

## 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

张晓娜, 陈平, 杜青, 周颖, 任建锐, 金福, 杨文钰, 雍太文

引用本文:

张晓娜, 陈平, 杜青, 等. 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[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(8): 1183–1194.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.181055>

---

### 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

#### 不同供氮水平下玉米/大豆间作体系干物质积累和氮素吸收动态模拟

Simulation of dry matter accumulation and nitrogen absorption in a maize/soybean intercropping system supplied with different nitrogen levels

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(9): 1354–1363 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190075>

#### 减量施氮与间作大豆对华南地区甜玉米农田氮平衡的影响

Effect of nitrogen reduction and soybean intercropping on nitrogen balance in sweet maize fields in South China

中国生态农业学报. 2018, 26(11): 1643–1652 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180121>

#### 禾豆间距对间作豌豆“氮阻遏”减缓效应的影响

Effect of cereal-legume spacing in intercropping system on alleviating “N inhibition” in pea plants

中国生态农业学报. 2016, 24(9): 1169–1176 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160289>

#### 新开垦土壤上构建玉米/蚕豆-根瘤菌高效固氮模式

Construction of efficient nitrogen-fixing cropping pattern: Maize/faba bean intercrop with rhizobium inoculation in reclaimed low-fertility soils

中国生态农业学报. 2018, 26(1): 62–74 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170620>

#### 减量施氮与间作模式对甜玉米AMF侵染和大豆结瘤及作物氮磷吸收的影响

Effects of reduced nitrogen application and intercropping on sweet corn AMF colonization, soybean nodulation and nitrogen and phosphorus absorption

中国生态农业学报. 2017, 25(8): 1139–1146 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170050>

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.181055

张晓娜, 陈平, 杜青, 周颖, 任建锐, 金福, 杨文钰, 雍太文. 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[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(8): 1183-1194

ZHANG X N, CHEN P, DU Q, ZHOU Y, REN J R, JIN F, YANG W Y, YONG T W. Effects of maize/soybean and maize/peanut intercropping systems on crops nitrogen uptake and nodulation nitrogen fixation[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(8): 1183-1194

# 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\*

张晓娜, 陈平, 杜青, 周颖, 任建锐, 金福, 杨文钰, 雍太文\*\*

(四川农业大学农学院/农业部西南作物生理生态与耕作重点实验室/四川省作物带状复合种植工程技术研究中心  
成都 611130)

**摘要:** 禾本科与豆科作物间作具有显著的增氮作用。为探明玉米/大豆、玉米/花生间作模式的氮素吸收、氮营养竞争能力及豆科结瘤特性的变化, 解释玉米与豆科间作体系的增氮效应, 通过田间试验, 设置玉米单作(MM)、大豆单作(SS)、玉米/大豆间作(MS)、花生单作(PP)、玉米/花生间作(MP)等5种植植模式, 研究不同种植模式对作物氮素积累、氮营养竞争强弱及豆科结瘤固氮特性的调控作用。结果表明, 与单作相比, 间作显著降低玉米和大豆的氮素积累量, 对花生的氮素积累量影响不显著。5种模式系统氮素积累总量表现为MS>SS>MP, PP和MM处理最低且差异不显著, MS处理比MP处理显著高21.8%。与MM处理相比, MS和MP处理的玉米氮素积累量分别降低20.5%和11.7%, 其中MP处理籽粒、叶片和茎秆氮素积累量比MS处理高8.9%、21.2%和14.3%。与SS处理相比, MS处理的大豆氮素积累量降低28.5%, 其中, 中行、边行分别降低10.1%、15.4%。玉米相对大豆氮营养竞争比率表现为强( $CR_{ms}>1$ ), 相对花生则表现为弱( $CR_{mp}<1$ )。与SS处理相比, 五叶期MS处理的大豆根瘤数量显著增加, 根瘤鲜重无显著差异, 盛花期后根瘤数量和鲜重均显著降低; MS处理的大豆根瘤固氮酶活性均降低, 且中行降低幅度更大。与PP处理相比, 开花期MP处理的花生根瘤数量和鲜重均显著增加, 下针期后均显著降低; MP处理的花生根瘤固氮酶活性均降低, 且边行降低幅度更大。各间作模式作物的氮素积累量虽然降低, 但间作模式的系统氮素积累量却显著高于各单作模式, 两种间作模式中MS处理的氮素积累总量最高。

**关键词:** 种植模式; 玉米/大豆间作; 玉米/花生间作; 氮素吸收; 结瘤固氮

中图分类号: S513; S565

文章编号: 2096-6237(2019)08-1183-12

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



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

ZHANG Xiaona, CHEN Ping, DU Qing, ZHOU Ying, REN Jianrui, JIN Fu, YANG Wenyu, YONG Taiwen\*\*

(College of Agriculture, Sichuan Agriculture University / Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Cultivation in Southwest China, Ministry of Agriculture / Sichuan Engineering Research Center for Crop Strip Intercropping System, Chengdu 611130, China)

\* 国家重点研发计划(2018YFD0201006)和国家现代农业(大豆)产业技术体系专项(CARS-04-03A)资助

\*\* 通信作者: 雍太文, 主要从事作物栽培生理生态研究。E-mail: yongtaiwen@sicau.edu.cn

张晓娜, 主要从事作物氮素营养相关研究。E-mail: 1039738012@qq.com

收稿日期: 2018-12-05 接受日期: 2019-03-28

\* This study was supported by the National Key Research and Development Project of China (2018YFD0201006) and the Special Fund for the Industrial System Construction of Modern Agriculture of China (CARS-04-03A).

\*\* Corresponding author, E-mail: yongtaiwen@sicau.edu.cn

Received Dec. 5, 2018; accepted Mar. 28, 2019

**Abstract:** Cereal/legume-based intercropping systems have a significant effect on the soil by increasing nitrogen (N) content. To understand the trends of N uptake, N nutrient competition capacity, and the legume nodulation characteristics in a maize/legume intercropping system, we investigated the N absorption advantage in maize/soybean and maize/peanut strip intercropping systems. We conducted a field experiment to study N accumulation, N nutrient competition, and the legume nodulation N fixation regulation characteristics in different planting patterns, which were maize monoculture (MM), soybean monoculture (SS), maize/soybean intercropping (MS), peanut monoculture (PP), and maize/peanut intercropping (MP). The results showed that compared with the monocultures, intercropping decreased N accumulation in maize and soybeans and had no significant effect on the N accumulation in peanuts. The trend of total N accumulation in the five planting patterns was MS > SS > MP; PP and MM treatments exhibited the lowest accumulation and the difference was not significant. Moreover, the N accumulation of MS treatment was 21.8% higher than that of MP treatment. Additionally, N accumulation of maize in MS and MP treatments decreased by 20.5% and 11.7%, respectively, compared with MM treatment. N accumulation of grain, leaves, and stalks of maize in MP treatment was 8.9%, 21.2%, and 14.3% higher than those in MS treatment. Furthermore, N accumulation of soybean in MS treatment decreased by 28.5%, and the central and fringe rows decreased by 10.1% and 15.4%, respectively compared with SS treatment. The effect of MP treatment on peanut N accumulation was not significant. The value of N nutrition competition indicated that maize had a dominant position in MS, whereas it exhibited less competition in MP treatment. Compared with SS treatment, the number of soybean nodules in MS treatment was higher at the fifth trifoliate stage and lower after the full bloom stage. The effect of nodule fresh weight was not significant at the fifth trifoliate stage, and it decreased after the full bloom stage. Nitrogenase activity of soybean nodules in MS treatment decreased, and the decrease was greater in the central rows. Relative to PP treatment, the number and fresh weight of peanut nodules in MP treatment were higher at the early flowering stage and lower after the acicula forming stage. The nitrogenase activity of peanut nodules in MP treatment decreased, and the amplitude of the decrease was greater in the fringe row. Although the amount of N accumulation of crops in the intercropping planting patterns was reduced, the total N accumulation of the intercropping system was significantly higher than the monoculture planting patterns. The amount of N accumulation of MS treatment was the highest in the two intercropping planting patterns.

**Keywords:** Planting pattern; Maize/soybean intercropping; Maize/peanut intercropping; Nitrogen uptake; Nodulation nitrogen fixation

间作套种是一种被证实具有多种优势而广泛应用推广的栽培技术<sup>[1]</sup>。该技术能够提高光、热、水、肥、土等自然资源的利用效率<sup>[2-4]</sup>，有效防治病虫害<sup>[5]</sup>，提高农田生态系统的生产力及稳定性，促进作物高产、高效并持续增产<sup>[6]</sup>。间套作系统中作物间有一定共生期，作物对资源的利用在时间和空间上产生互补效应。就空间而言，种间资源的互补效应体现在两方面：一是地上部光、热资源的充分利用，二是地下部水分、养分资源的充分利用<sup>[7]</sup>。大量研究表明，间套作地下部资源的优势主要体现在作物营养利用方面<sup>[8-10]</sup>，间套作通过物种多样性有效竞争营养资源提高养分利用率<sup>[11-12]</sup>，通过根系生态位分离充分利用空间营养资源增加养分吸收<sup>[13-14]</sup>。禾本科(Gramineae)作物与豆科(Leguminosae)作物间套作是较普遍的间套作组合方式<sup>[15-16]</sup>，豆科作物的根瘤具有生物固氮特性<sup>[17]</sup>，因此在治理环境污染和氮肥过度使用问题中承担重要角色<sup>[18-19]</sup>。研究表明，豆科作物与禾本科作物间套作后影响豆科的结瘤固氮。于晓波等<sup>[20]</sup>研究表明，玉米(*Zea mays*)与大豆(*Glycine max*)套作系统中，与单作相比套作大豆根

瘤数量、单株根瘤重和酰脲含量均显著下降。冯晓敏等<sup>[21]</sup>研究表明，燕麦(*Avena sativa*)与花生(*Arachis hypogaea*)间作后降低花生开花结荚期的根瘤数、根瘤重和单位质量的根瘤固氮酶活性，但提高了成熟期花生的固氮效率，促进了花生固氮能力的发挥。赵财等<sup>[22]</sup>研究表明，玉米与豌豆(*Pisum sativum*)间作系统中，与单作相比，间作豌豆有效根瘤个数和根瘤重均显著提高，根瘤数提高幅度达0~500%。房增国等<sup>[23]</sup>通过盆栽试验研究表明，在不同施氮条件下，玉米/花生混作后改善花生铁营养，玉米对氮素的高需求缓解了花生根瘤的“氮阻遏”效应，增加花生根瘤数，增强根瘤固氮酶活性。以上研究表明不同间套作系统对豆科结瘤固氮的影响不同。玉米与大豆间套作在西南丘陵旱地研究较多<sup>[24-26]</sup>，而对玉米/花生间作的相关研究较少。前期研究发现玉米与大豆、花生间作后虽然土地当量比(LER)均大于1，但与单作相比，间作中3种作物的产量均降低<sup>[27]</sup>。为了解其降低原因是否与作物的氮素积累和结瘤特性及根瘤固氮能力的变化有关，本文从玉米间作大豆、花生模式入手，研究两种间作体系中作物的氮

素积累和氮营养竞争能力差异以及豆科结瘤固氮等的变化, 了解玉米与大豆、花生间作后各作物氮营养的竞争关系及豆科根瘤生长发育特性的差异, 探讨两种间作模式的优势关系, 以期为西南丘陵旱地选择间作种植模式及养分利用提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验地点及材料

供试玉米、大豆、花生品种分别为‘正红 6 号’(四川农业大学提供)、『南豆 25’(四川省南充市农业科学研究院提供)、『天府 18 号’(四川省南充市农业科学研究院提供)。试验于 2016 年 5—10 月在四川省现代粮食产业仁寿示范基地展开。

### 1.2 试验设计

采用单因素完全随机设计。共 5 种模式: 玉米单作(MM)、大豆单作(SS)、花生单作(PP)、玉米/大豆间作(MS)、玉米/花生间作(MP)。带长 9 m, 带宽 2.2 m, 每小区 3 带, 小区面积 59.4 m<sup>2</sup>。每处理 3 次

重复。种植模式均采用宽窄行种植, 窄行行距 40 cm, 宽行行距 180 cm。间作玉米株距 17 cm, 宽行 180 cm 内种 3 行大豆或花生, 间作大豆或花生带内行距 30 cm, 大豆穴距 11 cm, 穴留 1 株; 花生穴距 13 cm, 穴留 2 株。单作玉米种植 4 行, 窄行行距 40 cm, 宽行 180 cm 内种 2 行玉米, 玉米带内行距 40 cm, 株距 34 cm; 单作大豆或花生种植 5 行, 窄行行距 40 cm, 宽行 180 cm 内种 3 行大豆或花生, 大豆穴距 18.3 cm, 穴留 1 株; 花生穴距 21.6 cm, 穴留 2 株(图 1)。单作、间作模式下, 玉米与大豆、花生独立施肥, 玉米分两次施肥, 底肥施 N 72 kg·hm<sup>-2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 105 kg·hm<sup>-2</sup>、K<sub>2</sub>O 112.5 kg·hm<sup>-2</sup>; 大喇叭口期追施 N 108 kg·hm<sup>-2</sup>; 大豆、花生一次施肥, 底肥施 N 60 kg·hm<sup>-2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 63 kg·hm<sup>-2</sup>、K<sub>2</sub>O 52.5 kg·hm<sup>-2</sup>。均为行间开沟均匀施肥。3 种作物 5 月 30 日播种, 玉米 9 月 4 日收获, 大豆 10 月 17 日收获, 花生 9 月 25 日收获。

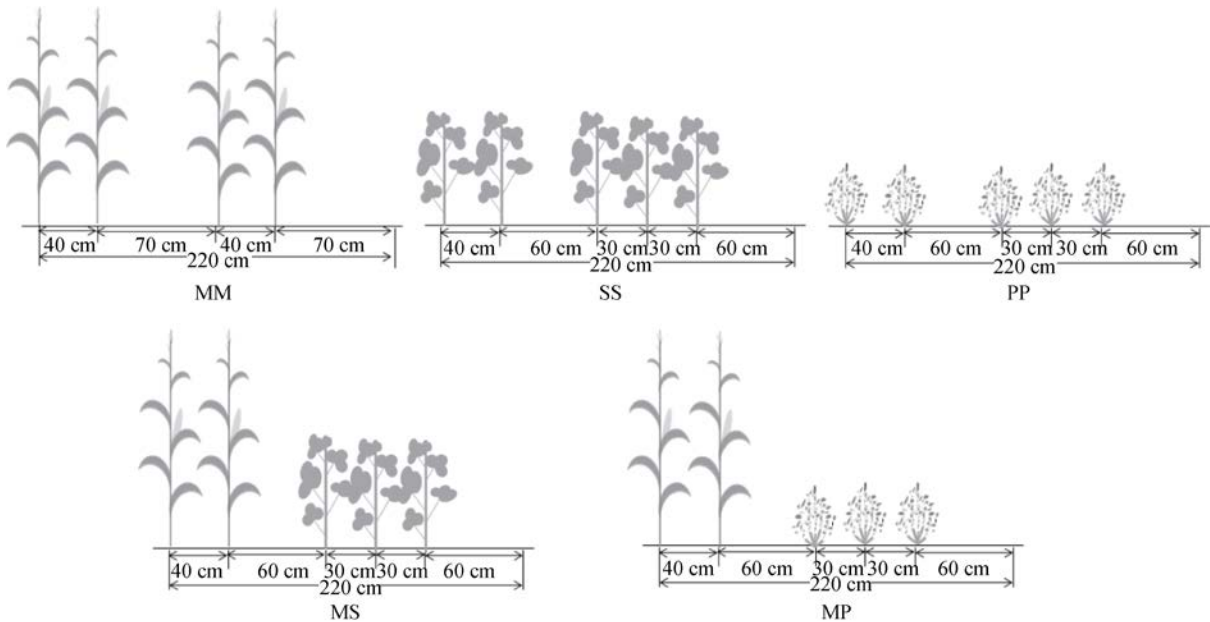


图 1 不同种植模式示意图

Fig. 1 Diagrammatic sketches of different planting patterns

MM: 玉米单作; SS: 大豆单作; PP: 花生单作; MS: 玉米/大豆间作; MP: 玉米/花生间作。MM: maize monoculture; SS: soybean monoculture; PP: peanut monoculture; MS: maize/soybean intercropping; MP: maize/peanut intercropping.

### 1.3 测定项目与方法

#### 1.3.1 植株地上部生物量与含氮量

各作物在成熟期采集地上部样品。每小区随机选取长势一致 3 株植株, 豆科分中、边行取样。植株自子叶痕处剪下, 按茎、叶、籽粒各器官分装。于 105 °C 杀青 30 min, 70 °C 烘干至恒重, 粉碎过 80 目筛后, 用凯氏定氮法测定植株全氮含量。

#### 1.3.2 豆科根瘤数量与鲜重

大豆五叶期(V5)、盛花期(R2)、鼓粒期(R6), 花生开花期(ES)、下针期(AS)、饱果期(FS)分别收集豆科作物根瘤样。选取长势一致的 4 株植株, 将地上部自子叶痕处剪下, 挖取长 40 cm、宽 30 cm、深 30 cm 见方的土段, 装入尼龙网袋, 浸入盛有冰块的塑料桶中清洗根系, 剥离根瘤, 泥水过筛后收集根瘤, 快速吸干水分并计数、称重, 完全混匀后放置液氮

保存用于测定固氮酶活性<sup>[20]</sup>。

### 1.3.3 根瘤固氮酶活性

采用乙炔还原法测定固氮酶活性<sup>[28]</sup>。将混匀后的根瘤称取 1 g 放入 10 mL 的青霉素瓶, 从中抽出 2 mL 的空气并注入 2 mL 乙炔气体, 于 30 °C 恒温水浴反应 30 min, 用微量注射器抽取 0.1 mL 气体注入气相色谱仪进行测定。气相条件: 柱温为 60 °C; 进样口温度 120 °C; FID 检测器温度 120 °C; 气体流速: N<sub>2</sub>、H<sub>2</sub> 和空气分别设定为 50 mL·min<sup>-1</sup>、60 mL·min<sup>-1</sup> 和 50 mL·min<sup>-1</sup>。

### 1.3.4 相关计算

根瘤固氮潜力(mL·h<sup>-1</sup>·plant<sup>-1</sup>)=根瘤固氮酶活性(mL·g<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup>)×根瘤鲜重(g·plant<sup>-1</sup>) (1)

植物各器官吸氮量(g)=植物各器官生物量(g)×植株各器官氮含量(g·kg<sup>-1</sup>) (2)

氮营养竞争比率计算公式<sup>[29]</sup>:

$$CR_{ms}=(NU_{im}/NU_{sm})\times F_{im}/(NU_{is}/NU_{ss})\times F_{is} \quad (3)$$

$$CR_{mp}=(NU_{im}/NU_{sm})\times F_{im}/(NU_{ip}/NU_{pp})\times F_{ip} \quad (4)$$

式中: CR<sub>ms</sub>、CR<sub>mp</sub> 分别为玉米相对于大豆、花生的氮营养竞争比率, NU<sub>im</sub>、NU<sub>is</sub>、NU<sub>ip</sub> 分别表示间作中的玉米、大豆、花生吸氮量, NU<sub>sm</sub>、NU<sub>ss</sub>、NU<sub>pp</sub> 分别表示单作中的玉米、大豆、花生吸氮量, F<sub>im</sub>、F<sub>is</sub>、F<sub>ip</sub> 分别为间作中玉米、大豆、花生所占面积比例(%)。CR<sub>ms</sub>>1 或 CR<sub>mp</sub>>1, 表明玉米相对于大豆或花生的

氮营养竞争能力强; CR<sub>ms</sub><1 或 CR<sub>mp</sub><1, 表明玉米相对于大豆或花生的氮营养竞争能力弱。

### 1.4 数据分析

采用 Excel 2013 进行数据整理, Origin 数据作图, SPSS 22.0 数据统计分析(LSD, α=0.05)。

## 2 结果与分析

### 2.1 间作对豆科作物结瘤及固氮的影响

#### 2.1.1 大豆和花生根瘤数量和鲜重

由表 1 可知, 不同处理对大豆根瘤数量和鲜重影响显著。不同生育时期, 与 SS 处理相比 MS 处理的大豆根瘤数量前期显著增加, 后期显著降低; 根瘤鲜重 V5 期影响不显著, R2 期显著降低, R6 期降低但差异不显著。随着生育时期的推移, 两种处理的大豆根瘤特性表现不一致。SS 处理的大豆根瘤数量增加至 R2 期后趋于稳定, 而 MS 处理的大豆根瘤数量增加至 R2 期后仍持续增加(29.7%)。说明 MS 处理推迟了大豆根瘤数量达到峰值的时间。SS 处理的大豆根瘤鲜重增加至 R2 期后大幅降低, 降低 21.1%, 而 MS 处理大豆根瘤鲜重增加至 R2 期后降幅较小, 降低 7.3%, 这可能由于 R2 期后大豆根瘤开始衰老, 而 MS 处理推迟了大豆根瘤峰值的时间, 所以 R2 期至 R6 期 MS 处理的大豆根瘤鲜重降幅较小。

表 1 间作模式对大豆和花生不同生育期根瘤数量和鲜重的影响

Table 1 Effects of intercropping patterns on nodule number and fresh weight of soybean and peanut at different growth stages

作物 Crop	处理 Treatment	根瘤数量 Nodule number per plant			根瘤鲜重 Nodule fresh weight (g·plant <sup>-1</sup> )		
		V5(ES)	R2(AS)	R6(FS)	V5(ES)	R2(AS)	R6(FS)
大豆 Soybean	SS	31.8±1.57b	249.8±5.56a	249.9±4.10a	0.4±0.01a	5.2±0.19a	4.1±0.13a
	MS	36.7±0.75a	177.2±2.16b	229.9±2.80b	0.4±0.02a	4.1±0.04b	3.8±0.16a
花生 Peanut	PP	29.3±0.37b	217.9±0.30a	256.6±6.88a	0.4±0.01b	2.1±0.08a	2.9±0.07a
	MP	38.7±0.39a	116.8±2.02b	205.8±1.25b	0.5±0.01a	1.2±0.06b	2.4±0.16b

SS: 大豆单作; MS: 玉米/大豆间作; PP: 花生单作; MP: 玉米/花生间作。大豆的生育时期: V5, 五叶期; R2, 盛花期; R6, 鼓粒期。花生的生育时期: ES, 开花期; AS, 下针期; FS, 饱果期。同列数据同一作物后不同字母表示单作与间作在 0.05 水平上差异显著。SS: soybean monoculture; MS: maize/soybean intercropping; PP: peanut monoculture; MP: maize/peanut intercropping. V5, R2 and R6 are the growth stages of soybean of 5-trifoliolate stage, full bloom stage and seed filling stage. ES, AS and FS are the growth stages of peanut of early flowering stage, acicula forming stage and filling stage. Different lowercase letters of the same crop in a column mean significant difference between monoculture and intercropping at 0.05 probability level.

不同处理对花生根瘤数量和鲜重影响显著。不同生育时期, MP 处理与 PP 处理相比, 花生根瘤数量和鲜重前期增加, 后期降低, ES 期 MP 处理根瘤数量和鲜重分别增加 32.1% 和 25.0%, AS 期、FS 期根瘤数量和鲜重分别降低 46.4% 和 19.8%、42.8% 和 17.2%。随着生育时期的推移, 两种处理的花生根瘤特性表现一致。AS 期至 FS 期 PP、MP 处理花生根瘤数量分别增加 17.8%、76.2%, 根瘤鲜重分别增加

38.1%、100.0%。两处理相比, MP 处理花生根瘤数量和鲜重的增幅较大, 说明间作模式在一定阶段后能够有效改善花生的根瘤生长。

#### 2.1.2 大豆和花生中行、边行根瘤数量和鲜重

由图 2 可知, 不同处理对各时期大豆中行、边行根瘤数量和鲜重影响显著。两种处理在不同生育时期下大豆中行、边行根瘤数量和鲜重表现不一致。SS 处理 V5 期大豆根瘤数量中行显著小于边行, 根

瘤鲜重无差异; R2 期根瘤数量和鲜重均无差异; R6 期根瘤鲜重和数量均为中行显著小于边行。表明 SS 处理的大豆具有边行优势。MS 处理 V5 期大豆根瘤

数量和鲜重中行显著大于边行; R2 期根瘤数量中行显著大于边行, 根瘤鲜重中行显著小于边行; R6 期根瘤鲜重和数量均为中行显著大于边行。表明 MS

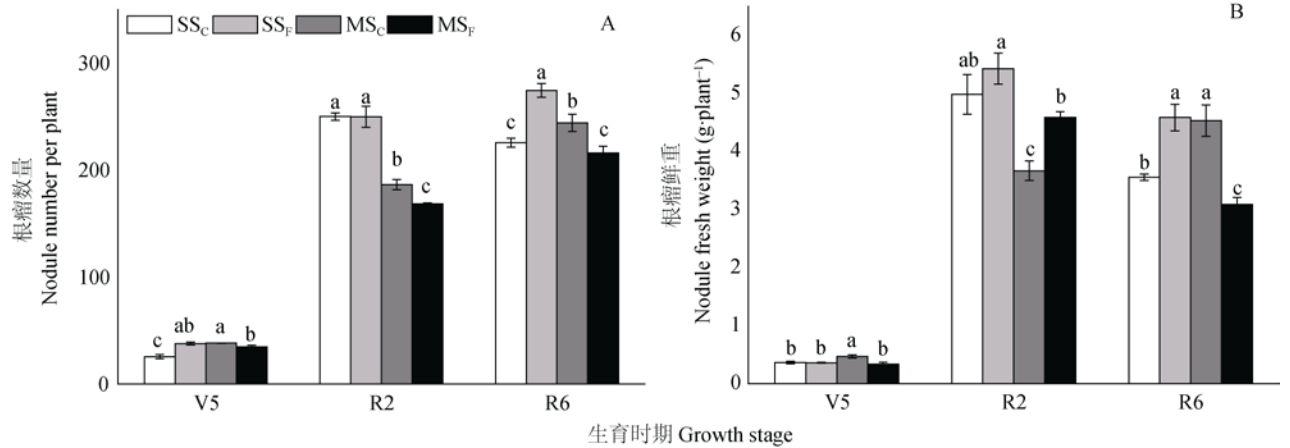


图 2 与玉米间作对大豆中行和边行根瘤数量(A)和根瘤鲜重(B)的影响

Fig. 2 Effects of intercropping with maize on nodule number (A) and nodule fresh weight (B) of soybeans in central and fringe rows  
C: 宽行中的中行; F: 宽行中的边行; SS: 大豆单作; MS: 玉米/大豆间作。V5: 五叶期; R2: 盛花期; R6: 鼓粒期。不同字母表示单作和间作的中行和边行间 0.05 水平上差异显著。C: central row in the wide-rows; F: fringe row in the wide-rows; SS: soybean monoculture; MS: maize/soybean intercropping. V5: 5-trifoliate stage; R2: full bloom stage; R6: seed filling stage. Different lowercase letters mean significant differences among central row and fringe row of monoculture and intercropping at 0.05 probability level.

处理的大豆没有边行优势, 可能原因是边行大豆与玉米间的竞争作用。

由图 3 可知, 不同处理对花生中行、边行根瘤数量和鲜重影响显著。两种处理在不同生育时期花生中行、边行根瘤数量和鲜重表现一致。PP 处理 ES 期花生根瘤数量和鲜重中行显著小于边行; AS 期根瘤数量中行显著大于边行, 鲜重无差异;

FS 期根瘤数量中行显著小于边行, 鲜重中行小于边行但差异不显著。MS 处理 ES 和 FS 期花生根瘤数量和鲜重中行显著小于边行; AS 期根瘤数量中行显著小于边行, 根瘤鲜重无差异。两处理的中行和边行相比, 都具有一定的边行优势。玉米与花生和大豆间作后, 对花生和大豆边行结瘤特性的影响不同。

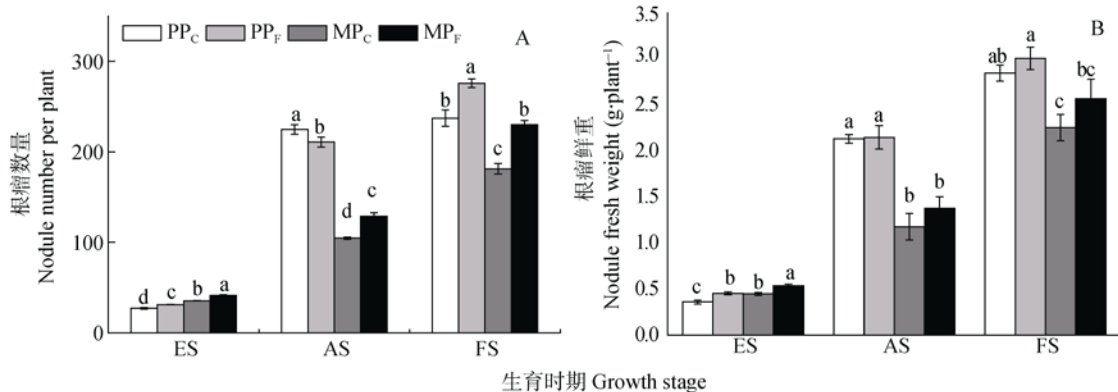


图 3 与玉米间作对花生中行和边行根瘤数量(A)和根瘤鲜重(B)的影响

Fig. 3 Effects of intercropping with maize on nodule number (A) and nodule fresh weight (B) of peanuts in central and fringe rows  
C: 宽行中的中行; F: 宽行中的边行; PP: 花生单作; MP: 玉米/花生间作。ES: 开花期; AS: 下针期; FS: 饱满期。不同字母表示单作和间作的中行和边行间 0.05 水平上差异显著。C: central row in the wide-rows; F: fringe row in the wide-rows; PP: peanut monoculture; MP: maize/peanut intercropping. ES: early flowering stage; AS: acicula forming stage; FS: filling stage. Different lowercase letters mean significant differences among central row and fringe row of monoculture and intercropping at 0.05 probability level.

### 2.1.3 大豆根瘤固氮酶活性

由图 4A 可知, 不同处理对大豆各时期中行、边行根瘤单位质量固氮酶活性影响显著。大豆根瘤单位质

量固氮酶活性, SS 和 MS 处理均在 R2 期最大, 且 SS 处理大于 MS 处理。SS 和 MS 处理在中行、边行的表现规律一致, 均为 V5 和 R2 期中行大于边行, R6 期中

行小于边行,但 SS 处理在 R6 期的差异不显著,MS 处理在 V5 期的差异不显著。SS 和 MS 处理中行、边行在 R2—R6 期的降幅分别为 19.6%、4.6%和 14.1%、1.7%,与中行相比,边行的降幅更小,可能是因为边行的边际效应所致。与 SS 处理相比,MS 处理的降幅更小,说明 MS 处理可以缓解大豆生长后期的根瘤衰老。

由图 4B 可知,不同处理对大豆各时期中行、边行单株根瘤固氮酶活性影响显著。两处理在各时期,大豆单株根瘤固氮酶活性与单位质量固氮酶活性的表现规律一致,均为 R2 期最大,SS 处理大于 MS 处理。而中行、边行的表现规律不一致,SS 处理 V5 和

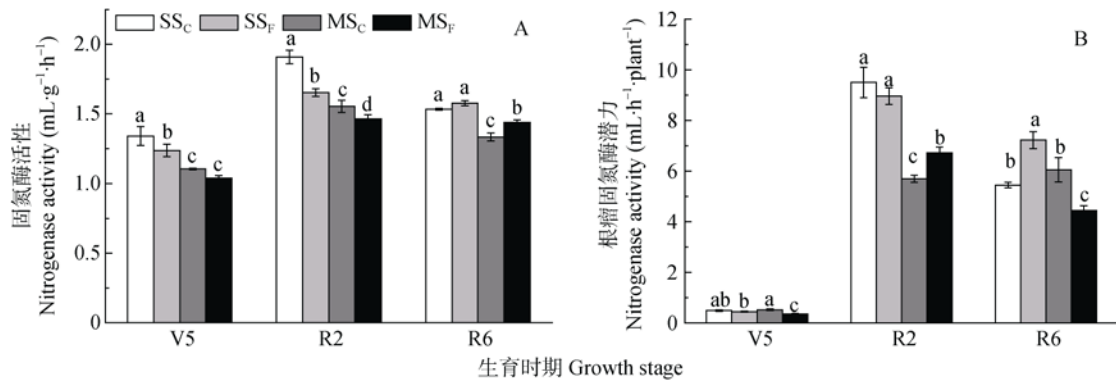


图 4 与玉米间作对中行和边行大豆根瘤固氮酶活性(A)和固氮酶潜力(B)的影响

Fig. 4 Effect of intercropping with maize on nitrogenase activity (A) and nitrogenase fixation potential (B) of nodule of soybeans in central and fringe rows

C: 宽行中的中行; F: 宽行中的边行; SS: 大豆单作; MS: 玉米/大豆间作。V5: 五叶期; R2: 盛花期; R6: 鼓粒期。不同字母表示单作和间作的中行和边行间 0.05 水平上差异显著。C: central row in the wide-rows; F: fringe row in the wide-rows; SS: soybean monoculture; MS: maize/soybean intercropping. V5: 5-trifoliate stage; R2: full bloom stage; R6: seed filling stage. Different lowercase letters mean significant differences among central row and fringe row of monoculture and intercropping at 0.05 probability level.

### 2.1.4 花生单株根瘤固氮酶活性

由图 5A 可知,不同处理对花生各时期中行、边行根瘤单位质量固氮酶活性影响显著,花生与大豆相比表现规律不同。花生单位质量固氮酶活性,PP 和 MP 处理均在 FS 期最大,PP 处理大于 MP 处理。PP 和 MP 处理在中行、边行的表现规律一致,均为中行显著大于边行。PP 和 MP 处理中行、边行在 AS—FS 期的增幅分别为 13.1%、14.1%和 7.7%、1.4%,与 PP 处理相比,MP 处理的增幅小,说明 MP 处理的花生根瘤固氮酶活性始终受抑制。

由图 5B 可知,不同处理对花生各时期中行、边行单株根瘤固氮酶活性影响显著,花生单株根瘤固氮酶活性在时期和处理间与单位质量根瘤固氮酶活性表现规律一致,PP 处理显著大于 MP 处理。PP 和 MP 处理中行、边行单株根瘤固氮酶活性表现为,PP 处理 ES 期中行显著小于边行,AS 和 FS 期差异不显著;MP 处理各时期均不显著。两处理中花生单位质量根瘤固氮酶活性为中行显著高

R2 期中行大于边行,但均不显著,R6 期中行显著小于边行;MS 处理 V5 和 R6 期中行显著大于边行,R2 期中行显著小于边行,MS 处理 R2 期中行的单位质量固氮酶活性大于边行,而单株根瘤固氮酶活性却小于边行,原因在于单株根瘤固氮酶活性由单位质量固氮酶活性和单株根瘤重量共同决定,R2 期中行的单株根瘤重量显著小于边行,所以中行单株根瘤固氮酶活性小于边行。SS 处理中行、边行在 R2—R6 期的降幅分别为 42.6%、19.3%,MS 处理 R2—R6 期,中行增幅为 6.3%,边行降幅为 33.8%,两处理相比,SS 处理的降幅更大。

于边行,花生鲜重为中行低于边行,所以在花生鲜重存在边际效应时,两处理的中行花生可能是通过提高单位质量的根瘤固氮酶活性来保持单株根瘤的固氮潜力。

## 2.2 间作对作物氮素积累及分配的影响

### 2.2.1 间作系统的作物氮素积累

由表 2 可知,5 种处理的系统氮素积累总量差异显著,各处理系统氮素积累总量表现为 MS>SS>MP,PP 和 MM 处理最低,差异不显著。MS 处理的系统氮素积累总量分别比 SS 和 MM 处理高 5.1%和 59.4%;MP 处理的系统氮素积累总量分别比 PP 和 MM 处理高 47.8%和 48.1%。MS 和 MP 处理的系统氮素积累总量相比,MS 处理比 MP 处理显著高 21.8%。结果表明,MS 和 MP 处理具有促进作物系统氮素积累的作用。MS 和 MP 处理对玉米氮素积累的影响存在差异,MP 处理较 MS 处理对玉米氮素积累具有一定促进作用。

### 2.2.2 玉米单株氮素积累与分配

由图 6 可知,不同处理对玉米氮素积累量影响

显著。玉米单株氮素积累总量, MS 和 MP 处理较 MM 处理显著降低 20.5%和 11.7%, 主要降低茎和籽粒器官的氮素积累量。与 MS 处理相比, MP 处理的

玉米单株氮素积累总量较高, 高 8.9%, 主要通过增加茎、叶和籽粒各器官的氮素积累量。各处理中玉米各器官的氮素分配比为籽粒>叶>茎。与 MM 处理

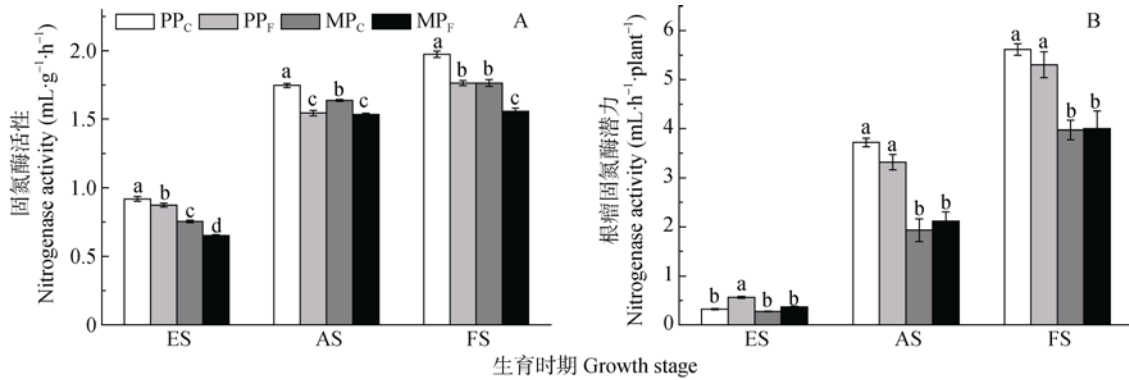


图 5 与玉米间作对中行和边行花生根瘤固氮酶活性(A)和固氮酶潜力(B)的影响

Fig. 5 Effect of intercropping with maize on nitrogenase activity (A) and nitrogenase fixation potential (B) of nodule of peanuts in central and fringe rows

C: 宽行中的中行; F: 宽行中的边行; PP: 花生单作; MP: 玉米/花生间作。ES: 开花期; AS: 下针期; FS: 饱果期。不同字母表示单作和间作的中行和边行间 0.05 水平上差异显著。C: central row in the wide-rows; F: fringe row in the wide-rows; PP: peanut monoculture; MP: maize/peanut intercropping. ES: early flowering stage; AS: acicula forming stage; FS: filling stage. Different lowercase letters mean significant differences among central row and fringe row of monoculture and intercropping at 0.05 probability level.

表 2 玉米/大豆和玉米/花生间作对作物氮素积累量的影响  
Table 2 N accumulate of maize, soybean and peanut of maize/soybean and maize/peanut intercropping patterns  
kg·hm<sup>-2</sup>

处理 Treatment	玉米 Maize	大豆 Soybean	花生 Peanut	总量 Total
MM	152.6±2.49a	—	—	152.6±2.49d
SS	—	356.8±1.91a	—	356.8±1.91b
MS	121.3±3.78c	254.9±0.95b	—	376.2±2.95a
PP	—	—	153.4±4.95a	153.4±4.95d
MP	134.7±1.54b	—	160.9±5.93a	295.4±7.42c

MM: 玉米单作; SS: 大豆单作; MS: 玉米/大豆间作; PP: 花生单作; MP: 玉米/花生间作。同列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。MM: maize monoculture; SS: soybean monoculture; MS: maize/soybean intercropping; PP: peanut monoculture; MP: maize/peanut intercropping. Values followed by different lowercase letters with a column are significantly different at 0.05 probability level.

相比, MS 和 MP 处理向茎的氮素分配减少, 向叶的氮素分配增加。主要因为间作光环境的改善影响玉

米向叶片分配较多的氮素。由于间作玉米保持与单作相同的密度, 玉米的生长环境既存在种间竞争也存在种内竞争, 因此对玉米茎秆的生长具有抑制作用, 向茎的氮素分配降低。

### 2.2.3 大豆单株氮素积累与分配

由图 7 可知, 不同处理对大豆氮素积累量影响显著。大豆单株氮素积累量, 两处理均为边行显著高于中行, 可能因为边行优势。与 SS 处理相比, MS 处理的中行和边行分别降低 10.1%和 15.4%, MS 处理的大豆中行各器官氮素积累量均降低, 以茎秆降低最多; 边行茎和籽粒氮素积累量降低, 而叶片增加。两种处理下大豆各器官氮素积累量表现一致, 均为籽粒最多, 叶片次之, 茎秆最少。与 SS 处理相比, MS 处理中行向籽粒的分配增加, 而边行向籽粒的分配降低, 表明生长受到抑制时, 大豆可以向籽粒中分配更多的氮素。

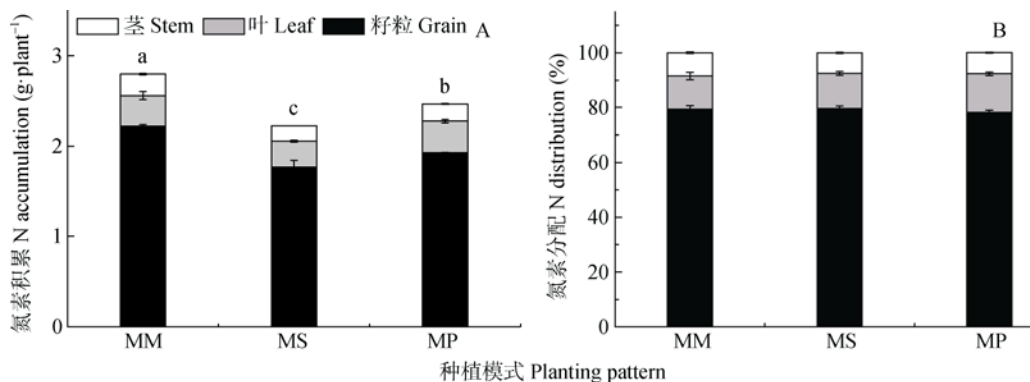


图 6 间作模式对玉米单株氮素积累(A)和氮素分配(B)的影响



Fig. 6 Effect of intercropping patterns on N accumulation (A) and N distribution (B) of maize

MM: 玉米单作; MS: 玉米/大豆间作; MP: 玉米/花生间作。不同小写字母表示不同处理间 0.05 水平上差异显著。MM: maize monoculture; MS: maize/soybean intercropping; MP: maize/peanut intercropping. Different lowercase letters mean significant differences among planting patterns at 0.05 probability level.

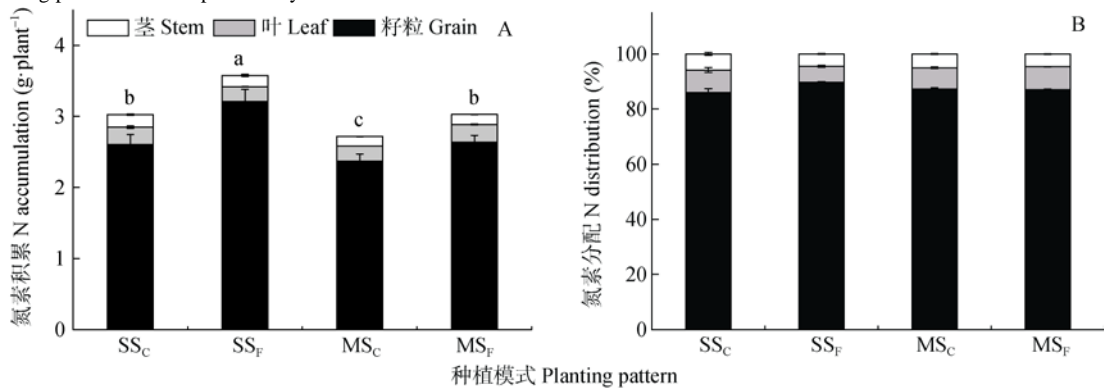


图 7 与玉米间作对中行和边行大豆氮素积累(A)和氮素分配(B)的影响

Fig. 7 Effect of intercropping with maize on N accumulation (A) and N distribution (B) in soybeans in central and fringe rows

C: 宽行中的中行; F: 宽行中的边行; SS: 大豆单作; MS: 玉米/大豆间作。不同小写字母表示单作和间作的中行和边行间 0.05 水平上差异显著。C: central row in the wide-rows; F: fringe row in the wide-rows; SS: soybean monoculture; MS: maize/soybean intercropping. Different lowercase letters mean significant differences among central row and fringe row of monoculture and intercropping at 0.05 probability level.

#### 2.2.4 花生单株氮素积累与分配

由图 8 可知, 不同处理对花生氮素积累量影响显著。花生单株氮素积累量两处理均为中行显著高于边行。与 PP 处理相比, MP 处理中行的氮素积累总量降低, 但差异不显著, 边行的氮素积累总量显著增加 19.1%, MP 处理中行茎秆和叶片的氮素积累量增加, 籽粒降低, 边行的茎秆和叶片的氮素积累量降低, 而籽粒的增加。两种处理下花生各器官氮素积累量表现一致, 均为籽粒最多, 叶片次之, 茎

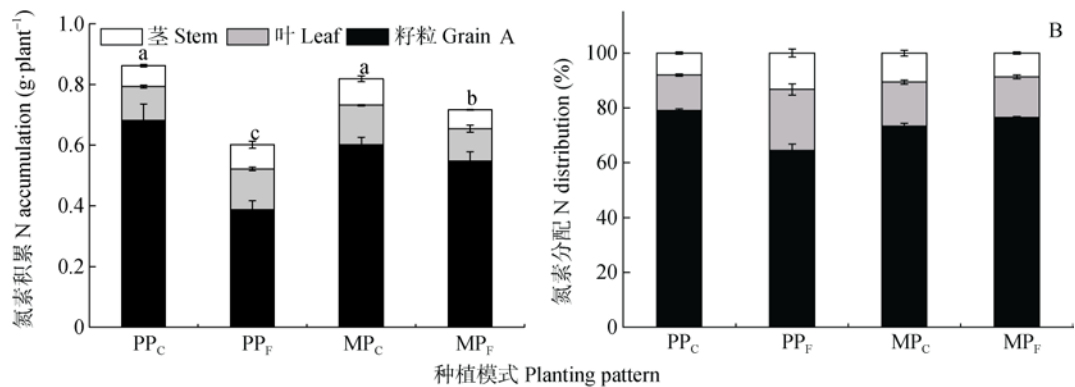


图 8 间作模式对中行和边行花生氮素积累(A)和氮素分配(B)的影响

Fig. 8 Effects of intercropping patterns on N accumulation (A) and N distribution (B) in central and fringe rows of peanut

C: 宽行中的中行; F: 宽行中的边行; PP: 花生单作; MP: 玉米/花生间作。不同小写字母表示单作和间作的中行和边行间 0.05 水平上差异显著。C: central row in the wide-rows; F: fringe row in the wide-rows; PP: peanut monoculture; MP: maize/peanut intercropping. Different lowercase letters mean significant differences among central row and fringe row of monoculture and intercropping at 0.05 probability level.

#### 2.3 豆科作物的氮素积累量与根瘤固氮酶活性的相关性

由图 10 可知, 大豆植株氮素积累量与根瘤固氮酶

秆最少。与 PP 处理相比, MP 处理中行向籽粒的分配降低, 而边行向籽粒的分配增加。

#### 2.2.5 间作模式的氮营养竞争比

由图 9 可知, MS、MP 处理下的玉米相对大豆、花生的氮营养竞争比率分别为 1.10、0.76。结果表明, MS 处理下玉米相对大豆的氮营养竞争力强, 而 MP 处理下玉米相对花生的氮营养竞争力弱。两种处理中玉米对豆科的竞争力表现不同, 玉米相对大豆具有竞争优势, 而相对花生则是竞争劣势。

活性呈正相关关系, 根瘤固氮酶活性极显著地提高了大豆植株氮素积累量( $P < 0.01$ )。而花生植株氮素积累量与根瘤固氮酶活性呈不显著的弱相关关系( $P > 0.05$ )。

### 3 讨论

#### 3.1 玉豆间作对豆科作物结瘤及固氮的影响

种植豆科作物或将其与非豆科作物进行套作、间作、轮作是一种循环的低碳农业种植模式。利用豆科作物和根瘤菌形成的共生固氮体系可以减少氮

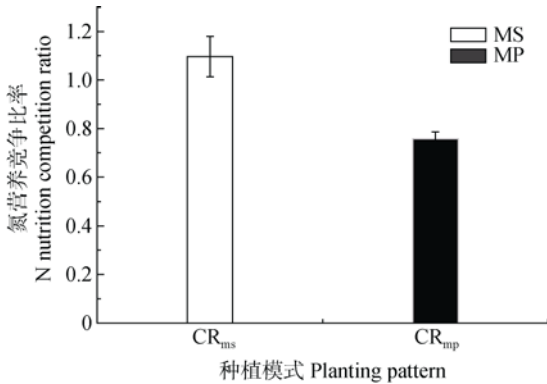


图 9 玉米/大豆(MS)和玉米/花生(MP)间作系统中玉米相对大豆(CR<sub>ms</sub>)和花生(CR<sub>mp</sub>)的氮营养竞争比率

Fig. 9 N nutrition competition ratios of maize relative to soybean (CR<sub>ms</sub>) and to peanut (CR<sub>mp</sub>) in maize/soybean (MS) and maize/peanut (MP) intercropping systems

肥的投入, 增加土壤有机质含量, 改善土壤物理性质, 是一种天然的利于生态环境的农业生产方式<sup>[17]</sup>。间套作通过种间互作改善地上部和地下部的生态环境, 影响作物根系的生长、构型及分布, 营养物质和能量

的吸收输送, 豆科根瘤的结瘤固氮等<sup>[30-31]</sup>。不同的种间互作对豆科根瘤结瘤固氮特性的影响不同。左元梅等<sup>[32]</sup>、李秀平等<sup>[33]</sup>和李娟等<sup>[34]</sup>研究玉米/花生混作、甘蔗/大豆间作、玉米/豌豆间作等表明种间互作能够增强花生和大豆的固氮能力、改善豌豆的结瘤数量。而于晓波等<sup>[20]</sup>研究玉米与大豆套作表明套作大豆结瘤受抑制, 固氮能力降低, 但套作后期大豆固氮的抑制作用会减小。说明豆科根瘤的结瘤特性和固氮能力在不同的间作方式中表现不同。本研究中, 间作在后期虽然降低了大豆和花生的结瘤特性和固氮能力, 但也延缓了大豆后期的根瘤衰老, 能够改善花生后期根瘤生长受到的抑制。间作中大豆和花生结瘤特性和固氮能力的降低是因为处于弱光环境下的大豆和花生将光合产物优先分配于地上以便截获更多光能<sup>[35]</sup>, 因此地下根系生长受阻抑制了根瘤的发生量。同时弱光环境中地上部的同化能力下降, 根瘤固氮酶合成和活性发挥的物质和能量减少, 导致固氮酶活性降低<sup>[20,36]</sup>。而间作对大豆根瘤的延缓作用和对花生根瘤抑制的改善作用可能是因为玉米收获后光环境的改善增加了物质能量的合成和运输。高位作物消失带来的光照恢复期间作大豆和花生继续保持并增加良好的光合作用, 积累较多的光合产物, 促进向地下部的物质运输, 补充能量的缺失, 为根瘤生长发育提供充足的物质能量, 使根瘤所受的抑制作用减小。

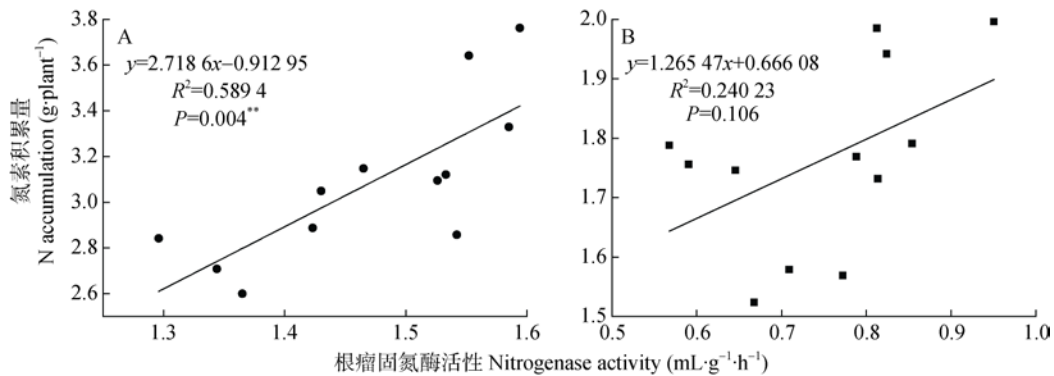


图 10 大豆(A)和花生(B)氮素积累量与根瘤固氮酶活性的相关性

Fig. 10 Correlation between N accumulation and nodule nitrogenase activity of soybean (A) and peanut (B)

\*\*\*表示在 0.01 水平上显著相关。\*\*\* indicates significant correlation at the level of 0.01.

#### 3.2 玉豆间作对作物氮素积累的影响

氮素是植物体内蛋白质、核酸、磷脂和某些生长激素的重要组分之一, 对作物最终产量的贡献为 40%~50%<sup>[37]</sup>。禾本科与豆科作物间套作具有提高禾本科作物氮素含量的作用。张雷昌等<sup>[38]</sup>、赵平等<sup>[39]</sup>和余常兵等<sup>[40]</sup>研究玉米/大豆间作、小麦(*Triticum aestivum*)/蚕豆(*Vicia faba*)间作、蚕豆和大豆与玉米间作后玉米和小麦地上部的氮含量均提高。本研究

中, 玉米与大豆和花生间作后虽然各作物的氮素积累量降低, 但两种间作模式的系统氮素积累量却显著高于各单作模式, 玉米/大豆间作最高。两种间作模式的玉米氮素积累量存在显著差异, 玉米/花生间作的玉米茎秆和叶片具有更好的氮积累优势, 因此对籽粒的贡献也更大。其原因可能有两方面: 第一, 大豆和花生氮营养竞争力的不同。两种豆科作物具有不同的形态特征, 对氮营养的需求也不同。花生

植株矮小、形态紧凑,对氮营养的需求较少,是氮竞争的优势作物,而大豆植株高大、枝叶茂盛,对氮营养的需求较多,是氮竞争的劣势作物。在有限的空间和养分资源条件下,与需氮少的花生间作的玉米可以吸收到更多的氮,而与需氮多的大豆间作的玉米则吸收到较少的氮。第二,地下根系的交互作用。两种或多种植物共同生长时,植物通过根系分泌的化学物质或根系物理接触进行植物识别和化感应答<sup>[41]</sup>。植物可能会以形态或生物化学方式对近邻做出反应<sup>[42]</sup>。玉米/花生间作的作物根系间可能分泌着某种根系分泌物或信号的识别交流,这种信号的应答可能引发玉米根系的生长,从而促进根系对氮素的吸收,但目前对这类根系互作的分泌物应答反应机制尚未揭示清楚。

本研究中,间作大豆的氮素积累量显著降低,其原因可能是前期荫蔽条件影响大豆地上茎秆和叶片的形态建成,而后期生长旺盛的叶片易造成封垄减少大豆行间的光照及通风,导致大豆垄下的叶片过早脱落,使后期籽粒灌浆时的氮营养供应不足,但玉米收获后有一定改善光照和通风的作用。间作对花生的氮素积累影响较小,原因在于花生植株较小,后期不易封垄,良好的光照和通风为茎叶的生长提供优越条件,为花生籽粒的灌浆提供较多的氮营养。

#### 4 结论

两种间作模式均增加了系统的氮素积累,但玉米/大豆间作模式的增氮优势更大。玉米/花生间作模式对玉米生长具有显著优势作用,但机制尚不清楚,有待进一步研究。与玉米间作,豆科作物的单株根瘤生长及固氮酶活性降低,但一定的“光恢复”阶段能有效缓解荫蔽对根瘤生长的抑制作用。两种间作模式中玉米/大豆间作模式的增氮效应更高,可优先选择玉米/大豆间作种植模式,合理的作物搭配组合能够有效调控作物氮素营养,对养分资源的高效利用有一定的指导意义。

#### 参考文献 References

- [1] 刘均霞, 陆引罡, 远红伟, 等. 玉米/大豆间作条件下作物根系对氮素的吸收利用[J]. 华北农学报, 2008, 23(1): 173-175  
LIU J X, LU Y G, YUAN H W, et al. The roots of the crop usually absorb and utilize studying to nitrogen under the maize/soybean intercropping condition[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2008, 23(1): 173-175
- [2] 王自奎, 吴普特, 赵西宁, 等. 作物间套作群体光能截获和利用机理研究进展[J]. 自然资源学报, 2015, 30(6): 1057-1066  
WANG Z K, WU P T, ZHAO X N, et al. A review of light interception and utilization by intercropped canopies[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(6): 1057-1066
- [3] 夏海勇, 李隆, 张正. 间套作体系土壤磷素吸收优势和机理研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2015, (1): 1-6  
XIA H Y, LI L, ZHANG Z. Research advances on soil phosphorus acquisition advantages and mechanisms in intercropping systems[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2015, (1): 1-6
- [4] 张风云, 吴普特, 赵西宁, 等. 间套作提高农田水分利用效率的节水机理[J]. 应用生态学报, 2012, 23(5): 1400-1406  
ZHANG F Y, WU P T, ZHAO X N, et al. Water-saving mechanisms of intercropping system in improving cropland water use efficiency[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(5): 1400-1406
- [5] 肖靖秀, 郑毅. 间套作系统中作物的养分吸收利用与病虫害控制[J]. 中国农学通报, 2005, 21(3): 150-154  
XIAO J X, ZHENG Y. Nutrients uptake and pests and diseases control of crops in intercropping system[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2005, 21(3): 150-154
- [6] 李隆. 间套作强化农田生态系统服务功能的研究进展与应用展望[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(4): 403-415  
LI L. Intercropping enhances agroecosystem services and functioning: Current knowledge and perspectives[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(4): 403-415
- [7] 徐燕, 郑毅, 毛昆明, 等. 玉米魔芋间作条件下作物的氮素养分吸收规律研究[J]. 云南农业大学学报, 2007, 22(6): 881-886  
XU Y, ZHENG Y, MAO K M, et al. Nitrogen uptake and utilization of plant in maize and konjaku intercropping[J]. Journal of Yunnan Agricultural University, 2007, 22(6): 881-886
- [8] 柏文恋, 郑毅, 肖靖秀. 豆科禾本科间作促进磷高效吸收利用的地下部生物学机制研究进展[J]. 作物杂志, 2018, (4): 20-27  
BAI W L, ZHENG Y, XIAO J X. Below-ground biotic mechanisms of phosphorus uptake and utilization improved by cereal and legume intercropping-a review[J]. Crops, 2018, (4): 20-27
- [9] 付学鹏, 吴凤芝, 吴瑕, 等. 间套作改善作物矿质营养的机理研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(2): 525-535  
FU X P, WU F Z, WU X, et al. Advances in the mechanism of improving crop mineral nutrients in intercropping and relay intercropping systems[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(2): 525-535
- [10] 王树起, 沈其荣, 褚贵新, 等. 种间竞争对旱作水稻与花生间作系统根系分布和氮素吸收积累的影响[J]. 土壤学报, 2006, 43(5): 860-863  
WANG S Q, SHEN Q R, CHU G X, et al. Effect of interspecies competition on root distribution and nitrogen uptake of peanut and rice in intercropping in aerobic soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(5): 860-863
- [11] 董楠. 不同作物组合间作优势和时空稳定性的生态机制[D]. 北京: 中国农业大学, 2017

- DONG N. The ecological mechanism of yield advantage and spatio-temporal stability in different crop combinations[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017
- [12] 徐强. 线辣椒/玉米套作生理生态机制研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007
- XU Q. Study on physiology and ecology mechanism of cap-sicum and maize relay intercropping system[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2007
- [13] 张德闪, 李洪波, 申建波. 集约化互作体系植物根系高效获取土壤养分的策略与机制[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(6): 1547–1555
- ZHANG D S, LI H B, SHEN J B. Strategies for root's foraging and acquiring soil nutrient in high efficiency under intensive cropping systems[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, 23(6): 1547–1555
- [14] 张少斌, 梁开明, 郭靖, 等. 基于生态位角度的农作物间套作增产机制研究进展[J]. 福建农业学报, 2016, 31(9): 1005–1012
- ZHANG S B, LIANG K M, GUO J, et al. Yield improvement by intercropping — Viewed from a niche perspective[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2016, 31(9): 1005–1012
- [15] 肖焱波. 豆科/禾本科间作体系中养分竞争和氮素转移研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2003
- XIAO Y B. Interspecific competition for nutrients and nitrogen transfer between the intercropped legume and cereal[D]. Beijing: China Agricultural University, 2003
- [16] 谢凯, 翁伯琦. 玉米与旱地作物间作套种研究进展[J]. 中国农学通报, 2014, 30(6): 26–32
- XIE K, WENG B Q. Research advances on intercropping technology of maize with other dryland crops[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(6): 26–32
- [17] 赵叶舟, 王浩铭, 汪自强. 豆科植物和根瘤菌在生态环境中的地位和作用[J]. 农业环境与发展, 2013, 30(4): 7–12
- ZHAO Y Z, WANG H M, WANG Z Q. The role of leguminous plants and rhizobium in ecological environment[J]. Agro-Environment and Development, 2013, 30(4): 7–12
- [18] 陈文新, 陈文峰. 发挥生物固氮作用减少化学氮肥用量[J]. 中国农业科技导报, 2004, 6(6): 3–6
- CHEN W X, CHEN W F. Exertion of biological nitrogen fixation in order to reducing the consumption of chemical nitrogenous fertilizer[J]. Review of China Agricultural Science and Technology, 2004, 6(6): 3–6
- [19] 韦革宏, 马占强. 根瘤菌-豆科植物共生体系在重金属污染环境修复中的地位、应用及潜力[J]. 微生物学报, 2010, 50(11): 1421–1430
- WEI G H, MA Z Q. Application of rhizobia-legume symbiosis for remediation of heavy-metal contaminated soils[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2010, 50(11): 1421–1430
- [20] 于晓波, 苏本营, 龚万灼, 等. 玉米-大豆带状套作对大豆根瘤性状和固氮能力的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(9): 1743–1753
- YU X B, SU B Y, GONG W Z, et al. The nodule characteristics and nitrogen fixation of soybean in maize-soybean relay strip intercropping[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(9): 1743–1753
- [21] 冯晓敏, 杨永, 臧华栋, 等. 燕麦花生间作系统作物氮素累积与转移规律[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(3): 617–624
- FENG X M, YANG Y, ZANG H D, et al. Characteristics of crop nitrogen accumulation and nitrogen transfer in oat and peanut intercropping system[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2018, 24(3): 617–624
- [22] 赵财, 柴强, 乔寅英, 等. 禾豆间距对间作豌豆“氮阻遏”减缓效应的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(9): 1169–1176
- ZHAO C, CHAI Q, QIAO Y Y, et al. Effect of cereal-legume spacing in intercropping system on alleviating “N inhibition” in pea plants[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(9): 1169–1176
- [23] 房增国, 左元梅, 赵秀芬, 等. 玉米-花生混作系统中的氮铁营养效应[J]. 生态环境, 2006, 15(1): 134–139
- FANG Z G, ZUO Y M, ZHAO X F, et al. Effects of maize-peanut mixed cropping on N and Fe nutrition[J]. Ecology and Environment, 2006, 15(1): 134–139
- [24] 杨燕竹, 杜青, 陈平, 等. 玉米大豆播期衔接对间作大豆干物质积累及产量的影响[J]. 华北农学报, 2017, 32(3): 96–102
- YANG Y Z, DU Q, CHEN P, et al. Effect of maize and soybean sowing date cohesion on soybean dry matter accumulation and yield in intercropping[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2017, 32(3): 96–102
- [25] 范元芳, 刘沁林, 王锐, 等. 玉米-大豆带状间作对大豆生长、光合荧光特性及产量的影响[J]. 核农学报, 2017, 31(5): 972–978
- FAN Y F, LIU Q L, WANG R, et al. Effects of shading on growth, photosynthetic fluorescence characteristics and yield of soybean in maize-soybean intercropping systems[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2017, 31(5): 972–978
- [26] 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
- [27] 张晓娜, 陈平, 庞婷, 等. 玉米/豆科间作种植模式对作物干物质积累、分配及产量的影响[J]. 四川农业大学学报, 2017, 35(4): 484–490
- ZHANG X N, CHEN P, PANG T, et al. The effects of dry matter accumulation, distribution and yield in the maize/soybean and maize/peanut intercropping system[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2017, 35(4): 484–490
- [28] 刘文钰, 雍太文, 刘小明, 等. 减量施肥对玉米-大豆套作体系中大豆根瘤固氮及氮素吸收利用的影响[J]. 大豆科学, 2014, 33(5): 705–712
- LIU W Y, YONG T W, LIU X M, et al. Effect of reduced N application on nodule N fixation, N uptake and utilization of soybean in maize-soybean relay strip intercropping system[J]. Soybean Science, 2014, 33(5): 705–712

- [29] WILLEY R W, RAO M R. A competitive ratio for quantifying competition between intercrops[J]. *Experimental Agriculture*, 1980, 16(2): 117–125
- [30] 李玉英, 胡汉升, 程序, 等. 种间互作和施氮对蚕豆/玉米间作生态系统地上部和地下部生长的影响[J]. *生态学报*, 2011, 31(6): 1617–1630  
LI Y Y, HU H S, CHENG X, et al. Effects of interspecific interactions and nitrogen fertilization rates on above- and below-growth in faba bean/maize intercropping system[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(6): 1617–1630
- [31] 秦娟, 上官周平. 植物之间互作效应及其生理机制[J]. *干旱地区农业研究*, 2005, 23(3): 225–230  
QIN J, SHANGGUAN Z P. Interaction effect and physiological mechanism in plants[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2005, 23(3): 225–230
- [32] 左元梅, 刘永秀, 张福锁. 玉米/花生混作改善花生铁营养对花生根瘤碳氮代谢及固氮的影响[J]. *生态学报*, 2004, 24(11): 2584–2590  
ZUO Y M, LIU Y X, ZHANG F S. Effects of improved iron nutrition of peanut intercropped with maize on carbon and nitrogen metabolism and nitrogen-fixing of peanut nodule[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(11): 2584–2590
- [33] 李秀平, 李穆, 年海, 等. 甘蔗/大豆间作对甘蔗和大豆产量与品质的影响[J]. *东北农业大学学报*, 2012, 43(7): 42–46  
LI X P, LI M, NIAN H, et al. Effect of sugarcane/soybean intercropping on growth, yield and quality of sugarcane and soybean[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2012, 43(7): 42–46
- [34] 李娟, 王文丽, 赵旭, 等. 根际分隔对玉米/豌豆间作种间竞争及豌豆结瘤固氮的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2016, 34(6): 177–183  
LI J, WANG W L, ZHAO X, et al. Effect of roots partitions on interspecific competition and nitrogen fixation in the pea-maize intercropping[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2016, 34(6): 177–183
- [35] 刘卫国, 蒋涛, 余跃辉, 等. 大豆苗期茎秆对荫蔽胁迫响应的生理机制初探[J]. *中国油料作物学报*, 2011, 33(2): 141–146  
LIU W G, JIANG T, SHE Y H, et al. Preliminary study on physiological response mechanism of soybean (*Glycine max*) stem to shade stress at seedling stage[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2011, 33(2): 141–146
- [36] 林佩真, 周惠民, 樊庆笙. 光照强度对大豆根瘤固氮作用的影响[J]. *南京农业大学学报*, 1985, 8(4): 58–63  
LIN P Z, ZHOU H M, FAN Q S. Effect of light intensity on nitrogen fixation of rhizobium-soybean symbiosis[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 1985, 8(4): 58–63
- [37] 吴巍, 赵军. 植物对氮素吸收利用的研究进展[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(13): 75–78  
WU W, ZHAO J. Advances on plants' nitrogen assimilation and utilization[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(13): 75–78
- [38] 张雷昌, 汤利, 董艳, 等. 根系互作影响玉米大豆间作作物氮吸收[J]. *云南农业大学学报: 自然科学版*, 2016, 31(6): 1111–1119  
ZHANG L C, TANG L, DONG Y, et al. Nitrogen absorption of crops affected by root interaction in maize and soybean intercropping[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University: Natural Science*, 2016, 31(6): 1111–1119
- [39] 赵平, 郑毅, 汤利, 等. 小麦蚕豆间作施氮对小麦氮素吸收、累积的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(4): 742–747  
ZHAO P, ZHENG Y, TANG L, et al. Effect of N supply and wheat/faba bean intercropping on N uptake and accumulation of wheat[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(4): 742–747
- [40] 余常兵, 孙建好, 李隆. 种间相互作用对作物生长及养分吸收的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(1): 1–8  
YU C B, SUN J H, LI L. Effect of interspecific interaction on crop growth and nutrition accumulation[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(1): 1–8
- [41] 夏志超. 根系分泌物介导的植物种间地下化学作用[D]. 北京: 中国农业大学, 2017  
XIA Z C. Root exudates mediated belowground chemical interactions between plants[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017
- [42] 杨雪芳. 化感水稻对邻近植物的生物化学响应及其化感物质衍生物的抑草机制[D]. 北京: 中国农业大学, 2017  
YANG X F. Biological and chemical responses of allelopathic rice to neighboring plants and the weed-suppressive mechanisms of rice allelochemical derivatives[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017