

## 西北地区不同间套作模式养分吸收利用及其对产量优势的影响

唐明明<sup>1,3</sup> 董楠<sup>1</sup> 包兴国<sup>2</sup> 卢秉林<sup>2</sup> 张炜平<sup>1</sup> 张美俊<sup>3</sup> 章芳芳<sup>1</sup> 李隆<sup>1\*</sup>

(1. 中国农业大学 资源与环境学院/生物多样性与有机农业北京市重点实验室,北京 100193;

2. 甘肃省农业科学院 土壤肥料与节水农业研究所,兰州 730070;

3. 山西农业大学 农学院,山西 太谷 030801)

**摘要** 养分吸收和利用对间套作产量优势有重要影响,而西北地区近年来发展的间套作模式中养分吸收和利用研究较少。本研究采用田间小区试验,比较了西北地区新型间套作模式玉米/马铃薯、玉米/油菜、大豆/马铃薯、大豆/油菜和马铃薯/油菜的间作优势以及成熟期养分吸收量和利用效率对间作优势的影响。结果表明,玉米/马铃薯、玉米/油菜、大豆/油菜和大豆/马铃薯4种间作模式具有间作产量优势,经济效益高于相应单作。马铃薯/油菜间作无产量优势。玉米/马铃薯、玉米/油菜、大豆/马铃薯和大豆/油菜间作体系中作物氮、磷和钾养分吸收总量分别高于相应单作10%~41%、8%~21%和11%~34%;马铃薯/油菜间作体系作物氮、磷和钾吸收量分别低于单作35%、42%和63%。玉米/油菜和大豆/油菜间作作物氮、磷和钾的利用效率分别高出相应单作10%~21%、5%~7%和15%~17%;玉米/马铃薯间作氮和钾利用效率间作比单作低3%和4%,而磷利用效率高于单作21%;大豆/马铃薯间作作物氮、磷和钾的利用效率分别比单作低15%、3%和14%;马铃薯/油菜间作氮磷利用效率间作低于单作18%和4%,钾利用效率间作高于单作20%。本研究证明并非所有间作模式都具有间作产量优势,并且间作优势主要源于养分吸收量的增加。

**关键词** 养分吸收;养分利用;产量优势;间套作;生态位分离

**中图分类号** S 344.2

**文章编号** 1007-4333(2015)05-0048-09

**文献标志码** A

## Effects of nutrient uptake and utilization on yield of intercropping systems in Northwest China

TANG Ming-ming<sup>1,3</sup>, DONG Nan<sup>1</sup>, BAO Xing-guo<sup>2</sup>, LU Bing-lin<sup>2</sup>,  
ZHANG Wei-ping<sup>1</sup>, ZHANG Mei-jun<sup>3</sup>, ZHANG Fang-fang<sup>1</sup>, LI Long<sup>1\*</sup>

(1. Beijing key Laboratory of biodiversity and Organic Farming/College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Soil and Fertilizer and Water-saving Institute, Gansu Academy of Agriculture Sciences, Lanzhou 730030, China;

3. College of Agriculture, Shanxi Agriculture University, Taigu 030801, China)

**Abstract** Nutrient uptake and utilization play an important role in yield advantage of intercropping, however, effects of nutrient and utilization on yield advantage of new intercropping systems are rarely explored in Northwest China, a field experiment was carried out to investigate effects of nutrient uptake and utilization on yield advantage of maize/potato, maize/rapeseed, soybean/potato, soybean/rapeseed and potato/rapeseed in Northwest China. The results showed that maize/potato, maize/rapeseed, soybean/potato and soybean/rapeseed intercropping systems had yield advantages with a land equivalent ratio ( $LER$ )  $> 1$ , and economic benefits was higher than those in the corresponding sole cropping systems, potato/rapeseed intercropping systems had a yield disadvantage with a land equivalent ratio ( $LER$ )  $< 1$ .

收稿日期: 2014-12-12

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(2014XJ031); 国家科技支撑计划项目(2012BAD14B04, 2012BAD14B10)

第一作者: 唐明明, 硕士研究生, E-mail: tangmingming1988@126.com

通讯作者: 李隆, 教授, 主要从事生物多样性与资源利用研究, E-mail: lilong@cau.edu.cn

Nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) uptake of maize/potato, maize/rapeseed, soybean/potato and soybean/rapeseed intercropping systems was increased by 10% – 41% ,8% – 21% and 11% – 34% compared to the weighted means of corresponding sole cropping systems. In contrast, potato/rapeseed intercropping systems decreased N, P and K uptake by 35% ,42% and 63% ,compared with corresponding weighted mean of sole cropping systems. N, P and K utilization efficiency by maize/rapeseed and soybean/ rapeseed intercropping systems were 10% – 21% , 5% – 7% and 15% – 17% higher than the weighted means of sole cropping systems. N and K utilization efficiency in intercropping systems of maize/potato was 3% and 4% lower than those in the corresponding sole cropping systems. P utilization efficiency in maize/potato intercropping was 21% higher than that in the corresponding sole cropping systems. The N, P and K utilization efficiency in soybean/potato intercropping systems was reduced by 15% ,3% and 14% ,compared to the weighted means of the sole cropping systems. N and P utilization efficiency in potato/rapeseed intercropping was 18% and 4% lower than that in the corresponding sole cropping systems. K utilization efficiency in maize/potato intercropping was 20% higher than that in the corresponding sole cropping systems. Not all intercropping systems have yield advantage, and yield advantage of intercropping was mainly attributed to enhanced nutrient uptake efficiency.

**Key words** nutrient uptake; nutrient utilization; yield advantage; intercropping; niche differentiation

间套作是中国传统耕作方式之一,也是河西走廊一熟制灌区高产高效的主要种植方式,间套作能够在相近生长季节内和相同土地面积上收获到2种以上作物的最适经济产量,从而降低了逆境风险和市场风险,实现了养分资源的高效利用<sup>[1]</sup>。以往研究表明间作比单作有明显的产量优势<sup>[2-5]</sup>。合理的利用间作种植技术还可以增加氮、磷和钾的吸收利用效率<sup>[6-8]</sup>。在不同施肥和不同行比条件下,硬粒小麦和菜豆间作干物质累积量和氮素累积量间作均高于单作<sup>[7]</sup>。在高氮低磷土壤上研究发现玉米/蚕豆间作不仅促进了蚕豆对磷的吸收,而且还改善了玉米的磷营养<sup>[8]</sup>;间作无论在产量上还是营养吸收上都具有优势<sup>[9-12]</sup>。间作优势在作物营养方面的基础主要是养分吸收量的增加和养分利用效率的提高<sup>[13]</sup>。李隆等<sup>[9]</sup>在小麦/大豆间作中的研究发现,在该模式中间作优势的主要原因是养分吸收量的增加,而并非利用效率的提高。党小燕等<sup>[14]</sup>在研究棉花和花生、洋葱、萝卜间作的养分吸收利用效率也得到相同结论。

近年来西北地区发展了很多新型间作模式,然而对于这些间作模式养分吸收利用的研究报道还较少。因此,本研究拟通过田间试验来比较西北地区近年来生产中发展起来的玉米/马铃薯、玉米/油菜、大豆/马铃薯、大豆/油菜和马铃薯/油菜5种间作模式的间作优势以及成熟期养分吸收量和利用效率对间作优势的影响。探讨作物营养对间作优势的贡献,以期为养分资源的高效利用提供科学依据,同时为新的间套作模式发展提供理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验点概况

试验于2013年安排在甘肃省武威市永昌镇白云村(38°37'N, 102°40'E)。海拔1504 m,  $\geq 0$  °C和10 °C的有效积温分别为3646 °C和3149 °C,无霜期170~180 d,年降雨量150 mm,供试土壤为石灰性灌漠土,耕层土壤含有机质19.14 g/kg,全氮1.18 g/kg,碱解氮68.8 mg/kg,速效磷17.3 mg/kg,速效钾233 mg/kg。

### 1.2 试验设计

试验采用单因素随机区组设计,设5种间作组合和4种作物单作,分别为:玉米/马铃薯、玉米/油菜、大豆/马铃薯、大豆/油菜、马铃薯/油菜5种间作组合和玉米单作、大豆单作、油菜单作、马铃薯单作。设3次重复,共计27个小区。

本试验不施农家肥,单作玉米、玉米/马铃薯和玉米/油菜模式施N 330 kg/hm<sup>2</sup>,其余模式N 180 kg/hm<sup>2</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 150 kg/hm<sup>2</sup>, 试验小区施N 120 kg/hm<sup>2</sup>和全部磷肥,其余氮肥于拔节前期和大喇叭口期(结合灌水)作为追肥分两次施入。其他管理按照当地农民习惯进行。

供试玉米品种为‘先玉335’(Zea mays L. cv. Xianyu No. 335),马铃薯品种为‘LK99’(Solanum tuberosum L. cv. LK No. 99),大豆品种为‘丰豆19’(Glycine max L. cv. Fengdou No. 19),油菜品种为‘天祝小油菜’(Brassica campestris L. cv. Tianzhu)

在玉米/马铃薯间作处理中,采用2行玉米、2

行马铃薯的间作种植形式,玉米行间距 0.4 m,马铃薯行间距 0.2 m,玉米与马铃薯间距 0.4 m,一个间作带宽 1.4 m;在玉米/油菜间作处理中,采用 2 行玉米、4 行油菜的间作种植形式,玉米行间距 0.4 m,油菜行间距 0.1 m,玉米与油菜间距 0.25 m,一个间作带宽 1.2 m;在大豆/马铃薯间作处理中,采用 2 行大豆、2 行马铃薯的间作种植形式,大豆行间距 0.2 m,马铃薯行间距 0.2 m,大豆与马铃薯间距 0.3 m,一个间作带宽 1.0 m;在大豆/油菜间作处理中,采用 2 行大豆、4 行油菜的间作种植形式,大豆行间距 0.2 m,油菜行间距 0.1 m,大豆与油菜间距 0.15 m,一个间作带宽 0.8 m。单作作物都是等行距种植,行距与间作时相同,单作和间作小区面积相同,为  $3.6 \text{ m} \times 6 \text{ m} = 21.6 \text{ m}^2$ 。

玉米和马铃薯覆膜种植,马铃薯垄作,其他作物平作;在作物整个生长期,所有小区均给予充足的灌水,其中单作玉米、单作大豆、玉米/马铃薯间作和 大豆/马铃薯间作各灌水 5 次,单作马铃薯灌水 4 次,单作油菜灌水 3 次,玉米/油菜间作、大豆/油菜间作和马铃薯/油菜间作各灌水 7 次,每次灌水量 75 mm。

油菜于 3 月 27 日播种,7 月 10 日收获;玉米、马铃薯和大豆于 4 月 17 日播种,其中马铃薯和大豆 8 月 25 日收获,玉米 10 月 4 日收获。

### 1.3 取样及测定方法

作物成熟时选取完整测产带,测定生物学产量和籽粒产量;在取样带上分别取 3 株玉米和马铃薯、5 株大豆、4 行  $\times$  20 cm 油菜为植物样测定养分含量;植株氮磷钾含量分别用凯氏定氮法、钒钼黄比色法和火焰光度计法测定,并根据作物的生物学产量折算为作物的氮、磷和钾吸收量。

## 1.4 计算方法

### 1.4.1 间作优势

土地当量比 LER 作为衡量产量优势的指标:

$$\text{LER} = (Y_{ic}/Y_{sc}) + (Y_{ic1}/Y_{sc1}) \quad (1)$$

式中:  $Y_{ic}$  和  $Y_{ic1}$  分别代表间作总面积上某作物的产量;  $Y_{sc}$  和  $Y_{sc1}$  分别为相应单作作物的产量。当  $\text{LER} > 1$ , 表明间作有优势; 当  $\text{LER} < 1$  为间作劣势<sup>[15]</sup>。

### 1.4.2 经济效益

经济效益是总产值与投入总成本的差值,其中投入总成本包括种子、化肥和用水费用。各项投入和收益均按当地水平计算。

### 1.4.3 单位面积产量的分解<sup>[16]</sup>

$$\text{产量} / \text{面积} = (\text{产量} / \text{养分吸收量}) \times (\text{养分吸收量} / \text{面积}) \quad (2)$$

式中,右边第 1 项为养分利用效率,第 2 项为养分吸收(捕获)效率。

### 1.4.4 养分吸收优势

通常采用下式,比较间作系统养分吸收量相对于单作养分吸收量的变化。以磷为例:

$$\Delta\text{PU} = \{[\text{PU}_{ic}/(F_c \times \text{PU}_{sc} + F_{c1} \times \text{PU}_{sc1})] - 1\} \times 100 \quad (3)$$

这里单作养分吸收量不是指某一种作物的,而是 2 种单作作物养分吸收量以间作比例为权重的加权平均值。式中  $\text{PU}_{ic}$  为间作中 2 种作物的总吸磷量,  $\text{PU}_{sc}$  和  $\text{PU}_{sc1}$  分别为相应单作作物的吸磷量,  $F_c$  和  $F_{c1}$  分别为间作中两种作物的比例,其中  $F_c = D_c / (D_c + D_{c1})$ ,  $D_c$  和  $D_{c1}$  分别为间作中两种作物所占土地面积。实际上,  $(F_c \times \text{PU}_{sc} + F_{c1} \times \text{PU}_{sc1})$  为按间作比例为权重加权平均的单作吸磷量。 $\Delta\text{PU}$  的正或负反映了间作吸磷量相对于单作的增加或减少<sup>[16]</sup>。氮和钾的计算方法相同。

### 1.4.5 养分利用效率比

仍以磷为例,磷利用效率定义为单位磷吸收量所能生产的地上部干物质量。间作磷利用效率相对于单作的增减( $\Delta\text{PUE}$ )用如下公式计算<sup>[16]</sup>:

$$\Delta\text{PUE} = \{[Y_{ic}/\text{PU}_{ic}]/[F_c \times Y_{sc}/\text{PU}_{sc} + F_{c1} \times Y_{sc1}/\text{PU}_{sc1}] - 1\} \times 100 \quad (4)$$

式中  $Y$  是产量。 $\Delta\text{PUE}$  反映了作物间作后养分利用效率的增加或减少。氮和钾用同法计算。

### 1.4.6 养分利用效率对产量优势的贡献

以磷为例,定义一种作物在间作和单作中的吸收量和利用效率分别为  $A_{ic}$ 、 $A_{sc}$  和  $E_{ic}$ 、 $E_{sc}$ ; 配对作物分别为  $A_{ic1}$ 、 $A_{sc1}$  和  $E_{ic1}$ 、 $E_{sc1}$ 。则式(1)变为:

$$\text{LER} = (A_{ic}/A_{sc}) \times (E_{ic}/E_{sc}) + (A_{ic1}/A_{sc1}) \times (E_{ic1}/E_{sc1}) \quad (5)$$

令  $ac = (A_{ic}/A_{sc}) - 1$ ,  $ac_1 = (A_{ic1}/A_{sc1}) - 1$ ;  $ec = (E_{ic}/E_{sc}) - 1$ ,  $ec_1 = (E_{ic1}/E_{sc1}) - 1$ , 代入(4)式并整理,得:

$$\text{LER} = 1 + (1 + ac + ac_1) + (ec + ec_1) + (ac \times ec + ac_1 \times ec_1) \quad (6)$$

式中:  $(1 + ac + ac_1)$  为间作相对于单作养分吸收量增减对间作产量优势的贡献;  $(ec + ec_1)$  是间作相对于单作养分利用效率的变化对间作产量优势的贡献; 同理,  $(ac \times ec + ac_1 \times ec_1)$  则是养分吸收和利用

效率交互作用对间作优势的贡献<sup>[17]</sup>。氮和钾用同法计算。

当比较间作与单作产量及养分吸收量时,均以可比面积为基础。采用加权平均法,将对应单作体系中各作物产量和养分吸收量根据他们所在的间作系统所占面积比例加权平均,与相同的间作体系做比较。

统计分析方法:采用 SAS 软件对数据进行单因素方差分析,5%显著水平。

## 2 结果与分析

### 2.1 产量优势及经济效益分析

玉米与马铃薯、油菜间作,大豆与马铃薯、油菜间作时,以籽粒产量和生物学产量为基础计算的 Land Equivalent Ratio (LER) 分别为 1.09、1.76、1.36、1.95 和 1.29、1.32、1.42、1.55,均大于 1(表 1),这 4 种间作模式具有间作产量优势;马铃薯与油菜间作后,以籽粒产量和生物学产量为基础计算的 Land Equivalent Ratio (LER) 为 0.87 和 0.76,均小于 1(表 1),该间作模式无间作产量优势。

玉米/油菜间作模式中,间作系统籽粒产量比单作提高 26%,差异显著(表 1),经济效益比单作提高 28%(表 2);大豆/油菜间作模式中,间作系统籽粒产量和生物学产量比单作分别提高 94%和 53%,差异达到显著水平(表 1),经济效益比单作提高 131%

(表 2);玉米/马铃薯间作模式中,间作系统生物学产量比单作增加 35%,差异显著(表 1),经济效益比单作增加 26%(表 2);大豆/马铃薯间作体系中,间作系统生物学产量比单作增加 32%,差异显著(表 1),经济效益比单作增加 50%(表 2);马铃薯和油菜间作,间作系统中籽粒产量和生物学产量比单作分别减少 68%和 45%(表 1),间作模式经济效益为负值(表 2)。

### 2.2 间作养分吸收量与单作养分加权平均吸收量的比较

玉米/马铃薯、大豆/马铃薯和大豆/油菜间作模式中,间作系统氮吸收量分别高于相应作物单作按照间作比例加权平均吸氮量 40%( $P=0.047$ )、47%( $P=0.044$ )、41%( $P=0.022$ );玉米与油菜间作后吸氮量变化未达显著水平( $P=0.360$ )(表 3)。马铃薯与油菜间作后间作系统氮吸收量相对于单作马铃薯与单作油菜按间作比例加权平均的氮吸收量降低 35%( $P=0.043$ )(表 3)。

玉米与马铃薯或者油菜间作、大豆与马铃薯或者油菜间作后,间作系统中作物吸磷量增加,与单作加权平均吸磷量差异未达到显著水平( $P=0.256$ ,  $P=0.214$ ,  $P=0.067$ ,  $P=0.252$ );马铃薯与油菜间作体系中作物吸磷量相对于单作按间作比例加权平均的吸钾量减少 42%( $P=0.023$ )(表 3)。

表 1 间作土地当量比、间作和单作体系中作物籽粒产量及生物学产量

Table 1 Grain yields, biological yields of intercropping and sole cropping and land equivalent ratios of intercropping

指标 Index	间作模式 Intercropping pattern	间作 Intercrops	单作 Sole crops	土地当量比 Land equivalent ratio
籽粒产量/ (kg/hm <sup>2</sup> ) Grain yields	玉米/马铃薯	15 435 a	13 656 a	1.09
	玉米/油菜	12 012 a	9 569 b	1.76
	大豆/马铃薯	9 134 a	7 659 a	1.36
	大豆/油菜	3 294 a	1 698 b	1.95
	马铃薯/油菜	2 373 b	7 367 a	0.87
生物学产量/ (kg/hm <sup>2</sup> ) Biological yields	玉米/马铃薯	26 560 a	19 683 b	1.29
	玉米/油菜	23 016 a	18 958 a	1.32
	大豆/马铃薯	13 341 a	10 105 b	1.42
	大豆/油菜	9 796 a	6 387 b	1.55
	马铃薯/油菜	5 784 b	10 425 a	0.76

注:不同小写字母表示同一间作模式下单间作系统在 0.05 水平差异显著。

Note: Values followed by different small letters are significantly different between intercropping and sole cropping at 0.05 level in LSD test.

表2 不同间作模式的经济效益

Table 2 Economic benefits of intercropping and sole cropping

元/hm<sup>2</sup>

间作模式 Intercropping pattern	处理 Treatment	总产值 Total output value	投入成本 Input costs	经济效益 Economic benefits
玉米/马铃薯 Maize/Potato	间作	30 703	7 188	23 515
	单作	25 385	6 743	18 642
玉米/油菜 Maize/Rapeseed	间作	28 111	3 876	24 235
	单作	22 115	3 179	18 936
大豆/马铃薯 Soybean/Potato	间作	19 364	6 469	12 895
	单作	15 002	6 386	8 616
大豆/油菜 Soybean/Rapeseed	间作	16 469	3 136	13 333
	单作	8 488	2 711	5 777
马铃薯/油菜 Potato/Rapeseed	间作	5 609	6 853	-1 244
	单作	12 379	6 340	6 039

注:单作经济效益表示2种单作作物按间作比例计算的加权平均值。

Note: Values are weighted means of corresponding sole cropping systems of economic benefits of sole crops.

表3 间作和单作体系中作物的养分吸收量

Table 3 Nutrients uptake (NU) of crops at harvest in intercropping and sole cropping system

养分 Nutrient	间作模式 Intercropping pattern	间作/ (kg/hm <sup>2</sup> ) Intercrops	单作加权平均/(kg/hm <sup>2</sup> ) Weighted mean of sole crops	养分吸收量的增减/% Changes in NU	差异显著性 Significant difference ( <i>P</i> )
氮 Nitrogen	玉米/马铃薯	394 a	281 b	40	0.047
	玉米/油菜	277 a	253 a	10	0.360
	大豆/马铃薯	324 a	221 b	47	0.044
	大豆/油菜	307 a	218 b	41	0.022
	马铃薯/油菜	133 b	204 a	-35	0.043
磷 Phosphorus	玉米/马铃薯	63 a	56 a	12	0.256
	玉米/油菜	59 a	48 a	21	0.214
	大豆/马铃薯	48 a	38 a	28	0.067
	大豆/油菜	39 a	33 a	20	0.252
	马铃薯/油菜	25 b	44 a	-42	0.023
钾 Potassium	玉米/马铃薯	381 a	309 a	23	0.193
	玉米/油菜	200 a	180 a	11	0.604
	大豆/马铃薯	357 a	254 b	41	0.042
	大豆/油菜	180 a	134 b	34	0.024
	马铃薯/油菜	91 b	247 a	-63	<0.010

注:不同小写字母表示同一间作模式下单间作系统在0.05水平差异显著。

Note: Values followed by different small letters are significantly different between intercropping and sole cropping at 0.05 level in LSD test.

大豆/马铃薯间作和大豆/油菜间作体系中钾吸收量相对于单作加权平均值分别增加 41% 和 34%，达到显著水平 ( $P=0.042, P=0.024$ )；玉米与马铃薯或油菜间作、大豆与马铃薯间作，间作体系中作物吸钾量与单作加权平均值比较未达显著水平 ( $P=0.193, P=0.604, P=0.241$ )；马铃薯与油菜间作后系统钾吸收量相对于单作加权平均值降低 63%

( $P<0.010$ )，与氮、钾变化相同(表 3)。

### 2.3 间作与单作养分利用效率的比较

玉米与油菜间作后氮素养分利用效率比单作加权平均高 21% ( $P=0.016$ )；玉米与马铃薯间作后磷的养分利用效率比单作按间作比例加权平均增加 21% ( $P=0.016$ )；其余模式养分利用效率相对于单作没有显著变化(表 4)。

表 4 间作和单作体系中作物的养分利用效率

Table 4 Nutrient use efficiency (NUE) of crops at harvest in intercropping and sole cropping system

养分 Nutrient	间作模式 Intercropping pattern	间作/ (kg/kg) Intercrops	单作加权平均/ (kg/kg) Mean of sole corps	养分利用效率的增减/% Changes in NUE	差异显著性 Significant difference( $P$ )
氮 Nitrogen	玉米/马铃薯	68 a	71 a	-4	0.794
	玉米/油菜	83 a	68 b	21	0.016
	大豆/马铃薯	42 a	48 a	-13	0.571
	大豆/油菜	42 a	39 a	10	0.331
	马铃薯/油菜	43 a	53 a	-18	0.357
磷 Phosphorus	玉米/马铃薯	423 a	349 b	21	0.016
	玉米/油菜	392 a	366 a	7	0.348
	大豆/马铃薯	277 a	295 a	-6	0.563
	大豆/油菜	308 a	295 a	5	0.745
	马铃薯/油菜	229 a	239 a	-4	0.778
钾 Potassium	玉米/马铃薯	71 a	73 a	-3	0.869
	玉米/油菜	116 a	101 a	15	0.347
	大豆/马铃薯	37 a	43 a	-13	0.161
	大豆/油菜	72 a	62 a	17	0.107
	马铃薯/油菜	63 a	53 a	20	0.079

注：不同小写字母表示同一间作模式下单间作系统在 0.05 水平差异显著。

Note: Values followed by different small letters are significantly different between intercropping and sole cropping at 0.05 level in LSD test.

### 2.4 养分吸收及利用效率对间作优势的贡献

在玉米/马铃薯、玉米/油菜、大豆/马铃薯和大豆/油菜间作模式中，氮、磷和钾养分吸收因子对间作优势的贡献为正，利用效率的贡献为负，吸收和利用效率交互作用的贡献也为负，说明玉米与马铃薯、油菜间作，大豆与马铃薯、油菜间作时，间作优势来源于养分吸收量的增加(表 5)。

马铃薯与油菜间作时，间作模式无产量优势；尽管氮、磷和钾养分吸收因子的贡献是正的，利用效率的贡献为负，吸收和利用效率交互作用的贡献也为负，后两者的绝对值大于前者，因而导致无间作优势(表 5)。

总之，本研究中的几种间作模式，间作优势在营养方面的基础主要来自间作相对于单作养分吸收效率的增加，而不是利用效率的改变。

表5 不同间作模式养分吸收和利用效率对土地当量比的贡献

Table 5 Contribution of nutrient uptake, utilization and their interaction to the land equivalent ratio (LER) in different intercropping systems

养分 Nutrient	间作模式 Intercropping pattern	土地当量比 LER	吸收因子 Uptake factor ( $1+ac+ac_1$ )	利用因子 Utilization factor ( $ec+ec_1$ )	交互因子 Interaction factor ( $ac \times ec + ac_1 \times ec_1$ )
氮 Nitrogen	玉米/马铃薯	1.29	1.94	-1.06	-0.6
	玉米/油菜	1.32	1.44	-0.87	-0.25
	大豆/马铃薯	1.42	2.24	-1.04	-0.77
	大豆/油菜	1.55	2.52	-1.13	-0.84
	马铃薯/油菜	0.76	0.86	-1.06	-0.04
磷 Phosphorus	玉米/马铃薯	1.29	1.29	-0.82	-0.19
	玉米/油菜	1.32	1.64	-0.97	-0.36
	大豆/马铃薯	1.42	2.09	-1.01	-0.66
	大豆/油菜	1.55	2.58	-1.11	-0.93
	马铃薯/油菜	0.76	0.77	-0.90	-0.11
钾 Potassium	玉米/马铃薯	1.29	1.46	-0.94	-0.24
	玉米/油菜	1.32	1.68	-0.89	-0.47
	大豆/马铃薯	1.42	2.27	-1.09	-0.76
	大豆/油菜	1.55	2.26	-1.06	-0.65
	马铃薯/油菜	0.76	0.48	-0.83	-0.11

### 3 结论与讨论

#### 3.1 间作产量优势

本研究结果表明玉米/马铃薯、玉米/油菜、大豆/马铃薯、大豆/油菜间作体系,无论是以籽粒产量还是生物学产量为基础计算的土地当量比(LER)均大于1(表1),这4种间作模式具有间作产量优势,经济效益也是增加的。许多研究已经证明多种间作体系存在间作优势。Li等<sup>[18]</sup>研究发现玉米和马铃薯间作种植,提高光的利用效率,增加田间空气流通,有利于农作物的生长,从而获得产量优势。Chai等<sup>[19]</sup>研究得出玉米/油菜间作具有明显的间作产量优势。在蚕豆/油菜间作中,间作油菜竞争资源的能力强于蚕豆,间作平均提高油菜产量15.6%~44.5%,提高蚕豆产量12.1%~26%<sup>[20]</sup>;在大豆/油菜间作体系中油菜边行籽粒产量比内行产量提高225%~590%<sup>[21]</sup>,豆科作物与油菜间作模式具有显著的产量优势。Okonkwo等<sup>[22]</sup>研究得出大豆/马

铃薯间作,土地当量比为1.25,该模式具有间作产量优势。

并非所有间作组合都有间作优势。在本研究中马铃薯/油菜间作,籽粒产量和生物学产量的土地当量比均小于1,该模式为间作劣势,且经济效益为负值,不适合实际生产。在蚕豆/豌豆间作体系中发现籽粒产量和生物学产量的土地当量比均小于1,这种间作体系无产量优势<sup>[23]</sup>。刘广才等<sup>[24]</sup>研究得出小麦/玉米间作在不施氮肥条件下,大麦/玉米间作在玉米不覆膜条件下,均表现为间作劣势。说明要获得间作优势,间作作物种类的优选和组合是非常必要的。

#### 3.2 间作对作物养分吸收的影响

在间作系统中,养分吸收优势主要来源于配对的两种作物对资源在空间和时间上的互补利用<sup>[25]</sup>。本研究结果表明,玉米/马铃薯间作具有氮营养吸收优势(表3)。玉米是喜光、喜温的高秆作物,马铃薯是喜凉爽、耐荫的矮秆作物,两种作物间作种植,充

分利用地上部的光热资源,促进了间作作物的生长和养分吸收。在大豆/油菜间作模式中间作系统氮吸收量显著增加。前人研究表明在小麦/蚕豆间作中,小麦对土壤和肥料氮素具有更强的竞争能力,一方面使小麦获得充分的氮素营养,具有显著的增产作用;另一方面,土壤氮素浓度的降低,促进了蚕豆的结瘤固氮作用<sup>[26]</sup>,从而使整个系统吸氮量明显增加,这种氮素利用来源上的生态位分离,是豆科与非豆科间作体系氮素补偿利用的主要机制。大豆/油菜间作中,油菜先于大豆种植,相对于大豆具有更强的资源竞争能力,共生前期获得更多营养,同时刺激大豆结瘤固氮,从而使整个间作系统养分吸收量增加。大豆/马铃薯间作体系具有氮营养吸收优势(表3),除了上述氮素利用来源上的生态位分离外,大豆根系分泌物能显著促进马铃薯块茎萌发和幼苗生长<sup>[27]</sup>,使间作产量得到提高(表1),这可能是大豆/马铃薯间作模式具有养分吸收优势的另一个原因。

玉米/油菜间作中,间作系统生物学产量和养分吸收量与单作相比没有显著差异(表1、3)。可能是由于玉米和油菜均为需肥量较大的作物,共生前期油菜有较强养分竞争能力,能获得更多营养满足自身生长发育需要,同时抑制玉米生长,油菜收获后,玉米生长得到恢复。这个现象可以用竞争恢复原理描述<sup>[28]</sup>,在小麦/玉米间作体系中,小麦作为优势种竞争养分的能力明显强于玉米,首先获得产量优势;在小麦收获时,劣势种玉米的生长或营养吸收受到了明显的抑制,当小麦收获后,共同生长期处于劣势的玉米具有一个明显的营养吸收和生长的恢复过程,保证了玉米的产量,使整个间作体系养分得以高效利用<sup>[28]</sup>。这个机制属于养分需求生态位在时间上的分离,降低了两个物种对养分的竞争,从而提高了养分的利用效率。马铃薯/油菜间作模式无间作产量优势,其在养分吸收上也不具有优势(表1、3)。可能原因是马铃薯和油菜同为矮秆作物,两种作物间作对光热资源竞争较激烈。

### 3.3 养分吸收和利用效率对产量优势的贡献

资源的有效利用是间套作产量优势的生物学基础<sup>[15]</sup>。间作产量优势是以养分吸收优势为物质基础的。在作物营养方面的基础主要取决于养分吸收因子、利用因子和交互因子的相互影响。在本研究中,玉米/马铃薯、玉米/油菜、大豆/油菜和大豆/马铃薯4种间作模式具有间作优势,马铃薯/油菜间作,无间作优势。玉米/马铃薯、玉米/油菜、大豆/油

菜和大豆/马铃薯4种间作模式中间作作物相比于单作提高了养分的吸收(表3),但养分利用效率除个别模式有变化外,大多数没有显著改变(表4),利用效率改变对间作优势的贡献也相对较小(表5)。在养分吸收利用方面,间作优势的主要原因是养分吸收量的增加(表5)。这与前人研究结果相似。李隆等<sup>[9]</sup>在小麦/大豆间作中研究发现间作作物氮、磷和钾养分吸收总量分别高出相应单作24%~39%,6%~27%和24%~64%;而间作体系氮、磷和钾的总利用效率分别比单作低5%~20%、5%~7%和6%~32%。这些结果说明间作优势主要表现在养分吸收量的增加,而不是养分利用效率的增加。党小燕等<sup>[14]</sup>在研究棉花和花生、洋葱、萝卜间作时也得到棉花与花生、洋葱和萝卜间作体系氮磷钾吸收效率对LER的贡献分别为0.41~0.82、0.25~1.04和0.15~0.59,而利用效率的贡献分别为-0.35~-0.04、0.03~0.14和-0.16~0.01。结果表明,棉花与其他作物的间作优势在营养方面的基础主要来自于间作相对于单作吸收效率的增加,而不是利用效率的改变。

## 参 考 文 献

- [1] Amosse C, Jeuffroy M H, Mary B, et al. Contribution of relay intercropping with legume cover crops on nitrogen dynamics in organic grain systems[J]. *Nutr Cycl Agroecosys*, 2014, 98: 1-14
- [2] 高阳, 段爱旺, 刘祖贵, 等. 间作种植模式对玉米和大豆干物质积累与产量组成的影响[J]. *中国农学通报*, 2009, 25(2): 214-221
- [3] Ghosh P K. Growth, yield, competition and economics of groundnut/cereal fodder intercropping systems in the semi-arid tropics of India[J]. *Field Crops Res*, 2004, 88: 227-237
- [4] Li Q Z, Sun J H, Wei X J, et al. Overyielding and interspecific interactions mediated by nitrogen fertilization in strip intercropping of maize with faba bean, wheat and barley[J]. *Plant Soil*, 2011, 339: 147-161
- [5] Thierfelder C, Cheesman S, Rusinamhodzi L. A comparative analysis of conservation agriculture systems: Benefits and challenges of rotations and intercropping in Zimbabwe[J]. *Field Crops Res*, 2012, 137: 237-250
- [6] 余常兵, 孙建好, 李隆. 种间相互作用对作物生长及养分吸收的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(1): 1-8
- [7] Mariotti M, Masoni A, Ercoli L, et al. Optimizing forage yield of durum wheat/field bean intercropping through N fertilization and row ratio[J]. *Grass Forage Sci*, 2012, 67(2): 243-254
- [8] Li L, Sun J H, Zhang F S, et al. Diversity enhances agricultural



- productivity via rhizosphere phosphorus facilitation on phosphorus-deficient soils[J]. PNAS, 2007, 104: 11192-11196
- [9] 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
- [10] Geijerstam L A, Martensson A. Nitrogen fixation and residual effects of field pea intercropped with oats[J]. Acta Agr Scand B-S P, 2006, 56: 186-196
- [11] Lithourgidis A S, Vlachostergios D N, Dordas C A, et al. Dry matter yield, nitrogen content, and competition in pea-cereal intercropping systems[J]. Eur J Agron, 2011, 34(4): 287-294
- [12] 赵平, 郑毅, 汤利, 等. 小麦/蚕豆间作施氮对小麦氮素吸收、累积的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(4): 742-747
- [13] Chowdhury M K, Rosario E L. Comparison of nitrogen, phosphorus and potassium utilization efficiency in maize/mungbean intercropping[J]. J Agr Sci, 1994, 122: 193-199
- [14] 党小燕, 危常州, 李隆, 等. 不同棉花间作模式中作物养分吸收和利用对间作优势的贡献[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(5): 513-519
- [15] Willey R W. Intercropping-its importance and research needs. Part I. Competition and yield advantages [J]. Field Crop Abstract, 1979, 32: 1-10
- [16] Morris R A, Garrity D P. Resource capture and utilization in intercropping: Non-nitrogen nutrients [J]. Field Crops Res, 1993, 33(3/4): 319-334
- [17] Trenbath B R. Resource use by intercrops [C]//Francis C A. Multiple Cropping Systems. New York; Macmillan Publishing Co, 1986, 57-81
- [18] Li C Y, He X H, Zhu S S, et al. Crop diversity for yield increase [J]. Plos One, 2009, 4(11): e8049
- [19] Chai Q, Qin A Z, Gan Y T, et al. Higher yield and lower carbon emission by intercropping maize with rape, pea, and wheat in arid irrigation areas [J]. Agron Sustain Dev, 2014, 34(2): 535-543
- [20] 肖靖秀, 汤利, 郑毅. 氮肥用量对油菜 || 蚕豆间作系统作物产量及养分吸收的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(6): 1468-1473
- [21] Ayisi K K, Putman D H, Vance C P, et al. Strip intercropping and nitrogen effects on seed, oil, and protein yields of canola and soybean [J]. Agron J, 1997, 89(1): 23-29
- [22] Okonkwo J C. Effect of time of introducing soybean into potato on the performance of potato/soybean intercrop in Jos Plateau, Nigeria [J]. J Sustain Agr, 2002, 4(2): 185-191
- [23] 李隆. 间作物种间促进和竞争作用研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 1999
- [24] 刘广才, 李隆, 黄高宝, 等. 大麦/玉米间作优势及地上部和地下部因素的相对贡献研究 [J]. 中国农业科学, 2005, 38(9): 1789-1795
- [25] Li L, Sun J H, Zhang F S, et al. Root distribution and interactions between intercropped species [J]. Oecologia, 2006, 147: 280-290
- [26] Xiao Y B, Li L, Zhang F S. Effect of root contact on interspecific competition and N transfer between wheat and faba bean using direct and indirect <sup>15</sup>N techniques [J]. Plant Soil, 2004, 262: 45-54
- [27] 李翠萍. 玉米、大豆根系分泌物对马铃薯块茎萌发和萌芽生长的化感效应 [J]. 河南农业科学, 2014, 43(9): 31-34
- [28] 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 Crop Res, 2001, 71: 173-181

责任编辑: 袁文业