中国生态农业学报 2012 年 7 月 第 20 卷 第 7 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Jul. 2012, 20(7): 901−908

**DOI: 10.3724/SP.J.1011.2012.00901**

# 光强对福建马蓝光合特性的影响*

宁书菊 张英娇 林建勇 魏道智**

(福建农林大学生命科学学院 福州 350002)

**摘 要** 以药用植物福建马蓝(*Strobilanthes cusia*)为材料, 研究不同光强对福建马蓝光合特性的影响。结果表明, 不同光强(100%自然光照、30%自然光照、6%自然光照)处理下, 马蓝叶片的光合速率日变化均呈双峰型曲线。3 种光强处理中, 以 30%自然光强下光合速率最高。与自然光照相比, 遮荫条件下(30%自然光照、6%自然光照)马蓝具有较高的初始荧光(*Fm*)、PSⅡ的光化学活性(*Fv*/*Fo*)、原初光能转换效率(*Fv*/*Fm*)、光化学量子产额(*Yield*)、光化学淬灭系数(*qP*)和较低的非光化学淬灭系数(*qN*); 遮荫条件下, 马蓝是通过提高叶片叶绿素 a/b 含量, 降低光补偿点, 提高光系统中光反应中心光化学活性, 增强系统的光能转换效率来提高光合速率, 以弥补弱光条件下光能的不足。试验发现遮荫条件下, 光合速率和气孔导度相关度较低, 非气孔因素应是遮阴影响马蓝光合的主要因子, 同时发现遮荫使得马蓝气孔对于光照强度响应的敏感度显著增加。光强对马蓝叶片药效学成分靛蓝、靛玉红中靛蓝含量影响不显著, 100%自然光处理的靛玉红含量大于两个遮荫处理。福建马蓝适宜于 30%自然光照条件下的间作套种或林下栽培, 对其生长有利。

**关键词** 马蓝 光强 光合特性 叶绿素荧光动力学参数 药效成分

**中图分类号:** R282.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2012)07-0901-08

# Effects of different light intensities on *Strobilanthes cusia* photosynthetic characteristics in Fujian Province

NING Shu-Ju, ZHANG Ying-Jiao, LIN Jian-Yong, WEI Dao-Zhi

(School of Life Sciences, Fujian Agricultural and Forest University, Fuzhou 350002, China)

**Abstract** "Jian Indigo" made from stem and leave of *Strobilanthes cusia* is one of the genuine drugs in Fujian Province. *S. cusia* original plant occurs in dank conditions and grows in forests or generally shaded conditions. Although light intensity is the main cultivation factor of *S. cusia*, studies on the characteristics of *S. cusia* photosynthesis under different light intensities were limited. Hence studies on different light intensities (full sunlight, 30% sunlight and 6% sunlight) were carried out to investigate the effects of light intensity on photosynthetic characteristics of *S. cusia* in Fujian Province. Results showed that diurnal variations in photosynthetic rates under three treatments tracked di-peak curves. Among the three light intensity treatments, the rate of photosynthesis was highest in the 30% sunlight treatment. Compared with natural light (full sunlight), the 30% and 6% sunlight treatments had higher *Fm, Fv/Fo, Fv/Fm, Yield*, *qP* and lower *qN*. Under shaded conditions, photosynthetic rate of *S. cusia* increased with increasing chlorophyll a/b and photochemical activity in the light response centre, and decreasing light compensation point. Enhancing light energy conversion efficiency rate in photosynthetic system in compensation of insufficient light energy in low light intensity conditions also increased *S. cusia* photosynthetic rate. There existed a little correlation between photosynthetic rate and stomatal conductance in *S. cusia*, which suggested the non-stomatal factors were the main drivers of photosynthesis in shaded conditions. It was further noted that shading significantly increased the sensitivity of stomata to light intensity. While the effect of light intensity on leaf indigo content was not obvious, indirubin content under full sunlight was higher than under shaded conditions. The 30% sunlight treatment in intercropping conditions or under tree shades was most suitable for the growth and medicinal component accumulation of *S. cusia* in Fujian Province.

**Key words** *Strobilanthes cusia*, Light intensity, Photosynthetic characteristics, Chlorophyll fluorescence kinetic parameter,

* 福建省生态学重点学科项目(0608537)和福建省自然科学基金项目(2011J01074)资助

** 通讯作者: 魏道智(1960—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为药用植物生理生态学。E-mail: weidz888@sohu.com
宁书菊(1963—), 女, 学士, 副教授, 主要研究方向为作物生理学。E-mail: shujuning@163.com

收稿日期: 2011−09−21 接受日期: 2012−02−08

Medicinal component
(Received Sep. 21, 2011; accepted Feb. 8, 2012)

马蓝(*Strobilanthes cusia*)为爵床科马蓝属多年生植物, 其茎叶加工后得粉状物即为中药青黛。青黛包括靛蓝和靛玉红两种主要药效学成分, 性寒、味咸, 归肝经具有清热解毒、凉血定惊之功效, “建青黛”为福建省道地药材之一。马蓝作为中药青黛的原植物, 喜阴湿, 一般生长在林下或背阴处, 随着青黛市场需求量的增加, 人工栽培面积不断扩大, 但在人工栽培自然光照条件下的马蓝往往生长缓慢, 植株矮小, 叶片小而黄, 尤其是夏季高温、高光强条件下经常发生大面积叶片黄化、植株枯萎现象, 严重影响了以收获地上部分为目的的马蓝生物产量。因此, 光照强度是影响马蓝栽培和制约中药青黛生产的主要因素。

有不少关于不同光强对植物光合特性变化影响的研究报道[1−31], 其中包括了一些药用植物[4,6,15−21], 但因为植物材料不同, 如阳生和阴生植物, 同样的遮荫处理, 具有不同的遮荫光合特性变化和耐荫机制[3,5,10], 因此研究不同环境因子条件下不同植物的光合特性变化, 对于揭示其光适应或耐荫机制有重要意义。有关福建马蓝的栽培和光合生理研究报道较少, 针对光照强度这一显著影响马蓝生长和制约生产的关键问题进行研究, 探索马蓝光合、生长和药效成分累积的适宜光照条件和耐荫机制, 对提高马蓝的光合作用, 促进生长, 提高青黛产量, 指导生产实践, 具有重要理论和实践意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料与设计

马蓝为福建栽培种。试验于2007年11月—2008年9月在福建农林大学植物生理试验田进行。供试土壤pH 5.73, 有机质27.98 mg·kg$^{-1}$, 碱解氮54.55 mg·kg$^{-1}$, 速效磷50.01 mg·kg$^{-1}$, 速效钾112.61 mg·kg$^{-1}$, 交换性钙669.14 mg·kg$^{-1}$, 交换性镁28.45 mg·kg$^{-1}$。

马蓝于2007年11月越冬栽培, 2008年4月初利用遮阳网遮荫, 依据试验田林下透光和种质资源生长情况, 分别设1层遮荫(30%自然光强)、2层遮荫(6%自然光强), 无遮荫(100%自然光强, 对照)3个处光强处理, 每个处理3次重复, 随机排列。栽培密度60 000株·hm$^{-2}$, 常规水肥管理。

### 1.2 测定项目与方法

#### 1.2.1 测定时间和抽样方法

2008 年 6 月下旬, 在田间随机多点选取植株的第 1 完全展开叶片进行叶绿素含量、叶面积、单叶重和靛蓝、靛玉红含量的测定。选择晴天, 对第 1 完全展开叶片光合参数和叶绿素荧光进行测定。

#### 1.2.2 叶面积及单叶重

选取各处理第1完全展开叶片20片, 采用YMJ-A型叶面积仪(浙江托普仪器公司)测定单叶叶面积, 取其均值。分别称取单叶鲜重, 取均值。

#### 1.2.3 叶绿素含量的测定

将选取的第1完全展开叶片剪碎混合, 依李合生[32]方法, 用720型紫外分光光度法测定叶片叶绿素含量。

#### 1.2.4 叶片靛蓝、靛玉红含量的测定

取马蓝第 1 片完全展开叶, 于 65 ℃烘箱烘干至恒重, 磨碎, 依刘依等[33]方法测定。

#### 1.2.5 光响应曲线测定

依陈根云等[34]方法, 选择第1片完全展开叶, 测定不同光强处理(6%自然光强、30%自然光强和100%自然光强)下, 叶片经不同有效光辐射密度(0~2 000 μmol·m$^{-2}$·s$^{-1}$)诱导后的光合速率变化, 运用SPSS软件计算、拟合马蓝叶片 *PAR*-*P*n 响应曲线。

#### 1.2.6 叶片光合特性参数的测定

采用 CIRAS-2(英国)便携式光合作用测定系统测定马蓝第 1 片完全展开叶光合速率。光合日变化在 8:00—18:00 每隔 1 h 测 1 次净光合速率(*P*n)、同时测定叶片胞间 $CO_2$ 浓度(*C*i)、气孔导度(*Gs*)、蒸腾速率(*T*r)、叶室内的光合有效辐射(*PAR*i)、叶片温度(*Tl*)等有关参数的值。各项目测定, 均为连体 3 次重复测定。

#### 1.2.7 叶片活体叶绿素荧光的测定

选择马蓝第 1 片完全展开叶, 采用 Handy FluorCam荧光仪进行田间叶片连体测定, 重复 3 次。获取主要荧光参数: *Fo*(初始荧光)、*Fm*(最大荧光)、*Fv*(可变荧光)、*Fv/Fm*(PSⅡ最大光化学效率或原初光能转换效率)、*Yield*(PSⅡ总的光化学量子产额)、*qP*(光化学淬灭系数)和 *qN*(非光化学淬灭系数)。

### 1.3 数据分析

采用Excel 2003及DPS软件统计分析试验数据, 利用Tukey多重比较法进行差异显著性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同光强处理对马蓝叶片有效光辐射和叶片温度的影响

不同光强下马蓝叶片获得的日有效光辐射变化见图 1 a, 最大有效辐射出现在 13:00 左右, 不同光

照条件处理叶面获得的有效光辐射差异显著，100%自然光强处理、30%和 6%自然光强最大有效光辐射(μmol·m$^{-2}$·s$^{-1}$)分别为 1 490、443 和 146。最大有效光辐射与叶片温度的变化相一致。

**2.2**　不同光强处理对马蓝叶片生长及叶绿素含量的影响

不同光强处理对马蓝叶片的生长影响显著，100%光强下马蓝叶片小而黄绿，叶长、叶宽、叶面积和单叶重分别为 30%自然光照叶片的 66.5%、62.5%、46.2%和 44.98%。遮荫叶片大而浓绿，30%光强叶片比 6%光强叶片表面光亮和深绿。叶绿素含量测定结果见表 1，各处理叶片的叶绿素 a、b 含量表现为 30%>6%>100%，处理间差异极显著($P$< 0.01)。低光照强度条件下，马蓝叶片具有较高的叶绿素 a/b 值，6%>30%>100%，6%与 100%自然光强之间差异显著。低光条件下色素的增加，特别是叶绿素 b 的增加，有利于马蓝在遮荫条件下更有效地吸收光能。这与许多植物的遮荫研究结果一致[7–9,13]。

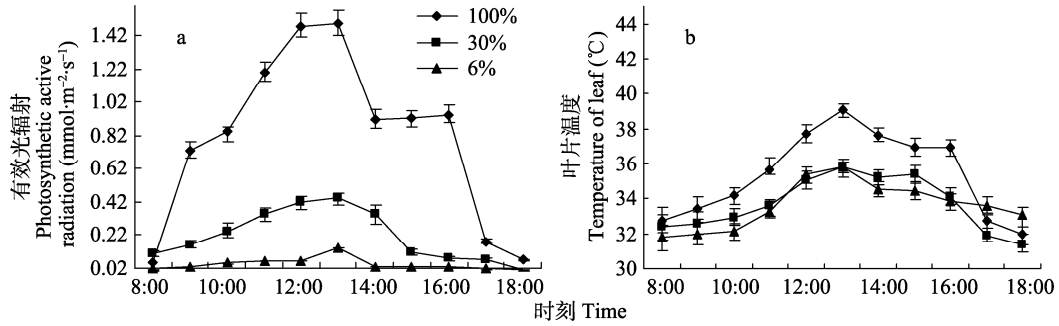



**图 1**　不同光强下马蓝叶片获得的有效光辐射**(a)**和叶片温度**(b)**的日变化

Fig. 1　Diurnal variations in photosynthetic active radiation (a) and leaves temperature (b) of *S. cusia* leaves under difference light intensities

100%、30%和 6%分别表示 100%自然光强、30%自然光强和 6%自然光强 3 个处理，下同。100%, 30% and 6% mean the treatments of 100%, 30% and 6% full sunlight, respectively. The same below.

**表 1**　不同光强处理下马蓝叶片性状与叶绿素含量

Table 1　Characteristics and contents of chlorophyll of *S. cusia* leaves under differences light intensities

| 光照强度 Light intensity | 叶面积 Leaf area (cm$^{-2}$) | 单叶重 Leaf weight [g(FW)] | 叶绿素 a Chloroghyll a [mg·g$^{-1}$(FW)] | 叶绿素 b Chloroghyll b [mg·g$^{-1}$(FW)] | 叶绿素 a/b Chloroghyll a/b |
|---|---|---|---|---|---|
| 100%自然光强 100% full sunlight | 38.847±3.262Cc | 0.861±0.041Cc | 0.08±0.001Cc | 0.05±0.003Cc | 1.71b |
| 30%自然光强 30% full sunlight | 84.061±8.396Aa | 1.914±0.117Aa | 0.91±0.007Aa | 0.38±0.020Aa | 2.38ab |
| 6%自然光强 6% full sunlight | 80.476±7.135Ab | 1.675±0.134Bb | 0.55±0.027Bb | 0.22±0.032Bb | 2.61a |

不同大、小写字母表示处理间 0.01 和 0.05 水平上差异显著 Different capital and small letters indicate significant difference among treatments at 0.01 and 0.05 levels. 下同 The same below.

**2.3**　不同光强处理对马蓝光曲线的影响

图 2 为 3 个不同光强处理马蓝的 *PAR*-*P*n 响应曲线。在一定的 *PAR*(光合有效辐射)范围内，3 个处理叶片净光合速率($P$n)都随光强增加而升高，到达一定光强后，$P$n 趋于光饱和而下降。由图可以直观看出，不仅处理间光合速率差异显著，而且对 *PAR* 的反应也存在明显区别，相比 30%光强和 6%光强处理，100%光强处理对光合有效辐射强度的增加敏感度减小；在达到光饱和点前，3 条光响应曲线的斜率差异明显，100%光强处理光合速率增加缓慢，6%光强处理光合强度上升速率也显著低于 30%光强处理。曲线表明高光照强度明显抑制马蓝叶片的光合速率，适当遮荫可增加耐荫植物的光合速率。

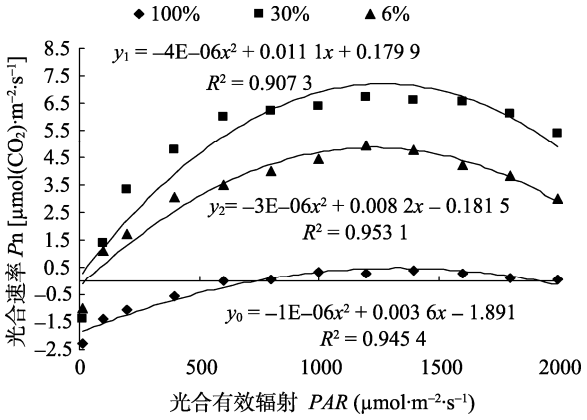



**图2**　不同光强处理下马蓝叶片***PAR*-*P*n**响应曲线

Fig. 2　*PAR*-*P*n curves of *S. cusia* leaves under difference light intensities

**2.4** 不同光强处理对马蓝净光合速率日变化的影响

图 3 显示不同光强处理马蓝叶片的光合强度日变化曲线均呈双峰型曲线, 净光合速率有明显的“午休”现象, 最大峰值均出现在 10:00 左右, 11:00—14:00 降至低谷, 此时也正值光辐射的高峰期, 具有明显的光抑制现象。从图可知, 不同光强处理马蓝叶片光合速率日变化的第 1 个峰出现时间基本一致, 10:00 前处理间光合速率表现为 30%自然光照>100%自然光照>6%自然光照; 10:00 后, 100%自然光照处理随着光照强度的逐渐增加, 光合速率迅速下降, 6%光照处理仅次于 100%自然光照处理。不同处理马蓝光合日变化的第 2 个峰值大小顺序虽无明显变化, 但出现时间具有明显差异, 30%、6%自然光强处理出现在 15:00 左右, 100%自然光强处理约晚 1 个小时左右出现峰值, 这与不同光强处理的光强日变化相一致, 非遮荫条件下, 抑制性光强持续时间较长, 因而 100%自然光照下马蓝叶片光合的第 2 个高峰出现明显推迟。

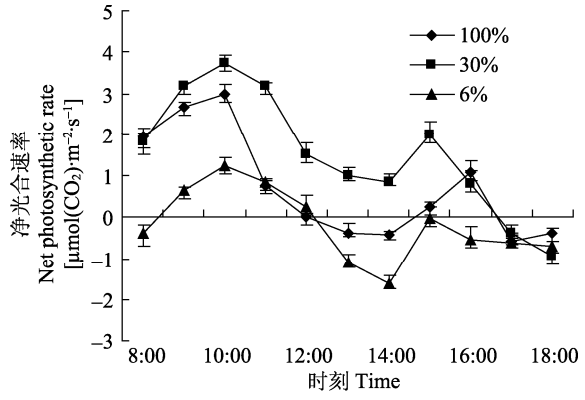



图 **3** 不同光强条件下马蓝叶片净光合速率日变化

Fig. 3 Diurnal variations in net photosynthetic rates of *S. cusia* leaves under different light intensities

**2.5** 不同光强处理马蓝叶片的光合参数变化

栽培观察发现, 马蓝适应于遮荫条件, 适当的遮荫有利于马蓝的生长。本研究对马蓝的净光合速率的研究结果也表明, 不同光强处理下马蓝的光合参数具有显著差异(表 2), 100%自然光强处理下的叶片, 不仅光合速率低, 暗呼吸速率也升高, 因而使得光补偿点显著高于遮荫处理, 光补偿点与光饱和点差值较小, 较易达到光饱和。所以在 3 种光照处理中, 100%自然光强处理的表观量子效率最低。数据同时表明遮荫处理具有较高的光合速率和较低的暗呼吸速率, 饱和点与光补偿点差值约为 100%自然光强的 2 倍, 量子效率约为 8 倍(30%光强处理)和 3 倍(6%光强处理)。遮荫后虽然光强变弱, 但对于马蓝来说, 光合能力和潜势反而更优于 100%自然光照条件, 说明遮荫有利于马蓝的光合作用, 这与栽培观察到的结果相一致。因此, 光强是影响马蓝叶片光合及生长的一个重要生态因子。

**2.6** 不同光强处理对马蓝光合参数日变化的影响

**2.6.1** 蒸腾速率(***Tr***)

从图 4 a 可知, 3 个光强处理下蒸腾速率(*T*r)的日变化趋势基本相同, 均呈单峰曲线变化。但遮荫影响了叶片的蒸腾速率和蒸腾高峰的出现时间, 30%、6%自然光强处理的蒸腾高峰比 100%自然光强处理滞后 1 h。蒸腾速率的高峰期(12:00—14:00)正是光合速率的低谷区, 随着蒸腾速率逐渐降低, 光合速率逐渐得到恢复。

**2.6.2** 气孔导度(***$G_S$***)

图 4 b 表明, 不同光强条件下, 气孔导度的日变化具有不同的变化趋势, 30%、6%自然光强处理的气孔导度具有相同变化趋势, 气孔随着时间的推移和光强的增强缓慢张开, 当光强达到一定强度时, 气孔导度突然增加, 迅速达到最大值。相比 30%和 6%光强处理, 100%自然光强处理的气孔对于光强响应过程较缓慢, 从响应光启动至达到最大值所用时间, 100%自然光强处理为 3 h, 30%自然光强处理为 2 h, 6%自然光强处理为 1 h。气孔迅速启动时的光辐射强度分别为其日最大光辐射强度值的 48.96%(100%自然光强处理)、55.08%(30%自然光强处理)和 46.58% (6%自然光强处理); 处理间差异不仅表现在气孔导度对光强的响应时间上, 气孔导度最大值也差异显著($P$<0.01), 30%和 6%光强处理的最大气孔导度分别为 100%自然光强处理的 2 倍和 1.5 倍, 气孔开度似乎和叶片所接受的光强呈反比, 且与当时叶片的光合速率不一致, 因此气孔的开张并非仅源于气体和水分交换。

表 **2** 不同光强条件下马蓝叶片的光合参数变化

Table 2 Changes in photosynthetic parameters of *S. cusia* leaves under difference light intensities

| 光照强度 Light intensity | 最大净光合速率 Maximum net photosynthetic rate [μmol($CO_2$)·$m^{-2}$·$s^{-1}$] | 光补偿点 Light compensation point (μmol·$m^{-2}$·$s^{-1}$) | 光饱和点 Light saturation point (μmol·$m^{-2}$·$s^{-1}$) | 表观量子效率 Apparent quantum field [μmol($CO_2$)·$μmol^{-1}$] | 暗呼吸速率 Dark respiration rate [μmol($CO_2$)·$m^{-2}$·$s^{-1}$] |
|---|---|---|---|---|---|
| 100%自然光强 100% full sunlight | 0.27±0.02 | 641.31±21.06 | 1 233±53.65 | 0.004±0.000 7 | 2.30±0.09 |
| 30%自然光强 30% full sunlight | 6.57±0.32 | 54.83±2.19 | 1 100±31.31 | 0.031±0.001 0 | 1.71±0.05 |
| 6%自然光强 6% full sunlight | 4.67±0.14 | 52.00±1.08 | 1 125±29.76 | 0.012±0.000 5 | 0.65±0.02 |

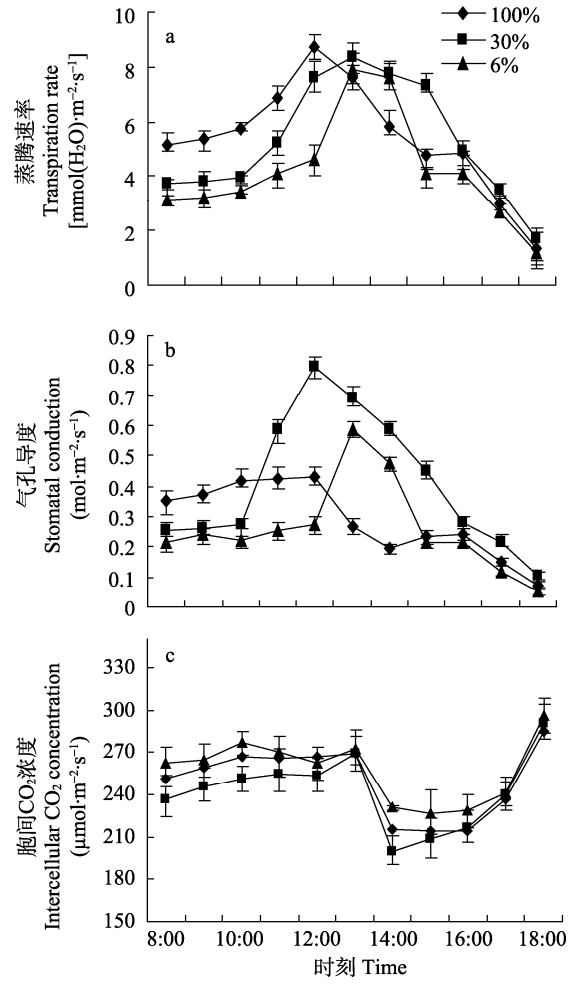



**图 4**　不同光强下马蓝叶片蒸腾速率**(a)**、气孔导度**(b)**和胞间 **$CO_2$** 浓度**(c)**的日变化

Fig. 4　Diurnal variations in transpiration rate (a), stomatal conductance (b) and intercellular $CO_2$ concentration (c) under different light intensities

### 2.6.3　胞间 $CO_2$ 浓度(*Ci*)

图4c表明，3个处理的*Ci* 变化趋势基本相同，30%自然光强处理因为具有较高光合速率，使得*Ci* 略低，但处理间差异不显著。不同光照条件下细胞间的$CO_2$变化和光合速率、气孔导度变化不完全一致，说明影响马蓝叶片光合作用的因素，除了气孔因素，还有非气孔因素。

### 2.6.4　遮荫条件下马蓝光合参数之间的相关关系

不同遮荫条件下马蓝光合参数之间的相关关系见表 3。表 3 表明，光合速率和气孔导度间存在不同相关关系，100%自然光照和 30%自然光照的气孔导度和光合速率间存在显著(0.641 0)和不显著(0.199 1)正相关关系，6%自然光则存在负相关关系。遮荫条件下，当 10:00 光合速率最高时，气孔导度并不高；当 12:00—14:00 气孔导度达到高峰时，恰是光合速率下降最低的时候，二者显著不一致(图 4b, c)，与刘悦秋等[13]对遮阴的异株荨麻研究结果相一致。说明遮荫条件下影响喜荫植物叶片光合速率主要为非气孔因素。

另外，从气孔导度和胞间 $CO_2$(*Gs*-*Ci*)的关系上得出自然光照条件下，*Gs*-*Ci* 间呈正相关关系，遮光条件下呈负相关关系，尽管 *Gs*-*Ci* 间的响应不一致，气孔导度也具有较大的变化差异，但从胞间 $CO_2$ 浓度变化曲线看，不同光照条件处理下的胞间 $CO_2$ 浓度并没有明显差异，说明 3 种光照条件下的气孔开度并没有影响到进入叶片细胞间的 $CO_2$，所以遮荫条件下影响马蓝光合作用的因子，更多的是非气孔性因素。

### 2.7　不同光强处理对马蓝叶绿素荧光参数的影响

初始荧光(*Fo*)是光系统 PSⅡ处于开放的非能量化状态；*Fv/Fm* 为开放的 PSⅡ反应中心捕获激发能的效率，代表叶绿体光系统Ⅱ的光化学效率；最大荧光产量(*Fm*)是PSⅡ反应中心完全关闭时的荧光产量，反映了通过 PSⅡ的电子传递情况；*Fv/Fo* 表示PSⅡ的潜在活性，*Yield* 为 PSⅡ的最大量子产额，同样反映PSⅡ的光化学活性[26,35]。由表3可以看到，不同光照条件下，3 个处理的 *Fo* 差异不显著，说明3 处理的光合基础是一致的，各处理的 *Fm*、*Fv/Fo*、*Fv/Fm*、*Yield* 值随着光强的减弱而增加，表现为6%>30%>100%自然光强处理，说明低光强条件下，马蓝叶片是通过增强 PSⅡ的捕获激发能力，获取最大量子产额，提高电子传递能力和光化学效率来弥

**表 3**　不同光强下马蓝叶片光合参数间的相关关系

Table 3　Correlation among photosynthetic parameters in *S. cusia* leaves under different light intensities

| 光强 Light intensity | *Pn*-*Ci* | *Pn*-*Gs* | *Gs*-*Ci* | *PRPi*-*Tl* | *Tr*-*Gs* | *PRPi*-*Gs* |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 100%自然光强 100% full sunlight | 0.149 9 | 0.641 0 | 0.272 3 | 0.875 6 | 0.759 3 | 0.603 8 |
| 30%自然光强 30% full sunlight | –0.146 8 | 0.199 1 | –0.114 9 | 0.692 8 | 0.899 7 | 0.913 5 |
| 6%自然光强 6% full sunlight | 0.331 6 | –0.385 0 | –0.147 5 | 0.586 6 | 0.972 7 | 0.758 5 |

*Pn*-*Ci*、*Pn*-*Gs*、*Gs*-*Ci*、*PRPi*-*Tl*、*Tr*-*Gs*、*PRPi*-*Gs* 分别表示净光合速率与胞间 $CO_2$ 浓度、净光合速率与气孔导度、气孔导度与胞间 $CO_2$ 浓度、光合有效辐射与叶片温度、蒸腾速率与气孔导度、光合有效辐射与气孔导度之间的相关关系。*Pn*-*Ci*, *Pn*-*Gs*, *Gs*-*Ci*, *PRPi*-*Tl*, *Tr*-*Gs* and *PRPi*-*Gs* show the correlation between net photosynthesis rate and intercellular $CO_2$ concentration, net photosynthesis rate and stomatal conductance, stomatal conductance and intercellular $CO_2$ concentration, photosynthetically available radiation and temperature of leaf, transpiration rate and stomatal conductance, photosynthetically available radiation and stomatal conductance.

补弱光条件下光量子的不足，保证光合作用。相比之下，100%自然光强处理中，光强对马蓝光合的抑制则是降低了光系统 II 的光化学效率。

*qP* 与 *qN* 分别代表光系统的光化学淬灭能力和非光化学淬灭能力。表 4 显示，遮荫处理光系统的光化学淬灭能力均大于100%自然光强处理，非光化学淬灭能力小于 100%自然光强处理，30%光强处理的光化学淬灭能力最高，所以遮荫条件下，耐荫植物是通过提高光系统的光化学效率来增强光化学淬灭能力，减少光损失与热耗散的非光化学淬灭，与吴雪霞等[14]、魏胜利等[15]结果一致，也支持了 Terashima 等[26]、Zhao 等[28]遮荫有利于提高耐荫植物光合及利用光能效率的结论。

### 2.8 不同光强处理对马蓝叶片中靛蓝和靛玉红含量的影响

不同光强条件下马蓝叶片中主要药效成分靛蓝、靛玉红含量变化如图 5 所示。由图可见在测定期间，靛蓝和靛玉红含量总体呈下降趋势，遮荫处理的靛蓝含量前期略高于、后期低于 100%自然光照处理，处理间差异不明显。100%和 6%自然光强处理靛玉红含量的变化趋势大致相同，但处理间具有较明显差异，除了 7 月 15 日的数据外，靛玉红含量均表现为 100%>6%>30%自然光强处理。由不同光强处理对叶片生长和光合的影响可以看出，100%自然光强对于马蓝生长和光合已经构成了一种环境胁迫，这种胁迫对于体内的次生代谢也是一种刺激，进而可能会影响到靛玉红的合成。表 1 表明，30%、6%自然光强处理的单叶重和叶面积显著大于 100%自然光强处理，在适宜的光强条件下，拥有较大的生物产量，因此相对于 100%自然光强处理而言，靛玉红含量较低。

## 3 讨论与结论

### 3.1 遮荫有利于提高马蓝光合速率，马蓝属典型的喜荫植物

本研究中，自然光强条件下，由于光强太强而产生明显光抑制，增加了马蓝光系统的热耗散(*qN* 增加)，降低了光能的吸收、转化和利用效率(*Fm*、*Fv/Fo*、*Fv/Fm*、*Yield* 降低)，同时可以看到，遮荫后叶绿素 a/b 比值增大，光合活性增加；随遮荫度的增加，*PAR*-*P*n 响应曲线左移，光补偿点降低；叶片叶绿素荧光参数变大，表现了典型的耐荫植物光合特性，说明在遮荫条件下，植物是通过充分发挥和挖掘自身光合系统对光吸收、光能转化能力，提高反应中心光化学活性，提高能量利用率来适应弱光条件，弥补光能的不足，而形成一种光生态适应性，这一点在其他耐荫植物上也有证实[2−3,6,8,10,15,17,24]。

### 3.2 弱光条件下，气孔蒸腾是其蒸腾的主要部分

气孔是控制叶片内外水蒸汽和 $CO_2$ 扩散的门户，本研究中气孔导度和蒸腾速率变化趋势具有正相关性。虽然各处理的气孔导度具有显著差异，30%自然光处理大于 6%自然光处理和 100%自然光处理，但是处理间的蒸腾速率差异并不显著。100%自然光强下，气孔开度虽受到强光抑制，却达到与其他两个光强处理同样的蒸腾速率，说明强光下除了气孔蒸腾，还存在着较强的叶面蒸腾。因此，强光条件下，

表 4 不同光照处理马蓝叶片叶绿素荧光的主要参数

Table 4 Characteristics of the chlorophyll fluorescence in *S. cusia* leaves under difference light intensities

| 光强 Light intensity | | 初始荧光 *Fo* | 最大荧光 *Fm* | PS II 潜在活性 *Fv/Fo* | PS II 最大光化学效率 *Fv/Fm* | 光化学量子产额 *Yield* | 光化学淬灭系数 *qP* | 非光化学淬灭系数 *qN* | 非光化学淬灭比率 1−*(qP/qN)* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 100%自然光强 | 100% full sunlight | 202.19Aa | 582.58Bc | 1.83Cc | 0.65Bc | 0.47Cc | 0.68 Bb | 0.85Aa | 0.20 |
| 30%自然光强 | 30% full sunlight | 207.04Aa | 741.38Bb | 2.89Bb | 0.76Ab | 0.58Bb | 0.91 Aa | 0.44Bc | −1.07 |
| 6%自然光强 | 6% full sunlight | 211.86Aa | 1 020.11Aa | 3.99Aa | 0.80Aa | 0.63Aa | 0.81 ABa | 0.51Bb | −0.59 |

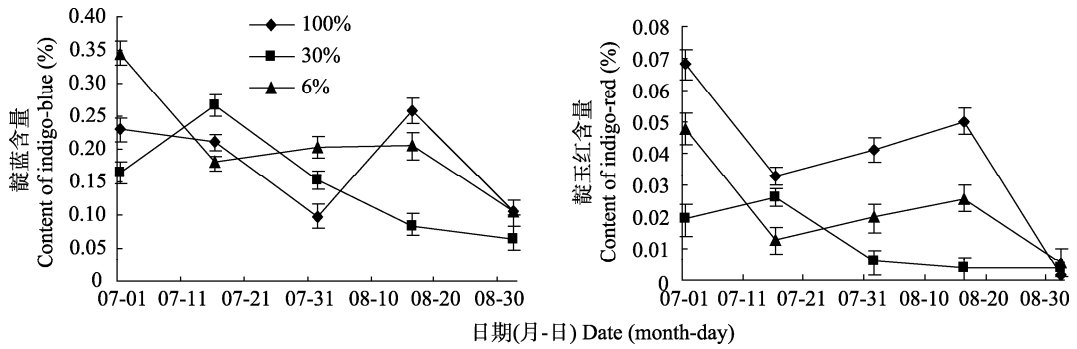



图 5 不同光强处理马蓝叶片靛蓝、靛玉红的含量变化

Fig. 5 Changes of indigo-blue and indigo-red contents in *S. cusia* leaves under difference light intensities

气孔开度被限制, 叶面蒸腾是蒸腾的一个主要部分, 弱光条件下, 叶面蒸腾的动力不足, 主要通过气孔蒸腾。

**3.3** 不同光强下, 气孔开张的敏感度不同, 可能和光质有关, 遵从反比定律

试验结果表明, 马蓝叶片气孔开度从响应光启动到达到最大值所用时间, 100%自然光强为 3 h, 30%自然光强为 2 h, 6%自然光强为 1 h; 气孔迅速启动时的光辐射强度分别为其日最大光辐射强度值的 48.96%、55.08%和 46.58%。从表面看 3 种光强条件下, 气孔开度达到最大所要求的光辐射强度占日最大光辐射强度的比例均在 50%左右。 同时, 气孔导度和有效光辐射间存在不同程度的正相关关系, 光照有利于气孔的开放, 但是彼此间所需光辐射强度和所用时间差异极显著。这说明不同光照条件下, 气孔的开张度对于光照强度的响应度不同, 在自然光照和弱光条件下, 气孔对光强的响应机制不同, 弱光条件下的气孔对光强的变化反应敏感度大于自然光照条件, 这与战吉宬等[22]观察到弱光条件下葡萄叶片气孔横轴相对加宽的结构变化现象相一致, 这可能和遮荫后透过光中某些波长的光线丰度(如蓝光)所引起的“蓝光效应”有关, 气孔开张遵从着反比定律(reciprocity law), 值得进一步研究。

**3.4** 马蓝生长的适宜光照强度为 **30%**自然光照

由试验结果可知, 适度遮荫有利于马蓝的光合作用和生长, 30%自然光强为马蓝生长的适宜光照条件, 在生产实践中, 马蓝可套种或栽培于稀疏林下。根据最适宜的生长不一定产生最大效益的原则, 如果兼顾生长和药效学成分的累积, 建议在最适 30%自然光照强度的基础上, 也可适度上调 2%~5%光照强度, 可同时增加马蓝生物产量和药效成分含量。

## 参考文献


[1] 刘贤赵, 康绍忠, 周吉福. 遮阴对作物生长影响的研究进展[J]. 干旱地区农业研究, 2001, 19(4): 67–73

[2] 吴成就, 伍贤进, 刘选明, 等. 药用植物光合作用研究[J]. 生命科学研究, 2001, 14(5): 464–470

[3] 文军, 刘金祥, 赵玉红. 草本植物遮荫效应的研究进展[J]. 草业科学, 2007, 24(9): 93–97

[4] 薛建平, 王兴, 张爱民, 等. 遮荫对半夏光合特性的影响[J]. 中国中药杂志, 2008, 33(24): 2896–2900

[5] 宋晓蕾, 杨红玉, 曾黎琼, 等. 植物遮荫效应的研究进展[J]. 北方园艺, 2009(5): 129–133

[6] 吕洪飞, 皮二旭, 王岚岚, 等. 遮荫处理的白英光合作用和叶绿素荧光特性研究[J]. 浙江师范大学学报: 自然科学版, 2009, 32(1): 1–6

[7] 潘远智, 江明艳. 遮荫对盆栽一品红光合特性及生长的影响[J]. 园艺学报, 2006, 33(1): 95–100

[8] 唐雪辉. 四种野生地被植物耐荫性研究[D]. 雅安: 四川农业大学硕士学位论文, 2006: 34

[9] 缴丽莉, 路丙社, 周如久, 等. 遮光对青榨槭光合速率及叶绿素荧光参数的影响[J]. 园艺学报, 2007, 34(1): 173–178

[10] 王雁, 苏雪痕, 彭镇华. 植物耐荫性研究进展[J]. 林业科学研究, 2002, 15(3): 349–353

[11] 刘贤赵, 康绍忠. 番茄不同生育阶段遮荫对光合作用与产量的影响[J]. 园艺学报, 2002, 29(5): 427–432

[12] 黄娟, 夏汉平, 蔡锡安. 遮光处理对三种钝叶草的生长习性与光合特性的影响[J]. 生态学杂志, 2006, 25(7): 759–764

[13] 刘悦秋, 孙向阳, 王勇, 等. 遮荫对异株荨麻光合特性和荧光参数的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(8): 3457–3464

[14] 吴雪霞, 龚静, 查丁石. 遮荫对茄子幼苗叶片叶绿素荧光特性的影响[J]. 吉林蔬菜, 2010(4): 35–38

[15] 魏胜利, 王文全, 秦淑英, 等. 桔梗、射干的耐阴性研究[J]. 河北农业大学学报, 2004, 27(1): 52– 57

[16] 钟泰林, 李根有, 石柏林. 遮荫对南五味子光合特性的影响[J]. 中草药, 2009, 40(3): 466–469

[17] 赵磊, 杨延杰, 林多. 光照强度对蒲公英光合特性及品质的影响[J]. 园艺学报, 2007, 34(6): 1555–1558

[18] 王艳茹, 郭巧生, 靳淼. 光强对药用白菊花生长发育及光合特性的影响[J]. 中国中药杂志, 2009, 34(13): 1632–1635

[19] 李万莲, 宛志沪, 杨书运. 参棚透光率对西洋参叶片光合作用的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(2): 261–266

[20] 郑国生, 何秀丽. 夏季遮荫改善大田牡丹叶片光合功能的研究[J]. 林业科学, 2006, 42(4): 27–32

[21] 欧亚丽, 李磊. 遮阴对黄精光合特性和蒸腾速率的影响[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(24): 10326–10327

[22] 战吉宬, 黄卫东, 王秀芹, 等. 弱光下生长的葡萄叶片蒸腾速率和气孔结构的变化[J]. 植物生态学报, 2005, 29(1): 26–31

[23] Lichtenthaler H K, Babani F, Langsdorf G. Chlorophyll fluorescence imaging of photosynthetic activity in sun and shade leaves of trees[J]. Photosynthesis Research, 2007, 93(1/3): 235–244

[24] McBee G G, Holt E C. Shade tolerance studies on Bermudagrass and other turfgrasses[J]. Agronomy Journal, 1966, 58(5): 523–525

[25] Terashima I, Seaki T. Light environment within a leaf I. Optical properties of paradermal sections of Camellia leaves with special reference to differences in the optical properties of palisade and spongy tissues[J]. Plant and Cell Physiology, 1983, 24(8): 1493–1501

[26] Terashima I, Inoue Y. Vertical gradient in photosynthetic properties of Spinach Chloroplast dependent on intra-leaf light environment[J]. Plant and Cell Physiology, 1985, 26(4): 781–785

[27] Kitao M, Lei TT, Koike T, et al. Tradeoff between shade ad-

aptation and mitigation of photoinhibition in leaves of *Quercus mongolica* and *Acer mono* acclimated to deep shade[J]. Tree Physiology, 2006, 26(4): 441–448

[28] Zhao D L, Oosterhuis D M. Influence of shade on mineral nutrient status of field grown cotton[J]. Journal of Plant Nutrition, 1998, 21(8): 1681–1695

[29] Fankhanser C, Chory J. Light control of plant development[J]. Annual Review of Cell and Developmental Biology, 1997, 13(1): 203–229

[30] Urban O, Kosvancová M, Marek M V, et al. Induction of photosynthesis and importance of limitations during the induction phase in sun and shade leaves of five ecologically contrasting tree species from the temperate zone[J]. Tree Physiology, 2007, 27(8): 1207–1215

[31] Senevirathna A M W K, Stirling C M, Rodrigo V H L. Growth, photosynthetic performance and shade adaptation of rubber (*Hevea brasiliensis*) grown in natural shade[J]. Tree Physiology, 2003, 23(10): 705–712

[32] 李合生. 植物生理学生化实验指导原理与技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 134–137

[33] 刘依, 韩鲁佳, 闫巧娟, 等. 板蓝根中靛蓝和靛玉红的提取及其质量分数的测定[J]. 中国农业大学学报, 2003, 8(6): 5–8

[34] 陈根云, 俞冠路, 陈悦, 等. 光合作用对光和二氧化碳响应的观测方法探讨[J]. 植物生理与分子生物学学报, 2006, 32(6): 696–691

[35] 张守仁. 叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论[J]. 植物学通报, 1999, 16(4): 444–448

# 中国科学院遗传与发育生物学研究所<br>农业资源研究中心研究生教育简介

## 1 概况

中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心(以下简称中心)的前身为始建于 1978 年的中国科学院石家庄农业现代化研究所。中心拥有中国科学院院士 1 人, 研究员 17 人, 引进中国科学院“百人计划”人才 3 名。在读硕士和博士研究生 80 人。

中心沿北纬 38 度带分别在河北省元氏县、栾城县和南皮县建立了 3 个野外试验台站, 形成了具有不同生态类型的山地丘陵区—山前平原区—滨海平原区农业科学研究基地。其中栾城农业生态系统试验站已于 2005 年晋升为国家野外试验台站, 同时也是中国科学院生态网络台站成员和国际 GTOS 成员。中心拥有中国科学院农业水资源重点实验室、河北省节水农业重点实验室和中国科学院小麦转基因研究试验基地。

自 2002 年进入中国科学院知识创新工程以来, 中心面向国家水安全、粮食安全、生态环境安全的重大战略需求和农业资源与生态学前沿领域, 以农业水资源高效利用为重点, 在节水理论与技术、农业生物技术、生态系统及信息管理等领域, 开展应用基础研究, 集成创新资源节约型现代农业模式, 为区域农业持续发展做出了基础性、战略性、前瞻性贡献。

## 2 招生与培养

### 2.1 招生

每年秋季招收 1 次生态学博士、学术型硕士和生物工程全日制专业学位硕士研究生。每年 8 月左右开展免试生接收工作。通过中心复试并获得拟接收资格的免试生, 若最终未获所在校外推指标者, 只要统考成绩通过中心的复试线, 可免复试直接录取。

### 2.2 培养与就业

中心十分注重培养质量, 改善人才成长环境, 努力提高学生的综合素质。每年有多位学生荣获中国科学院和中国科学院遗传与发育生物学研究所的各种冠名奖学金。学生毕业后赴国内外大学和科研院所等企事业单位就职或从事博士后研究工作。近 5 年毕业生就业率达 96.59%, 其中 2010 年毕业生就业率达 100%, 按期毕业率达 96%。

### 2.3 学生待遇

学生在学期间不仅不收取任何学费, 还享有相应的研究助理薪金, 硕士生奖/助学金 25000 元/年左右, 博士生 35000 元/年左右。优秀学生每年除可获得中国科学院研究生院奖学金、冠名奖学金等奖励外, 还可享有研究所设立的“振声奖学金”和“益海嘉里奖学金”等。

学生拥有宽敞明亮并备有单独卫生间的住宿(两人间)环境和价位适中的学生食堂。

热忱欢迎地球科学、生物学、农学和林学等相关专业有志青年踊跃报考及推免！

## 3 联系方式

单位网址: http://www.sjziam.ac.cn 电话: 0311-85801050 传真: 0311-85815093
联系人: 王老师 E-mail: yzb@sjziam.ac.cn 邮政编码: 050022