中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

花生与玉米和芝麻间作的产量及经济效益分析

武岩岩，汪江涛，李雪，孙增光，郭彬彬，尹飞，焦念元

引用本文:
武岩岩, 汪江涛, 李雪, 等. 花生与玉米和芝麻间作的产量及经济效益分析[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(8): 1285–1295.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.210056

(向下翻页，阅读全文)

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

江西红壤旱地玉米||大豆间作模式对作物产量及种间关系的影响

Yields and interspecific relationship of the maize–soybean intercropping system in the upland red soil of Jiangxi Province

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(7): 1127–1137 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200882

光照亏缺对橡胶–作物农林复合系统中作物生产力的影响

Effect of light deficiency on productivity of intercrops in rubber–crop agroforestry system

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(5): 680–689 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190858

玉米间作花生冠层微环境变化及其与荚果产量的相关性研究

Canopy microenvironment change of peanut intercropped with maize and its correlation with pod yield

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(1): 31–41 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190525

玉米/大豆、玉米/花生间作对作物氮素 吸收及结瘤固氮的影响

Effects of maize/soybean and maize/peanut intercropping systems on crops nitrogen uptake and nodulation nitrogen fixation

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(8): 1183–1194 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.181055

化学调控和施磷对玉米/花生间作磷吸收利用和间作优势的影响

Effects of chemical regulation and P fertilization on P absorption and utilization in maize/peanut intercropping system

中国生态农业学报. 2015(9): 1093–1101 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.150155

中国生态农业学报(中英文) 2021 年 8 月 第 29 卷 第 8 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Aug. 2021, 29(8): 1285−1295

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.210056

武岩岩, 汪江涛, 李雪, 孙增光, 郭彬彬, 尹飞, 焦念元. 花生与玉米和芝麻间作的产量及经济效益分析[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(8): 1285−1295

WU Y Y, WANG J T, LI X, SUN Z G, GUO B B, YIN F, JIAO N Y. Yield and economic benefits of peanut intercropping with maize and sesame[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(8): 1285−1295

花生与玉米和芝麻间作的产量及经济效益分析*

武岩岩, 汪江涛, 李 雪, 孙增光, 郭彬彬, 尹 飞, 焦念元**

(河南科技大学农学院/河南省旱地农业工程技术研究中心 洛阳 471023)

摘 要: 为明确不同间作体系对花生产量形成和经济效益的影响, 本试验于 2018—2019 年, 设置玉米||花生(M||P)、芝麻||花生(S||P)、单作花生(SP)、单作玉米(SM)和单作芝麻(SS)5 个种植模式, 研究了不同种植模式对花生功能叶光合-光强响应曲线、干物质积累、种间竞争力指数、产量及经济效益的影响。结果表明: 1)与玉米||花生体系中的间作花生相比, 芝麻||花生体系中间作花生的最大净光合速率(P_{nmax})、产量和最大干物质积累量分别显著提升了 18.0%~20.7%、64.2%~70.0%、26.5%~31.8% (P<0.05)。2)间作芝麻干物质积累进入缓增期后 16~19 d, 芝麻||花生中间作花生仍处于干物质积累快增期, 芝麻和花生干物质积累快增期互相错开, 而玉米||花生体系中玉米和花生的干物质积累快增期重叠; 成熟期, 间作花生相对于芝麻、玉米的竞争力指数分别为 –2.31~–2.06 和–4.68~–4.34。说明间作花生相对于芝麻的竞争力比相对于玉米的竞争力强。3)芝麻||花生较玉米||花生的土地当量比提高 3.0%~4.0%, 且大于 1; 经济效益显著提高 16.7%~50.8%(P<0.05), 达 2.3 万~2.4 万元·hm^{-2}。研究结果表明芝麻||花生较玉米||花生, 提高了土地利用率、产量和收益, 其机理在于芝麻||花生较玉米||花生能错开作物间干物质积累的快增期, 降低高、矮两种作物的种间竞争强度, 提高间作花生冠层光强和净光合速率。

关键词: 芝麻||花生; 玉米||花生; 种间竞争力; 产量; 经济效益

中图分类号: S344.2 开放科学码(资源服务)标识码(OSID):

Yield and economic benefits of peanut intercropping with maize and sesame*

WU Yanyan, WANG Jiangtao, LI Xue, SUN Zengguang, GUO Binbin, YIN Fei, JIAO Nianyuan**

(College of Agriculture, Henan University of Science and Technology / Henan Dryland Agricultural Engineering Technology Research Center, Luoyang 471023, China)

Abstract: Peanuts are an important oil crop in China. Intercropping peanuts with maize or sesame improves the field microclimate and the utilization of light and heat resources and increases yield and income. Different high crops in the intercropping systems have different effects on the canopy light intensity, photosynthetic capacity of the functional leaves, dry matter accumulation, and yield of intercropping crops. The purpose of this study was to optimize the peanut intercropping system and to select suitable crops for peanut intercropping. To assess the effects of different intercropping systems on peanut yield and the economic benefits, a field experiment was conducted in 2018 and 2019 with five treatments: maize intercropping with peanut (maize||peanut, M||P), sesame intercropping with peanut (sesame||peanut, S||P), monocultured peanut (SP), monocultured maize (SM), and monocultured sesame (SS). The different planting patterns were assessed for their effects on the interspecific competition index, dry matter ac-

* 国家自然科学基金项目(U1404315)、河南省自然科学基金项目(182300410014)和河南省科技攻关项目(182102110180)资助

** 通信作者: 焦念元, 主要从事间套作资源高效利用及生理生态机理研究。E-mail: jiaony1@163.com
武岩岩, 主要从事花生与玉米、芝麻间作生理生态研究。E-mail: 18437957962@163.com

收稿日期: 2021-01-28 接受日期: 2021-03-26

* The study was supported by the National Natural Science Foundation of China (U1404315), the Natural Science Foundation of Henan Province (182300410014) and the Key Technology Projects of Henan Province (182102110180).

** Corresponding author, E-mail: jiaony1@163.com

Received Jan. 28, 2021; accepted Mar. 26, 2021

cumulation, photosynthetic rate response curves to light in the functional leaves, yield, and the economic benefits of peanuts. The results showed that: 1) compared with intercropped peanuts in maize||peanut, the maximum net photosynthetic rate (P_{nmax}), yield, and maximum dry matter accumulation of intercropped peanuts in sesame||peanut increased by 18.0%–20.7%, 64.2%–70.0%, and 26.5%–31.8%, respectively. 2) When the dry matter accumulation of intercropped sesame entered the period of 16–19 days after the slow-growing period, the intercropped peanuts in sesame||peanut were still in the period of rapid dry matter accumulation. The fast growth periods of dry matter accumulation of sesame and peanut in sesame||peanut intercropping system staggered each other, however, those of maize and peanuts in maize||peanut intercropping system were overlapped. At the mature stage, the competitiveness index of peanuts against sesame and maize in the intercropping systems was –2.31~–2.06 and –4.68~–4.34, respectively. This indicates that the competitiveness of intercropped peanuts to sesame is stronger than that to maize. 3) The land-equivalent ratio of sesame||peanut intercropping system increased by 3.0%–4.0% compared with maize||peanut intercropping system, and those of both systems were greater than 1. The economic benefits of sesame||peanut intercropping system significantly increased by 16.7%–50.8% compared with maize||peanut intercropping system, reaching 23 000–24 000 ¥·hm^{-2}. Compared with maize||peanut intercropping system, sesame||peanut intercropping system improved the land utilization rate, yield, and income. Sesame||peanut intercropping system staggered the rapid growth periods of dry matter accumulation of two crops, reduced the intensity of interspecific competition between high and low crops, and improved the canopy light intensity and net photosynthetic rate of intercropped peanuts.

Keywords: Sesame||peanut intercropping; Maize||peanut intercropping; Interspecific competitiveness; Yield; Economic benefits

间作是一种具有显著优势的种植模式[1-3]，在中国、印度、东南亚、拉丁美洲等地区应用普遍[4]。良好的间作体系可以维持和提高群体的生物多样性[5]，充分利用光、热、水、肥等资源，减少肥料投入，增加单位土地面积产量[6]。花生(*Arachis hypogaea* L.)与其他作物间作是生产上常见的种植模式。已有研究发现，玉米(*Zea mays* L.)与花生[7]、芝麻(*Sesamum indicum* L.)与花生[8]等作物间作行比为 2∶4 时效果表现良好。Wang 等[8]研究显示，芝麻与花生间作行比为 2∶4 时，与其他间作行比相比，芝麻单株蒴果数和产量最高。姚远等[7]研究表明玉米与花生间作行比为 2∶4 时，对玉米产量影响不显著，间作体系花生产量提高，其经济效益明显高于玉米与花生的其他间作行比。在花生与芝麻和玉米的间作体系中，间作可充分发挥芝麻、玉米的增产潜力，在保证高位作物产量的前提下，通过多收花生来提高间作体系对土地的利用效率。而在间作体系中，如何提高花生的产量是进一步提高间作体系土地利用效率的关键。与单作花生相比，玉米||花生体系中高位作物降低了间作花生的冠层光照强度[9]和功能叶的光合能力[10-11]，从而降低间作花生的产量，成为高矮作物间作体系产量和收益进一步提高的限制因素[12-14]。因此，选择合适的作物同花生间作种植，减小高位作物对间作花生的遮阴程度，是解决这一问题的有效方法。相比玉米，芝麻具有株高低、冠层小的特点，当与花生间作时，芝麻对花生的遮阴程度小，利于改善间作花生冠层的微环境，促进间作花生的光能吸收利用能力和产量的形成。但芝麻||花生是否会有利于间作体系的产量和收益的提高？具体如何影响间作花生产量形成，其机理是什么？目前还鲜有报道。因此，本研究以玉米||花生、芝麻||花生 2∶4 模式为研究对象，主要研究了间作花生的冠层光照强度、功能叶光合-光强响应曲线、干物质积累、间作体系土地当量比和经济效益，分析间作花生干物质积累特点和间作花生竞争力指数，明确其中机理。

1 材料与方法

1.1 材料和样地

试验于 2018—2019 年在河南科技大学开元校区农场(112°16′~112°37′E，34°32′~34°45′N)进行。该区属温带季风性气候，全年日照时数 2141.6 h，年平均降水量约 600 mm，无霜期为 215~219 d。土壤为黄潮土，中壤。0~20 cm 耕层，土壤 pH 为 7.56，容重为 1.35 g·cm^{-3}，有机质含量为 10.72 g·kg^{-1}，速效磷和碱解氮含量分别为 6.46 mg·kg^{-1} 和 33.86 mg·kg^{-1}，田间灌溉系统良好。

供试品种，花生为‘花育 16 号’，玉米为‘郑单 958’，芝麻为‘豫芝 8 号’。共设置 5 个处理，分别为玉米||花生(M||P)、芝麻||花生(S||P)、单作花生(SP)、单作玉米(SM)和单作芝麻(SS)，每个处理重复 3 次。单作花生行距、株距分别为 30 cm 和 20 cm，单作玉米行距、株距分别为 60 cm 和 25 cm，单作芝麻行距、株距分别为 40 cm 和 25 cm。两间作体系均采用当地产量效益较佳的 2∶4 模式，即 2 行玉米或 2 行芝麻与 4 行花生间作种植，玉米||花生和芝麻||花生体系中玉米、芝麻宽行行距均为 160 cm，窄行行距 40 cm，株距 20 cm，玉米或芝麻与花生间的行距为 35 cm，间作花生行距和株距与单作花生相同。花生均为每穴双

株, 芝麻、玉米为每穴单株。玉米、芝麻施用纯氮为 180 kg·hm^{-2}, 基追比为 1∶1, 追肥分别在玉米大口期、芝麻开花结蒴期穴施; 花生施用纯氮为 90 kg·hm^{-2}。玉米、芝麻、花生均基施磷肥 180 kg(P_2O_5)·hm^{-2}。氮肥为尿素, 磷肥为磷酸二铵。田间管理同大田生产。2018 年、2019 年播种日期分别为 6 月 13 日、6 月 17 日。2018 年、2019 年收获日期均为 10 月 19 日。

1.2　数据采集与计算

1.2.1　花生冠层光强日变化曲线

采用 Watch Dog 1000 系列微型气象站记录不同处理花生荚果膨大期 6:30—18:30 时的顶部冠层光强, 每个处理重复 3 次, 取其均值, 绘制冠层光强日变化曲线。

1.2.2　光合-光强响应曲线

参照焦念元等[15]的方法, 使用 LI-6400XT 型光合仪(LI-COR, USA), 分别在花生荚果膨大期、玉米乳熟期、芝麻灌浆成熟期测定其功能叶光合-光强响应曲线, 测定时间为晴天上午 9:00—12:00。测量部位花生为倒 3 叶, 玉米为穗位叶, 芝麻为从上向下倒 5~6 片叶。采用 Photosyn assistant 软件计算分析光饱和时最大净光合速率(P_{nmax})、光饱和点(I_{sat})、光补偿点(I_{c})和暗呼吸速率(R_{d})。光合-光强响应曲线拟合采用直角双曲线修正模型[16], 计算公式为:

$$P_{\mathrm{n}}(I)=\alpha\times\frac{1-\beta\times I}{1+\gamma\times I}\times I-R_{\mathrm{d}} \tag{1}$$

式中: P_{n} 为净光合速率, I 为光强, α 为光响应曲线的初始斜率, β、γ 为系数, R_{d} 为暗呼吸速率。

1.2.3　干物质积累

2018—2019 年在花生开花下针期、结荚期、荚果膨大期和饱果成熟期, 每个小区选取代表性 2 穴 4 株花生, 每个处理重复 3 次; 玉米取样时期为拔节期、抽雄期、乳熟期、完熟期, 芝麻取样时期为幼苗生长期、开花结蒴期、灌浆成熟期和完熟期, 分别选取代表性 2 株玉米或芝麻, 每个处理重复 3 次。样品 105 ℃杀青 30 min, 75 ℃烘干称重。干物质量采用 Logistic 生长模型[17-18]进行拟合, 公式为:

$$y=\frac{K}{1+a\times\mathrm{e}^{-b\times t}} \tag{2}$$

式中: y 为任意时刻干物质量(g·plant^{-1}); K 为最大干物质量(g·plant^{-1}); t 为苗后天数(d); a、b 为待定系数。对式(2)进行一阶求导得到干物质积累[19]速率函数:

$$v(t)=\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}=\frac{K\times a\times b\times\mathrm{e}^{-b\times t}}{(1+a\times\mathrm{e}^{-b\times t})^2} \tag{3}$$

对式(3)进行一阶求导、二阶求导并令其等于 0, 求出干物质最大积累速率($v_{\max}$)及出现时间($t_{\max}$)、快速积累开始和结束的时间(t_1 和 t_2), t_1、t_2 依次将作物的生育期分为干物质积累渐增期、快增期和缓增期, 干物质快增期持续时间为Δt:

$$v_{\max}=\frac{Kb}{4} \tag{4}$$

$$t_{\max}=\frac{\ln a}{b} \tag{5}$$

$$t_1=\frac{\ln a-1.317}{b} \tag{6}$$

$$t_2=\frac{\ln a+1.317}{b} \tag{7}$$

$$\Delta t=t_2-t_1 \tag{8}$$

1.2.4　竞争力指数

间作作物种间竞争关系依据 Willey[20]提出的竞争力指数衡量:

$$A_a=\frac{Y_a}{Y_A\times P_a}-\frac{Y_b}{Y_B\times P_b} \tag{9}$$

$$A_b=\frac{Y_b}{Y_B\times P_b}-\frac{Y_a}{Y_A\times P_a} \tag{10}$$

式中: A_a 为间作作物 a 的竞争力指数, A_b 为间作作物 b 的竞争力指数, $A_a>0$ 表明 a 作物相对 b 作物的竞争能力强, $A_a<0$ 则刚好相反; P_a 为间作作物 a 的播种面积比例(本间作体系中, 花生播种面积比例均为 3∶5); P_b 为间作作物 b 的播种面积比例(本间作体系中, 芝麻、玉米播种比例均为 2∶5); Y_a、Y_b 分别表示间作作物 a、b 的生物产量; Y_A、Y_B 分别为单作作物 a、b 的生物产量。以地上部干重作为植株的生物产量, 计算方式为:

$$\text{生物产量}=\frac{\text{取样小区生物产量}}{\text{取样小区面积}} \tag{11}$$

1.2.5　产量、土地当量比及偏土地当量比

收获时, 选取各处理有代表性的植株 2 m 双行进行测产, 玉米取果穗, 芝麻取蒴果, 花生取荚果, 风干后玉米、芝麻取籽粒称重, 花生称荚果重。间作优势采用土地当量比(LER)和偏土地当量比(PLER)[21]来衡量:

$$\mathrm{LER}=\frac{Y_{ai}}{Y_{as}}+\frac{Y_{bi}}{Y_{bs}} \tag{12}$$

$$\mathrm{PLER}(a)=\frac{Y_{ai}}{Y_{as}} \tag{13}$$

$$\mathrm{PLER}(b)=\frac{Y_{bi}}{Y_{bs}} \tag{14}$$

式中: Y_{ai} 为间作作物 a 的实际产量, Y_{as} 为单作作物 a 的实际产量, Y_{bi} 为间作作物 b 的实际产量, Y_{bs} 为单作作物 b 的实际产量。PLER(a)代表 a 作物在间作体系中的偏土地当量比, PLER(b)代表 b 作物在间作体系

中的偏土地当量比。

1.3 统计分析

采用 Microsoft Excel 2010、SPSS 22.0 和 Origin 2018 等软件对数据进行处理分析与作图。处理间显著性分析采用单因素方差分析(LSD 法，α=0.05)。采用决定系数(R^2)来检验 Logistic 模型精度。

2 结果与分析

2.1 不同间作体系花生荚果膨大期的冠层光照强度

由图 1 可知不同间作模式对花生冠层光照强度日变化曲线具有显著影响。荚果膨大期花生冠层光照强度日变化曲线均呈单峰曲线，峰值出现在 11:30—12:30。与玉米||花生体系的花生[IP(M||P)]相比，芝麻||花生体系的花生[IP(S||P)]的冠层光照强度在 9:00—11:30、12:30—17:00 显著提高，IP(S||P)的日均光照强度较 IP(M||P)显著提高 39.4%(P<0.05)；IP(S||P)与 IP(M||P)的冠层光强在峰值处(11:30—12:30)差异不显著。单作花生(SP)日均光照强度较 IP(M||P)和 IP(S||P)分别显著提高 96.4%、48.3% (P<0.05)。

2.2 不同间作体系花生功能叶光合-光强响应曲线及参数

直角双曲线修正模型适合多种植物光响应曲线的拟合，拟合值与实测值较接近[22-24]。根据式(1)，采用直角双曲线修正模型对 2018—2019 年光合数据进行拟合，采用 Photosyn assistant 软件计算相应光合参数。由表 1 可知，光合-光强曲线决定系数(R^2)均大于 0.975，说明光合-光强响应曲线的拟合度较高。不同处理花生的最大净光合速率(P_{nmax})表现为单作花生(SP)>芝麻||花生体系的花生[IP(S||P)]>玉米||花生体系的花生[IP(M||P)]，IP(S||P)和 IP(M||P)较 SP 分别降低 15.6%~15.9%、28.7%~30.2%。说明间作花生光合速率受到高位作物遮阴的影响，有所下降。IP(S||P)的 P_{nmax} 和光饱和点(I_{sat})较 IP(M||P)分别提高 18.0%~20.7%和 22.8%~55.8%。不同间作模式下花生的暗呼吸速率较为复杂，本试验未表现出明显规律性。

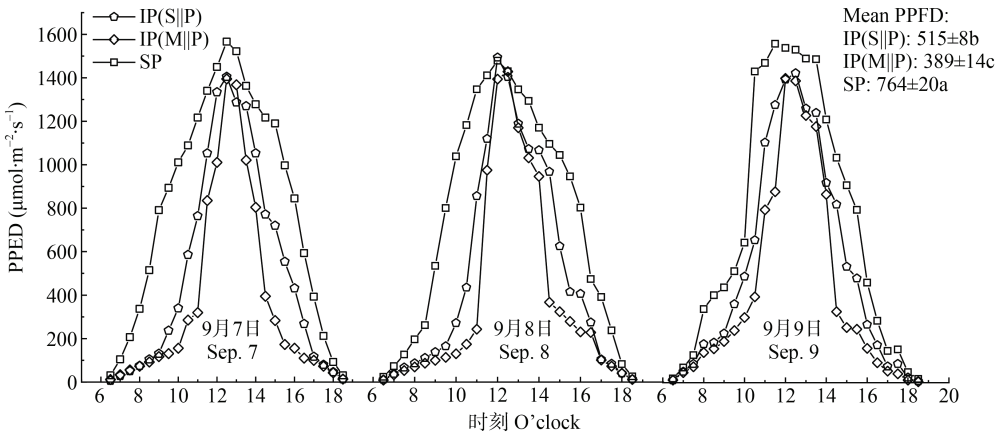

图 1 不同间作体系中花生荚果膨大期冠层光强日变化曲线(2019)

Fig. 1 Diurnal variation curves of light intensity of peanut canopy in different intercropping systems at pod enlargement stage of peanut in 2019

IP(S||P): 芝麻||花生体系的间作花生; IP(M||P): 玉米||花生体系的间作花生; SP: 单作花生; PPFD: 光量子通量密度。不同小写字母表示差异在 P<0.05 水平差异显著。IP(S||P): peanut in sesame||peanut intercropping system; IP(M||P): peanut in maize||peanut intercropping system; SP: monocultured peanut; PPFD: light quantum flux density. Different lowercase letters mean significant differences at P<0.05 level.

表 1 玉米||花生、芝麻||花生对花生功能叶光合-光强响应曲线参数的影响

Table 1 Effects of maize||peanut and sesame||peanut intercropping on relevant parameters of the photosynthetic rate response curves to light in the functional leaves of peanuts

年份 Year	种植方式 Planting pattern	P_{nmax}	I_{sat}	I_c	R_d	决定系数 Determination coefficient
2018	IP(S||P)	21.57	1720	84	3.11	0.9965
	IP(M||P)	18.28	1104	64	3.38	0.9982
	SP	25.65	1544	60	2.64	0.9957
2019	IP(S||P)	22.94	1488	60	2.67	0.9993
	IP(M||P)	19.01	1164	56	2.63	0.9986
	SP	27.23	1540	56	3.12	0.9987

IP(S||P): 芝麻||花生体系的间作花生; IP(M||P): 玉米||花生间作体系内间作花生; SP: 单作花生。P_{nmax}: 光饱和时净光合速率; I_{sat}: 光饱和点; I_c: 光补偿点; R_d: 暗呼吸速率。IP(S||P): peanut in sesame||peanut intercropping system; IP(M||P): peanut in maize||peanut intercropping system; SP: monocultured peanut; P_{nmax}: net photosynthetic rate at light saturation; I_{sat}: light saturation point; I_c: light compensation point; R_d: dark respiration rate.

图 2 为 2018—2019 年各处理花生的光合-光强响应曲线。花生的光合-光强响应曲线在光强超过 800 μmol·m^{-2}·s^{-1} 后，各处理表现为 SP>IP(S||P)>IP(M||P)。由表 1、图 2 可知，与玉米||花生体系的花生相比，芝麻||花生体系的花生的受光情况更好，其最大净光合速率、光饱和点更高。在光强达到 1000 μmol·m^{-2}·s^{-1} 之后，间作玉米(IM)的净光合速率显著高于单作玉米(SM)。在光强超过 150 μmol·m^{-2}·s^{-1} 后，间作芝麻(IS)的净光合速率显著高于单作芝麻(SS)。

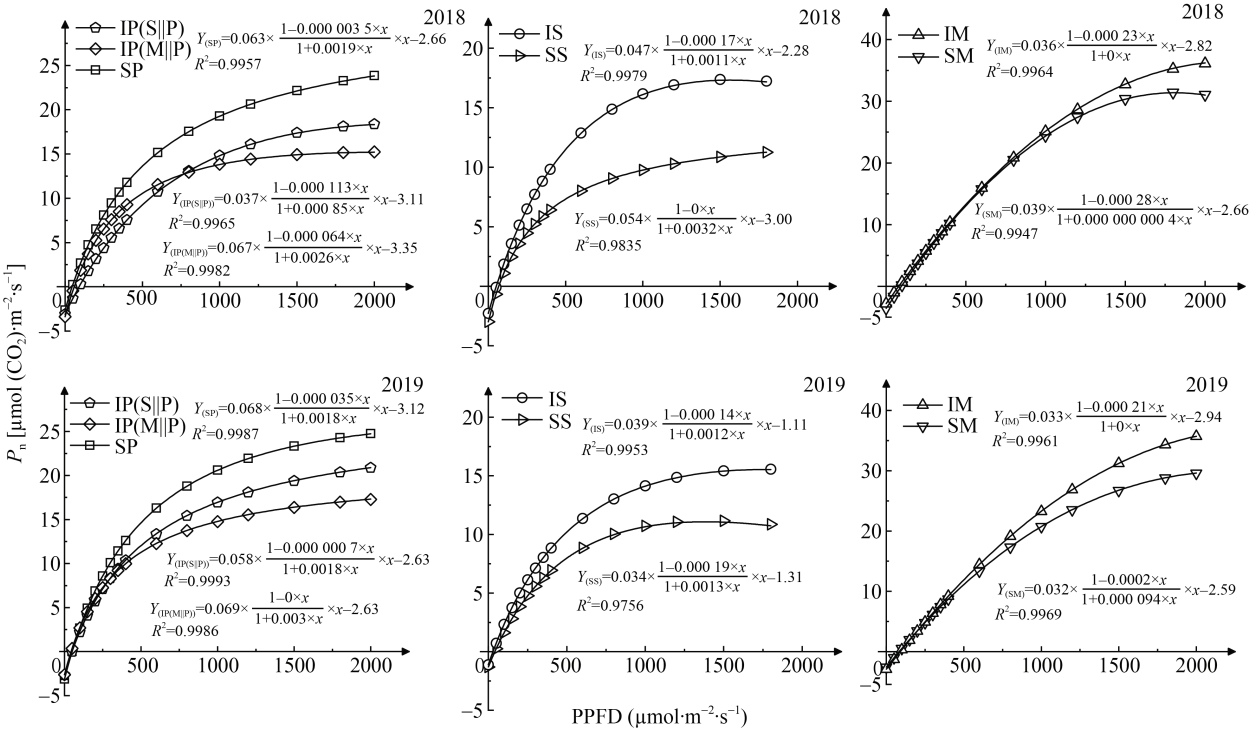

图 2　玉米||花生、芝麻||花生对花生、芝麻、玉米功能叶光合-光强响应曲线的影响

Fig. 2　Effects of maize||peanut and sesame||peanut intercropping on the photosynthetic rate response curves to light in the functional leaves of peanut, sesame and maize

IP(S||P): 芝麻||花生体系的间作花生; IP(M||P): 玉米||花生间作体系内间作花生; SP: 单作花生; SM: 单作玉米; IM: 间作玉米; SS: 单作芝麻; IS: 间作芝麻; P_n: 净光合速率。IP(S||P): peanut in sesame||peanut intercropping system; IP(M||P): peanut in maize||peanut intercropping system; SP: monocultured peanut; SM: monocultured maize; IM: intercropped maize; SS: monocultured sesame; IS: intercropped sesame; P_n: net photosynthetic rate.

2.3　不同间作体系花生干物质积累 Logistic 模型曲线及相关参数

干物质积累量与作物产量呈显著正相关[25-27]，可以反映作物的生长情况。根据公式(2)，将 2018—2019 年的花生试验数据拟合得出干物质随苗后天数积累的曲线，其模型参数如表 2 所示。2018—2019 年基于苗后天数建立的 Logistic 作物生长模型的决定系数(R^2)均高于 0.950，说明模拟精度较高，模型可以精确模拟花生生长中干物质的积累过程。从 Logistic 模型拟合结果看，2018—2019 年，与单作花生(SP)相比，IP(M||P)的最大干物质量(K)降低了 26.9%~33.7%，IP(S||P)的最大干物质量降低了 7.5%~12.7%。

图 3 为各种植模式下花生干物质的 Logistic 生长模型曲线，结合表 2 的拟合结果可知，2018—2019 年，不同间作体系中花生苗后 47~52 d 进入干物质积累快增期，最大干物质积累速率的出现时间依次表现为: SP 苗后 65~66 d, IP(S||P)苗后 70 d, IP(M||P)苗后 74 d。花生最大干物质积累速率表现为 SP>IP(S||P)>IP(M||P)，单作花生最大干物质积累速率为 1.64~1.95 g·株$^{-1}$·d^{-1}，高于 IP(S||P) 40%，高于 IP(M||P) 134%~135%。在苗后 79~101 d 各处理花生依次进入干物质积累缓增期，进入缓增期时间依次表现为 IP(M||P)迟于 IP(S||P)迟于 SP；花生快增期持续天数表现为 SP<IP(S||P)<IP(M||P)，单作花生较 IP(S||P)和 IP(M||P)分别缩短 7~9 d 和 19~21 d。

2.4　不同间作体系芝麻、玉米干物质积累 Logistic 模型曲线及相关参数

由表 3 可知，间作玉米、间作芝麻最大干物质积累量和最大干物质积累速率，较单作玉米、单作芝麻明显提高。结合表 3 和图 4 可知，各处理芝麻苗后 45~47 d 进入干物质积累快增期，最大干物质

表 2 玉米||花生、芝麻||花生体系中花生干物质积累量 Logistic 模型参数

Table 2 Parameters in Logistic models of dry matter accumulation of peanuts in maize||peanut and sesame||peanut intercropping systems

年份 Year	种植方式 Planting pattern	K (g·plant^{-1})	a	b	R^2	v_{max} (g·d^{-1})	t_{max} (d)	t_1 (d)	t_2 (d)	Δt (d)
2018	IP(S||P)	75.33	77.32	0.062	0.990	1.17	70	49	91	42
	IP(M||P)	57.16	37.04	0.049	0.971	0.70	74	47	101	54
	SP	86.27	155.78	0.076	0.990	1.64	66	49	84	35
2019	IP(S||P)	77.61	156.24	0.072	0.959	1.40	70	52	88	37
	IP(M||P)	61.37	53.14	0.054	0.954	0.83	74	49	98	49
	SP	83.90	420.72	0.093	0.959	1.95	65	51	79	28

IP(S||P): 芝麻||花生体系的间作花生; IP(M||P): 玉米||花生间作体系内间作花生; SP: 单作花生。K: 最大干物质量; v_{max}: 干物质量最大积累速率; t_{max}: 干物质量最大积累速率出现时间; t_1: 快增期开始时间; t_2: 快增期结束时间; Δt: 快增期持续时间。IP(S||P): peanut in sesame||peanut intercropping system; IP(M||P): peanut in maize||peanut intercropping system; SP: monocultured peanut; K: maximum dry matter mass; v_{max}: maximum dry matter accumulation rate; t_{max}: time to maximum accumulation rate of dry matter mass; t_1: start time of the rapid growth period; t_2: end time of the rapid growth period; Δt: duration of rapid growth period.

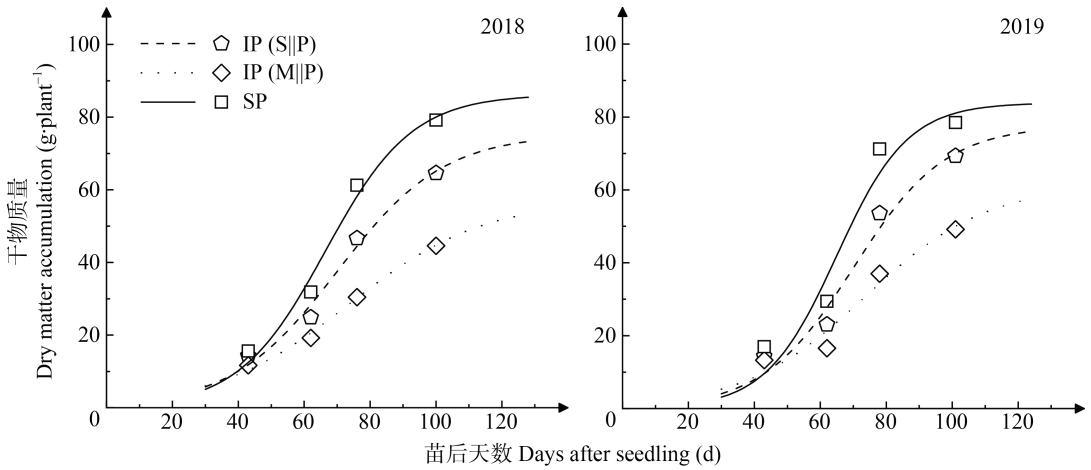

图 3 玉米||花生、芝麻||花生体系中花生干物质量积累曲线

Fig. 3 Logistic curves of dry matter accumulation of peanuts in maize||peanut and sesame||peanut intercropping systems

IP(S||P): 芝麻||花生体系的间作花生; IP(M||P): 玉米||花生体系的间作花生; SP: 单作花生。IP(S||P): peanut in sesame||peanut intercropping system; IP(M||P): peanut in maize||peanut intercropping system; SP: monocultured peanut.

表 3 玉米||花生、芝麻||花生体系中芝麻和玉米干物质积累量 Logistic 模型参数

Table 3 Parameters of Logistic models of dry matter accumulation of sesame and maize in maize||peanut and sesame||peanut intercropping systems

年份 Year	种植方式 Planting pattern	K (g·plant^{-1})	a	b	R^2	v_{max} (g·d^{-1})	t_{max} (d)	t_1 (d)	t_2 (d)	Δt (d)
2018	IS	95.46	837.17	0.117	0.996	2.79	58	46	69	23
	SS	67.16	230.30	0.091	0.993	1.53	60	45	74	29
	IM	327.44	52.40	0.057	0.995	4.67	69	46	93	46
	SM	298.64	58.29	0.056	0.992	4.18	73	49	96	47
2019	IS	95.21	1277.35	0.125	0.997	2.98	57	47	68	21
	SS	69.35	539.57	0.105	0.993	1.82	60	47	72	25
	IM	378.11	38.05	0.049	0.995	4.63	74	47	101	54
	SM	308.45	36.43	0.049	0.976	3.78	73	46	100	54

IS: 间作芝麻; SS: 单作芝麻; IM: 间作玉米; SM: 单作玉米; K: 最大干物质量; v_{max}: 干物质量最大积累速率; t_{max}: 干物质量最大积累速率出现时间; t_1: 快增期开始时间; t_2: 快增期结束时间; Δt: 快增期持续时间。IS: intercropped sesame; SS: monocultured sesame; IM: intercropped maize; SM: monocultured maize; K: maximum dry matter mass; v_{max}: maximum dry matter accumulation rate; t_{max}: time to maximum accumulation rate of dry matter mass; t_1: start time of the rapid growth period; t_2: end time of rapid growth period; Δt: duration of rapid growth period.

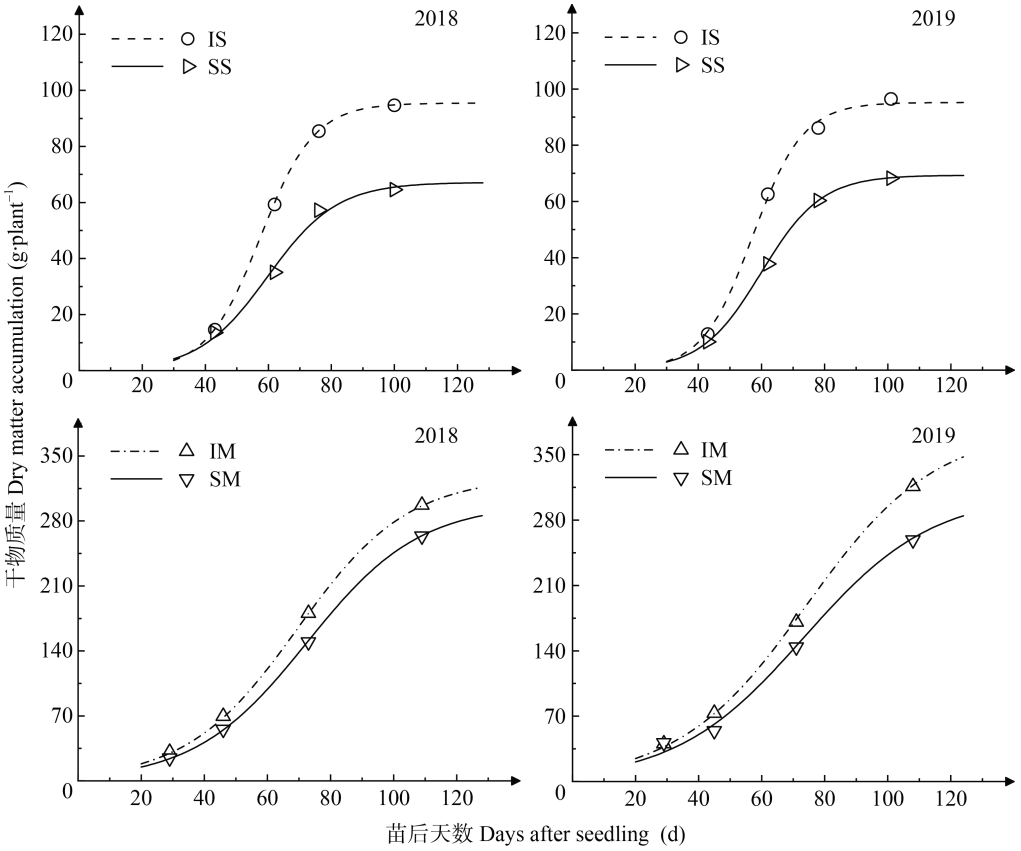

图 4　玉米||花生、芝麻||花生体系中芝麻和玉米干物质量积累曲线

Fig. 4　Logistic curves of dry matter accumulation of sesame and maize in sesame||peanut and maize||peanut intercropping systems

SM: 单作玉米; IM: 间作玉米; SS: 单作芝麻; IS: 间作芝麻。SM: monocultured maize; IM: intercropped maize; SS: monocultured sesame; IS: intercropped sesame.

积累速率出现在 57~60 d, 苗后 68~74 d 进入干物质积累缓增期; 间作芝麻最大干物质积累速率为 2.79~2.98 g·株$^{-1}$·d^{-1}, 高于单作 63.7%~82.4%, 间作芝麻快增期持续天数小于单作 4~6 d。各处理玉米苗后 46~49 d 进入干物质积累快增期, 最大干物质积累速率出现在 69~74 d, 苗后 93~101 d 进入干物质积累缓增期; 间作玉米最大干物质积累速率为 4.63~4.67 g·株$^{-1}$·d^{-1}, 高于单作 11.7%~22.5%, 快增期持续天数年际间有差异, 处理间差异≤1 d。通过干物质量 Logistic 生长模型的参数和曲线可以看出, 与单作花生相比, 间作降低了花生的干物质积累量, 在玉米||花生体系中花生干物质积累量的降低幅度大于芝麻||花生中花生干物质积累量的降低幅度。

2.5　不同间作体系中花生的种间竞争力指数

种间竞争力指数是指一种作物对另一种作物养分、水分竞争能力的强弱[28]。结合式(9)和(10), 对间作花生的种间竞争力进行计算。从表 4 可以看出, 在芝麻||花生、玉米||花生行比为 2∶4 的间作体系中, 花生相对于芝麻和玉米的种间竞争力指数均为负值, 分别为–2.31~–2.06 和–4.68~–4.34, 说明在花生这两个间作体系中均占据劣势生态位, 且玉米相比芝麻, 对花生的竞争强度大。

表 4　芝麻||花生、玉米||花生体系中花生的种间竞争力

Table 4　Interspecific competitiveness of peanut to maize and sesame in maize||peanut and sesame||peanut intercropping systems

年份 Year	种植方式 Planting pattern	生物产量 Biological yield (kg·hm^{-2})			花生竞争力指数 Competitiveness index of peanut
		花生 Peanut	芝麻 Sesame	玉米 Maize	
2018	芝麻||花生体系 Sesame||peanut intercropping	5382±15b	11 837±169a	—	–2.31
	玉米||花生体系 Maize||peanut intercropping	3714±32c	—	37 134±524a	–4.34
	单作 Monoculture	6598±28ab	8067±46b	17 590±316b	—
2019	芝麻||花生体系 Sesame||peanut intercropping	5776±221b	12 059±49a	—	–2.06
	玉米||花生体系 Maize||peanut intercropping	4085±26c	—	39 493±585a	–4.68
	单作 Monoculture	6540±90b	8531±142b	17 252±124b	—

2.6 不同间作体系的作物产量、土地当量比及经济效益

由表 5 可知, 3 种单作作物的产量均显著高于间作体系中相应间作作物产量(P<0.05)。花生产量表现为 SP>IP(S||P)>IP(M||P), 差异显著(P<0.05)。偏土地当量比是衡量间作产量优势的指标[29], 当偏土地当量比大于间作作物播种面积占比时, 说明该作物有间作产量优势。在两个间作模式中, 芝麻、玉米的偏土地当量比均大于 2/5, 而花生均小于 3/5。芝麻||花生体系花生[IP(S||P)]的偏土地当量比大于玉米||花生体系中花生[IP(M||P)]的偏土地当量比, 说明相比于 IP(M||P), IP(S||P)在间作体系中更具有产量优势。从间作体系土地当量比上看, 两种间作体系的土地当量比均大于 1, 且芝麻||花生间作体系比玉米||花生间作体系的土地当量比高 1.9%~5.8%。

在 5 种种植模式中, 经济收益表现为: S||P>SP>SS>M||P>SM。其中, 2018 年、2019 年芝麻||花生体系总收益比玉米||花生体系分别高 0.97 万元·hm^{-2}、0.33 万元·hm^{-2}, 分别比单作花生高 0.13 万元·hm^{-2}、0.06 万元·hm^{-2}, 比单作芝麻高 0.31 万元·hm^{-2}、0.19 万元·hm^{-2}, 比单作玉米高 1.37 万元·hm^{-2}、0.53 万元·hm^{-2}。5 种模式中, 芝麻||花生体系经济效益最好, 单作玉米的收益最低。

3 讨论

3.1 芝麻||花生、玉米||花生对花生净光合速率和干物质积累的影响

光合作用是作物生长发育的基础, 提高光能利用效率是增强作物生产能力的重要途径[30]。间作体系中高位作物不同, 形成的冠层形态特征不同[31-33]。与玉米相比, 芝麻对光能的截获能力较弱, 对与其间作的花生的冠层光强影响较小。本试验研究显示, 在芝麻或玉米与花生间作行比为 2∶4 的条件下, 芝麻||花生体系的花生[IP(S||P)]的冠层光强和最大净光合速率(P_{nmax})比玉米||花生体系的花生[IP(M||P)]分别显著提高 39.4%和 18.0%~20.7%。表明相对于玉米||花生, 芝麻||花生可以改善花生的受光状况, 提高间作花生功能叶的净光合速率, 协调间作体系对光能的利用。

表 5 玉米||花生、芝麻||花生体系的产量、土地当量比和经济效益

Table 5 Yield, land equivalent ratio, and economic benefits of maize||peanut and sesame||peanut intercropping systems

年份 Year	种植方式 Planting pattern	产量 Yield (kg·hm^{-2})			偏土地当量比 Partial land equivalent ratio			土地当量比 Land equivalent ratio	收益 Revenue (×10^4 ¥·hm^{-2})
		花生 Peanut	芝麻 Sesame	玉米 Maize	花生 Peanut	芝麻 Sesame	玉米 Maize		
2018	S||P	1917±110b	1175±40b	—	0.49	0.60	—	1.09	2.87
	M||P	1125±13c	—	5867±17b	0.29	—	0.74	1.03	1.90
	SP	3917±83a	—	—	—	—	—	—	2.74
	SS	—	1969±78a	—	—	—	—	—	2.56
	SM	—	—	7896±177a	—	—	—	—	1.50
2019	S||P	1683±28b	1038±31b	—	0.45	0.61	—	1.06	2.32
	M||P	1025±34c	—	7067±54b	0.27	—	0.77	1.04	1.99
	SP	3764±159a	—	—	—	—	—	—	2.26
	SS	—	1688±39a	—	—	—	—	—	2.13
	SM	—	—	9206±4a	—	—	—	—	1.79

S||P: 芝麻||花生; M||P: 玉米||花生; 2018 年和 2019 年花生价格分别为 7.00 元·kg^{-1} 和 6.00 元·kg^{-1}, 芝麻价格分别为 13.00 元·kg^{-1} 和 2.60 元·kg^{-1}, 玉米价格分别为 1.90 元·kg^{-1} 和 1.94 元·kg^{-1} (数据来源惠农网)。S||P: sesame||peanut intercropping system; M||P: maize||peanut intercropping system. In 2018 and 2019, the prices of peanut were 7.00 and 6.00 ¥·kg^{-1}, the prices of sesame were 13.00 and 12.60 ¥·kg^{-1}, and the prices of maize were 1.90 and 1.94 ¥·kg^{-1}, respectively (data from https://www.cnhnb.com/).

干物质最大积累速率和最大积累量与最大净光合速率数据的趋势相一致。与 IP(M||P)相比, IP(S||P)干物质最大积累速率和最大干物质积累量提高。花生干物质积累 Logistic 模型曲线及相关参数显示, IP(S||P)在苗后 49~52 d 进入干物质积累快增期, 间作芝麻(IS)在苗后 46~47 d 进入干物质积累快增期, IP(S||P)较间作芝麻干物质积累快增期持续时间长 16~19 d; IP(M||P)在苗后 47~49 d 进入干物质积累快增期, 间作玉米(IM)在苗后 46~47 d 进入干物质积累快增期, IP(M||P)较单作玉米(IM)快增期持续时间分别长 8 d (2018 年)和–5 d (2019 年)。表明在间作芝麻干物质快增期结束后 16~19 d, 芝麻||花生体系的花

生仍处于干物质积累快增期; 而间作玉米与间作花生干物质积累快增期基本一致, 导致在玉米||花生体系中, 两种作物在生长旺盛的时期对资源的竞争激烈。通过计算成熟期不同处理种间竞争力指数, 发现花生相对于玉米和芝麻的种间竞争力指数均为负值, 且花生相对于芝麻的竞争力指数比相对于玉米的竞争力指数大 46.8%~56.0%。说明两个间作体系中, 花生在生育后期处于竞争劣势情况下, 与玉米||花生相比, 芝麻||花生可以错开花生和高位作物干物质积累的快增期, 协调二者对光能的吸收利用, 降低高矮作物间的种间竞争强度。

3.2 芝麻||花生、玉米||花生体系的产量及经济效益

合理搭配不同作物进行间作种植可以有效提高单位面积土地产值, 达到增产增收的目的[34]。本研究显示, 与玉米||花生体系的花生[IP(M||P)]相比, 芝麻||花生体系的花生[IP(S||P)]产量显著提高 64.2%~70.0%, 说明较玉米||花生, 芝麻||花生有利于花生产量的形成。此外, 与单作玉米和单作芝麻相比, 2018—2019 年, 芝麻||花生体系的土地当量比为 1.062~1.086, 其中 IP(S||P) 的偏土地当量比 0.447~0.489, 玉米||花生体系的土地当量比为 1.030~1.040, 而 IP(M||P) 的偏土地当量比仅为 0.272~0.287。两间作体系的土地当量比均大于 1。说明与单作相比, 玉米||花生和芝麻||花生均可以提高土地利用率, 这和吴小丽等[35]、梁满等[36]的研究相一致。尤其强调的是, 芝麻||花生体系的土地当量比高于玉米||花生体系, 与 IP(M||P)相比, IP(S||P)的偏土地当量比提高 64.3%~70.4%, 且两者的偏土地当量比均小于其在间作体系中的面积比例 3/5。说明与玉米||花生相比, 芝麻||花生提高了土地利用率; 间作花生在间作体系中处于产量劣势地位, 与 IP(S||P)相比, IP(M||P)在间作体系中产量劣势更明显, 减产幅度也更大。

从经济效益上来看, 5 种种植模式中芝麻||花生体系的效益最好, 比玉米||花生体系高 0.65 万元·hm^{-2}。这主要是由于芝麻||花生体系中花生的减产幅度较小, 且芝麻单价比玉米高。玉米||花生虽然提高了间作玉米的产量, 但对间作花生减产幅度较大, 从而造成玉米||花生体系总体经济效益较低。虽然玉米||花生体系的总体产量高于单作花生, 但总收益低于单作花生, 这是因为间作玉米增产部分的经济收益无法弥补少种以及间作造成花生减产造成的经济效益损失。本研究两年间各处理的总经济效益有较大浮动与每年各作物单价浮动有关, 且 5 种种植模式中, 单作玉米效益最低。

4 结论

1)与间作玉米相比, 间作芝麻对花生遮阴程度较小, 能改善间作花生受光状况, 提高间作花生功能叶净光合速率, 降低高位作物遮光造成的减产效应, 芝麻||花生体系中的花生产量较玉米||花生体系中的花生产量显著提升 64.2%~70.4%。2)和玉米||花生相比, 芝麻||花生使高、矮两种作物干物质积累快增期相互错开, 降低了两种作物间的种间竞争强度, 更有利于间作花生荚果干物质的形成和积累。3)芝麻||花生体系的土地当量比高于玉米||花生体系, 且大于 1; 其经济效益比玉米||花生体系高 16.7%~50.8%, 为 2.32 万~2.87 万元·hm^{-2}, 说明与玉米||花生相比, 芝麻||花生更能提高土地利用效率, 既能保证高位作物的生产, 又能降低间作花生的减产幅度, 保证总经济收益的进一步提高。与玉米||花生相比, 芝麻||花生提高了间作花生的产量和整体的收益, 其机理在于: 相比花生与玉米间作, 花生与芝麻间作协调了矮位作物和高位作物光能的分配, 提高了间作花生冠层光照强度和功能叶净光合速率, 错开干物质积累的快增期, 降低种间竞争强度。

参考文献 References

[1] 张向前, 黄国勤, 卞新民, 等. 间作对玉米品质、产量及土壤微生物数量和酶活性的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(22): 7082–7090
ZHANG X Q, HUANG G Q, BIAN X M, et al. Effects of intercropping on quality and yield of maize grain, microorganism quantity, and enzyme activities in soils[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(22): 7082–7090

[2] LI Q S, CHEN J, WU L K, et al. Belowground interactions impact the soil bacterial community, soil fertility, and crop yield in maize/peanut intercropping systems[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2018, 19(2): E622

[3] 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
WANG L, WANG Q, ZHANG E H, et al. Effect of nitrogen application on productivity and water use efficiency of wheat/maize intercropping system under straw mulching[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(8): 955–964

[4] VANDERMEER J H. The Ecology of Intercropping[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1989

[5] XIONG H C, SHEN H Y, ZHANG L X, et al. Comparative proteomic analysis for assessment of the ecological significance of maize and peanut intercropping[J]. Journal of Proteomics, 2013, 78: 447–460

[6] 张德, 龙会英. 种间相互作用对牧草间作体系生产力的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(2): 234–239

ZHANG D, LONG H Y. Effects of interspecific interactions on productivity of the intercropping system of intercropping *Stylosanthes guianensis*/*Paspalum atratum*[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017, 35(2): 234–239

[7] 姚远, 刘兆新, 刘妍, 等. 花生、玉米不同间作方式对花生生理性状以及产量的影响[J]. 花生学报, 2017, 46(1): 1–7
YAO Y, LIU Z X, LIU Y, et al. Effect of different peanut-maize intercropping patterns on peanut growth and yield[J]. Journal of Peanut Science, 2017, 46(1): 1–7

[8] WANG Q, WU Y H, ZHAO L, et al. Research on efficiency improving technology for intercropping sesame (*Sesamum indicum*) and peanut (*Arachis hypogaea*)[J]. Agricultural Science & Technology, 2012, 13(2): 324–329

[9] 林松明, 孟维伟, 南镇武, 等. 玉米间作花生冠层微环境变化及其与荚果产量的相关性研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(1): 31–41
LIN S M, MENG W W, NAN Z W, et al. Canopy microenvironment change of peanut intercropped with maize and its correlation with pod yield[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(1): 31–41

[10] 王飞, 刘领, 武岩岩, 等. 玉米花生间作改善花生铁营养提高其光合特性的机理[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(5): 901–913
WANG F, LIU L, WU Y Y, et al. Mechanism of maize intercropping peanut improving iron nutrition to increase photosynthetic performance of peanut[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(5): 901–913

[11] 相云秋, 张甜, 邹晓霞, 等. 玉米花生间作对花生植株生长动态影响的研究[J]. 农业科学, 2018, 8(1): 69–75
XIANG Y Q, ZHANG T, ZOU X X, et al. Effect of maize-peanut intercropping on peanut growth dynamics[J]. Hans Journal of Agricultural Sciences, 2018, 8(1): 69–75

[12] 姚远. 花生、玉米不同间作方式对连作花生生理特性及产量品质的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2017
YAO Y. Effect of different peanut-maize intercropping patterns on the physiological characteristics, yield and quality in continuous cropping peanut[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2017

[13] 朱启林, 向蕊, 汤利, 等. 间作条件下施氮量对马铃薯光合特性的调控作用[J]. 生态学杂志, 2018, 37(5): 1391–1397
ZHU Q L, XIANG R, TANG L, et al. The effects of nitrogen application rate on photosynthetic characteristics of potato under intercropping[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(5): 1391–1397

[14] 沈其荣, 褚贵新, 曹金留, 等. 从氮素营养的角度分析旱作水稻与花生间作系统的产量优势[J]. 中国农业科学, 2004, 37(8): 1177–1182
SHEN Q R, CHU G X, CAO J L, et al. Yield advantage of groundnut intercropped with rice cultivated in aerobic soil from the viewpoint of plant nitrogen nutrition[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004, 37(8): 1177–1182

[15] 焦念元, 李亚辉, 李法鹏, 等. 间作玉米穗位叶的光合和荧光特性[J]. 植物生理学报, 2015, 51(7): 1029–1037
JIAO N Y, LI Y H, LI F P, et al. Photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristics in ear leaves of intercropped maize[J]. Plant Physiology Journal, 2015, 51(7): 1029–1037

[16] 叶子飘, 李进省. 光合作用对光响应的直角双曲线修正模型和非直角双曲线模型的对比研究[J]. 井冈山大学学报: 自然科学版, 2010, 31(3): 38–44
YE Z P, LI J S. Comparative investigation light response of photosynthesis on non-rectangular *Hyperbola* model and modified model of rectangular *Hyperbola*[J]. Journal of Jinggangshan University: Natural Science, 2010, 31(3): 38–44

[17] WEST G B, BROWN J H, ENQUIST B J. A general model for ontogenetic growth[J]. Nature, 2001, 413(6856): 628–631

[18] WU R L, MA C X, LITTELL R C, et al. A logistic mixture model for characterizing genetic determinants causing differentiation in growth trajectories[J]. Genetical Research, 2002, 79(3): 235–245

[19] 崔党群. Logistic 曲线方程的解析与拟合优度测验[J]. 数理统计与管理, 2005, 24(1): 112–115
CUI D Q. Analysis and making good fitting degree test for logistic curve regression equation[J]. Application of Statistics and Management, 2005, 24(1): 112–115

[20] WILLEY R W. Intercropping: its importance and research needs. Part 2, agronomy and research approaches[EB/OL]. (1979-01-01). https://www.researchgate.net/publication/284790670_Intercropping_its_Importance_and_Research_Needs_Part_2_Agronomy_and_Research_Approaches

[21] MEAD R, WILLEY R W. The concept of a 'land equivalent ratio' and advantages in yields from intercropping[J]. Experimental Agriculture, 1980, 16(3): 217–228

[22] 张磊, 刘维正, 辛国胜, 等. 3 种专用型甘薯光合光响应曲线及其模型拟合研究[J]. 中国农学通报, 2015, 31(15): 71–77
ZHANG L, LIU W Z, XIN G S, et al. Photosynthesis light response curves of three sweet-potato varieties and model fitting[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(15): 71–77

[23] LI Y H, SHI D Y, LI G H, et al. Maize/peanut intercropping increases photosynthetic characteristics, ^{13}C-photosynthate distribution, and grain yield of summer maize[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2019, 18(10): 2219–2229

[24] 周玉霞, 巨天珍, 王引弟, 等. 4 种光响应曲线模型对 3 种高寒草甸植物的实用性分析[J]. 草地学报, 2018, 26(2): 488–496
ZHOU Y X, JU T Z, WANG Y D, et al. Four light response curve models applied to the analysis of three species of alpine meadow plants[J]. Acta Agrestia Sinica, 2018, 26(2): 488–496

[25] 王小春, 杨文钰, 邓小燕, 等. 玉米/大豆和玉米/甘薯模式下玉米干物质积累与分配差异及氮肥的调控效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1): 46–57
WANG X C, YANG W Y, DENG X Y, et al. Differences of dry matter accumulation and distribution of maize and their responses to nitrogen fertilization in maize/soybean and maize/sweet potato relay intercropping systems[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(1): 46–57

[26] 肖永成. 大豆干物质积累分配与产量的关系研究[J]. 现代

农业科技, 2020, (1): 4–6
XIAO Y C. Relationship between dry matter accumulation distribution and yield of soybean[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2020, (1): 4–6

[27] 赵德强, 李彤, 侯玉婷, 等. 玉米大豆间作模式下干物质积累和产量的边际效应及其系统效益[J]. 中国农业科学, 2020, 53(10): 1971–1985
ZHAO D Q, LI T, HOU Y T, et al. Benefits and marginal effect of dry matter accumulation and yield in maize and soybean intercropping patterns[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(10): 1971–1985

[28] 赵建华, 孙建好, 李伟绮. 玉米播期对大豆/玉米间作产量及种间竞争力的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(11): 1634–1642
ZHAO J H, SUN J H, LI W Q. Effect of maize sowing date on yield and interspecific competition in soybean/maize intercropping system[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(11): 1634–1642

[29] WAHID P A. Radioisotope studies of root activity and root-level interactions in tree-based production systems: a review[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2001, 54(5): 715–736

[30] 肖璞, 刘虎虎, 王翀, 等. 植物高光效研究进展[J]. 生物学杂志, 2020, 37(2): 88–91
XIAO P, LIU H H, WANG C, et al. Advances on the high photosynthetic efficiency in plants[J]. Journal of Biology, 2020, 37(2): 88–91

[31] 陈宗培, 薛佳欣, 李奔, 等. 玉米光合特性和冠层微环境对密度和行株距配置的响应[J]. 作物杂志, 2020, (1): 179–186
CHEN Z P, XUE J X, LI B, et al. Response of photosynthetic characteristics and canopy micro-environment to planting density and row spacing of maize (*Zea mays* L.)[J]. Crops, 2020, (1): 179–186

[32] 魏珊珊, 王祥宇, 董树亭. 株行距配置对高产夏玉米冠层结构及籽粒灌浆特性的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(2): 441–450
WEI S S, WANG X Y, DONG S T. Effects of row spacing on canopy structure and grain-filling characteristics of high-yield summer maize[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(2): 441–450

[33] 杨宗渠, 李长看, 徐芳芳, 等. 不同品种芝麻冠层结构及其光合特性[J]. 西北农业学报, 2017, 26(7): 1020–1025
YANG Z Q, LI C K, XU F F, et al. Canopy structure and photosynthetic characteristics of different sesame cultivars[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2017, 26(7): 1020–1025

[34] GIL J. Multiple cropping systems[J]. Nature Food, 2020, 1(10): 593

[35] 吴小丽, 江日东, 陈傲, 等. 不同玉米花生间作模式对系统产量及土地当量比的影响分析[J]. 中国农业文摘: 农业工程, 2020, 32(6): 44–45
WU X L, JIANG R D, CHEN A, et al. Effects of different maize and peanut intercropping patterns on system yield and land equivalent ratio[J]. Agricultural Science and Engineering in China, 2020, 32(6): 44–45

[36] 梁满, 徐杰, 汪宝卿, 等. 不同等带宽间作模式对芝麻花生产量和效益的影响[J]. 花生学报, 2020, 49(1): 79–82
LIANG M, XU J, WANG B Q, et al. Effects of different intercropping system with equal band width on yield and economic benefit of sesame and peanut[J]. Journal of Peanut Science, 2020, 49(1): 79–82