

引用格式:

刘子凡, 刘治, 黄洁, 魏云霞. 不同隔根方式下木薯与花生间作的竞争力分析[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2021, 47(6): 630–635.

LIU Z F, LIU Z, HUANG J, WEI Y X. Investigation on the cassava/peanut competitiveness in their intercropping with different root partition patterns[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2021, 47(6): 630–635.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



不同隔根方式下木薯与花生间作的竞争力分析

刘子凡¹, 刘治¹, 黄洁^{2,3*}, 魏云霞^{2,3}

(1.海南大学热带作物学院, 海南 海口 570228; 2.中国热带农业科学院热带作物品种资源研究所, 海南 儋州 571737; 3.农业农村部木薯种质资源保护与利用重点实验室, 海南 儋州 571737)

摘 要:通过盆栽试验, 设置完全隔根、部分隔根和不隔根 3 种处理, 测定木薯与花生的地上部干质量、氮、磷、钾含量, 根围土壤脲酶活性, 酸性磷酸酶活性及土壤细菌与真菌总量, 以完全隔根处理中的木薯和花生作为相应的单作, 分析不隔根和部分隔根处理中的木薯、花生的偏土地当量比、侵占力、偏养分吸收当量比、养分竞争比率、实际产量损失、实际土壤酶活性损失以及实际土壤细菌总量与真菌总量损失的差异。结果表明: 不隔根和部分隔根处理的木薯和花生偏土地当量比均大于 1, 实际产量损失均大于 0, 不隔根处理的木薯偏土地当量比和实际产量损失均显著大于部分隔根处理的, 而不隔根和部分隔根处理的花生偏土地当量比和实际产量损失无显著差异; 不隔根与部分隔根处理的侵占力和养分竞争比率均大于 0; 木薯和花生的偏氮、磷、钾养分吸收当量比均大于 1, 不隔根处理中木薯偏磷吸收当量比和磷竞争比率均显著大于部分隔根处理的; 不隔根和部分隔根处理的木薯与花生实际土壤脲酶活性损失与土壤酸性磷酸酶活性损失均大于 0, 且不隔根处理的显著高于部分隔根处理的; 不隔根和部分隔根处理的实际木薯土壤细菌和真菌总量损失均大于 0, 而实际花生土壤细菌和真菌总量损失均小于 0, 且不隔根处理的显著高于部分隔根处理的。说明木薯与花生的根系之间存在着促进型的互作效应, 其根本原因是根围土壤的微生态环境发生了改变。

关 键 词:木薯; 花生; 间作; 隔根; 养分吸收; 土壤酶; 真菌; 细菌

中图分类号: S533.047

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2021)06-0630-06

Investigation on the cassava/peanut competitiveness in their intercropping with different root partition patterns

LIU Zifan¹, LIU Zhi¹, HUANG Jie^{2,3*}, WEI Yunxia^{2,3}

(1. College of Tropical Crops, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China; 2. Tropical Crops Genetic Resources Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Danzhou, Hainan 571737, China; 3. Key Laboratory of Conservation and Utilization of Cassava Genetic Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Danzhou, Hainan 571737, China)

Abstract: In order to establish a theoretical framework for the high yield and high efficiency cultivation in the cassava/peanut intercropping system, the relationship between their roots interaction and crop competitiveness was investigated in this study. Pot experiment with three root partition treatments, completely partition(CP), partially partition(PP) and non-partition(NP) was applied to the intercropping. The aboveground dry weight of cassava and peanut, the total content of nitrogen, phosphorus and potassium, the activities of urease and acid phosphatase, the total

收稿日期: 2020-10-11

修回日期: 2020-11-20

基金项目: 财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系(CARS-11-hnhj)

作者简介: 刘子凡(1975—), 男, 江西余干人, 博士, 教授, 主要从事热带作物高效栽培研究, jiangxilaobao@163.com; *通信作者, 黄洁, 研究员, 主要从事木薯栽培与推广研究, hnhjcn@163.com

amount of soil bacteria and fungi were measured. Cassava and peanut in CP as corresponding monoculture, the difference of partial land equivalent ratio of cassava($PLER_c$) or peanuts($PLER_p$), aggressivity, partial nutrient absorption equivalent ratio($PAER_N$), nutrition competitive ratio(NCR), the actual yield loss(AYL), the actual soil urease loss(ASL_U), the actual soil acid phosphatase loss(ASL_{AP}), actual soil bacteria amount loss($ASAL_B$) and actual soil fungi amount loss($ASAL_F$) in NP and PP were analyzed. The results showed that: (1) $PLER_c$ and $PLER_p$ of NP and PP were larger than 1, AYL_c and AYL_p were larger than 0, and $PLEA_c$ and AYL_c in NP were significantly higher than in PP, while $PLEA_p$ and AYL_p had no difference between in NP and in PP. (2) Aggressivity and NCR in NP and PP were higher than 0, $PAER_N$, $PAER_p$ and $PAER_K$ of cassava and peanut were larger than 1, $PAER_p$ and NCR_p of cassava in NP were significantly higher than in PP. (3) ASL_U and ASL_{AP} of cassava and peanut in NP and PP were higher than 0, and the value in NP were significantly higher than in PP. (4) $ASAL_B$ and $ASAL_F$ of cassava in NP and PP were higher than 0, while $ASAL_B$ and $ASAL_F$ of peanut were less than 0, and the value in NP was significantly higher than in PP. In conclusion, promotive interaction existed between cassava and peanut roots during their intercropping mainly due to the change of microecological environment of root soil.

Keywords: cassava; peanut; intercropping; partition root; nutrient absorption; soil enzymes; fungi; bacteria

木薯适应性强,耐旱耐瘠,广泛栽培于热带和部分亚热带地区^[1]。木薯的生育期较长,前期生长缓慢,种植稀疏,不能充分利用光能和土壤肥力,单位面积产量与效益较低^[2]。开展木薯间作栽培可以提高产量与产值,有利于木薯产业的可持续发展。木薯与花生间作是木薯产业发展中应用面积较大的一种高产高效种植模式^[3]。研究^[3-4]表明,合理的木薯与花生间作模式能提高土地当量比、产值当量比、产量和经济效益。前人从地上部光合特性^[5]、地下部养分资源吸收与利用^[6-7]、碳氮代谢^[8-9]、土壤微生态环境^[10-11]等方面对木薯与花生间作的产量优势原因进行了分析。ZHANG 等^[12]认为,作物地下部根系互作及养分、水分在土壤中的移动比地上部相互影响更为重要,且地下部根际相互作用的贡献可达 50%以上。但目前关于木薯与花生间作体系地下部根系间互作的研究尚少。本研究采用盆栽试验,设完全隔根、部分隔根和不隔根 3 种处理,测定木薯和花生的生物量、养分吸收量、土壤酶活性和土壤微生物总量,分析地下部根系互作及间作物之间的竞争力关系,旨在为木薯与花生间作的高产高效栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

木薯品种选用华南 8 号,由中国热带农业科学院热带作物品种资源研究所提供。花生品种选用湛油 75 号,由湛江市农业科学研究院提供。供试土壤取自海南大学农科基地未种植过木薯和花生的 0~20 cm 表层土。土壤的理化性质为 pH 4.22,有

机质、碱解氮、速效磷、速效钾含量分别为 17.70、11.73、13.25、62.22 mg/kg。经自然风干、敲碎、过筛(孔径 1 cm),按土与珍珠岩的体积比为 95:5 混匀后备用。

1.2 方法

试验设在海南大学海甸校区农科基地。采用盆栽方法,供试塑料桶内径 40 cm,高 45 cm,装土前先用铁丝将铁皮或防虫网与桶固定,以隔成体积相等的 2 个区域,铁皮、防虫网与桶的缝隙用玻璃胶密封。

试验设 3 种隔根方式:①完全隔根,采用铁皮分隔,该处理地下部根系没有水、物质和信息等的相互交换;②部分隔根,采用防虫网(孔径 48 μm)分隔,该处理地下部根系有水分和物质的相互交换,但根系间无直接的相互作用;③不隔根,2 个区域无任何隔离,该处理地下部根系有直接交互作用。以完全隔根处理的木薯和花生作为相应的单作对照。每个处理 25 盆,完全随机排列。

2016 年 2 月 1 日种植。木薯为直插种茎,花生为穴播。每盆种 1 条木薯种茎,离盆中心点 10 cm。花生 2 穴,每穴播 2 粒,穴距 20 cm,离桶中心线 5 cm。待长出 3 片真叶后间苗,每穴留 1 株,作物生长期间只进行水分和虫草管理。

1.3 取样与测定

1.3.1 取样

植株样品采集:于花生收获期,即植后 120 d,每处理随机选择具有代表性的 10 盆植株。木薯植株仅采集地上部,花生植株则采集整个植株。

根围土壤采集:将木薯、花生根系从土壤中整体挖出,轻轻抖下与根系松散结合的土体后,用经火焰灭菌的镊子刮取附在根系上的一薄层(<10 mm)土壤作为根围土壤^[13],除去杂物,4℃保存,备用。

1.3.2 指标的测定

称取采集的花生质量,得实测产量。将摘除果实后的花生植株、木薯植株地上部分别于 105℃下杀青 30 min,75℃烘干至恒重,称重。粉碎后,分别采用半微量蒸馏法、钼锑抗吸光度法、火焰光度法测土壤全 N、全 P 和全 K 含量。采用苯酚钠比色法测土壤脲酶活性,以 24 h 后 1 g 土壤中 NH₃-N 的微克数表示;采用磷酸苯二钠比色法测土壤酸性磷酸酶活性,具体按苏州科铭生物技术有限公司生产的土壤酸性磷酸酶活性测定试剂盒说明书进行;按 MoBio 土壤提取试剂盒操作说明提取土壤样品总 DNA,检测 DNA 质量和浓度;按照荧光定量 PCR 仪标准程序进行扩增,测定土壤微生物的总数。

1.3.3 指标计算

实际产量损失(AYL)是基于单株生物量衡量系统内物种间竞争行为的指标^[14]。计算公式见(1)。

$$AYL_c = \frac{Y_{ic}}{Y_{mc}} - 1 \quad (1)$$

$$PLER_c = Y_{ic}/Y_{mc} \quad (2)$$

式中:AYL_c表示木薯实际产量损失;PLER_c表示木薯偏土地当量比;Y_{ic}表示不隔根或部分隔根处理的木薯产量或干物质量;Y_{mc}表示完全隔根木薯产量或木薯干物质量。值的正负表示有无间作优势,正值越大,表示间作优势越大;负值越大,表示间作劣势越大。花生偏土地当量比 PLER_p 和花生实际产量损失 AYL_p 的计算同理。

实际木薯(花生)土壤脲酶活性损失、实际木薯(花生)土壤酸性磷酸酶活性损失、实际土壤细菌总量损失 ASAL_B 与实际土壤真菌总量损失 ASAL_F 的计算方法参照公式(1)。

侵占力(A)是表征木薯相对于花生的竞争能力的指标,计算公式见(3)。

$$A = \frac{A_{ic}}{A_{mc}} - \frac{A_{ip}}{A_{mp}} \quad (3)$$

式中:A_{ic}、A_{ip}分别为木薯、花生在不隔根间作处理的干质量;A_{mc}、A_{mp}分别为木薯、花生在完全或部分隔根间作处理的干质量。侵占力大于 0,表明木薯的竞争能力强于花生;小于 0,表明木薯的竞争能力弱于花生。

$$PAER_N = Y_{iNA}/Y_{mNA} \quad (4)$$

PAER_N为偏氮吸收当量比;Y_{iNA}为间作氮素吸收量;Y_{mNA}为单作氮素吸收量。偏磷吸收当量比 PAER_P 与偏钾养分吸收当量比 PAER_K 的计算方法同公式(4)。

种间营养竞争比率(nutrition competitive ratio, NCR)是评定间作中不同物种竞争力大小的指标。木薯相对于花生的氮竞争比率 NCR_N 计算公式为:

$$NCR_N = \frac{N_{ic}}{N_{mc}} - \frac{N_{ip}}{N_{mp}} \quad (5)$$

式中:N_{ic}、N_{ip}分别为不隔根处理木薯、花生的吸氮量;N_{mc}、N_{mp}分别为部分或完全隔根间作处理木薯、花生的吸氮量。木薯相对于花生的磷竞争比率 NCR_P 和木薯相对于花生的钾竞争比率 NCR_K 的计算方法参照公式(5)。

1.4 数据处理

采用 Excel 2016 进行数据整理及表格制作;运用 DPS 7.55 对数据进行统计分析;采用邓肯氏新复极差法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 隔根间作对木薯及花生偏土地当量比、实际产量损失与侵占力的影响

从表1可知,木薯、花生的偏土地当量比均大于 1,实际产量损失均大于 0,说明不隔根和部分隔根间作对木薯和花生均具有间作优势。不隔根间作处理木薯的偏土地当量比和实际产量损失显著大于部分隔根间作处理的;而不隔根间作处理花生偏土地当量比和实际产量损失高于部分隔根处理的,但无显著差异。说明木薯间作产量优势部分来自于其根系对土壤空间的叠加。此外,不隔根间作处理和部分隔根间作处理的侵占力均大于 0,且不隔根间作处理的侵占力显著大于部分隔根间作处理,说明木薯植株的竞争能力强于花生植株,木薯与花生根系的直接接触对间作优势的发挥有一定的促进作用。

表 1 不同处理木薯和花生的偏土地当量比、实际产量损失及侵占力

Table 1 Partial land equivalent ratio of cassava and peanuts, the actual yield loss and aggressivity of different treatments					
处理	偏土地当量比		实际产量损失		侵占力
	木薯	花生	木薯	花生	
不隔根	(2.65±0.17)a	1.27±0.10	(1.64±0.17)a	0.27±0.10	(1.37±0.12)a
部分隔根	(2.05±0.24)b	1.13±0.07	(1.05±0.24)b	0.13±0.07	(0.92±0.17)b

同列数据不同小写字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著。

2.2 隔根间作对木薯和花生偏氮、磷、钾吸收当量比及竞争比率的影响

从表 2 可知，不隔根和部分隔根处理的木薯和花生氮、磷、钾吸收当量比均大于 1，说明不隔根和部分隔根间作的木薯和花生对氮、磷、钾养分的吸收均具有优势。不隔根处理和部分隔根处理，氮、磷、钾的竞争比率均大于 0，说明木薯对氮、磷、钾资源的吸收始终处于优势地位。不隔根处理的偏磷吸收当量比和磷竞争比率显著高于部分隔根处理的，说明木薯和花生根系的直接接触可促进木薯对磷的吸收。

表 2 隔根间作木薯、花生偏氮、磷、钾吸收当量比及竞争比率

Table 2 Partial nitrogen, phosphorus, potassium absorption equivalent ratio of cassava and peanut, nutrition competitive ratio of different treatments				
项目	处理	偏养分吸收当量比		竞争比率
		木薯	花生	
全氮	不隔根	(1.96±0.36)a	1.21±0.23	(0.75±0.09)a
	部分隔根	(1.88±0.18)a	1.15±0.23	(0.73±0.40)a
全磷	不隔根	(5.34±0.28)a	1.43±0.08	(4.13±0.36)a
	部分隔根	(2.60±0.26)b	1.28±0.07	(1.32±0.26)b
全钾	不隔根	(2.98±0.28)a	1.22±0.14	(1.76±0.18)a
	部分隔根	(2.21±0.24)a	1.10±0.13	(1.11±0.16)a

同一项目同列数据不同小写字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著。

2.3 隔根间作对木薯和花生实际土壤脲酶与酸性磷酸酶活性损失的影响

从表 3 可知，木薯、花生实际土壤脲酶活性损

失与土壤酸性磷酸酶活性损失均大于 0，说明不隔根和部分隔根间作能提高木薯和花生土壤脲酶活性和土壤酸性磷酸酶活性，具有间作优势。另外，不隔根处理下木薯与花生实际土壤脲酶活性损失和土壤酸性磷酸酶活性损失均显著大于部分隔根处理的，说明木薯与花生根系的直接接触可促进土壤脲酶和酸性磷酸酶活性的提高。

表 3 隔根间作木薯和花生的实际土壤脲酶和酸性磷酸酶活性损失

Table 3 The actual soil urease and acid phosphatase loss of cassava and peanut of different treatments				
处理	实际土壤脲酶活性损失		实际土壤酸性磷酸酶活性损失	
	木薯	花生	木薯	花生
不隔根	(0.54±0.09)a	(0.32±0.05)a	(0.76±0.13)a	(0.84±0.16)a
部分隔根	(0.14±0.06)b	(0.08±0.01)b	(0.50±0.09)b	(0.21±0.03)b

同列数据不同小写字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著。

2.4 隔根间作对木薯和花生的实际根围土壤细菌与真菌总量损失的影响

从表 4 可知，木薯实际土壤细菌和真菌总量损失均大于 0，花生实际土壤细菌和真菌总量损失均小于 0，说明不隔根和部分隔根对木薯土壤细菌和真菌总量存在间作优势，对花生土壤细菌和真菌总量存在间作劣势。另外，不隔根处理对木薯土壤真菌和细菌总量的间作优势强于部分隔根处理，不隔根处理对花生土壤真菌和细菌总量的间作劣势强于部分隔根处理，说明木薯与花生的根系互作提高了木薯的间作优势，强化了花生的间作劣势。

表 4 隔根间作木薯和花生的土壤细菌和真菌总量

Table 4 Actual soil bacteria and fungi amount loss of cassava and peanut of different treatments				
处理	实际土壤细菌总量损失		实际土壤真菌总量损失	
	木薯	花生	木薯	花生
不隔根	(0.15±0.00)a	(-0.40±0.02)b	(0.15±0.00)a	(-0.17±0.01)b
部分隔根	(0.04±0.00)b	(-0.06±0.00)a	(0.09±0.01)b	(-0.02±0.00)a

同列数据不同小写字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著。

3 结论与讨论

完全隔根、部分隔根和不隔根3个处理的生物

量差异可反映木薯与花生地下部根系之间水分、养分和信息等交流互作而产生的补偿效应。本研究中，木薯与花生不隔根间作和部分隔根间作的偏土

地当量比均大于1,即均具有间作优势,且木薯不隔根处理的间作优势大于部分隔根处理,说明木薯与花生根系之间存在着促进型的互作效应。这与采用大田试验获得的木薯与花生间作优(劣)势结果不一致^[6]。究其原因,可能是因为大田试验间作优(劣)势来源包含地上部效应和地下部效应2个部分。

间作优势的产生多以营养优势为基础^[15]。作物对养分的吸收主要是通过根系的截获、质流和扩散来完成。不隔根处理间作作物根系的相互穿插可促进水肥交流和根系叠加^[16],有利于截获在土壤中扩散和迁移速度比较慢的养分^[17]。另外,间作作物间的根系互作可刺激非豆科作物根系分泌更多的有机酸等物质。HORST等^[18]发现白羽扇豆根系分泌的柠檬酸可促进小麦对磷的吸收,提高相邻作物对磷素的吸收^[19]。木薯与花生不隔根或部分隔根种植时,花生可能会促进木薯根系分泌出更多的有机酸,使一些来自于植物根系和土壤的磷酸酶活性增强^[20],促进木薯根系对磷的吸收。此外,作物间营养物质的转移与养分的“源”“库”关系有关^[21]。木薯与花生间作体系中木薯对磷的竞争较强,花生根系的细胞壁中含有能够溶解Fe-P和Al-P的成分,能从低磷土壤中吸收更多的磷^[22],使得根系密生区土壤养分消耗加大^[23],作物根围土壤间的磷素浓度差增大,加快了磷素的转移^[24]。

本研究结果还表明,不隔根处理木薯的实际土壤细菌总量损失和真菌总量损失均大于0,可能是因为花生根系伸入木薯区土壤,根系分泌物、脱落物及其腐解物释放了营养物质,影响土壤酶活性,增加根系沉积的C、N化合物,继而促进木薯土壤细菌和真菌的增殖^[20,25]。但是,花生的实际土壤细菌总量损失和真菌总量损失小于0,可能是因为木薯根系分泌物的组成或数量不利于花生土壤真菌和细菌的生长^[26]。而部分隔根处理的实际土壤酶活性损失、实际土壤真菌总量与细菌总量损失均小于不隔根处理,主要是由于尼龙网虽然阻止了根系的直接接触,但根系分泌物、脱落物中的部分营养物质和水分仍可穿越尼龙网到达对方作物根围土壤,改变了土壤微环境^[25,27-28]。

参考文献:

[1] 苏冬辉. 不同浓度多效唑浸泡种茎对木薯生长的影响[J]. 现代农业科技, 2020(17): 105.
SU D H. Effects of soaked seed stem by paclobutrazol at different concentrations on cassava growth[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2020(17): 105.

[2] 严炜, 刘光华, 娄予强, 等. 木薯间套作栽培研究概况及产业发展对策[J]. 南方农业学报, 2011, 42(4): 391-394.
YAN W, LIU G H, LOU Y Q, et al. Research survey on cassava intercropping cultivation and the countermeasures for developing cassava industry[J]. Journal of Southern Agriculture, 2011, 42(4): 391-394.

[3] 刘子凡, 黄洁, 魏云霞, 等. 不同木薯/花生模式下的产量表现及其经济产出研究[J]. 热带作物学报, 2016, 37(1): 65-69.
LIU Z F, HUANG J, WEI Y X, et al. Effect of yield performance and economic returns in different cassava/peanut intercropping system[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2016, 37(1): 65-69.

[4] 罗兴录. 木薯与花生间作产量效应及生态经济效益研究[J]. 耕作与栽培, 1998(4): 1-3.
LUO X L. Yield effect and ecological economic benefit of cassava/peanut intercropping system[J]. Tillage and Cultivation, 1998(4): 1-3.

[5] 熊军, 闫海锋, 韦绍丽, 等. 木薯+花生间作对作物光合特性、农艺性状和产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(6): 165-168.
XIONG J, YAN H F, WEI S L, et al. Effects of cassava/peanut intercropping on photosynthetic characteristics, agronomic traits and yield[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2016, 44(6): 165-168.

[6] 刘子凡, 苏必孟, 黄洁, 等. 木薯花生间作模式养分吸收与利用优势的比较[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2019, 45(5): 478-484.
LIU Z F, SU B M, HUANG J, et al. Advantage of nutrient absorption and utilization in cassava-peanut intercropping system[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2019, 45(5): 478-484.

[7] POLTHANEE A, KOTCHASATIT A. Growth, yield and nutrient content of cassava and mungbean growth under intercropping[J]. Pakistan Journal of Biological Sciences, 1999, 2(3): 871-876.

[8] 唐秀梅, 钟瑞春, 揭红科, 等. 间作花生对木薯碳氮代谢产物及关键酶活性的影响[J]. 中国农学通报, 2011, 27(3): 94-98.
TANG X M, ZHONG R C, JIE H K, et al. Effect of interplanting peanut on metabolites and key enzyme activities of carbon-nitrogen metabolism of cassava[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(3): 94-98.

[9] 唐秀梅, 钟瑞春, 揭红科, 等. 间作木薯对花生叶片碳氮代谢产物及关键酶活性的影响[J]. 西南农业学报, 2014, 27(6): 2316-2321.
TANG X M, ZHONG R C, JIE H K, et al. Effect of cassava-peanut intercropping on metabolites and key enzyme activity of carbon-nitrogen metabolism of peanut leaf[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2014, 27(6): 2316-2321.

[10] POLTHANEE A, WANAPAT S, MANGPROM P. Row arrangement of peanut in cassava-peanut intercropping: II. Nutrient removal and nutrient balance in soil[J]. Khon

- Kaen Agricultural Journal, 1998, 26(3): 125–131.
- [11] 徐海强, 黄洁, 刘子凡, 等. 木薯/花生间作对其根际土壤微生物数量、群落结构及多样性的影响[J]. 南方农业学报, 2016, 47(2): 185–190.
XU H Q, HUANG J, LIU Z F, et al. Effects of cassava-peanut intercropping on microbial amount, community structure and diversity in rhizosphere soils[J]. Journal of Southern Agriculture, 2016, 47(2): 185–190.
- [12] ZHANG F S, LI L. Using competitive and facilitative interactions in intercropping systems enhances crop productivity and nutrient-use efficiency[J]. Plant and Soil, 2003, 248(1/2): 305–312.
- [13] 苏利荣, 何铁光, 苏天明, 等. 甘蔗/绿豆间作体系作物根围土壤无机磷变化特征[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(6): 73–78.
SU L R, HE T G, SU T M, et al. Changes of inorganic phosphorus contents in rhizosphere soil in sugarcane and mung bean intercropping system[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(6): 73–78.
- [14] BANIK P, SASMAL T, GHOSAL P K, et al. Evaluation of mustard(*Brassica campestris* Var. Toria) and legume intercropping under 1 : 1 and 2 : 1 row-replacement series systems[J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2000, 185(1): 9–14.
- [15] 褚贵新, 沈其荣, 曹金留, 等. 旱作水稻与花生间作系统中的氮素固定与转移及其对土壤肥力的影响[J]. 土壤学报, 2003, 40(5): 717–723.
CHU G X, SHEN Q R, CAO J L, et al. Biological nitrogen fixation and nitrogen export of groundnut intercropped with rice cultivated in aerobic soil and its effect on soil nitrogen fertility[J]. Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(5): 717–723.
- [16] 齐万海, 柴强. 不同隔根方式下间作小麦玉米的竞争力及产量响应[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(1): 31–34.
QI W H, CHAI Q. Yield response to wheat/maize competitiveness in wheat/maize intercropping system under different root partition patterns[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(1): 31–34.
- [17] MORRIS R A, GARRITY D P. Resource capture and utilization in intercropping: non-nitrogen nutrients[J]. Field crops Research, 1993, 34(3/4): 319–334.
- [18] HORST W J, WASCHKIES C. Phosphatversorgung von sommerweizen(*Triticum aestivum* L.) in mischkultur mit Weißer lupine(*Lupinus albus* L.)[J]. Zeitschrift Für Pflanzenernährung Und Bodenkunde, 1987, 150(1): 1–8.
- [19] 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.
- [20] 滕云飞. 玉米/辣椒间作群体生态效应及氮磷营养特性研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2006.
TENG Y F. Study on ecological effects and characteristic of N, P nutrients in maize/pepper intercropping systems[D]. Changchun: Jilin Agriculture University, 2006.
- [21] BETHLENFALVAY G J, REYES-SOLIS M G, CAMEL S B, et al. Nutrient transfer between the root zones of soybean and maize plants connected by a common mycorrhizal mycelium[J]. Physiologia Plantarum, 1991, 82: 423–432.
- [22] AE N, OTANI T. The role of cell wall components from groundnut roots in solubilizing sparingly soluble phosphorus in low fertility soils[J]. Plant and Soil, 1997, 196(2): 265–270.
- [23] 张恩和. 供磷水平对间套作物根系酸性磷酸酶活性的影响[J]. 西北植物学报, 2001, 21(1): 53–58.
ZHANG E H. Effects of P application on root acid phosphates of crops in intercropping[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2001, 21(1): 53–58.
- [24] 肖焱波, 李隆, 张福锁. 小麦/蚕豆间作体系中的种间相互作用及氮转移研究[J]. 中国农业科学, 2005, 38(5): 965–973.
XIAO Y B, LI L, ZHANG F S. The interspecific nitrogen facilitation and the subsequent nitrogen transfer between the intercropped wheat and fababean[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(5): 965–973.
- [25] 王瑛, 孟亚利, 陈兵林, 等. 麦棉套作棉花根际非根际土壤微生物和土壤养分[J]. 生态学报, 2006, 26(10): 3485–3490.
WANG Y, MENG Y L, CHEN B L, et al. Studies on the soil microorganism quality and soil nutrient content at the rhizosphere and non-rhizosphere region of cotton in wheat-cotton intercropping system[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(10): 3485–3490.
- [26] ZUO Y M, ZHANG F S, LI X L, 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): 13–25.
- [27] 左元梅, 陈清, 张福锁. 利用¹⁴C示踪研究玉米/花生间作玉米根系分泌物对花生铁营养影响的机制[J]. 核农学报, 2004, 18(1): 43–46.
ZUO Y M, CHEN Q, ZHANG F S. The mechanisms of root exudates of maize in improvement of iron nutrition of peanut in peanut/maize intercropping system by ¹⁴C tracer technique[J]. Acta Agriculturae Nucleatae Sinica, 2004, 18(1): 43–46.
- [28] 董晓钢, 汤利, 郑毅, 等. 不同玉米大豆间作处理根系互作对根际微生物数量的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2015, 30(4): 624–628.
DONG X G, TANG L, ZHENG Y, et al. Effects of roots interaction on the growth of rhizosphere microorganisms in maize and soybean intercropping[J]. Journal of Yunnan Agricultural University(Natural Science), 2015, 30(4): 624–628.

责任编辑: 毛友纯

英文编辑: 柳 正