

DOI: 10.12357/cjea.20220056

孙增光, 汪江涛, 聂良鹏, 武岩岩, 刘娟, 焦念元. 花生||芝麻对花生铁营养吸收利用的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(9): 1409–1416

SUN Z G, WANG J T, NIE L P, WU Y Y, LIU J, JIAO N Y. Effect of peanut||sesame intercropping on iron nutrient absorption and utilization of peanut[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022, 30(9): 1409–1416

花生||芝麻对花生铁营养吸收利用的影响*

孙增光¹, 汪江涛¹, 聂良鹏³, 武岩岩¹, 刘娟^{2**}, 焦念元^{1**}

(1. 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; 2. 河南省农业科学院经济作物研究所 郑州 450002; 3. 信阳市农业科学院 信阳 464000)

摘 要: 为探究花生||芝麻改善花生铁营养的机理, 本试验以花生‘科大黑花 001’和芝麻‘豫芝 8 号’为试验材料, 单作花生 (SP) 为对照, 研究了花生||芝麻行比 4 : 2 (P||S 4:2) 和 6 : 3 (P||S 6:3) 2 种间作模式对花生叶片 SPAD 值、根际土壤 pH、各器官活性铁和全铁含量及单株铁积累与分配的影响, 并分析了 2 种间作模式的间作产量优势。结果表明: 与 SP 相比, P||S 4:2、P||S 6:3 花生叶片 SPAD 值分别提高 13.60%~30.10% 和 22.15%~33.31% ($P<0.05$), 根际土壤 pH 在开花下针期、结荚期和荚果膨大期均显著降低 ($P<0.05$)。与 SP 相比, P||S 4:2 和 P||S 6:3 的花生茎、叶的活性铁含量分别提高 31.80%~72.78% 和 24.41%~72.49% ($P<0.05$), 全铁含量分别提高 16.80%~22.86% 和 15.91%~27.88% ($P<0.05$); 单株铁积累量在开花下针期、荚果膨大期和收获期分别提高 7.91%~22.42% 和 5.77%~15.58%, 尤其在收获期, 差异达显著水平 ($P<0.05$)。收获期, 与 SP 相比, P||S 4:2 和 P||S 6:3 的花生果仁全铁含量分别显著提高 21.97% 和 17.42% ($P<0.05$)。花生||芝麻的间作产量优势表现为 P||S 6:3>P||S 4:2。综上可知, 花生||芝麻能显著提高花生各器官的活性铁含量, 促进其对铁元素的吸收利用, 提高果仁铁含量及积累量, 这与间作能显著降低花生根际 pH 密切相关。改善花生果仁铁营养最佳模式是 P||S 4:2, 而间作产量优势最高模式为 P||S 6:3。

关键词: 花生||芝麻; 花生; 铁营养; 根际 pH

中图分类号: S513

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



Effect of peanut||sesame intercropping on iron nutrient absorption and utilization of peanut*

SUN Zengguang¹, WANG Jiangtao¹, NIE Liangpeng³, WU Yanyan¹, LIU Juan^{2**}, JIAO Nianyuan^{1**}

(1. College of Agriculture, Henan University of Science and Technology / Henan Dry Land Agricultural Engineering Technology Research Center, Luoyang 471023, China; 2. Industrial Crops Research Institute, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China; 3. Xinyang Academy of Agricultural Sciences, Xinyang 464000, China)

Abstract: Peanut and sesame are important oil crops in China, and they play an important role in national production. In alkaline soils, iron deficiency and chlorosis often occur in single-cropped peanut; however, iron deficiency rarely occurs in single-cropped sesame. Iron deficiency symptoms in peanut are significantly improved when intercropped with sesame and have significant yield ad-

* 国家现代农业产业技术体系 (CARS-13)、河南省自然科学基金项目 (212300410342) 和河南省科技攻关项目 (182102110180 和 212102110282) 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; 刘娟, 主要从事花生高产优质栽培生理研究, E-mail: liujuanviolet@163.com

孙增光, 主要从事间套作生理生态研究。E-mail: 1459147519@qq.com

收稿日期: 2022-01-20 接受日期: 2022-04-25

* The study was supported by the National Modern Agricultural Industrial Technology System (CARS-13), the Natural Science Foundation of Henan Province (212300410342) and the Science and Technology Key Projects of Henan Province (182102110180, 212102110282).

** Corresponding authors: JIAO Nianyuan, E-mail: jiaony1@163.com; LIU Juan, E-mail: liujuanviolet@163.com
Received Jan. 20, 2022; accepted Apr. 25, 2022

vantages and economic benefits. To explore the mechanism of improvement in iron nutrition of peanut in peanut/sesame intercropping system (peanut||sesame), a field experiment was conducted to investigate the effects of two intercropping modes of peanut and sesame with rows ratios of 4 : 2 (P||S 4:2) and 6 : 3 (P||S 6:3) on the leaves SPAD value, pH of rhizosphere soil, active iron contents and total iron contents of different parts, and iron accumulation and distribution per plant of peanut. In this experiment, peanut cultivar ‘Keda Heihua 001’ and sesame cultivar ‘Yuzhi No. 8’ were used as the materials, and peanut single cropping (SP) was used as the control. Furthermore, the yield advantages of two planting patterns of peanut||sesame were analyzed. The following results were obtained when intercropping was compared with SP: the leaf SPAD values of peanut in P||S 4:2 and P||S 6:3 treatments increased by 13.60%–30.10% and 22.15%–33.31% ($P<0.05$), respectively. The pH of the rhizosphere soil decreased significantly at the flowering and needling, pod setting, and pod expansion stages. Compared with those of SP, the contents of active iron in peanut stems and leaves were enhanced by 31.80%–72.78% and 24.41%–72.49% ($P<0.05$), respectively; and the total iron contents were enhanced by 16.80%–22.86% and 15.91%–27.88% ($P<0.05$), respectively, in P||S 4:2 and P||S 6:3 treatments. In addition, the iron accumulation per plant was increased by 7.91%–22.42% and 5.77%–15.58% in P||S 4:2 and P||S 6:3 treatments, respectively, at flowering and needling, pod expansion, and harvest stage; and, especially at harvest stage, the difference reached significant level ($P<0.05$). Compared with those of SP at the harvest stage, the total iron contents of peanut seeds in P||S 4:2 and P||S 6:3 treatments increased by 21.97% and 17.42%, respectively ($P<0.05$), and the yield advantage of peanut||sesame was P||S 6:3 > P||S 4:2. In conclusion, peanut||sesame can significantly increase the active iron contents in different parts of peanut, promote iron absorption and utilization, and improve the iron content and accumulation in seeds, and this is closely related to the fact that intercropping can significantly reduce the rhizosphere pH of peanut. The best intercropping pattern for iron nutrition improvement in peanut seeds was P||S 4:2; however, P||S 6:3 produced the highest yield.

Keywords: Peanut/sesame intercropping; Peanut; Iron nutrition; Rhizosphere pH

合理的间套作能实现时间和空间上资源的集约化利用^[1],是提高耕地利用率、缓解人地矛盾的有效途径。芝麻(*Sesamum indicum* L.)和花生(*Arachis hypogaea* L.)是我国重要的经济和油料作物^[2],在华北地区花生||芝麻间作是一种常见的种植模式,具有明显的产量间作优势和较高的经济效益^[3-4]。这主要是由于花生||芝麻存在明显的生长空间差异,高矮搭配能提高其地上冠层通风透光性,增强芝麻功能叶 PS II 对光能的吸收、转化与电子传递,促进对 CO₂ 的羧化固定,提高芝麻净光合速率和产量^[5];而且还能错开芝麻、花生干物质快速增长积累期^[6],利于花生干物质积累和产量提高,减肥减药、减少病虫害^[7]。花生||芝麻间作行比对其间作优势具有重要的影响,前人研究表明:花生 : 芝麻行比为 6 : 3 的种植模式较花生单作或芝麻单作增收 1050 元·hm⁻² 以上^[3],而汪强等^[4]认为 6 : 2 行比间作模式产量和效益最高,但综合来看 6 : 3 模式最优,其在不减少花生密度的情况下,适当种植芝麻,保证了较高的产量及经济效益。

生产上发现,在石灰性土壤上,作为缺铁适应机理 I 的花生新生叶时常出现缺铁黄化现象,导致其光合电子传递链的电子传递受阻,降低光合速率^[8],成为花生高产稳产的主要限制因素之一^[9],而同样作为缺铁适应机理 I 的芝麻却很少出现缺铁症状,二者间作后花生缺铁失绿症状得到明显改善。前人研究表明,玉米(*Zea mays* L.)||花生能改善花生铁营养,

关键在于玉米根系分泌的麦根酸活化土壤中铁营养,不仅能满足自身生长需要,还能被与其间作的花生吸收,改善花生铁营养^[10-11],促进花生生长和共生固氮^[12]。那么,花生||芝麻是如何改善花生铁营养的?其机理是什么?目前尚不清楚。为此,本试验以单作花生为对照,研究了花生||芝麻 4 : 2 和花生||芝麻 6 : 3 对花生上部叶 SPAD、各部位铁含量、铁积累与分配特点及花生产量的影响,揭示花生||芝麻高产高效机理。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验于 2017—2018 年在河南科技大学农场(33°35′~35°05′N, 111°8′~112°59′E)进行。试验地的年平均气温为 12.1~15.1 °C,年平均降水量约为 610 mm,年日照时数 1856~2263 h,无霜期 215~219 d。气候为半湿润、半干旱大陆性季风气候。试验地土质为中壤黄潮土,0~20 cm 耕层土壤容重 1.31 g·cm⁻³,有机质 14.90 g·kg⁻¹,pH 8.20,全氮 1.32 g·kg⁻¹,速效磷 15.7 mg·kg⁻¹,速效氮 33.9 mg·kg⁻¹,速效钾 223.8 mg·kg⁻¹,有效铁 5.98 mg·kg⁻¹(养分分级属中等水平),排灌良好。

1.2 试验设计

本试验以花生‘科大黑花 001’和芝麻‘豫芝 8 号’为供试材料,分别设单作花生(SP)、单作芝麻(SS)、花生||芝麻行比为 4 : 2 (P||S 4:2) 和 6 : 3 (P||S 6:3) 等 4 种植植方式,共 4 个处理,每个处理重复 3 次,共

12个小区。小区长8 m、宽6 m,面积48 m²。南北行向种植,芝麻、花生种植均为平作种植,其前茬作物为冬小麦(*Triticum aestivum* L.)。单作芝麻行距40 cm,株距20 cm,密度125 000株·hm⁻²;单作花生行距30 cm,穴距20 cm,每穴双粒播种,密度166 667穴·hm⁻²;花生||芝麻体系中,芝麻、花生间距30 cm,间作芝麻行距30 cm,株距15 cm,密度74 074株·hm⁻²;间作花生行距30 cm,穴距20 cm,每穴双粒播种,密度111 111穴·hm⁻²。各处理磷肥均基施磷酸二铵180 kg(P₂O₅)·hm⁻²,氮肥均基施尿素90 kg(N)·hm⁻²。2017年花生、芝麻于6月27日播种,10月11日收获;2018年花生、芝麻于6月12日播种,9月22日收获。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 SPAD值

使用SPAD-502型叶绿素仪测定。于花生开花下针期、结荚期和荚果膨大期,每个小区分别选择代表性单作花生、间作花生4:2和6:3各15株,测其主茎倒3叶(上部叶)的SPAD值,取平均值。

1.3.2 干物质量及全铁含量

在花生开花下针期、结荚期、荚果膨大期和收获期,各小区取代表性4株花生植株,自来水冲洗后再用去离子水漂洗。P||S 4:2和P||S 6:3处理中花生分别选取东侧2行和东侧3行代表性植株。花生晾干后分为上部叶(花生植株每个分支上部数前3个节间的叶片为上部叶)、中部叶(花生植株每个分支上部数4~6个节间的叶片为中部叶)、下部叶(每个分支剩余叶片为下部叶)、上部茎(花生植株每个分支上部数前3个节间的茎为上部茎)、中部茎(花生植株每个分支上部数4~6个节间的茎为中部茎)、下部茎(每个分支剩余茎为下部茎)和果仁共7个部分,105℃杀青30 min,75℃烘至恒重;称重后用不锈钢粉碎机粉碎,浓H₂SO₄-H₂O₂法消煮,原子吸收分光光度计(瓦里安AA220)测定全铁含量。

1.3.3 根际土pH

在花生开花下针期和结荚期时,每个小区取两穴4株花生,采用抖土法取花生根际土,即以抖动后仍附着在根系的土壤为根际土壤,用PSH-2C型酸度计定量测定。

1.3.4 植株活性铁含量

在开花下针期、黄化始期和盛期时,每个小区取两穴4株花生,分别称取其上部叶、中部叶、下部叶、上部茎、中部茎和下部茎2 g(鲜重),剪碎20 mL 1 mol·L⁻¹ HCl浸提(25℃下连续震荡5 h)过滤后,原子吸收分光光度计(瓦里安AA220)测定活

性铁含量^[13]。

1.3.5 产量

在收获期,单作芝麻、单作花生每个小区均选取有代表性的2 m双行植株,花生||芝麻4:2和花生||芝麻6:3分别选取东侧有代表性的2 m双行和2 m 3行植株进行测产,重复3次。分别取芝麻蒴果和花生荚果,风干后测定芝麻籽粒和花生荚果重量,间作花生、间作芝麻按所占面积计算实际产量。

1.4 数据统计分析

试验数据采用Excel 2016进行整理、分析和绘图,使用SPSS软件进行方差分析,利用LSD方法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 花生||芝麻对花生叶片SPAD值的影响

在花生开花下针期,单作花生新叶出现了缺铁失绿症状,而间作花生未出现;在花生荚果膨大期,间作花生新生叶也出现缺铁失绿症状,但其症状比单作花生轻。经测定分析花生上部叶SPAD表明,在开花下针期,花生叶的SPAD值表现为P||S 4:2>P||S 6:3>SP;结荚期与荚果膨大期表现为P||S 6:3>P||S 4:2>SP(图1)。与SP相比,P||S 4:2和P||S 6:3中花生叶SPAD值分别提高13.60%~30.10%和22.15%~33.31%,差异均达到显著水平($P<0.05$)。这表明花生||芝麻可以改善花生叶片黄化现象,提高花生叶的SPAD值,

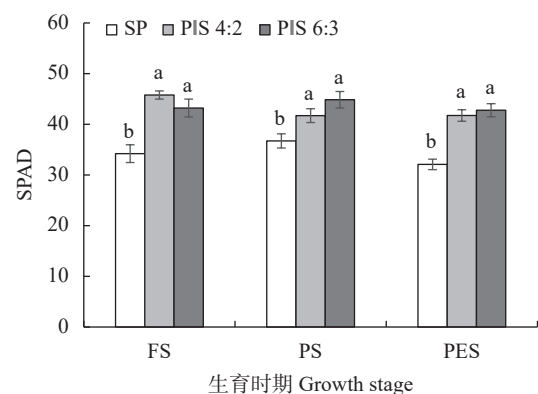


图1 花生||芝麻对花生叶SPAD值的影响(2018年)

Fig. 1 Effect of peanut||sesame on the SPAD value of peanut leaves in 2018

SP: 单作花生; P||S 4:2: 花生||芝麻行比为4:2; P||S 6:3: 花生||芝麻行比为6:3。FS: 开花下针期; PS: 结荚期; PES: 荚果膨大期。不同小写字母表示同一生育期不同处理间差异显著($P<0.05$)。SP: sole-cropping peanut; P||S 4:2: four rows peanut intercropped with two rows sesame; P||S 6:3: six rows peanut intercropped with three rows sesame. FS: flowering and needling stage; PS: pod setting stage; PES: pod expansion stage. Different lowercase letters above the bars indicate significant differences among treatments at the same growth stage ($P<0.05$).

尤其在 P||S 6:3 模式下,花生叶的 SPAD 值增长最大。

2.2 花生||芝麻对花生各部位活性铁含量的影响

活性铁的含量比全铁含量更能准确地反映植物的铁营养状况,植物出现缺铁失绿的原因不是体内铁的总量不足,而是活性铁不足^[14]。本研究发现,在开花下针期、黄化始期和黄化盛期,花生的上部叶、中部叶、下部叶、上部茎、中部茎和下部茎各部位的活性铁含量均表现为 P||S 4:2>P||S 6:3>SP, 差异均达显著水平 ($P<0.05$) (表 1)。在黄化盛期,与 SP 相比, P||S 4:2 和 P||S 6:3 两种间作模式中,花生上部叶、中部叶、下部叶、上部茎、中部茎和下部茎的活性铁含量分别提高 24.41%~40.39%、28.96%~50.88%、43.13%~72.49%、36.14%~55.21%、33.16%~67.31% 和 31.80%~72.78%, 且达显著水平 ($P<0.05$)。这表明花生||芝麻时可以显著提高花生茎、叶的活性铁含量,改善花生铁营养。

2.3 花生||芝麻对花生各部位全铁含量的影响

如表 2 所示,各处理间,花生下部叶、中部叶、上部叶、下部茎、中部茎和上部茎的全铁含量各时期均表现为 P||S 4:2>P||S 6:3>SP。尤其在收获期, P||S 4:2 和 P||S 6:3 的花生上部叶、中部叶、下部叶、上部茎、中部茎、下部茎和果仁的全铁含量分别比单作花生 (SP) 提高 15.91%~26.66%、20.93%~27.88%、22.48%~27.86%、16.80%~22.62%、17.17%~22.86%、17.56%~22.51% 和 17.42%~21.97%, 差异均达显著水平 ($P<0.05$)。这表明,花生||芝麻不仅提高花生茎、叶的全铁含量,还能提高收获期果仁中铁营养。

2.4 花生||芝麻对花生单株铁积累的影响

如图 2 所示,与单作花生相比,花生||芝麻提高了花生单株铁积累量。与单作花生相比, P||S 4:2 和 P||S 6:3 的单株铁积累量在开花下针期分别提高 22.42% 和 15.58%, 在结荚期分别提高 5.08% 和 2.21%, 在荚

表 1 芝麻||花生对花生各部位活性铁含量的影响 (2018 年)

Table 1 Effect of peanut||sesame on active Fe contents of different parts of peanut in 2018

mg·kg⁻¹

生育期 Growth stage	种植方式 Cropping pattern	上部叶 Top leaf	中部叶 Middle leaf	下部叶 Lower leaf	上部茎 Top stem	中部茎 Middle stem	下部茎 Lower stem
开花下针期 Flowering and needling stage	SP	19.35±0.39c	20.16±0.46c	21.26±0.20c	18.99±0.35c	20.66±0.23c	22.37±0.38c
	P S 4:2	29.68±0.60a	27.38±0.63a	35.21±0.33a	30.54±0.56a	32.78±0.37a	36.78±0.62a
	P S 6:3	24.52±0.50b	22.45±0.51b	26.31±0.25b	25.37±0.46b	27.85±0.32b	29.65±0.50b
黄化始期 Early etiolation stage	SP	19.67±0.40c	21.66±0.50c	22.37±0.23c	20.37±0.37c	22.47±0.26c	23.69±0.40c
	P S 4:2	33.49±0.68a	29.77±0.68a	37.69±0.38a	31.29±0.57a	34.51±0.39a	38.52±0.65a
	P S 6:3	29.58±0.60b	23.74±0.54b	27.54±0.25b	25.21±0.46b	26.61±0.30b	28.66±0.48b
黄化盛期 Severe etiolation stage	SP	20.65±0.42c	22.17±0.51c	23.37±0.21c	20.34±0.37c	21.32±0.24c	22.89±0.39c
	P S 4:2	30.85±0.63a	33.45±0.76a	40.31±0.40a	31.57±0.58a	35.67±0.41a	39.55±0.67a
	P S 6:3	25.69±0.52b	28.59±0.65b	33.45±0.31b	27.69±0.51b	28.39±0.32b	30.17±0.51b

SP: 单作花生; P||S 4:2: 花生||芝麻行比为 4 : 2; P||S 6:3: 花生||芝麻行比为 6 : 3。同列同一生育期数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。SP: sole-cropping peanut; P||S 4:2: four rows peanut intercropped with two rows sesame; P||S 6:3: six rows peanut intercropped with three rows sesame. Different lowercase letters after data in the same column of the same growth stage indicate significant differences among treatments ($P<0.05$).

表 2 芝麻||花生对花生各部位全铁含量的影响 (2018 年)

Table 2 Effect of peanut||sesame on total Fe contents in different parts of peanut in 2018

mg·kg⁻¹

生育期 Growth stage	种植方式 Cropping pattern	上部叶 Upper leaf	中部叶 Middle leaf	下部叶 Lower leaf	上部茎 Upper stem	中部茎 Middle stem	下部茎 Lower stem	果仁 Seed
开花下针期 Flowering and needling stage	SP	130.7±5.3c	144.5±4.6b	159.6±3.7b	134.2±3.4c	141.3±4.4c	139.7±5.0c	—
	P S 4:2	160.9±6.5a	186.0±6.0a	213.3±5.0a	175.4±4.5a	178.3±5.6a	178.3±6.4a	—
	P S 6:3	145.5±5.9b	177.5±5.7ab	204.7±4.8a	156.2±4.0b	166.6±5.2b	160.6±5.8b	—
结荚期 Pod setting stage	SP	123.8±5.0c	133.5±4.3b	146.2±3.4c	117.9±3.0c	139.4±4.4c	157.2±5.6b	—
	P S 4:2	146.8±5.9a	161.2±5.2a	183.8±4.3a	152.1±3.9a	181.5±5.7a	209.3±7.5a	—
	P S 6:3	130.9±5.3bc	153.3±4.9a	172.3±4.0b	135.6±3.5b	166.3±5.2b	197.8±7.1a	—
荚果膨大期 Pod expansion stage	SP	122.3±4.9b	135.7±4.4b	157.7±3.7c	113.9±2.9b	136.3±4.3b	149.7±5.4b	—
	P S 4:2	155.5±6.3a	175.9±5.6a	197.8±4.6a	142.5±3.7a	165.1±5.2a	192.8±6.9a	—
	P S 6:3	145.5±5.7a	170.6±5.5a	183.8±4.3b	135.9±3.5a	157.5±5.0a	180.5±6.5a	—
收获期 Harvest stage	SP	121.9±4.9c	138.1±4.4b	146.8±3.4b	116.7±3.0c	133.4±4.2b	143.5±5.1b	66.0±1.6c
	P S 4:2	154.4±6.2a	176.6±4.8a	187.7±4.4a	143.1±3.7a	163.9±5.2a	175.8±6.3a	80.5±1.5a
	P S 6:3	141.3±5.7b	167.0±5.4a	179.8±4.2a	136.3±3.5b	156.3±4.9a	168.7±6.0a	77.5±1.3b

SP: 单作花生; P||S 4:2: 花生||芝麻行比为 4 : 2; P||S 6:3: 花生||芝麻行比为 6 : 3。同列同一生育期数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。SP: sole-cropping peanut; P||S 4:2: four rows peanut intercropped with two rows sesame; P||S 6:3: six rows peanut intercropped with three rows sesame. Different lowercase letters after data in the same column of the same growth stage indicate significant differences among treatments ($P<0.05$).

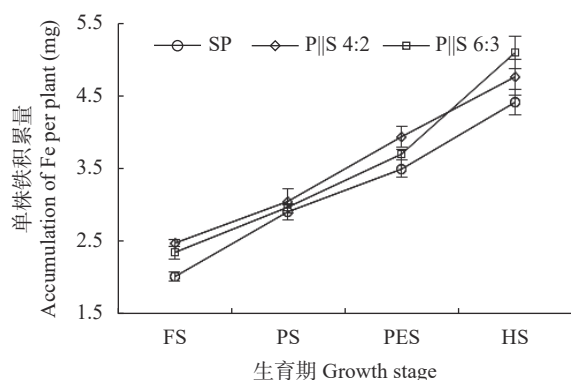


图2 花生||芝麻对花生单株铁积累的影响 (2018年)

Fig. 2 Effect of peanut||sesame on Fe accumulation of peanut in 2018

SP: 单作花生; P||S 4:2: 花生||芝麻行比为4:2; P||S 6:3: 花生||芝麻行比为6:3。FS: 开花下针期; PS: 结荚期; PES: 荚果膨大期; HS: 收获期。SP: sole-cropping peanut; P||S 4:2: four rows peanut intercropped with two rows sesame; P||S 6:3: six rows peanut intercropped with three rows sesame. FS: flowering and needling stage; PS: pod setting stage; PES: pod expansion stage; HS: harvest stage.

果膨大期分别提高12.66%和5.77%,在收获期分别提高7.91%和15.65%,开花下针期和收获期差异达显著水平 ($P<0.05$)。这表明,花生||芝麻能促进花生

铁积累。

2.5 花生||芝麻对花生全铁积累与分配的影响

如表3所示,在收获期,与单作相比,花生||芝麻提高了花生各部位的铁积累量。其中,花生叶的铁积累量表现为:上部叶>中部叶>下部叶;茎的铁积累量表现为:下部茎>中部茎>上部茎;果仁铁积累量表现为 P||S 4:2>P||S 6:3>SP。与单作相比, P||S 4:2和 P||S 6:3的果仁铁积累量分别提高23.72%和20.34%,差异达显著水平 ($P<0.05$);其分配比例分别提高13.89%和3.05%,其中 P||S 4:2和单作相比差异达显著水平 ($P<0.05$)。这表明,花生||芝麻能提高花生各部位的铁积累量,促进铁向果仁的分配,提高果仁的铁积累量。

2.6 花生||芝麻对花生根际土 pH 的影响

如表4所示,与 SP 相比,在开花下针期, P||S 4:2和 P||S 6:3模式下的花生根际土 pH 分别降低2.21%和1.10%;在结荚期, P||S 4:2和 P||S 6:3模式 pH 分别降低2.92%和2.31%;在荚果膨大期, P||S 4:2和 P||S 6:3模式 pH 分别降低2.32%和1.47%。这表明花生||芝麻能够降低花生根际土的 pH。

表3 花生||芝麻对收获期花生铁积累与分配的影响 (2018年)

Table 3 Effect of peanut||sesame on Fe accumulation and distribution at harvest stage in 2018

项目 Item	种植方式 Cropping pattern	上部叶 Upper leaf	中部叶 Middle leaf	下部叶 Lower leaf	上部茎 Upper stem	中部茎 Middle stem	下部茎 Lower stem	果仁 Seed
铁积累量 Fe accumulation (mg·plant ⁻¹)	SP	1.32±0.04b	0.38±0.03d	0.33±0.02b	0.44±0.03b	0.45±0.03b	0.90±0.03a	0.59±0.01b
	P S 4:2	1.33±0.04b	0.47±0.04c	0.34±0.02ab	0.44±0.03b	0.48±0.06a	0.98±0.05a	0.73±0.02a
	P S 6:3	1.36±0.05ab	0.54±0.03a	0.34±0.02ab	0.48±0.06a	0.49±0.05a	1.19±0.02a	0.71±0.01a
铁分配比例 Fe distribution ratio (%)	SP	29.99a	8.68b	7.40a	9.89a	10.19a	20.40b	13.46c
	P S 4:2	27.97b	9.94b	7.07ab	9.17b	9.99ab	20.53b	15.33a
	P S 6:3	26.74b	10.46a	6.60b	9.32ab	9.59b	23.42a	13.87c

SP: 单作花生; P||S 4:2: 花生||芝麻行比为4:2; P||S 6:3: 花生||芝麻行比为6:3。同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。SP: sole-cropping peanut; P||S 4:2: four rows peanut intercropped with two rows sesame; P||S 6:3: six rows peanut intercropped with three rows sesame. Different lowercase letters after data in the same column indicate significant differences among treatments ($P<0.05$).

表4 芝麻||花生对花生根际土 pH 的影响 (2018年)

Table 4 Effect of peanut||sesame on the pH value of the rhizosphere soil of peanut in 2018

种植方式 Cropping pattern	开花下针期 Flowering and needling stage	结荚期 Pod setting stage	荚果膨大期 Pod expansion stage
SP	8.13±0.02a	8.21±0.04a	8.17±0.02a
P S 4:2	7.95±0.03c	7.97±0.02b	7.98±0.04c
P S 6:3	8.04±0.04b	8.02±0.05b	8.05±0.03b

SP: 单作花生; P||S 4:2: 花生||芝麻行比为4:2; P||S 6:3: 花生||芝麻行比为6:3。同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。SP: sole-cropping peanut; P||S 4:2: four rows peanut intercropped with two rows sesame; P||S 6:3: six rows peanut intercropped with three rows sesame. Different lowercase letters after data in the same column indicate significant differences among treatments ($P<0.05$).

2.7 花生||芝麻对间作体系产量及土地当量比的影响

如表5所示,2年试验结果显示单作作物的产量显著高于间作体系中相应间作作物的产量 ($P<0.05$)。

2017年 P||S 4:2和 P||S 6:3的花生产量比单作花生分别降低67.19%和63.38%,芝麻产量比单作芝麻分别降低20.82%和17.18%;2018年 P||S 4:2和 P||S 6:3的花生产量分别比单作花生降低了45.80%和41.63%,芝麻产量比单作芝麻分别降低41.33%和38.56%。但从间作体系来看,两种间作模式的土地当量比均大于1,表现为 P||S 6:3>P||S 4:2, P||S 6:3较 P||S 4:2的土地当量比提高5.83%~6.19%。这表明花生||芝麻能提高土地利用效率,其提高幅度为12%~20%,具有明显产量间作优势。

3 讨论

3.1 花生||芝麻能改善花生铁营养

已有研究发现,石灰性土壤 pH 通常在7.5~8.5,

表 5 花生||芝麻对间作体系产量及土地当量比的影响
Table 5 Effect of peanut||sesame on yield and land equivalent ratio in intercropping system

年份 Year	种植模式 Cropping 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
		花生 Peanut	芝麻 Sesame	花生 Peanut	芝麻 Sesame	
2017	SP	5361±818a	1729±48a	—	—	—
	P S 4:2	1759±32b	1369±19c	0.328(0.667)	0.792(0.333)	1.12
	P S 6:3	1963±257b	1432±19b	0.366(0.667)	0.828(0.333)	1.19
2018	SP	4000±83a	2308±238a	—	—	—
	P S 4:2	2168±17b	1354±101b	0.542(0.667)	0.587(0.333)	1.13
	P S 6:3	2335±28b	1418±109b	0.583(0.667)	0.614(0.333)	1.20

SP: 单作花生; P||S 4:2: 花生||芝麻行比为4:2; P||S 6:3: 花生||芝麻行比为6:3。同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。SP: sole-cropping peanut; P||S 4:2: four rows peanut intercropped with two rows sesame; P||S 6:3: six rows peanut intercropped with three rows sesame. Different lowercase letters after data in the same column indicate significant differences among treatments ($P<0.05$).

当土壤 pH>7.5 时, 土壤 pH 每升高 1 个单位, 土壤溶液中铁的活性就降低 1000 倍, 使土壤中的铁不易被吸收利用^[15]。由于石灰性土壤 pH 较高, 花生上部叶极易出现缺铁失绿症状^[16]。当作物出现缺铁状态时, 会影响植株叶片叶绿素合成, 进而影响作物的生长发育^[8]。Inal 等^[17]研究发现, 玉米 (*Zea mays* L.)||花生能降低花生根际土 pH, 花生叶片未出现缺铁失绿症状, 其植株的活性铁含量及全铁含量显著高于单作花生, 促进了花生对铁营养的吸收。本研究发现, 在开花下针期, 单作花生出现缺铁黄化现象, 而花生||芝麻后, 花生新生叶片缺铁失绿症状消失或明显减轻; 间作花生功能叶 SPAD 值显著高于单作花生, 上部叶活性铁含量和全铁含量显著高于单作花生, 并且间作花生根际土 pH 显著低于单作花生, 这表明花生||芝麻能够改善花生铁营养, 其机理可能是花生||芝麻时芝麻根系分泌有机酸^[18], 使花生根际土 pH 降低, 从而提高了土壤铁的有效性。这与 Inal 等^[17]、郭桂英等^[19]分别在玉米||花生、小麦||花生中的花生根际土 pH 降低, 提高花生铁营养具有相似的研究结果。亦或是由于芝麻根系分泌出柠檬酸^[18], 与土壤中难溶性铁形成柠檬酸螯合铁有关, 这还需要进一步研究。

3.2 花生||芝麻促进花生铁营养的吸收利用

土壤缺铁会严重降低作物籽粒中的铁含量^[20]。前人研究发现, 通过合理有效的间作可以改善作物籽粒的缺素问题。如郭桂英等^[19]在小麦||花生体系中研究发现, 小麦花生间作后能够有效改善花生铁营养; 在玉米花生间作体系中, 玉米的根际效应能够活化花生根际铁, 改善花生各部位的铁营养状况, 尤其是能够提高花生果仁的铁含量^[21-22]。花生芝麻间作体系中, 间作花生各器官的全铁含量、单株铁积累量均高于单作花生, 尤其在收获期, 花生||芝麻能显著提高花生单株铁积累量及果仁全铁含量, 显著促进铁在果仁内的积累与分配。这表明花生||芝麻能够

促进花生对铁的吸收利用, 提高果仁铁营养, 其机理可能是因为芝麻降低了花生根际土 pH, 使根际周围的铁更容易被花生根系吸收利用, 促进铁营养向花生果仁的吸收与分配; 也有可能是由于花生||芝麻时芝麻根系分泌柠檬酸, 螯合土壤中的难溶性铁, 是否如玉米||花生那样, 玉米改善花生铁营养后诱导花生铁吸收基因在根中^[23]、铁转运基因在根和叶中的表达^[24-25], 促进花生对铁的吸收与运输, 增强向果仁的分配, 还需进一步探索研究。本研究结果还表明, P||S 4:2 模式在改善花生铁营养上效果优于 P||S 6:3, 这可能是因为 P||S 4:2 模式下, 花生与芝麻的根系交互紧密, 根际交互效应能更好地促进花生根部对土壤中铁元素的吸收利用。

3.3 花生||芝麻对产量间作优势的影响

本研究结果表明, 与单作体系相比, 花生||芝麻行比为 4:2 和 6:3 两种间作模式均表现出明显的产量间作优势。这与王健等^[26]和梁满等^[27]对花生||芝麻的研究结果一致。花生||芝麻产量优势在于其地下根际种间作用改善了花生铁营养, 提高了叶片 SPAD 值; 其地上部冠层较玉米||花生更利于协调矮位作物与高位作物共处后期的光竞争矛盾, 改善花生冠层光环境, 提高功能叶净光合速率, 错开干物质快速增长积累期, 促进花生干物质积累和产量提高^[6]; 同时, 还增强了芝麻功能叶 PS II 对光能的吸收、转化与电子传递, 促进对 CO₂ 的羧化固定, 提高了芝麻净光合速率和产量^[5]。两种花生||芝麻模式中, 产量间作优势以行比为 6:3 模式高于行比为 4:2 模式。这主要是由于芝麻功能叶的净光合速率 6:3 行比模式明显高于 4:2 行比模式^[5]; 对花生而言, 受芝麻遮荫的程度表现为 6:3 行比模式小于 4:2 行比模式, 且芝麻、花生的偏土地当量比均表现为 6:3 行比模式高于 4:2 行比模式 (表 5), 所以 6:3 行比模式的产量间作优势较高。

4 结论

综上所述,相较于单作花生,花生||芝麻能够有效地改善花生缺铁黄化现象,改善花生铁营养,这与花生||芝麻降低花生根际 pH 密切相关。根际 pH 降低有利于提高土壤中铁有效性含量,从而显著提高花生地上部各器官的活性铁含量、全铁含量以及果仁铁含量和铁积累量,促进花生对铁营养的吸收及向果仁的分配。在花生||芝麻两种模式中,4:2 行比模式改善花生铁营养效果最优,6:3 行比模式的产量间作优势最高。因此,在大田生产中,可以在偏碱性的地块上采用花生||芝麻来改善花生铁营养,促进生长发育,达到增产提质效果。

参考文献 References

- [1] WILLEY R W. Resource use in intercropping systems[J]. *Agricultural Water Management*, 1990, 17(1/2/3): 215–231
- [2] 曹小娣. 芝麻花生间作效益好[J]. *中国农业信息*, 2007(4): 28
CAO X D. High efficiency of sesame peanut intercropping[J]. *China Agricultural Information*, 2007(4): 28
- [3] 李红梅. 花生—芝麻间作模式研究[J]. *现代农业科技*, 2010(7): 53, 56
LI H M. Study on peanut-sesame intercropping pattern[J]. *Modern Agricultural Sciences and Technology*, 2010(7): 53, 56
- [4] 汪强, 吴延华, 赵莉, 等. 芝麻与花生间作套种增效技术研究[J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(27): 16519–16522
WANG Q, WU Y H, ZHAO L, et al. Research on technology of improving efficiency when intercropping sesame (*Sesamum indicum*) with peanut (*Arachis hypogaea* L.)[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39(27): 16519–16522
- [5] 王飞, 孙增光, 焦念元, 等. 芝麻与花生间作对芝麻功能叶光合荧光特性的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(11): 3787–3794
WANG F, SUN Z G, JIAO N Y, et al. The effects of sesame/peanut intercropping on photosynthetic fluorescence characteristics in functional leaf of sesame[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(11): 3787–3794
- [6] 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
WU Y Y, WANG J T, LI X, et al. Yield and economic benefits of peanut intercropping with maize and sesame[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(8): 1285–1295
- [7] 高树广, 李伟峰, 王瑞霞, 等. 周口生态区麦茬芝麻-花生间作高效栽培技术[J]. *陕西农业科学*, 2018, 64(3): 98–99
GAO S G, LI W F, WANG R X, et al. High-efficient cultivation techniques of sesame intercropping with peanut after harvest wheat in Zhoukou ecological area[J]. *Shaanxi Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 64(3): 98–99
- [8] 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
- [9] 高丽, 史衍玺, 周健民. 不同耐低铁基因型花生铁营养特性的差异[J]. *土壤通报*, 2009, 40(6): 1393–1397
GAO L, SHI Y X, ZHOU J M. Genetic differences in iron nutrient characteristic of different peanut cultivars with resistance to iron deficiency[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40(6): 1393–1397
- [10] ZUO Y M, ZHANG F S, LI X, et al. Studies on the improvement in iron nutrition of peanut by intercropping with maize on a calcareous soil[J]. *Plant and Soil*, 2000, 220: 12–15
- [11] JIAO N Y, WANG F, MA C, et al. Interspecific interactions of iron and nitrogen use in peanut (*Arachis hypogaea* L.)-maize (*Zea mays* L.) intercropping on a calcareous soil[J]. *European Journal of Agronomy*, 2021, 128: 126303
- [12] 左元梅, 张福锁. 不同禾本科作物与花生混作对花生根系质外体铁的累积和还原力的影响[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(2): 221–225
ZUO Y M, ZHANG F S. Effects of different Gramineous crops mixed with peanut on accumulation and reducing capacity of extracellular iron in peanut root[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(2): 221–225
- [13] TAKKAR P N, KAUR N P. HCl method for Fe^{2+} estimation to resolve iron chlorosis in plants[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1984, 7(1/2/3/4/5): 81–90
- [14] 张秀玮, 张民, 王全辉, 等. 外源NO对缺铁胁迫下花生生理特性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(3): 665–673
ZHANG X W, ZHANG M, WANG Q H, et al. Effects of exogenous nitric oxide on physiological characteristics of peanut under iron-deficient stress[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(3): 665–673
- [15] SCHMIDT W. Iron solutions: acquisition strategies and signaling pathways in plants[J]. *Trends in Plant Science*, 2003, 8(4): 188–193
- [16] 唐琨, 朱伟文, 周文新, 等. 土壤pH对植物生长发育影响的研究进展[J]. *作物研究*, 2013, 27(2): 207–212
TANG K, ZHU W W, ZHOU W X, et al. Research progress on effects of soil pH on plant growth and development[J]. *Crop Research*, 2013, 27(2): 207–212
- [17] INAL A, GUNES A, ZHANG F, et al. Peanut/maize intercropping induced changes in rhizosphere and nutrient concentrations in shoots[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2007, 45(5): 350–356
- [18] 吕丰娟, 张志华, 汪瑞清, 等. 不同生育期芝麻根系分泌物对连作障碍的响应及其自毒作用[J]. *中国油料作物学报*, 2021, 43(6): 1087–1098
LYU F J, ZHANG Z H, WANG R Q, et al. Response of sesame root exudates at different growing stages to continuous cropping and its autotoxicity[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2021, 43(6): 1087–1098
- [19] 郭桂英, 申建波. 小麦/花生间作体系中根际有效铁含量及pH值的动态分布[J]. *海南大学学报(自然科学版)*, 2006, 24(1): 42–46
GUO G Y, SHEN J B. Dynamic distribution of DTPA-Fe and pH value in the rhizosphere of peanut in the intercropping system between peanut and wheat[J]. *Natural Science Journal of Hainan University*, 2006, 24(1): 42–46
- [20] 张妮娜, 上官周平, 陈娟. 植物应答缺铁胁迫的分子生理机制及其调控[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(5): 1365–1377

- ZHANG N N, SHANGGUAN Z P, CHEN J. Molecular physiological mechanism and regulation of plant responses to iron deficiency stress[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(5): 1365–1377
- [21] ZUO Y, ZHANG F. Iron and zinc biofortification strategies in dicot plants by intercropping with gramineous species. A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2009, 29(1): 63–71
- [22] 左元梅, 李晓林, 王永歧, 等. 玉米花生间作对花生铁营养的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 1997, 3(2): 153–159
ZUO Y M, LI X L, WANG Y Q, et al. Effect of maize/peanut intercropping on iron nutrition of peanut[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1997, 3(2): 153–159
- [23] GUO X T, XIONG H C, SHEN H Y, et al. Dynamics in the rhizosphere and iron-uptake gene expression in peanut induced by intercropping with maize: role in improving iron nutrition in peanut[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2014, 76: 36–43
- [24] XIONG H C, KAKEI Y, KOBAYASHI T, et al. Molecular evidence for phytosiderophore-induced improvement of iron nutrition of peanut intercropped with maize in calcareous soil[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2013, 36(10): 1888–1902
- [25] SHEN H Y, XIONG H C, GUO X T, et al. AhDMT1, a Fe^{2+} transporter, is involved in improving iron nutrition and N_2 fixation in nodules of peanut intercropped with maize in calcareous soils[J]. *Planta*, 2014, 239(5): 1065–1077
- [26] 王健, 蔡崇光. 花生、芝麻间作高产高效技术[J]. *辽宁农业科学*, 2002(1): 44–45
WANG J, CAI C G. High yield and high efficiency technology of peanut and sesame intercropping[J]. *Liaoning Agricultural Science*, 2002(1): 44–45
- [27] 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

欢迎订阅 2023 年《中国生态农业学报（中英文）》

《中国生态农业学报(中英文)》原名《中国生态农业学报》,由中国科学院遗传与发育生物学研究所和中国生态经济学学会主办,中国科学院主管,科学出版社出版。系中文核心期刊、中国科技精品期刊、百种中国杰出学术期刊、中国权威学术期刊,为中国学术期刊综合评价数据库、中国期刊全文数据库、中国学术期刊文摘、中国科学引文数据库、中国科技论文与引文数据库、CNKI 中国期刊全文数据库源刊,并被国际农业生物学文摘(CABI)、美国化学文摘(CA)、日本科学技术振兴机构数据库(JST)、哥白尼索引(IC)、美国乌利希国际期刊指南、Scopus 等国际数据库及检索单位收录。

《中国生态农业学报(中英文)》报道农业生态学、农业生态经济学及生态农业和农业生态工程等领域的创新性研究成果。内容划分为农业生态系统及其调控、作物栽培与生理生态、农业资源与环境、农业生态经济与生态农业 4 个栏目。

据《中国科技期刊引证报告》(核心版)2021 年影响因子为 2.005,学科排名第 2。据 CNKI《中国学术期刊影响因子年报(自然科学与工程技术)·2021 版》期刊复合影响因子为 3.262,期刊综合影响因子为 2.361。

《中国生态农业学报(中英文)》国内外公开发行,每期定价 70 元,全年 840 元。邮发代号: 82-973,全国各地邮局均可订阅。漏订者可直接汇款至编辑部补订。

地址: (050022) 河北省石家庄市槐中路 286 号《中国生态农业学报(中英文)》编辑部

电话: (0311) 85818007; 网址: <http://www.ecoagri.ac.cn>; E-mail: editor@sjziam.ac.cn



公众微信号: zgstnyxb

<http://www.ecoagri.ac.cn>