

马怡茹, 魏 飞, 马子豪, 等. 连作棉田间作洋葱、孜然对棉花光合特性及根系生长的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(6): 792-797.

MA Yi-ru, WEI Fei, MA Zi-hao, et al. Effects of continuous cropping cotton intercropping onion and cumin on photosynthetic characteristics and root growth of cotton[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(6): 792-797.

连作棉田间作洋葱、孜然对棉花光合特性及根系生长的影响

马怡茹, 魏 飞, 马子豪, 王超凡, 孙新展, 刘建国*

(石河子大学/新疆生产建设兵团绿洲生态农业重点实验室, 新疆 石河子 832003)

摘 要:为探讨棉花间作模式调节农田生态环境、缓解棉花连作障碍的作用,以棉花连作30年土壤为对象,设置棉花间作洋葱、间作孜然处理,研究两种间作模式对棉花地上部光合特性、根系生长发育及土壤酚酸类化感物质含量的影响。结果表明,与对照相比,间作洋葱和间作孜然处理的棉花根长、根质量、比表面积分别增加54.5%、45.7%、16.3%和22.8%、15.7%、4.9%,初花期叶绿素含量、净光合速率比对照分别增加12.7%、12.2%和20.7%、7.2%。间作洋葱、孜然处理棉花根际土壤中3种主要酚酸类化感物质总量分别降低67.9%和57.8%,与单作相比差异显著。研究表明,长期连作棉田间作洋葱、孜然降低了棉田土壤中化感物质含量,改良土壤环境,促进棉花根系生长发育,提高棉花叶片光合能力及生物量,并且间作洋葱对连作棉花生长发育的调节效果优于间作孜然,可作为缓解棉花连作障碍的种植方式。

关键词:间作;连作障碍;化感物质;光合特性;根系生长

中图分类号:S344.2

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2019)06-0792-06

doi: 10.13254/j.jare.2018.0288

Effects of continuous cropping cotton intercropping onion and cumin on photosynthetic characteristics and root growth of cotton

MA Yi-ru, WEI Fei, MA Zi-hao, WANG Chao-fan, SUN Xin-zhan, LIU Jian-guo*

(Shihezi University/The Key Laboratory of Oasis Eco-agriculture of the Xinjiang Production and Construction Group, Shihezi, 832003, China)

Abstract: Because of the problems associated with continuous cotton cropping in the Xinjiang cotton area, this study was conducted to alter the farmland ecological environment through cotton field intercropping and to alleviate continuous cropping obstacles which are important measures needed to reform the farming system. Soils subjected to cotton continuous cropping for 30 years were evaluated. Two treatments, onion and cumin, were used for cotton intercropping, and their effects on the growth, development, and photosynthetic characteristics of cotton shoots and content of phenolic acid allelochemicals in the soil were evaluated. The results showed that compared with the control, the root length, root mass, and specific surface area of intercropped onion and cumin treatment were increased by 54.5%, 45.7%, 16.3% and 22.8%, 15.7%, 4.9%, respectively; The chlorophyll content and net photosynthesis rate at initial flowering stage increased by 12.7%, 12.2%, and 20.7%, 7.2%, respectively, compared with the control. The total levels of the three main phenolic allelochemicals in the rhizo-

收稿日期:2018-10-23 录用日期:2018-12-12

作者简介:马怡茹(1991—),女,硕士研究生,从事绿洲农田生态系统研究。E-mail:10724697@qq.com

*通信作者:刘建国 E-mail:l-jianguo@126.com

基金项目:国家自然科学基金项目(31560375)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(31560375)

sphere soil of intercropped onion and cumin were reduced significantly by 67.9% and 57.8%, respectively, compared with the control. Therefore, long-term continuous cropping of cotton with onion and cumin reduced allelochemicals in cotton field soil, improved the soil environment, promoted the growth and development of cotton roots, and improved the photosynthetic capacity and biomass of cotton leaves. Additionally, the effect of cotton intercropping with onions on the growth and development of continuously cropped cotton was better than that of cotton intercropping with cumin, and thus could alleviate the continuous cropping barrier of cotton.

Keywords: intercropping; continuous cropping obstacle; allelochemical; photosynthetic characters; root growth

新疆是我国最重要的棉花种植区,随着棉花种植面积的不断扩大,种植年限的不断增加,出现了大面积的连作障碍问题^[1],部分县(团场)甚至达到了棉花种植面积的95%^[2]。为缓解连作障碍问题,在设施栽培和大田生产中可行的方法有:土壤灭菌法、生防菌株选用、合理的轮作与间作、抗性品种选育等^[3-4]。大量研究及生产实践证明,轮作和间作是缓解作物连作障碍的最切实有效的措施之一。但由于目前新疆棉区棉花种植比例大,能够与棉花轮作的农作物种类少、种植面积少,加之土地承包制度以及经济效益^[5-6]等原因,在生产中通过轮作措施减缓连作障碍问题是行不通的,但在新疆棉区以间作的方式缓解棉花连作障碍是可行的。通过间作缓解连作障碍也是学者研究的热点,张亚楠等^[7]研究发现茅苍术与花生间作能够缓解由于连作障碍造成的土壤线虫对花生的危害;张海春等^[8]、马琨等^[9]发现间作能够改善连作土壤中根系微生物数量、丰富微生物群落和提高土壤酶活性;胡国彬等^[10]认为小麦与蚕豆间作能够改变蚕豆根系的微生态环境,使根际土壤朝着健康方向转化,最终缓解蚕豆连作障碍的不良影响;棉花与小麦、谷子等同穴互作可降低棉花化感自毒物质的积累量,改善育苗土壤微生物数量和结构^[11]。

孜然是传统的调味料,在新疆已有1000余年的种植历史,在南疆主要是与棉花、玉米等作物间套作种植,表现出良好的间作优势。葱蒜类作物因其特有的化感和抑菌特性,常被用于间作套种,分蘖洋葱可修复连作番茄土壤,同时,分蘖洋葱伴生可促进番茄对磷和锰矿质养分的吸收,促进番茄植株的生长^[12]。通过棉花间作孜然、洋葱缓解棉花连作障碍,在新疆棉区既有理论上的可行性,又有实践中的可操作性,因此,本试验依托棉花长期连作定位试验,选择长期连作棉田土壤,通过研究洋葱、孜然与棉花间作对棉花生长特征、光合特性及根系的影响,以探究合理的间作模式以及缓解棉花连作障碍的调控技术。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2017年在石河子大学农学院试验站(86°03'E, 45°19'N)长期连作试验田进行,试验站海拔404 m,年日照时数超过2700 h,无霜期170 d左右,≥10℃的活动积温3650℃,年平均气温7℃,年降水量205 mm,为温带大陆性气候,降水量少,光热资源充足,是典型的绿洲灌溉农田。供试土壤为棉花连作30年土壤,土壤质地为壤土,土壤pH为7.56,碱解氮含量119.08 mg·kg⁻¹,有效磷含量20.1 mg·kg⁻¹,有效钾含量72.6 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

试验选择棉花连作30年土壤,设置棉花间作洋葱(C|O)、棉花间作孜然(C|C)、棉花单作(CK)共3个处理,重复6次。试验采用根箱法,将连作30年棉田土壤风干过筛后,装入长60 cm、高50 cm和宽15 cm根箱中,根箱有一面为有机玻璃材质,可在不同生育期打开观测根系发育状况。棉花品种为新陆早45号,每个根箱种植3株棉花,株距20 cm,在2株棉花之间种植1株洋葱(孜然),种植比例为棉花:洋葱(孜然)=3:2。2017年4月25日播种,每箱施入尿素(含N 46%)10 g、KH₂PO₄(含P₂O₅ 22.8%)15 g,水分管理为蕾期前每隔6 d灌水一次,蕾期后4 d灌水一次。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 光合指标

在棉花出苗后25(苗期)、45(蕾期)、70 d(初花期),利用Li-6400便携式光合测定仪,选择晴天上午11时,测定棉花功能叶的净光合速率、气孔导度、胞间CO₂浓度及蒸腾速率等光合指标。

1.3.2 叶绿素含量

在棉花出苗后25(苗期)、45(蕾期)、70 d(初花期),利用SPAD-502叶绿素仪测定棉花功能叶相对叶绿素含量(SPAD值)。

1.3.3 根系形态特征指标

在棉花出苗后80 d(开花期),打开根箱,剪除地上部分,从根箱中取完整根系,用水小心冲洗干净并无重叠地置于装有3~4 mm纯净水的透明树脂塑料盘内,用EPSON扫描仪双面光源扫描根系,利用WinRHIZO根系分析系统分析根系各参数(根长、根表面积、根质量、根冠比等)。

1.3.4 化感物质

在棉花出苗后80 d(开花期)取样,采用“抖土法”取棉花根际土,用100 mL蒸馏水提取根际土溶液,迅速离心过滤、浓缩至5 mL,滤液过0.45 μm 滤膜,-20 $^{\circ}\text{C}$ 冷冻保存、备用。酚酸类化感物质采用HPLC法测定,测定方法及条件参照文献[13]。

1.4 数据分析

利用SPSS、Excel和WinRHIZO根系分析软件进行数据处理及分析。

2 结果与分析

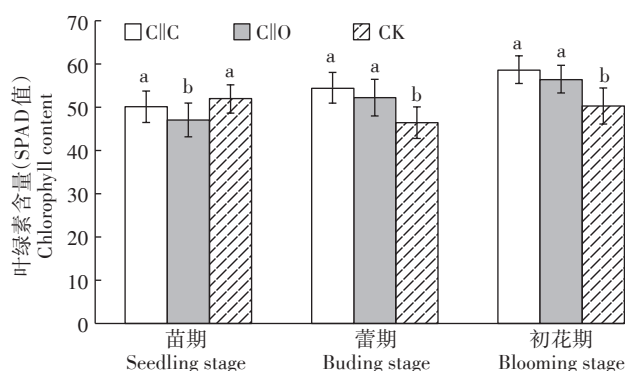
2.1 间作模式对棉花植株生长和生物量的影响

由表1可以看出,间作洋葱和间作孜然的棉花单株质量、叶面积与对照相比均显著增加,单株质量比单作分别增加51.0%和20.1%,叶面积分别增加25.5%和15.8%。间作洋葱处理的株高和株高日增长量比单作分别增加23.9%和29.8%,差异达显著水平($P<0.05$),间作孜然处理比单作分别增加11.1%和14.8%,差异不显著($P>0.05$)。两种间作模式相比,间作洋葱的棉花株高、单株质量、叶面积和株高日增长量均高于间作孜然,分别增加11.6%、25.7%、8.4%和12.9%,其中单株质量差异达显著水平($P<0.05$)。

2.2 间作模式对棉花叶绿素含量的影响

由图1不同间作处理下棉花各生育期叶绿素含

量看出,从苗期、蕾期到初花期叶绿素含量逐渐增加。苗期不同处理间叶绿素含量差异较小,蕾期和初花期间作洋葱、间作孜然处理叶绿素含量均显著高于单作处理,比单作分别上升17.5%、17.1%和12.7%、12.2%。



不同小写字母表示同一生育期各处理间差异显著($P<0.05$)。下同
Different lowercase letters indicate significant difference among treatments at the same growing stage($P<0.05$). The same below

图1 种植模式对棉花功能叶叶绿素含量的影响

Figure 1 Effects of planting patterns on chlorophyll content of cotton leaves

2.3 间作模式对棉花功能叶光合特性的影响

不同间作处理下棉花各生育期功能叶光合特性变化规律见表2。间作棉花净光合速率随生育期进程而增加,在开花期达到最大值;两种间作模式下的棉花单叶净光合速率除苗期外均高于单作棉花,并且表现为间作洋葱>间作孜然>单作;蕾期和初花期间作洋葱、间作孜然处理棉花净光合速率比单作分别上升21.1%、6.4%和20.7%、7.2%,其中间作洋葱与单作差异达显著水平($P<0.05$),间作孜然处理与单作在初花期差异达显著水平($P<0.05$)。不同处理棉花叶片蒸腾速率与净光合速率变化趋势一致,表现为间作洋葱>间作孜然>单作,蕾期和初花期间作洋葱、间作孜然处理棉花蒸腾速率比单作分别增加13.1%、8.2%和17.1%、4.9%,其中间作洋葱与单作差异达显著水平($P<0.05$)。各处理气孔导度随着生育期进程先增大后减小,最大值出现在蕾期,蕾期和初花期不同处理间均表现为间作洋葱>间作孜然>单作,两种间作模式与单作差异均达显著水平($P<0.05$)。蕾期和初花期间作洋葱、间作孜然处理细胞间 CO_2 浓度比单作分别提高10.5%、8.1%和4.7%、16.2%。由此可以看出,两种间作模式下棉花的光合指标都受到影响,且洋葱与棉花间作处理对棉花光合特性影响优于孜然与棉花间作。

表1 不同间作模式下棉花蕾期功能叶及单株生长指标

Table 1 Cotton leaves and plant growth indexes under different intercropping patterns at budding stage

处理 Treatments	株高 Plant height/ cm	单株质量 Plant mass/ g	叶面积 Leaf area/ cm^2	株高日增长量 Plant height daily growth/cm
C O	40.5±2.41a	8.62±0.22a	811±32.6a	0.61±0.08a
C C	36.3±1.08ab	6.86±0.18b	748±25.5a	0.54±0.11ab
CK	32.7±0.76b	5.71±0.21c	646±28.7b	0.47±0.07b

注:同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different small letters in the same column showed the significant difference between the cropping patterns ($P<0.05$). The same below.

2.4 间作模式对棉花根系生长指标的影响

由表3可以看出,两种间作模式处理下,棉花根长、根质量、比根长和比表面积均比棉花单作增加,且差异均达显著水平,其中,间作洋葱和间作孜然处理棉花的根长、根质量与单作相比分别增加了54.5%、45.7%和22.8%、15.7%,且差异显著;间作洋葱和间作孜然处理棉花比根长、比表面积与单作相比分别增加了6.5%、16.3%和6.3%、4.9%,差异达显著水平。两种间作模式棉花根长、根质量、比根长和比表面积均表现为间作洋葱大于间作孜然,与地上部表现完全一致,且根长、根质量和比表面积两处理间差异均达显著水平。由此可以看出,间作促进棉花根系发育,并且棉花间作洋葱效果大于间作孜然。

2.5 不同间作模式下土壤中酚酸类化感物质的含量

从图2不同间作处理土壤中的三种酚酸类化感物质含量来看,间作可降低连作棉田土壤中酚酸类化感物质含量,与单作相比间作洋葱和间作孜然处理三种酚酸类化感物质总量分别降低67.9%和57.8%,均达显著水平。两种间作方式均可降低土壤中对羟基苯甲酸、阿魏酸和香草醛的含量,间作洋葱与单作相比分别降低70.7%、70.4%和62.6%,间作孜然与单作相比分别降低62.8%、52.1%和53.4%。两种模式间相比,间作洋葱土壤中对羟基苯甲酸、阿魏酸和香草

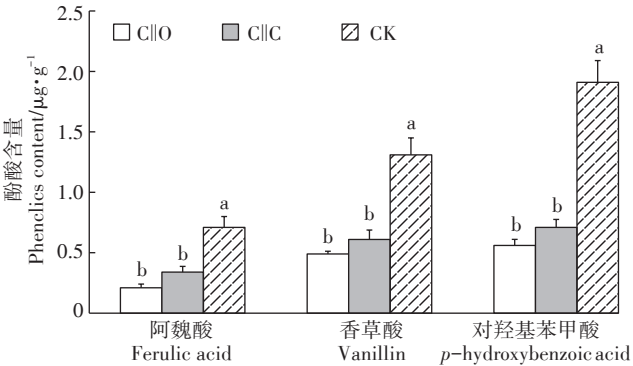


图2 不同种植模式下土壤中三种酚酸类物质的含量

Figure 2 Three phenolics content of soil under different planting patterns

醛的含量比间作孜然分别降低21.1%、38.2%和19.7%,但差异不显著。由此可看出,与单作相比,棉花间作处理对化感物质的削减作用更强。

3 讨论

间作是一种在空间上实现种植集约化的种植方式,通过丰富作物多样性来协调种间竞争、补偿关系,充分利用光、温、水、肥等资源,提高光能利用率和土地生产率^[4],在国内外被广泛采用。本研究两种间作模式下,与单作相比,棉花根长、根质量、比根长和

表2 种植模式对棉花叶片光合生理指标的影响

Table 2 Effects of planting patterns on photosynthetic physiological indexes of cotton leaves

生育期 Growing stage	处理 Treatments	净光合速率 Net photosynthesis rate/ $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	气孔导度 Stomatal conductance/ $\text{mol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	胞间CO ₂ 浓度 Inter-cellular carbon dioxide concentration/ $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{mol}^{-1}$	蒸腾速率 Transpiration rate/ $\text{mmol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
苗期 Seedling stage	C O	12.5±1.28a	0.24±0.05a	152.5±10.4b	9.7±1.45a
	C C	10.8±0.95b	0.25±0.03a	171.5±4.1a	10.4±1.08a
	CK	12.3±1.03a	0.15±0.01b	108.1±9.8c	6.2±0.14b
蕾期 Budding stage	C O	24.7±1.10a	0.64±0.02a	169.6±3.51a	13.8±0.29a
	C C	21.7±0.21ab	0.52±0.09b	165.9±10.4a	13.2±1.42a
	CK	20.4±0.53b	0.42±0.11c	153.5±21.7b	12.2±1.96b
初花期 Blooming stage	C O	25.1±1.51a	0.48±0.06a	156.2±7.8b	14.4±1.26a
	C C	22.3±0.98b	0.45±0.05a	173.3±5.7a	12.9±0.98b
	CK	20.8±0.29c	0.39±0.02b	149.2±4.4b	12.3±0.40b

表3 不同种植模式下棉花根系生长指标

Table 3 The cotton root growth indexes under different planting patterns

处理 Treatments	根长 Root length/cm	根质量/g·株 ⁻¹ Root mass/g·plant ⁻¹	根冠比 Root/shoot	比根长 Specific root length/cm·g ⁻¹	比表面积 Specific surface area/cm ² ·g ⁻¹
C O	936±19.9a	1.85±0.03a	0.27±0.004a	507±3.6a	143±2.2a
C C	744±14.5b	1.47±0.02b	0.27±0.006a	506±2.9a	129±1.5b
CK	606±26.1c	1.27±0.03c	0.29±0.009a	476±10.5b	123±1.1c

比表面积都显著增加,主要原因是间作体系中根系互作对协调水分与养分的关系、调控根系分泌物的释放种类与数量具有重要作用,进而影响根系发育和地上部生长^[15-16],间作还可以改善作物的营养环境,达到提高地上部养分吸收利用效率和提高产量的目的^[17-18]。间作体系中地上部的互补主要是通过空间光热的调控提高光合效率来实现的,棉花间作孜然、洋葱,通过不同作物根系分泌物调控根际过程,使根际环境得到优化,促进地上部生长,间作体系棉花叶绿素含量、光合速率及地上部生物量均增加,达到了缓解棉花连作障碍,促进棉花生长的目的。杨平等^[19]研究认为小麦根系分泌物可提高黄瓜幼苗根系保护酶活性、提高黄瓜幼苗的全株干质量、叶面积及光合作用;焦念元等^[20]、冯晓敏等^[21]研究发现,间作花生、间作燕麦通过提高功能叶的叶绿素b含量,增强了叶片对光能的捕获和转化能力,这与本研究结论一致。

化感自毒物质积累是引起作物连作障碍的重要因素之一,合理间作能有效调节根际微生物区系和群落结构,增加土壤中酚酸的降解从而缓解连作障碍^[22]。在旱作水稻西瓜间作^[23]、玉米大豆间作^[24]系统中,间作改变了根际酚酸的种类和含量;肖靖秀等^[25]研究认为间作降低了小麦根际酚酸的含量,抑制了酚酸在小麦根际的累积,间作也改变了蚕豆根际酚酸的种类,其中主要是促进了蚕豆根际香草酸和丁香酸的累积、减少了香豆酸含量,总之,间作可通过改变根际有机酸和酚酸的累积而改变根际过程。棉花自毒作用与酚酸类化感物质在土壤中的积累密切相关,且随连作棉花年限增加化感物质积累量增加^[13],研究表明在连作30年棉田间作洋葱和间作孜然可促进棉花根系发育、提高棉花光合效率和生物量,主要是由于间作降低了土壤中化感物质的含量,改善了土壤微生态环境。棉田间作洋葱和间作孜然对长期连作棉田根际土壤环境的影响,特别是间作模式削减酚酸类化感物质的机制、不同作物间作效果的差异还需进一步研究。

4 结论

(1)长期连作棉田间作洋葱、孜然通过降低化感物质含量,改善棉田生长环境,提高棉花的光合速率并促进棉花地上部及地下部生长发育。

(2)间作洋葱与间作孜然对于棉花生长的影响存在一定差异,相比而言间作洋葱对连作棉花地上部及

根系生长的促进效果更佳。

因此,间作洋葱和间作孜然能够缓解棉花长期连作带来的连作障碍,但间作洋葱和间作孜然缓解棉花连作障碍的土壤生态效益及大田推广应用还有待进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 顾美英,徐万里,茆军,等.新疆绿洲农田不同连作年限棉花根际土壤微生物群落多样性[J].生态学报,2012,32(10):3031-3040.
GU Mei-ying, XU Wan-li, MAO Jun, et al. Microbial community diversity of rhizosphere soil in continuous cotton cropping system in Xinjiang [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(10):3031-3040.
- [2] 蒋旭平.新疆棉花长期连作对棉区生态环境的影响与棉花轮作可选择空间的思考[J].农业现代化研究,2009,30(5):599-602.
JIANG Xu-ping. Impact of long-term cotton cropping on ecological environment in cotton region and thoughts on choice space of cotton rotation [J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2009, 30(5):599-602.
- [3] 殷继忠,蔡柏岩.生防细菌菌剂修复连作障碍的研究进展[J].中国农学通报,2017,33(21):101-107.
YIN Ji-zhong, CAI Bai-yan. Continuous cropping obstacle repair by bio-control bacterium [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33(21):101-107.
- [4] 李天来,杨丽娟.作物连作障碍的克服——难解的问题[J].中国农业科学,2016,49(5):916-918.
LI Tian-lai, YANG Li-juan. Overcoming continuous cropping obstacles: The difficult problem [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(5):916-918.
- [5] 刘建国,张伟,李彦斌,等.新疆绿洲棉花长期连作对土壤理化性状和土壤酶活性的影响[J].中国农业科学,2009,42(2):725-733.
LIU Jian-guo, ZHANG Wei, LI Yan-bin, et al. Effects of long-term continuous cropping system of cotton on soil physical-chemical properties and activities of soil enzyme in oasis in Xinjiang [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(2):725-733.
- [6] 蒋旭平.新疆棉农连作行为分析——基于棉花替代作物可选择空间的思考[J].中国农业资源与区划,2009,30(6):47-50.
JIANG Xu-ping. Analysis of cotton and agriculture continuous cropping behavior [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2009, 30(6):47-50.
- [7] 张亚楠,李孝刚,王兴祥.茅苍术间作对连作花生土壤线虫群落的影响[J].土壤学报,2016,53(6):1497-1505.
ZHANG Ya-nan, LI Xiao-gang, WANG Xing-xiang. Effects of interplanting of *Atractylodes lancea* in monocultured peanut fields on soil nematode community [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(6):1497-1505.
- [8] 张海春,张浩,胡晓辉.不同间作模式对温室连作番茄产量、土壤微生物和酶的影响[J].西北农业学报,2016,25(8):1218-1223.
ZHANG Hai-chun, ZHANG Hao, HU Xiao-hui. Effects of different intercropping patterns on tomato yield and soil microflora and enzymes activities in continuous cropping [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2016, 25(8):1218-1223.

- [9] 马 琨, 杨桂丽, 马 玲, 等. 间作栽培对连作马铃薯根际土壤微生物群落的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(10):2987-2995.
MA Kun, YANG Gui-li, MA Ling, et al. Effects of intercropping on soil microbial communities after long-term potato monoculture[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(10):2987-2995.
- [10] 胡国彬, 董 坤, 董 艳, 等. 间作缓解蚕豆连作障碍的根际微生物生态效应[J]. 生态学报, 2016, 36(4):1010-1020.
HU Guo-bin, DONG Kun, DONG Yan, et al. Effects of cultivars and intercropping on the rhizosphere microenvironment for alleviating the impact of continuous cropping of faba bean[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(4):1010-1020.
- [11] 李伶俐, 黄耿华, 李彦鹏, 等. 棉花与不同作物同穴互作育苗对土壤微生物、酶活性和根系分泌物的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(6):1475-1482.
LI Ling-li, HUANG Geng-hua, LI Yan-peng, et al. Effects of mutual aid grow seedlings of cotton with other crops in the same aperture on soil microorganisms quantity, enzyme activity and root secretion[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(6):1475-1482.
- [12] 吴 瑕, 吴凤芝, 周新刚, 等. 分蘖洋葱伴生对番茄矿质养分吸收及灰霉病发生的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(3):734-742.
WU Xia, WU Feng-zhi, ZHOU Xin-gang, et al. Effect of intercropping with tillered onion on mineral nutrient uptake and gray mold disease occurrence of tomato[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(3):734-742.
- [13] Jiang G Y, Li Y B, Liu J G. Autotoxicity potential of cotton tissues and root exudates and identification of its autotoxins[J]. *Allelopathy Journal*, 2013, 32(2):279-288.
- [14] Li L, Sun J H, Zhang F S, et al. Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping II. Recovery or compensation of maize and soybean after wheat harvesting[J]. *Field Crops Research*, 2001, 71:173-181.
- [15] 侯 慧, 董 坤, 杨智仙, 等. 间作系统根-土互作与连作障碍缓解机制[J]. 中国农学通报, 2016, 32(29):105-112.
HOU Hui, DONG Kun, YANG Zhi-xian, et al. Root-soil interaction in intercropping system and alleviation mechanism of continuous cropping obstacle[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, 32(29):105-112.
- [16] Dai C C, Chen Y, Wang X X, et al. Effects of intercropping of peanut with the medicinal plant *Atractylodes lancea* on soil microecology and peanut yield in subtropical China[J]. *Agroforestry Systems*, 2013, 87(2):417-426.
- [17] 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):1617-1624.
LI Yu-ying, HU Han-sheng, CHENG Xu, 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):1617-1624.
- [18] 张雷昌, 汤 利, 董 艳, 等. 根系互作影响玉米大豆间作物氮吸收[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2016, 31(6):1111-1119.
ZHANG Lei-chang, TANG Li, DONG Yan, 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.
- [19] 杨 平, 吴凤芝. 不同化感效应的小麦根系分泌物对黄瓜幼苗生长及根系生理生化特性的影响[J]. 中国蔬菜, 2012(4):37-42.
YANG Ping, WU Feng-zhi. Effects of root aqueous extracts of wheat cultivars with different allelopathy potential on cucumber seedlings growth and physiological and biochemical characters of cucumber root [J]. *China Vegetables*, 2012(4):37-42.
- [20] 焦念元, 杨萌珂, 宁堂原, 等. 玉米花生间作和磷肥对间作花生光合特性及产量的影响[J]. 植物生态学报, 2013, 37(11):1010-1017.
JIAO Nian-yuan, YANG Meng-ke, NING Tang-yuan, et al. Effects of maize-peanut intercropping and phosphate fertilizer on photosynthetic characteristics and yield of intercropped peanut plants[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2013, 37(11):1010-1017.
- [21] 冯晓敏, 杨 永, 任长忠, 等. 豆科-燕麦间作对作物光合特性及籽粒产量的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(9):1426-1434.
FENG Xiao-min, YANG Yong, REN Chang-zhong, et al. Effects of legumes intercropping with oat on photosynthesis characteristics of and grain yield[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41(9):1426-1434.
- [22] 陈 玲, 董 坤, 杨智仙, 等. 连作障碍中化感自毒效应及间作缓解机理[J]. 中国农学通报, 2017, 33(8):91-98.
CHEN Ling, DONG Kun, YANG Zhi-xian, et al. Allelopathy autotoxicity effect of successive cropping obstacle and its alleviate mechanism by intercropping[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33(8):91-98.
- [23] Hao W Y, Ren L X, Ran W, et al. Allelopathic effects of root exudates from watermelon and rice plants on *Fusarium oxysporum* f. sp. *niveum* [J]. *Plant and Soil*, 2010, 336(1):485-497.
- [24] Gao X, Wu M, Xu R N, et al. Root interactions in a maize/soybean intercropping system control soybean soil-borne disease, red crown rot [J]. *PLoS ONE*, 2014, 9(5):1-9
- [25] 肖靖秀, 郑 毅, 汤 利, 等. 间作小麦蚕豆不同生长期根际有机酸和酚酸变化[J]. 土壤学报, 2016, 53(3):685-693.
XIAO Jing-xiu, ZHENG Yi, TANG Li, et al. Changes in organic and phenolic acids in rhizosphere of interplanted wheat and faba bean with growth stage[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(3):685-693.