

# 种植方式对玉米-大豆套作体系中作物产量、 养分吸收和种间竞争的影响\*

雍太文<sup>1†</sup> 刘小明<sup>1†</sup> 宋春<sup>1,2</sup> 周丽<sup>1</sup> 李星辰<sup>1</sup>  
杨峰<sup>1</sup> 王小春<sup>1</sup> 杨文钰<sup>1\*\*</sup>

(1. 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 成都 611130;  
2. 四川农业大学资源环境学院生态环境研究所 成都 611130)

**摘要** 为探寻玉米-大豆套作体系下作物间的资源竞争关系,揭示玉米-大豆套作系统的增产机理,本研究以玉米-大豆套作系统(简称玉豆套作)为对象,通过2 a大田定位试验,研究了玉豆套作带状连作(A1)、玉豆套作带状轮作(A2)、玉豆套作等行距种植(A3)、玉米单作(A4)、大豆单作(A5)5种植方式对玉米、大豆的产量、养分吸收及种间竞争能力的影响。结果表明,与单作和等行距种植相比,带状种植的玉米产量降低、大豆产量显著增加,A2的大豆产量分别比A5和A3高25.5%和89.2%。与带状连作相比,带状轮作促进玉米增产和对N、P、K的吸收,玉米籽粒产量及植株N、P、K的吸收总量分别提高7.5%、18.5%、9.1%、14.1%。与大豆单作相比,带状套作显著增加了大豆的经济系数和养分收获指数,A2的经济系数和植株N、P、K收获指数分别增加40.9%、11.9%、20.6%、39.9%。带状种植方式下,玉米对N、P、K的竞争能力弱于大豆( $A_{ms}<0$ ,  $CR_{ms}<1$ ),但带状轮作提高了玉米的种间竞争能力和营养竞争比率。玉米-大豆套作体系下,相对带状连作和等行距种植,带状轮作种植有利于玉米与大豆间的和谐共生,促进了玉米、大豆对养分的吸收,提高了系统的产量和土地当量比率(LER)。

**关键词** 玉米 大豆 带状套作 连作 轮作 产量 养分吸收 种间竞争

中图分类号: 147.3; S181; S344.3 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2015)06-0659-09

## Effect of planting patterns on crop yield, nutrients uptake and interspecific competition in maize-soybean relay strip intercropping system

YONG Taiwen<sup>1</sup>, LIU Xiaoming<sup>1</sup>, SONG Chun<sup>1,2</sup>, ZHOU Li<sup>1</sup>, LI Xingchen<sup>1</sup>,  
YANG Feng<sup>1</sup>, WANG Xiaochun<sup>1</sup>, YANG Wenyu<sup>1</sup>

(1. College of Agronomy, Sichuan Agricultural University / Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Cultivation in Southwest China, Ministry of Agriculture, Chengdu 611130, China; 2. Institute of Ecological and Environmental Sciences, College of Resources and Environment, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

**Abstract** To deal with the contradiction between population growth and land shortage, maize-soybean relay strip intercropping system has become increasingly popular and widely adopted in Southeast China. The conventional maize-soybean relay strip intercropping system used by farmers have not been good for high maize-soybean yields and nutrient uptake. To therefore explore the characteristics of competition for resources between crops and the mechanism of yield increase under maize-soybean relay strip intercropping system, a two-year field experiment was conducted where the effects of planting patterns on crop yield, nutrient uptake and interspecies competition for resources were investigated. The tested planting patterns included maize-soybean relay intercropping in continuous strips with wide-narrow rows (A1), maize-soybean relay intercropping in rotation strips with wide-narrow rows (A2), maize-soybean relay intercropping in continuous strips with equal rows (A3), maize monoculture (A4) and soybean monoculture

\* 农业部公益性行业(农业)科研专项(201203096)、国家大豆产业技术体系建设专项(CARS-04-PS19)和国家自然科学基金项目(31271669)资助

\*\* 通讯作者: 杨文钰, 现主要从事作物栽培及生理研究。E-mail: mssiyangwy@sicau.edu.cn

† 同等贡献者: 雍太文, 主要从事作物栽培生理生态研究, E-mail: yongtaiwen@sicau.edu.cn; 刘小明, 主要从事作物栽培生理生态研究。

收稿日期: 2014-12-18 接受日期: 2015-04-01

(A5). The density of maize and soybean under relay intercropping was equal to that under monoculture. The results showed that compared with monoculture and equal width spacing, relay strip intercropping decreased maize grain yield while increased soybean bean yield significantly. Maize grain yield under A2 treatment was 4.9% and 5.7% lower than those under A4 and A3 treatments, respectively. However, soybean bean yield under A2 treatment was 25.5% and 89.2% higher than those under A5 and A3 treatments, respectively. Compared with A1 treatment, maize grain yield and N, P, K uptake increased under A2 treatment. The maize grain yield and N, P, K uptake under A2 treatment were 7.5%, 18.5%, 9.1% and 14.1% higher than those under A1 treatment. However, yield and N, P, K uptake of soybean were not significantly different between A2 and A1 treatments. Compared with the monoculture treatments, the economic coefficient and nutrient harvest index of soybean in maize-soybean relay strip intercropping systems significantly increased. The economic coefficient and N, P, K harvest indexes of soybean under A2 treatment increased by 40.9%, 11.9%, 20.6% and 39.9%, respectively. In maize-soybean relay strip intercropping systems, maize competition was weaker than that of soybean for N, P, K ( $A_{ms} < 0$ ,  $CR_{ms} < 1$ ). However, rotation helped improve interspecific competition and nutrient competition ratio of maize. In 2013, interspecific competition was close to 0 while nutrient competition ratio was close to 1 under A2 treatment. Comparison of A2 with A1 and A3 treatments showed that rotation benefited harmonious symbiosis between maize and soybean. This symbiosis enhanced nutrient uptake of both maize and soybean, subsequently increasing yield and land equivalent ratio (LER) of the cropping system.

**Keywords** Maize; Soybean; Relay strip intercropping; Continuous cropping; Rotation cropping; Yield; Nutrient uptake; Interspecific competition

(Received Dec. 18, 2014; accepted Apr. 1, 2015)

当前世界农业正面临人口不断增加, 粮食刚性需求不断上升, 可利用资源不断减少, 生态环境日益破坏等严重社会和生态问题, 粮食安全已成为各个国家和地区关注的焦点。为提高粮食产量, 各国农业专家和学者通过育种和栽培措施不断提高种子质量和改善作物生长环境。其中, 间作套种就是一种增加粮食总产的有效途径, 尤其是禾本科作物与豆科作物的间套作具有明显的增产效应。如: 豌豆(*Pisum sativum* Linn.)-大麦(*Hordeum vulgare* Linn.)<sup>[1]</sup>、小麦(*Triticum aestivum* Linn.)-大豆[*Glycine max* (Linn.) Merr.]<sup>[2]</sup>、小麦-豌豆<sup>[3]</sup>、玉米(*Zea mays* Linn.)-木豆[*Cajanus cajan* (Linn.) Millsp.]<sup>[4]</sup>、苜蓿(*Medicago* spp.)-玉米<sup>[5]</sup>、水稻(*Oryza sativa* Linn.)-花生(*Arachis hypogaea* Linn.)<sup>[6]</sup>、甘蔗(*Saccharum officinarum* Linn.)-大豆<sup>[7]</sup>等间套作系统。但是, 作物种植具有明显的连作障碍<sup>[8-10]</sup>, 特别是豆科作物的连作种植, 例如, 大豆连作种植时, 土壤中化感物质和有害生物增加, 植株固氮能力和干物质积累能力下降, 农艺性状发生明显变化, 影响产量形成过程, 使大豆产量降低<sup>[10-12]</sup>。前人关于连作障碍的研究在单作模式上研究较多, 对于套作模式的研究鲜见报道。

玉米-大豆带状复合种植作为农业部主推技术, 经过近 10 年来的研究, 技术日趋成熟, 在我国南方及黄淮海地区进行了广泛应用, 对当地农民增收和农业增产做出重要贡献<sup>[13]</sup>。前期研究表明, 玉米-大豆带状复合种植不仅增产效果显著<sup>[14]</sup>, 还提高了系统的养分利用效率<sup>[15-16]</sup>, 降低农田氮肥损失<sup>[17]</sup>, 改善农田生态系统服务功能<sup>[18]</sup>。然而, 前人主要集中

在连作种植的相关研究上, 鲜见针对大豆连作障碍而开展的微区轮作效应及其系统的种间竞争研究, 未能充分发挥该模式的增产潜力及生态环保效应。因此, 本研究通过 2 a 定位试验, 系统研究了带状轮作种植与传统等行距及单作种植下玉米、大豆产量和养分吸收的变化特性, 以及套作系统下作物的种间资源竞争关系, 为进一步完善间套作的竞争补偿原理提供理论基础, 为玉米-大豆带状复合种植技术优化提供实践依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验时间、地点及材料

试验于 2012 年 3 月—2013 年 10 月在四川省现代粮食产业(仁寿)示范基地(30°07'N, 104°18'E)进行。试验地土壤类型为紫色土, 2012 年基础土壤肥力: pH 为 6.8, 有机质为 17.26 g·kg<sup>-1</sup>, 全氮为 0.90 g·kg<sup>-1</sup>, 全磷为 0.50 g·kg<sup>-1</sup>, 全钾为 14.28 g·kg<sup>-1</sup>, 碱解氮为 77.35 mg·kg<sup>-1</sup>, 速效磷为 22.83 mg·kg<sup>-1</sup>, 速效钾为 196.63 mg·kg<sup>-1</sup>。供试玉米品种为‘登海 605’, 由山东登海种业股份有限公司提供; 大豆品种为‘南豆 12’, 由四川省南充市农业科学研究院大豆研究所提供。

### 1.2 试验设计

单因素随机区组设计, 设玉米-大豆 3 种套种方式, 即玉豆套作带状连作(A1)、玉豆套作带状轮作(A2)、玉豆套作等行距种植(A3), 以玉米单作(A4)、大豆单作(A5)为对照, 共 5 个处理, 3 次重复。小区面积 36 m<sup>2</sup>。单作、套作模式下玉米与大豆的种植密度一致, 玉米密度 5.85 万株·hm<sup>-2</sup>, 大豆密度 11.7 万

株·hm<sup>-2</sup>。玉米单作和单作采用等行距种植, 玉米行距 100 cm、大豆行距 50 cm, 玉米穴距 17 cm, 大豆穴距 34 cm, 玉米穴留 1 株, 大豆穴留 2 株。玉米-大豆套作体系下, 连续种 3 带, 带长 6 m、带宽 2 m, A1、A2 采用玉米、大豆 2 : 2 宽窄行带状种植, 玉米宽行 160 cm, 窄行 40 cm, 玉米宽行内种 2 行大豆, 大豆行距 40 cm, 玉米与大豆间距 60 cm, 玉米、大豆穴距 17 cm, 玉米穴留 1 株, 大豆穴留 2 株; A3 采用玉米、大豆 1 : 1 等行距种植, 玉米、大豆行距 100 cm, 玉米与大豆间距 50 cm, 玉米、大豆穴距 17 cm, 玉米穴留 1 株, 大豆穴留 2 株, 各处理田间

种植方式如图 1。2012 年, A1 和 A2 处理种植方式一致, 2013 年, A2 处理分带轮作, 即玉米种植在上一年大豆带, 大豆种植在上一年玉米带, A3、A4、A5 处理种植方式同上一年。单作、套作模式下, 玉米、大豆独立施肥, 采用株间穴施, 玉米底肥施 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>, 大喇叭口期追肥施 N 108 kg·hm<sup>-2</sup>; 大豆底肥施 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>。2012 年, 玉米 4 月 1 日播种, 7 月 29 日收获; 大豆 6 月 10 日播种, 10 月 31 日收获。2013 年, 玉米 4 月 3 日播种, 8 月 1 日收获; 大豆 6 月 11 日播种, 10 月 29 日收获。

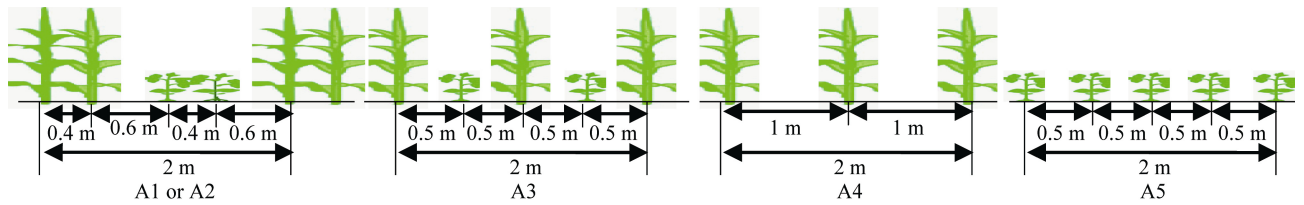


图 1 不同种植方式示意图

Fig. 1 Diagrammatic sketch of different planting patterns

A1: 玉米-大豆套作带状连作; A2: 玉米-大豆套作带状轮作; A3: 玉米-大豆套作等行距种植; A4: 玉米单作; A5: 大豆单作。下同。A1: maize-soybean relay intercropping in strip continuation with wide-narrow row; A2: maize-soybean relay intercropping in strip rotation with wide-narrow row; A3: maize-soybean relay intercropping in strip continuation with equal row; A4: maize monoculture; A5: soybean monoculture. The same below.

### 1.3 测定项目与计算方法

#### 1.3.1 植株样的采集与测定

于成熟期采集各作物的植株样品。套作与单作处理的玉米、大豆植株取样方法相同, 每小区随机选取长势一致样段两段, 每段取对称 2 行的连续 2 穴, 单作和套作处理的玉米 8 株、大豆 16 株。将植株样品按地上部秸秆、籽粒和地下根系分开, 105 °C 下杀青 30 min 后继续在 75 °C 烘至恒量, 测定干物质重; 样品粉碎后过 60 目筛, 测定全氮、全磷、全钾含量, 全氮采用凯氏定氮法, 全磷采用钼锑比色法, 全钾采用火焰光度法。

#### 1.3.2 相关计算

土地当量比率(LER)是衡量土地利用效率的指标, 其值的大小表示土地资源利用效率的高低<sup>[7,19]</sup>。

$$LER_m = Y_{im} / Y_{sm} \quad (1)$$

$$LER_s = Y_{is} / Y_{ss} \quad (2)$$

$$LER_{ms} = LER_m + LER_s \quad (3)$$

式中: LER<sub>m</sub>、LER<sub>s</sub>和LER<sub>ms</sub>分别表示套作玉米、套作大豆和玉米系统的土地当量比率; Y<sub>im</sub>、Y<sub>is</sub>为玉米、大豆在套作时的籽粒产量(或吸N量、吸P量、吸K量); Y<sub>sm</sub>、Y<sub>ss</sub>为玉米、大豆在单作时的籽粒产量(或吸N量、吸P量、吸K量)。当LER<sub>ms</sub>>1, 表示套作系统有产量优势和养分资源利用优势; LER<sub>ms</sub><1, 则无产量优势和养分资源利用优势。根据籽粒产量、吸N量、吸P

量、吸K量计算的LER值分别用Y-LER、N-LER、P-LER、K-LER表示。

种间相对竞争能力<sup>[7,19]</sup>计算公式为:

$$A_{ms} = (Y_{im} / Y_{sm}) - (Y_{is} / Y_{ss}) \quad (4)$$

式中: A<sub>ms</sub>为玉米相对于大豆的竞争能力。A<sub>ms</sub>>0, 表明玉米竞争能力强于大豆; A<sub>ms</sub><0, 表明玉米竞争能力弱于大豆。根据籽粒产量、吸N量、吸P量、吸K量计算的A<sub>ms</sub>值分别用Y-A<sub>ms</sub>、N-A<sub>ms</sub>、P-A<sub>ms</sub>、K-A<sub>ms</sub>表示。

营养竞争比率<sup>[7,19]</sup>计算公式为:

$$CR_{ms} = (Y_{im} / Y_{sm}) / (Y_{is} / Y_{ss}) \quad (5)$$

式中: CR<sub>ms</sub>为玉米相对于大豆的营养竞争比率。CR<sub>ms</sub>>1, 表明玉米比大豆的营养竞争能力强; CR<sub>ms</sub><1, 表明玉米比大豆的营养竞争能力弱。根据籽粒产量、吸N量、吸P量、吸K量计算的CR<sub>ms</sub>值分别用Y-CR<sub>ms</sub>、N-CR<sub>ms</sub>、P-CR<sub>ms</sub>、K-CR<sub>ms</sub>表示。

$$\text{经济系数} = \text{籽粒产量} / \text{地上部植株干物质重} \quad (6)$$

$$\text{养分收获指数}(\%) = \text{籽粒中N(P或K)积累量} / \text{成熟期植株总N(P或K)积累量} \times 100\% \quad (7)$$

$$\text{玉米-大豆套作系统的总籽粒产量} = \text{套作玉米籽粒产量} + \text{套作大豆籽粒产量} \quad (8)$$

### 1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2003 进行数据整理, 采用

DPS 7.05软件对试验数据进行方差分析和LSD显著性测验。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同种植方式下玉米、大豆的生物量

由表 1 可知, 玉米-大豆套作体系下, 带状连作与带状轮作种植的大豆生物量差异不显著; 而带状轮作种植后, 玉米的生物量显著提高, 2013 年, A2 的玉米籽粒产量、植株总生物量比 A1 高 7.5%、6.0%。与单作相比, 带状连作和带状轮作种植的玉米、大

豆生物量均呈降低趋势, A2 下, 玉米的籽粒产量、植株总生物量平均降低 4.9%和 2.4%, 大豆的茎叶、植株总生物量平均降低 27.5%和 13.8%, 但大豆的籽粒产量则显著增加 25.5%; 等行距种植的玉米生物量最高, 但大豆生物量最低, A3 的大豆籽粒产量、植株总生物量比 A5 的平均低 33.7%、55.3%。进一步分析玉米-大豆套作系统可知, 带状轮作显著提高了系统的生物量, 2013 年, A2 的系统周年籽粒产量和植株总生物量比 A1 高 6.9%、6.8%, 比 A3 高 8.9%、14.4%。

表 1 种植方式对玉米、大豆生物量的影响  
Table 1 Effects of planting patterns on biomass of maize and soybean

年份 Year	种植方式 Plant pattern	玉米 Maize			大豆 Soybean			玉米-大豆 Maize-soybean		
		茎叶 Stem	籽粒 Grain	总生物量 Total biomass	茎叶 Stem	籽粒 Grain	总生物量 Total biomass	茎叶 Stem	籽粒 Grain	总生物量 Total biomass
2012	A1	6 262±512b	6 375±104b	12 637±408b	2 159±227b	1 871±75a	4 030±286a	8 421±578a	8 246±161a	16 668±468a
	A2	6 535±213b	6 464±311ab	12 999±364b	2 118±158b	1 759±116a	3 878±258a	8 654±125a	8 223±331a	16 877±396a
	A3	7 194±198a	7 126±596a	14 321±627a	1 163±112c	1 011±65c	2 174±176b	8 358±227a	8 137±660a	16 495±800a
	A4	6 509±269b	7 039±298ab	13 549±531ab	—	—	—	—	—	—
	A5	—	—	—	2 730±245a	1 413±202b	4 143±85a	—	—	—
2013	A1	6 301±187c	7 713±150b	14 015±175c	3 930±411b	2 054±145a	5 984±556b	10 232±428a	9 768±163b	19 999±508b
	A2	6 564±107b	8 295±194a	14 860±187b	4 347±593b	2 143±208a	6 491±776b	10 912±700a	10 439±226a	21 351±740a
	A3	6 925±284a	8 532±130a	15 457±157a	2 158±130c	1 051±84c	3 210±214c	9 083±209b	9 583±181b	18 667±552c
	A4	6 512±109bc	8 475±184a	14 987±293ab	—	—	—	—	—	—
	A5	—	—	—	6 193±584a	1 697±129b	7 891±483a	—	—	—

同列不同字母表示在 0.05 水平上差异显著。下同。Values followed by different letters with a column are significantly different at 0.05 probability level. The same below.

### 2.2 不同种植方式下玉米、大豆的经济系数

与单作相比, 玉米-大豆套作体系下的玉米经济系数无显著差异, 但大豆的经济系数显著增加(表 2), 其中, A1、A2 下大豆的经济系数比 A5 平均高 45.2%、40.9%, 说明玉米-大豆带状套作能够通过提高大豆的物质转移能力来提高大豆产量。玉米-大豆套作系统下, 虽然 A3 的经济系数比 A1 和 A2 高, 但带状连作、带状轮作与等行距种植对玉米、大豆单季作物的经济系数无显著影响。

### 2.3 不同种植方式下玉米、大豆的养分吸收量

与单作相比, 带状连作和带状轮作的玉米植株 N、P、K 吸收量无显著变化(表 3), 但显著降低了大豆茎叶 N、P、K 的吸收量和大豆植株的总吸 P 量与总吸 K 量, 提高了大豆籽粒 N、P、K 的吸收量和植株总吸 N 量, 其中, A2 处理的大豆籽粒吸 N 量、植株总吸 N 量、籽粒吸 P 量、籽粒吸 K 量比 A5 高 24.4%、9.8%、9.6%、22.4%; 等行距种植与单作相比, 玉米植株的 N、P、K 吸收量呈增加趋势, 但大

表 2 种植方式对玉米、大豆经济系数的影响  
Table 2 Effects of planting patterns on economic coefficients of maize and soybean

种植模式 Plant pattern	2012 年 Year 2012			2013 年 Year 2013		
	玉米 Maize	大豆 Soybean	玉米-大豆 Maize-soybean	玉米 Maize	大豆 Soybean	玉米-大豆 Maize-soybean
A1	0.505a	0.465a	0.495a	0.550a	0.344a	0.488b
A2	0.498a	0.454a	0.487a	0.558a	0.331a	0.489b
A3	0.497a	0.466a	0.493a	0.552a	0.327a	0.514a
A4	0.520a	—	—	0.565a	—	—
A5	—	0.341b	—	—	0.216b	—

豆则显著降低, A3 的大豆籽粒吸 N 量、植株总吸 N 量、籽粒吸 P 量、植株总吸 P 量、籽粒吸 K 量、植株总吸 K 量比 A5 平均低 35.7%、43.1%、38.2%、48.8%、31.2%、54.0%。玉米-大豆套作体系下, 带状连作和带状轮作对大豆植株的 N、P、K 吸收量无显著影响, 但带状轮作后, 玉米植株的 N、P、K 吸收量显著提高, 2013 年, A2 处理的玉米籽粒吸 N 量、植株总吸 N 量、籽粒吸

P 量、总吸 P 量、籽粒吸 K 量、总吸 K 量比 A1 高 20.4%、18.5%、8.5%、9.1%、10.0%、14.1%。带状轮作提高了玉米-大豆套作系统的植株 N、P、K 吸收量, 2013 年, A2 处理的籽粒吸 N 量、植株总吸 N 量、籽粒吸 P 量、植株总吸 P 量、籽粒吸 K 量、植株总吸 K 量比 A1 高 11.2%、11.6%、4.5%、5.9%、6.9%、10.9%, 比 A3 高 46.9%、39.3%、14.5%、14.6%、37.2%、28.4%。

表 3 种植方式对玉米、大豆吸 N 量、吸 P 量及吸 K 量的影响  
Table 3 Effects of planting patterns on N, P and K uptake of maize and soybean

养分 Nutrient	年份 Year	种植模式 Plant pattern	玉米 Maize			大豆 Soybean			玉米-大豆 Maize-soybean			
			茎叶 Stem	籽粒 Grain	总吸收量 Total uptake	茎叶 Stem	籽粒 Grain	总吸收量 Total uptake	茎叶 Stem	籽粒 Grain	总吸收量 Total uptake	
			kg·hm <sup>-2</sup>									
氮 N	2012	A1	52.6±4.3b	71.8±2.0a	124.5±2.6a	18.5±2.4b	127.3±6.2a	145.8±7.4a	71.1±5.4a	199.1±8.1a	270.3±7.1a	
		A2	55.3±1.3ab	72.9±5.5a	128.1±6.1a	20.0±2.3ab	120.2±6.8a	140.3±8.8a	75.3±3.6a	193.1±5.4a	268.4±8.9a	
		A3	61.7±1.4a	76.1±9.1a	137.7±7.7a	9.6±0.8c	66.4±6.0c	76.1±6.6c	71.3±0.8a	142.5±15.1b	213.8±14.3b	
		A4	48.0±5.4b	78.2±3.4a	126.3±8.6a	—	—	—	—	—	—	
		A5	—	—	—	24.3±2.2a	98.1±11.4b	122.4±9.2b	—	—	—	
	2013	A1	49.0±13.8a	104.7±6.7b	153.7±17.4b	37.2±3.9b	158.0±11.2a	195.2±11.6a	86.3±17.5a	262.7±4.7a	348.9±15.2a	
		A2	56.0±2.3a	126.1±7.7a	182.1±7.4a	41.3±3.8b	166.2±18.2a	207.4±17.4a	97.3±5.7a	292.2±24.3a	389.5±22.7a	
		A3	58.3±1.7a	117.3±7.8ab	175.6±8.8ab	22.4±1.3c	81.6±9.4c	104.1±10.7b	80.8±2.6a	198.9±17.2b	279.7±19.5b	
		A4	52.1±3.4a	116.2±2.5ab	168.3±5.6ab	—	—	—	—	—	—	
		A5	—	—	—	61.9±5.8a	132.2±10.1b	194.2±6.2a	—	—	—	
	磷 P	2012	A1	3.6±1.2a	13.4±0.2a	17.0±1.2a	4.7±0.5b	13.3±0.6a	18.1±1.0a	8.3±0.9a	26.7±0.7a	35.0±0.3a
			A2	3.3±0.5a	12.3±0.6a	15.6±1.1a	5.2±0.3ab	12.3±1.1a	17.5±1.4a	8.6±0.8a	24.6±1.3a	33.2±2.1a
			A3	4.3±0.9a	12.6±0.9a	16.8±0.7a	2.7±0.2c	7.5±0.4c	10.2±0.5b	7.0±0.7a	20.1±0.9b	27.1±0.5b
			A4	3.7±0.7a	12.6±0.7a	16.3±1.3a	—	—	—	—	—	—
			A5	—	—	—	6.5±1.4a	10.2±0.9b	16.7±0.45a	—	—	—
2013		A1	7.2±0.8a	24.6±2.0a	31.8±1.5b	5.3±0.7b	15.5±0.4a	20.7±0.9b	12.5±1.4a	40.1±1.9a	52.6±0.8a	
		A2	7.9±0.3a	26.7±3.9a	34.7±3.8ab	5.9±0.6b	15.2±1.8a	21.1±2.4b	13.8±0.4a	41.9±5.6a	55.7±6.0a	
		A3	8.2±0.2a	28.7±1.8a	36.9±2.0a	3.7±0.4c	8.0±0.7b	11.7±1.2c	12.0±0.6a	36.6±2.4a	48.6±2.9a	
		A4	8.5±2.3a	27.9±0.6a	36.4±2.1a	—	—	—	—	—	—	
		A5	—	—	—	11.2±1.1a	14.9±0.4a	26.1±0.9a	—	—	—	
钾 K	2012	A1	143.6±3.1a	26.8±0.7a	170.4±2.5a	127.3±14.2a	63.3±3.3a	190.6±16.7a	270.9±13.8a	90.1±4.0a	361.0±16.3a	
		A2	148.2±16.9a	27.9±3.5a	176.2±16.5a	126.0±9.4a	61.2±5.2a	187.2±14.2a	274.2±13.7a	89.2±7.9a	363.4±14.7a	
		A3	163.3±9.3a	31.9±5.1a	195.2±4.2a	65.7±6.4b	36.8±3.9c	102.5±9.6b	229.0±5.3b	68.7±7.0b	297.7±7.4b	
		A4	152.8±26.0a	32.4±1.4a	185.1±27.2a	—	—	—	—	—	—	
		A5	—	—	—	149.3±13.5a	50.1±5.2b	199.4±9.4a	—	—	—	
	2013	A1	104.1±31.7a	30.9±3.2a	135.0±28.6a	87.2±9.2b	38.4±5.5ab	125.6±14.1b	191.4±32.2ab	69.3±4.5a	260.6±32.9ab	
		A2	120.1±14.1a	34.0±2.7a	154.1±16.3a	94.8±9.1b	40.0±4.9a	134.9±13.6b	214.9±10.2a	74.1±6.5a	289.0±15.6a	
		A3	124.3±2.6a	33.9±3.8a	158.2±3.8a	46.8±5.8c	20.1±2.6c	66.9±8.1c	171.1±8.4b	54.0±5.0b	225.1±10.5b	
		A4	121.1±8.1a	36.4±6.0a	157.5±13.4a	—	—	—	—	—	—	
		A5	—	—	—	136.3±12.9a	32.6±1.5b	168.8±11.6a	—	—	—	

#### 2.4 不同种植方式下玉米、大豆的养分收获指数

由表 4 可知, 与单作相比, 套作玉米植株的 N、P、K 收获指数差异不显著, 但套作大豆的则显著增加, 其中, A1、A2 大豆植株的 N 收获指数比 A5 的平均高 13.6%和 11.9%, P 收获指数比 A5 的高 25.7%

和 20.6%, K 收获指数比 A5 的高 43.0%和 39.9%。玉米-大豆套作体系下, 玉米、大豆植株的 N、P、K 收获指数在 A1、A2、A3 处理间无显著差异。从玉米-大豆套作系统来看, 带状连作与带状轮作相对等行距种植的植株 N、P、K 收获指数呈增加趋势, 其

表 4 种植方式对玉米、大豆养分收获指数的影响  
Table 4 Effects of planting patterns on nutrient harvest indexes of maize and soybean

养分 Nutrient	种植模式 Plant pattern	2012 年 Year 2012			2013 年 Year 2013		
		玉米 Maize	大豆 Soybean	玉米-大豆 Maize-soybean	玉米 Maize	大豆 Soybean	玉米-大豆 Maize-soybean
N	A1	57.8ab	87.3a	73.7a	68.4a	80.9a	75.4a
	A2	56.8ab	85.7a	71.9a	69.2a	80.0a	75.0a
	A3	55.1b	87.3a	66.5b	66.8a	78.4a	71.1a
	A4	62.0a	—	—	69.1a	—	—
	A5	—	80.0b	—	—	68.1b	—
P	A1	79.0a	73.8a	76.2a	77.2a	74.6a	76.2a
	A2	78.6a	70.3a	74.3a	76.9a	72.1a	75.1a
	A3	74.7a	73.8a	74.3a	77.7a	68.1b	75.4a
	A4	77.4a	—	—	76.8a	—	—
	A5	—	61.1b	—	—	57.0c	—
K	A1	15.7a	33.3a	25.0a	23.9a	30.5a	26.8a
	A2	16.0a	32.7a	24.5a	22.1a	29.7a	25.6a
	A3	16.4a	35.9a	23.1a	21.4a	30.0a	24.0a
	A4	17.7a	—	—	23.0a	—	—
	A5	—	25.2b	—	—	19.4b	—

中, A1、A2 的系统 N 收获指数比 A3 的高 8.4%和 6.8%。

## 2.5 不同种植方式下玉米-大豆套作系统的土地当量比率(LER)

由表 5 可知, 玉米-大豆套作系统具有显著的生产优势和资源利用优势( $LER_{ms}>1$ ), 不同种植方式间表现为带状连作和带状轮作间的  $LER_{ms}$  差异不显著,

但显著高于等行距种植, 说明玉米-大豆带状套作相对等行距种植有利于系统的产量提高和 N、P、K 等养分资源的充分利用。此外, 带状轮作与带状连作相比, 显著提高了玉米的  $LER_m$ , 但大豆的  $LER_s$  则无显著差异, 2013 年, A2 处理的 Y- $LER_m$ 、N- $LER_m$ 、P- $LER_m$  和 K- $LER_m$  比 A1 分别高 7.5%、20.7%、8.8%和 12.3%。

表 5 种植方式对玉米-大豆套作系统土地当量比率(LER)的影响  
Table 5 Effects of planting patterns on land equivalent ratios (LER) of maize and soybean relay intercropping systems

LER 类型 Type of LER	种植模式 Plant pattern	2012 年 Year 2012			2013 年 Year 2013		
		$LER_m$	$LER_s$	$LER_{ms}$	$LER_m$	$LER_s$	$LER_{ms}$
Y-LER	A1	0.907a	1.336a	2.242a	0.911b	1.216a	2.127a
	A2	0.919a	1.263a	2.182a	0.979a	1.270a	2.249a
	A3	1.013a	0.729b	1.741b	1.007a	0.624b	1.631b
N-LER	A1	0.919a	1.303a	2.223a	0.900b	1.201a	2.101a
	A2	0.933a	1.237a	2.170a	1.086a	1.261a	2.347a
	A3	0.974a	0.687b	1.661b	1.009ab	0.623b	1.632b
P-LER	A1	1.065a	1.312a	2.376a	0.880a	1.039a	1.919ab
	A2	0.977a	1.221a	2.198a	0.957a	1.024a	1.981a
	A3	1.002a	0.746b	1.748b	1.025a	0.537b	1.562b
K-LER	A1	0.829a	1.268a	2.097a	0.854a	1.180a	2.034a
	A2	0.867a	1.231a	2.098a	0.959a	1.233a	2.192a
	A3	0.984a	0.743b	1.727b	0.938a	0.620b	1.558b

Y-LER、N-LER、P-LER和K-LER分别表示根据籽粒产量、吸N量、吸P量和吸K量计算的土地当量比率;  $LER_m$ 、 $LER_s$ 和 $LER_{ms}$ 分别表示套作玉米、套作大豆和玉豆系统的土地当量比率。Y-LER, N-LER, P-LER and K-LER are land equivalent ratios calculated with grain yield, N uptake, P uptake and K uptake respectively;  $LER_m$ ,  $LER_s$  and  $LER_{ms}$  are land equivalent ratios of maize intercropping, soybean intercropping and maize-soybean relay strip intercropping, respectively.

## 2.6 不同种植方式下玉米-大豆套作系统的种间竞争作用

种植方式对玉米-大豆套作体系下玉米与大豆之间的竞争能力有显著影响, 带状种植方式下, 玉米的竞争能力弱于大豆( $A_{ms} < 0$ ,  $CR_{ms} < 1$ ), 而等行距种植方式下, 玉米的竞争能力强于大豆( $A_{ms} > 0$ ,  $CR_{ms} > 1$ )(表 6)。年度间, 玉米与大豆的竞争能力也有较大差异, 等行距种植方式下, 2013 年玉米对大豆的种间竞争能力与营养竞争比率比 2012 年呈现较大

幅度提高, 致使大豆对 N、P、K 的吸收量显著下降(表 3), 最终导致 A3 的大豆生物量和产量相对 A1、A2 显著降低(表 1); 但带状种植方式下, 2013 年玉米对大豆的种间竞争能力和营养竞争比率相对 2012 年提高, 促进了玉米对 N、P、K 的吸收(表 3), 使玉米生物量和产量显著提高(表 1)。此外, 带状轮作相对于带状连作更有利于作物间和谐共生, 2013 年, 带状轮作种植后, 玉米对大豆的种间竞争能力( $A_{ms}$ )更接近 0, 营养竞争比率( $CR_{ms}$ )更接近 1。

表 6 种植方式对玉米-大豆套作系统种间竞争能力( $A_{ms}$ )和营养竞争比率( $CR_{ms}$ )的影响

Table 6 Effects of planting patterns on interspecific competition ( $A_{ms}$ ) and nutrient competition ratio ( $CR_{ms}$ ) of maize and soybean intercropping system

计算类型 Type of calculation	种植模式 Plant pattern	2012 年 Year 2012		2013 年 Year 2013	
		$A_{ms}$	$CR_{ms}$	$A_{ms}$	$CR_{ms}$
Y- $A_{ms}$ (Y- $CR_{ms}$ )	A1	-0.429b	0.684b	-0.306b	0.757b
	A2	-0.344b	0.747b	-0.291b	0.781b
	A3	0.284a	1.414a	0.383a	1.639a
N- $A_{ms}$ (N- $CR_{ms}$ )	A1	-0.384b	0.708b	-0.301b	0.759b
	A2	-0.304b	0.769b	-0.176b	0.865b
	A3	0.287a	1.431a	0.387a	1.646a
P- $A_{ms}$ (P- $CR_{ms}$ )	A1	-0.247b	0.813b	-0.159b	0.848b
	A2	-0.244b	0.814b	-0.067b	0.934b
	A3	0.256a	1.349a	0.488a	1.917a
K- $A_{ms}$ (K- $CR_{ms}$ )	A1	-0.438b	0.657b	-0.325b	0.729b
	A2	-0.365b	0.718b	-0.275b	0.786b
	A3	0.241a	1.355a	0.319a	1.566a

$A_{ms}$  为玉米相对于大豆的竞争能力;  $CR_{ms}$  为玉米相对于大豆的营养竞争比率; Y- $A_{ms}$ (Y- $CR_{ms}$ )、N- $A_{ms}$ (N- $CR_{ms}$ )、P- $A_{ms}$ (P- $CR_{ms}$ )和 K- $A_{ms}$ (K- $CR_{ms}$ )分别表示根据籽粒产量、吸 N 量、吸 P 量和吸 K 量计算的  $A_{ms}$ ( $CR_{ms}$ )值。 $A_{ms}$  is interspecific competition of maize to soybean;  $CR_{ms}$  is nutrient competition ratio of maize to soybean; Y- $A_{ms}$ (Y- $CR_{ms}$ ), N- $A_{ms}$ (N- $CR_{ms}$ ), P- $A_{ms}$ (P- $CR_{ms}$ ) and K- $A_{ms}$ (K- $CR_{ms}$ ) are interspecific competitions (nutrient competition) calculated by grain yield, N uptake, P uptake and K uptake, respectively.

## 3 讨论

### 3.1 种植方式对玉米-大豆套作体系作物产量的影响

间套种植是在土地面积不变的条件下同时种植 2 种或 2 种以上的作物, 合理的间套种植能够实现作物增产, 其中, 禾本科作物与豆科作物的间套种植具有显著的间套优势。Ngwira 等<sup>[4]</sup>研究认为, 玉米-木豆间作能够促进作物增产, 并具有显著的经济效益; Mao 等<sup>[20]</sup>研究表明, 玉米-豌豆套作相对于单作具有显著的产量优势, 提高了土地当量比。本研究中, 玉米-大豆套作体系下, 与单作相比, 带状种植方式的玉米产量略有降低, 而大豆产量显著提高, 玉米系统的总产量显著提高, 与前人研究一致<sup>[15]</sup>; 等行距种植方式的玉米产量虽有提高, 但大豆产量显著下降, 不利于玉米-大豆套作系统总产量的提高。本研究还发现, 2012 年未进行分带轮作时, 玉米的产量在 A1 与 A2 处理间差异不显著, 2013 年 A2

处理分带轮作后, 玉米的产量显著提高。其原因可能是, 一方面, 大豆通过 N 素转移作用使玉米 N 素吸收能力显著增加, 进而促进了玉米产量的提高, 同时刺激自身根瘤固氮, 以满足自身对 N 营养的需求<sup>[21-22]</sup>; 另外, 大豆的根系分泌物能够活化土壤中难溶性 P, 促进玉米对 P 素的吸收<sup>[23]</sup>。另一方面, 王小春等<sup>[24-25]</sup>对小麦-玉米-大豆套作的作物产量和土壤养分残留研究指出, 轮作种植后的玉米利用了大豆残留在土壤中的养分, 促进了 N、K 的吸收, 最终促进了玉米产量的提高。说明玉米-大豆套作进行分带轮作后, 间套效应和轮作效应同时存在, 二者共同作用使作物增产。

### 3.2 种植方式对玉米-大豆套作体系养分吸收与种间竞争的影响

禾本科作物与豆科作物间作套种能够促进作物对土壤养分的吸收利用, 与单作相比, 具有明显的养分利用优势。Xiao 等<sup>[26]</sup>研究表明, 小麦与蚕豆间

作可使籽粒吸 N 量增加 79%; 褚贵新等<sup>[27]</sup>研究表明, 水稻与花生间作能使水稻 N 素吸收量增加 32.81%; Betencourt 等<sup>[28]</sup>和 Mei 等<sup>[29]</sup>研究发现小麦与鹰嘴豆 (*Cicer arietinum* Linn.) 或蚕豆间作能显著促进 P 在根系周围积累, 提高了作物对 P 的吸收量。前期研究发现小麦-玉米-大豆套作体系中, 玉米占据优势生态位, 处于竞争优势地位, 大豆则处于竞争弱势, 套作体系提高了玉米的养分吸收量, 但大豆的养分吸收量则显著降低, 不利于玉米-大豆套作系统的养分高效利用<sup>[21]</sup>。本研究中, 玉米-大豆套作体系下, 等行距种植时 (A3), 玉米的种间竞争力 ( $Y-A_{ms}$ 、 $N-Y_{ms}$ 、 $P-Y_{ms}$ 、 $K-Y_{ms}$  均  $>0$ ) 和营养竞争比率 ( $Y-CR_{ms}$ 、 $N-CR_{ms}$ 、 $P-CR_{ms}$ 、 $K-CR_{ms}$  均  $>1$ ) 强于大豆, 导致大豆植株对 N、P、K 的吸收量显著降低, 使 A3 系统 N、P、K 的资源利用能力 ( $N-LER_s$ 、 $P-LER_s$ 、 $K-LER_s$ 、 $N-LER_{ms}$ 、 $P-LER_{ms}$ 、 $K-LER_{ms}$ ) 显著低于带状种植的 A1、A2 处理, 最终导致其系统产量和土地当量比 ( $Y-LER_{ms}$ ) 相对带状种植显著下降。带状种植方式下 (A1、A2), 玉米的种间竞争力 ( $Y-A_{ms}$ 、 $N-Y_{ms}$ 、 $P-Y_{ms}$ 、 $K-Y_{ms}$  均  $<0$ ) 和营养竞争比率 ( $Y-CR_{ms}$ 、 $N-CR_{ms}$ 、 $P-CR_{ms}$ 、 $K-CR_{ms}$  均  $<1$ ) 均弱于大豆, 但带状轮作下玉米对大豆的种间竞争力和营养竞争比率相对带状连作下的呈增加趋势, 使玉米对 N、P、K 的吸收增强, N、P、K 资源利用能力 ( $N-LER_m$ 、 $P-LER_m$ 、 $K-LER_m$ ) 显著提高, 最终促使带状轮作下的玉米产量和土地当量比 ( $Y-LER_m$ 、 $Y-LER_{ms}$ ) 提高。由此说明, 玉豆套种带状轮作通过弱化种间竞争作用, 能有效促进玉米-大豆套作体系中玉米、大豆对 N、P、K 养分的吸收利用, 最终促进了系统生物量和产量提高。但套作体系内, 不同的种植方式除对作物养分吸收与竞争产生显著影响外, 也对土壤养分含量、酶活性、微生物数量等均有显著的影响, 如, 小麦-油菜 (*Helianthus annuus* Linn.) 轮作有利于提高土壤磷酸酶、脲酶、 $\beta$ -葡萄糖苷酶、多酚氧化酶、纤维素酶的活性<sup>[30]</sup>; 与连作相比, 黄瓜 (*Cucumis sativus* Linn.) 通过轮作有利于改善土壤微生物结构, 增加细菌和放线菌数量, 减少真菌数量<sup>[31]</sup>。有关玉米-大豆套种带状轮作种植体系下的土壤养分含量、酶活性以及微生物多样性对作物养分吸收的影响还有待进一步研究。

#### 4 结论

与单作和玉米-大豆套作等行距种植相比, 玉米-大豆套作带状种植下玉米产量降低, 但大豆产量显著提高。与玉米-大豆带状连作相比, 玉米-大

豆带状轮作显著提高了玉米产量和 N、P、K 吸收量, 但大豆产量和 N、P、K 吸收量无显著变化。玉米-大豆套作体系下, 采用带状轮作种植, 玉米与大豆的种间竞争力和营养竞争比率最协调, 种间竞争作用得到缓解, 促进了玉米和大豆对养分的吸收, 提高了作物产量和土地当量比。

#### 参考文献

- [1] Haugaard-Nielsen H, Ambus P, Jensen E S. Interspecific competition, N use and interference with weeds in pea-barley intercropping[J]. *Field Crops Research*, 2001, 70: 101-109
- [2] Li L, Sun J H, Zhang F S, et al. Wheat/maize or wheat / soybean strip intercropping : yield advantage and interspecific interactions on nutrients[J]. *Field Crops Research*, 2001, 71: 123-137
- [3] Subedi K D. Wheat intercropped with toro (*Brassica campestris* var. toria) and pea (*Pisum sativum*) in the subsistence farming system of the Nepalese hills[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 1997, 128: 283-289
- [4] Ngwira A R, Aune J B, Mkwinda S. On-farm evaluation of yield and economic benefit of short term maize legume intercropping systems under conservation agriculture in Malawi[J]. *Field Crops Research*, 2012, 132: 149-157
- [5] Zhang G G, Yang Z B, Dong S T. Interspecific competitiveness affects the total biomass yield in an alfalfa and corn intercropping system[J]. *Field Crops Research*, 2011, 124: 66-73
- [6] Shen Q R, Zhu G X. Bi-directional nitrogen transfer in an intercropping system of peanut with rice cultivated in aerobic soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2004, 40: 81-87
- [7] Yang W T, Li Z X, Wang J W, et al. Crop yield, nitrogen acquisition and sugarcane quality as affected by interspecific competition and nitrogen application[J]. *Field Crops Research*, 2013, 146: 44-50
- [8] 邢会琴, 肖占文, 闫吉智, 等. 玉米连作对土壤微生物和土壤主要养分的影响[J]. *草业科学*, 2011, 28(10): 1777-1780
- [9] Xing H Q, Xiao Z W, Yan J Z, et al. Effects of continuous cropping of maize on soil microbes and main soil nutrients[J]. *Pratacultural Science*, 2011, 28(10): 1777-1780
- [10] 贺丽娜, 梁银丽, 高静, 等. 连作对设施黄瓜产量和品质及土壤酶活性的影响[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2008, 36(5): 155-159
- [11] He L N, Liang Y L, Gao J, et al. The effect of continuous cropping on yield, quality of cucumber and soil enzymes activities in solar greenhouse[J]. *Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition*, 2008, 36(5): 155-159
- [12] 许艳丽, 刘晓冰, 韩晓增, 等. 大豆连作对生长发育动态及产量的影响[J]. *中国农业科学*, 1999, 32(增刊): 64-68
- [13] Xu Y L, Liu X B, Han X Z, et al. Effect of continuous-cropping on yield and growth-development of soybean[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1999, 32(S): 64-68
- [14] 阮维斌, 王敬国, 张福锁. 连作障碍因素对大豆养分吸收和固氮作用的影响[J]. *生态学报*, 2003, 23(1): 22-28
- [15] Ruan W B, Wang J G, Zhang F S. The effect of continuous cropping factors on soybean seedling growth and nitrogen fixation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(1): 22-28



- [12] 李春格, 李晓鸣, 王敬国. 大豆连作对土体和根际微生物群落功能的影响[J]. 生态学报, 2006, 26(4): 1144-1150  
Li C G, Li X M, Wang J G. Effect of soybean continuous cropping on bulk and rhizosphere soil microbial community function[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(4): 1144-1150
- [13] 杨文钰, 雍太文, 任万军, 等. 发展套作大豆, 振兴大豆产业[J]. 大豆科学, 2008, 27: 1-7  
Yang W Y, Yong T W, Ren W J, et al. Develop relay-planting soybean, revitalize soybean industry[J]. Soybean Science, 2008, 27: 1-7
- [14] 刘小明, 雍太文, 苏本营, 等. 减量施氮对玉米-大豆套作系统中作物产量的影响[J]. 作物学报, 2014, 40(9): 1629-1638  
Liu X M, Yong T W, Su B Y, et al. Effect of reduced N amount application on crop yield in maize-soybean intercropping system[J]. Acta Agronomica Sinica, 2014, 40(9): 1629-1638
- [15] 雍太文, 刘小明, 刘文钰, 等. 减量施氮对玉米-大豆套作体系中作物产量及养分吸收利用的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(2): 474-482  
Yong T W, Liu X M, Liu W Y, et al. Effects of reduced N application rate on yield and nutrient uptake and utilization in maize-soybean relay strip intercropping system[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(2): 474-482
- [16] Xiang D B, Yong T W, Yang W Y, et al. Effect of phosphorus and potassium nutrition on growth and yield of soybean in relay strip intercropping system[J]. Scientific Research and Essays, 2012, 7(3): 342-351
- [17] 刘小明, 雍太文, 刘文钰, 等. 减量施氮对玉米-大豆套作体系土壤氮素残留和氮肥损失的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(8): 2267-2274  
Liu X M, Yong T W, Liu W Y, et al. Effect of reduced N application on soil N residue and N loss in maize-soybean relay strip intercropping system[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(8): 2267-2274
- [18] 苏本营, 陈圣宾, 李永庚, 等. 间套作种植提升农田生态系统服务功能[J]. 生态学报, 2013, 33(14): 4505-4514  
Su B Y, Chen S B, Li Y G, et al. Intercropping enhances the farmland ecosystem services[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(14): 4505-4514
- [19] Lithourgidis A S, Vlachostergios D N, Dordas C A, et al. Dry matter yield, nitrogen content, and competition in pea-cereal intercropping systems[J]. European Journal of Agronomy, 2011, 34: 287-294
- [20] Mao L L, Zhang L Z, Li W Q, et al. Yield advantage and water saving in maize/pea intercrop[J]. Field Crops Research, 2012, 138: 11-20
- [21] 雍太文, 杨文钰, 任万军, 等. 两种三熟套作体系中的氮素转移及吸收利用[J]. 中国农业科学, 2009, 42(9): 3170-3178  
Yong T W, Yang W Y, Ren W J, et al. Analysis of the nitrogen transfer, nitrogen uptake and utilization in the two relay-planting systems[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(9): 3170-3178
- [22] 雍太文, 董茜, 刘小明, 等. 不同施肥方式对玉米-大豆套作体系根瘤固氮及氮素吸收利用的影响[J]. 中国油料作物学报, 2014, 36(1): 84-91  
Yong T W, Dong Q, Liu X M, et al. Effect of N application methods on N uptake and utilization efficiency in maize-soybean relay strip intercropping system[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2014, 36(1): 84-91
- [23] 沈宏, 杨存义, 范小威. 大豆根系分泌物和根细胞壁对难溶性磷的活化[J]. 生态环境, 2004, 13: 633-635  
Shen H, Yang C Y, Fan X W, et al. Mobilization of sparingly soluble phosphates by root exudates and root cell wall of soybean seedlings[J]. Ecological Environment, 2004, 13: 633-635
- [24] 王小春, 杨文钰, 邓小燕, 等. 玉/豆和玉/薯模式下土壤氮素养分积累差异及氮肥对土壤硝态氮残留的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(3): 197-203  
Wang X C, Yang W Y, Deng X Y, et al. Soil nutrient differences and effects of nitrogen in soil under maize / soybean and maize / sweet potato relay strip intercropping systems[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(3): 197-203
- [25] 王小春, 杨文钰, 任万军, 等. 小麦/玉米/大豆和小麦/玉米/甘薯套作体系中玉米产量及养分吸收的差异[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(4): 803-812  
Wang X C, Yang W Y, Ren W J, et al. Study on yield and differences of nutrient absorptions of maize in wheat / maize / soybean and wheat / maize / sweet potato relay intercropping systems[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2012, 18(4): 803-812
- [26] Xiao Y B, Li L, Zhang F S. Effect of root contact on interspecific competition and N transfer between wheat and fababean using direct and indirect  $^{15}\text{N}$  techniques[J]. Plant Soil, 2004, 262: 45-54
- [27] 褚贵新, 沈其荣, 李奕林, 等. 用  $^{15}\text{N}$  叶片标记法研究旱作水稻/花生间作系统中氮素的双向转移[J]. 生态学报, 2004, 24(2): 278-284  
Chu G X, Shen Q R, Li Y L, et al. Researches on bi-directional N transfer between the intercropping system of groundnut with rice cultivated in aerobic soil using  $^{15}\text{N}$  foliar labeling method[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(2): 278-284
- [28] Betencourt E, Duputel M, Colomb B, et al. Intercropping promotes the ability of durum wheat and chick pea to increase rhizosphere phosphorus availability in a low P soil[J]. soil biology & biochemistry, 2012, 46: 181-190
- [29] Mei P P, Gui L G, Wang P, et al. Maize / faba bean intercropping with rhizobia inoculation enhances productivity and recovery of fertilizer P in a reclaimed desert soil[J]. Field Crops Research, 2012, 130: 19-27
- [30] 刘瑜, 褚贵新, 梁永超, 等. 不同种植方式对北疆绿洲土壤养分和生物学性状的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(3): 465-471  
Liu Y, Chu G X, Liang Y C, et al. Soil nutrient and biological characteristics in North Xinjiang Oases as influenced by cropping patterns[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(3): 465-471
- [31] 杨凤娟, 吴焕涛, 魏珉, 等. 轮作与休闲对日光温室黄瓜连作土壤微生物和酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(12): 2983-2988  
Yang F J, Wu H T, Wei M, et al. Effects of rotation and fallowing on the microbial communities and enzyme activities in a solar green house soil under continuous cucumber cropping[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(12): 2983-2988