

DOI:10.11829/j.issn.1001-0629.2016-0416

孙善军, 邹长明, 张晓红, 赵敏, 何涛. 遮阴对两个绿豆品种光合作用和生长发育的影响. 草业科学, 2017, 34(6): 1247-1254.

Sun S J, Zou C M, Zhang X H, Zhao M, He T. Effect of shading on photosynthesis and growth in two *Phaseolus aureus* varieties. Pratacultural Science, 2017, 34(6): 1247-1254.

遮阴对两个绿豆品种光合作用和生长发育的影响

孙善军^{1,2}, 邹长明¹, 张晓红¹, 赵敏², 何涛¹

(1. 安徽科技学院, 安徽 凤阳 233100; 2. 蚌埠市农业技术推广中心, 安徽 蚌埠 233000)

摘要: 为了确定绿豆(*Phaseolus aureus*)作为套种作物的适宜性, 以小槐花园叶绿豆和大花叶子绿豆两个品种为试验材料, 通过田间试验和盆栽试验对其耐阴能力及其机理进行了研究。测定不同遮阴处理(全光照、遮光率 30% 和 72%)下, 绿豆在初花期的叶片光合参数、叶绿素含量和光合酶(RuBPCase)活性, 研究绿豆生长发育和营养品质对弱光的响应。结果表明, 在遮光 30% 时, 大花叶子绿豆的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)、水分利用效率(WUE)和 RuBPCase 活性较全光照显著下降了 24%、18%、12%、13% 和 21% ($P < 0.05$), 而小槐花园叶绿豆无显著变化 ($P > 0.05$)。在遮光 72% 时, 两种绿豆的 P_n 、 G_s 、 T_r 和 WUE 等光合参数均显著下降了约 11%。在遮光 30% 时, 大花叶子绿豆的营养生长受到显著影响而小槐花园叶绿豆无显著变化; 但在遮光 72% 时, 两种绿豆的营养生长均受到显著抑制, 干物质产量比全光照降低了约 34%。两种遮阴处理与全光照相比, 种子产量显著降低了约 37%。综上可知, 小槐花园叶绿豆具有一定的耐阴能力, 能耐 30% 的遮光, 适宜作为林果行间的套种作物。

关键词: 绿豆; 耐阴能力; 光合参数; 叶绿素; 光合酶; 营养成分; 产量

中图分类号: S522.05; Q945.11

文献标志码: A

文章编号: 1001-0629(2017)06-1247-08*

Effect of shading on photosynthesis and growth in two *Phaseolus aureus* varieties

Sun Shan-jun^{1,2}, Zou Chang-ming¹, Zhang Xiao-hong¹, Zhao Min², He Tao¹

(1. University of Anhui Science and Technology, Fengyang 233100, China;

2. Bengbu Agricultural Technology Promotion Center, Bengbu 233000, China)

Abstract: In order to determine the suitability of *Phaseolus aureus* as interplanting crops, field experiments and pot trials were conducted under full natural light, and 30 and 72% shading to test the shade tolerance of two Mung bean varieties, including Small Robinia-flower Round-leaf (SRRPA) and Big Lace-leaf Mung bean (BLPA) in 2015. The photosynthetic parameters, chlorophyll content, and RuBPCase activity in leaves of the Mung beans were measured during the first bloom stage. In addition, the response of growth and nutritional quality to weak light was studied. The results showed that, the net photosynthetic rate (P_n), stomatal conductance (G_s), transpiration rate (T_r), water use efficiency (WUE) and RuBPCase activity of BLPA significantly decreased by 24%, 18%, 12%, 13%, and 21%, respectively, than that under full light, whereas these parameters showed no significant change at 30% shading in SRRPA in response to shading. Photosynthetic parameters, including P_n , G_s , T_r , and WUE, in the two Mung bean varieties were significantly decreased by more than 11% under 72% shading. Vegetative growth of BLPA was significantly inhibited, but that of SRRPA re-

* 收稿日期: 2016-08-08 接受日期: 2017-01-03

基金项目: 农业部生物有机肥创制重点实验室开放课题(BOFC2015KB01), 国家重点研发计划(2016YFD0300901)

第一作者: 孙善军(1973-), 男, 安徽怀远人, 高级农艺师, 硕士, 主要从事土壤与肥料研究。E-mail: 1254427343@qq.com

通信作者: 邹长明(1963-), 男, 湖南祁东人, 教授, 硕士, 主要从事土壤与肥料研究。E-mail: cmzou@163.com

revealed no significant change at 30% shading. In addition, vegetative growth of the Mung beans was significantly inhibited at 72% shading, and dry matter yield decreased by more than 34%, compared to those under full light. Shading treatments significantly reduced seed yield by over 37% compared to that under full light. These results indicated that SRRPA had the ability of resisting shade, and could tolerate 30% shading, which was suitable for intercropping.

Key words: *Phaseolus aureus*; shade tolerance; photosynthesis parameters; chlorophyll; photosynthetic enzyme; nutritive components; yield

Corresponding author: Zou Chang-ming E-mail:cmzou@163.com

光合作用是地球上最重要的化学反应,光合作用决定了作物产量水平的高低^[1],而光照强度是植物光合作用的最重要环境因子^[2-3],喜阳植物适宜于强光下生长而喜阴植物适宜于弱光下生长^[4]。普通的粮油作物一般是喜阳植物,遮阴对其生长发育、碳氮代谢、产量和品质有不良影响^[3,5-6]。但不同的植物种类甚至同一植物的不同品种对光环境的适应性有差异,有些植物在光照环境改变后,可以通过调整茎、叶的形态结构,改变光合参数,调节光合酶活性及光合色素含量以适应新的光照环境^[7-14],因此,人们常通过遮阴试验来观察植物对弱光的反应,比较植物的耐阴能力,以筛选出耐阴品种^[8-12]。

绿豆(*Phaseolus aureus*)是一种粮—饲—药兼用的作物^[14]。绿豆种子是高蛋白、低脂肪、中淀粉的食物,既是上佳营养保健食品,又是医药和食品工业的原料^[15-16];绿豆鲜秸秆富含矿质元素和粗蛋白、粗脂肪,营养丰富且粗纤维含量也较低,是很好的饲料和肥料^[17-19]。但由于绿豆在我国为小杂粮作物,种植面积一直较少^[20]。随着人们对营养保健食品的重视,对杂粮的需求逐年增加,2009—2011年曾一度出现绿豆紧缺现象而价格猛涨^[21],有必要扩大种植面积以满足市场需求。绿豆耐旱耐瘠且生育期短,适宜与其它作物间作套种。近年研究者在这方面进行了一些研究,研究发现绿豆—谷子(*Setaria italica*)间作有利于提高绿豆的产量与品质,增产提质效应优于绿豆—玉米(*Zea mays*)间作^[16]。间作绿豆对核桃(*Juglans regia*)苗的根系水分运输和光合代谢有促进作用^[22]。有研究者从绿豆产量性状方面筛选了适宜于甘蔗(*Saccharum officinarum*)和幼龄柑橘(*Citrus reticulata*)间作的中绿5号、中绿1号和F8等绿豆品种^[23]以及对棉花(*Gossypium*)—绿豆最佳间作模式及其经济效益进行了研究^[24];邹长明等^[9]则对遮光率52%条件下的绿豆光合性能和生长发育进行了观测,发现遮

阴52%显著降低了绿豆光合产物积累量,抑制了其根系和根瘤生长,对绿豆生殖生长也有显著不良影响。为了深入了解绿豆在不同遮光率条件下的生产能力,本研究对小槐花园叶绿豆(Small Robinia-flower Round-leaf mung bean)(园叶型代表品种)和大花叶子绿豆(Big Lace-leaf mung bean)(花叶型代表品种)进行了不同遮阴处理,为推广绿豆与主作物间作和套作技术提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试材料为从国家种质资源库引进的两个绿豆品种:小槐花园叶绿豆和大花叶子绿豆。

1.2 试验地概况

试验地位于安徽省凤阳县府城镇山后街村的绿肥作物种质资源圃,位于32°52.869' N, 117°33.699' E,年均气温14.9℃,年日照时数2 249 h,无霜期212 d,年均降水量904 mm。土壤为肥力较高的黄褐土, pH 6.2,有机质含量为25.0 g·kg⁻¹,碱解氮含量为98.0 mg·kg⁻¹,有效磷含量为49.9 mg·kg⁻¹,速效钾含量为244 mg·kg⁻¹。

1.3 试验方法

于2015年4月—7月进行田间试验,设置3个遮光处理,分别为全光照(遮光率0%,对照)、遮光率30%和遮光率72%(由于绿豆在遮光率52%条件下的表现已经在2014年进行了观测^[9],2015年试验去掉了52%遮光率处理)。随机区组设计,每个处理3次重复,每个重复1个小区,小区面积为3 m×4 m,共18个小区。种植前不施肥,株距×行距=40 cm×50 cm,穴播,每穴播种3~4粒,出苗后定苗两株。同时按相同处理方式盆栽试验,4次重复,每盆装砂—土混合物6 kg(砂:土=1:1),不施肥,每盆播种8粒,出苗后定苗3株。遮阴处理分别用淡蓝色纱网和

黑色遮阳网来遮阴,使遮光率分别为 30%(70%透光率,正午实测)和 72%(28%透光率,正午实测),遮阳网架在 1.5 m 高的竹桩上,分枝期开始遮阴直到成熟期结束。

1.4 测定指标及方法

1.4.1 观察生育期 生长期调查记录出苗期、分枝期、初花期、结荚期、成熟期的具体日期^[25]。

1.4.2 光合参数测定 在初花期,用美国产 Li-6400XT 型便携式光合仪,于 09:00—11:00 测定各处理绿豆地上部完全伸展的功能叶的光合参数,设定叶室温度 25℃、相对湿度 70%、CO₂ 浓度 380 μmol·mol⁻¹,在光合有效辐射(PAR)为 1 000 μmol·(m²·s)⁻¹条件下,读取净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO₂ 浓度(C_i)和蒸腾速率(T_r)数据,用公式 P_n/T_r 计算瞬时水分利用效率(WUE)。

1.4.3 光合色素与光合酶测定 采集初花期鲜叶样品测定叶绿素(Chl)与类胡萝卜素(Car)含量、核酮糖-1,5-二磷酸羧化酶(RuBPCase)活性,鲜叶中的叶绿素与类胡萝卜素含量用 95%乙醇提取,在 665、649 和 470 nm 波长下用 722 型分光光度计测定吸光度,根据不同波长下的吸光度计算叶绿素 a (Chl a)、叶绿素 b (Chl b)和类胡萝卜素含量^[26];RuBPCase 活性用 Tris-HCl 缓冲液、谷胱甘肽和 EDTA 混合物提取,在 340 nm 波长下用分光光度法测定^[26]。

1.4.4 营养生长调查 在田间绿豆初花期测量株高,调查分枝数,测量叶片面积和叶片数并计算叶面积指数,同时测量叶片厚度和茎粗;盆栽绿豆初花期倒盆一去土一洗净后测量地上部和地下部鲜重、干重及根瘤

鲜重。

1.4.5 营养物质测定 在田间初花期取鲜样,采用 10%乙酸提取,茚三酮比色法测定游离氨基酸含量^[26];粗蛋白采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮,奈氏比色法测定^[27],粗脂肪采用索氏提取法(乙醚提取,称重法)测定^[27],粗纤维采用酸性洗涤剂(十六烷基三甲基溴化铵-硫酸溶液)法测定^[27]。

1.4.6 产量测定 各小区在初花期收 6 m² 植株(隔行割取地上部)计算鲜草产量,取样测定水分后计算干物质产量,再根据生长天数算出干物质积累效率;在成熟期收获荚果种子,晒干后计产。

1.5 数据分析

用 Excel 2007 进行数据计算,用 SPSS 18.0 软件进行单因素方差分析和多重比较。

2 结果与分析

2.1 遮阴对绿豆光合作用的影响

随着遮光率的增加,两个绿豆品种(小槐花园叶绿豆和大花叶子绿豆)的光合效率均呈下降趋势(表 1),其中大花叶子绿豆下降幅度更大。遮光率 30%条件下,与对照相比,小槐花园叶绿豆 P_n、G_s 和 T_r 下降不显著(P>0.05)而大花叶子绿豆 P_n、G_s 和 T_r 分别显著下降了 24%、21%和 12%(P<0.05);遮光率 72%条件下,小槐花园叶绿豆和大花叶子绿豆的 P_n、G_s 和 T_r 下降幅度分别为 24%和 58%、25%和 58%,11%和 32%。结果表明,遮阴对大花叶子绿豆光合作用的影响要大于对小槐花园叶绿豆。

资料显示^[4,7,9],在增加Chl总量的同时降低叶片

表 1 盆栽绿豆的光合参数
Table 1 Photosynthetic parameters of the *P. aureus* in the pot trial

品种 Variety	Sr/%	P _n / μmol·(m ² ·s) ⁻¹	G _s / mol·(m ² ·s) ⁻¹	T _r / μmol·(m ² ·s) ⁻¹	WUE/ g·kg ⁻¹	C _i / μmol·mol ⁻¹
小槐花园叶绿豆 SRRPA	0	19.31±0.51a	0.28±0.01a	3.97±0.13a	4.86±0.17a	220.00±4.90a
	30	19.29±0.43a	0.27±0.01a	3.85±0.15a	5.01±0.13a	222.10±5.80a
	72	14.63±0.38b	0.21±0.02b	3.52±0.11b	4.16±0.15b	230.30±6.10a
大花叶子绿豆 BLPA	0	20.55±0.60a	0.24±0.02a	4.02±0.18a	5.11±0.25a	214.30±4.80c
	30	15.63±0.55b	0.19±0.01b	3.53±0.13b	4.43±0.20b	228.60±3.30b
	72	8.67±0.44c	0.10±0.01c	2.75±0.14c	3.15±0.16c	249.20±6.40a

注:同一品种同列不同小写字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)。Sr,遮光率;P_n,净光合速率;G_s,气孔导度;T_r,蒸腾速率;WUE,水分利用效率;C_i,胞间 CO₂ 浓度。下同。

Note: Different lowercase letters of same cultivar within the same colum indicate significant difference among different treatments at the 0.05 level; Sr, shading rate; P_n, net photosynthetic rate; G_s, stomatal conductance; T_r, transpiration rate; WUE, water efficiency; C_i, intercellular CO₂ concentration; SRRPA, Small Robinia-flower Round-leaf Mung bean; BLPA, Big Lace-leaf Mung bean; similary for the following tables.

中的 Chl a/b 可增强植物的耐阴能力。与对照相比,遮阴后两种绿豆 Chl 总量增加且 Chl a/b 显著减少 ($P<0.05$),品种间也表现出差异(表 2),遮光 30%时,小槐花园叶绿豆和大花叶子绿豆的 Chl a/b 分别减少了 58%和 42%;遮光 72%时,两种绿豆的 Chl a/b 分别减少了 62%和 47%;另外,大花叶子绿豆的光合酶(RuBPCase)活性在遮光 30%和遮光 72%分别较对照显著降低 21%和 36% ($P<0.05$),而小槐花园叶绿豆降低不显著 ($P>0.05$)。结果表明,小槐花园叶绿豆对弱光的适应能力更强。

2.2 遮阴对绿豆营养生长的影响

在遮光 30%条件下,与对照相比,小槐花园叶绿豆的株高显著增高了 20% ($P<0.05$),而大花叶子绿豆增加不显著 ($P>0.05$), (表 3),小槐花园叶绿豆的茎粗降低不显著而大花叶子绿豆的茎粗显著降低了 19%;在遮光 72%条件下,两个绿豆品种的株高较对照增加不显著,但茎粗比对照分别显著降低了 33%和 43%;根/冠比是对弱光较敏感的指标之一^[9,28],遮光

30%可使两个绿豆品种的根/冠比分别显著降低了 17%和 26%,遮光 72%可使之显著降低了 225%和 32%;遮阴对根瘤的生长有不良影响,在遮光 30%条件下,小槐花园叶绿豆的根瘤鲜重较对照降低了 4%,而大花叶子绿豆显著降低了 35%,遮光率 72%条件下,两种绿豆的根瘤鲜重较对照分别显著降低了 90%和 92%。

遮阴使绿豆叶片显著变薄 ($P<0.05$) (表 4)。两种绿豆叶片厚度在遮光 30%时较对照分别显著降低了 16%和 17%,在遮光 72%时较对照分别显著降低了 22%和 32%;遮阴也使绿豆叶片数量减少,两种绿豆叶片数量在遮光 30%时较对照分别减少 10% ($P>0.05$)和 22% ($P<0.05$),在遮光 72%时较对照分别减少了 48%和 60% ($P<0.05$);叶片面积则主要表现在不同遮光率上的差异,在遮光 30%时叶片面积比对照显著增加而遮光 72%时显著减少;在干物质产量和干物质积累效率方面,品种间和处理间均有不同,小槐花园叶绿豆在遮光30%时与对照无显著差异,而大花叶

表 2 盆栽绿豆鲜叶中光合色素含量及 RuBPCase 活性
Table 2 Content of photosynthetic pigments and activity of RuBPCase in fresh leaves of the *P. aureus* in the pot trial

品种 Variety	Sr/%	Chl a/ mg · g ⁻¹	Chl b/ mg · g ⁻¹	Chl(a+b) mg · g ⁻¹	Chl a/b	Car/ mg · g ⁻¹	RuBPCase activity/ μmol · (g · min) ⁻¹
小槐花园叶绿豆 SRRPA	0	1.85±0.18c	0.47±0.17c	2.32±0.35c	3.94±0.51a	0.49±0.05a	45.10±2.31a
	30	2.61±0.12b	1.56±0.14b	4.17±0.26b	1.67±0.28b	0.38±0.03b	43.51±1.92a
	72	3.05±0.13a	2.02±0.18a	5.07±0.31a	1.51±0.39b	0.35±0.04b	41.64±2.23a
大花叶子绿豆 BLPA	0	1.46±0.13c	0.36±0.07c	1.82±0.20c	4.06±0.21a	0.44±0.10a	46.71±2.67a
	30	2.69±0.11b	1.14±0.08b	3.83±0.19b	2.36±0.30b	0.44±0.07a	37.13±2.30b
	72	3.20±0.09a	1.49±0.06a	4.69±0.15a	2.15±0.33b	0.46±0.05a	30.02±2.10c

注: Sr, 遮光率; Chl a, 叶绿素 a; Chl b, 叶绿素 b; Chl(a+b), 叶绿素总量; Chl a/b, Chlorophyll a/b; Car, 类胡萝卜素。
Note: Sr, shading rate; Chl a, chlorophyll a; Chl b, chlorophyll b; Chl(a+b), chlorophyll (a+b); Chl a/b, chlorophyll a/b; Car, carotenoid.

表 3 遮阴对盆栽绿豆根茎性状和根瘤的影响
Table 3 Effect of shading on roots, stem and root nodules of the *P. aureus* in the pot trial

品种 Variety	Sr/%	Ph/cm	Sd/cm	Bq	FWU/ g · pot ⁻¹	FWO/ g · pot ⁻¹	R/S	Wr/g
小槐花园叶 绿豆 SRRPA	0	39.22±1.71b	0.66±0.06a	8±1a	20.90±1.51a	114.01±6.10b	0.18±0.01a	3.57±0.29a
	30	47.13±1.90a	0.61±0.05a	8±1a	19.04±1.32a	129.93±4.41a	0.15±0.01b	3.41±0.23a
	72	41.03±2.10b	0.44±0.03b	5±1b	10.67±1.10b	78.03±5.32c	0.14±0.01b	0.35±0.10b
大花叶子 绿豆 BLPA	0	38.92±1.32a	0.63±0.07a	8±1a	20.30±1.20a	107.51±8.40a	0.19±0.02a	3.65±0.21a
	30	41.00±1.56a	0.51±0.03b	7±1a	13.59±0.89b	99.30±6.90a	0.14±0.01b	2.38±0.26b
	72	39.84±1.52a	0.36±0.01c	4±0b	5.41±0.78c	40.82±5.50b	0.13±0.01b	0.31±0.15c

注: Sr, 遮光率; Ph, 株高; Sd, 径粗; Bq, 侧枝数; FWU, 地下部鲜重; FEO, 地上部鲜重; R/S, 根/冠; Wr, 每盆根瘤重。
Note: Sr, shading rate; Ph, plant height; Sd, stem diameter; Bq, branching quantity; FWU, fresh weight underground; FWO, fresh weight over-ground; R/S, root-shoot ratio; Wr, fresg weight of root nodule per pot

表 4 遮阴对田间绿豆叶部性状和干物质积累的影响

Table 4 Effect of shading on leaves and dry matter accumulation of the *P. aureus* in the field experiment

品种 Variety	Sr/%	Leq	La/cm ²	Lt/mm	Lai	DM/kg·hm ⁻²	EDM/ kg·(hm ² ·d) ⁻¹
小槐花园叶 绿豆 SRRPA	0	73±6a	57.22±3.00b	0.37±0.02a	4.18±0.20a	2 050.32±85.12a	50.00±2.30a
	30	66±6a	67.33±3.31a	0.31±0.01b	4.44±0.23a	2 162.14±89.01a	50.30±2.11a
	72	38±3b	41.01±1.90c	0.25±0.02c	1.56±0.10b	1 344.23±54.23b	29.90±1.52b
大花叶子 绿豆 BLPA	0	88±5a	45.60±1.80b	0.36±0.03a	4.01±0.19a	2 039.34±92.05a	45.30±3.33a
	30	69±6b	49.93±1.21a	0.30±0.02b	3.44±0.15b	1 728.21±81.17b	36.00±2.81b
	72	35±4c	27.52±1.12c	0.28±0.02b	0.96±0.11c	740.09±49.23c	14.50±1.62c

注:Sr,遮光率;Leq,单株叶片数;La,叶片面积;Lt,叶片厚度;Lai,叶面积指数;DM,干物质产量;EDM,干物质积累效率。
Note: Sr, shading rate; Leq, leaf quantity; La, leaf area; Lt, leaf thickness; Lai, leaf area index; DM, dry matter yield; EDM, efficiency of dry matter accumulation.

子绿豆的干物质产量和干物质积累效率则分别比对照降低了 15%和 21%($P<0.05$),在遮光 72%时,两种绿豆的干物质产量和干物质积累效率均显著降低(表 4)。结果表明,遮阴对大花叶子绿豆营养生长的影响大于对小槐花园叶绿豆的,遮光 72%的影响大于遮光 30%的。

2.3 遮阴对绿豆生殖生长的影响

遮阴对绿豆的生殖生长有抑制作用,随着遮光率的增加,初花期显著推迟($P<0.05$),遮光 30%时两种绿豆分别推迟 2 和 3 d,遮光 72%时两种绿豆分别推迟 4 和 6 d(表 5);遮光使花期持续天数也显著缩短,遮光 30%时两种绿豆分别缩短 3 和 5 d,遮光 72%时分别缩短 6 和 8 d;遮光使其开花数、结荚数和荚长也显著减少,与对照相比,遮光 30%时两种绿豆开花数分别减少了 25%和 49%,结荚数减少了 26%和 53%,荚长减少了 11%和 21%,遮光 72%时减少更多;种子产量也因遮光而显著降低,遮光 30%时两种绿豆种子产量分别降低了 37%和 67%,遮光 72%时分别降低

了 76%和 88%;但全生育期和千粒重在遮阴后与对照相比差异不显著($P>0.05$)。

2.4 遮阴后绿豆的饲用营养价值变化

遮阴不利于绿豆的氮代谢,表现为根瘤鲜重显著减少($P<0.05$)(表 3),游离氨基酸和粗蛋白含量均显著下降(表 6)。遮光 30%时,两种绿豆的游离氨基酸含量较对照分别下降了 13%和 17%,遮光 72%时分别下降了 32%和 40%;遮光 30%时,两种绿豆的粗蛋白含量较对照分别显著下降了 10%和 16%,遮光 72%时下降更多。而碳代谢则随遮阴程度不同而异,两种绿豆的粗纤维和粗脂肪含量在遮光 30%时较对照降低不显著($P>0.05$),而遮光 72%时较对照显著减少了 20%多。蛋白质产量也因品种和遮光率不同而有不同程度的降低,遮光 30%时,小槐花园叶绿豆蛋白质产量较对照仅降低 2%($P>0.05$),而大花叶子绿豆则降低了 28%($P<0.05$);遮光 72%时,两种绿豆的蛋白质产量较对照分别降低了 46%和 74%($P<0.05$)(表 6)。

表 5 遮阴对田间绿豆生殖生长的影响

Table 5 Effect of shading on reproductive growth of the *P. aureus* in the field experiment

品种 Variety	Sr/%	Ef/d	Fc/d	Wg/d	Fp	Pp	Pl/cm	TW/g	Sy/kg·hm ⁻²
小槐花园叶 绿豆 SRRPA	0	41±0c	18±1a	64±1a	40±2a	38±2a	11.10±0.30a	35.32±1.49a	842.18±41.10a
	30	43±0b	15±1b	65±1a	30±2b	28±2b	9.93±0.51b	35.21±1.33a	532.23±22.21b
	72	45±0a	12±0c	65±1a	16±1c	13±1c	8.73±0.39c	34.93±1.72a	206.18±13.11c
大花叶子 绿豆 BLPA	0	45±0c	21±1a	71±1a	37±2a	34±2a	8.62±0.61a	44.61±1.89a	745.12±31.02a
	30	48±0b	16±1b	72±1a	19±1b	16±1b	6.81±0.40b	42.80±1.61a	244.35±20.07b
	72	51±1a	13±0c	72±1a	11±1c	8±1c	5.44±0.33c	43.53±1.12a	93.36±18.24c

注:Sr,遮光率;Ef,出苗—初花天数;Fc,花期持续天数;Wg,全生育期;Fp,每株开花数;Pp,每株荚数;Pl,荚长;TW,千粒重;Sy,种子产量。
Note: Sr, shading rate; Ef, emerging to first bloom; Fc, flowering continuously time; Wg, whole growth stage; Fp, flowers per plant; Pp, pods per plant; Pl, pod length; TW, thousand-grain weight; Sy, seed yield.

表 6 遮阴后田间绿豆鲜草的营养成分变化

Table 6 Content of nutritive components in fresh-grass of the *P. aureus* in the field experiment

品种 Variety	Sr/%	Water/%	Aa/%	Cp/%	Cf/%	EE/%	Ycp/kg·hm ⁻²
小槐花园叶绿豆 SRRPA	0	82.33±1.30a	1.66±0.11a	2.96±0.16a	3.91±0.22a	0.64±0.05a	342.77±18.10a
	30	82.92±1.41a	1.45±0.08b	2.65±0.11b	3.82±0.19a	0.63±0.04a	335.01±14.57a
	72	83.41±1.43a	1.13±0.05c	2.29±0.13c	2.93±0.18b	0.51±0.02b	185.39±16.33b
大花叶子绿豆 BLPA	0	82.82±1.33a	1.79±0.09a	3.15±0.12a	3.73±0.16a	0.65±0.04a	373.38±15.61a
	30	83.03±1.12a	1.48±0.07b	2.66±0.09b	3.56±0.13a	0.59±0.04a	270.37±11.32b
	72	83.11±1.20a	1.07±0.04c	2.25±0.10c	2.89±0.21b	0.49±0.03b	98.49±12.09c

注: Sr, 遮光率; W, 含水量; Aa, 游离氨基酸; Cp, 粗蛋白; Cf, 粗纤维; EE, 每株荚数; Ycp, 荚长。
Note: Sr, shading rate; W, water content; Aa, amino acid; Cp, crude protein; Cf, crude fiber; Cft, crude fat; Ycp, yield of crude protein.

3 讨论与结论

遮阴对绿豆光合作用的影响依品种和遮光率而不同,以 P_n 为例,小槐花园叶绿豆的 P_n 在遮光 30% 时与对照相比差异不显著(仅下降 0.1%)而在遮光 72% 时显著下降了 24.2%,大花叶子绿豆的 P_n 在遮光 30% 时显著降低了 23.9%,在遮光 72% 时显著降低了 57.8%,其它光合参数如 G_s 和 T_r 也有类似趋势。从光合酶(RuBPCase)活性上也能体现品种间的差异,小槐花园叶绿豆能在不同遮光率下维持 RuBPCase 活性的稳定,而大花叶子绿豆的 RuBPCase 活性在遮光 30% 和遮光 72% 时分别比对照显著降低了 21% 和 36%。表明遮阴对大花叶子绿豆光合作用的影响大于小槐花园叶绿豆的,遮光 72% 的影响大于遮光 30% 的,其中小槐花园叶绿豆在遮光 30% 条件下仍能维持光合效率稳定,但遮光 72% 对两种绿豆的光合作用均有显著的不良影响,资料显示,遮光 52% 对绿豆的光合作用也有显著不良影响^[9]。

不同遮阴强度对绿豆生长发育的影响不同,不同品种的反应也有差异。遮光 72% 时所有绿豆的根、茎、叶生长量均显著下降,而遮光 30% 则有利于绿豆地上部生长,表现为叶片显著变大,株高和鲜重显著增加(小槐花园叶绿豆)或差异不显著(大花叶子绿豆),但所有遮阴处理(包括遮光率 52% 的处理^[9])都不利

于绿豆地下部的生长,这导致遮阴后供试绿豆的根/冠比显著减小。这可能是因为绿豆在弱光下,由于蒸腾速率降低,根系吸收水分的压力减轻,在光合产物供应不足时,营养物质优先分配给地上部以保证茎叶的生长,这种变化与其它植物有类似的趋势^[4,7,9,28]。

遮阴不仅影响绿豆的营养生长,抑制生殖生长,降低种子产量,还改变植株的其它形态,茎粗变细,侧枝数减少,根瘤量减少,叶片变薄,叶片数减少等,这与其它资料一致^[4,7,9,28]。

豆科作物主要依靠根瘤固氮以提供氮源(一般占总氮量的 2/3 左右)^[29],而遮阴可使根瘤量减少^[9,28],其中遮光 72% 可使本研究的两种绿豆根瘤量减少 90% 以上,因而遮阴对绿豆氮代谢有显著不良影响,这是遮阴后两种绿豆植株氨基酸和粗蛋白含量显著降低的根本原因。大豆(*Glycine max*)也有类似现象^[30]。本研究中,遮阴对供试绿豆碳代谢的影响程度相对弱一些,其粗纤维和粗脂肪含量在遮光 30% 时降低不明显,仅在遮光 72% 时显著降低。

综上,30% 的遮阴对小槐花园叶绿豆的营养生长影响较小但对其生殖生长有显著抑制作用,72% 的遮阴不利于两种绿豆的光合作用和生长发育,小槐花园叶绿豆能在遮光 30% 条件下正常生长但在遮光 72% 时生长受阻,大花叶子绿豆不耐阴。因此,小槐花园叶绿豆可选择作为林果行间的套种作物。

参考文献 References:

[1] 牛丽芳,路铁刚,林浩.水稻高光效育种研究进展.生物技术进展,2014,4(3):153-157.
Niu L F,Lu T G,Lin H.Progress of high photosynthesis efficiency rice breeding.Current Biotechnology,2014,4(3):153-157.
(in Chinese)

[2] 张华,康雅茸,徐春华.兰州银滩黄河湿地 4 种植物的光合特性.草业科学,2016,33(4):622-634.
Zhang H,Kang Y R,Xu C H.Photosynthetic characteristics of 4 wild plants in Yintan wetland in Lanzhou section of Yellow

- River, Pratacultural Science, 2016, 33(4): 622-634. (in Chinese)
- [3] 王振华, 孙宏勇, 张喜英, 陈素英, 裴冬. 不同冬小麦品种光合作用对环境因子响应的初步研究. 华北农学报, 2007, 22(1): 9-12.
Wang Z H, Sun H Y, Zhang X Y, Chen S Y, Pei D. Response of photosynthesis of different winter wheat cultivars to environmental factors. Acta Agriculturae Boreali-sinica, 2007, 22(1): 9-12. (in Chinese)
- [4] 姜武, 姜卫兵, 李志国. 园艺作物光合性状种质差异及遗传表现研究进展. 经济林研究, 2007, 25(4): 102-108.
Jiang W, Jiang W B, Li Z G. Advance of researches on germplasm differences and genetic expression of photosynthetic traits in horticultural crops. Nonwood Forest Research, 2007, 25(4): 102-108. (in Chinese)
- [5] 崔海岩, 靳立斌, 李波, 赵斌, 董树亭, 刘鹏, 张吉旺. 大田遮阴对夏玉米光合特性和叶黄素循环的影响. 作物学报, 2013, 39(3): 478-485.
Cui H Y, Jin L B, Li B, Zhao B, Dong S T, Liu P, Zhang J W. Effects of shading on photosynthetic characteristics and xanthophyll cycle of summer maize in the field. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(3): 478-485. (in Chinese)
- [6] Thangaraj M, Sivasubramanian V. Effects of low light intensity on growth and productivity of irrigated rice (*Oryza sativa* L.). Journal Madras Agricultural Journal, 1990, 77(5-6): 220-224.
- [7] 陈煜, 杨志民, 李志华. 草坪草耐阴性研究进展. 中国草地学报, 2006, 28(3): 71-76.
Chen Y, Yang Z M, Li Z H. Review of studies on turfgrass shade-tolerance. Chinese Journal of Grassland, 2006, 28(3): 71-76. (in Chinese)
- [8] 张建新, 颜赞, 方炎明. 遮光对臭牡丹生长和光合特性的影响. 植物资源与环境学报, 2013, 22(1): 88-93.
Zhang J X, Yan Y, Fang Y M. Effect of shading on growth and photosynthetic characteristics of *Clerodendrum bungei*. Journal of Plant Resources and Environment, 2013, 22(1): 88-93. (in Chinese)
- [9] 邹长明, 王允青, 刘英, 张晓红, 唐杉. 四种豆科作物的光合生理和生长发育对弱光的响应. 植物生态学报, 2015, 39(9): 909-916.
Zou C M, Wang Y Q, Liu Y, Zhang X H, Tang S. Responses of photosynthesis and growth to weak light regime in four legume species. Chinese Journal of Plant Ecology, 2015, 39(9): 909-916. (in Chinese)
- [10] 德力格尔, 李媛媛, 张淑娟. 遮阴对成坪期草地早熟禾和紫羊茅生长特性的影响. 草业科学, 2015, 32(6): 886-892.
Deligeer, Li Y Y, Zhang S J. Effects of shading on growth characteristics of *Poa pratensis* and *Festuca rubra* during turf mature stage. Pratacultural Science, 2015, 32(6): 886-892. (in Chinese)
- [11] 张哲, 黄淑萍, 杜桂娟, 马凤江, 杨姝, 刘洋. 遮阴对4种豆科牧草光合特性的影响. 草业科学, 2013, 30(1): 44-51.
Zhang Z, Huang S P, Du G J, Ma F J, Yang S, Liu Y. Effects of shading on photosynthetic characteristics of four legums. Pratacultural Science, 2013, 30(1): 44-51. (in Chinese)
- [12] 张云, 夏国华, 马凯, 李根有, 代英超, 严彩霞. 遮阴对堇叶紫金牛光合特性和叶绿素荧光参数的影响. 应用生态学报, 2014, 25(7): 1940-1948.
Zhang Y, Xia G H, Ma K, Li G Y, Dai Y C, Yan C X. Effects of shade on photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence of *Ardisia violacea*. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(7): 1940-1948. (in Chinese)
- [13] Bloorj M G, Grubb P J. Growth and mortality in high and low light: Trends among 15 shade-tolerant tropical rain forest tree species. Journal of Ecology, 2003, 91: 77-85.
- [14] Lusk C H, Pozo A D. Survival and growth of seedlings of 12 chilean rainforest trees in two light environments: Gas exchange and biomass distribution correlates. Austral Ecology, 2002, 27: 173-182.
- [15] 李伟. 几种杂粮的药用及保健作用探析. 现代农业科技, 2015(1): 88, 90.
Li W. Study on medicinal and health function of several cereals. Modern Agricultural Science and Technology, 2015(1): 88, 90. (in Chinese)
- [16] 马秀杰. 间作对绿豆生物性状、产量和品质的影响. 核农学报, 2014, 28(3): 0546-0551.
Ma X J. Effects of intercropping on biological features, yield and qualities of mungbean. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2014, 28(3): 0546-0551. (in Chinese)
- [17] 邹长明, 王允青, 刘英, 张晓红, 唐杉. 肥饲兼用型绿豆品种的引种栽培与评价. 湖南农业大学学报: 自然科学版, 2014, 40(4): 344-348.
Zou C M, Wang Y Q, Liu Y, Zhang X H, Tang S. Introduction and evaluation of mungbean varieties used for green manure and feed. Journal of Hunan Agricultural University: Natural Sciences, 2014, 40(4): 344-348. (in Chinese)

- [18] 司鹏,乔宪生,黄显淦.18 种果园常用豆科绿肥作物微量元素含量分析.中国农学通报,2012,28(4):157-162.
Si P, Qiao X S, Huang X G. The analysis of trace elements content among 18 kinds common leguminous green manure of orchard. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(4): 157-162. (in Chinese)
- [19] 邹长明,刘英,杨杰,王允青,张晓红,唐杉,蔡华斌.豆科绿肥品种养分富集能力比较研究.作物杂志,2013,107(3):75-79.
Zou C M, Liu Y, Yang J, Wang Y Q, Zhang X H, Tang S, Cai H B. Comparison of leguminous green manure crops varieties on capacity of accumulating nutrients. Crops, 2013, 107(3): 75-79. (in Chinese)
- [20] 王兰芬,武晶,景蕊莲,程须珍,王述民.绿豆种质资源苗期抗旱性鉴定.作物学报,2015,41(1):145-153.
Wang L F, Wu J, Jing R L, Cheng X Z, Wang S M. Drought resistance identification of mungbean germplasm resources at seedlings stage. Acta Agronomica Sinica, 2015, 41(1): 145-153. (in Chinese)
- [21] 张蕙杰,郭永田,周俊玲,王述民,程须珍.近年绿豆价格波动的成因分析.农业经济问题,2012(4):30-34.
Zhang H J, Guo Y T, Zhou J L, Wang S M, Cheng X Z. Analysis on the cause of price fluctuation of mung bean in recent years. Agricultural Economic Question, 2012(4): 30-34. (in Chinese)
- [22] 张翠萍,孟平,张劲松,万贤崇.间作绿豆对核桃苗光合特性及根系导水力的作用.林业科学研究,2016,29(1):110-116.
Zhang C P, Meng P, Zhang J S, Wan X C. Effects of intercropped *Vigna radiata* on root hydraulic conductance and photosynthetic characteristics of *Juglans regia* seedlings. Forest Research, 2016, 29(1): 110-116. (in Chinese)
- [23] 罗高玲,蔡庆生,陈燕华,李经成.甘蔗、柑橘间套种绿豆品种筛选试验.南方农业学报,2013,44(10):1638-1641.
Luo G L, Cai Q S, Chen Y H, Li J C. Screening experiment of mung bean varieties for intercropping with sugarcane and citrus. Journal of Southern Agriculture, 2013, 44(10): 1638-1641. (in Chinese)
- [24] 智健飞,刘忠宽,曹卫东,秦文利,刘振宇.棉花-绿豆合理间作模式与效益研究.河北农业科学,2010,14(9):12-13,16.
Zhi J F, Liu Z K, Cao W D, Qin W L, Liu Z Y. Study on the rational intercropping pattern and economic benefit of cotton and mungbean. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2010, 14(9): 12-13, 16. (in Chinese)
- [25] 曹卫东.绿肥种质资源描述规范和数据标准.北京:中国农业出版社,2007:12-18.
Cao W D. Description and Data Standard of Green Manure Crops Germplasm Resources. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2007: 12-18. (in Chinese)
- [26] 王学奎.植物生理生化实验原理和技术,北京:高等教育出版社,2006:134-139,195-201.
Wang X K. Principles and Techniques of Plant Physiological Biochemical Experiment, Beijing: Higher Education Press, 2006, 134-139, 195-201. (in Chinese)
- [27] 鲍士旦.土壤农化分析.北京:中国农业出版社,2004:264-351.
Bao S D. Soil and Agricultural Chemistry Analysis. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2004: 264-351. (in Chinese)
- [28] 邹长明,王允青,曹卫东,刘英,张晓红,唐杉.不同品种小豆光合作用和生长发育对弱光的响应.应用生态学报,2015,26(12):3687-3692.
Zou C M, Wang Y Q, Cao W D, Liu Y, Zhang X H, Tang S. Response of photosynthesis and growth to weak light regime in different adzuki bean (*Vigna angularis*) varieties. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(12): 3687-3692. (in Chinese)
- [29] 金喜军,马春梅,龚振平,姚玉波,邸伟.大豆鼓粒期对肥料氮的吸收与分配研究.植物营养与肥料学报,2010,16(2):395-399.
Jin X J, Ma C M, Gong Z P, Yao Y B, Di W. Study on fertilizer-N absorption and distribution of soybean [*Glycine max* (L.)] during the seed-filling period. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(2): 395-399. (in Chinese)
- [30] 刘兵,王程,金剑,刘居东,张秋英,刘晓冰,Herbert S J.生殖生长期光富集和遮阴对大豆干物质分配及产量品质的影响.干旱地区农业研究,2009,27(2):103-107.
Liu B, Wang C, Jin J, Liu J D, Zhang Q Y, Liu X B, Herbert S J. Effect of light enrichment and shading during reproductive stage on dry matter distribution, yield and quality of soybean. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(2): 103-107. (in Chinese)

(责任编辑 苟燕妮)