

张文慧, 刘小刚, 王露, 等. 不同遮光和施氮水平对小粒咖啡生长和光合特性的影响[J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(1): 32-39.  
ZHANG Wenhui, LIU Xiaogang, WANG Lu, et al. Effects of shading and nitrogen application levels on growth and photosynthesis characteristics of *Coffea arabica*[J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(1): 32-39.

# 不同遮光和施氮水平对小粒咖啡 生长和光合特性的影响

张文慧, 刘小刚, 王露, 李义林, 丛岩, 杨启良, 隋龙  
(昆明理工大学现代农业工程学院, 云南昆明 650500)

**摘要:**【目的】探明小粒咖啡 *Coffea arabica* 幼树最佳的光照和施氮耦合模式。【方法】试验设置 3 个遮光水平: 不遮光 ( $S_0$ , 自然光照)、轻度遮光 ( $S_1$ , 65% 自然光照)、重度遮光 ( $S_2$ , 30% 自然光照), 3 个施氮水平: 无氮 ( $N_0$ ,  $0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )、中氮 ( $N_1$ ,  $0.20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )、高氮 ( $N_2$ ,  $0.40\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), 研究不同遮光和施氮水平对小粒咖啡生长、日均光合特性和生物量累积的影响。【结果】随遮光度的增加叶绿素总量呈上升趋势。与  $S_0$  处理相比,  $S_1$  处理小粒咖啡叶片净光合速率、气孔导度、表观光能利用效率和总生物量分别提高 13.54%、18.54%、127.77% 和 12.41%;  $S_2$  处理总生物量减少 11.55%。与  $N_0$  处理相比,  $N_1$  处理叶片净光合速率、气孔导度、表观光能利用效率和总生物量分别增加 27.25%、20.77%、10.80% 和 18.47%,  $N_2$  处理的上述性状分别增加 14.85%、25.99%、41.65% 和 21.02%。与  $S_0N_0$  相比, 随遮光度和施氮量的增加叶片蒸腾速率和表观光能利用效率增大, 叶片水分利用效率呈先增后减趋势。【结论】小粒咖啡最优的遮光和施氮耦合模式为轻度遮光下高氮组合 ( $S_1N_2$ ), 该组合有利于获得较高的叶片水光利用效率和生物量。

**关键词:** 小粒咖啡; 遮光; 氮肥; 光合特性; 生物量

中图分类号: S571.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2019)01-0032-08

## Effects of shading and nitrogen application levels on growth and photosynthesis characteristics of *Coffea arabica*

ZHANG Wenhui, LIU Xiaogang, WANG Lu, LI Yilin, CONG Yan, YANG Qiliang, SUI Long

(Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

**Abstract:** 【Objective】To explore the optimal coupled management mode of light intensity and nitrogen application for *Coffea arabica* seedlings. 【Method】We set three shading levels: No shade ( $S_0$ , natural light), light shade ( $S_1$ , 65% natural light) and severe shade ( $S_2$ , 30% natural light), and three nitrogen levels: No nitrogen ( $N_0$ ,  $0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), medium nitrogen ( $N_1$ ,  $0.20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), high nitrogen ( $N_2$ ,  $0.40\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). The effects of shading and nitrogen levels on growth, daily photosynthetic characteristics and biomass accumulation of *C. arabica* seedlings were studied.

【Result】With the increase of shading degree, the total chlorophyll content increased. Compared with  $S_0$  treatment, the net photosynthetic rate, stomatal conductance, light radiation use efficiency and total biomass of *C. arabica* in  $S_1$  treatment increased by 13.54%, 18.54%, 127.77% and 12.41%, respectively. The total biomass decreased by 11.55% in  $S_2$  treatment. Compared with  $N_0$  treatment, the net photosynthetic rate, stomatal conductance, light radiation use efficiency and total biomass of *C. arabica* in  $N_1$  treatment increased by 27.25%,

收稿日期: 2018-05-03 网络首发时间: 2018-12-28 14:39:00

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.s.20181227.1104.026.html>

作者简介: 张文慧 (1992—), 女, 硕士研究生, E-mail: [amo\\_wenhui@126.com](mailto:amo_wenhui@126.com); 通信作者: 刘小刚 (1977—), 男, 教授, 博士, E-mail: [liuxiaogangjy@126.com](mailto:liuxiaogangjy@126.com)

基金项目: 国家自然科学基金 (51469010, 51769010, 51109102); 云南省应用基础研究项目 (2014FB130); 大学生创新创业训练计划项目 (201710674039)

20.77%, 10.80% and 18.47%, respectively, and these traits in  $N_2$  treatment increased by 14.85%, 25.99%, 41.65% and 21.02%, respectively. Compared with  $S_0N_0$ , with the increases of shading and nitrogen levels, leaf transpiration rate and light radiation use efficiency increased, leaf water use efficiency firstly increased and then decreased. 【Conclusion】 The optimal mode of light and nitrogen management of *C. arabica* is the combination of light shade and high nitrogen ( $S_1N_2$ ). This mode is suitable for obtaining high leaf water-radiation use efficiency and biomass.

**Key words:** *Coffea arabica*; shading; nitrogen; photosynthetic characteristic; biomass

小粒咖啡 *Coffea arabica* 性喜温凉、静风、荫蔽或半荫蔽的环境, 适度遮光可为咖啡提供良好的生长发育环境<sup>[1]</sup>。遮荫增大咖啡叶片气孔导度和水势, 降低叶片光合速率、蒸腾速率不显著。增加荫蔽会使光合速率日变化曲线由双峰变为单峰<sup>[2]</sup>, 从而降低气孔导度对净光合速率的抑制<sup>[3]</sup>。不同荫蔽下咖啡叶片形态解剖可塑性较高, 叶片光合特性基本一致<sup>[4]</sup>。遮光处理减小咖啡叶片面积和厚度, 增加枝条长度<sup>[5]</sup>。另有研究表明, 荫蔽栽培增加咖啡叶绿素含量, 降低抗坏血酸累积和叶片的表型可塑性, 而不显著影响主要抗氧化酶和丙二醛含量<sup>[6]</sup>。

氮素是植物体最重要的结构物质, 也是植物体内蛋白质、核酸、酶、叶绿素以及许多内源激素及其前体物质的组成部分, 因此氮素对植物生理代谢和生长发育有重要作用<sup>[7]</sup>。合理施氮有利于提高叶片气孔导度, 加快  $CO_2$  供应速度, 进而提高光合速率<sup>[8-9]</sup>。合理施氮还可提高小粒咖啡的株高、茎粗、枝条、新梢和叶片数量及氮肥偏生产力<sup>[10-12]</sup>, 氮亏缺则会严重影响小粒咖啡生长, 显著降低其光合特性和干物质累积<sup>[13]</sup>。目前, 不同光照条件下氮肥对咖啡光合生长及表观光能利用效率等方面影响的报道还较少。

遮光改变咖啡生长的微气候环境, 进而改变咖啡的光合特性和水光利用效率, 而合理施氮能促进咖啡生理生长和生物量的累积。不同遮光条件下施氮如何改变小粒咖啡叶绿素含量、光合特性、水光利用效率和生物量累积尚不清楚。因此, 本文研究不同遮光和施氮水平对小粒咖啡光合特性、生长和生物量累积的影响, 以期找到小粒咖啡适宜的施氮和遮光耦合模式, 为合理施氮和光照管理提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验于 2014 年 4 月—2015 年 7 月在昆明理工大学现代农业工程学院温室 ( $E102^{\circ}45'$ ,  $N24^{\circ}42'$ ) 内开展。2014 年 4 月 11 日移栽 1 年生且长势一致

的小粒咖啡幼树 ‘Catimor P796’ 到生长盆 (上底直径 30.0 cm, 下底直径 22.5 cm, 高 30.0 cm) 中, 下底均匀分布 5 个直径为 0.5 cm 的小孔保证根区通气良好。供试土壤为老冲积母质发育的红褐土, 田间持水量 24.3%, 土壤粒径 0~0.02 mm 的颗粒占 7.9%, 0.02~0.10 mm 的占 32.3%, 0.10~0.25 mm 的占 45.3%, 0.25~1.00 mm 的占 13.5%。土壤有机质、全氮、全磷和全钾质量分数分别为 5.05、0.87、0.68 和 13.90  $g \cdot kg^{-1}$ 。每盆装风干土 14 kg, 容重 1.20  $g \cdot cm^{-3}$ 。土壤表面覆盖厚蛭石避免土壤发生板结, 厚度约 0.5 cm。

### 1.2 试验设计

试验设遮光和氮肥双因素, 完全区组设计, 共 9 个处理, 每个处理 3 次重复。3 个遮光水平 ( $S$ ) 分别为不遮光 ( $S_0$ , 自然光照, 对照)、轻度遮光 ( $S_1$ , 65% 自然光照)、重度遮光 ( $S_2$ , 30% 自然光照); 3 个施氮水平 ( $N$ ) 分别为无氮 ( $N_0$ )、中氮 ( $N_1$ , 每千克干土中添加 0.40 g 氮肥)、高氮 ( $N_2$ , 每千克干土中添加 0.60 g 氮肥)。氮肥选用尿素 (含质量分数为 46.4% 的氮), 每千克干土中施  $KH_2PO_4$  (含质量分数为 52% 的  $P_2O_5$  和 34% 的  $K_2O$ ) 0.50 g。施肥方式为随水灌入, 称量法控制灌水量, 在咖啡幼树移栽 54 d 后开始试验处理, 灌水周期为 7 d, 灌水上限为 85% 的田间持水量。通过不同密度的黑色遮荫网实现遮光, 遮荫网与小粒咖啡树冠始终保持 2 m 的距离, 便于通风和取样观测。

### 1.3 测定项目与方法

在咖啡幼树旺长期 (2015 年 6 月 25 日), 于 08:00—18:00 用便携式光合仪 Li-6400 测定树顶靠下功能叶的净光合速率 ( $P_n$ )、气孔导度 ( $G_s$ ) 和蒸腾速率 ( $Tr$ ) 等光合特性指标, 每隔 2 h 测定 1 次, 每个重复测定 3 次, 取平均值进行分析。叶片瞬时水分利用效率 (Leaf water use efficiency, LWUE) 为净光合速率与蒸腾速率的比值, 表观光能利用效率 (Light radiation use efficiency, LRUE) 为净光合速率与光合有效辐射的比值<sup>[2]</sup>。叶绿素含量测定采用 95% ( $\varphi$ ) 乙醇提取比色法<sup>[14]</sup>。

试验结束时 (2015 年 7 月 25 日) 测定小粒咖啡各生长指标及单株生物量。株高、新枝长度采用毫米刻度尺测量, 茎粗采用游标卡尺测量。根系取样时, 将栽植容器放在尼龙网筛上用水冲去泥土, 获得整体根系, 再用流水将根系缓冲洗干净, 冲洗时在根系下面放置 100 目筛以防止脱落的根系被水冲走, 同时用滤纸和吸水纸擦干根系上的水分测其鲜质量。鲜样 105 °C 条件下杀青 30 min, 然后于 80 °C 干燥至恒质量, 用天平称其干质量 (以每株为单位测量)。根冠比为根系与冠层生物量的比值。

#### 1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2013 处理数据和制图, 试验数据用平均值±标准误表示, 用 SPSS 21.0 进行方差分析和多重比较, 多重比较采用 Duncan's 法。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同遮光水平下施氮处理对小粒咖啡叶绿素含量的影响

遮光和施氮对小粒咖啡叶片叶绿素 a、b 含量以及叶绿素总量影响显著, 施氮对类胡萝卜素含量影响显著, 二者的交互作用对叶绿素 a 含量和叶绿素总量影响显著 (表 1)。与 S<sub>0</sub> 处理相比, S<sub>1</sub> 和 S<sub>2</sub> 处理的叶绿素 a 增加 55.75% 和 78.06%, 叶绿素

b 增加 41.44% 和 74.16%, 叶绿素总量增加 51.07% 和 76.78%, 而类胡萝卜素呈先增后减的趋势; 与 N<sub>0</sub> 相比, N<sub>1</sub> 和 N<sub>2</sub> 处理的叶绿素 a 增加 19.07% 和 31.58%、叶绿素 b 增加 25.75% 和 63.09%, 叶绿素总量增加 1.06% 和 44.25%, 类胡萝卜素增加 110.10% 和 199.56%。与 S<sub>0</sub>N<sub>0</sub> 相比, S<sub>1</sub>N<sub>2</sub> 的类胡萝卜素含量最大, 同时叶绿素含量也较大。

### 2.2 不同遮光水平下施氮处理对小粒咖啡叶片光合特性的影响

2.2.1 净光合速率 由图 1 可知, 不同遮光和施氮水平处理下小粒咖啡叶片净光合速率 (Pn) 日变化基本呈“双峰曲线”, 峰值分别出现在 10:00 和 14:00。遮光和施氮及其交互作用对日均 Pn 影响显著。与 S<sub>0</sub> 处理相比, S<sub>1</sub> 和 S<sub>2</sub> 处理的日均 Pn 分别提高 13.54% 和 6.02%。与 N<sub>0</sub> 处理相比, N<sub>1</sub> 和 N<sub>2</sub> 处理的日均 Pn 分别增加 27.25% 和 14.85%。与 S<sub>0</sub>N<sub>0</sub> 相比, S<sub>2</sub>N<sub>2</sub>、S<sub>2</sub>N<sub>1</sub>、S<sub>1</sub>N<sub>2</sub> 和 S<sub>1</sub>N<sub>1</sub> 的日均 Pn 分别增加 21.23%、31.73%、40.05% 和 42.72%。

2.2.2 蒸腾速率 不同遮光和施氮水平处理下小粒咖啡叶片蒸腾速率 (Tr) 的日变化曲线和 Pn 相似, 呈“双峰曲线”, 均在 12:00 和 16:00 取得峰值 (图 2)。施氮及两者交互作用对日均 Tr 影响显著。与 S<sub>0</sub> 处理相比, S<sub>1</sub> 和 S<sub>2</sub> 处理的日均 Tr 分别增加

表 1 遮光和施氮处理下小粒咖啡叶绿素含量<sup>1)</sup>

Table 1 Chlorophyll content of *Coffea arabica* under different shading and nitrogen levels

遮光水平(S) Shading level	施氮水平(N) Nitrogen level	w/(mg·g <sup>-1</sup> )			
		叶绿素a Chlorophyll a	叶绿素b Chlorophyll b	总叶绿素 Total chlorophyll	类胡萝卜素 Carotenoid
S <sub>0</sub>	N <sub>0</sub>	7.09±0.66f	3.20±0.48e	10.29±1.14g	1.81±0.39cde
	N <sub>1</sub>	10.65±1.17e	5.06±0.97d	15.71±2.14f	2.08±0.22cd
	N <sub>2</sub>	15.55±0.70d	7.94±1.48bc	23.49±0.78de	3.27±0.53ab
	$\bar{x}$	11.07	5.40	16.50	2.39
S <sub>1</sub>	N <sub>0</sub>	15.20±0.44d	6.31±0.54cd	21.51±0.98e	1.37±0.30de
	N <sub>1</sub>	17.84±0.95c	7.66±0.82bc	25.50±0.13cd	2.79±0.49abc
	N <sub>2</sub>	18.81±0.39bc	8.94±0.36b	27.75±0.75bc	3.73±0.21a
	$\bar{x}$	17.28	7.64	24.92	2.63
S <sub>2</sub>	N <sub>0</sub>	18.36±0.70bc	7.80±0.38bc	26.16±1.08c	0.82±0.21e
	N <sub>1</sub>	19.91±1.22ab	9.05±0.72b	28.96±0.50b	2.38±0.42bcd
	N <sub>2</sub>	21.01±0.85a	11.36±0.81a	32.37±1.66a	3.53±0.91a
	$\bar{x}$	19.76	9.40	29.16	2.24
P	S	<0.001	<0.001	<0.001	0.378
	N	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	S×N	0.006	0.463	0.010	0.248

1) 同列数据后不同小写字母表示差异显著 (P<0.05, Duncan's 法)

1) Different lowercase letters in the same column indicated significant difference (P<0.05, Duncan's test)

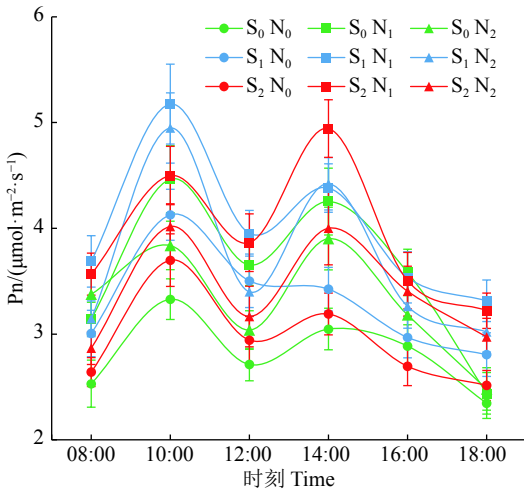


图 1 不同遮光和施氮处理下小粒咖啡净光合速率 (Pn) 日变化

Fig. 1 Daily changes of net photosynthesis rate (Pn) of *Coffea arabica* under different shading and nitrogen levels

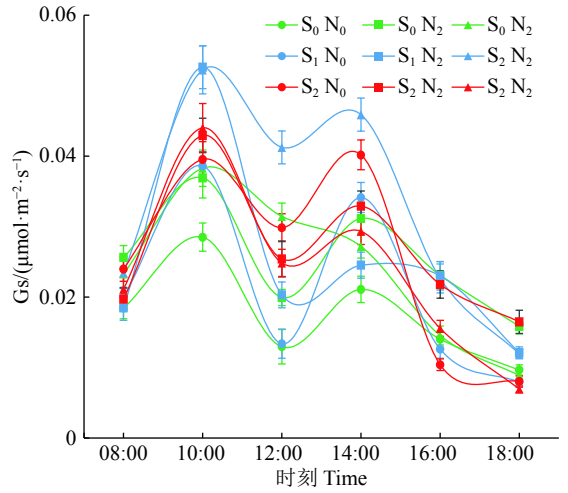


图 3 不同遮光和施氮处理下小粒咖啡气孔导度 (Gs) 日变化

Fig. 3 Daily changes of stomatal conductance (Gs) of *Coffea arabica* under different shading and nitrogen levels

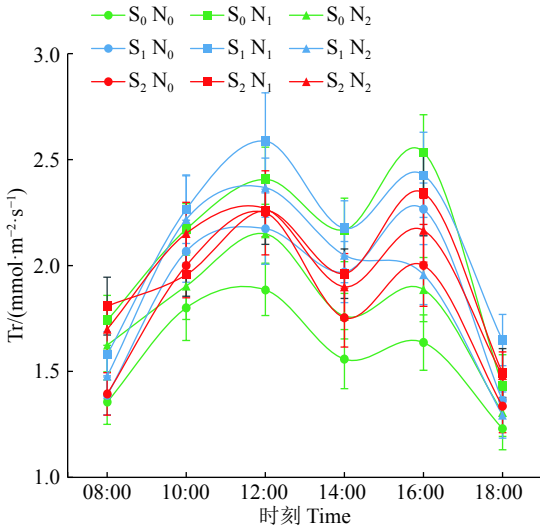


图 2 不同遮光和施氮处理下小粒咖啡蒸腾速率 (Tr) 日变化

Fig. 2 Daily changes of transpiration rate (Tr) of *Coffea arabica* under different shading and nitrogen levels

9.13% 和 5.12%。与 N<sub>0</sub> 处理相比, N<sub>1</sub> 和 N<sub>2</sub> 处理的日均 Tr 分别增加 17.62% 和 7.92%。S<sub>1</sub>N<sub>1</sub> 的日均 Tr 最大, 比 S<sub>0</sub>N<sub>0</sub> 增加 34.00%。

2.2.3 气孔导度 各处理叶片气孔导度 (Gs) 日变化呈“双峰曲线”(图 3), 遮光和施氮的交互作用对日均 Gs 影响显著。与 Pn、Tr 相似, Gs 于 10:00 和 14:00 达到峰值。与 S<sub>0</sub> 处理相比, S<sub>1</sub> 和 S<sub>2</sub> 处理的日均 Gs 分别增加 18.54 % 和 13.04%; 与 N<sub>0</sub> 处理相比, N<sub>1</sub> 和 N<sub>2</sub> 处理的日均 Gs 分别增加 20.77% 和 25.99%。S<sub>1</sub>N<sub>2</sub> 的日均 Gs 最大, 比 S<sub>0</sub>N<sub>0</sub> 增加 88.65%。

2.2.4 叶片瞬时水分利用效率 施氮对 08:00 的小粒咖啡叶片瞬时水分利用效率 (LWUE) 影响显著, 遮光及两者交互作用对 14:00 的叶片瞬时水分利用效率影响显著 (图 4)。轻度遮光处理和施氮处理使小粒咖啡叶片瞬时水分利用效率增加。与 S<sub>0</sub> 处理相比, S<sub>1</sub> 和 S<sub>2</sub> 处理的 LWUE 分别提高了 6.52% 和 0.43%。与 N<sub>0</sub> 处理相比, N<sub>1</sub> 和 N<sub>2</sub> 处理的 LWUE 分别提高了 7.35% 和 7.16%。S<sub>1</sub>N<sub>2</sub> 处理 LWUE 最大, 在 10:00 和 14:00 时与 S<sub>0</sub>N<sub>0</sub> 相比 LWUE 分别提高 18.89% 和 28.85%。这说明施氮配合适度遮光有利于 LWUE 的增加, 但过量遮光则使 LWUE 有所降低。

2.2.5 叶片表观光能利用效率 施氮对小粒咖啡叶片表观光能利用效率 (LRUE) 的影响显著 (图 5)。与 S<sub>0</sub> 处理相比, S<sub>1</sub> 和 S<sub>2</sub> 处理的 LRUE 分别增大 127.77% 和 260.50%。与 N<sub>0</sub> 处理相比, N<sub>1</sub> 和 N<sub>2</sub> 处

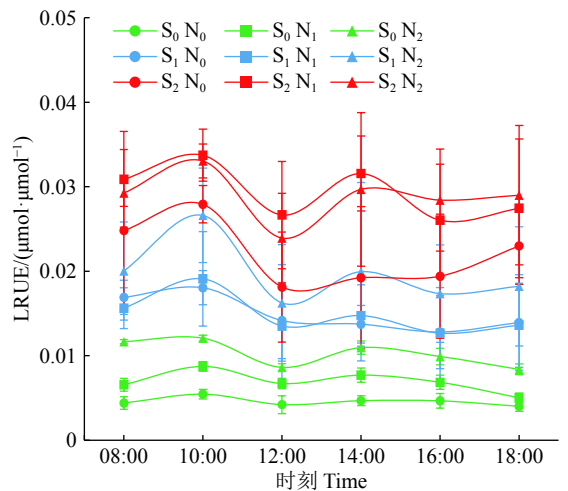


图 4 不同遮光和施氮处理下小粒咖啡叶片瞬时水分利用效率 (LWUE)

Fig. 4 Leaf water use efficiency (LWUE) of *Coffea arabica* under different shading and nitrogen levels

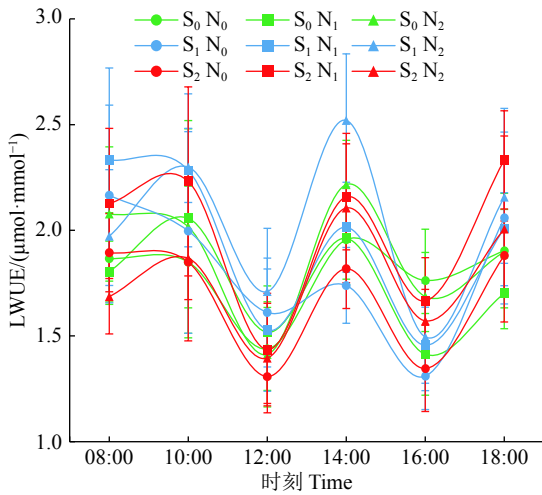


图 5 不同遮光和施氮处理下小粒咖啡叶片表观光能利用效率 (LRUE)

Fig. 5 Light radiation use efficiency (LRUE) of *Coffea arabica* leaf under different shading and nitrogen levels

理的日均 LRUE 分别增加 10.80% 和 41.65%。与  $S_0N_0$  相比,  $S_2N_2$ 、 $S_2N_1$ 、 $S_2N_0$ 、 $S_1N_2$  和  $S_1N_1$  和日均 LRUE 分别提高 533.70%、544.56%、384.46%、322.82% 和 226.32%。

### 2.3 不同遮光水平下施氮处理对小粒咖啡生长特性的影响

遮光对小粒咖啡株高、茎粗、冠幅和叶片数影

响显著, 施氮对株高、茎粗、冠幅、叶片数和新枝长度影响显著 (表 2)。与  $S_0$  相比, 其余处理株高和茎粗分别增加 18.14%~23.37%、18.75%~35.60%,  $S_1$  处理新枝长度和枝条数分别增加 9.60% 和 9.86%,  $S_2$  处理冠幅增加 24.06%; 与  $N_0$  相比, 其余处理叶片数、新枝长度和枝条数分别增加 5.14%~5.54%、10.16%~13.05% 和 5.71%~12.86%,  $N_2$  处理株高、茎粗和冠幅分别增加 8.80%、15.94% 和 10.20%。与  $S_0N_0$  相比,  $S_2N_2$ 、 $S_1N_2$ 、 $S_2N_1$  和  $S_2N_0$  株高增加 34.67%~26.72%;  $S_1N_2$ 、 $S_1N_1$ 、 $S_2N_2$  和  $S_1N_0$  茎粗增加 51.85%~31.03%;  $S_2N_2$ 、 $S_2N_1$ 、 $S_1N_2$  和  $S_2N_0$  冠幅增加 9.50%~30.58%,  $S_1N_0$  和  $S_0N_1$  冠幅减小 5.79% 和 8.26%;  $S_2N_2$ 、 $S_1N_2$ 、 $S_2N_1$  和  $S_1N_1$  叶片数增加 18.94%~28.24%,  $S_1N_1$ 、 $S_1N_2$ 、 $S_2N_2$  和  $S_2N_1$  新枝长度增加 13.87%~24.90%;  $S_2N_2$ 、 $S_1N_1$ 、 $S_1N_2$  和  $S_0N_2$  枝条数增加 13.64%~22.73%。

### 2.4 不同遮光水平下施氮处理对小粒咖啡生物量的影响

遮光对小粒咖啡株高、茎粗、冠幅和叶片数影响极显著, 施氮对株高、茎粗、冠幅和叶片数影响极显著, 对新枝长度影响显著 (表 2)。与  $S_0$  处理相比,  $S_1$  处理株高、茎粗、新枝长度和枝条数分别增加 18.14%、35.60%、9.60% 和 9.86%,  $S_2$  处理株高、

表 2 不同遮光和施氮处理下小粒咖啡生长<sup>1)</sup>

Table 2 *Coffea arabica* growth under different shading and nitrogen levels

遮光水平(S)	施氮水平(N)	株高/cm	茎粗/mm	冠幅/cm	叶片数	枝条数	新枝长度/cm
Shading level	Nitrogen level	Plant height	Stem diameter	Crown width	Leaf number	Branch number	Shoot length
$S_0$	$N_0$	55.95±1.91f	9.61±1.00de	60.50±3.54cde	301±15.56e	22±2.83a	14.48±0.74c
	$N_1$	58.05±2.90e	9.29±0.11e	55.50±2.83e	324±5.66de	23±1.41a	17.05±1.34ab
	$N_2$	62.95±1.48d	10.81±0.58de	62.75±1.06cd	345±16.97bcd	26±4.24a	15.54±0.65abc
	$\bar{x}$	58.98	9.90	59.71	323	24	15.69
$S_1$	$N_0$	66.90±2.69c	12.59±0.71bc	57.00±1.41de	338±14.14cd	25±2.83a	15.85±0.73abc
	$N_1$	69.65±1.20bc	13.11±0.35ab	64.00±0.71c	358±15.56abc	27±1.41a	18.08±1.17a
	$N_2$	72.50±3.54b	14.59±0.26a	66.25±3.18bc	376±16.97ab	26±2.83a	17.66±1.83ab
	$\bar{x}$	69.68	13.43	62.33	357	26	17.20
$S_2$	$N_0$	70.90±1.27b	10.97±0.74cde	71.25±6.01b	349±7.07bcd	23±1.41a	15.33±0.94bc
	$N_1$	72.05±1.34b	11.26±1.28cd	71.50±0.71b	364±8.49abc	24±1.41a	16.48±0.73abc
	$N_2$	75.35±1.63a	13.05±0.38ab	79.00±2.12a	386±9.90a	27±1.41a	17.10±0.19ab
	$\bar{x}$	72.77	11.76	73.92	366.33	24.67	16.30
P	S	<0.001	<0.001	<0.001	0.001	0.290	0.086
	N	<0.001	0.003	<0.001	0.002	0.151	0.020
	S×N	0.448	0.864	0.077	0.990	0.737	0.681

1) 同列数据后不同小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ , Duncan's 法)

1) Different lowercase letters in the same column indicated significant difference ( $P<0.05$ , Duncan's test)

茎粗和冠幅分别增加 23.37%、18.75% 和 24.06%; 与 N<sub>0</sub> 处理相比, N<sub>1</sub> 处理叶片数、新枝长度和枝条数分别增加 5.54%、13.05% 和 5.71%, N<sub>2</sub> 处理株高、茎粗、冠幅、叶片数、新枝长度和枝条数分别增加 8.80%、15.94%、10.20%、5.14%、10.16% 和 12.86%。与 S<sub>0</sub>N<sub>0</sub> 相比, S<sub>2</sub>N<sub>2</sub>、S<sub>1</sub>N<sub>2</sub>、S<sub>2</sub>N<sub>1</sub> 和 S<sub>2</sub>N<sub>0</sub> 株高增加 34.67%~26.72%; S<sub>1</sub>N<sub>2</sub>、S<sub>1</sub>N<sub>1</sub>、S<sub>2</sub>N<sub>2</sub> 和 S<sub>1</sub>N<sub>0</sub> 茎粗增加 51.85%~31.03%; S<sub>2</sub>N<sub>2</sub>、S<sub>2</sub>N<sub>1</sub>、S<sub>2</sub>N<sub>0</sub> 和 S<sub>1</sub>N<sub>2</sub> 冠幅增加 9.50%~30.58%, S<sub>1</sub>N<sub>0</sub> 和 S<sub>0</sub>N<sub>1</sub> 冠幅减小 5.79% 和 8.26%; S<sub>2</sub>N<sub>2</sub>、S<sub>1</sub>N<sub>2</sub>、S<sub>2</sub>N<sub>1</sub> 和 S<sub>1</sub>N<sub>1</sub> 叶片数增加 18.94%~28.24%, S<sub>1</sub>N<sub>1</sub>、S<sub>1</sub>N<sub>2</sub>、S<sub>2</sub>N<sub>2</sub> 和 S<sub>0</sub>N<sub>1</sub> 新枝长度增加 17.75%~24.90%; S<sub>2</sub>N<sub>2</sub>、S<sub>1</sub>N<sub>1</sub>、S<sub>1</sub>N<sub>2</sub> 和 S<sub>0</sub>N<sub>2</sub> 枝条数增加 13.64%~22.73%。

### 2.5 不同遮光水平下施氮处理对小粒咖啡单株生物量的影响

除遮光对根冠比、两者交互作用对茎和杆单株生物量影响不显著外, 遮光、施氮及其交互作用对其余各器官生物量及根冠比影响显著 (表 3)。与

S<sub>0</sub> 处理相比, S<sub>1</sub> 和 S<sub>2</sub> 处理的根冠比增加 5.26% 和 5.11%, S<sub>2</sub> 处理各器官生物量减少 7.79%~17.04%, 总生物量减少 11.55%, S<sub>1</sub> 处理各器官生物量增加 8.12%~17.34%, 总生物量增加 12.41%。与 N<sub>0</sub> 处理相比, N<sub>1</sub> 处理各器官生物量增加 8.69%~30.16%, 总生物量增加 18.47%, N<sub>2</sub> 处理 N<sub>2</sub> 处理 14.51%~25.79%, 总生物量增加 21.02%, N<sub>2</sub> 处理根冠比增加 8.16%。与 S<sub>0</sub>N<sub>0</sub> 相比, 除 S<sub>2</sub>N<sub>0</sub> 和 S<sub>1</sub>N<sub>0</sub> 茎生物量分别减少 17.33% 和 10.18%, S<sub>2</sub>N<sub>2</sub> 叶、杆生物量减少不明显, S<sub>2</sub>N<sub>0</sub> 叶、杆和总生物量分别减少 7.53%、12.26% 和 7.25%, 根生物量增加不明显外, 根、茎、叶、杆和总生物量分别增加 7.97%~57.90%、7.07%~52.43%、15.70%~41.84%、7.32%~46.77% 和 5.05%~39.16%。除 S<sub>2</sub>N<sub>1</sub> 和 S<sub>0</sub>N<sub>1</sub> 根冠比减小不明显, S<sub>1</sub>N<sub>0</sub> 减小根冠比 7.97% 外, 其余处理根冠比均有不同程度的增加, 其中 S<sub>1</sub>N<sub>2</sub> 根冠比最大, 比 S<sub>0</sub>N<sub>0</sub> 增加 17.66%。这表明适度遮光能促进根系的生长。

表 3 不同遮光和施氮水平下小粒咖啡单株生物量累积<sup>1)</sup>

Table 3 Biomass accumulation of *Coffea arabica* under different shading and nitrogen levels

遮光水平(S) Shading level	施氮水平(N) Nitrogen level	各器官生物量/g Biomass of organs				总生物量/g Total biomass	根冠比/% Root/crown ratio
		根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	杆 Rod		
S <sub>0</sub>	N <sub>0</sub>	29.05±1.30g	13.16±0.64cde	61.93±2.64de	28.75±1.73cd	132.89±3.70f	28.04±2.60cd
	N <sub>1</sub>	34.46±0.74d	14.09±1.19bcd	75.61±0.91c	33.76±0.96b	157.92±0.40c	27.92±0.85cd
	N <sub>2</sub>	39.24±0.64c	16.12±0.91b	87.84±1.85a	30.86±2.85bc	174.05±0.54b	29.10±0.50bcd
	$\bar{x}$	34.25	14.46	75.13	31.12	154.59	28.35
S <sub>1</sub>	N <sub>0</sub>	31.95±0.79ef	11.82±2.32de	80.90±1.45b	31.16±1.16bc	155.83±1.82c	25.80±1.18d
	N <sub>1</sub>	42.74±0.14b	15.01±0.40bc	81.87±0.64b	42.20±3.87a	181.81±2.97a	30.74±0.52abc
	N <sub>2</sub>	45.87±0.11a	20.06±0.85a	84.56±2.64ab	34.44±0.85b	184.93±2.75a	32.99±0.54a
	$\bar{x}$	40.19	15.63	82.44	35.93	174.19	29.84
S <sub>2</sub>	N <sub>0</sub>	29.89±1.02fg	10.88±0.89e	57.26±2.26e	25.23±1.24d	123.26±1.15g	32.01±1.04ab
	N <sub>1</sub>	31.37±1.72ef	14.19±1.34bcd	71.65±4.50c	31.14±1.68bc	148.34±2.45d	26.86±2.43d
	N <sub>2</sub>	32.84±0.27de	15.17±0.49bc	63.65±1.62d	27.94±1.05cd	139.59±2.45e	30.77±0.38abc
	$\bar{x}$	31.37	13.41	64.19	28.1	137.06	29.88
P	S	<0.001	0.025	<0.001	<0.001	<0.001	0.143
	N	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	S×N	<0.001	0.054	<0.001	0.258	<0.001	0.004

1) 同列数据后不同小写字母表示差异显著 (P<0.05, Duncan's 法)

1) Different lowercase letters in the same column indicated significant difference (P<0.05, Duncan's test)

## 3 讨论

光照和氮素是作物生长发育的 2 个重要影响因素。协调好光照和氮素的关系, 一定程度上可以增强作物光合作用, 促进光合产物的形成, 加速养

分物质的运输和传导, 对作物吸收土壤养分及进行营养物质转运具有很好的促进作用<sup>[15]</sup>, 本研究中, 不同遮光和施氮水平处理下小粒咖啡叶片净光合速率、蒸腾速率和气孔导度的日变化基本呈“双峰曲线”, 存在“光合午休”现象。这可能是由于外

界环境中的强光和高温,超出其光合作用的最高点,因此对植株造成了胁迫作用,这与朱巧玲等<sup>[16]</sup>的研究结果一致。遮光处理下最大净光合速率、蒸腾速率和气孔导度均高于全光照,这是由于遮光可提高气孔导度,因而降低了气孔限制值,使  $\text{CO}_2$  和水蒸气进出气孔阻力减小,从而缓解光强度超过光饱和点时造成的光抑制<sup>[17]</sup>。而处理  $S_1$  比  $S_2$  的净光合速率、蒸腾速率和气孔导度略大,表明轻度遮光能最大程度优化小粒咖啡的光合特性。张元帅等<sup>[18]</sup>认为随着氮素施用量的增加能增强植物叶片光能捕获能力,提高光能转化效率,促进光合作用,进而提高光合速率。本研究中相同遮光条件下与  $N_0$  相比,小粒咖啡叶片的净光合速率、蒸腾速率和气孔导度随着氮肥施用量的增加而增加,可能是增施氮肥在遮光条件下能有效缓解弱光胁迫的不利影响。

叶绿素的含量可反映作物光合能力和生态适应能力<sup>[19]</sup>,而增加施氮量能提高叶绿素的含量。本研究表明,小粒咖啡叶片叶绿素含量随遮光程度的增加显著升高。这可能是由于强光促进叶绿素的降解,或是由于遮光促进小粒咖啡叶片叶绿素的补偿合成以维持基础代谢<sup>[20-21]</sup>,最终导致叶绿素含量增加。在相同遮光条件下,咖啡叶绿素含量随氮肥施用量的增加而增加,这与增施氮肥可提高咖啡叶绿素含量,增强叶片叶肉细胞光合活性和吸光强度,进而增加净光合速率的结论相一致<sup>[22]</sup>。遮光和氮肥的交互作用对叶绿素总量影响显著,这与遮光条件下增施氮肥促进叶绿素合成和光合碳同化,平衡碳氮代谢,进而影响作物对叶绿素等光合物质的积累和运转<sup>[18]</sup>有关。

生物量累积是作物获取能量的主要体现,表观光能利用效率是决定作物生产力的重要因素<sup>[23]</sup>。本研究中,轻度遮光 ( $S_1$ ) 时获得最大生物量累积,而重度遮光比自然光照下获得的生物量累积少,表明适度遮光有利于小粒咖啡生物量的合成,并且能显著提高叶片表观光能利用效率,这是由于小粒咖啡对弱光胁迫具有一定的调节和适应能力,通过降低光补偿点来适应低强度的光辐射环境<sup>[24]</sup>,这与小粒咖啡具有一定的耐阴性也是有关的。本研究中,随着遮光程度的增加叶片表观光能利用效率增加,但过度遮光降低了根、茎、叶的生物量,可能是由于过度遮光降低光照强度,导致单位面积叶片净光合速率下降,引起光合碳同化力不足和碳氮代谢失调。水分利用效率反映植物耗水与其干物质生产之间的关系,是评价植物生长适宜程度的综合指标<sup>[25]</sup>,施氮能提高作物渗透调节能力,降低蒸腾失水,减

少植株耗水量,从而提高水分利用效率<sup>[26]</sup>。同一遮光水平下小粒咖啡的叶片水分利用效率和生物量均随施氮量的增加而增加,王林等<sup>[27]</sup>认为施氮增强光截获量,提高光合速率,从而增加小粒咖啡生物量。本研究中,小粒咖啡根质量随施氮量的增大而增大,表明增施氮肥能有效促进小粒咖啡的根系生长,显著提高其根系活力,使根系在土壤中均匀分布,有利于小粒咖啡根系对土壤养分的吸收利用,从而促进小粒咖啡各生长器官发育,提高生物量和水分利用效率<sup>[28]</sup>。

## 4 结论

1) 不同遮光和施氮条件下小粒咖啡叶片的净光合速率、蒸腾速率以及气孔导度日变化均呈双峰型。增加遮光度显著提高小粒咖啡叶绿素总量和叶绿素 b 含量;增加施氮量显著增加叶绿素 b 含量。

2) 小粒咖啡叶片表观光能利用效率随着遮光度的增加而增加,净光合速率和叶片瞬时水分利用效率先增后减。轻度遮光 ( $S_1$ ) 显著增加生物量累积,而重度遮光 ( $S_2$ ) 不利于生物量累积。

3) 与无氮 ( $N_0$ ) 相比,高氮 ( $N_2$ ) 显著增加叶片的净光合速率、气孔导度和表观光能利用效率,促进小粒咖啡的生长,增加生物量累积。

4) 轻度遮光高氮处理 ( $S_1N_2$ ) 的小粒咖啡叶片水分利用效率、表观光能利用效率和最大净光合速率最大。基于水光高效利用和促进苗木生长等方面考虑,轻度遮光和高氮组合为小粒咖啡苗木的最优光氮管理模式。

### 参考文献:

- [1] EHRENBERGEROVÁ L, CIENCIALA E, KUČERA A, et al. Carbon stock in agroforestry coffee plantations with different shade trees in Villa Rica, Peru[J]. *Agroforest Syst*, 2016, 90(3): 433-445.
- [2] 刘小刚, 万梦丹, 齐韵涛, 等. 不同遮阴下亏缺灌溉对小粒咖啡生长和水光利用的影响[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(1): 191-197.
- [3] FRANCK N, VAAST P. Limitation of coffee leaf photosynthesis by stomatal conductance and light availability under different shade levels[J]. *Trees*, 2009, 23(4): 761-769.
- [4] ARAUJO W L, DIAS P C, MORAES G A B K, et al. Limitations to photosynthesis in coffee leaves from different canopy positions[J]. *Plant Physiol Biochem*, 2008, 46(10): 884-890.
- [5] BOSSELMANN A S, DONS K, OBERTHUR T, et al. The influence of shade trees on coffee quality in small holder coffee agroforestry systems in Southern Colom-

- bia[J]. *Agric Ecosyst Environ*, 2009, 129(1/2/3): 253-260.
- [6] CHAVES A R M, TEN-CATEN A, PINHEIRO H A, et al. Seasonal changes in photoprotective mechanisms of leaves from shaded and unshaded field-grown coffee (*Coffea arabica* L.) trees[J]. *Trees*, 2008, 22(3): 351-361.
- [7] 张岩, 刘小刚, 万梦丹, 等. 小粒咖啡光合特性和抗氧化酶对有限灌溉和氮素的响应[J]. *排灌机械工程学报*, 2015, 33(11): 991-1000.
- [8] 李建明, 潘铜华, 王玲慧, 等. 水肥耦合对番茄光合、产量及水分利用效率的影响[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(10): 82-90.
- [9] 谭娟, 郭晋川, 吴建强, 等. 不同灌溉方式下甘蔗光合特性[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(11): 150-158.
- [10] 刘小刚, 郝琨, 韩志慧, 等. 水氮耦合对干旱区小粒咖啡产量和品质的影响[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(2): 143-150.
- [11] NAZARENO R B, OLIVEIRA C A D, SANZONOW-ICZ C, et al. Initial growth of Rubi coffee plant in response to nitrogen, phosphorus and potassium and water regimes[J]. *Pesqui Agropecu Bras*, 2003, 38(8): 903-910.
- [12] FENILLI T A B, REICHARDT K, BACCHI O O S, et al. The N-15 isotope to evaluate fertilizer nitrogen absorption efficiency by the coffee plant[J]. *An Acad Bras Cienc*, 2007, 79(4): 767-776.
- [13] 蔡传涛, 蔡志全, 解继武, 等. 田间不同水肥管理下小粒咖啡的生长和光合特性[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(7): 1207-1212.
- [14] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [15] 张亚琦, 李淑文, 付巍, 等. 施氮对杂交谷子产量与光合特性及水分利用效率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(5): 1119-1126.
- [16] 朱巧玲, 冷佳奕, 叶庆生. 黑毛石斛和长距石斛的光合特性[J]. *植物学报*, 2013, 48(2): 151-159.
- [17] REN B, CUI H, CAMBERATO J J, et al. Effects of shading on the photosynthetic characteristics and mesophyll cell ultrastructure of summer maize[J]. *Sci Nat*, 2016, 103: 67. doi: 10.1007/s00114-016-1392-x.
- [18] 张元帅, 冯伟, 张海艳, 等. 遮阴和施氮对冬小麦旗叶光合特性及产量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2016, 24(9): 1177-1184.
- [19] 万梦丹, 刘小刚, 徐航, 等. 不同灌水和光强条件下小粒咖啡叶片光响应及光合生理特征[J]. *排灌机械工程学报*, 2016, 34(9): 795-803.
- [20] LI H, JIANG D, WOLLENWEBER B, et al. Effects of shading on morphology, physiology and grain yield of winter wheat[J]. *Eur J Agron*, 2010, 33(4): 267-275.
- [21] 郭翠花, 高志强, 苗果园. 花后遮阴对小麦旗叶光合特性及籽粒产量和品质的影响[J]. *作物学报*, 2010, 36(4): 673-679.
- [22] 郝琨, 刘小刚, 张岩, 等. 干旱胁迫-复水与氮肥耦合对小粒咖啡生长和水氮生产力的影响[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(12): 4034-4042.
- [23] 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.
- [24] 赵育民, 牛树奎, 王军邦, 等. 植被光能利用率研究进展[J]. *生态学杂志*, 2007, 26(9): 1471-1477.
- [25] 张岁岐, 山仑. 植物水分利用效率及其研究进展[J]. *干旱地区农业研究*, 2002, 20(4): 1-5.
- [26] 肖生春, 肖洪浪, 段争虎. 干旱沙漠地区春小麦的水分与氮肥利用效率研究[J]. *中国沙漠*, 2004, 24(3): 360-364.
- [27] 王林, 王琦, 张恩和, 等. 间作与施氮对秸秆覆盖作物生产力和水分利用效率的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2014, 22(8): 955-964.
- [28] HAO K, LIU X, HAN Z, et al. Effects of drip irrigation modes on growth and physiological characteristics of Arabica coffee under different N levels[J]. *J Drain Irrig Machine Engineer*, 2017, 35(10): 912-920.

【责任编辑 李庆玲, 庄 延】