作物学报 ACTA AGRONOMICA SINICA 2021, 47(6): 1175–1187 http://zwxb.chinacrops.org/
ISSN 0496-3490; CN 11-1809/S; CODEN TSHPA9 E-mail: zwxb301@caas.cn

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2021.04148

糜子/绿豆间作模式下施氮量对绿豆叶片光合特性及产量的影响

党 科 宫香伟 吕思明 赵 冠 田礼欣 靳 飞 杨 璞 冯佰利* 高小丽*

西北农林科技大学农学院 / 旱区作物逆境生物学国家重点实验室 / 农业农村部作物基因资源与种质创制陕西科学观测试验站, 陕西杨凌 712100

摘 要: 探讨施氮量对间作条件下绿豆叶片光合特性、氮素特征及产量的影响, 以期为西北旱区糜子//绿豆间作模式的合理施氮提供理论依据。试验于 2018—2019 年在陕西榆林采用裂区设计, 主处理设糜子间作绿豆(PM)、绿豆单作(SM)2 种种植模式, 副处理设 0 (N0)、45 (N1)、90 (N2)和 135 kg hm^{-2} (N3) 4 个氮肥水平。结果表明, 施氮处理下间作绿豆叶片净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)比不施氮平均增加 10.5%~24.5%、15.2%~29.5%, 提高了叶片光合特性; PSII 最大光化学效率(F_v/F_m)、PSII 实际光化学效率(Φ_{PSII})平均增加 2.9%~7.8%、11.7%~28.4%, PSII 非光化学淬灭系数(non-photochemical quenching coefficient, NPQ)降低 10.3%~17.4%, 叶片叶绿素荧光参数得到改善, 对弱光的截获和利用能力提高, 叶片 PSII 反应中心活性增强。单株叶面积、单位干质量叶片氮含量(N_{mass})和单位面积氮含量(N_{area})均随施氮量增加表现为先升高后降低的趋势; Chl *a*、Chl *b* 含量增加, 光合氮利用效率(photosynthetic N-use efficiency, PNUE)则比不施氮有所降低; 不同施氮量均显著增加间作绿豆干物质积累量和荚数, 百粒重 2 年平均分别比不施氮增加 1.1%~6.9%, 产量增加 9.3%~19.7%。2 年试验间作各处理土地当量比(land equivalent ratio, LER)为 1.63~2.07, 表现为间作产量优势。由此可知, 施氮可改善间作绿豆叶片光合物质生产能力, 延缓衰老, 有效调节了光合系统对遮阴的适应性反应, 且间作叶片光合性能对氮肥的响应要大于单作。糜子/绿豆间作模式 LER 大于 1, 可作为西北旱作农业区推广种植模式, 在 90 kg hm^{-2}施氮量下间作绿豆叶片光合特性表现最好, 产量最高, LER 最大, 是其适宜施氮水平。

关键词: 绿豆; 氮肥; 间作; 光合特性; 光合氮利用效率; 产量

Effects of nitrogen application rate on photosynthetic characteristics and yield of mung bean under the proso millet and mung bean intercropping

DANG Ke, GONG Xiang-Wei, LYU Si-Ming, ZHAO Guan, TIAN Li-Xin, JIN Fei, YANG Pu, FENG Bai-Li*, and GAO Xiao-Li*

College of Agronomy, Northwest A&F University / State Key Laboratory of Crop Stress Biology for Arid Areas / Shaanxi Research Station of Crop Gene Resources & Germplasm Enhancement, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling 712100, Shaanxi, China

Abstract: To explore the effect of nitrogen (N) on the leaf gas exchange, chlorophyll fluorescence, nitrogen characteristics and yield of mung bean under intercropping with proso millet, the field experiments were conducted in 2018 and 2019 using split-plot design with two cropping patterns [proso millet-mung bean intercropping (PM) and soled mung bean (SM)] and four total N fertilizer application rates [0 (N0), 45 (N1), 90 (N2), and 135 kg hm^{-2} (N3)]. Under N application, the net photosynthetic rate (P_n) and transpiration rate (T_r) of mung bean in intercropping increased by 10.5%–24.5% and 15.2%–29.5% on average, which improved the photosynthetic characteristics. Maximum photochemical efficiency (F_v/F_m) and actual photochemical efficiency (Φ_{PSII})

本研究由陕西省重点研发计划项目(2018TSCXL-NY-03-01), 陕西省省级现代农作物种业项目(20171010000004)和陕西省小杂粮产业技术体系项目(2009-2019)资助。

This study was supported by the Shaanxi Province Key Research and Development Project (2018TSCXL-NY-03-01), the Shaanxi Province Modern Crops Seed Industry Project (20171010000004), and the Minor Grain Crops Research and Development System of Shaanxi Province (2009-2019).

* 通信作者(Corresponding authors): 冯佰利, E-mail: fengbaili@nwsuaf.edu.cn; 高小丽, E-mail: gao2123@nwsuaf.edu.cn

第一作者联系方式: E-mail: dangke4718@163.com

Received (收稿日期): 2020-07-06; Accepted (接受日期): 2020-12-01; Published online (网络出版日期): 2020-12-28.

URL: https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20201228.1002.006.html

increased by 2.9%–7.8% and 11.7%–28.4%, respectively, and PSII non-photochemical quenching coefficient (NPQ) decreased by 10.3%–17.4%. The chlorophyll fluorescence parameters were improved, resulting in enhancing the ability to capture and utilize light energy, and the activity of PSII reaction center was enhanced. Leaf area per plant, N content per unit dry mass of leaves (N_{mass}) and N content per unit area (N_{area}) increased first and then decreased with the increase of N application rate. The content of Chl *a* and Chl *b* increased. Photosynthetic N-use efficiency (PNUE) decreased compared with N0. N application significantly increased the dry matter accumulation and pods of mung bean in intercropping. Under the treatment of N1, N2, and N3, 100-grain weight and yield were increased by 1.1%–6.9% and 9.3%–19.7%, respectively. In the two-year trial intercropping, the land equivalent ratio of each treatment was 1.63–2.07, indicating the yield advantage of intercropping. N application could improve the photosynthetic production capacity of mung bean in intercropping and effectively regulate the adaptive response of photosynthetic system to shading. The response of photosynthetic performance of intercropping to N fertilizer was greater than that of single-plant systems. Under the conditions of this experiment, the proso millet and mung bean intercropping model can increase land productivity, and it can be used as a planting model to promote dry farming in northwestern China. The intercropping mung bean had the best photosynthetic characteristics at 90 kg hm^{-2}, which showed the highest yield, and the largest land equivalent ratio.
Keywords: mung bean; nitrogen fertilizer; intercropping; photosynthetic characters; photosynthetic nitrogen-use efficiency; yield

间作是通过在同一田地上相间种植 2 种或者 2 种以上作物, 以实现时间与空间集约化的一种种植方式[1]。禾豆高低位复合群体的间作模式是一种高效的种植方式, 如高位玉米、小麦、燕麦等禾本科作物和低位大豆、蚕豆、花生等豆科作物间作[2-4]。科学合理的间作组合不仅可充分利用光能[2,5]、优化肥料的施用、合理利用土地资源[3], 发挥作物间的互补效应[6], 还能通过带状轮作种植, 减缓连作障碍[7]。糜子绿豆间作已被证明具有良好的产量效益, 其能够高效利用光、热、水等资源, 可作为西北旱区抗灾保收的种植方式之一, 但低位绿豆(*Vigna radiata* L.)由于遮阴、养分竞争等因素的影响产量降低[8-9]。因此, 如何进一步增强低位绿豆耐遮阴能力, 促进其生长发育并提高产量, 是糜子绿豆间作技术的研究目标之一。

绿豆因其较强的抗逆性和固氮能力, 成为西北旱区重要的粮食作物和经济作物, 在作物布局中具有不可替代性。绿豆为豆科作物, 但在生育前期, 根瘤发育尚未完全, 自身所固定的氮素不能完全满足生长需要, 需要从外界吸收一定的氮素。因此, 生育初期土壤外施氮肥是满足绿豆氮素需求的主要措施。前人研究表明, 豆科作物不同品种和种植区域适宜施氮水平存在差异, 陈剑等[10]、叶卫军等[11]表明, 小豆、绿豆较为适宜施氮量为 30~60 kg hm^{-2}, 司玉坤等[12]表明, 豫中地区大豆氮肥用量为 120 kg hm^{-2} 时产量表现较好, 氮肥施用过多易造成植株徒长, 导致产量下降。而合理施肥可以缓解由于遮阴导致的叶片净光合速率、蒸腾速率、胞间二氧化碳浓度下降, 使叶绿素相对含量、过氧化物酶和超氧化物歧化酶等活性增加, 进而有效调控植物的光合作用, 增强作物对遮阴的适应能力[13-15], 补充因捕光组分氮比例提高而造成的叶片氮消耗, 保证植物的正常生长[16]。此外, 施肥能有效缓解以热能形式的光耗散, 提高叶片的光化学效率, 缓解遮阴对产量影响。

氮肥与间作的有机结合已成为目前广泛关注的热点, 探究禾豆间作系统中适宜施氮对低位豆科作物遮阴逆境的缓解效应, 对西北旱区可持续农业发展过程中种植模式与氮肥的结合具有重要意义。前人对于肥料对禾豆复合群体的影响主要集中在大宗作物上, 且多数为高位作物的养分积累分配[17]、土壤性质变化[18-19]及生长发育[20]等方面, 关于施氮对低位绿豆遮阴逆境的影响报道较少。本研究通过研究施氮量对绿豆光合特性的影响, 探讨间作绿豆氮素利用与光合特性的关系及产量效应, 揭示低位作物在不同氮水平条件下对遮阴逆境的响应规律, 旨在为西北旱区现代农业中氮肥与适宜种植方式的结合提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

于 2018—2019 年在陕西省榆林市(37°56′26″N, 109°21′46″E)小杂粮综合试验示范站开展试验, 该区域属于干旱半干旱大陆性季风气候, 海拔 1120 m, 年平均降水量 400 mm 左右, 降水主要集中在 7 月至 9 月, 年平均气温为 11.0℃, 最高气温 36.3℃, 最低气温–25.7℃, 无霜期 145 d (图 1)。试验地属于典型的黄土高原丘陵沟壑区, 土壤为黄绵土, 地势平坦、肥力均匀, 试验前耕层 0~20 cm 土壤含有机质 6.79 g kg^{-1}、全氮 0.55 g kg^{-1}、硝态氮 9.36 mg kg^{-1}、铵态氮 11.39 mg kg^{-1}、速效磷 35.9 mg kg^{-1}、速效钾 109.2 mg kg^{-1}, pH 8.6。

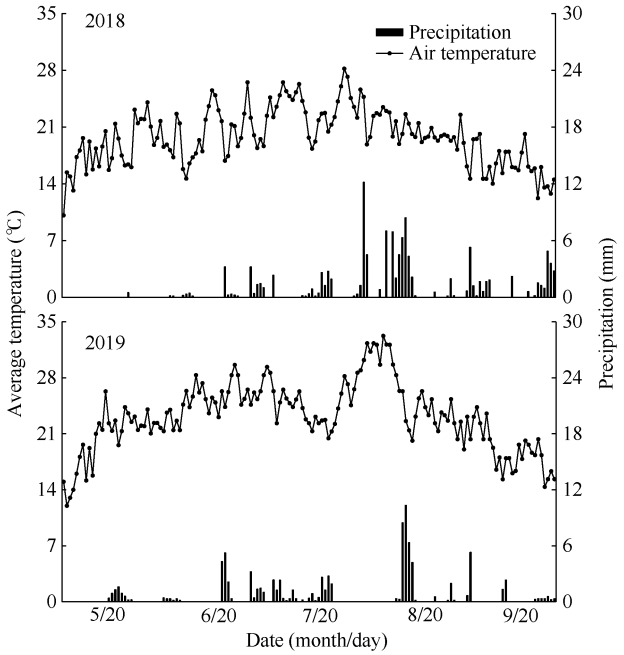

图 1　试验地 2018–2019 年作物生育期内日平均降水量和温度
Fig. 1　Average daily rainfall and mean temperature during whole growth period of the experiment plots in 2018 and 2019

1.2　试验设计

试验采用裂区设计，主处理设糜子间作绿豆(PM)、绿豆单作(SM) 2 种种植模式，行距均为 33 cm，糜子株距 5 cm，绿豆株距 15 cm，小区面积 30 m^2 (6 m×5 m)，南北向种植，间作实行 2 行糜子、4 行绿豆的方式，每个重复中包括 3 个间作组合带，以单作绿豆为对照。糜子种植密度 50 万株 hm^{-2}，绿豆 20 万株 hm^{-2}。副处理设 0 (N0)、45 (N1)、90 (N2) 和 135 kg hm^{-2} (N3) 4 个氮肥水平，4 次重复，随机区组排列。用尿素(含纯氮 46.7%)播种前作为基肥一次性施入，试验田同时撒施 P_2O_5 90 kg hm^{-2}、K_2O 75 kg hm^{-2}，后期未进行追肥处理。间作糜子播种前施与绿豆等量肥料，于拔节期追施氮肥 0、15、30 和 45 kg hm^{-2}。2018 年 5 月 18 日和 6 月 10 日绿豆与糜子播种，8 月 20 日和 9 月 25 日绿豆与糜子成熟。2019 年 5 月 25 日和 6 月 10 日绿豆与糜子播种，8 月 30 日和 9 月 30 日绿豆与糜子成熟，试验过程中糜子、绿豆生长状况良好，无明显发病情况。选用当地主栽品种‘陕糜 1 号’和‘中绿 8 号’，按照国家糜子、绿豆品种区域试验要求进行田间管理。

1.3　测定项目与方法

1.3.1　*光合特性和叶绿素荧光参数*　　各小区选取有代表性的绿豆植株 5 株挂牌标记，在分枝期(7 月 10 日)、开花期(7 月 23 日)、结荚期(8 月 5 日)和鼓粒期(8 月 18 日)用 CIRAS-3 型光合作用测定系统(英国)测定绿豆净光合速率(net photosynthesis rate, P_n)、胞间 CO_2 浓度(intercellular CO_2 concentration, C_i)和蒸腾速率(transpiration rate, T_r)。水分利用效率(water use efficiency, WUE)为净光合速率与蒸腾速率的比值，即 WUE= P_n/T_r。选择绿豆主茎倒三叶复叶中间小叶，测定时设定光合仪参数人工光源光为 90%红光+10%蓝光，光照强度为 1200 μmol m^{-2} s^{-1}，CO_2 浓度为 380 mol m^{-2} s^{-1}，叶室温度为 30℃，时间为晴天上午 9:00—11:30，按照田间种植顺序往返测定。

叶片(主茎倒三叶复叶中间小叶)暗适应 30 min 后，用超便携式调制叶绿素荧光仪 MINI-PAM 2000 (WALZ 公司，德国)测定 PSII 最大光化学效率(maximal photochemical efficiency of photosystem II, F_v/F_m)、PSII 非光化学淬灭系数(non-photochemical quenching coefficient, NPQ)。测定结束后将测定叶片摘下液氮速冻，并于−80℃下保存鲜样备用。PSII 实际光化学效率(actual PSII efficiency, Φ_{PSII})根据公式计算:

$$\Phi_{PSII}=\frac{F_v}{F_m}\times q_P \quad (1)$$

式中，Φ_{PSII} 为实际光化学效率，F_v/F_m 为最大光化学效率，q_P 为光化学淬灭系数。

1.3.2　*光合色素含量*　　参照王一等[21]的方法测定鼓粒期叶片光合色素含量，将所取绿豆鲜样叶片切成细丝，用 80%丙酮溶液浸提 12 h。将浸提液在 663 nm 和 645 nm 波长下比色，所得光密度(OD)值代入公式计算溶液叶绿素 *a* (Chl *a*)、叶绿素 *b* 浓度(Chl *b*)，并计算叶绿素 *a*/*b* (Chl *a*/*b*)浓度，公式如下:

$$\text{Chl } a \text{ (mg L}^{-1}) = 12.25A_{663}-2.79A_{645} \quad (2)$$

$$\text{Chl } b \text{ (mg L}^{-1}) = 21.50A_{645}-5.10A_{663} \quad (3)$$

$$\text{Chl } a/b = \text{Chl } a/\text{Chl } b \quad (4)$$

色素在叶片中的含量(mg g^{-1})= 色素浓度(mg L^{-1})×提取液总体积(mL)/样品质量(g)

1.3.3　*叶面积、农艺性状和干物质积累*　　于鼓粒期选择另外 5 株挂牌标记的绿豆植株，用 YMJ-CH 植物叶面积仪测定叶面积(由浙江托普云农科技股份有限公司研发生产)，5 次重复，并分别测定株高、茎粗、主茎节数、主茎分枝数和单株荚数。然后将植株地上部茎、叶、叶柄、荚等不同器官置于烘箱内 105℃杀青 30 min，然后于 80℃烘至恒重，用 1/1000 电子天平称干重，作为各器官干物质积累量。

1.3.4 叶片全氮含量 将干物质测定后绿豆叶片粉碎、过筛后, 采用 H_2O_2-H_2SO_4 法消煮, 凯氏定氮法测定全氮(N%)含量, 3 次重复后求平均值。

1.3.5 产量测定 将每个处理 3 个小区中的绿豆和糜子有效植株的荚和穗全部收回, 人工脱粒晒干后测产, 根据小区实测产量折算出每公顷的理论产量, 测定绿豆百粒重, 并计算土地当量比(land equivalent ratio, LER)[22]。

1.3.6 相关参数计算

比叶质量(LMA, g m^{-2}) = 叶干质量/叶面积 (5)

单位干质量叶片氮含量(N_{mass}, g kg^{-1}) = 叶片氮含量(%)×单位换算系数 (6)

单位面积氮含量(N_{area}, mg cm^{-2}) = N_{mass}×LMA (7)

光合氮利用效率(PNUE, CO_2 μmol mol^{-1} s^{-1}) = P_n/N_{area} (8)

$$LER=\frac{Y_{ip}}{Y_{sp}}+\frac{Y_{im}}{Y_{sm}} \quad (9)$$

式中, Y_{ip} 和 Y_{im} 分别代表间作糜子和间作绿豆的产量, Y_{sp} 和 Y_{sm} 分别为单作糜子和单作绿豆的产量。若 LER>1, 说明糜子//绿豆存在间作优势, 若 LER<1, 说明糜子//绿豆存在间作劣势。

1.4 数据处理

气体交换参数、叶绿素荧光参数、叶片氮素特征数据为 2019 年 1 年数据, 其余各指标均为 2018 年和 2019 年 2 年数据。采用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS 19.0 统计软件分析数据并作图, 用最小显著极差法在 $P = 0.05$ 水平下进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 氮水平对间作绿豆气体交换参数的影响

由图 2 可知, 绿豆叶片 P_n 和 WUE 分别在开花期和鼓粒期最大, C_i 和 T_r 随生育时期推进表现为先升高后降低的趋势。在同一氮肥水平下, 间作绿豆生殖生长阶段的 P_n 和 T_r 小于单作, 但 C_i 大于单作。施氮缓解了间作对绿豆光合特性的影响, 在同一种植模式下, P_n 随氮肥施用量的增加而呈现先升高后降低的趋势, 间作绿豆在 N1、N2 和 N3 处理下 P_n 较 N0 分别增加 24.5%、23.2%和 10.5%, T_r 分别增加 15.2%、29.5%和 25.9%。就单作而言, 生殖生长期在 N1 水平时 P_n 最高, 且与 N0 和 N3 差异显著(P<0.05)。就间作而言, 在 N2 处理下 P_n 达到最高, 与 N0 处理差异显著(P<0.05), 可见开花后 N1 和 N2 施氮水平使单、间作绿豆有较好的光合特性。

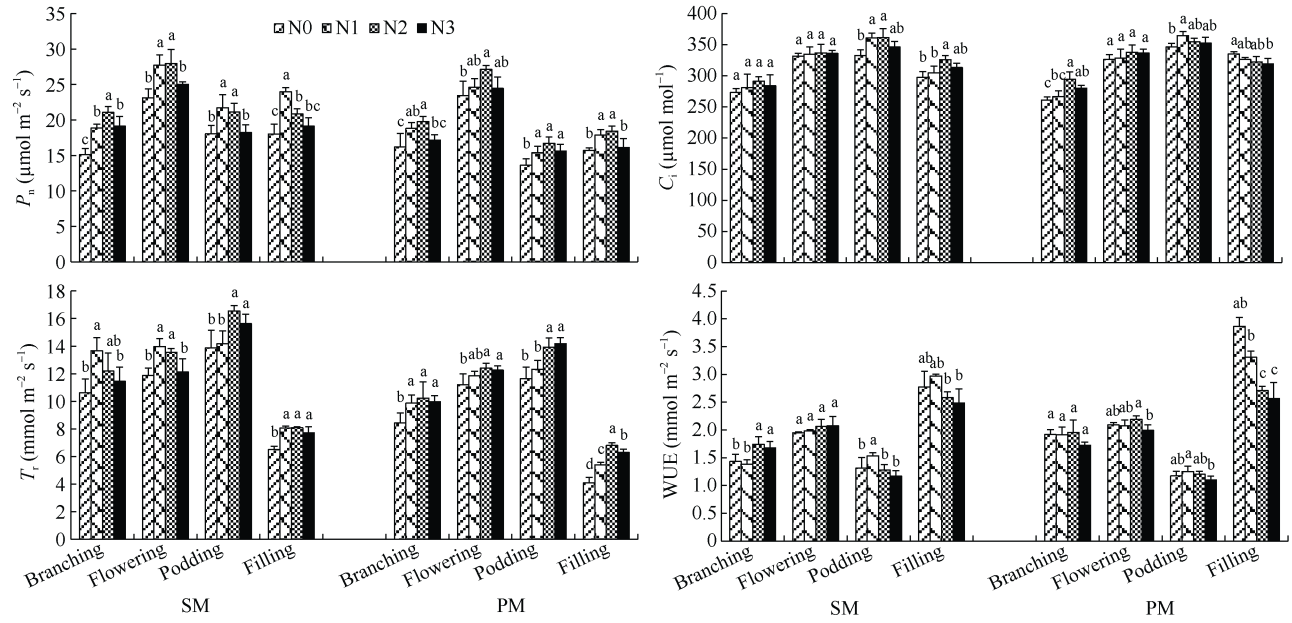

图 2 氮水平对间作绿豆气体交换参数的影响

Fig. 2 Effects of nitrogen treatments on the gas exchanges in intercropping mung bean

柱上不同小写字母代表在同一间作模式下各施氮水平在 0.05 水平差异显著。SM: 单作绿豆; PM: 间作绿豆。N0: 氮肥施用量 0 kg hm^{-2}; N1: 氮肥施用量 45 kg hm^{-2}; N2: 氮肥施用量 90 kg hm^{-2}; N3: 氮肥施用量 135 kg hm^{-2}。P_n: 净光合速率; C_i: 胞间二氧化碳浓度; T_r: 蒸腾速率; WUE: 水分利用效率。

Values followed by different lowercase letters above the bars mean significant differences at the 0.05 probability level in the same cropping pattern. SM: sole mung bean; PM: intercropping mung bean. N0: nitrogen fertilizer application of 0 kg hm^{-2}; N1: nitrogen fertilizer application of 45 kg hm^{-2}; N2: nitrogen fertilizer application of 90 kg hm^{-2}; N3: nitrogen fertilizer application of 135 kg hm^{-2}. P_n: net photosynthesis rate; C_i: intercellular CO_2 concentration; T_r: evaporation rate; WUE: water use efficiency.

2.2　氮水平对间作绿豆叶绿素荧光参数的影响

由图 3 可知, 从营养生长到生殖生长, 绿豆叶片 F_v/F_m 和 Φ_{PSII} 先升高后降低, NPQ 在结荚后又有所升高。在同一氮肥施用量下, 间作绿豆叶片 F_v/F_m、Φ_{PSII} 和 NPQ 均大于单作。施氮后单作 F_v/F_m、Φ_{PSII} 比不施氮平均升高 5.3%~8.2%、19.2%~27.3%, 间作平均升高 2.9%~7.8%、11.7%~28.4%; 单作 NPQ 降低 6.6%~10.2%, 间作降低 10.3%~17.4%, 可见间作施氮后以热能形式耗散的光能的减少程度要大于单作。生育后期单、间作绿豆 F_v/F_m、Φ_{PSII} 分别在 N1、N2 下达到最大, 且与 N0 和 N3 处理差异显著 (P<0.05)。整个生育时期综合分析发现, N1、N2 处理分别对单、间作绿豆叶片叶绿素荧光参数影响最大, 且间作绿豆叶片 Φ_{PSII} 和 NPQ 对氮肥的响应大于单作。

2.3　氮水平对间作绿豆叶片光合色素含量的影响

由图 4 可知, 2 种种植模式下, 叶片 Chl *a*、Chl *b* 含量均随施氮量的增加而增加, 在 N3 处理下最大, 且除了 2019 年间作下 N0 和 N1 处理差异不显著外, N1、N2 和 N3 均与 N0 的差异达到显著水平(P<0.05)。由图 5 可知, 间作绿豆叶片的 Chl *a*、Chl *b* 均高于单作, 除了 2019 年间作下 N1 处理外, N1、N2 和 N3

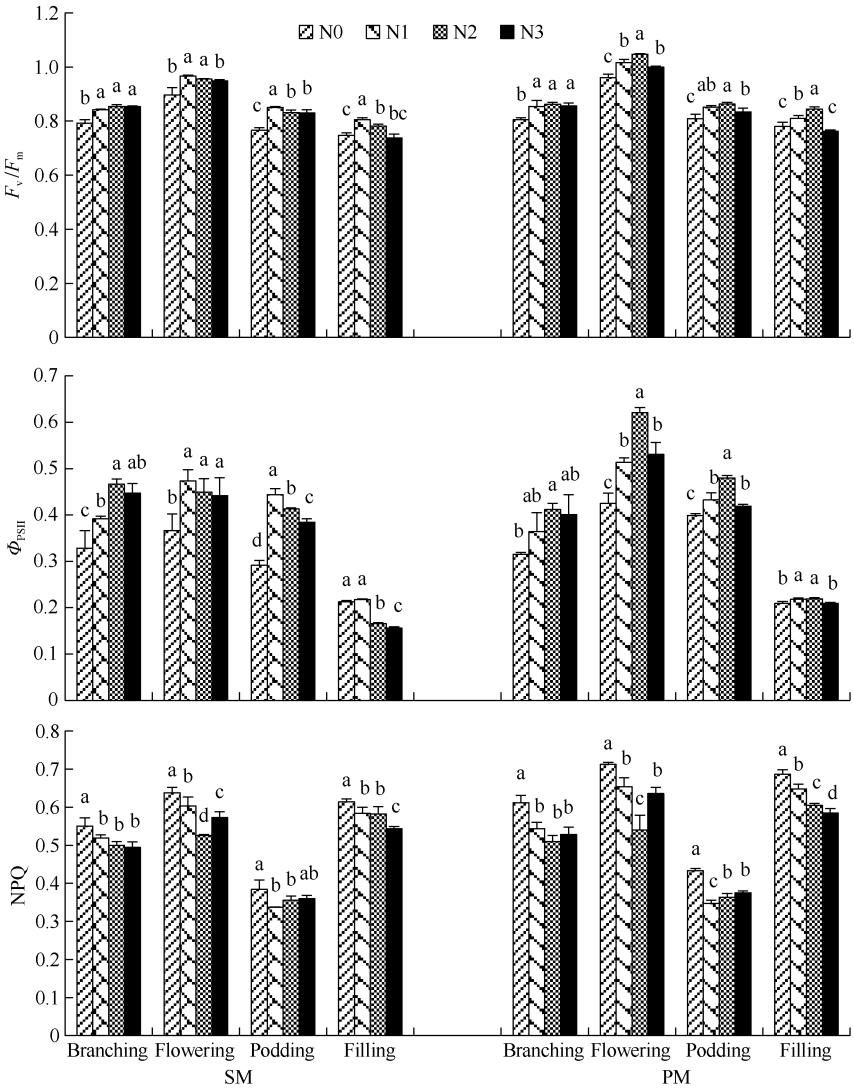

图 3　氮水平对间作绿豆叶绿素荧光参数的影响

Fig. 3　Effects of nitrogen level on the chlorophyll fluorescence parameters in intercropping mung bean

处理同图 2。柱上不同小写字母代表在同一间作模式下各施氮水平在 0.05 水平差异显著。F_v/F_m: 最大光化学效率; Φ_{PSII}: 实际光化学效率; NPQ: 非光化学淬灭系数。

Treatments are the same as those given in Fig. 2. Values followed by different lowercase letters above the bars mean significant differences at the 0.05 probability level in the same cropping pattern. F_v/F_m: the maximal photochemical efficiency of photosystem II; Φ_{PSII}: the actual PSII efficiency (Φ_{PSII}); NPQ: non-photochemical quenching coefficient.

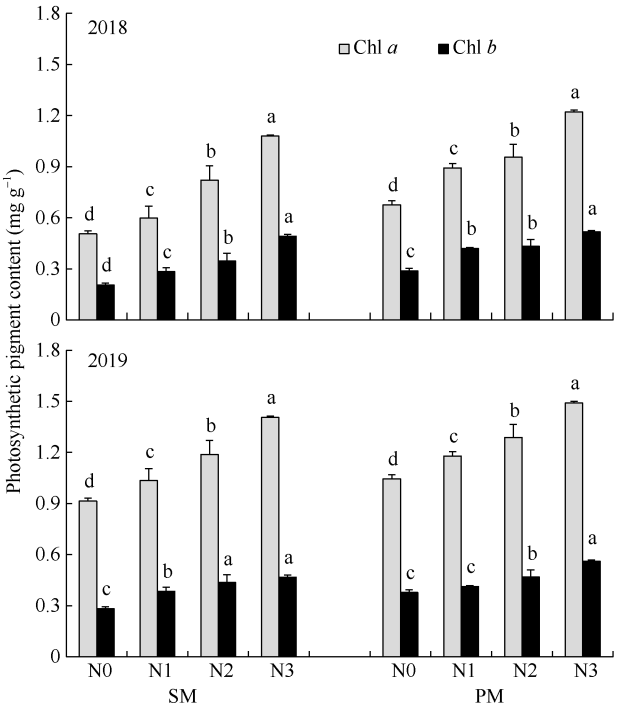

图 4 氮水平对间作绿豆叶绿素光合色素含量的影响

Fig. 4 Effects of nitrogen treatments on the chlorophyll fluorescence parameters in intercropping mung bean

处理同图 2。柱上不同小写字母代表在同一间作模式下各施氮水平在 0.05 水平差异显著。

Treatments are the same as those given in Fig. 2. Values followed by different lowercase letters above the bars mean significant differences at the 0.05 probability level in the same cropping pattern.

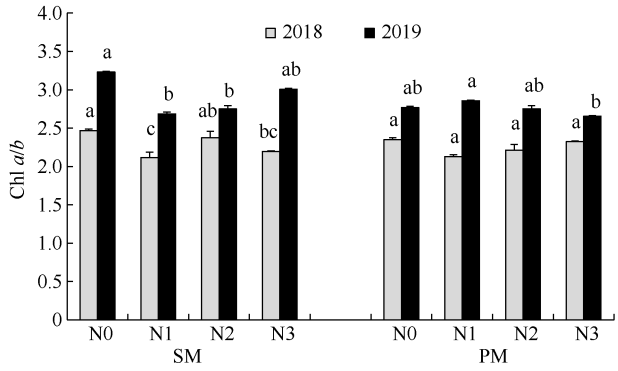

图 5 氮水平对间作绿豆叶绿素 *a*/*b* 的影响

Fig. 5 Effects of nitrogen treatments on the chlorophyll *a*/*b* in intercropping mung bean

处理同图 2。柱上不同小写字母代表在同一间作模式下各施氮水平在 0.05 水平差异显著。

Treatments are the same as those given in Fig. 2. Values followed by different lowercase letters above the bars mean significant differences at the 0.05 probability level in the same cropping pattern.

较 N0 处理 Chl *a*/*b* 有所降低，表明 Chl *b* 含量所占的比例有所增加。

2.4 氮水平对间作绿豆叶片氮素特征的影响

从表 1 可以看出，种植模式和氮水平互作对 LMA、N_{area} 和 PNUE 有显著影响，对单株叶面积和 N_{mass} 影响不显著。同一氮肥水平下，间作绿豆的单株叶面积、N_{mass}、N_{area} 小于单作。氮水平对叶片氮

表 1 氮水平对间作绿豆叶片氮素特征的影响

Table 1 Effects of nitrogen treatments on the nitrogen characteristics of intercropping mung bean leaves

种植模式 Planting pattern	氮水平 N level (kg hm^{-2})	单株叶面积 Leaf area per plant (cm^2)	比叶质量 LMA (g m^{-2})	单位干物质量氮含量 N_{mass} (g kg^{-1})	单位面积氮含量 N_{area} (mg cm^{-2})	光合氮利用效率 PNUE (CO_2 μmol g^{-1} s^{-1})
SM	N0	3178.9±310.2 a	51.33±5.05 b	24.51±0.21 b	0.13±0.01 b	14.43±1.51 a
	N1	3706.3±112.4 a	60.83±1.82 ab	27.77±0.57 a	0.17±0.00 a	13.60±0.34 a
	N2	3608.4±470.9 a	66.73±8.42 a	28.11±1.12 a	0.20±0.02 a	11.25±0.98 b
	N3	3400.4±188.3 a	67.10±3.62 a	26.67±1.32 a	0.18±0.02 a	10.66±0.95 b
PM	N0	2308.5±200.8 c	57.59±4.80 a	20.01±1.08 b	0.12±0.01 a	13.97±0.84 a
	N1	2658.9±222.3 b	55.31±4.86 a	25.64±0.20 a	0.14±0.01 a	12.73±0.65 a
	N2	3019.6±121.4 a	54.04±2.15 a	25.00±0.59 a	0.14±0.00 a	13.81±0.85 a
	N3	2913.0±174.7 ab	56.76±3.31 a	21.61±2.16 b	0.12±0.02 a	13.55±2.90 a
变异来源 Variation source						
种植模式 Planting pattern (P)		**	*	**	**	NS
氮水平 N level (N)		*	NS	**	**	*
种植模式×氮水平 P×N		NS	*	NS	**	*

表中数据为平均值±标准误。同列数据后不同小写字母表示处理间差异达 0.05 显著水平。*: 在 0.05 水平差异显著; **: 在 0.01 水平差异显著; NS: 不显著。处理同图 2。

The data in the table are mean ± standard error. Values followed by different lowercase letters in the same column mean significant differences at the 0.05 probability level. *: significant difference at the 0.05 probability level; **: significant difference at the 0.01 probability level; NS: no significant difference. Treatments are the same as those given in Fig. 2. LMA: leaf mass per area; N_{mass}: N content per unit dry mass of leaves; N_{area}: N content per unit area; PNUE: photosynthetic N-use efficiency.

素特征存在一定程度影响, 单、间作的单株叶面积、N_{mass}、N_{area} 均随施氮量增加表现出先增加后降低的趋势; 单作处理下 LMA 表现为 N3>N2>N1>N0, 但间作表现为 N0>N3>N1>N2。PNUE 的表现则有所不同, 单作处理随氮肥施用量增加 PNUE 逐渐降低, N1、N2 和 N3 分别比 N0 降低 5.8%、22.1%和 26.1%, 间作处理 PNUE 表现为 N0>N2>N3>N1, 且 N1、N2 和 N3 分别比 N0 降低 8.9%、1.1%和 3.0%, 单、间作分别在 N1 和 N2 处理下 PNUE 下降幅度最小。

2.5　氮水平对间作绿豆地上干物质积累和农艺性状的影响

由图 6 可知, 间作模式和氮肥对绿豆地上干物质积累量均有显著影响(P<0.05), 2 年变化趋势一致。单、间作绿豆在 N2 和 N3 处理下干物质积累量最大, 且 N1、N2 和 N3 均与 N0 差异达到显著(P<0.05), 施氮处理单、间作干物质积累比 N0 处理 2 年平均分别增加 21.3%~45.7%、25.4%~41.3%, 荚和叶的干物质积累较 N0 的增加幅度最大。

由表 2 可知, 除主茎节数之外, 种植模式对绿豆株高、茎粗、主茎分枝数和荚数均有显著影响, 同一氮肥水平下, 间作绿豆的株高增加、茎粗、主茎分枝数、荚数减小。施氮处理使单、间作荚数比 N0 处理 2 年平均分别增加 12.9%~35.0%、45.2%~72.3%, 种植模式与氮水平的交互作用对株高和荚数的影响达到极显著水平(P<0.01), 对主茎分枝数的影响达

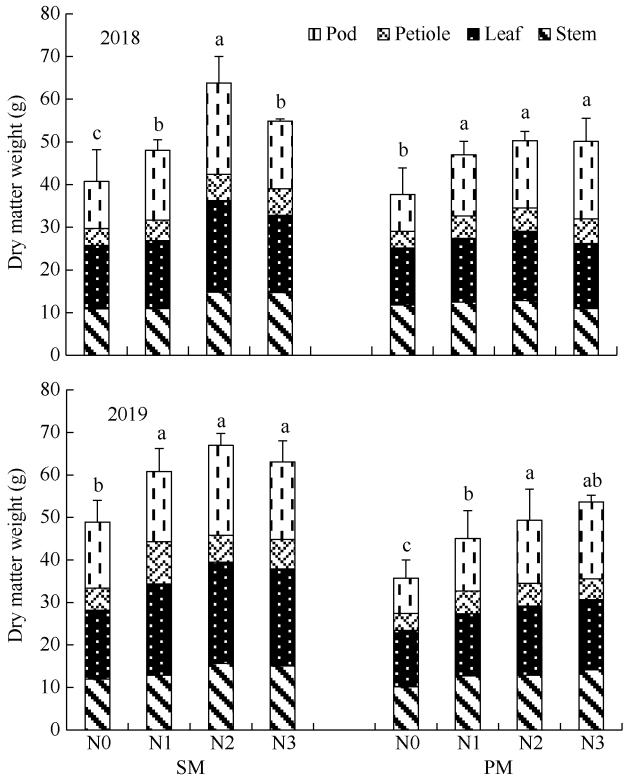

图 6　氮水平对间作绿豆干物质积累量的影响

Fig. 6　Effects of nitrogen treatments on the dry matter accumulation in intercropping mung bean

处理同图 2。柱上不同小写字母代表在同一间作模式下各施氮水平在 0.05 水平差异显著。

Treatments are the same as those given in Fig. 2. Values followed by different lowercase letters above the bars mean significant differences at the 0.05 probability level in the same cropping pattern.

表 2　氮水平对间作绿豆农艺性状的影响

Table 2　Effects of nitrogen treatments on the agronomic characters in intercropping mung bean

年份 Year	种植模式 Planting pattern	氮水平 N level (kg hm^{-2})	株高 Plant height (cm)	茎粗 Stem diameter (mm)	主茎节数 Nodes of main stem	主茎分枝数 Branches of main stem	单株荚数 Pods per plant
2018	SM	N0	60.40±6.15 a	7.58±1.25 a	9.80±0.84 a	5.00±0.00 c	52.80±2.77 c
		N1	65.40±7.81 a	7.77±0.44 a	10.40±1.34 a	5.80±1.10 bc	68.40±6.47 a
		N2	65.60±4.97 a	8.44±1.08 a	10.40±0.89 a	6.40±0.55 ab	67.60±1.41 a
		N3	63.00±4.62 a	8.76±0.87 a	9.20±1.30 a	7.00±0.00 a	57.60±5.57 b
	PM	N0	61.80±6.35 b	7.32±0.64 a	9.40±0.55 a	5.00±1.00 a	30.00±4.82 c
		N1	68.20±8.44 a	7.94±0.91 a	10.60±0.89 a	5.20±0.45 a	41.40±4.16 b
		N2	68.80±2.83 a	8.07±0.55 a	9.6±0.89 a	5.20±0.45 a	48.62±2.09 a
		N3	71.40±3.65 a	7.83±0.81 a	10.8±0.84 a	5.80±0.45 a	47.68±2.25 a
2019	SM	N0	63.86±4.01 a	7.79±0.43 a	10.20±0.71 a	5.60±0.45 a	48.20±5.85 c
		N1	64.60±4.93 a	7.99±0.83 a	11.00±0.71 a	5.60±1.10 a	68.60±1.48 a
		N2	67.20±1.73 a	8.63±0.91 a	11.00±0.89 a	6.80±0.45 a	63.00±6.15 ab
		N3	68.64±1.86 a	8.48±0.26 a	11.60±1.14 a	7.00±0.00 a	56.40±2.31 b
	PM	N0	55.08±4.16 c	6.92±0.45 a	9.40±1.22 a	5.00±0.00 a	25.40±5.12 b
		N1	66.20±3.10 b	7.81±0.47 a	10.80±0.84 a	5.00±0.71 a	39.00±5.61 a

(续表 2)

年份 Year	种植模式 Planting pattern	氮水平 N level (kg hm^{-2})	株高 Plant height (cm)	茎粗 Stem diameter (mm)	主茎节数 Nodes of main stem	主茎分枝数 Branches of main stem	单株荚数 Pods per plant
2019		N2	75.18±2.27 a	7.58±0.65 a	10.00±1.14 a	5.00±0.00 a	47.40±1.34 a
		N3	73.08±3.79 a	7.93±0.50 a	9.40±1.10 a	5.00±0.00 a	46.80±2.19 a
变异来源 Variation source							
年份 Year (Y)			NS	NS	NS	NS	*
种植模式 Planting pattern (P)			*	*	NS	**	**
氮水平 N level (N)			**	NS	NS	**	**
年份×种植模式 Y×P			NS	NS	*	NS	NS
年份×氮水平 Y×N			NS	NS	NS	NS	NS
种植模式×氮水平 P×N			**	NS	NS	*	**
年份×种植模式×氮水平 Y×P×N			NS	NS	NS	NS	NS

表中数据为平均值±标准误。同列数据后不同小写字母表示处理间差异达 0.05 显著水平。*: 在 0.05 水平差异显著; **: 在 0.01 水平差异显著; NS: 不显著。处理同图 2。

The data in the table are mean ± standard error. Values followed by different lowercase letters in the same column mean significant difference at the 0.05 probability level. *: significant difference at the 0.05 probability level; **: significant difference at the 0.01 probability level; NS: no significant difference. Treatments are the same as those given in Fig. 2.

到显著水平(P<0.05)。2 年试验绿豆农艺性状变化基本一致, 荚数的显著增加是氮肥对绿豆农艺性状的主要影响, 单、间作分别在 N1 和 N2 施氮水平下荚数达到最大。

2.6 氮水平对糜子和绿豆产量的影响

由表 3 可知, 种植模式、氮水平和种植模式与氮水平交互作用对百粒重和产量的影响差异极显著(P<0.01), 2 年绿豆百粒重和产量变化趋势基本一致。同一氮肥水平下, 间作绿豆百粒重和产量均小于单作, 单、间作分别在 N1 和 N2 处理下产量达到最大, 就单作而言, 2 年试验各处理产量均表现为 N1>N2>N3>N0, N1、N2 和 N3 处理下产量 2 年平均分别比 N0 增加 16.8%、9.5%和 3.8%, 百粒重增加 1.7%~5.7%; 就间作而言, 随氮肥增加百粒重和产量先增加后降低, 2018 年产量表现为 N2>N1>N3>N0, 2019 年产量表现为 N2>N3>N1>N0, N1、N2 和 N3 处理下产量 2 年平均分别比 N0 处理增加 9.3%、19.7%和 11.1%, 百粒重增加 1.1%~6.9%。施氮后间作糜子产量显著增加, 比 N0 处理 2 年平均增加 17.9%~38.6%, 2 年试验间作土地当量比均大于 1, 说明各处理表现为间作优势, 在 N2 处理下达到最大, 分别为 2.07 和 2.00。

表 3 氮水平对糜子和绿豆产量的影响

Table 3 Effects of nitrogen treatments on yield of proso millet and mung bean

年份 Year	种植模式 Planting pattern	氮水平 N level (kg hm^{-2})	百粒重 100-grain weight (g)	绿豆产量 Mung bean grain yield (kg hm^{-2})	糜子产量 Proso millet grain yield (kg hm^{-2})	土地当量比 Land equivalent ratio
2018	SM	N0	5.53±0.21 b	1069.3±114.2 b	4067.8±287.6 c	—
		N1	5.67±0.29 ab	1297.8±71.6 a	4400.8±287.1 c	—
		N2	5.83±0.14 a	1168.8±98.4 ab	4911.4±321.4 b	—
		N3	5.65±0.19 ab	1137.5±96.7 b	5631.6±206.7 a	—
	PM	N0	5.22±0.07 b	806.0±27.7 c	4240.2±152.5 c	1.81±0.14 b
		N1	5.61±0.35 a	853.7±23.7 b	5286.4±283.1 b	1.86±0.02 b
		N2	5.35±0.14 b	905.0±45.0 a	6331.8±386.2 a	2.07±0.14 a
		N3	5.28±0.19 b	812.0±11.8 bc	5120.1±354.1 b	1.63±0.07 c
2019	SM	N0	5.97±0.09 b	1198.7±69.8 b	4259.4±382.0 d	—
		N1	6.30±0.20 a	1350.5±35.1 a	4737.5±99.5 c	—
		N2	6.33±0.14 a	1315.5±58.0 a	5196.9±168.8 b	—

(续表 3)

年份 Year	种植模式 Planting pattern	氮水平 N level (kg hm^{-2})	百粒重 100-grain weight (g)	绿豆产量 Mung bean grain yield (kg hm^{-2})	糜子产量 Proso millet grain yield (kg hm^{-2})	土地当量比 Land equivalent ratio
2019		N3	6.04±0.22 b	1217.6±63.2 b	5646.9±234.1 a	—
	PM	N0	5.75±0.15 b	768.5±27.9 c	5043.8±241.0 d	1.84±0.18 a
		N1	6.11±0.19 a	867.7±41.9 b	5656.3±215.4 c	1.84±0.05 a
		N2	6.12±0.15 a	979.8±34.8 a	6531.3±403.3 a	2.00±0.08 a
		N3	5.81±0.22 b	937.9±57.1 a	6075.0±84.2 b	1.85±0.09 a
变异来源 Variation source						
年份 Year (Y)			**	**	**	*
种植模式 Planting pattern (P)			**	**	**	—
氮水平 N level (N)			**	**	**	NS
年份×种植模式 Y×P			NS	NS	**	—
年份×氮水平 Y×N			*	NS	NS	NS
种植模式×氮水平 P×N			*	**	**	—
年份×种植模式×氮水平 Y×P×N			NS	NS	*	—

表中数据为平均值±标准误。同列数据后不同小写字母表示处理间差异达 0.05 显著水平。*: 在 0.05 水平差异显著; **: 在 0.01 水平差异显著; NS: 不显著。处理同图 2。

The data in the table are mean ± standard error. Values followed by different lowercase letters in the same column mean significant differences at the 0.05 probability level. *: significant difference at the 0.05 probability level; **: significant difference at the 0.01 probability level; NS: no significant difference. Treatments are the same as those given in Fig. 2.

2.7 相关性分析

由图 7 各指标相关性分析可以看出, 单作绿豆 P_n 与 T_r、WUE、F_v/F_m、N_{mass} 表现为显著正相关关系, 但间作绿豆 P_n 与 F_v/F_m、N_{mass}、Φ_{PSII} 表现为显著正相关关系。单、间作绿豆产量与 P_n、T_r、F_v/F_m、N_{mass} 和百粒重表现为显著正相关关系, 且间作绿豆产量与 Φ_{PSII} 和单株叶面积之间也表现为显著正相关关系, 而与 NPQ 表现为极显著负相关关系。与单作相比, 间作模式下氮水平对绿豆光合特性和产量的影响主要表现在 Φ_{PSII} 和 NPQ 的变化上。

3 讨论

3.1 氮水平对间作绿豆叶片光合特性的影响

间作组合中, 大豆、花生等低位作物受玉米、燕麦等高位作物遮阴的影响, 长期处于生态位劣势, 导致净光合速率降低[2,23]。研究表明, 适量施氮增加作物净光合速率、蒸腾速率和叶绿素含量, 增大绿叶面积持续期, 延缓生育后期叶片衰老, 使产量增加[24-25]。本试验结果表明, 间作使绿豆叶片光合性能降低, 但 P_n 和 T_r 随施氮量增加先升高后降低, 这与前人的研究结果相似[26-27]。施氮后叶片 F_v/F_m、Φ_{PSII} 增加, 表明 PSII 反应中心活性增强, 光化学量子产量和光化学效率提高, NPQ 有所降低, 进一步说明 PSII 天线色素对光能的捕获效率增加, 以热能形式耗散的光能减少。间作绿豆 F_v/F_m、Φ_{PSII} 和 NPQ 均大于单作, 与 P_n 表现相反, 这与前人在遮阴对作物影响的研究结果基本一致[21,28]。叶片光截获能力和光破坏防御机制增强, 对弱光的利用能力提高, 光合性能得到有效调节, 这是施氮后间作绿豆生育后期光合速率增加的主要生理机制, 且间作的这种适应性调节强于单作。同时, 施氮还补充了因捕光组分氮比例提高而造成的叶片氮消耗, 缓解光合系统和叶片正常生长之间的氮素竞争, 进一步保证绿豆物质生产的正常进行[16]。王一等[21]研究表明, 遮阴时间延长会使 PSII 反应中心结构与功能受损程度增加, 过多施氮后绿豆叶片 P_n、F_v/F_m 和 Φ_{PSII} 均有所下降, 这可能是植株营养器官徒长, 分枝数增加, 冠层郁闭, 对光能的截获和吸收减少。另外, 高施氮量下糜子生长旺盛, 对绿豆的遮阴程度和时间增加, 作物种间竞争加剧, 低位绿豆群体内部环境恶化导致冠层结构不良, 叶片衰老而光合能力下降, PSII 反应中心结构与功能也受到一定程度损伤, F_v/F_m 和 Φ_{PSII} 降低, 进而影响其群体光合生产[24,29]。

3.2 氮水平对间作绿豆叶片氮素利用特征和产量的影响

氮素营养对叶片光合作用的调控表现在诸多方面, 包括叶面积大小, 叶片氮素、光合色素、蛋白质和非光化学组分含量等[30-31]。朱启林等[32-33]研究表

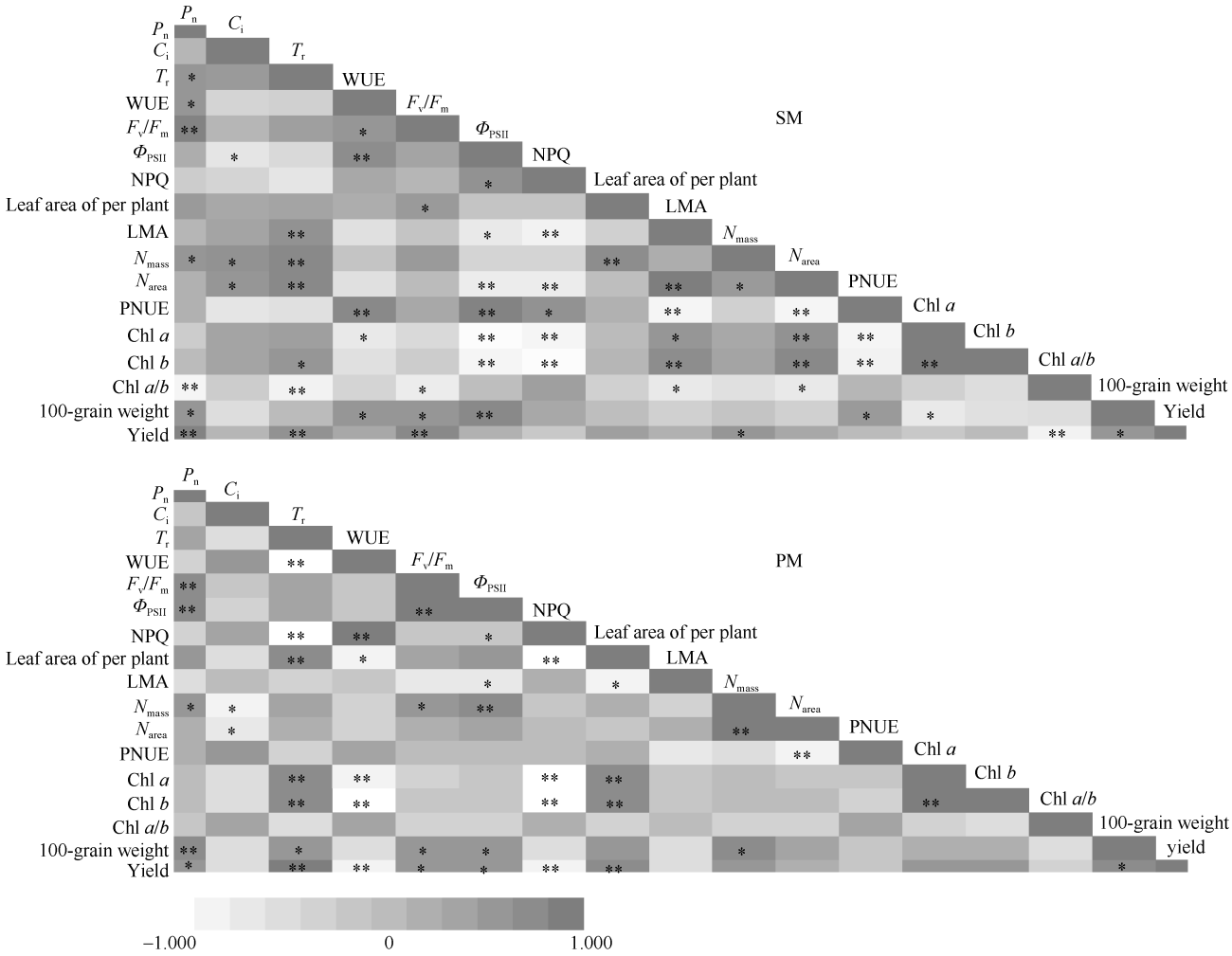

图 7 叶片光合特性及氮素利用特征与产量之间的相关性分析

Fig. 7 Correlation analysis of leaf photosynthetic and nitrogen utilization characteristics and yield

SM: 单作绿豆; PM: 间作绿豆。*: 在 0.05 水平显著相关; **: 在 0.01 水平显著相关。

SM: sole mung bean; PM: intercropping mung bean. *: significant correlation at the 0.05 probability level; **: significant correlation at the 0.01 probability level.

明, 单、间作玉米净光合速率与 N_{mass} 和 N_{area} 之间呈先升高后降低的指数关系, 施氮会降低植物的 PNUE。Trouwborst 等[34]发现, 植物处于遮阴逆境时, 叶片氮素向光能利用系统的分配比例降低, 而会将更多的氮分配到捕光系统中。间作会使低位作物产量降低[6,29], 但在一定范围内施用氮肥会使产量增加[35-36]。本试验条件下, 施氮后绿豆 PNUE 下降, 与前人的研究结果基本一致[16,37], 表明氮素在光合器官中羧化系统和生物力能学组分中的分配比例的降低, 并且间作绿豆 CO_2 供应不足, 一些光合蛋白闲置而无法发挥其功能, 使 PNUE 与氮素含量呈现负相关[37-39], 但对于光系统中氮素分配的定量分析有待进一步深入探讨。间作使绿豆产量显著降低, 但施氮处理下单、间作荚数比 N0 处理 2 年平均分别增加 12.9%~35.0% 和 45.2%~72.3%, 产量增加 3.8%~16.8%和 9.3%~19.7%, 间作绿豆产量与 P_n、T_r、单株叶面积、Φ_{PSII} 表现为显著正相关关系, 表明光合特性的增强和叶片氮素合理的利用是后期产量形成的关键。此外, 较高耐受环境胁迫能力的植物往往具有较低 PNUE 和较高的叶片寿命[40], 施氮增加绿叶面积和叶绿素含量, Chl *b* 含量的比例增加, Chl *b* 能够利用漫射光中较多的蓝紫光, 延缓叶片衰老, 并且植株茎秆变粗, 抗倒伏能力增强, 提高植株对弱光的捕获能力[26,41]。由此可见, 绿豆对糜子遮阴造成的弱光环境具有一定的自我调节能力, 适宜氮肥对这种自我调节有明显的改善, 使间作逆境胁迫减小, 促进荚果形成并转化为产量。

过量施氮后肥料后效缓释效应延长, 群体发育

动态相对滞后造成贪青晚熟, 并且株高的增加容易造成后期倒伏, 造成产量降低[42-43]。本试验条件下, 随施氮量增加间作绿豆百粒重和产量表现为先增加后降低的趋势, 单、间作绿豆在 N1、N2 处理下产量最高, 造成这种差异的主要原因是单作绿豆在 N1 条件下 P_n、T_r、F_v/F_m和 Φ_{PSII}等光合特性指标最高, 过量施氮对其光合作用有所抑制, 而间作绿豆群体由于存在种间竞争、高位糜子遮阴等环境因素的影响, 需要较多的氮素满足自身生长发育。LER 是评价间作系统优劣的重要指标[44], 2 年试验间作各处理 LER 为 1.63~2.07, LER 均大于 1, 说明糜子/绿豆间作能够提高农田土地利用效率。适量施氮可降低低位绿豆的减产幅度, 在一定程度上缓解遮阴对其造成的负效应, 使间作系统产量增加, 进一步提高土地生产力, 氮肥施用量超过一定水平后, 间作增产效应减弱, 因此, 适宜施氮量与间作模式相结合是高效利用土地资源的重要条件。本研究探讨了糜子绿豆间作系统中前期外施氮肥后糜子遮阴对低位绿豆叶片光合特性的影响, 为间作模式和肥料相结合提供了一定的理论依据, 外施氮素对于间作绿豆根系根瘤生长及土壤氮素利用的影响等方面的变化特征需要进一步探讨。在提高产量的同时, 结合生产实践减少肥料施用和提高肥料利用率是现代农业可持续发展的关键。

4　结论

施氮处理显著提高绿豆光合特性, 改善叶绿素荧光参数, 增强间作遮阴时绿豆叶片 PSII 反应中心活性, 有效调节了间作叶片光合系统对遮阴的适应性反应, 且间作叶片光合性能对氮肥的响应要大于单作。此外, 施氮增加绿豆绿叶面积和有效荚数, 延缓叶片衰老, 干物质积累量和产量增加, 但施氮量为 135 kg hm^{-2} 时光合性能降低, 对遮阴逆境的缓解效果减弱, 产量降低。糜子/绿豆间作模式 LER 大于 1, 具有较高的土地生产力, 可作为西北旱作农业区推广种植模式, 在 90 kg hm^{-2} 施氮量下间作绿豆叶片光合特性表现最好, 产量比不施氮增加 19.7%, LER 最大, 是其适宜施氮水平。

References

[1] 苏本营, 陈圣宾, 李永庚, 杨文钰. 间套作种植提升农田生态系统服务功能. 生态学报, 2013, 33: 4505–4514.
Su B Y, Chen S B, Li Y G, Yang W Y. Intercropping enhances the farmland ecosystem services. *Acta Ecol Sin*, 2013, 33: 4505–4514 (in Chinese with English abstract).

[2] 冯晓敏, 杨永, 任长忠, 胡跃高, 曾昭海. 豆科–燕麦间作对作物光合特性及籽粒产量的影响. 作物学报, 2015, 41: 1426–1434.
Feng X M, Yang Y, Ren C Z, Hu Y G, Zeng Z H. Effects of legumes intercropping with oat on photosynthesis characteristics of and grain yield. *Acta Agron Sin*, 2015, 41: 1426–1434 (in Chinese with English abstract).

[3] 李玉英, 余常兵, 孙建好, 李春杰, 李隆, 程序. 蚕豆/玉米间作系统经济生态施氮量及对氮素环境承受力. 农业工程学报, 2008, 24(3): 223–227.
Li Y Y, Yu C B, Sun J H, Li C J, Li L, Cheng X. Nitrogen environmental endurance and economically-ecologically appropriate amount of nitrogen fertilizer in faba bean/maize intercropping system. *Trans CSAE*, 2008, 24(3): 223–227 (in Chinese with English abstract).

[4] Li L, Sun J H, Zhang F S, Li X L, Yang S C, Rengel Z. Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping: I. Yield advantage and interspecific interactions on nutrients. *Field Crops Res*, 2001, 71: 173–181.

[5] Reddy M S, Willey R W. Growth and resource use studies in an intercrop of pearl millet/groundnut. *Field Crops Res*, 1981, 4: 13–24.

[6] Chapagain T, Riseman A. Barley-pea intercropping: effects on land productivity, carbon and nitrogen transformations. *Field Crops Res*, 2014, 166: 18–25.

[7] 王田涛, 王琦, 王惠珍, 张恩和. 连作条件下间作模式对当归生长特性和产量的影响. 草业学报, 2013, 22(2): 54–61.
Wang T T, Wang Q, Wang H Z, Zhang E H. Effects of intercropping patterns on growth characters and yield of *Angelica sinensis* under continuous mono-cropping planting. *Acta Pratacult Sin*, 2013, 22(2): 54–61 (in Chinese with English abstract).

[8] 宫香伟, 李境, 马洪驰, 陈光华, 王孟, 杨璞, 高金锋, 冯佰利. 黄土高原旱作区糜子-绿豆带状种植农田小气候特征与产量效应. 应用生态学报, 2018, 29: 3256–3266.
Gong X W, Li J, Ma H C, Chen G H, Wang M, Yang P, Gao J F, Feng B L. Field microclimate and yield for proso millet intercropping with mung bean in the dryland of Loess Plateau, Northwest China. *Chin J Appl Ecol*, 2018, 29: 3256–3266 (in Chinese with English abstract).

[9] 党科, 宫香伟, 陈光华, 赵冠, 刘龙, 王洪露, 杨璞, 冯佰利. 糜子绿豆带状种植下糜子的氮素积累、代谢及产量变化. 作物学报, 2019, 45: 1880–1890.
Dang K, Gong X W, Chen G H, Zhao G, Liu L, Wang H L, Yang P, Feng B L. Nitrogen accumulation,metabolism, and yield of proso millet in proso millet mung bean intercropping systems. *Acta Agron Sin*, 2019, 45: 1880–1890 (in Chinese with English abstract).

[10] 陈剑, 敖雪, 姚兴东, 薛仁风, 赵阳, 王英杰, 李韬, 金晓梅, 庄艳, 葛维德, 闫广艳. 施氮肥对不同株型赤豆品种光合生理、干物积累及产量的影响. 江苏农业科学, 2018, 46(23): 90–93.
Chen J, Ao X, Yao X D, Xue R F, Zhao Y, Wang Y J, Li T, Jin X M, Zhuang Y, Ge W D, Yan G Y. Effects of nitrogen application on photosynthetic physiology, dry matter accumulation and yield of different plant-types of adzuki beans. *Jiangsu Agric Sci*, 2018, 46(23): 90–93 (in Chinese with English abstract).

[11] 叶卫军, 杨勇, 张丽亚, 田东丰, 张玲玲, 周斌. 氮肥用量对绿豆品种皖科绿 3 号农艺性状及氮肥利用率的影响. 作物杂志, 2019, (3): 137–141.
Ye W J, Yang Y, Zhang L Y, Tian D F, Zhang L L, Zhou B. Effects of nitrogen on agronomic traits and nitrogen use efficiency of mung bean cultivar Wankelü 3. *Crops*, 2019, (3): 137–141 (in Chinese with English abstract).

[12] 司玉坤, 齐欣, 武庆慧, 白红波, 赵亚南, 叶优良, 黄玉芳. 氮、磷肥用量对豫中地区大豆产量、干物质及经济效益的影响. 中国农学通报, 2019, 35(15): 30–34.
Si Y K, Qi X, Wu Q H, Bai H B, Zhao Y N, Ye Y L, Huang Y F. Nitrogen and phosphorus fertilizer rate affect yield, dry matter and economic benefits of soybean in central Henan. *Chin Agric Sci Bull*, 2019, 35(15): 30–34 (in Chinese with English abstract).

[13] 贾曼曼, 肖靖秀, 汤利, 郑毅. 不同施氮量对小麦蚕豆间作作物产量及其光合特征的影响. 云南农业大学学报(自然科学), 2017, 32(2): 350–357.
Jia M M, Xiao J X, Tang L, Zheng Y. Effects of nitrogen supply on yields and photosynthesis characteristics of crops in wheat and broad bean intercropping. *J Yunnan Agric Univ* (Nat Sci), 2017, 32(2): 350–357 (in Chinese with English abstract).

[14] 林松明, 张正, 南镇武, 孟维伟, 李林, 郭峰, 万书波. 施钙对不同种植模式下花生产量及生理特性的影响. 华北农学报, 2019, 34(3): 111–118.
Lin S M, Zhang Z, Nan Z W, Meng W W, Li L, Guo F, Wan S B. Effects of calcium application on peanut yield and physiological characteristics under different planting patterns. *Acta Agric Boreali-Sin*, 2019, 34(3): 111–118 (in Chinese with English abstract).

[15] Vos J, Pelvander P. Effects of partial shading of the potato plant on photosynthesis of treated leaves, leaf area expansion and allocation of nitrogen and dry matter in component plant parts. *Eur J Agron*, 2001, 14: 209–220.

[16] 唐敬超, 史作民, 罗达, 刘世荣. 遮荫处理对灰木莲幼苗叶片光合氮利用效率的影响. 生态学报, 2017, 37: 7493–7502.
Tang J C, Shi Z M, Luo D, Liu S R. Photosynthetic nitrogen-use efficiency of *Manglietia glauca* seedling leaves under different shading levels. *Acta Ecol Sin*, 2017, 37: 7493–7502 (in Chinese with English abstract).

[17] 林洪鑫, 潘晓华, 袁展汽, 肖运萍, 刘仁根, 汪瑞清, 吕丰娟. 施氮和木薯-花生间作对木薯养分积累和系统养分利用的影响. 中国农业科学, 2018, 51: 3275–3290.
Lin H X, Pan X H, Yuan Z Q, Xiao Y P, Liu R G, Wang R Q, Lyu F J. Effects of nitrogen application and cassava-peanut intercropping on cassava nutrient accumulation and system nutrient utilization. *Sci Agric Sin*, 2018, 51: 3275–3290 (in Chinese with English abstract).

[18] 褚军, 薛建辉, 吴殿鸣, 金梅娟, 吴永波. 不同施氮水平下杨树–苋菜间作系统对土壤氮素流失的影响. 应用生态学报, 2014, 25: 2591–2597.
Chu J, Xue J H, Wu D M, Jin M J, Wu Y B. Effects of poplar–amaranth intercropping system on the soil nitrogen loss under different nitrogen applying levels. *Chin J Appl Ecol*, 2014, 25: 2591–2597 (in Chinese with English abstract).

[19] 覃潇敏, 郑毅, 汤利, 龙光强. 施氮对间作条件下玉米、马铃薯根际微生物群落功能多样性的影响. 农业资源与环境学报, 2015, 32: 354–362.
Qin X M, Zheng Y, Tang L, Long G Q. Effects of nitrogen application rates on rhizosphere microbial community functional diversity in maize and potato intercropping. *J Agric Res Environ*, 2015, 32: 354–362 (in Chinese with English abstract).

[20] 杨文亭, 李志贤, 赖健宁, 吴鹏, 章莹, 王建武. 甘蔗-大豆间作和减量施氮对甘蔗产量和主要农艺性状的影响. 作物学报, 2014, 40: 556–562.
Yang W T, Li Z X, Lai J N, Wu P, Zhang Y, Wang J W. Effects of sugarcane-soybean intercropping and reduced nitrogen application on yield and major agronomic traits of sugarcane. *Acta Agron Sin*, 2014, 40: 556–562 (in Chinese with English abstract).

[21] 王一, 张霞, 杨文钰, 孙歆, 苏本营, 崔亮. 不同生育时期遮阴对大豆叶片光合和叶绿素荧光特性的影响. 中国农业科学, 2016, 49: 2072–2081.
Wang Y, Zhang X, Yang W Y, Sun X, Su B Y, Cui L. Effect of shading on soybean leaf photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristics at different growth stages. *Sci Agric Sin*, 2016, 49: 2072–2081 (in Chinese with English abstract).

[22] 宫香伟, 党科, 李境, 罗艳, 赵冠, 杨璞, 高小丽, 高金锋, 王鹏科, 冯佰利. 糜子绿豆间作模式下糜子光合物质生产及水分利用效率. 中国农业科学, 2019, 52: 4139–4153.
Gong X W, Dang K, Li J, Luo Y, Zhao G, Yang P, Gao X L, Gao J F, Wang P K, Feng B L. Effects of different intercropping patterns on photosynthesis production characteristics and water use efficiency of proso millet. *Sci Agric Sin*, 2019, 52: 4139–4153 (in Chinese with English abstract).

[23] 焦念元, 宁堂原, 赵春, 王芸, 史忠强, 侯连涛, 付国占, 江晓东, 李增嘉. 玉米花生间作复合体系光合特性的研究. 作物学报, 2006, 32: 917–923.
Jiao N Y, Ning T Y, Zhao C, Wang Y, Shi Z Q, Hou L T, Fu G Z, Jiang X D, Li Z J. Characters of photosynthesis in intercropping system of maize and peanut. *Acta Agron Sin*, 2006, 32: 917–923 (in Chinese with English abstract).

[24] 吕丽华, 赵明, 赵久然, 陶洪斌, 王璞. 不同施氮量下夏玉米冠层结构及光合特性的变化. 中国农业科学, 2008, 41: 2624–2632.
Lyu L H, Zhao M, Zhao J R, Tao H B, Wang P. Canopy structure and photosynthesis of summer maize under different nitrogen fertilizer application rates. *Sci Agric Sin*, 2008, 41: 2624–2632 (in Chinese with English abstract).

[25] 张艾英, 郭二虎, 王军, 范惠萍, 李瑜辉, 王丽霞, 王秀清, 程丽萍. 施氮量对春谷农艺性状、光合特性和产量的影响. 中国农业科学, 2015, 48: 2939–2951.
Zhang A Y, Guo E H, Wang J, Fan H P, Li Y H, Wang L X, Wang X Q, Cheng L P. Effect of nitrogen application rate on agronomic, photosynthetic characteristics and yield of spring foxtail millet. *Sci Agric Sin*, 2015, 48: 2939–2951 (in Chinese with English abstract).

[26] Seemann P J R. Photosynthetic induction state of leaves in a soybean canopy in relation to light regulation of ribulose-1-5-bisphosphate carboxylase and stomatal conductance. *Plant Physiol*, 1990, 94: 628–633.

[27] 张绪成, 上官周平. 施氮对旱地不同抗旱性小麦叶片光合色素含量与荧光特性的影响. 核农学报, 2007, 21: 299–304.
Zhang X C, Shangguan Z P. Effect of nitrogen fertilization on photosynthetic pigment and fluorescence characteristics in leaves of winter wheat cultivars on dryland. *J Nucl Agric Sci*, 2007, 21:

299–304 (in Chinese with English abstract).

[28] 荣立苹, 李倩中, 李淑顺, 唐玲. 遮荫对鸡爪槭生理特性和叶绿素荧光参数的影响. 西南农业学报, 2013, 26(1): 144–147.
Rong L P, Li Q Z, Li S S, Tang L. Effects of shading on physiological characteristics and chlorophyll fluorescence parameters of acer palmatum. *Southwest China J Agric Sci*, 2013, 26(1): 144–147 (in Chinese with English abstract).

[29] 崔亮, 苏本营, 杨峰, 杨文钰. 不同玉米-大豆带状套作组合条件下光合有效辐射强度分布特征对大豆光合特性和产量的影响. 中国农业科学, 2014, 47: 1489–1501.
Cui L, Su B Y, Yang F, Yang W Y. Effects of photo-synthetically active radiation on photosynthetic characteristics and yield of soybean in different maize/soybean relay strip intercropping systems. *Sci Agric Sin*, 2014, 47: 1489–1501 (in Chinese with English abstract).

[30] Monneveux P, Zaidi P H, Sanchez C. Population density and low nitrogen affects yield-associated traits in tropical maize. *Crop Sci*, 2005, 45: 535.

[31] Chonggang X, Rosie F, Wullschlegar S D, Wilson C J, Cai M, McDowell N G. Toward a mechanistic modeling of nitrogen limitation on vegetation dynamics. *PLoS One*, 2012, 7: e37914.

[32] 朱启林, 向蕊, 汤利, 龙光强. 间作对氮调控玉米光合速率和光合氮利用效率的影响. 植物生态学报, 2018, 42: 672–680.
Zhu Q L, Xiang R, Tang L, Long G Q. Effects of intercropping on photosynthetic rate and net photosynthetic nitrogen use efficiency of maize under nitrogen addition. *Chin J Plant Ecol*, 2018, 42: 672–680 (in Chinese with English abstract).

[33] 黎星, 程慧煌, 曾勇军, 汪勇, 商庆银. 不同时期超级杂交稻光合特性及氮素利用效率研究. 核农学报, 2019, 33: 978–987.
Li X, Cheng H H, Zeng Y J, Wang Y, Shang Q Y. Study on photosynthetic characteristics and nitrogen utilization efficiency of super hybrid rice in different periods. *J Nucl Agric Sci*, 2019, 33: 978–987 (in Chinese with English abstract).

[34] Trouwborst G, Hogewoning S W, Harbinson J, Van Ieperen W. Photosynthetic acclimation in relation to nitrogen allocation in cucumber leaves in response to changes in irradiance. *Physiol Plant*, 2011, 142: 157–169.

[35] 张玉春, 杨敏, 周齐齐, 刘希伟, 李彦生, 张敏, 蔡瑞国. 不同氮肥用量条件下花后遮光对冬小麦干物质和氮素积累与转运的影响. 华北农学报, 2018, 33(3): 203–209.
Zhang Y C, Yang M, Zhou Q Q, Liu X W, Li Y S, Zhang M, Cai R G. Effects of shading after anthesis under different nitrogen application rates on dry matter and nitrogen accumulation and translocation in winter wheat. *Acta Agric Boreali-Sin*, 2018, 33(3): 203–209 (in Chinese with English abstract).

[36] 王小春, 杨文钰, 邓小燕, 张群, 雍太文, 刘卫国, 杨峰, 毛树明. 玉米/大豆和玉米/甘薯模式下玉米光合特性差异及氮肥调控效应. 中国生态农业学报, 2015, 23: 141–149.
Wang X C, Yang W Y, Deng X Y, Zhang Q, Yong W T, Liu W G, Yang F, Mao S M. Differences in maize photosynthetic characteristics and nitrogen regulation effects in maize/soybean and maize/sweet potato relay strip intercropping. *Chin J Eco-Agric*, 2015, 23: 141–149 (in Chinese with English abstract).

[37] 刘涛, 鲁剑巍, 任涛, 李小坤, 丛日环. 不同氮水平下冬油菜光合氮利用效率与光合器官氮分配的关系. 植物营养与肥料学报, 2016, 22: 518–524.
Liu T, Lu J W, Ren T, Li X K, Cong R H. Relationship between photosynthetic nitrogen use efficiency and nitrogen allocation in photosynthetic apparatus of winter oilseed rape under different nitrogen levels. *Plant Nutr Fert Sci*, 2016, 22: 518–524 (in Chinese with English abstract).

[38] 曾建敏, 彭少兵, 崔克辉, 黄见良. 热带水稻光合特性及氮素光合效率的差异研究. 作物学报, 2006, 32: 1817–1822.
Zeng J M, Peng S B, Cui K H, Hang J L. Genetic variation in photosynthetic characteristics and photosynthetic nitrogen use efficiency in tropical rice. *Acta Agron Sin*, 2006, 32: 1817–1822 (in Chinese with English abstract).

[39] Millard P, Sommerkom M, Gwen-Aelle G. Environmental change and carbon limitation in trees: a biochemical, ecophysiological and ecosystem appraisal. *New Phytol*, 2007, 175: 11–28.

[40] Reich P B, Walters M B. Photosynthesis-nitrogen relations in Amazonian tree species: II. Variation in nitrogen vis-a-vis specific leaf area influences mass- and area-based expressions. *Oecologia*, 1994, 97: 73–81.

[41] Gong W Z, Jiang C D, Wu Y S, Chen H H, Liu W Y, Yang W Y. Tolerance vs. avoidance: two strategies of soybean (*Glycine max*) seedlings in response to shade in intercropping. *Photosynthetica*, 2015, 53: 259–268.

[42] Hu Y J, Zhang H C. Optimizing nitrogen management strategy under wheat straw incorporation for higher rice production and nitrogen use efficiency. *J Plant Nutr*, 2016, 40: 492–505.

[43] 楚光红, 章建新, 唐长青, 高阳, 傅积海. 密度对中熟春大豆冠层结构及光合特性的影响. 中国农学通报, 2018, 34(18): 16–22.
Chu G H, Zhang J X, Tang C Q, Gao Y, Fu J H. Density affecting canopy structure and photosynthetic characteristics of medium maturity spring soybean. *Chin Agric Sci Bull*, 2018, 34(18): 16–22 (in Chinese with English abstract).

[44] 高砚亮, 孙占祥, 白伟, 冯良山, 杨宁, 蔡倩, 冯晨, 张哲. 辽西半干旱区玉米与花生间作对土地生产力和水分利用效率的影响. 中国农业科学, 2017, 50: 3702–3713.
Gao Y L, Sun Z X, Bai W, Feng L S, Yang N, Cai Q, Feng C, Zhang Z. Productivity and water use efficiency of maize-peanut intercropping systems in the semi-arid region of western Liaoning province. *Sci Agric Sin*, 2017, 50: 3702–3713 (in Chinese with English abstract).