

DOI: 10.5846/stxb201408301726

雍太文, 刘小明, 刘文钰, 周丽, 宋春, 杨峰, 蒋利, 王小春, 杨文钰. 减量施氮对玉米-大豆套作系统下作物氮素吸收和利用效率的影响. 生态学报, 2015, 35(13): 4473-4482.

Yong T W, Liu X M, Liu W Y, Zhou L, Song C, Yang F, Jiang L, Wang X, Yang W Y. Effects of reduced nitrogen application on nitrogen uptake and utilization efficiency in maize-soybean relay strip intercropping system. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(13): 4473-4482.

## 减量施氮对玉米-大豆套作系统下作物氮素吸收和利用效率的影响

雍太文<sup>1,2</sup>, 刘小明<sup>1,2</sup>, 刘文钰<sup>1,2</sup>, 周丽<sup>1,2</sup>, 宋春<sup>2,3</sup>, 杨峰<sup>1,2</sup>, 蒋利<sup>1,2</sup>, 王小春<sup>1,2</sup>, 杨文钰<sup>1,2,\*</sup>

1 四川农业大学农学院, 成都 611130

2 农业部西南作物生理生态与耕作重点实验室, 成都 611130

3 四川农业大学资源环境学院生态环境研究所, 成都 611130

**摘要:**为探索玉米-大豆套作系统中作物对 N 素吸收的差异特性, 揭示减量施 N 对玉米-大豆套作系统的 N 高效利用机理。利用<sup>15</sup>N 同位素示踪技术, 结合小区套做区多年定位试验, 研究了玉米单作(MM)、大豆单作(SS)、玉米-大豆套作(IMS)及不施 N(NN)、减量施 N(RN: 180 kg N/hm<sup>2</sup>)、常量施 N(CN: 240 kg N/hm<sup>2</sup>)下玉米、大豆的生物量、吸 N 量、N 肥利用率及土壤 N 含量变化。结果表明, 与 MM(SS)相比, IMS 下玉米茎叶及籽粒的生物量、吸 N 量降低, <sup>15</sup>N%丰度及<sup>15</sup>N 吸收量增加, 大豆籽粒及植株的生物量、吸 N 量及<sup>15</sup>N 吸收量显著提高; IMS 下玉米、大豆植株的 N 肥利用率、土壤 N 贡献率、土壤<sup>15</sup>N%丰度降低, <sup>15</sup>N 回收率显著增加。施 N 与不施 N 相比, 显著提高了单、套作下玉米、大豆植株的生物量、吸 N 量、<sup>15</sup>N 丰度及<sup>15</sup>N 吸收量; RN 与 CN 相比, IMS 下, RN 的玉米、大豆植株总吸 N 量提高 13.4%和 12.4%, N 肥利用率提高 213.0%和 117.5%, 土壤总 N 含量提高 12.2%和 11.6%, 土壤 N 贡献率降低 12.0%和 11.2%, 玉米植株<sup>15</sup>N 吸收量与<sup>15</sup>N 回收率提高 14.4%和 52.5%, 大豆的则降低 57.1%和 42.8%, 单作与套作的变化规律一致。玉米-大豆套作系统中作物对 N 素吸收存在数量及形态差异, 减量施 N 有利于玉米-大豆套作系统对 N 肥的高效吸收与利用, 实现作物持续增产与土壤培肥。

**关键词:**玉米-大豆套作; 减量施 N; N 素吸收利用; <sup>15</sup>N

## Effects of reduced nitrogen application on nitrogen uptake and utilization efficiency in maize-soybean relay strip intercropping system

YONG Taiwen<sup>1,2</sup>, LIU Xiaoming<sup>1,2</sup>, LIU Wenyu<sup>1,2</sup>, ZHOU Li<sup>1,2</sup>, SONG Chun<sup>2,3</sup>, YANG Feng<sup>1,2</sup>, JIANG Li<sup>1,2</sup>, WANG Xiaochun<sup>1,2</sup>, YANG Wenyu<sup>1,2,\*</sup>

1 College of Agronomy, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China

2 Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Cultivation in Southwest, Ministry of Agriculture, Chengdu 611130, China

3 Institute of Ecological and Environmental Sciences, College of Resources and Environment, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China

**Abstract:** To investigate the N uptake difference features between crops in the relay strip maize-soybean intercropping system, and reveal the efficient N utilization mechanism under reduced N application condition, the <sup>15</sup>N isotope tracer and plot location experiment combined with micro plot test assays were employed in the present study. Two field experiments were performed to analyze the biomass, N uptake, N use efficiency and soil N content of maize and soybean with 3 planting

**基金项目:**国家自然科学基金(31271669); 国家大豆现代产业技术体系建设专项(CARS-04-PS19); 国家公益性行业(农业)科研专项(201203096)

收稿日期: 2014-08-30; 修订日期: 2015-03-27

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: mssiyangwy@sicau.edu.cn

patterns, including maize monoculture (MM), soybean monoculture (SS) and maize-soybean relay strip intercropping (IMS), under 3 N application rates, including no N application (NN), reduced N application (RN: 180 kg N/hm<sup>2</sup>) and conventional N application (CN: 240 kg N/hm<sup>2</sup>). The results showed that the biomass and N uptake of maize stem and grain with IMS decreased, and <sup>15</sup>N% abundance and <sup>15</sup>N uptake increased, compared to monoculture system; the biomass, N uptake and <sup>15</sup>N uptake of soybean grain and plant with IMS increased significantly; and the N fertilizer utilization efficiency, soil N contribution rate, and soil <sup>15</sup>N% abundance of maize and soybean with IMS reduced. However, the <sup>15</sup>N recovery rate of maize and soybean increased. Comparing N application to no N application, the total N uptake, N fertilizer utilization efficiency and soil total N content of maize and soybean with N application increased, and the soil N contribution rate reduced, both in monoculture and relay strip intercropping systems; Furthermore, the <sup>15</sup>N% abundance, <sup>15</sup>N uptake and the recovery rate of maize aboveground plant increased significantly, but those indices of soybean decreased remarkably. Comparing reduced N application to conventional N application, the total N uptake of aboveground plant of maize and soybean with IMS raised 13.4% and 12.4%, and N fertilizer utilization efficiency raised 213.0% and 117.5%, and the soil total N content increased 12.2% and 11.6%, but the soil N contribution rate decreased 12.0% and 11.2%. In addition, the <sup>15</sup>N uptake and recovery rate of maize plant with IMS increased 14.4% and 52.5%, for soybean, correspondingly reduced 57.1% and 42.8%. <sup>15</sup>N abundance of maize soil with IMS dropped 6.3%, but that of soybean improved 9.2%. There were quantitative and morphological differences of N uptake in the maize-soybean relay strip intercropping system. It is concluded that reduced N application was not only benefit to the N fertilizer efficient absorption and utilization for relay strip intercropping crops, but also achieve sustained crop yield and soil fertility.

**Key Words:** Maize-soybean relay strip intercropping; reduced N application; N uptake and utilization; <sup>15</sup>N

我国是世界上单位化肥投入粮食产出最低的国家之一<sup>[1]</sup>,如何合理施用氮肥,建立高产稳产、优质低耗、省工无污染的氮肥管理技术,成为了关系国计民生的大事。研究表明,适当的氮素减量不仅不会引起作物产量发生显著的变化,而且还可以降低农田氮素损失<sup>[2-3]</sup>,提高氮肥利用率<sup>[4-5]</sup>,改善土壤微生物群落结构<sup>[6]</sup>,优化农田生态系统氮素循环,利于农业可持续发展。间作套种在耕地面积不增加的前提下,显著增加了播种面积、提高了资源利用率和粮食产量<sup>[7-8]</sup>,尤其是豆科+禾本科的间作优势十分明显,被广泛研究和利用<sup>[9-12]</sup>。玉米-大豆带状套作作为我国南方旱地农业的一种主要种植模式,不仅增产增收效果明显<sup>[13]</sup>,还有助于提高系统光能利用效率<sup>[14]</sup>,降低农田氮素损失<sup>[15]</sup>,改善农田生态系统服务功能<sup>[16]</sup>。在现有的间套作系统中,尤其是豆科+禾本科的间作优势很大程度是因为氮营养的促进作用<sup>[17-18]</sup>,针对种间氮素促进机制研究者们通常利用生态位理论及氮素转移理论来解释<sup>[19-20]</sup>,但有关玉米-大豆带状套作系统下作物氮素吸收的生态位差异特性鲜见报道。前期研究表明在玉米-大豆套作体系中作物对N的吸收存在竞争与补偿<sup>[21-22]</sup>,但这种N素补偿作用是否与作物对N素吸收形态差异有关尚不清楚?本文拟借助<sup>15</sup>N同位素示踪技术,研究减量施氮下玉米-大豆套作系统中作物对N素吸收的形态差异,并利用生态位原理来阐述玉米-大豆套作系统氮高效利用机理,对揭示间套复合系统种间资源竞争补偿原理提供理论参考,对完善玉米-大豆减量一体化施肥技术提供实践依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验时间、地点

试验于2012年3月—2013年10月在四川省现代粮食产业(仁寿)示范基地进行。2012年基础土壤肥力:pH值6.8,有机质17.26 g/kg,全N0.90 g/kg,全P0.50 g/kg,全K14.28 g/kg,碱解氮77.35 mg/kg,速效磷22.83 mg/kg,速效钾196.63 mg/kg。

## 1.2 试验材料

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所提供。 $^{15}\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$ 肥料( $^{15}\text{N}$ 的丰度为 10.02%)由上海化工研究院生产。

## 1.3 试验方法

### 1.3.1 小区试验设计

采用二因素裂区设计,主因素为种植方式,玉米单作(MM)、大豆单作(SS)、玉米-大豆套作(IMS);副因素为玉米、大豆施 N 总量,不施 N(NN)、减量施 N(RN:180 kg N/hm<sup>2</sup>,根据当地玉米施 N 量确定)、常量施 N(CN:240 kg N/hm<sup>2</sup>,根据当地玉米与大豆的总施 N 量确定),玉米、大豆施 N 比例为 3:1,重复 3 次。每处理连续种 3 带,带长 6m、带宽 2m,N 肥施用普通尿素。

玉米、大豆单作采用等行距种植,玉米行距 100cm、大豆行距 50cm,玉米、大豆穴距 17cm,穴留 1 株;玉米-大豆套作采用宽窄行种植,玉米宽行 160cm,窄行 40cm,玉米宽行内种 2 行大豆,大豆行距 40cm,玉米与大豆间距 60cm,穴距 17cm,玉米穴留 1 株,密度 5.85 万株/hm<sup>2</sup>,大豆穴留 2 株,密度 11.7 万株/hm<sup>2</sup>,玉米、大豆单作与套作的密度相同。玉米 N 肥分两次施用,即玉米底肥和大喇叭口期追肥,大豆 N 肥一次性施用。玉米、大豆单作按株间穴施方式施肥,玉米-大豆套作按玉米、大豆一体化施肥方式,即玉米底肥统一施纯 N 72 kg/hm<sup>2</sup>,玉米大喇叭口期追肥与大豆氮磷钾肥混合施用,在玉米、大豆之间,距玉米 25cm 处开沟施肥,各作物氮肥施用方式及施用量见表 1;单、套作玉米及单作大豆的磷钾肥随底肥施用,每公顷玉米施用量为 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 105 kg、K<sub>2</sub>O 112.5 kg,每公顷大豆施用量为 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 63 kg、K<sub>2</sub>O 52.5kg。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。

表 1 不同种植方式下的氮肥施用量

Table 1 N application rates under different planting patterns

种植模式 Planting pattern	施 N 处理 N application	小区/(kg N/hm <sup>2</sup> ) Plot			微区/g <sup>15</sup> NH <sub>4</sub> <sup>15</sup> NO <sub>3</sub> Micro plot		
		施 N 总量 Total N	底肥 Base	追肥 Top	施 N 总量 Total N	底肥 Base	追肥 Top
		application rate	fertilizer	fertilizer	application rate	fertilizer	fertilizer
MM	RN	135	72	63	29.30	15.63	13.67
	CN	180	72	108	39.07	15.63	23.44
SS	RN	45	45	0	9.77	9.77	0
	CN	60	60	0	13.02	13.02	0
IMS	RN	180	72	108	97.67	39.07	58.6
	CN	240	72	168	130.22	39.07	91.15

MM:玉米单作 Maize monoculture;SS:大豆单作 Soybean monoculture;IMS:玉米-大豆套作 Maizesoybean relay strip intercropping; RN:减量施氮 Reduced N application;CN:常量施氮 Conventional N application

### 1.3.2 微区试验

除 NN 处理外,RN 与 CN 处理均采用小区套微区方式,设置微区 18 个。单作(MM、SS)、套作(IMS)处理下微区面积为分别为 0.76m<sup>2</sup>和 1.9m<sup>2</sup>,施用氮肥为硝酸铵- $^{15}\text{N}_2$ ( $^{15}\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$ ),施氮水平如表 1。施肥时,将硝酸铵- $^{15}\text{N}_2$ 溶于蒸馏水后等量施用于各处理的每穴植株,施用方式与小区一致。微区布置在小区中间一带,小心地将所要布置微区周边的土挖开,MM、SS 处理下挖成长×宽×深为 2m×0.38m×0.6m 的土柱,IMS 处理下挖成长×宽×深为 2m×0.95m×0.6m 的土柱,然后均用高度为 0.7m 的无底镀锌铁皮围圈起来,并保持该土柱桶与土柱紧贴,土柱桶顶端高出地面 0.1m。最后把微区土柱桶内有缝隙的地方用原层次土填充,土柱桶外挖出的土也进行原状回填。微区作物种植及磷钾施肥水平同小区试验。

## 1.4 植株样品采集及全氮含量测定

小区试验于成熟期采集各作物的植株样。套作与单作处理的植株取样方法相同,每小区随机取长势一致

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均为 8 株,单作大豆 8 株、套作大豆 16 株。将植株按地上部秸秆、籽粒和地下根系分开,105℃下杀青 30 min 后继续在 75℃烘至恒重,测定干物质重;样品粉碎过 60 目筛后存放于干燥器中,用 FOSS 全自动定氮仪测定玉米、大豆各个器官中全氮的含量,计算氮素吸收利用率。

植株各器官吸氮量 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ) = 植株各器官生物量 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ) × 植株各器官氮浓度 ( $\text{g}/\text{g}$ )

氮肥吸收利用率 ( $\text{UE}_N, \%$ ) =  $\frac{(\text{施氮区地上植株氮积累量} - \text{不施氮区地上植株氮积累量})}{\text{施氮量}} \times 100$

## 1.5 微区植株<sup>15</sup>N 吸收及土壤<sup>15</sup>N 残留

### 1.5.1 玉米、大豆植株取样及<sup>15</sup>N%丰度测定

微区试验于玉米、大豆成熟期取样,玉米 4 株,大豆 8 株,连根整体挖出,抖掉与根系结合的土壤,植株按地上部秸秆、籽粒和地下根系分开,均在 105℃下杀青 30 min 后继续在 75℃烘至恒重,测定干物质重;样品粉碎后过 60 目筛,测定总 N 含量和<sup>15</sup>N%丰度。用 K-05 自动定氮仪测定总 N 含量,并将定氮后的馏出液浓缩至 1 mL,用同位素比率质谱仪(Thermo-Fisher Delta V Advantage IRMS)测定<sup>15</sup>N 丰度。氮原子百分超(atom%<sup>15</sup>N excess)等于标记样品的<sup>15</sup>N%与未标记样品(不施 N 处理)的<sup>15</sup>N%之差。

植株中来自<sup>15</sup>N 的百分数 %Ndff = (植株中<sup>15</sup>N 原子百分超/肥料的<sup>15</sup>N 原子百分超) × 100;

植株对<sup>15</sup>N 的吸收量( $\text{mg}/\text{株}$ ) Ndff = 植株吸氮量 × %Ndff / 100;

植株对施入<sup>15</sup>N 标记肥料的回收率 %NUR = 植株对<sup>15</sup>N 的吸收量(Ndff)/标记<sup>15</sup>N 的量 × 100

### 1.5.2 玉米、大豆带土壤 N 含量及<sup>15</sup>N 残留

各作物收获后用土钻分带采集土壤样品(0—20 cm)。单作玉米和单作大豆土壤样品分别为垂直玉米行或大豆行 0cm、距玉米行间 25cm、距大豆行间 25cm,共 3 个样点;玉米-大豆套作处理下玉米带土壤样品和大豆带土壤样品分别为垂直玉米行或大豆行距窄行 0cm、20cm,距宽行 20cm、40cm,共 4 个样点。将采集样品制备成混合样,按四分之一法则取 20 g 土,所取土样留一部分作鲜样测  $\text{NO}_3\text{-N}$  和  $\text{NH}_4\text{-N}$  含量,另一部分风干后测定总 N 含量和<sup>15</sup>N 丰度。土壤总 N 含量和<sup>15</sup>N 丰度测定方法同植株。称取 5.00 g 鲜土置振荡瓶中,加 1 mol/L KCL 溶液 50 mL,于恒温气浴摇床以振速 120 r/min,振荡 60 min 后,取滤液于塑料瓶中,4℃冷藏,在 1 周内用连续流动分析仪(ALLIANCE INTEGRAL Futura)测定浸提液中的  $\text{NH}_4\text{-N}$  和  $\text{NO}_3\text{-N}$  含量。

## 1.6 数据处理

采用 Microsoft Excel 2003 数据整理;采用 DPS7.05 软件对试验数据进行方差分析和 LSD 显著性测验。

## 2 结果分析

### 2.1 施氮与种植方式对作物生物量及吸 N 量的影响

#### 2.1.1 生物量

施氮与种植方式显著影响了作物的生物量(表 2)。与 MM 相比,IM 下玉米根、茎叶及籽粒干物质重降低,但差异不显著,两年平均降低 12.9%、3.3%和 3.2%。施 N 相对不施 N 显著提高了玉米根、茎叶及籽粒干物质重,但 RN 与 CN 间在不同种植方式下的变化规律不一致;MM 下,RN 与 CN 间除茎叶重差异不显著外,CN 的根和籽粒重均显著高于 RN,两年平均高 20.5%和 3.2%;IM 下,除 CN 与 RN 的根重差异不显著外,RN 的茎叶、籽粒重均显著高于 CN,两年平均高 6.4%和 7.9%。

对大豆,SS 的根、茎叶重虽高于 IS,但 IS 的籽粒重比 SS 的高 15.0%。单套作方式下,大豆根重随施 N 量的增加而增加,且 RN 与 CN 间差异不显著;大豆茎叶和籽粒重则为 RN 的显著高 NN 与 CN,其中,SS 下 RN 的籽粒重比 NN、CN 平均高 20.0%和 19.2%,IS 下 RN 的籽粒重则分别高 45.7%和 11.9%。

#### 2.1.2 吸 N 量

与 MM 相比,IM 的玉米根、茎叶及籽粒吸 N 量呈降低趋势,其中籽粒吸 N 量平均降低 5.1%(表 3);对大

豆,IS 下根与茎叶的吸 N 量相对 SS 虽呈降低趋势,但 IS 的籽粒吸 N 量显著高于 SS,平均高 15.1%。单套作下施 N 处理的玉米、大豆根与茎叶的吸 N 量显著高于不施 N 的,其中茎叶吸 N 量以 RN 的最高,根吸 N 量以 CN 的最高;玉米籽粒吸 N 量在 MM 下随施 N 量的增加而增加,以 CN 的最高,比 RN 的高 5.4%,IM 下以 RN 的最高,比 NN 和 CN 的分别高 44.2%和 11.5%;大豆籽粒吸 N 量在 SS 与 IS 下均以 RN 的最高,SS 下比 NN 和 CN 的分别高 28.2%和 22.3%,IS 下分别高 46.6%和 12.3%。进一步分析玉米、大豆植株地上部总吸 N 量可知,IM 的低于 MM,IS 的高于 SS;各施 N 水平间,单套作下均以 RN 的最高,尤其是 IMS 下表现十分明显,RN 的玉米、大豆地上部植株总吸 N 量分别比 CN 的高 13.4%和 12.4%。

表 2 不同施 N 水平与种植方式下的玉米、大豆生物量

Table 2 Biomass of maize and soybean under different N rates and planting patterns

N 处理 N Treatments	玉米 Maize/(kg/hm <sup>2</sup> )						大豆 Soybean/(kg/hm <sup>2</sup> )					
	根 Root		茎叶 Stem		籽粒 Grain		根 Root		茎叶 Stem		籽粒 Grain	
	MM	IM	MM	IM	MM	IM	SS	IS	SS	IS	SS	IS
2012												
NN	428.2c	440.4b	6524.1b	6374.5b	6174.8c	6095c	217.0a	152.5b	2254.6b	1551.8b	1552.1b	1567.3c
RN	552.7b	533.0ab	6760.4a	6798.3a	6914.3b	6790.5a	221.4a	193.8a	2775.6a	2297.6a	1888.4a	2364.1a
CN	707.1a	631.0a	6608.0ab	6621.1ab	7187.3a	6346.5b	246.1a	201.0a	2205.5b	2250.0a	1471.7b	2176.8b
平均 Mean	562.6	534.8	6630.8	6598.0	6758.8	6410.7*	228.2	182.4	2411.9	2033.1	1637.4	2036.1*
2013												
NN	1151.3b	955.2a	6349.6a	5190.8c	6291.3b	5630.8c	639.2b	433.5a	2322.1b	1904.7b	1675.1b	1594.1c
RN	1292.2ab	1040.6a	6742.2a	6877.8a	7903.7a	8534.4a	693.7ab	507.3a	2985.3a	2236.2a	1981.0a	2224.1a
CN	1462.0a	1092.1a	6425.6a	6245.5b	8101.7a	7837.6b	747.6a	447.9a	3080.3a	2001.7ab	1800.7ab	1947.0b
平均 Mean	1301.8	1029.3	6505.8	6104.7	7432.a	7334.3	693.5	462.9*	2795.9	2047.5*	1818.9	1921.7

MM:玉米单作 Maize monoculture;IM:玉米套作 Maize relay strip intercropping;SS:大豆单作 Soybean monoculture;IS:大豆套作 Soybean relay strip intercropping;NN:不施氮 No N application;RN:减量施氮 Reduced N application;CN:常量施氮;Conventional N application 同列数据后不同字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ );IM(S)处理平均值后的星号(\*)表示 IM(S)与 MM(或 SS)差异显著( $P<0.05$ )

表 3 不同施 N 水平与种植方式下玉米、大豆吸 N 量

Table 3 N uptake of maize and soybean under different N rates and planting patterns

N 处理 N Treatments	玉米 Maize/(kg/hm <sup>2</sup> )						大豆 Soybean/(kg/hm <sup>2</sup> )					
	根 Root		茎叶 Stem		籽粒 Grain		根 Root		茎叶 Stem		籽粒 Grain	
	MM	IM	MM	IM	MM	IM	SS	IS	SS	IS	SS	IS
2012												
NN	1.77b	1.70b	49.35b	47.17b	65.10b	62.45c	1.65a	1.31a	20.69c	12.66c	96.50b	103.54c
RN	3.08a	2.80a	55.37a	60.92a	77.92a	76.05a	1.91a	1.49a	28.38a	22.12a	130.19a	160.55a
CN	3.17a	3.52a	50.55b	51.04b	79.85a	68.12b	2.16a	1.74a	24.08b	17.99b	100.31b	144.51b
平均 Mean	2.67	2.67	51.75	53.04	74.29	68.87*	1.91	1.51*	24.38	17.59*	109.0	136.20*
2013												
NN	4.27b	4.29a	44.04c	34.77c	75.16b	71.22c	4.38b	2.44a	29.66b	18.17b	134.61b	128.86c
RN	6.12a	4.90a	56.83a	60.49a	110.44a	118.70a	4.83b	3.27a	32.43a	21.90a	163.55a	178.10a
CN	6.58a	4.95a	51.73b	53.42b	119.53a	106.56b	5.87a	2.87a	32.24a	19.16ab	142.48b	156.85b
平均 Mean	5.66	4.71	50.87	49.56	101.71	98.83	5.03	2.86*	31.44	19.74*	146.88	154.60

## 2.2 施氮与种植方式对作物<sup>15</sup>N 吸收的影响

### 2.2.1 植株总 N 含量及<sup>15</sup>N%丰度

不同<sup>15</sup>NH<sub>4</sub><sup>15</sup>NO<sub>3</sub>标记量对不同种植方式下玉米、大豆植株各器官的总 N 含量及<sup>15</sup>N 丰度有显著影响(表 4,表 5)。与 MM 相比,IM 下玉米根的总 N 含量及<sup>15</sup>N%丰度显著降低,且 IM 下玉米茎叶及籽粒的总 N 含量分别降低 1.8%和 3.3%,但<sup>15</sup>N 丰度显著增加 18.6%和 15.8%。各施 N 水平间,MM 下玉米根、茎叶及籽粒的总 N 含量均为 RN>CN>NN,IM 下除施 N 处理的茎叶总 N 含量显著高于不施 N 外,根与籽粒的总 N 含量施 N 与

不施 N 差异不显著;施 N 后,玉米各器官的<sup>15</sup>N%丰度均显著高于不施 N 植株的<sup>15</sup>N%自然丰度,RN 与 CN 相比,玉米根的<sup>15</sup>N%丰度显著降低,玉米茎叶与籽粒的<sup>15</sup>N%丰度显著增加。

表 4 不同施 N 水平与种植方式下玉米、大豆植株的总 N 含量

Table 4 Plant total N content of maize and soybean under different N rates and planting patterns (g/kg)

N 处理 N Treatments	玉米 Maize						大豆 Soybean					
	根 Root		茎叶 Stem		籽粒 Grain		根 Root		茎叶 Stem		籽粒 Grain	
	MM	IM	MM	IM	MM	IM	SS	IS	SS	IS	SS	IS
NN	5.58b	5.29a	8.56b	8.18b	11.40b	11.78a	9.25a	11.59a	12.08c	10.34b	71.01a	70.88a
RN	6.80a	5.17a	11.45a	11.02a	12.99a	11.72a	7.21b	8.49b	16.51a	13.92a	66.25b	67.55ab
CN	6.49a	5.10a	10.80a	11.07a	12.43a	12.10a	8.14ab	8.73b	14.72b	13.91a	73.91a	66.25b
平均 Mean	6.29	5.18 *	10.27	10.09	12.28	11.87	8.2	9.6 *	14.44	12.72	70.39	68.23

表 5 不同施 N 水平与种植方式下玉米、大豆植株的<sup>15</sup>N%丰度

Table 5 <sup>15</sup>N% abundance of maize and soybean under different N rates and planting patterns (%)

N 处理 N Treatments	玉米 Maize						大豆 Soybean					
	根 Root		茎叶 Stem		籽粒 Grain		根 Root		茎叶 Stem		籽粒 Grain	
	MM	IM	MM	IM	MM	IM	SS	IS	SS	IS	SS	IS
NN	0.371c	0.374c	0.376c	0.373c	0.372c	0.371c	0.373c	0.377c	0.373b	0.370c	0.369b	0.368c
RN	2.288b	2.314b	2.252a	2.718a	2.303a	2.726a	0.538b	0.480b	0.436a	0.514b	0.424a	0.503b
CN	3.354a	2.664a	2.155b	2.583b	2.184b	2.532b	0.720a	0.798a	0.461a	0.789a	0.481a	0.795a
平均 Mean	2.005	1.784 *	1.594	1.891 *	1.620	1.876 *	0.544	0.552	0.423	0.558 *	0.425	0.556 *

对大豆,IS 下茎叶与籽粒的总 N 含量相对 SS 降低,但 IS 下茎叶及籽粒的<sup>15</sup>N%丰度显著增加。各施 N 处理间,大豆根的总 N 含量随施 N 量的增加而降低,<sup>15</sup>N%丰度则随施 N 量的增加而增加;大豆茎叶总 N 含量在 SS 及 IS 下均以 RN 的最高;大豆籽粒总 N 含量在 SS 下以 RN 的最低,IS 下则以 RN 的最高;大豆茎叶及籽粒的<sup>15</sup>N%丰度随施 N 量的增加而增加,SS 及 IS 下均以 CN 的最高。

### 2.2.2 <sup>15</sup>N 吸收量

与 MM(SS)相比(表 6),IM(IS)下玉米、大豆茎叶和籽粒的<sup>15</sup>N 吸收量增加,其中,IM、IS 的籽粒<sup>15</sup>N 吸收量比 MM、SS 的分别高 12.3%、335.5%,植株<sup>15</sup>N 总吸收量分别高 5.6%和 255.1%。RN 与 CN 相比,玉米茎叶、籽粒及植株<sup>15</sup>N 总吸收量显著提高,而大豆的则显著降低;其中,玉米在 IM 下 RN 的比 CN 的分别提高 12.2%、17.3%和 14.4%,导致 RN 下玉米植株<sup>15</sup>N 吸收量占植株总 N 吸收量百分比显著提高,MM 与 IM 下分别提高 4.5%和 7.2%,而大豆在 IS 下 RN 的比 CN 的分别降低 54.5%、57.5%和 57.1%,最终 RN 下大豆植株<sup>15</sup>N 吸收量占植株总 N 吸收量百分比显著降低,SS 与 IS 下分别降低 43.8%和 67.8%。由此可见,与 CN 相比,RN 降低了套作系统中大豆对肥料 N 的吸收,但增加了套作系统中玉米对肥料 N 的吸收。

表 6 不同施 N 水平与种植方式下玉米、大豆植株的<sup>15</sup>N 吸收量

Table 6 The <sup>15</sup>N uptake of maize and soybean under different N rates and planting patterns (mg/株)

作物 Crops	N 处理 N Treatments	根 Root			茎叶 Stem			籽粒 Grain			总计 Total		
		MM/SS	IM/IS	Mean	MM/SS	IM/IS	Mean	MM/SS	IM/IS	Mean	MM/SS	IM/IS	Mean
玉米 Maize	RN	18.17b	11.12a	14.64b	330.19a	326.78a	328.48a	354.52a	388.79a	371.65a	702.87a	726.69a	714.78a
	CN	23.86a	12.54a	18.20a	275.62b	291.32b	283.47b	286.95b	331.49b	309.22b	586.44b	635.35b	610.89b
	平均	21.02	11.83 *		302.90	309.05		320.74	360.14 *		644.66	681.02 *	
大豆 Soybean	RN	0.18b	0.14b	0.16b	2.13a	3.41b	2.77b	2.92b	9.43b	6.18b	5.24b	12.98b	9.11b
	CN	0.39a	0.57a	0.48a	2.21a	7.50a	4.85a	4.34a	22.18a	13.26a	6.95a	30.25a	18.60a
	平均	0.29	0.36		2.17	5.45 *		3.63	15.81 *		6.09	21.62 *	

## 2.3 N 肥利用率与土壤 N 贡献率

### 2.3.1 N 肥利用率

MM 与 IM 间的玉米 N 肥利用率差异不显著(表 7),但 IS 下的大豆 N 肥利用率比 SS 的降低 46.7%。RN 与 CN 相比,玉米、大豆的 N 肥利用率均显著提高,其中,玉米在 MM 与 IM 下分别提高 40.2% 和 213.0%,大豆在 SS 与 IS 下分别提高 455.2% 和 117.5%。玉米-大豆套作系统的周年 N 肥利用率明显高于玉米单作和套作模式下单一作物的 N 肥利用率,比玉米单作平均高 146.5%;各施 N 水平间则为 RN 显著高于 CN。进一步分析<sup>15</sup>N 回收率(表 8),与 MM(SS)相比,IM(IS)下的玉米、大豆植株<sup>15</sup>N 回收率显著提高 5.3% 和 241.4%。与 CN 相比,MM、IM 下 RN 的玉米植株<sup>15</sup>N 回收率显著提高 59.8% 和 52.5%,但 IS 下 RN 的大豆植株<sup>15</sup>N 回收率显著降低 42.8%,SS 下 RN 的与 CN 的差异不显著。

表 7 玉米-大豆套作系统的氮肥利用率

Table 7 N utilization efficiency of maize-soybean relay strip intercropping system (%)

N 处理 N Treatments	2012					2013				
	玉米 Maize		大豆 Soybean		玉米-大豆 IMS	玉米 Maize		大豆 Soybean		玉米-大豆 IMS
	MM	IM	SS	IS		MM	IM	SS	IS	
RN	14.0a	15.1a	88.7a	36.9a	52.1a	35.6a	37.6a	64.6a	29.5a	70.1a
CN	8.9b	3.2b	12.0b	19.3b	23.3b	28.9b	24.4b	17.4b	12.1b	34.6b
平均 Mean	11.4	9.2	50.3	28.1*	37.7	32.3	31.0	41.0	20.8*	52.4

表 8 玉米-大豆套作系统中作物的<sup>15</sup>N 回收率

Table 8 <sup>15</sup>N recovery rate of crops in maize-soybean relay strip intercropping system (%)

N 处理 N Treatments	玉米 Maize			大豆 Soybean		
	MM	IM	Mean	SS	IS	Mean
RN	27.429a	28.358a	27.894a	1.225a	3.037b	2.131b
CN	17.160b	18.591b	17.875b	1.219a	5.307a	3.263a
平均 Mean	22.294	23.475		1.222	4.172*	

### 2.3.2 土壤 N 贡献率

与 MM(SS)相比,IM(IS)下玉米、大豆的土壤 N 贡献率降低 6.2% 和 15.6%(表 9)。RN 与 CN 相比,除 MM 下玉米土壤 N 贡献率差异不显著外,其它处理下均为 RN 的显著低于 CN,其中,IM 与 IS 下 RN 的玉米、大豆土壤 N 贡献率分别降低 12.0% 和 11.2%。连续 2 年种植后,由于套作系统周年 N 肥利用率提高(表 7),玉米-大豆套作系统周年土壤 N 贡献率呈降低趋势,且套作系统的土壤 N 贡献率低于单作系统和套作模式下单一作物,其中,RN 下 IMS 的比 MM 和 SS 的分别低 12.0% 和 12.6%。

表 9 玉米-大豆套作系统下各作物的土壤氮贡献率

Table 9 Soil N contribution of crops in relay strip intercropping system (%)

N 处理 N Treatments	2012					2013				
	玉米 Maize		大豆 Soybean		玉米-大豆 IMS	玉米 Maize		大豆 Soybean		玉米-大豆 IMS
	MM	IM	SS	IS		MM	IM	SS	IS	
RN	86.0a	80.0b	74.0b	63.6b	70.7b	71.3a	59.1b	84.3b	74.1b	66.9b
CN	87.8a	92.0a	94.2a	71.6a	80.2a	70.0a	66.3a	94.1a	83.5a	75.3a
平均 Mean	86.9	86.0	84.1	67.6*	75.4	70.7	62.7	89.2	78.8*	71.1

## 2.4 土壤 N 含量及<sup>15</sup>N%丰度

### 2.4.1 土壤无机 N 含量

玉米、大豆土壤的无机总 N 与 NO<sub>3</sub>-N 含量变化规律一致(表 10),种植方式间为 IM>MM,IS<SS;各施 N 水平间,除 IS 下大豆土壤的 NO<sub>3</sub>-N 及无机总 N 含量随施 N 量的增加而降低外,MM、IM 与 SS 下玉米、大豆土

壤的  $\text{NO}_3\text{-N}$  及无机总 N 含量均随施 N 量的增加而增加。相对 MM (SS) 处理, IM 与 IS 下玉米、大豆土壤  $\text{NH}_4\text{-N}$  含量呈增加趋势; 施 N 相对不施 N 提高了玉米土壤  $\text{NH}_4\text{-N}$  含量, 但显著降低了大豆土壤  $\text{NH}_4\text{-N}$  含量。

表 10 玉米-大豆套作系统中作物土壤  $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$  含量

Table 10 Soil  $\text{NO}_3\text{-N}$  and  $\text{NH}_4\text{-N}$  content of crops in the relay strip intercropping system (mg/kg)

N 处理 N Treatments	玉米 Maize						大豆 Soybean					
	$\text{NO}_3\text{-N}$		$\text{NH}_4\text{-N}$		Inorganic total N		$\text{NO}_3\text{-N}$		$\text{NH}_4\text{-N}$		Inorganic total N	
	MM	IM	MM	IM	MM	IM	SS	IS	SS	IS	SS	IS
NN	41.19b	42.79b	24.49a	25.18a	65.68b	69.96b	58.77b	42.83a	20.05a	30.04a	78.82b	72.86a
RN	49.15a	55.77a	25.57a	25.33a	74.72a	81.11a	64.67a	42.25a	18.91a	25.68a	83.58ab	67.93a
CN	52.38a	59.71a	27.16a	26.96a	79.54a	86.67a	68.20a	39.26a	21.19a	29.35a	89.38a	68.62a
平均 Mean	47.57	52.76*	25.74	25.82	73.3	79.2a	63.8a	41.45*	20.05	28.36	83.93	69.80

### 2.4.2 土壤总 N 含量及 $^{15}\text{N}$ 丰度

与 MM (SS) 相比, IM 下玉米土壤  $^{15}\text{N}$  丰度降低 2.0%, 土壤总 N 含量增加 7.8%, 而 IS 下大豆土壤  $^{15}\text{N}$  丰度和土壤总 N 含量分别降低 3.0% 和 13.8% (表 11)。施 N 与不施 N 相比, 玉米土壤总 N 含量和  $^{15}\text{N}$  丰度显著提高, 而大豆的土壤总 N 含量降低, 土壤  $^{15}\text{N}$  丰提高; MM 与 IM 下玉米土壤总 N 含量为  $\text{RN} > \text{CN}$ , 而土壤  $^{15}\text{N}$  丰度则为  $\text{RN} < \text{CN}$ , SS 与 IS 下大豆土壤总 N 含量与  $^{15}\text{N}$  丰度均为  $\text{RN} > \text{CN}$ , 其中, IS 下 RN 的比 CN 的分别高 11.6% 和 9.2%。

表 11 玉米-大豆套作系统中作物土壤总氮含量及  $^{15}\text{N}$  丰度

Table 11 Soil total N content and  $^{15}\text{N}$  abundance of crops in the relay strip intercropping system

N 处理 N Treatments	玉米 Maize						大豆 Soybean					
	Total N/(g/kg)			$^{15}\text{N}$ abundance/%			Total N/(g/kg)			$^{15}\text{N}$ abundance/%		
	MM	IM	Mean	MM	IM	Mean	SS	IS	Mean	SS	IS	Mean
NN	0.803b	0.909a	0.856b	0.379c	0.382b	0.380c	1.061a	0.961a	1.011a	0.380b	0.379b	0.379c
RN	0.972a	1.036a	1.004a	0.469b	0.461a	0.465b	1.012ab	0.885b	0.949b	0.460a	0.451a	0.455a
CN	0.886ab	0.923a	0.905ab	0.515a	0.492a	0.504a	0.988b	0.793c	0.890c	0.443a	0.413b	0.428b
平均 Mean	0.887	0.956		0.454	0.445		1.020	0.879*		0.427	0.414	

## 3 讨论

### 3.1 玉米-大豆套作系统作物氮素吸收差异特性

根据生态位理论, 如果限制因子为不同资源但满足同一需求, 如豆科作物利用  $\text{N}_2$ , 非豆科作物利用  $\text{NO}_3\text{-N}$  或  $\text{NH}_4\text{-N}$ , 各自占据不同的生态位, 那么也会使种间竞争作用缓解<sup>[23]</sup>。高浓度的土壤无机氮可能阻碍豆科固氮, 如非豆科与豆科间作, 非豆科可能竞争到更多的土壤无机氮, 间作豆科的生物固氮比单作增加<sup>[19,24]</sup>。豆科与非豆科间作时, 豆科与非豆科对 N 的需求都将得到一定程度上的满足, 也就存在了种间互利大于种间竞争的可能性, 形成产量和氮素吸收利用优势。本研究中, 利用微区与大田试验相结合的方法, 充分揭示了玉米-大豆套作体系中作物对 N 素吸收数量与形态的差异, 与 MM 相比, 大田试验中 IM 下玉米茎叶、籽粒的吸 N 量虽降低, 但微区试验中, IM 下玉米地上部植株  $^{15}\text{N}$  丰度及  $^{15}\text{N}$  吸收量显著增加, 其中籽粒  $^{15}\text{N}$  吸收量增加 12.3%, 加之土壤 N 贡献率降低 6.2%, 体现出玉米-大豆套作体系玉米对  $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$  的吸收优势, 植株  $^{15}\text{N}$  吸收量占总 N 吸收量的 23.9%; 减量施 N 促进了套作植株对  $^{15}\text{N}$  的吸收, IM 下 RN 的玉米籽粒  $^{15}\text{N}$  吸收量比 CN 的高 17.3%, 而且, RN 下 IM 的比 MM 的高 9.7%; 前期研究发现减量施 N 有利于促进套作玉米籽粒灌浆, 提高经济系数及籽粒百粒重<sup>[25]</sup>, 这就为玉米-大豆套作共生期间玉米对  $^{15}\text{N}$  的吸收优势奠定基础。对大豆, 套作植株 N 吸收量及  $^{15}\text{N}$  回收率相对单作虽都提高, 但植株  $^{15}\text{N}$  总吸收量较小, 仅占植株总 N 吸收量的 0.6%—4.4%, IS 下的大豆 N 肥利用率也比 SS 的低 46.7%, 减量施 N 后的降低效果更明显, 说明大豆对  $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$

为吸收劣势,N素吸收主要以根瘤固N为主;减量施N不仅促进大豆植株对肥料N的吸收,更有利于大豆根瘤固氮,减N 18%提高了套作大豆根瘤固氮酶活性<sup>[26]</sup>。

氮的利用效率受环境中N形态影响,大多数植物吸收的N主要是 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NH}_4^+$ 离子,尤其是禾本科作物吸收的N主要为无机态氮。本研究中,虽然IM下玉米土壤 $\text{NO}_3^-$ -N及无机N总含量相对MM提高,但RN相对CN降低;此外,套作玉米的土壤表观N损失显著降低<sup>[15]</sup>。因此,玉米-大豆套作既有利于玉米当季对肥料N的吸收利用,更有利于降低对土壤N素的过度消耗,维持土壤肥力。 $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NH}_4^+$ -N会抑制固氮作物根瘤菌的侵染、固氮酶活性和根瘤菌分化与生长<sup>[27]</sup>,以抑制共生固氮;本研究中,由于玉米对N肥的竞争吸收以及大豆固定的N及时向玉米转移<sup>[28]</sup>,降低了土壤N浓度,既满足了根瘤发育必需的“启动N”<sup>[29]</sup>,又避免N过量而抑制根瘤固氮<sup>[30]</sup>,RN的大豆土壤 $\text{NO}_3^-$ -N及无机N含量均最低,为根瘤固氮及N转移创造了条件。

### 3.2 减量施N对玉米-大豆套作系统的增产节肥效应

氮肥对提高作物产量起着重要作用,但过量施用和低效利用会造成资源浪费和环境污染,不利于农业可持续发展<sup>[31]</sup>,而适当的氮素减量不会引起作物产量的显著变化<sup>[4-6]</sup>。本研究中,IM的玉米植株生物量及籽粒产量相对MM虽降低,但RN的产量及生物量相对CN的显著增加,这就弥补了套作条件下的玉米产量劣势,2013年,IM下RN的玉米产量比MM下CN的最高玉米产量高5.3%。此外,减量施N提高了大豆光合作用及物质积累,降低了玉米-大豆套作体系的种间竞争作用<sup>[13]</sup>,显著提高了套作体系下大豆产量,比大豆单作高15.0%,有利于玉米-大豆套作体系下作物均衡增产。前期研究发现减N 18%有效提高了玉米花后和大豆花前干物质积累量、转移量、转移率和对籽粒的贡献率<sup>[25]</sup>,与本研究的增产效应十分一致。但有关减量施N下玉米-大豆套作体系地下根系相互作用及地下根系N吸收对地上部产量形成的贡献还有待进一步研究。

禾本科与豆科作物间套作有明显的间套作优势<sup>[11,18-19]</sup>,在“小麦/玉米/大豆”套作体系施肥效应研究中,发现采用传统株间穴施化肥后,玉米占据优势生态位,大豆处于竞争劣势<sup>[23]</sup>;与单作相比,套作体系下玉米产量、氮素吸收量及氮肥利用率显著提高,而大豆对氮肥的利用率降低51.45%<sup>[21]</sup>,不利于套作系统平衡吸收养分及可持续利用养分。本研究采用减量一体化施肥后,相对MM或SS,IMS不仅未显著影响玉米植株N吸收量,还使大豆籽粒吸N量显著增加,确保了玉米-大豆套作系统总吸N量及周年N肥利用率提高;RN与CN相比,玉米、大豆的籽粒及茎叶吸N量提高,使IMS下RN的玉米、大豆地上部植株总吸N量比CN的高12.4%和13.4%,体现出减量施N对玉米-大豆套作系统N素吸收的平衡效应。此外,RN相对CN还降低了土壤N素贡献率、提高了土壤总N含量;与MM和SS相比,IMS下单季作物土壤N素贡献率分别降低6.2%和15.6%,而套系统相对单作则降低12%左右,且呈逐年降低趋势,其原因则归因于RN显著提高了IMS下玉米和大豆的N肥吸收利用率,分别较CN的高213.0%和117.5%,且呈逐年增加趋势,导致RN下系统周年N肥利用率提高113.0%,土壤N素贡献率降低11.5%,维持了土壤肥力,尤其是显著提高了耗地作物玉米的土壤总N含量,IM的比MM的高7.8%,RN的比CN的高10.6%。这与战秀梅等<sup>[5]</sup>、Constantin等<sup>[2]</sup>研究减量施N的节肥效应一致,但减量施N下玉米-大豆套作体系N素种间竞争补偿机理及土壤N素转化与作物N素吸收间的关系还有待进一步研究。

## 4 结论

玉米-大豆套作系统中作物对N素吸收存在数量及形态差异,相对单作,套作下玉米的籽粒及植株总吸N量降低,大豆的则增加;玉米的土壤 $\text{NO}_3^-$ -N含量、总N含量增加,大豆的则降低;玉米、大豆的N肥利用率及<sup>15</sup>N回收率提高,土壤N贡献率及土壤<sup>15</sup>N%丰度降低。玉米植株对 $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NH}_4^+$ -N为吸收优势,大豆则为吸收劣势,以生物固N为主。减量施N有利于玉米-大豆套作体系作物持续增产及维持土壤肥力,IMS下,RN的玉米、大豆籽粒产量及植株吸N量显著高于CN,系统周年N肥利用率逐年增加,土壤N贡献率逐年降低。

### 参考文献(References):

- [1] 张福锁,王激清,张卫峰,崔振岭,马文奇,陈新平,江荣风.中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径.土壤学报,2008,45(5):

- 915-924.
- [ 2 ] Constantin J, Mary B, Laurent F, Aubrion G, Fontaine A, Kerveillant P, Beaudoin N. Effects of catch crops, no till and reduced nitrogen fertilization on nitrogen leaching and balance in three long-term experiments. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 135(4): 268-278.
- [ 3 ] 王秀斌, 梁国庆, 周卫, 孙静文, 裴雪霞, 夏文建. 优化施肥下华北冬小麦/夏玉米轮作体系农田反硝化损失与  $N_2O$  排放特征. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(1): 48-54.
- [ 4 ] 刘学军, 赵紫娟, 巨晓棠, 张福锁. 基施氮肥对冬小麦产量、氮肥利用率及氮平衡的影响. *生态学报*, 2002, 22(7): 1122-1128.
- [ 5 ] 战秀梅, 李亭亭, 韩晓日, 邹殿博, 左仁辉, 叶冰. 不同施肥方式对春玉米产量、效益及氮素吸收和利用的影响. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(4): 861-868.
- [ 6 ] Ruan W B, Ren T, Chen Q, Zhu X, Wang J G. Effects of conventional and reduced N inputs on nematode communities and plant yield under intensive vegetable production. *Applied Soil Ecology*, 2013, 66: 48-55.
- [ 7 ] Zhang G G, Yang Z B, Dong S T. Interspecific competitiveness affects the total biomass yield in an alfalfa and corn intercropping system. *Field Crops Research*, 2011, 124(1): 66-73.
- [ 8 ] 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. *Field Crops Research*, 2012, 132: 149-157.
- [ 9 ] Hauggard-Nielsen H, Gooding M, Ambus P, Corre-Hellou G, Crozat Y, Dahlmann C, Dibet A, von Fragstein P, Pristeri A, Monti M, Jensen E S. Pea-barley intercropping for efficient symbiotic  $N_2$ -fixation, soil N acquisition and use of other nutrients in European organic cropping systems. *Field Crops Research*, 2009, 113(1): 64-71.
- [ 10 ] Li L, Li S M, Sun J H, Zhou L L, Bao X G, Zhang H G, Zhang F S. Diversity enhances agricultural productivity via rhizosphere phosphorus facilitation on phosphorus-deficient soils. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104: 11192-11196.
- [ 11 ] Li W X, Li L, Sun J H, Guo T, Zhang F S, Bao X, Peng A, Tang C. Effects of intercropping and nitrogen application on nitrate present in the profile of an Orthic Anthrosol in Northwest China. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2005, 105(3): 483-49.
- [ 12 ] Lithourgidis A S, Vlachostergios D N, Dordas C A, Damalas C A. Dry matter yield, nitrogen content, and competition in pea-cereal intercropping systems. *European Journal of Agronomy*, 2011, 34(4): 287-294.
- [ 13 ] 刘小明, 雍太文, 苏本营, 刘文钰, 周丽, 宋春, 杨峰, 王小春, 杨文钰. 减量施氮对玉米-大豆套作系统中作物产量的影响. *作物学报*, 2014, 40(9): 1629-1638.
- [ 14 ] Yang F, Huang S, Gao R C, Liu W G, Yong T W, Wang X C, Wu X L, Yang W Y. Growth of soybean seedlings in relay strip intercropping systems in relation to light quantity and red: far-red ratio. *Field Crops Research*, 2014, 155: 245-253.
- [ 15 ] 刘小明, 雍太文, 刘文钰, 苏本营, 宋春, 杨峰, 王小春, 杨文钰. 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. *应用生态学报*, 2014, 25(8): 2267-2274.
- [ 16 ] 苏本营, 陈圣宾, 李永庚, 杨文钰. 间套作种植提升农田生态系统服务功能. *生态学报*, 2013, 33(14): 4505-4514.
- [ 17 ] Jensen E S. Grain yield, symbiotic  $N_2$  fixation and interspecific competition for inorganic N in pea-barley intercrops. *Plant and Soil*, 1996, 182(1): 25-38.
- [ 18 ] Li L, Sun J H, Zhang F S, Li X L, Yang S C, Rengel Z. Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping I. Yield advantage and interspecific interactions on nutrients. *Field Crops Research*, 2001, 71(2): 123-137.
- [ 19 ] 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  $^{15}N$  techniques. *Plant and Soil*, 2004, 262(1/2): 45-54.
- [ 20 ] Hauggard-Nielsen H, Ambus P, Jensen E S. The comparison of nitrogen use and leaching in sole cropped versus intercropped pea and barley. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2003, 65(3): 289-300.
- [ 21 ] 雍太文, 杨文钰, 任万军, 樊高琼, 向达兵. 两种三熟套作体系中的氮素转移及吸收利用. *中国农业科学*, 2009, 42(9): 3170-3178.
- [ 22 ] 雍太文, 杨文钰, 向达兵, 陈小容, 万燕. 小麦/玉米/大豆套作的产量、氮营养表现及其种间竞争力的评定. *草业学报*, 2012, 21(1): 50-58.
- [ 23 ] Vandermeer J H. *The Ecology of Intercropping*. New York, USA: Cambridge University Press, 1992: 358-381.
- [ 24 ] 褚贵新, 沈其荣, 王树起. 不同供氮水平对水稻/花生间作系统中氮素行为的影响. *土壤学报*, 2004, 41(5): 789-794.
- [ 25 ] 董茜, 雍太文, 刘小明, 刘文钰, 徐婷, 宋春, 王小春, 杨文钰. 施氮方式对玉米-大豆套作体系中作物产量及玉米籽粒灌浆特性的影响. *作物学报*, 2014, 40(11): 2028-2039.
- [ 26 ] 雍太文, 董茜, 刘小明, 刘文钰, 宋春, 杨峰, 王小春, 杨文钰. 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效率的影响. *中国油料作物学报*, 2014, 36(1): 84-91.
- [ 27 ] Streeter J, Wong P P. Inhibition of legume nodule formation and  $N_2$  fixation by nitrate. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 1988, 7(1): 1-23.
- [ 28 ] 雍太文, 杨文钰, 向达兵, 万燕, 刘卫国, 王小春. 小麦/玉米/大豆和小麦/玉米/甘薯套作对土壤氮素含量及氮素转移的影响. *作物学报*, 2012, 38(1): 148-158.
- [ 29 ] 王树起, 韩晓增, 乔云发, 严君, 李晓慧. 施氮对大豆根瘤生长和结瘤固氮的影响. *华北农学报*, 2009, 24(2): 176-179.
- [ 30 ] 刘丽君, 孙聪姝, 刘艳, 王全富, 祖伟. 氮肥对大豆结瘤及叶片氮素积累的影响. *东北农业大学学报*, 2005, 36(2): 133-137.
- [ 31 ] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, Shen J L, Han W X, Zhang W F, Christie P, Goulding K W T, Vitousek P M, Zhang F S. Significant acidification in major Chinese croplands. *Science*, 2010, 327(5968): 1008-1010.