从 8:00 ~ 18:00 每隔 1 h 测定自然条件下金荞麦叶片的光合日变化。测定的指标主要有净光合速率(Pn),气孔导度(Gs),胞间 CO₂ 浓度(Ci),蒸腾速率(Tr)以及主要环境因子[包括光合有效辐射(PAR),大气温度(Ta),空气相对湿度(RH),大气 CO₂ 浓度(Ca)等]。测定前选择 3 株健壮植株,选取生长部位相同、向阳角度一致的 3 片叶片进行活体测定,测定时保持叶片自然生长角度不变,结果取 3 次测定的平均值。同时计算金荞麦叶片水分利用率(WUE = Pn/Tr)及气孔限制值(Ls = 1 - Ci/Ca)。

2.2 光响应曲线的测定 被测叶片在自然光下适应 2 h,于晴朗天气的上午 9:00 ~ 11:00 测定光响应曲线,温度和 CO₂ 浓度采用自然条件。PAR 采用便携式光合测定仪内置红蓝光源控制,光照强度梯度设为 0, 25, 50, 100, 150, 200, 500, 800, 1 000, 1 200, 1 500, 1 800, 2 000, 2 500 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,叶片选择同 2.1 项。

2.3 数据处理 采用 Excel 2007 和 SPSS 20.0 软件进行数据进行处理分析。

3 结果与分析

3.1 金荞麦叶片光合作用 金荞麦叶片 PAR 日变化的规律呈现单峰曲线(图 1)。植物光合作用能量的最终来源是 PAR^[11],金荞麦叶片 PAR 数值变化在 200 ~ 1 800 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。从 8:00 ~ 10:00,随着温度的升高和光照的增强,PAR 呈快速上升趋势;10:00 ~ 12:00,PAR 上升趋势减缓;到 13:00 左右时达到最大值(1 704 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$),随着之后时间的延长,PAR 数值不断地减小;16:00 后迅速减小,18:00 测定的 PAR 数值为最低值(202 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)。

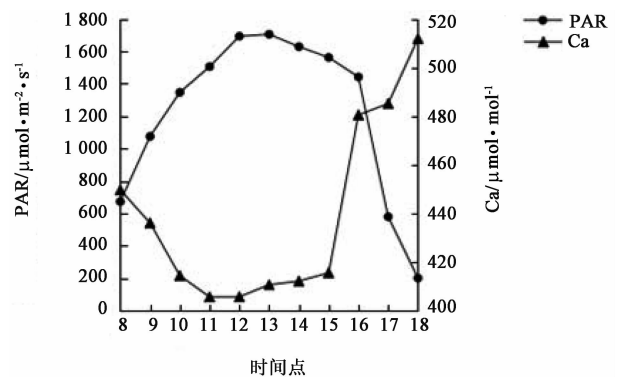


图 1 金荞麦叶片环境因子(PAR, Ca)日变化曲线
Fig. 1 Daily variation curves of environmental factors (PAR, Ca) in leaves of *Fagopyrum dibotrys*

Ta 变化趋势与 PAR 的变化趋势基本一致,也呈“单峰”曲线(图 2),其变化在 25.2 ~ 33.3 $^{\circ}\text{C}$ 。早上 8:00 Ta 最低(25.2 $^{\circ}\text{C}$),随着 PAR 值的增大,8:00 ~ 13:00, Ta 值呈上升趋势,在 13:00 Ta 值达到最高温度(33.3 $^{\circ}\text{C}$);13:00 之后 Ta 值开始下降,13:00 ~ 14:00 Ta 下降速率较快,14:00 ~ 15:00, 16:00 ~ 17:00 Ta 值下降速率缓慢,15:00 ~ 16:00,

17:00 ~ 18:00 Ta 值下降速率较快。

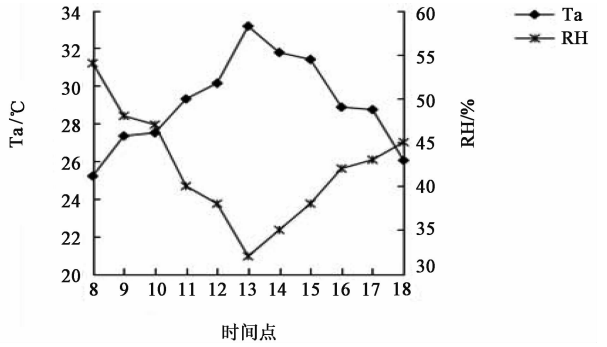


图 2 金荞麦叶片环境因子 (Ta, RH) 日变化曲线
Fig. 2 Daily variation curves of environmental factors (Ta, RH) in leaves of *Fagopyrum dibotrys*

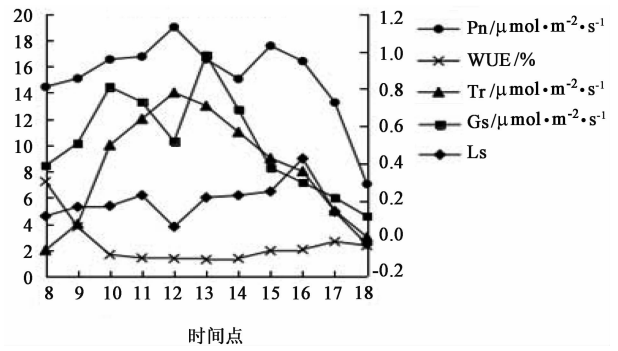
RH 的变化趋势与 PAR 和 Ta 日变化趋势相反 (图 2), 其变化在 32.85% ~ 54.26%。早晚金荞麦叶片 RH 较高, 午间 RH 较低; 8:00 时的 RH 为 54.26%, RH 随着时间的延长先下降后上升, 13:00 左右时降到最小值 32.85%, 13:00 ~ 16:00 的 RH 增加速率较大, 16:00 ~ 18:00 的 RH 增加速率较慢, 18:00 的 RH 增加到 45.97%。

Ca 的变化趋势与 RH 日变化趋势基本一致 (图 1), Ca 的日变化呈现早晚高、午间低的现象, 其 Ca 变化在 406.05 ~ 512.02 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。8:00 时的 Ca 为 449.67 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 之后 Ca 逐渐降低, 到 11:00 ~ 12:00 时达到最低值 406.03 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 12:00 之后随着时间的延长 Ca 逐渐增大, 15:00 ~ 16:00 的 Ca 增加速率较大, 到 18:00 时 Ca 增加到 512.02 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。

3.2 金荞麦叶片光合作用的日变化

3.2.1 Pn 日变化 金荞麦叶片 Pn 日变化呈双峰曲线 (图 3), 从 8:00 ~ 12:00 金荞麦叶片 Pn 呈上升趋势, 到 12:00 时金荞麦叶片 Pn 出现第一个高峰值 19.13 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 12:00 ~ 14:00 金荞麦叶片 Pn 快速下降, 14:00 ~ 15:00 金荞麦叶片 Pn 又迅速上升, 到 15:00 左右时金荞麦叶片 Pn 出现第二个高峰值 16.54 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 且低于第一个峰值; 谷底出现在 14:00 左右, 其 Pn 为 15.04 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 约为最大峰值的 78.62%, 此时金荞麦叶片出现了较为明显的光合午休现象。

3.2.2 Gs 日变化 金荞麦叶片 Gs 日变化规律与金荞麦叶片 Pn 日变化规律基本一致, 呈现双峰曲线 (图 3)。8:00 ~ 10:00 金荞麦叶片 Gs 呈现上升趋势, 到 10:00 时金荞麦叶片 Gs 出现第一个高峰值 0.81 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 10:00 ~ 12:00 金荞麦叶片 Gs



Pn, WUE, Tr 以左侧纵坐标为准; Gs, Ls 以右侧纵坐标为准
图 3 金荞麦叶片光合作用 (Pn, WUE, Tr, Gs, Ls) 日变化曲线
Fig. 3 Diurnal variation curves of photosynthesis (Pn, Gs, Tr, WUE, Ls) in leaves of *Fagopyrum dibotrys*

呈现下降趋势, 12:00 左右时金荞麦叶片 Gs 日变化曲线出现谷底, 此时其 Gs 为 0.52 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 12:00 ~ 13:00 金荞麦叶片 Gs 又迅速上升, 到 13:00 左右时其 Gs 出现第二个峰值 0.98 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 且高于第一个峰值。

3.2.3 Tr 日变化 金荞麦叶片 Tr 日变化规律与 PAR 和 Ta 的日变化规律基本一致, 也呈现单峰曲线 (图 3)。8:00 ~ 12:00 金荞麦叶片 Tr 持续上升, 到 12:00 时 Tr 出现高峰值 14.02 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 12:00 ~ 18:00 Tr 呈下降趋势, 到 18:00 左右时 Tr 数值为 3.58 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 此时其 Tr 高于早晨 8:00 时的蒸腾速率。

3.2.4 Ci 日变化 金荞麦叶片 Ci 日变化规律为傍晚时最高、早晨次之、中午较低 (图 4)。8:00 ~ 12:00 随着 PAR 和 Ta 的增加, 金荞麦叶片 Ci 逐渐下降, 到 12:00 时金荞麦叶片 Ci 出现最低峰, 其数值为 290.67 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 之后随着光合作用的减弱, 金荞麦叶片 Ci 又开始上升, 到 18:00 左右时其数值达到 526.65 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。

3.2.5 WUE 及 Ls 日变化 金荞麦叶片 WUE 在 8:00 时最大 (图 3), 其 WUE 数值为 7.22, 8:00 ~ 12:00 金荞麦叶片 WUE 随着时间的延长而逐渐降低, 10:00 ~ 14:00 金荞麦叶片 WUE 趋于稳定状态, 14:00 ~ 18:00 金荞麦叶片 WUE 又开始逐渐增大, 到 15:00 时金荞麦叶片 WUE 达到峰值, 其数值为 3.06, 低于 8:00 时金荞麦叶片 WUE。金荞麦叶片 Ls 日变化规律与 Gs 日变化规律基本一致, 呈现双峰曲线 (图 3), 8:00 ~ 11:00 金荞麦叶片 Ls 呈上升趋势, 到 11:00 时金荞麦叶片 Ls 达到第一个峰值, 其 Ls 数值为 0.23, 11:00 ~ 12:00 金荞麦叶片 Ls 开始下降, 到 12:00 时其 Ls 出现谷底, 12:00 ~ 16:00

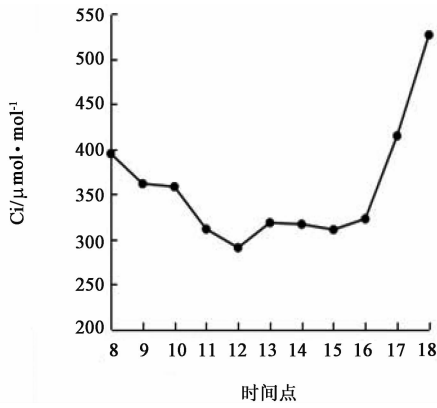


图 4 金荞麦叶片光合作用 (Ci) 日变化曲线

Fig. 4 Diurnal variation curves of photosynthesis (Ci) in leaves of *Fagopyrum dibotrys*

金荞麦叶片 Ls 又呈上升趋势,到 16:00 时其 Ls 达到第二个峰值,其数值为 0.43,高于第一个峰值,16:00~18:00 金荞麦叶片 Ls 又呈下降趋势,18:00

表 1 金荞麦叶片净光合速率与影响因子的相关分析

Table 1 Correlation analysis between net photosynthetic rate and influencing factors in leaves of *Fagopyrum dibotrys*

影响因子	Pn	Gs	Ci	Tr	PAR	RH	Ta	Ca	WUE	Ls
Pn	1									
Gs	0.605 ¹⁾	1								
Ci	-0.952 ²⁾	-0.608 ¹⁾	1							
Tr	0.732 ¹⁾	0.703 ¹⁾	-0.771 ²⁾	1						
PAR	0.888 ²⁾	0.706 ¹⁾	-0.950 ²⁾	0.883 ²⁾	1					
RH	-0.388	-0.436	0.526	-0.795 ²⁾	-0.676 ¹⁾	1				
Ta	0.551	0.542	-0.662 ¹⁾	0.798 ²⁾	0.771 ²⁾	-0.949 ²⁾	1			
Ca	-0.833 ²⁾	-0.822 ²⁾	0.817 ²⁾	-0.749 ²⁾	-0.832 ²⁾	0.427	-0.548	1		
WUE	-0.274	-0.373	0.364	-0.794 ²⁾	-0.571	0.841 ²⁾	-0.724 ¹⁾	0.319	1	
Ls	0.519	0.241	-0.630 ¹⁾	0.300	0.581	-0.291	0.432	-0.213	-0.184	1

注: ¹⁾表示 $P < 0.05$; ²⁾表示 $P < 0.01$ 。

3.4 金荞麦叶片的光响应 光补偿点 (LCP) 和光饱和点 (LSP) 是植物光合能力的重要体现, LCP 能够反映金荞麦叶片对弱光的适应能力, LSP 能够反应金荞麦叶片对强光的适应能力^[11-12]。金荞麦叶片 Pn 最大时为 $21.42 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 此时的 PAR 为 $2000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 即为金荞麦叶片光饱和点 LSP; 当 PAR 为零时, Pn 为 $-2.48 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 即为金荞麦叶片光补偿点 LCP, 此时金荞麦叶片进行暗呼吸作用。在 $\text{PAR} < 1200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 金荞麦叶片 Pn 随着 PAR 的增强而呈显著上升趋势 (图 5)。当 PAR 在 $1200 \sim 1500 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时金荞麦叶片 Pn 随着 PAR 的增强而呈缓慢增加的趋势。当 PAR 增强到 $1800 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 金荞麦叶片 Pn 趋于稳定。

时其 Ls 达到最低, 其数值为 -0.03 。

3.3 金荞麦叶片净光合速率与影响因子的相关性分析 生理生态因子共同作用会对植物的 Pn 有影响, 通过对金荞麦叶片 Pn 及其主要生理生态因子进行多元相关性分析 (表 1), 通过金荞麦叶片 Pn 与各影响因子间的数值相关分析可知, 金荞麦叶片 Pn 日变化与 PAR 呈极显著正相关 ($r = 0.888, P < 0.01$), 与 Tr 呈显著正相关 ($r = 0.732, P < 0.05$), 与 Gs 呈显著正相关 ($r = 0.605, P < 0.05$), 与 Ca 呈极显著负相关 ($r = -0.833, P < 0.01$), 与 Ci 呈极显著负相关 ($r = -0.952, P < 0.01$)。分析结果表明, 金荞麦叶片 Pn 与主要影响因子 PAR, Tr, Gs 呈正相关, 与 Ca, Ci 呈负相关。比较各影响因子与金荞麦叶片 Pn 的相关性大小排序为 $\text{PAR} > \text{Tr} > \text{Gs} > \text{Ta} > \text{Ls} > \text{WUE} > \text{RH} > \text{Ca} > \text{Ci}$, 表明 PAR, Tr, Gs, Ta 是影响金荞麦叶片净光合速率的主要影响因子。

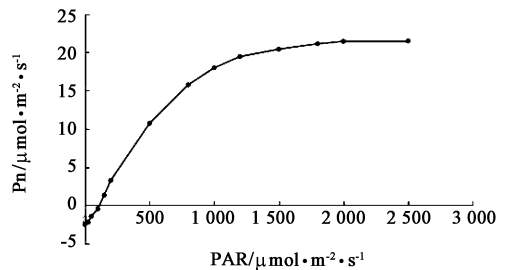


图 5 金荞麦叶片光合速率-光合有效辐射响应曲线

Fig. 5 Photosynthetic rate and photosynthetic effective radiation response curve of *Fagopyrum dibotrys*

4 结论

光合作用是一个较为复杂的生理过程, 叶片光合效率与自身因素如叶绿素含量、叶片厚度、叶片成熟程度密切相关, 同时又受光强度、气温、空气相对

湿度、土壤含水量等外界因子影响^[13]。光是植物光合作用能量的最终来源,也是影响光合作用生理因子的最根本因素,光合作用对植物生长和代谢产物积累的快慢具有重要的影响^[14]。然而,当叶片吸收光能过多,不能及时有效地加以利用或耗散时,植物就会遭受强光胁迫,引起光合能力的降低,发生光抑制。光抑制是植物光合作用非气孔限制因素的主要表现形式^[15]。本研究结果表明,金荞麦叶片 Pn 日变化呈现双峰曲线,存在明显的植物午休现象。在金荞麦叶片出现光合午休现象时,其 Ci 也为全天最低。据报道,Pn 降低的过程中,Ci 下降,Ls 增大^[16],因此说明 Pn 降低主要是由气孔导度降低引起的。通过对金荞麦叶片 Pn 与其他影响因子的相关性分析,结果表明 Gs 是影响金荞麦叶片 Pn 的最主要生理因子,说明金荞麦叶片的 Ph 明显受 Gs 的影响,在有利于叶肉细胞的光合时 Gs 增大,不利于光合时 Gs 减小,因此可以说金荞麦属于气孔限制型植物。

金荞麦的药用部位为根茎,其叶片的光合作用效率直接影响地下部分根茎内含物的积累。强光、高温以及低湿等都可能造成植物光合午休现象的发生。金荞麦在 14:00 左右时出现了较为明显的光合午休现象。此时金荞麦叶片 PAR 数值较大,即光照强度较强,说明强光是引起金荞麦 Pn 中午降低的重要环境因子,由于强光会引起空气温度上升、湿度降低,从而致使金荞麦叶片气孔导度下降,间接引起了光合午休现象的发生。因此,在中午强光照射下采取适当的人工遮荫措施,减少光照,有利于降低空气温度、增加大气相对湿度,从而提高金荞麦叶片的光合水平,增加其光合产物。

本文采用便携式光合测定仪对金荞麦叶片光合响应特征及光合参数日变化进行研究,旨在了解金荞麦光合作用规律,为优化金荞麦栽培技术、对人工进行调控环境因子以提高药材质量和产量提供实验依据。

[参考文献]

[1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典. 一部 [M].

北京:中国医药科技出版社,2015:218.

- [2] 吴和珍,周洁云,潘宏林. 金荞麦化学成分的研究[J]. 中国医院药学杂志,2008,28(21):1829-1831.
- [3] 邵萌,杨跃辉,高慧媛,等. 金荞麦的化学成分研究[J]. 沈阳药科大学学报,2005,22(2):100-102,160.
- [4] 陈晓锋,顾振纶. 金荞麦抗肿瘤作用研究进展[J]. 中草药,2000,31(9):715-718.
- [5] 王立波,邵萌,高慧媛,等. 金荞麦抗菌活性研究[J]. 中国微生态学杂志,2005,17(5):330-331.
- [6] 包鹏,张向荣,周晓棉,等. 金荞麦提取物的药效学研究[J]. 中国现代中药,2009,11(7):36-37,41.
- [7] 严晶,刘丽娜,陆茵,等. 金荞麦提取物对肠易激综合征大鼠肥大细胞 PAR-2, SP 的影响[J]. 中国实验方剂学杂志,2018,24(2):92-97.
- [8] WANG K J, ZHANG Y J, YANG C R, et al. Antioxidant phenolic constituents from *Fagopyrum dibotrys* [J]. J Ethno Pharmacol, 2005, 99(2): 259-264.
- [9] 蒙华,李成磊,吴琦,等. 金荞麦查尔酮合成酶基因 CHS 的克隆及序列分析[J]. 草业学报,2010,19(3): 162-169.
- [10] 孙良志,谭勇,李国玉,等. 新疆鼠尾草叶片净光合速率日变化特征研究[J]. 中国现代中药,2013, 15(11):966-970.
- [11] 刘玲,刘淑明,孙丙寅. 不同产地花椒幼苗光合特性研究[J]. 西北农业学报,2009,18(3):160-165.
- [12] 张中峰,黄玉清,莫凌,等. 岩溶区 4 种石山植物光合作用的光响应[J]. 西北林学院学报,2009, 24(1): 44-48.
- [13] 叶子飘,于强. 冬小麦旗叶光合速率对光强度和 CO₂ 浓度的响应[J]. 扬州大学学报:农业与生命科学版, 2008,29(3):33-37.
- [14] 周娟娟,谷巍,陈菁瑛,等. 建泽泻光合特性及其与环境因子的相互关系研究[J]. 南京中医药大学学报, 2014,30(10):68-71.
- [15] 张媛,邵建柱,刘兴菊,等. 我国板栗光合作用研究进展[J]. 西北林学院学报,2007,22(5):53-56,82.
- [16] YANG H B, AN S Q, SUN O J, et al. Seasonal variation and correlation with environmental factors of photosynthesis and water use efficiency of *Juglans regia* and *Ziziphus jujube* [J]. Integr Plant Biol, 2008, 50(2): 210-220.

[责任编辑 顾雪竹]