

## 施氮量对绿豆 || 燕麦间作系统生产力及氮吸收累积的影响

杨学超<sup>1</sup> 胡跃高<sup>1</sup> 钱欣<sup>1</sup> 任长忠<sup>2</sup> 林叶春<sup>1</sup> 郭来春<sup>2</sup> 王春龙<sup>2</sup> 曾昭海<sup>1\*</sup>

(1. 中国农业大学 农学与生物技术学院, 北京 100193;

2. 吉林省白城市农业科学院, 吉林 白城 137000)

**摘要** 以白绿 11 号和白燕 2 号为材料, 研究不同施氮量(0、30、60、90 和 120 kg/hm<sup>2</sup>)对绿豆 || 燕麦间作系统生产力、生物产量及氮素吸收利用率的影响。结果表明: 绿豆 || 燕麦具有间作产量优势, 间作系统比单作系统生产力平均提高了 30%。间作系统生产力、生物产量、氮素吸收率并未随着施氮量的增加而增加, 不施氮或施氮量较低时, 燕麦与绿豆间作通过种间氮营养互补机制在不降低产量的同时, 可以获得较高的土地当量比(LEER)、生物产量及氮积累量; 高氮肥量和种间互作使作物发生氮素“奢侈吸收”, 且高氮条件下, 豆科固氮酶受到抑制或失去活性, 发生“氮阻遏”。

**关键词** 绿豆; 燕麦; 生物产量; 氮素吸收利用

中图分类号 S 522; S 512.6; S 344.2

文章编号 1007-4333(2012)04-0046-07

文献标志码 A

## Effects of nitrogen application level on system productivity, nitrogen absorption and accumulation in mung bean || oat intercropping system

YANG Xue-chao<sup>1</sup>, HU Yue-gao<sup>1</sup>, QIAN Xin<sup>1</sup>, REN Chang-zhong<sup>2</sup>, LIN Ye-chun<sup>1</sup>, GUO Lai-chun<sup>2</sup>, WANG Chun-long<sup>2</sup>, ZENG Zhao-hai<sup>1\*</sup>

(1. College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Baicheng Academy of Agricultural Sciences, Baicheng 137000, China)

**Abstract** This study, the effects of nitrogen application rates on the productivity, nitrogen uptake and dry matter yield were investigated in mung bean || oat intercropping system. Under the condition of different fertilizer amount (0, 30, 60, 90 and 120 kg/hm<sup>2</sup>), naked oat “Baiyan2” and the mung bean “Bailv11” were used as the experiment materials. The results showed that, compared with sole cropping system, on average, intercropping significantly increased system productivity by 30%. The productivity, dry matter yield, and nitrogen uptake and utilization efficiency did not go up along with the increase of nitrogen application rate. Under high nitrogen fertilizer and intercropping, all nitrogen fixers have a character that they will loss ability of nitrogen fixation, called “ammonia repress”, indicating that over abundant nitrogen uptake existed. Without or with lower the supply of N fertilizer, intercrops of mung bean and oat showed higher productivity, LEER, biological yield, nitrogen uptake and utilization efficiency, but without influencing the total intercrop grain yield.

**Key words** mung bean || oat intercropping system; biological yield; nitrogen uptake and utilization efficiency

氮素是作物需求最多的营养元素, 氮肥是农作物增产的 60% 以上<sup>[1]</sup>。在大田体系中, 增施氮肥是生产中投入最多的肥料。化肥的增产作用占到农作物提供养分保证高产的关键。目前我国的氮肥用量达

收稿日期: 2012-02-09

基金项目: 国家燕麦荞麦产业技术体系项目(CARS-08-B-1); 国家公益性行业(农业)科研专项(201103001); 国家“十二五”粮食丰产科技工程项目(2011BAD16B15); 国家自然科学基金资助项目(30871491)

第一作者: 杨学超, 硕士研究生, E-mail: yang\_xuechao@163.com

通讯作者: 曾昭海, 副教授, 博士, 主要从事作物栽培及耕作学专业研究, E-mail: zengzhaochai@cau.edu.cn

184 kg/hm<sup>2</sup>[2],较 20 世纪 80 年代以来增长了近 2 倍[3]。过分依赖和超量使用氮肥,会导致肥料利用率降低、地下水及饮用水硝酸盐污染、水体富营养化、温室效应增强、生物多样性和生态系统稳定性降低、农作物病虫害加重等一系列严重的环境问题[2-6]。

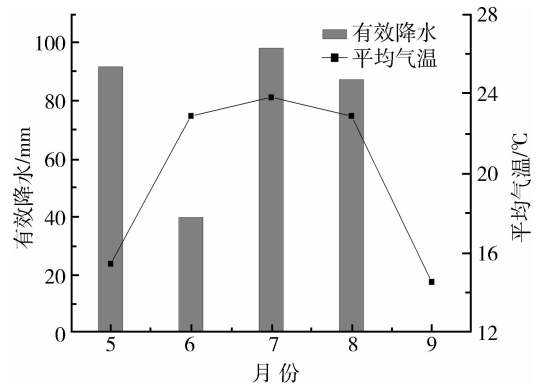
间套作是我国传统农业的重要组成部分,在农业的可持续发展中占有不可替代的地位。豆科与禾本科间作是传统农业中应用较为成功的一个组合,主要表现在种间氮营养的互补性和氮来源的多样性[7-8]。豆科与禾本科间作体系中禾本科作物利用土壤中的矿质氮,减少土壤氮素对豆科作物固氮酶活性的抑制。豆科作物固定大气中的氮,减少对氮素的竞争[9-10],节约了土壤氮素供禾本科吸收利用。豆科与禾本科间作对减少氮肥用量,促进土壤可持续利用具有现实意义,是一种稳产、高产、高效、可持续的种植体系[2]。我国的豆科||禾本科间作模式丰富,如西北地区蚕豆||玉米[2,11]、大豆||小麦[11]和燕麦||箭筈豌豆[12-14],华东及华北地区花生||玉米[15]。

施氮水平影响豆科、禾本科间作作物产量[16-17]、养分吸收积累[18-19]及病害、杂草的控制[20]。白城地区是中国东北地区最大的绿豆产地,也是燕麦的新兴产区。对于燕麦、绿豆间作,间作系统的氮节约效应及间作产量优势等问题尚鲜见报道。本研究通过探讨不同施氮水平下燕麦、绿豆间作产量及氮素吸收累积的特点,旨在为白城地区燕麦、绿豆合理间作提供理论依据及实践指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究地区概况

试验于 2011 年 5—9 月在吉林省白城市农科院洮儿河燕麦基地(45°37'N,122°48'E)进行。当地气候属温带大陆性季风气候,年均日照时数 2 919.4 h,年均气温 4.9℃,无霜期 157 d,年均降水量 407.9 mm,属于典型的两季不足,一年有余的自然生态区。试验田土壤为典型的黑钙土,耕层土壤有机质含量 14.7 g/kg、全氮含量 0.8 g/kg、碱解氮含量 59.6 mg/kg、有效磷含量 9.9 mg/kg、速效钾含量 76.6 mg/kg、pH 8.0。前茬作物为白燕 2 号。气象数据由白城市气象局提供(图 1)。



有效降水指 5 mm 以上降雨量。

图 1 试验期间有效月降雨量和月均温变化

Fig. 1 Effective precipitation and temperature during experiment period

### 1.2 试验设计

试验采用裂区设计,主区为施氮水平(尿素,含氮量 46%);纯氮用量分别为 0、30、60、90 和 120 kg/hm<sup>2</sup>;副区为种植方式:单作绿豆,单作燕麦,燕麦||绿豆;每处理重复 3 次。

各小区施磷肥(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) 45 kg/hm<sup>2</sup>,钾肥(K<sub>2</sub>O) 45 kg/hm<sup>2</sup>。磷肥、钾肥播前以基肥一次性施入。氮肥施用方法:基肥 60%,燕麦三叶期追施 40%。保护行为白燕 2 号。

小区面积 24 m<sup>2</sup>(6 m×4 m),区组之间行道为 1.5 m。单、间作行距均为 33 cm,燕麦条播,播量 150 kg/hm<sup>2</sup>,绿豆穴播,株距 20 cm,出苗后定苗至每穴 1 株。燕麦绿豆间作比例为 2:1(图 2)。

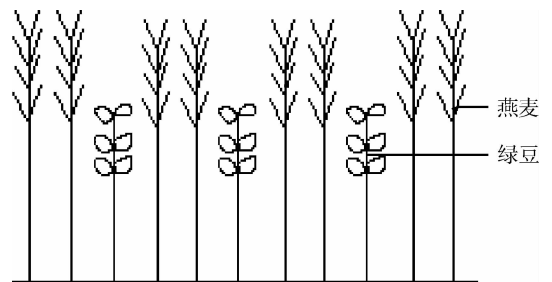


图 2 燕麦||绿豆间作图

Fig. 2 Treatment and intercropping proportion

供试材料由吉林省白城市农科院提供:燕麦(*Avena nuda* L.)为裸燕麦白燕 2 号(Baiyan2),绿豆(*Vigna radiate*)为白绿 11 号(Bailv11)。燕麦和绿豆于 5 月 10 日同期播种,收获时间分别为 8 月 2 日、9 月 5 日。两作物共处期 85 d。

### 1.3 样品采集及分析方法

生物产量。燕麦、绿豆成熟期,每小区取生长均匀燕麦样段 50 cm,齐地表剪下。每小区连续取生长均匀的绿豆 5 株,样品于 105 °C 杀青 30 min 后,70~80 °C 烘干至恒重后称重<sup>[21]</sup>。

产量。燕麦、绿豆成熟期,每小区取燕麦 2 m<sup>2</sup>,齐地割起,风干后测定籽粒、干草产量<sup>[21]</sup>,单作每小区取 3 行 2 m 样段,间作每小区取 2 行 3 m 样段(相当于 2 m<sup>2</sup> 样方)。每小区取绿豆 1 m<sup>2</sup>,测定籽粒产量,单作每小区取 3 行 1 m 样段,间作每小区取 1 行 3 m 样段(相当于 1 m<sup>2</sup> 样方)。

将样品粉碎后,采用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮,凯氏定氮法测定样品氮浓度<sup>[22]</sup>。

#### 1.3.1 数据计算

间作优势。土地当量比(land equivalent ratio, LER)用于衡量间作优势<sup>[23]</sup>:

$$LER = L_o + L_m \quad (1)$$

式中: $L_o = Y_{io}/Y_{so}$ ;  $L_m = Y_{im}/Y_{sm}$ 。  $Y_{so}$ 、 $Y_{sm}$  为单作燕麦和绿豆的籽粒产量, kg/hm<sup>2</sup>;  $Y_{io}$ 、 $Y_{im}$  为间作总面积上燕麦和绿豆的籽粒产量, kg/hm<sup>2</sup>; 当  $LER > 1$ , 表示间作系统有产量优势; 当  $LER < 1$ , 则无产量优势;

间作系统生产力(system productivity, SP, kg/hm<sup>2</sup>)<sup>[1]</sup>。单位面积两种间作物籽粒产量的加权平均值:

$$SP = Y_o \times Z_o + Y_m \times Z_m \quad (2)$$

式中: $Y_o$ 、 $Y_m$  为间作燕麦和绿豆的籽粒产量, kg/hm<sup>2</sup>;  $Z_o$ 、 $Z_m$  为绿豆和燕麦在间作系统中所占的面积比例,其中  $Z_o = 0.67$ ,  $Z_m = 0.33$ ; 间作系统和单作系统氮素吸收累积量计算同式(2)。

种间相对竞争力( $A_{om}$ )<sup>[23]</sup>。燕麦相对于绿豆的资源竞争力:

$$A_{om} = Y_{io}/(Y_{so} \times Z_o) - Y_{im}/(Y_{sm} \times Z_m) \quad (3)$$

式中, $A_{om} > 0$ , 表示燕麦竞争能力强于绿豆;  $A_{om} < 0$ , 表示燕麦竞争能力弱于绿豆。

氮素收获指数(nitrogen harvest index, NHI)<sup>[1]</sup>。成熟期单位面积植株籽粒氮素吸收量与植株总氮素吸收量之比,  $NHI = GNU/NU$ 。

氮素吸收率(nitrogen uptake efficiency, NUE, kg/kg)<sup>[1]</sup>。单位面积植株总氮素吸收量与单位面积施入的纯氮量之比,  $NUE = NU/N_f$ 。

氮素干物质利用率(nitrogen dry matter production efficiency, NDMPE, kg/kg)<sup>[1]</sup>。单位面积植株干物质与单位面积植株总氮素吸收量的比值,  $NDMPE = DM/NU$ 。

氮素经济利用率(nitrogen grain production efficiency, NGPE, kg/kg)<sup>[1]</sup>。单位面积生产力与单位面积植株总氮素吸收比值,  $NGPE = SP/NU$ 。

上述指标中,GNU 为作物籽粒的吸氮量, kg/hm<sup>2</sup>; NU 为作物秸秆和籽粒的总氮量, kg/hm<sup>2</sup>; DM 为秸秆和籽粒的总干物质质量, kg/hm<sup>2</sup>;  $N_f$  为施入的纯氮量, kg/hm<sup>2</sup>。

#### 1.3.2 统计分析

采用 Excel 2007 进行数据整理, OriginPro8 (OriginLab, USA) 绘制图形, 利用 SAS v8 (SAS Institute, USA) 统计软件 GLM 程序, Duncan's 多重比较法进行差异显著性分析<sup>[24]</sup> ( $P = 0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 间作和施氮量对作物生产力的影响

施氮量显著( $P < 0.05$ )影响单作燕麦、绿豆产量。施氮量为 60 kg/hm<sup>2</sup> 时, 产量均最高, 分别为 2 227.3、1 837.5 kg/hm<sup>2</sup> (表 1)。

绿豆 || 燕麦间作系统具有显著的间作优势, 不同氮肥水平下, 间作系统比单作系统生产力提高了 30%。施氮量为 30 kg/hm<sup>2</sup> 时, 间作系统产量最高 (2 617.2 kg/hm<sup>2</sup>), 但与其他处理之间差异不显著 ( $P > 0.05$ )。

施氮量为 90 kg/hm<sup>2</sup> 时, 种间相对竞争力小于零, 绿豆竞争能力强于燕麦; 其他施氮水平下, 相对竞争力都大于零, 燕麦竞争能力强于绿豆。

### 2.2 间作和施氮量对 LER 的影响

绿豆/燕麦间作系统具有显著的间作优势, 无论施氮水平高低, LER 均大于 1; 氮肥对 LER 影响显著, 施氮量为 90 kg/hm<sup>2</sup> 时, LER 最大为 1.49, 间作效果最明显; 但不施氮相比, 差异不显著, 且不施氮时, LER 显著高于施氮量 30、60、120 kg/hm<sup>2</sup>。

表 1 间作和施肥对作物生产力的影响

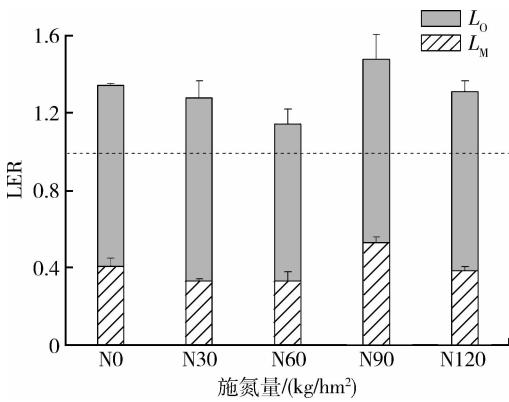
Table 1 Effects of intercropping and nitrogen fertilizer on crop productivity

kg/hm<sup>2</sup>

| 施氮量 | 燕麦          |           | 绿豆        |         | 系统         |           | LER  | A <sub>om</sub> |
|-----|-------------|-----------|-----------|---------|------------|-----------|------|-----------------|
|     | 单作          | 间作        | 单作        | 间作      | 单作         | 间作        |      |                 |
| 0   | 1 900.0 c   | 1 783.3 b | 1 520.5 b | 630.0 b | 1 773.5 d  | 2 413.3 a | 1.35 | 0.16            |
| 30  | 2 108.3 ab  | 2 066.4 a | 1 816.8 a | 613.8 b | 2 011.1 ab | 2 617.2 a | 1.29 | 0.46            |
| 60  | 2 227.3 a   | 1 720.0 b | 1 837.5 a | 621.1 b | 2 097.4 a  | 2 439.9 a | 1.15 | 0.15            |
| 90  | 1 945.0 bc  | 1 763.3 b | 1 564.8 b | 836.9 a | 1 818.3 cd | 2 600.2 a | 1.49 | -0.24           |
| 120 | 2 057.3 abc | 1 820.0 b | 1 611.8 b | 628.9 b | 1 908.8 bc | 2 448.9 a | 1.32 | 0.15            |
| 平均  | 2 047.6     | 1 830.6   | 1 670.3   | 666.1   | 1 921.8    | 2 503.9   | 1.32 | 0.14            |

注：同列不同字母表示 5% 水平差异显著，下同。

同一施氮水平下，燕麦部分的土地当量比  $L_O$  (0.82~0.95) 均大于绿豆的  $L_M$  (0.34~0.54)，表明增产的组分主要是燕麦，间作对绿豆的影响较小。 $L_O$ 、 $L_M$  值均是施氮量为 90 kg/hm<sup>2</sup> 时最大，分别为 0.95、0.54 (图 3)。



$L_O$ 、 $L_M$  分别代表燕麦、绿豆部分的土地当量比。

图 3 收获时燕麦/绿豆间作系统土地当量比

Fig. 3 Land equivalent ratio (LER) for mung bean-oat intercrops at harvest time

### 2.3 间作和施氮量对生物产量的影响

施氮量显著 ( $P < 0.05$ ) 影响燕麦生物产量。不施氮时，生物产量最高，与施氮量 90 kg/hm<sup>2</sup> 差异不显著，这可能与多年施肥的肥料后效有关<sup>[21]</sup>。

施氮量显著影响绿豆生物产量。随着施氮量的增加，单作绿豆生物产量呈先增加后减少的趋势，可能与豆科作物在高氮条件下，固氮酶受到抑制，导致的“氮阻遏”有关<sup>[25]</sup>；施氮量为 60 kg/hm<sup>2</sup> 时，生物产量最高，与施氮量 90 kg/hm<sup>2</sup> 差异不显著。

间作系统 (SP) 中，施氮量为 90 kg/hm<sup>2</sup> 时生物产量最高为 9 761.5 kg/hm<sup>2</sup>，不施氮次之为 9 133.2 kg/hm<sup>2</sup>；施氮量为 120 kg/hm<sup>2</sup> 最低，仅为 7 927.7 kg/hm<sup>2</sup>。

### 2.4 间作和施氮量对作物地上部氮素吸收的影响

与单作系统相比，施氮量为 0、90、120 kg/hm<sup>2</sup> 时，间作系统氮素吸收均表现出一定的间作优势， $LER_N$  均大于 1。施氮量为 90 kg/hm<sup>2</sup> 时最大，与不施氮处理差异不显著 ( $P > 0.05$ ) (表 3)。随着施氮量的增加，间作系统作物地上部氮素吸收量呈增加

表 2 间作和施肥对生物产量的影响

Table 2 Effects of intercropping and nitrogen fertilizer on biological yield of crop

kg/hm<sup>2</sup>

| 施氮量 | 燕麦        |            | 绿豆         |            | 系统         |           |
|-----|-----------|------------|------------|------------|------------|-----------|
|     | 单作        | 间作         | 单作         | 间作         | 单作         | 间作        |
| 0   | 9 157.8 a | 6 657.2 bc | 7 360.8 b  | 2 476.0 a  | 8 889.9 a  | 9 133.2 b |
| 30  | 7 131.3 c | 6 887.2 b  | 7 524.0 b  | 1 810.3 bc | 7 559.5 b  | 8 697.5 b |
| 60  | 7 992.3 b | 6 439.2 c  | 11 301.0 a | 1 617.0 c  | 8 837.2 ab | 8 056.2 c |
| 90  | 8 880.3 a | 7 496.2 a  | 10 363.0 a | 2 265.3 ab | 9 374.5 a  | 9 761.5 a |
| 120 | 8 329.8 b | 5 619.2 d  | 7 832.2 b  | 2 308.5 ab | 8 501.7 ab | 7 927.7 c |
| 平均  | 8 298.3   | 6 619.8    | 8 876.2    | 2 095.0    | 8 632.6    | 8 715.2   |

表3 间作和施肥对作物地上部氮素吸收的影响

Table 3 Effects of intercropping and nitrogen fertilizer on nitrogen uptake of above-ground part of crop  
kg/hm<sup>2</sup>

| 施氮量 | 燕麦      |         | 绿豆       |         | 系统 SP   |         | LER <sub>N</sub> |
|-----|---------|---------|----------|---------|---------|---------|------------------|
|     | 单作      | 间作      | 单作       | 间作      | 单作      | 间作      |                  |
| 0   | 114.7 a | 82.2 c  | 173.6 d  | 56.0 b  | 134.3 b | 138.2 b | 1.14 ab          |
| 30  | 120.4 a | 84.7 c  | 226.5 c  | 50.8 b  | 155.8 b | 135.5 b | 0.95 b           |
| 60  | 114.7 a | 88.5 bc | 353.7 ab | 59.2 ab | 194.4 a | 147.7 b | 0.94 b           |
| 90  | 118.9 a | 122.2 a | 382.4 a  | 86.9 ab | 206.8 a | 189.1 a | 1.20 a           |
| 120 | 134.0 a | 104.8 b | 311.4 b  | 78.1 a  | 193.2 a | 183.0 a | 1.04 ab          |
| 平均  | 120.6   | 96.5    | 289.5    | 62.2    | 176.9   | 158.7   | 1.05             |

趋势,但增加到一定程度(120 kg/hm<sup>2</sup>),作物吸氮量差异不显著。

## 2.5 间作和施氮量对作物氮素吸收利用率的影响

间作对氮素吸收和利用影响达到显著水平( $P < 0.05$ ),间作系统中氮素收获指数和氮素经济

利用率分别比单作平均增加 39%和 47%,而氮素吸收率和氮素干物质利用率下降,分别比单作平均下降 14%和 22%。氮素经济利用率明显低于氮素干物质利用率(表 4)。表明间作时虽然氮素的吸收率下降,但籽粒氮积累量增加。且籽粒对氮的利用率

表4 间作和氮肥对作物氮素吸收利用率的影响

Table 4 Effects of intercropping and nitrogen fertilizer on nitrogen uptake and utilization efficiency of crop

| 施氮量<br>kg/hm <sup>2</sup> | 氮素收获指数  |         | 氮素吸收率/(kg/kg) |         | 氮素经济利用率/(kg/hm <sup>2</sup> ) |         | 氮素干物质利用率/(kg/kg) |        |
|---------------------------|---------|---------|---------------|---------|-------------------------------|---------|------------------|--------|
|                           | 单作      | 间作      | 单作            | 间作      | 单作                            | 间作      | 单作               | 间作     |
| 0                         | 0.42 a  | 0.55 ab | —             | —       | 13.4 a                        | 17.7 a  | 57.1 a           | 43.2 a |
| 30                        | 0.42 a  | 0.59 a  | 5.19 a        | 4.51 a  | 13.0 a                        | 19.5 a  | 55.6 a           | 44.3 a |
| 60                        | 0.35 ab | 0.47 bc | 3.24 b        | 2.46 b  | 10.8 b                        | 16.8 ab | 47.4 b           | 37.6 b |
| 90                        | 0.28 c  | 0.44 c  | 2.30 c        | 2.10 bc | 8.57 c                        | 13.8 b  | 43.8 b           | 37.7 b |
| 120                       | 0.32 bc | 0.43 c  | 1.61 d        | 1.52 c  | 9.53 bc                       | 13.4 b  | 42.4 b           | 29.8 c |
| 平均                        | 0.36    | 0.50    | 3.09          | 2.65    | 11.0                          | 16.2    | 49.3             | 38.5   |

较低,作物对氮素的利用发生了“奢侈吸收”。

施氮量为 30 kg/hm<sup>2</sup>,间作系统中氮素收获指数、氮素经济利用率、氮素干物质利用率均达到最大值,显著高于其他处理( $P < 0.05$ ),与不施氮处理差异不显著。

## 3 讨论

### 3.1 种植方式对作物产量和氮素吸收积累的影响

绿豆 || 燕麦具有显著的间作优势。可能的原因主要是豆科与禾本科间作后缓解了对土壤氮的竞争,发生了氮营养生态位的分离:禾本科通过竞争吸收土壤有效氮,降低了豆科根区的有效氮含量,为豆

科作物解除了氮阻遏的障碍,增加了豆科作物对生物固氮的依赖,减少对土壤有效氮的吸收,把土壤中的有效氮节约供给与之相伴的禾本科作物利用,促进氮的互补利用,实现间作优势的最大化<sup>[8,25]</sup>。用<sup>15</sup>N同位素标记试验发现在小麦 || 蚕豆种间根系分隔试验中,随着种间根系作用的增强,豆科只吸收很少的氮肥,留下大部分肥料氮供禾本科吸收<sup>[7]</sup>。

试验中燕麦竞争能力大于绿豆的竞争能力,可能的原因是禾本科作物的根生长快,扎的深,生长初期对土壤和肥料氮的竞争能力强于豆科作物,使得豆科的生长及对氮的吸收利用受到抑制<sup>[24]</sup>,这与 Mucheru-Muna<sup>[18]</sup>等在玉米 || 小麦, Martin<sup>[26]</sup>等在

大麦||大豆研究中结果一致。试验中间作时绿豆由于前期遭遇低温条件,生长缓慢,后期在水分、光照等竞争方面存在劣势,也可能造成绿豆竞争能力偏低。试验中施氮量为 $90\text{ kg/hm}^2$ 时,间作绿豆竞争能力强于燕麦,这可能与取样误差、地力不均等有关。

豆科与禾本科间作有利于作物对氮素的吸收积累。肖靖秀等<sup>[16]</sup>研究大麦||蚕豆:地上氮素累积吸收量比单作提高 $7.0\%\sim 32.1\%$ ;李隆等<sup>[27]</sup>研究小麦||大豆:氮的吸收总量比单作提高了 $24\%\sim 39\%$ 。李玉英等<sup>[1]</sup>研究,与单作相比蚕豆||玉米氮素利用率从 $3\%$ 下降到 $1\%$ 。本试验中,燕麦||绿豆氮素吸收优势明显,间作时虽然氮肥的吸收率下降,但籽粒的氮积累量增加。籽粒对氮的利用率低于干物质的利用,间作系统中高氮肥量和种间互作在提高作物生产力的同时,发生了“奢侈吸收”现象<sup>[1]</sup>。可能的原因是间作系统中,禾本科对氮肥的竞争能力强于豆科,以及对氮的氮营养互补机制。且在低氮条件下,这种氮营养互补机制互补性更高<sup>[24]</sup>。试验中单作燕麦产量在施氮量为 $60\text{ kg/hm}^2$ 时达到最高,与周川姣等<sup>[28]</sup>研究白燕2号施氮量为 $90\text{ kg/hm}^2$ 时产量最高结果不一致,这可能与气候、栽培等条件差异及当地多年种植燕麦施肥充足有关。

### 3.2 施氮量对间作系统产量及氮素吸收累积的影响

不施氮或施氮量低时,在不降低产量的同时,禾本科与豆科间作可能会获得更高的LER值、生物产量及氮积累量。肖焱波等研究小麦||蚕豆表明:在同一施氮水平下,间作由于根系相互作用,显著地增加了小麦对氮素的吸收,改善了小麦生长,这种现象在不施氮时表现更为明显<sup>[8]</sup>;Bhim等<sup>[24]</sup>研究表明:不施氮时,豌豆||小麦系统产量最高;Hauggaard-Nielsen等<sup>[29]</sup>研究豌豆||大麦结果表明,不施氮时LER值最高为1.22;Jensen等<sup>[30]</sup>研究豌豆||大麦结果表明,不施氮时LER值最高为1.25。本试验低施氮量 $30\text{ kg/hm}^2$ 时燕麦||绿豆产量最高为 $2\ 617.2\text{ kg/hm}^2$ ;不施氮时得到较高的LER值为1.35,虽低于施氮量为 $90\text{ kg/hm}^2$ ,但差异不显著。不施氮时生物产量为 $9\ 133.2\text{ kg/hm}^2$ ,仅次于施氮量为施氮量 $90\text{ kg/hm}^2$ ( $9\ 761.5\text{ kg/hm}^2$ );施氮量为 $30\text{ kg/hm}^2$ ,间作系统中氮素收获指数、氮素经济利用率、氮素干物质利用率均达到最大值,显著高于其他处理( $P<0.05$ ),与不施氮处理差异不显著。可能的原因是氮肥较低时禾本科与豆科间作系统的

氮利用互补性会更高,此时禾本科需要较多的无机氮,促使豆科通过加强共生固氮来满足系统的需求。虽然禾本科随着氮肥的增加,竞争力会增强<sup>[24]</sup>,但LER值、生物产量等下降,同时说明施氮量对豆科影响更大。间作条件下,施氮量增加到一定程度( $120\text{ kg/hm}^2$ ),其间作系统产量优势消失,可能与豆科“氮阻遏”有关,豆科作物在高氮水平下,不能合成固氮酶或固氮酶活性丧失,减少了被固定氮向非豆科作物的转移影响豆科的生长及整个系统的生长受到影响<sup>[25]</sup>,多施的氮肥不能被系统利用,既增加了生产成本,又加重了环境的负担。这与前人在禾本科豆科间作系统中进行氮肥优化处理,结果一致<sup>[16]</sup>。不同施氮水平下,边行效应的竞争<sup>[27]</sup>、作物品种差异<sup>[16]</sup>等都可能影响影响间作氮养分吸收优势的形成。

## 4 结 论

从农业可持续的角度考虑,合理施用氮肥在燕麦、绿豆间作系统的高效生产中是必不可少的。间作时,燕麦对资源的利用以及获取有效资源的能力强于绿豆,形成了禾本科与豆科竞争能力的动态变化。不施氮或施氮量低时,绿豆、燕麦间作在不降低产量的同时,可能会获得较高的产量、LER值、生物产量及氮积累量,在白城地区土壤、生态环境资源有限的情况下,这样的系统有益于形成的可持续的植物生长系统。

总之,靠单纯大剂量施用化学氮肥以提高作物产量的局面必须改变,我们有必要积极探索如何合理有效地施用化学氮肥,尽可能高效率地发挥豆科与禾本科间作优势。深入研究豆禾间作优势的作用机理,找出绿豆、燕麦间作中的最适施氮水平,以达到减低氮肥用量仍保高产的目的。

## 参 考 文 献

- [1] 李玉英,余常兵,孙建好,等.蚕豆/玉米间作系统经济生态施氮量及对氮素环境承受力[J].农业工程学报,2008,24(3):223-227
- [2] 金绍龄,张丽慧,李隆.小麦玉米带田一种作物施用氮肥对配对作物氮营养的影响[J].西北农业学报,1993,2(3):1-6
- [3] 金绍龄,李隆,张丽慧,等.小麦/玉米带田作物氮营养特点[J].西北农业大学学报,1996(5):46-52
- [4] 吕耀.农业生态系统中氮素造成的非点源污染[J].农业环境保护,1998,17(1):35-39

- [5] 李荣刚,崔玉亭,程序. 苏南太湖地区水稻氮肥施用与环境可持续发展[J]. 耕作与栽培,1999(4):49-50
- [6] 张维理,田哲旭,张宁,等. 我国北方农用氮肥造成地下水硝酸盐污染的调查[J]. 植物营养与肥料学报,1995(2):82-89
- [7] 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
- [8] 肖焱波,段宗颜,金航,等. 小麦/蚕豆间作体系中的氮节约效应及产量优势[J]. 植物营养与肥料学报,2007(2):267-271
- [9] Fujita K,Ofosu-Budu K G,Ogata S. Biological nitrogen fixation in mixed legume-cereal cropping systems[J]. Plant and Soil, 1992,141(1):155
- [10] Fan F,Zhang F,Song Y, et al. Nitrogen fixation of faba bean (*Vicia faba* L.) interacting with a non-legume in two contrasting intercropping systems[J]. Plant and Soil,2006,283(1):275
- [11] 李隆,杨思存,孙建好,等. 小麦/大豆间作中作物种间的竞争作用和促进作用[J]. 应用生态学报,1999(2):70-73
- [12] 王旭,曾昭海,朱波,等. 燕麦与箭筈豌豆不同混作模式对根际土壤微生物数量的影响[J]. 草业学报,2009(6):151-157
- [13] 安成孝. 燕麦与箭舌豌豆混播对产草量的影响[J]. 草与畜杂志,1986(4):9-10
- [14] 陈恭. 燕麦与绿豆、箭筈豌豆间作生产模式及根际沉积效应[D]. 北京:中国农业大学,2011
- [15] 焦念元,宁堂原,赵春,等. 玉米花生间作复合体系光合特性的研究[J]. 作物学报,2006(6):917-923
- [16] 肖靖秀,汤利,郑毅,等. 大麦/蚕豆间作条件下供氮水平对作物产量和大麦氮吸收累积的影响[J]. 麦类作物学报,2011(3):499-503
- [17] 肖焱波,段宗颜,金航,等. 小麦/蚕豆间作体系中的氮节约效应及产量优势[J]. 植物营养与肥料学报,2007,13(2):267-271
- [18] Mucheru-Muna M, Pypers P, Mugendi D, et al. A staggered maize - legume intercrop arrangement robustly increases crop yields and economic returns in the highlands of Central Kenya [J]. Field Crops Research,2010,115(2):132-139
- [19] Li W,Li L,Sun J, et al. Effects of intercropping and nitrogen application on nitrate present in the profile of an Orthic Anthrosol in Northwest China [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment,2005,105(3):483-491
- [20] 陈远学. 小麦/蚕豆间作系统中种间相互作用与氮素利用、病害控制及产量形成的关系研究[D]. 中国农业大学,2007
- [21] 周川姣,肖相芬,周顺利,等. 施氮量对两种类型燕麦物质积累和产量的影响[J]. 作物杂志,2009(3):58-61
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3版. 北京:中国农业出版社,2005
- [23] Willey R W. Intercropping-its importance and research needs [J]. Competition and yield advantages. 1979,32:2-10
- [24] Bhim B, Ghaley H H. Intercropping of wheat and pea as influenced by nitrogen fertilization [J]. Nutrient Cycling In Agroecosystems,2005,73:201-212
- [25] 陈文新,陈文峰. 发挥生物固氮作用 减少化学氮肥用量[J]. 中国农业科技导报,2004(6):3-6
- [26] Martin M P L D, Snaydon R W. Root and shoot interactions between barley and field beans when intercropped [J]. Appl Ecol,1982,19:263-272
- [27] 李隆,李晓林,张福锁,等. 小麦大豆间作条件下作物养分吸收利用对间作优势的贡献[J]. 植物营养与肥料学报,2000,6(2):140-146
- [28] 周川姣,肖相芬,周顺利,等. 施氮量对两种类型燕麦物质积累和产量的影响[J]. 作物杂志,2009(3):58-61
- [29] Hauggaard-Nielsen H, Jensen E S. Evaluating pea and barley cultivars for complementarity in intercropping at different levels of soil N availability[J]. Field Crops Research,2001,72(3):185-196
- [30] Jensen E S. Grain yield, symbiotic N<sub>2</sub> fixation and interspecific competition for inorganic N in pea-barley intercrops[J]. Plant and Soil,1996,182:25-38

责任编辑:袁文业