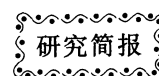


DOI: 10.3724/SP.J.1006.2008.00706



施氮量和玉米-花生间作模式对氮磷吸收与利用的影响

焦念元^{1,2} 宁堂原¹ 赵 春³ 侯连涛⁴ 李增嘉^{1,*} 李友军² 付国占²
韩 宾¹

(¹ 山东农业大学农学院 / 作物生物学国家重点实验室, 山东泰安 271018; ² 河南科技大学农学院, 河南洛阳 471003; ³ 东营职业学院, 山东东营 257091; ⁴ 山东轻工业学院, 山东济南 250100)

摘 要: 2004—2005 年在山东泰安研究了施氮量与种植方式对玉米和花生产量、生物量、氮磷吸收与利用以及蛋白质产量的影响。结果表明, 与单作相比, 玉米-花生间作显著提高了玉米产量和氮、磷吸收量, 但降低了花生产量和氮吸收量。2 行玉米 4 行花生间作模式(2:4 间作模式)的产量、生物量、蛋白质产量、氮磷吸收量以及氮磷吸收利用效率均高于 2 行玉米 8 行花生间作模式(2:8 间作模式); 2:4 间作模式的氮、磷吸收效率均显著高于单作模式, 土地当量比(LE_R)和蛋白质土地当量比(PLER)均大于 1, 土地利用效率提高 8%~17%, 间作优势明显。与不施氮处理相比, 施氮处理显著提高间作玉米产量, 间作花生增产不显著, 促进玉米-花生间作体系氮、磷积累, 提高了氮、磷吸收总量及磷吸收利用效率, 从而显著提高了间作体系的产量和蛋白质产量, 间作优势却随施氮量的增加而降低。

关键词: 种植方式; 施氮量; 玉米-花生间作; 氮吸收与利用; 磷吸收与利用

Effect of Nitrogen Application and Planting Pattern on N and P Absorption and Use in Maize-Peanut Intercropping System

JIAO Nian-Yuan^{1,2}, NING Tang-Yuan¹, ZHAO Chun³, HOU Lian-Tao⁴, LI Zeng-Jia^{1,*}, LI You-Jun²,
FU Guo-Zhan², and HAN Bin¹

(¹ College of Agronomy / State Key Laboratory of Crop Biology, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, Shandong; ² College of Agronomy, Henan University of Science & Technology, Luoyang 471003, Henan; ³ Dongying Vocational College, Dongying 257091, Shandong; ⁴ Shandong Institute of Light Industry, Jinan 250100, Shandong, China)

Abstract: A field experiment was carried out for revealing the effects of nitrogen application and planting pattern on yield, biomass, N and P absorption, protein yield of maize (*Zea mays* L.)-peanut (*Arachis hypogaea* L.) intercropping system in 2004 and 2005. The results showed that the yield, N and P absorption of intercropping maize increased significantly, however, the yield and N absorption of intercropping peanut was reduced in the intercropping system, compared with monocropping maize or peanut respectively. The 2-row maize and 4-row peanut pattern (2:4 pattern) showed higher ($P<0.01$) values than the 2-row maize and 8-row peanut pattern (2:8 pattern) in yield, biomass, protein yield, N and P fertilizer absorption efficiencies, N and P use efficiencies of intercropping system, and higher ($P<0.01$) values than the two monocropping systems in N and P absorption efficiencies. Both the land equivalent ratio for yield (LE_R) and land equivalent ratio for protein yield (PLER) in 2:4 pattern were above 1, and the land use ratio enhanced by 8%–17%, implying obvious intercropping dominance. Compared with zero N application, nitrogen fertilizer increased yield and protein yield of maize and peanut in the intercropping system by promoting the accumulation and absorption of N and P, enhancing P use efficiency, but the intercropping dominance was weakened with the increase of nitrogen fertilizer.

Keywords: Planting pattern; Nitrogen application level; Maize-peanut intercropping; N absorption and use; P absorption and use

间套作具有集约利用光、热、肥、水等资源, 减少病虫害, 实现农业高产高效等优点, 在我国传统农业和现代

基金项目: 山东省财政厅财政支农项目 (SDGP2003-54); 河南科技大学人才科研基金项目 (06014); 河南科技大学青年基金项目 (2007QN027)

作者简介: 焦念元(1974–), 男, 山东平邑人, 博士, 主要从事高产高效复合群体种间营养效应及生理生态研究。E-mail: jiaonyl@163.com

* 通讯作者(Corresponding author): 李增嘉。E-mail: lizj@sdau.edu.cn

Received(收稿日期): 2007-05-11; Accepted(接受日期): 2007-11-20.

农业中做出了巨大贡献^[1]。随着人口增加和耕地面积的减少, 间套作在各国农业生产中愈来愈受到重视。近年来, 玉米-花生间作在我国黄淮海地区及花生产区发展迅速, 得到大面积推广, 并且在间作模式、田间小气候、产量效益^[2], 改善花生铁营养^[3-6]、提高光能利用^[7-8], 以及施氮量对花生固氮影响^[9]等方面开展了较多研究。但是对间作体系氮、磷吸收与利用的特点尚需深入研究。玉米-花生间作体系中, 玉米是高需氮肥作物, 花生是低需氮肥作物。施氮量低时, 因玉米产量低而难以实现高产; 施氮量高时, 花生则因“氮阻遏”^[10]而降低生物固氮作用, 无增产效果。因此, 如何施用氮肥以提高玉米-花生间作体系的肥料利用效率, 提高体系产量及品质已成为生产上亟需解决的问题。为此, 本试验研究了施氮量与种植方式对玉米-花生间作产量、生物量、氮磷营养吸收与利用及蛋白质产量的影响, 为实现玉米-花生间作高产、优质生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验田概况

2004—2005 年在山东农业大学农学实验站进行田间试验, 试验点属于温带半湿润大陆性气候, 年日照 2 611 h, 年平均气温 12.8℃, 无霜期约 200 d, 年降雨量 701.6 mm。试验地为褐壤土, 土层深厚, 土壤基础肥力状况见表 1。

1.2 试验设计

供试作物为玉米(郑单 958)和花生(丰花 1 号)。2004

年设单作玉米、单作花生、玉米-花生间作 3 种植方式及 N₀ (0 kg N hm⁻²)、N₁₅₀ (150 kg N hm⁻²) 2 个氮水平, 共 6 个处理, 3 次重复, 完全随机设计。各处理均基施磷肥 120 kg P₂O₅ hm⁻²和钾肥 100 kg K₂O hm⁻², 氮肥按基追比 1:1 两次施用, 在玉米拔节期撒施, 然后灌溉。单作花生起垄、覆膜、宽窄行种植, 窄行行距 25 cm, 宽行行距 40 cm, 株距 20 cm, 密度 15.38 万穴 hm⁻², 每穴 2 粒; 单作玉米行距 60 cm, 株距 25 cm, 密度 6.67 万株 hm⁻²。2:4 间作模式(图 1-A)中, 花生种植同单作, 密度 10 万穴 hm⁻²; 玉米宽行行距 160 cm, 窄行行距 40 cm, 株距 20 cm, 密度 5 万株 hm⁻²。前茬是棉花, 小区面积 32 m²。花生于 4 月 22 日播种, 9 月 12 日收获; 玉米于 6 月 3 日播种, 9 月 17 日收获。两种作物共处期 100 d。

2005 年设单作玉米、单作花生、玉米-花生 2:4 间作、2:8 间作 4 种植方式及 N₀ (0 kg N hm⁻²)、N₁₈₀ (180 kg N hm⁻²)、N₃₆₀ (360 kg N hm⁻²) 3 个氮水平, 共 12 个处理, 3 次重复, 完全随机设计。单作花生同 2004 年; 单作玉米行距 65 cm, 株距 20 cm, 密度为 7.69 万株 hm⁻²; 2:4 间作模式(图 1-A)中, 花生同单作, 密度 10 万穴 hm⁻², 玉米宽行行距 160 cm, 窄行行距 40 cm, 株距 15 cm, 密度 6.67 万株 hm⁻²; 2:8 间作模式(图 1-B)中, 花生同单作, 密度 12.12 万穴 hm⁻²; 玉米宽行行距 290 cm, 窄行行距 40 cm, 株距 15 cm, 密度 4.05 万株 hm⁻²。各处理均基施磷肥 90 kg P₂O₅ hm⁻², 钾肥 120 kg K₂O hm⁻², 氮肥施用时期同 2004 年。花生于 4 月 18 日播种, 9 月 8 日收获; 玉米于 6 月 3 日播种, 9 月 13 日收获。两种作物共处期 96 d。

表 1 土壤基础肥力
Table 1 Initial fertility of the experimental soil

土层 Soil layer (cm)	有机质 Organic matter (g kg ⁻¹)	全氮 Total N (g kg ⁻¹)	速效氮 Available N (mg kg ⁻¹)	速效磷 Available P (mg kg ⁻¹)	速效钾 Available K (mg kg ⁻¹)
0-10	13.10	0.956	114.64	39.22	79.25
10-20	12.63	0.933	110.76	38.44	75.36
20-40	9.69	0.496	65.46	16.95	61.68

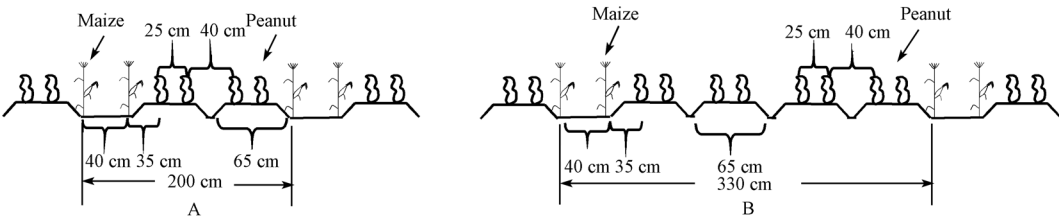


图 1 玉米花生间作模式
Fig. 1 Planting pattern of maize-peanut intercropping
A: 2:4 间作模式; B: 2:8 间作模式。A: 2:4 pattern; B: 2:8 pattern.

1.3 测定项目与方法

1.3.1 取样 收获期, 各处理均取玉米 3 株, 分成茎秆、叶片、苞叶、籽粒、穗轴; 花生 5 株, 分成茎、叶片、果壳、果仁。105℃杀青 30 min, 85℃烘干后称重, 粉碎待用。

1.3.2 产量与生物量 收获期, 玉米、花生均取 2 m 双

行, 测定产量和生物量。2:4 间作模式中, 玉米所占比例为 0.57, 花生所占比例为 0.43; 2:8 间作模式中, 玉米为 0.4, 花生为 0.6。

1.3.3 蛋白质含量 样品经浓 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮, 用半微量凯氏定氮法测定氮含量, 然后换算为蛋白质含量(%),

系数为 6.25。

1.3.4 氮、磷含量 样品经浓 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮, 用半微量凯氏定氮法测定氮含量, 用日本岛津公司生产的 ICPS-7500 等离子体发射光谱仪 ICP-AES 分析法测定磷含量。

1.4 数据分析

土地当量比(LER) = $(Y_{im}/Y_{mm}) + (Y_{ip}/Y_{mp})$ 。式中, Y_{im} 和 Y_{ip} 分别代表间作玉米和间作花生的产量、生物量或蛋白质产量, Y_{mm} 和 Y_{mp} 分别为单作玉米和单作花生的产量、生物量或蛋白质产量。 $LER > 1$ 为间作优势, $LER < 1$ 为间作劣势^[11]。

作物吸氮(磷)量 = 各器官质量与氮(磷)含量之积的总和; 氮肥吸收效率($NUPE$) = (作物吸氮量 - 不施氮区作物吸氮量)/施氮量 $\times 100\%$; 氮素利用效率($NUTE$) = 籽粒产量/作物吸氮量; 磷肥吸收效率($PUPE$) = (作物吸磷量 - 不施磷区作物吸磷量)/施磷量 $\times 100\%$; 磷素利用效率($PUTE$) = 籽粒产量/作物吸磷量。

采用 DPS 软件进行数据分析, 采用 LSD 法显著性检验。

2 结果与分析

2.1 间作与施氮对作物产量和生物量的影响

2.1.1 产量 表 2 表明, 在可比面积上, 玉米-花生间作明显提高了玉米产量, 比单作玉米高 13.07%~59.65%, 但间作花生产量比单作降低 8.64%~49.73%。两年试验结果显示 2:4 间作模式的土地利用效率提高 8%~17%, 均为

$LER > 1$, 说明产量间作优势明显; 2:8 间作模式 $LER < 1$, 表现为产量间作劣势。

与不施氮处理相比, 施氮能显著($P < 1\%$)提高间作玉米产量, 并随施氮量增加而明显增加, 处理间表现为 $N_{360} > N_{180} > N_0$, 而间作花生增产效果不明显; 同时, 施氮量对玉米花生间作体系的 LER 具有明显的调控作用, 2:4 间作模式表现为随施氮量增加呈先增后降趋势, 即 $N_{180} > N_{360} > N_0$, 2:8 间作模式表现为随施氮量增加而降低。

方差分析表明, 种植方式($F = 24.37$, $F_{0.01(2,18)} = 6.01$)、施氮量($F = 15.82$, $F_{0.01(2,18)} = 6.01$)显著影响玉米产量, 并互作效应显著($F = 5.13$, $F_{0.01(4,18)} = 4.58$); 对花生仅种植方式有显著($F = 33.7$, $F_{0.01(2,18)} = 6.01$)影响。

2.1.2 生物量 表 3 表明, 间作玉米的生物量比单作玉米高 23.00%~58.43%, 与单作花生相比, 2004 年间作花生的生物量降低 11.68%~14.23%, 2005 年差异不明显。两种模式的 $BLER$ 值均大于 1, 2:4 间作模式的 $BLER$ 值大于 2:8 间作模式。 N_{180} 处理和 N_{360} 处理的 2:4 间作模式生物量分别比相应单作玉米和单作花生高 9.12%、9.27% 和 124.74%、147.45%。

与不施氮处理相比, 施氮处理显著($P < 1\%$)提高间作玉米生物量, 随着施氮量的增加显著提高玉米生物量, 但对间作花生的生物量无显著影响。2:4 间作模式的 $BLER$ 随着施氮量增加呈递增趋势; 在 2005 年, N_{180} 处理和 N_{360} 处理的 2:4 间作模式生物量分别比不施氮处理高 26.69% 和 41.17%。

表 2 玉米-花生间作的产量及产量土地当量比
Table 2 Yield and land equivalent ratio in maize-peanut intercropping system

年份 Year	施氮水平 N level (kg hm ⁻²)	单作产量 MY (kg hm ⁻²)		间作玉米产量 YIM (kg hm ⁻²)		间作花生产量 YIP (kg hm ⁻²)		土地当量比 LER	
		玉米 Maize	花生 Peanut	2:4	2:8	2:4	2:8	2:4	2:8
2004	0	8 574 B	3 344 B	13 589 B	—	1 681 A	—	1.12	—
	150	10 165 A	3 688 A	16 228 A	—	1 936 A	—	1.14	—
2005	0	10 813 B	3 806 A	13 820 B	12 226 B	3 080 BA	3 477 A	1.08	1.00
	180	11 544 B	4 099 A	17 476 A	13 537 B	2 965 A	3 345 B	1.17	0.96
	360	13 466 A	4 053 A	18 646 A	16 158 A	2 912 A	3 201 B	1.10	0.95

MY: monocropping yield; YIM: yield of intercropping maize; YIP: yield of intercropping peanut; LER: land equivalent ratio. Values within each year in the same column followed by a different letter are significantly different at $P < 0.01$.

表 3 玉米-花生间作的生物量及生物量土地当量比
Table 3 Biomass and land equivalent ratio for biomass in maize-peanut intercropping system

年份 Year	施氮水平 N level (kg hm ⁻²)	单作生物量 MB (kg hm ⁻²)		间作玉米生物量 BIM (kg hm ⁻²)		间作花生生物量 BIP (kg hm ⁻²)		生物量土地 当量比 BLER	
		玉米 Maize	花生 Peanut	2:4	2:8	2:4	2:8	2:4	2:8
2004	0	16 510 B	6 521 A	25 514 B	—	5 593 A	—	1.25	—
	150	19 971 A	6 970 A	30 682 A	—	6 156 A	—	1.26	—
2005	0	18 558 C	9 058 B	24 990 C	22 827 C	9 841 A	9 932 A	1.23	1.15
	180	21 451 B	10 415 A	33 347 B	29 525 B	10 232 A	10 318 A	1.31	1.14
	360	23 869 A	10 541 A	37 817 A	32 334 A	10 527 A	10 177 A	1.33	1.12

MB: monocropping biomass; BIM: biomass of intercropping maize; BIP: biomass of intercropping peanut; BLER: land equivalent ratio for biomass. Values within each year in the same column followed by a different letter are significantly different at $P < 0.01$.

方差分析表明，种植方式($F = 23.04$, $F_{0.01(2,18)} = 6.01$)、施氮量($F = 16.95$, $F_{0.01(2,18)} = 6.01$)显著影响玉米生物量，且其互作效应显著($F = 29.75$, $F_{0.01(4,18)} = 4.58$)；而对花生均无显著影响。

2.2 间作与施氮对作物氮、磷吸收与利用的影响

2.2.1 氮、磷积累动态 图 2 表明，玉米-花生间作体系的氮、磷积累具有相同的变化趋势，表现出“前慢后快”的特点，即在玉米拔节前小于单作花生，此后，呈赶超单作花生的趋势，到玉米开花期，已明显超过单作花生，到收获期，单作玉米也超过单作花生，但一直低于玉米-花生间作。与 N_{180} 处理相比， N_{360} 处理提高了玉米-花生间作各时期的氮、磷积累量，其中氮积累量相对增加 13.7%~34.4%。

2.2.2 氮、磷吸收

2.2.2.1 氮素吸收量 表 4 表明，在可比面积上，间作玉米吸氮量比单作玉米平均高 30.22%，而间作花生吸氮量比单作花生平均低 6.72%；2：4 间作模式的吸氮总量高于单作玉米和单作花生，平均分别高 48.32%和 210.29%，比 2：8 间作模式平均高 16.62%。

与不施氮处理相比，施氮处理提高了间作玉米、间作花生的吸氮量，并随施氮量的提高而增加，间作玉米达到显著水平；施氮处理显著提高间作体系的吸氮总量，并随施氮量的提高显著增加，但增幅降低。

方差分析表明，种植方式($F = 11.13$, $F_{0.01(2,18)} = 6.01$)、施氮量($F = 24.89$, $F_{0.01(2,18)} = 6.01$)显著影响玉米氮吸收量，并互作效应显著($F = 24.4$, $F_{0.01(4,18)} = 4.58$)，对花

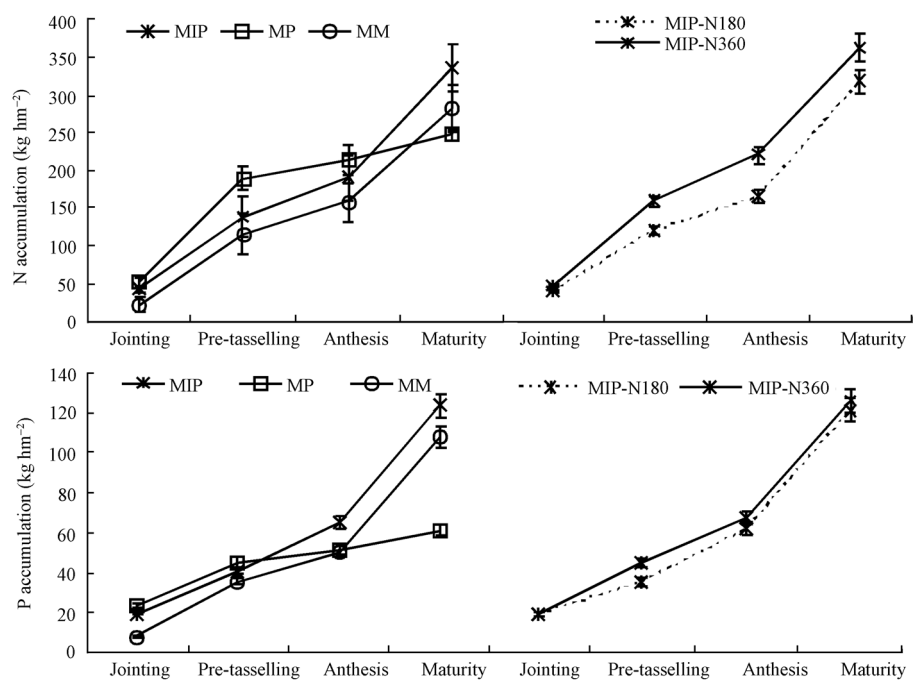


图 2 玉米花生间作氮、磷积累(2005, 2：4 间作模式)

Fig. 2 N and P accumulation in maize-peanut intercropping system (2005, 2:4 pattern)

MIP: maize-peanut intercropping; MP: monocropping peanut; MM: monocropping maize; MIP-N180: maize-peanut intercropping with 180 kg N hm⁻²; MIP-N360: maize-peanut intercropping with 360 kg N hm⁻².

表 4 玉米-花生间作氮吸收量
Table 4 N absorption in maize-peanut intercropping system

年份 Year	施氮水平 N level (kg hm ⁻²)	单作吸氮量 MN (kg hm ⁻²)		间作玉米吸氮量 NIM (kg hm ⁻²)		间作花生吸氮量 NIP (kg hm ⁻²)		吸氮总量 Total N (kg hm ⁻²)	
		玉米 Maize	花生 Peanut	2：4	2：8	2：4	2：8	2：4	2：8
2004	0	147.9 B	181.3 A	218.1 B	—	152.3 A	—	189.8 B	—
	150	182.0 A	194.0 A	304.2 A	—	172.3 A	—	247.5 A	—
2005	0	210.8 C	200.3 B	252.6 C	231.2 C	195.7 B	201.6 B	228.1 C	213.4 C
	180	260.1 B	241.2 A	378.7 B	324.7 B	228.2 A	216.3 AB	314.0 B	259.7 B
	360	305.4 A	251.4 A	443.5 A	390.0 A	248.5 A	231.2 A	359.6 A	294.7 A

MN: monocropping N absorption; NIM: N absorption of intercropping maize; PIM: N absorption of intercropping peanut. Values within each year in the same column followed by a different letter are significantly different at $P < 0.01$.

生只有施氮量影响显著($F = 24.78$, $F_{0.01(2,18)} = 6.01$)。

2.2.2.2 磷素吸收量 间作玉米吸磷总量显著高于单作玉米, 平均高 45.68%。2005 年 2:4 间作模式的间作花生吸磷量比单作花生平均高 10.59%, 2:8 间作模式的只有 4.23%。在相同施氮量下, 2:4 间作模式的磷吸收总量显著高于 2:8 间作模式, 平均高 22.04%, 比单作玉米和单作花生分别高 29.13%和 367.50%(表 5)。

与不施氮处理相比, 施氮处理促进了间作体系磷的吸收, 并随着施氮量增加而增加; N_{180} 处理和 N_{360} 处理分别比不施氮处理平均高 36.35%和 52.38%, 均达显著水平。

方差分析表明, 种植方式($F = 12.25$, $F_{0.01(2,18)} = 6.01$)、施氮量($F = 20.3$, $F_{0.01(2,18)} = 6.01$)显著影响玉米磷吸

收, 且互作效应显著($F = 34.03$, $F_{0.01(4,18)} = 4.58$); 对花生只有施氮量影响显著($F = 24.38$, $F_{0.01(2,18)} = 6.01$)。

2.2.3 氮、磷利用效率

2.2.3.1 氮利用效率 表 6 表明, 2:4 间作模式的氮吸收效率和氮利用效率均比 2:8 间作模式平均高 59.72%和 6.76%, 且氮吸收效率极显著高于单作玉米和单作花生, 氮利用效率却高于单作花生低于单作玉米。与不施氮处理相比, 施氮显著降低玉米-花生间作体系的氮利用效率, 并随着施氮量的增加呈降低趋势; 与 N_{180} 处理相比, N_{360} 处理降低了间作体系氮肥吸收效率, 2:4 和 2:8 间作模式分别相对降低 23.40%和 16.04%, 说明增施氮肥不利于提高玉米花生间作体系的氮吸收利用效率。

表 5 玉米-花生间作磷吸收量
Table 5 P absorption in maize-peanut intercropping system

年份 Year	施氮水平 N level (kg hm ⁻²)	单作吸磷量 MP (kg hm ⁻²)		间作玉米吸磷量 PIM (kg hm ⁻²)		间作花生吸磷量 PIP (kg hm ⁻²)		吸磷总量 Total P (kg hm ⁻²)	
		玉米 Maize	花生 Peanut	2:4	2:8	2:4	2:8	2:4	2:8
2004	0	65.5 B	38.5 A	109.8 B	—	32.1 A	—	76.5 B	—
	150	85.4 A	42.2 A	133.3 A	—	35.8 A	—	91.4 A	—
2005	0	77.8 C	50.3 B	99.0 C	91.8 C	54.5 B	55.2 A	79.9 C	69.8 C
	180	103.1 B	61.4 A	162.4 A	145.9 B	67.7 A	62.5 A	121.7 B	95.8 B
	360	112.3 A	60.7 A	171.1 A	162.5 A	68.6 A	61.3 A	127.0 A	101.8 A

MP: monocropping P absorption; PIM: P absorption of intercropping maize; PIP: P absorption of intercropping peanut. Values within each year in the same column followed by a different letter are significantly different at $P < 0.01$.

表 6 玉米-花生间作氮利用效率
Table 6 N use efficiency in maize-peanut intercropping system

年份 Year	施氮水平 N level (kg hm ⁻²)	氮肥吸收效率 NUPE (%)				氮素利用效率 NUTE (%)			
		单作玉米 MM	单作花生 MP	2:4 模式 2:4 pattern	2:8 模式 2:8 pattern	单作玉米 MM	单作花生 MP	2:4 模式 2:4 pattern	2:8 模式 2:8 pattern
2004	0	—	—	—	—	69.02 A	18.45 A	44.63 A	—
	150	32.75	8.49	38.51	—	58.60 B	19.03 A	40.73 B	—
2005	0	—	—	—	—	51.25 A	19.03 A	40.33 A	39.53 A
	180	27.39 A	22.72 A	47.69 A	28.55 A	44.37 B	16.97 B	35.79 B	32.55 B
	360	26.26 A	14.19 B	36.53 B	23.97 A	44.08 B	16.10 C	33.03 C	31.89 B

NUPE: nitrogen uptake efficiency; NUTE: nitrogen utilization efficiency; MM: monocropping maize; MP: monocropping peanut. Values within each year in the same column followed by a different letter are significantly different at $P < 0.01$.

2.2.3.2 磷利用效率 表 7 表明, 2:4 间作模式的磷吸收效率和利用效率比 2:8 间作模式平均高 54.17%和 16.46%, 且磷吸收效率极显著高于单作玉米和单作花生, 而磷利用效率高于单作花生, 低于单作玉米。2005 年试验中, 与不施氮处理相比, 施氮显著降低玉米花生间作体系的磷利用效率, 但随着施氮量的增加却有升高趋势; 与 N_{180} 处理相比, N_{360} 处理显著提高间作体系磷吸收效率, 2:4 间作模式和 2:8 间作模式分别提高 12.70%和 22.91%, 说明增施氮肥有利于玉米花生间作体系对磷肥的吸收。

2.2.4 蛋白质产量 由表 8 可知, 间作玉米的蛋白质产量极显著高于单作玉米, 平均高 37.69%; 施氮处理的

间作花生蛋白质产量却低于单作花生, 平均低 7.36%。2:4 间作模式的蛋白质土地当量比(PLER)为 1.17~1.33, 蛋白质总产量比单作玉米和单作花生平均分别高 23.89%和 24.27%, 显著高于 2:8 间作模式。

与不施氮处理相比, 施氮处理显著提高了间作体系的蛋白质产量, 随施氮量的增加而增加, 且 2:4 间作模式的 PLER 随施氮量的增加呈递增趋势。这说明增加氮肥用量有利于提高间作体系的蛋白质产量。

方差分析表明, 种植方式($F = 16.20$, $F_{0.01(2,18)} = 6.01$)和施氮量($F = 34.29$, $F_{0.01(2,18)} = 6.01$)显著影响玉米蛋白质产量, 且互作效应显著($F = 50.10$, $F_{0.01(4,18)} = 4.58$); 对花生只有施氮量显著 ($F = 18.43$, $F_{0.01(2,18)} = 6.01$) 影响。

表 7 玉米花生间作磷利用效率
Table 7 Phosphorus use efficiency in maize-peanut intercropping system

年份 Year	施氮水平 N level (kg hm ⁻²)	磷肥吸收效率 <i>PUPE</i> (%)				磷素利用效率 <i>PUTE</i> (%)			
		单作玉米 MM	单作花生 MP	2 : 4 模式 2:4 pattern	2 : 8 模式 2:8 pattern	单作玉米 MM	单作花生 MP	2 : 4 模式 2:4 pattern	2 : 8 模式 2:8 pattern
2004	0	—	—	—	—	136.88 A	86.71 A	106.80 A	—
	150	—	—	—	—	119.07 B	87.31 A	110.36 A	—
2005	0	—	—	—	—	138.89 A	75.73 A	115.19 A	99.95 A
	180	28.07 B	12.37 A	46.47 A	28.89 A	112.00 C	66.77 B	92.36 B	77.41 B
	360	38.29 A	11.56 A	52.37 A	35.51 A	119.94 B	66.81 B	93.54 B	82.34 B

PUPE: phosphorus uptake efficiency; *PUTE*: phosphorus utilization efficiency; MM : monocropping maize; MP: monocropping peanut. Values within each year in the same column followed by a different letter are significantly different at $P<0.01$.

表 8 玉米-花生间作蛋白产量及蛋白质土地当量比
Table 8 Protein yields and land equivalent ratio for protein yield in maize-peanut intercropping system

年份 Year	施氮水平 N level (kg hm ⁻²)	单作蛋白质 MPY (kg hm ⁻²)		间作玉米蛋白质 PYIM (kg hm ⁻²)		间作花生蛋白质 PYIP (kg hm ⁻²)		蛋白质土地当量比 <i>PLER</i>	
		玉米 Maize	花生 Peanut	2 : 4	2 : 8	2 : 4	2 : 8	2 : 4	2 : 8
2004	0	924.6 B	1 132.9 A	1 372.3 B	—	951.6 B	—	1.21	—
	150	1 137.5 A	1 212.5 A	1 901.8 A	—	1 076.9 A	—	1.33	—
2005	0	1 250.0 C	1 255.6 B	1 581.6 C	1 444.6 C	1 315.6 B	1 266.6 A	1.17	1.07
	180	1 632.7 B	1 488.8 A	2 352.6 B	2 048.6 B	1 417.4 AB	1 356.3 A	1.23	1.05
	360	1 877.3 A	1 571.3 A	2 725.6 A	2 423.4 A	1 528.7 A	1 426.1 A	1.25	1.06

MPY: monocropping protein yield; PYIM: protein yield of intercropping maize; PYIP: protein yield of intercropping peanut; *PLER*: land equivalent ratio for protein yield. Values within each year in the same column followed by a different letter are significantly different at $P<0.01$.

3 讨论

由于间套作能集约利用光、热、水、肥等自然资源, 减少病虫害, 小麦-玉米、小麦-大豆、蚕豆-玉米和小麦-蚕豆等间作体系均表现出明显的间作优势^[12-14]。本研究也发现玉米花生 2 : 4 间作模式的 *LER* 和 *PLER* 均大于 1, 具有明显的间作优势。李隆^[15-17]等发现玉米蚕豆间作时, 种间竞争比较弱, 玉米和蚕豆产量均得到显著提高, 而本研究发现仅间作玉米产量显著提高, 而间作花生产量低于单作花生, 可能是在生育后期间光能竞争激烈, 间作花生处于光竞争劣势, 光合速率降低, 间作玉米处于光竞争优势^[8]。

与 2 : 4 间作模式相比, 2 : 8 间作模式的产量、生物量、蛋白质产量以及氮、磷吸收总量和利用效率均显著降低, 并且 *LER* 小于 1, 表现为间作劣势。这说明玉米花生间作时, 玉米为优势作物, 可比面积上间作玉米的产量平均比单作玉米高 28%, 而花生为劣势作物, 增加劣势作物花生的比例, 则限制间作优势的发挥。但周苏玫等^[2]认为 2 : 8 间作模式优于 2 : 4 间作模式, 这可能与栽培品种、种植密度或自然条件有关。因此, 应根据生产条件确定合理的作物比例, 发挥间作优势。

玉米-花生间作优势还表现在间作玉米氮、磷吸收量显著高于单作玉米, 间作花生氮、磷吸收量与单作花生差异不明显。因此, 间作体系的氮、磷吸收总量显著高于单

作玉米和单作花生, 氮吸收效率分别比单作玉米和单作花生平均高 27.18%和 90.48%, 磷吸收效率分别高 24.50%和 242.36%。研究表明^[16-18], 不同作物间作, 种间根际作用活化养分, 促进养分吸收。在本试验中, 玉米-花生间作也存在养分的种间促进作用, 其促进机制有待进一步研究。

本研究还表明, 玉米-花生间作优势还受到氮肥调控。与不施氮处理相比, 施氮处理能显著提高玉米-花生间作的产量、生物量和蛋白质产量, 但随施氮量的提高增幅减小。这是因为施氮促进了玉米-花生间作体系氮、磷吸收积累, 提高了磷吸收利用效率, 但随着施氮量的增加, 间作玉米氮、磷吸收积累量还能保持较大增幅, 生物量增加却加大了对花生遮阴程度, 造成间作花生氮、磷吸收积累量增幅不大或略有降低。所以与 N_{180} 处理相比, N_{360} 处理的 *LER* 变小, 间作优势降低。

References

[1] Liu X-H(刘巽浩), Han X-L(韩湘玲), Zhao M-Z(赵明斋), Kong Y-Z(孔扬庄). Efficiency of light energy, crops competition, yields analysis of wheat corn multiple system in Huabei Plain. *Acta Agron Sin* (作物学报), 1981, 7(1): 63–71 (in Chinese with English abstract)

[2] Zhou S-M(周苏玫), Ma S-Q(马淑琴), Li W(李文), Zhang S-T(张石头). Analysis of superiority of maize and peanut row intercropping. *J Henan Agric Univ* (河南农业大学学报), 1998, 32(1): 17–22 (in Chi-

- Chinese with English abstract)
- [3] Zuo Y-M(左元梅), Li X-L(李晓林), Zhang F-S(张福锁), Cao Y-P(曹一平), Wang Y-H(王运华). Effect of maize/peanut intercropping on root Fe (III) reducing capacity and iron nutrition of peanut. *J Plant Nutr Fert Sci* (植物营养与肥料学报), 1998, 4(2): 170–175 (in Chinese with English abstract)
- [4] Zuo Y M, Zhang F S, Li X L, Can Y P. Studies on the improvement in iron nutrition of peanut by intercropping with maize on a calcareous soil. *Plant Soil*, 2000, 220: 13–25
- [5] Liu Y-X(刘永秀), Zhang F-S(张福锁), Mao D-R(毛达如). Effects of maize-peanut mixed cropping on iron nutrition and nitrogen fixation of peanut. *Chin J Soil Sci* (土壤通报), 1999, 30 (2): 55–56 (in Chinese with English abstract)
- [6] Zuo Y-M(左元梅), Li X-L(李晓林), Zhang F-S(张福锁), Cao Y-P(曹一平). The effects of peanut intercropped with on iron nutrition efficiency of peanut and intercropping advantage in sandy soil Henan province. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2003, 29(5): 658–663 (in Chinese with English abstract)
- [7] Jiao N-Y(焦念元), Chen M-C (陈名灿), Fu G-Z(付国占), Ning T-Y(宁堂原), Wang L-M(王黎明), Li Z-J(李增嘉). Research on photosynthetic matter accumulation and leaf air index change of compound colony in the maize/peanut intercropping system. *Crops* (作物杂志), 2007, (1): 34–35 (in Chinese)
- [8] Jiao N-Y(焦念元), Ning T-Y(宁堂原), Zhao C(赵春), Wang Y(王芸), Shi Z-Q(史忠强), Hou L-T(侯连涛), Fu G-Z(付国占), Jiang X-D(江晓东), Li Z-J(李增嘉). Characters of photosynthesis in intercropping system of maize and peanut. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2006, 32(6): 917–923 (in Chinese with English abstract)
- [9] Fang Z-G(房增国), Zuo Y-M(左元梅), Li L(李隆), Zhang F-S(张福锁). Effects of different nitrogen levels on iron nutrition and nitrogen fixation of peanut in maize-peanut mixed cropping system. *Plant Nutr Fert Sci* (植物营养与肥料学报), 2004, 10(4): 386–390 (in Chinese with English abstract)
- [10] Chen W-X(陈文新), Chen W-F(陈文峰). Exertion of biological nitrogen fixation in order to reducing the consumption of chemical nitrogenous fertilizer. *Rev China Agric Sci Tech* (中国农业科技导报), 2004, 6(6): 3–6 (in Chinese with English abstract)
- [11] Willey R W. Intercropping-its importance and research needs: I. Competition and yield advantages. *Field Crops Abstr*, 1979, 32: 1–10
- [12] Li W X, Li L, Sun J H, Zhang F S, Christie P. Effects of nitrogen and phosphorus fertilizers and intercropping on uptake of nitrogen and phosphorus by wheat, maize and faba bean. *J Plant Nutr*, 2003, 26: 629–642
- [13] Li L, Sun J H, Zhang F S, Li X L, Rengel Z, Yang S C. Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping: I. Yield advantage and interspecific interactions on nutrients. *Field Crops Res*, 2001, 71: 123–137
- [14] Liu G-C(刘广才), Li L(李隆), Huang G-B(黄高宝), Sun J-H(孙建好), Guo T-W(郭天文), Zhang F-S(张福锁). Intercropping advantage and contribution of above-ground and below-ground interactions in the barley-maize intercropping. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 2005, 38(9): 1787–1795 (in Chinese with English abstract)
- [15] Li L, Yang S C, Li X L, Zhang F S, Christie P. Interspecific complementary and competitive interactions between intercropped maize and faba bean. *Plant Soil*, 1999, 212: 105–114
- [16] Li L, Zhang F S, Li X L, Christie P, Sun J H, Yang S C, Tang C X. Interspecific facilitation of nutrient uptake by intercropped maize and faba bean. *Nutr Cycling Agroecosyst*, 2003, 65: 61–71
- [17] 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. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2007, 104: 11192–11196
- [18] Zhang F S, Shen J B, Li L, Liu X. An overview of rhizosphere processes related with plant nutrition in major cropping systems in China. *Plant Soil*, 2004, 260: 89–99