

线辣椒玉米套作的养分吸收利用及产量优势分析

徐 强^{1,4}, 谢宝英², 卢 涛³, 程智慧^{4,*}

(¹ 安徽农业大学园艺学院, 合肥 230036; ² 安徽农业大学理学院, 合肥 230036; ³ 濮阳市园林绿化处, 河南濮阳 457000; ⁴ 西北农林科技大学园艺学院, 陕西杨凌 712100)

摘 要: 采用田间微区试验和地下部种间根系分隔技术, 研究了施氮肥和不施氮肥两种情况下, 线辣椒 / 玉米套作体系的产量优势, 套作与单作在成熟期氮磷钾养分吸收量和利用效率的差异, 以及地上部和地下部因素对套作产量优势的相对贡献。结果表明, 不论施氮肥与否, 线辣椒 / 玉米套作经济产量和生物产量的土地当量比均大于 1, 呈现产量优势, 但生物产量套作优势比经济产量更明显。套作氮、磷、钾养分吸收总量分别比单作高出 16.4% ~ 22.1%、26.1% ~ 30.5% 和 27.0% ~ 51.5%, 而套作的养分利用效率分别比单作降低 4.0% ~ 14.1%、4.4% ~ 9.4% 和 4.3% ~ 15.9%。套作优势在养分资源方面主要是因为吸收量的增加, 而非利用率的提高; 套作线辣椒的养分收获指数高于单作。不施氮肥时, 地上部和地下部因素对套作体系经济产量优势的相对贡献分别为 93.2% 和 6.8%, 生物产量优势的相对贡献分别为 88.8% 和 11.2%; 施氮肥时, 对经济产量优势的相对贡献分别为 85.2% 和 14.8%, 生物产量优势的相对贡献分别为 84.6% 和 15.4%。

关键词: 辣椒; 玉米; 套作; 套作优势; 养分利用效率; 地上部因素; 地下部因素

中图分类号: S 641.3; S 513 **文献标识码:** A **文章编号:** 0513-353X (2010) 08-1247-10

Studies on Uptake and Utilization of Nitrogen , Phosphorus and Potassium and Yield Advantage in Capsicum/Maize Relay Intercropping System

XU Qiang^{1,4}, XIE Bao-ying², LU Tao³, and CHENG Zhi-hui^{4,*}

(¹ School of Horticulture , Anhui Agricultural University , Hefei 230036 , China ; ² School of Science , Anhui Agricultural University , Hefei 230036 , China ; ³ Landscape Greening Bureau of Puyang City , Puyang , Henan 457000 , China ; ⁴ College of Horticulture , Northwest A & F University , Yangling , Shaanxi 712100 , China)

Abstract : A microplot experiment and a root barrier technique were employed to investigate the yield advantage of relay intercropping and the absorption and utilization efficiency of nitrogen , phosphorus and potassium by the component crops relay intercropped or monocultured , and the relative contribution of above- and below-ground interactions to yield in the capsicum/maize relay intercropping system with or without nitrogen fertilizer application was also researched. The results showed that the land equivalent ratios (LERs) of both economic yield and biological yield exceeded 1 , which demonstrated a significant

收稿日期: 2010-04-19; **修回日期:** 2010-07-06

基金项目: 国家‘十五’科技攻关项目 (2004BA516A09); 安徽农业大学稳定和引进人才科研项目 (yj2008-10); 安徽省 2010 年高校省级优秀青年人才基金项目 (2010SQRL062)

* 通信作者 Author for correspondence (E-mail : chengzh2004@163.com)

yield advantage for all the relay intercropping treatments of capsicum and maize. The biological yield advantage was stronger than that of the economic yield advantage. The absorption of nitrogen, phosphorus and potassium by capsicum and maize in the intercropping system were 16.4% – 22.1%, 26.1% – 30.5% and 27.0% – 51.5% higher, respectively, than those in the monoculture system. However, the utilization efficiency of nitrogen, phosphorus and potassium in the intercropping system were 4.0% – 14.1%, 4.4% – 9.4% and 4.3% – 15.9% lower, respectively, than those in the monoculture system. The relay intercropping advantage on nutrient aspect was mainly due to the increase of nutrient absorption but not the decrease of nutrient utilization efficiency. The harvesting index of relay intercropping capsicum was significantly higher than that of the monocultured capsicum. The contribution of above- and below-ground interactions to the relay intercropping advantage of economic yield were 93.2% and 6.8%, respectively; Nevertheless the values were 88.8% and 11.2% respectively for biological yield in the condition of no nitrogen fertilizer application. While in the nitrogen fertilizer application zone, the contribution of above- and below-ground interactions to the relay intercropping advantage of economic yield were 85.2% and 14.8% respectively, and 84.6% and 15.4% were their relay intercropping advantage of biological yields respectively.

Key words : capsicum ; maize ; relay intercropping ; yield advantage ; nutrient utilization efficiency ; above-ground interaction ; below-ground interaction

间套作种植模式的产量优势已被多数研究证实 (Chowdhury & Rosario, 1994; Li et al., 2001; Hauggaard-Hielsen et al., 2001; Zhang & Li, 2003; Zhang et al., 2008; Ghanbari et al., 2010), 其生物学基础在于资源的有效利用, 主要表现在资源吸收量的增加或利用效率的提高, 或两者兼有 (Chowdhury & Rosario, 1994)。玉米/蚕豆和玉米/鹰嘴豆间作模式中, 利用磷能力强的蚕豆、鹰嘴豆通过根系分泌物 (李淑敏, 2004) 或磷酸酶 (Li et al., 2007) 促进低磷效率基因型玉米对磷的吸收; 小麦/玉米间作使小麦的氮吸收量比单作增加了 37% (Zhang & Li, 2003)。玉米/花生间作后, 来自玉米根系的植物铁载体显著改善了花生植株的铁营养状况 (Inal et al., 2007)。

陕西省的关中东部地区线辣椒 (*Capsicum annuum* L. var. *acuminatum* Fingen) 栽培模式主要是小麦、线辣椒、玉米“梯阶式”套种, 占当地线辣椒生产面积的 75% 以上。当年秋播小麦, 翌年麦收前 20 ~ 25 d 内, 将线辣椒苗移栽到套种麦田预留空带内, 小麦收获后, 在麦茬带田内每隔 6 行线辣椒套种 2 行玉米。此套作模式中, 小麦与线辣椒的共生期很短 (20 d 左右, 线辣椒处于缓苗期), 以线辣椒与玉米共生为主, 共生期达 90 d 左右。线辣椒与玉米套种具有显著的产量优势, 但该种植模式中土壤养分资源利用和产量优势形成之间的内在联系及其相互作用机制并不十分清楚。作者拟通过大田种间根系分隔微区试验分析线辣椒/玉米套作模式的产量优势, 综合评价该套作模式中养分吸收和利用效率, 并应用土地当量比 (Land equivalent ratio, LER) 与资源 (捕获) 吸收和利用效率的数量关系 (Trenbath, 1986) 分析养分吸收和利用效率对线辣椒、玉米套作产量优势的贡献; 同时探索地上部和地下部因素对套作产量优势的相对贡献, 为间套作模式的管理和持续发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料及试验田概况

试验于 2007 年在西北农林科技大学园艺学院园艺场进行。玉米品种为早熟的‘陕高农 1 号’,

线辣椒品种为西北农林科技大学园艺学院选育的‘陕 8819’。

试验区域海拔 528.15 m，属大陆性暖温带季风气候，年均气温 12.9℃，年均日照 2 196 h，无霜期约 220 d。年均降雨量 660 mm，年均蒸发量 993.2 mm。供试土壤为砂壤土，耕层土壤 pH 值为 7.87，EC 为 $0.28 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ ，有机质含量 $13.98 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，全氮 $1.07 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，碱解氮 $90.06 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，速效磷 $45.41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，速效钾 $116.91 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，排灌系统良好。

1.2 试验设计

采用种植方式、施肥量、分隔方式 3 因素随机区组设计。种植方式为线辣椒单作、玉米单作、线辣椒 / 玉米套作；施肥量为施氮 $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (+ N) 与不施氮 (- N)；套作种间根系分隔方式为分隔、不分隔，共 8 个处理。根系分隔采用 0.12 mm 厚度的农用棚膜，分隔长度为 3 m，深度为 1 m。套作带中线辣椒每 6 行为一个分隔单元，玉米每 2 行为一个分隔单元。种植带为东西走向，分隔膜位于相邻线辣椒、玉米行的中间。

玉米行距为 0.4 m，株距 0.35 m；线辣椒株行距均为 0.4 m，玉米与线辣椒行间距为 0.24 m，一个线辣椒 / 玉米套作带宽 2.88 m。单作和套作在净占地面积上的种植密度相同，线辣椒留苗 $62\,500 \text{ 穴} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，每穴留苗 3 株，玉米留苗 $71\,400 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。套作中玉米占 22.2%，线辣椒占 77.8%。小区 $8.64 \text{ m} \times 6.0 \text{ m}$ ，每个试验小区套作种植 3 个组合带，单作玉米和单作线辣椒各种 12 行，重复 3 次。所有处理均施 P_2O_5 $50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 作基肥。

线辣椒育苗移栽，苗龄 60 d，5 月 20 日定植，10 月 5 日拔秧；玉米 6 月 10 日播种，9 月 15 日收获，两作物共生期约 90 d。所有处理的肥水管理与大田生产一致。

为了与大面积生产的田间生态条件保持一致，使试验结果有可参考性，试验只对种间根系不分隔处理的养分吸收量、利用效率及收获指数进行了分析。

1.3 分析方法

1.3.1 养分含量测定

植物样品用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 湿灰化法消煮，凯氏定氮仪测氮含量；钼铝黄显色，UV-754 紫外可见分光光度计比色测磷含量；火焰光度计测钾含量（鲍士旦，2000）。比较套作与单作养分吸收量时，均以可比面积为基础。

1.3.2 间套作优势

应用 LER 作为衡量套作产量优势的指标（Knörzer et al., 2009）。 $\text{LER} = (\text{Y}_{\text{ic}} / \text{Y}_{\text{mc}}) + (\text{Y}_{\text{im}} / \text{Y}_{\text{mm}})$ ，式中 Y_{ic} 和 Y_{im} 分别代表套作总面积上线辣椒和玉米的产量， Y_{mc} 和 Y_{mm} 分别为单作线辣椒和单作玉米的产量。当 $\text{LER} > 1$ ，为套作优势，当 $\text{LER} < 1$ ，为套作劣势。

套作相对于单作净增产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) = (套作线辣椒产量 + 套作玉米产量) - (单作线辣椒产量 $\times 0.778$ + 单作玉米产量 $\times 0.222$)。

1.3.3 养分吸收量比较

参照文献（Morris & Garrity, 1993）给出的计算方法比较套作养分吸收量与单作养分吸收量的差异。计算中所用单作养分吸收量不仅仅指某一种作物，而是单作玉米和单作线辣椒的养分吸收量以套作面积上各自所占比例为权重的加权平均值。

$\text{XU}(\%) = \{ [\text{XU}_{\text{ic}} / (\text{F}_{\text{m}} \times \text{XU}_{\text{mm}} + \text{F}_{\text{c}} \times \text{XU}_{\text{mc}})] - 1 \} \times 100$ 。式中，X 为某养分（N、P 或 K）， XU_{ic} 为套作体系中玉米与线辣椒的养分总吸收量， XU_{mm} 和 XU_{mc} 分别为单作玉米和单作线辣椒的养分吸收量， F_{m} 和 F_{c} 分别为套作系统中玉米和线辣椒所占比例。XU 的正或负反映套作吸氮量相对单作的增加或减少。

1.3.4 养分利用效率比较

单位养分吸收量所能生产的植株干物质质量为养分利用效率。套作养分利用效率相对于单作的增减 (XUE) 用如下公式计算 (Morris & Garrity, 1993), $XUE(\%) = [(Y_{ic} / XU_{ic}) / (F_m \times Y_{mm} / XU_{mm} + F_c \times Y_{mc} / XU_{mc}) - 1] \times 100$ 。式中, Y 为产量, 下标与前文养分吸收量计算式中的意义相同。XUE 的正或负反映作物套作后养分利用效率相对单作的增加或减少。

1.3.5 养分吸收和利用效率对产量优势的贡献

玉米在套作和单作中的吸收量和利用效率分别用 A_{im} 、 A_{mm} 和 E_{im} 、 E_{mm} 代表; 相应线辣椒的分别为 A_{ic} 、 A_{mc} 和 E_{ic} 、 E_{mc} 。根据文献 (李隆等, 2000), LER 的计算式写成: $LER = (A_{im} / A_{mm}) \times (E_{im} / E_{mm}) + (A_{ic} / A_{mc}) \times (E_{ic} / E_{mc})$, 令 $a_m = (A_{im} / A_{mm}) - 1$, $a_c = (A_{ic} / A_{mc}) - 1$; $e_m = (E_{im} / E_{mm}) - 1$, $e_c = (E_{ic} / E_{mc}) - 1$, 代入上式并整理得: $LER = 1 + (1 + a_m + a_c) + (e_m + e_c) + (a_m e_m + a_c e_c)$, 式中 $(1 + a_m + a_c)$ 为套作相对单作养分吸收量的增减对套作产量优势的贡献; $(e_m + e_c)$ 为套作相对于单作养分利用效率的增减对套作产量优势的贡献; $(a_m e_m + a_c e_c)$ 为养分吸收量和利用效率交互作用对套作优势的贡献。

1.4 数据处理与分析

数据处理及表格用 Microsoft office 2003 软件, 统计分析与显著性检验用 Minitab 15.0 软件。

2 结果与分析

2.1 套作产量优势

生物产量指作物在整个生育期间地上部分通过光合作用生产和积累的总干物质重量; 而经济产量, 即一般所指的产量, 指栽培目的所需要的主产品收获量。从表 1 可以看出, 不论增施氮肥和种间根系分隔与否, 线辣椒/玉米套作体系的经济产量和生物产量的 LER 均大于 1, 表明具有显著的套作优势, 地上部种间相互作用和地下部种间相互作用对该套作体系的经济产量和生物产量优势均有贡献。

表 1 线辣椒/玉米套作与单作的经济产量、生物产量及 LER

Table 1 Economic yield, and biological yield of capsicum and maize grown as monocrops and relay intercropping, and LER

种植方式 Cropping pattern	施肥处理 Fertilizer application	分隔方式 Root barrier	经济产量 (生物产量) / (kg · hm ⁻²) Economic yield (Biological yield)		LER
			玉米 Maize	线辣椒 Capsicum	
单作 Monocrops	- N		13 647 (24 583)	11 308 (17 539)	
	+ N		14 579 (26 927)	12 373 (19 872)	
套作 Relay intercropping	- N	不分隔 No barrier	15 339 (27 821)	12 581 (19 707)	1.12 (1.13)
		分隔 Barrier	13 019 (24 892)	13 124 (20 197)	1.11 (1.12)
	+ N	不分隔 No barrier	16 775 (30 696)	15 114 (25 278)	1.21 (1.24)
		分隔 Barrier	14 155 (25 156)	15 362 (25 858)	1.18 (1.22)
施氮水平间 Fertilizer application treatment			NS	NS	
种植方式 Cropping pattern			*	**	
根系分隔 Partition			**	**	
+ N × 种植方式 + N × cropping pattern			NS	**	
- N × 种植方式 - N × cropping pattern			*	NS	
种植方式 × 根系分隔 Partition × cropping			**	**	

注: NS 表示差异不显著, * 和 ** 分别表示达到 5% 和 1% 的显著水平。

Note: NS means non-significance, * and ** means significant difference at 5% and 1%, respectively.

另外,根据 LER 值分析,种间根系不分隔处理的套作优势大于种间根系分隔处理;生物产量套作优势比经济产量更明显。不增施氮肥时,根系不分隔处理的套作玉米经济产量和生物产量显著地高于单作,而套作线辣椒经济产量和生物产量与单作差异不显著。增施氮肥后,套作产量优势进一步提高,其 LER 值比对应的不增施氮肥处理大;套作玉米经济产量和生物产量与单作差异不显著;而套作线辣椒经济产量和生物产量显著高于单作,较不施氮肥分别增加 14.3%、21.2%。其中增施氮肥使线辣椒经济产量和生物产量极显著高于对应的不施氮肥处理,套作分别增加 18.6%、28.1%,而单作分别增加 9.4%、13.3% (表 1)。这说明增施氮肥处理的线辣椒/玉米套作体系产量优势主要来自于套作线辣椒经济产量和生物产量的大幅度提高。

2.2 套作地上部因素和地下部因素对产量优势的相对贡献

套作种间根系用塑料膜分隔时,仅存地上部种间相互作用;种间根系不分隔时,种间地上部和地下部相互作用共同存在。用套作相对单作的净增产量作为套作优势来表示地上部和地下部种间相互作用对线辣椒/玉米套作体系产量优势的相对贡献。由表 2 可知,套作种间根系不分隔时,地上部和地下部因素共同作用使套作体系在不增施氮肥和增施氮肥两种条件下经济产量(线辣椒和玉米之和,下同)分别净增 1 366、2 620 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,生物产量分别净增 2 406、5 043 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。套作种间根系分隔时,不增施氮肥和增施氮肥两种条件下经济产量分别净增 1 273、2 231 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,生物产量分别净增 2 137、4 264 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。前后两种分隔方式相减则为地下部种间相互作用在不增施氮肥和增施氮肥两种条件下使经济产量分别净增 93 和 389 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,生物产量分别净增 269 和 779 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。不论是经济产量还是生物产量,地上部因素对套作优势的贡献均远大于地下部;无论增施氮肥与否,地上部与地下部因素对套作优势贡献的比例差异均较大。

表 2 套作地下部因素和地上部因素对线辣椒/玉米产量优势的贡献

Table 2 Contribution of above- and below-ground to yield advantage in the capsicum/maize relay intercropping system

施肥处理 Fertilizer application	因素 Factor	经济产量 Economic yield		生物产量 Biological yield	
		套作优势/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	相对贡献率/%	套作优势/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	相对贡献率/%
		Relay intercrops advantage	Relative contribution ratio	Relay intercrops advantage	Relative contribution ratio
- N	地上部 + 地下部 Above-ground and below-ground	1 366		2 406	
	仅地上部 Above-ground only	1 273	93.2	2 137	88.8
	仅地下部 Below-ground only	93	6.8	269	11.2
+ N	地上部 + 地下部 Above-ground and below-ground	2 620		5 043	
	仅地上部 Above-ground only	2 231	85.2	4 264	84.6
	仅地下部 Below-ground only	389	14.8	779	15.4

2.3 套作与单作对养分的吸收量

套作后植株吸氮量明显增加(表 3),不增施氮肥,套作系统吸氮量比单作玉米和单作线辣椒按套作比例加权平均的吸氮量高 22.1%;增施氮肥,这种差异缩小,套作比单作仍高 16.4%。这一方面说明套作增加了植株吸氮量;另一方面说明在缺氮条件下,套作比单作有更明显的吸氮潜力。套作也明显提高了植株的吸磷量,磷吸收量为 27.5 ~ 33.4 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,而单作磷吸收量为 21.8 ~ 25.6 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,套作磷吸收量高于单作 26.1% ~ 30.5%。从表 3 还可以看出,增施氮肥有利于提高套作植株吸磷量,不增施氮肥的套作比单作吸磷量增加 26.1%,施氮肥后套作比单作增加 30.5%。套作使作物吸钾量提高 27.0% ~ 51.5%,趋势与氮、磷相同。这种差异在增施氮肥后更为明显。

表 3 收获时单作与套作体系的作物养分吸收量

Table 3 Quantities of nutrient absorption of crops grown as monocrops and relay intercropping at maturity

施肥处理 Fertilizer application	种植方式 Cropping pattern	N		P		K	
		吸收量/ (kg · hm ⁻²) Adsorption amount	比单作增减/ % Changes to monocrops	吸收量/ (kg · hm ⁻²) Adsorption amount	比单作增减/ % Changes to monocrops	吸收量/ (kg · hm ⁻²) Adsorption amount	比单作增减/ % Changes to monocrops
- N	单作 Monocrops	156.7		21.8		213.6	
	套作 Relay intercropping	191.3	22.1	27.5	26.1	271.3	27.0
+ N	单作 Monocrops	181.4		25.6		226.2	
	套作 Relay intercropping	211.1	16.4	33.4	30.5	342.8	51.5

2.4 套作与单作的养分利用效率

从生物产量角度分析，套作养分利用效率是套作植株的生物产量之和除以某养分的总吸收量；单作养分利用效率是按套作比例为权重对单作的加权平均值。只有增施氮肥套作体系的磷利用效率比单作高 4.4%，其它养分均表现为套作利用效率低于单作（表 4），可见，从生物产量的角度衡量养分利用效率，套作略低于单作或明显低于单作。另外，增施氮肥可大幅度提高套作的氮、磷、钾吸收量（表 3），但作物的氮、钾利用效率却下降（表 4），仅磷的利用效率有所增加。

表 4 单作与套作系统中生物产量的养分利用效率

Table 4 Comparisons of nutrient use efficiency for biological yield between monocrops and relay intercropping

施肥处理 Fertilizer application	种植方式 Cropping pattern	N		P		K	
		利用效率/ (kg · kg ⁻¹) Nutrient use efficiency	比单作增减/ % Changes to monocrops	利用效率/ (kg · kg ⁻¹) Nutrient use efficiency	比单作增减/ % Changes to monocrops	利用效率/ (kg · kg ⁻¹) Nutrient use efficiency	比单作增减/ % Changes to monocrops
- N	单作 Monocrops	90.8		578.6		63.4	
	套作 Relay intercropping	87.2	- 4.0	524.5	- 9.4	60.7	- 4.3
+ N	单作 Monocrops	92.7		572.3		67.9	
	套作 Relay intercropping	79.6	- 14.1	597.4	4.4	57.1	- 15.9

从经济产量角度分析，套作养分利用效率是套作植株的经济产量之和除以其养分的总吸收量。表 5 显示，不增施氮肥时套作植株的氮、磷、钾利用效率比单作分别提高 10.5%、5.2%和 9.3%。增施氮肥后套作植株的氮利用效率低于单作，降低了 5.3%，而磷、钾的利用效率套作仍然高于单作，分别提高 12.8%和 10.9%。

从养分收获指数角度分析（表 6），养分收获指数是指果实中养分的累积量占植株养分总累积量的比例，其比例的大小反映了作物生长后期养分向果实转移的强度。与单作相比，套作玉米的氮收获指数有所下降，而套作线辣椒的氮收获指数却是增加的。因此，以生物产量为基础的氮利用效率，套作低于单作，而以经济产量为基础的氮利用效率则有所不同。套作玉米、线辣椒的磷收获指数呈略有增加的趋势，这可解释表 4 和表 5 中磷利用效率的差异。套作玉米的钾收获指数低于单作，而套作线辣椒的钾收获指数高于单作。

表 5 单作与套作系统中经济产量的养分利用效率

Table 5 Comparisons of nutrient use efficiency for economic yield between monocrops and relay intercropping							
施肥处理 Fertilizer application	种植方式 Cropping pattern	N		P		K	
		利用效率/ (kg·kg ⁻¹)	比单作增减/ %	利用效率/ (kg·kg ⁻¹)	比单作增减/ %	利用效率/ (kg·kg ⁻¹)	比单作增减/ %
		Nutrient use efficiency	Changes to monocrops	Nutrient use efficiency	Changes to monocrops	Nutrient use efficiency	Changes to monocrops
- N	单作 Monocrops	32.4		220.6		24.6	
	套作 Relay intercropping	35.8	10.5	232.1	5.2	26.9	9.3
	单作 Monocrops	35.6		227.3		22.9	
+ N	套作 Relay intercropping	33.7	- 5.3	256.4	12.8	25.7	10.9

注：线辣椒的养分利用效率以果实产量为基础计算。
 Note：Calculation of capsicum nutrients use efficiency was based on fruit yield.

表 6 套作和单作条件下作物的养分收获指数

Table 6 Nutrient harvest index of maize and capsicum grown as monocrops and relay intercropping							
施肥处理 Fertilizer application	种植方式 Cropping pattern	N		P		K	
		玉米	线辣椒	玉米	线辣椒	玉米	线辣椒
		Maize	Capsicum	Maize	Capsicum	Maize	Capsicum
- N	单作 Monocrops	0.69	0.39	0.68	0.53	0.15	0.19
	套作 Relay intercropping	0.67	0.46	0.74	0.54	0.14	0.27
	单作 Monocrops	0.72	0.42	0.69	0.47	0.13	0.20
+ N	套作 Relay intercropping	0.57	0.54	0.75	0.55	0.11	0.24

注：线辣椒的养分收获指数是以果实中的养分含量计算。
 Note：Nutrient harvest index was calculated by the nutrition content of fruit in capsicum.

2.5 养分吸收和利用效率对套作优势的贡献

套作优势的主要原因是养分吸收量的增加，而非是利用效率的提高。LER 反映了套作产量优势的大小，其值大小由养分吸收量项、养分利用效率和交互项三部分共同决定。

从表 7 可以看出，氮吸收因子的贡献为正，而氮利用效率的贡献为负。这说明套作后氮养分利用效率降低了；吸收和利用效率交互作用的贡献为正。另外，增施氮肥后吸氮量对套作优势的贡献有所降低，不增施氮肥为 0.33，增施氮肥为 0.29，说明在缺氮条件下，套作能够增加植株对氮的吸

表 7 养分吸收和利用效率对套作优势的贡献

Table 7 Contribution of absorption and utilization of nutrient , and interaction factors to LER					
养分 Nutrient	施肥处理 Fertilizer application	LER	养分吸收量项 Nutrition absorbtion amount items	养分利用效率项 Nutrition utilization efficiency items	交互项 Interaction items
氮 N	- N	1.29	0.33	- 0.23	0.19
	+ N	1.25	0.29	- 0.15	0.11
磷 P	- N	1.26	0.27	- 0.19	0.18
	+ N	1.30	0.31	- 0.14	0.13
钾 K	- N	1.19	0.25	0.10	- 0.16
	+ N	1.33	0.59	- 0.37	0.11

注：LER = 1 + (1 + a_m + a_c) + (e_m + e_c) + (a_me_m + a_ce_c)，1 + a_m + a_c 为养分吸收量项，e_m + e_c 为养分利用效率项，a_me_m + a_me_c 为交互项。
 Note：1 + a_m + a_c is nutrition absorbtion amount items，e_m + e_c is nutrition utilization efficiency items，a_me_m + a_me_c is interaction tiems.

收,从而使套作优势明显。磷养分的吸收因子贡献为正,约 0.27 ~ 0.31;利用效率贡献为负,约 -0.19 ~ -0.14;吸收和利用效率交互作用贡献也为正,施氮肥有利于磷吸收对套作优势的贡献。钾养分的吸收对套作优势贡献为正,利用效率和交互作用的贡献有正有负。

从表 7 还可看出,增施氮肥,提高了磷、钾养分吸收效率对套作优势的贡献,说明氮和磷、磷和钾之间的交互作用为正。

3 讨论

本研究结果表明,无论增施氮肥与否,线辣椒/玉米套作体系经济产量和生物产量的 LER 均大于 1,呈现显著套作优势。辣椒玉米间作对辣椒疫病、病毒病和玉米大、小斑病均具有显著防治效果 (Midmore et al., 1992; 孙雁 等, 2006),还可降低夏季辣椒的“日灼病”(李学敏, 1994)。这说明线辣椒/玉米套作是一个优质、高产、高效种植模式。

套作优势是种间资源竞争作用小于促进作用的结果 (Zhang & Li, 2003; Li et al., 2007)。种间促进作用主要表现在地上部光热水气资源的改善 (Zhang et al., 2008; Ghanbari et al., 2010)和地下部根系间营养、水分、土壤微生物、土壤酶的改善 (Gunes et al., 2007; 徐强 等, 2007)。非豆科作物之间的套作,缺乏豆科作物的根系固氮效应,种间竞争比较激烈,产量优势的形成主要依赖于时间生态位和空间生态位差异的有效利用。Zhang 等 (2008) 报道,棉花/小麦套作体系的产量优势来自于作物在时间和空间上对光合有效辐射 (PAR) 截获量的增加,并非光能利用率的提高。本试验中的玉米/线辣椒套作体系,一高一矮在空间上形成垂直高差,充分利用农田生态位和变平面用光为立体分层用光,使田间光截获能力大大提高,整个农田系统的光热资源得到充分利用。适度的遮荫可提高辣椒产量,而过度遮荫则导致辣椒落花落果 (Wien et al., 1989)。与单作相比,套作遮荫还可以使矮秆作物区域的土壤湿度增加和温度降低 (Ghanbari et al., 2010),地上部、地下部竞争未形成叠加效应 (Mushagalusa et al., 2008),利于线辣椒生长。套作体系中作物产量和养分吸收量增加的原因之一是作物种间根系在占据土壤空间方面呈现很好的互补性,发生对称性种间促进作用。Li 等 (2006) 研究蚕豆/玉米间作体系发现,间作后玉米根系的 RLD (根长密度) 有所下降,且根系延伸到蚕豆根区之下,趋于向深层土壤区域发展,从而获得更大的土壤养分空间,种间根系呈现分层分布,大大降低了种间根系对养分的竞争强度。本试验对线辣椒采用的育苗移栽方式造成主根截断,其又属于浅根系蔬菜,根系在土层中的分布较浅,同深根系玉米竞争土壤资源的强度显著降低。增施氮肥条件下套作体系的经济产量和生物产量 LER 比不增施氮肥高,说明增施氮肥能提高套作体系的产量优势。这是因为不施肥时,种间地下部对资源的激烈竞争削弱了套作优势。施肥缓解了种间地下部的竞争,套作优势更明显。无论种间根系分隔与否,线辣椒玉米套作的经济产量和生物产量 LER 均大于 1,说明此套作体系优势来自于地上部、地下部种间相互作用两个方面。种间根系不分隔时的套作体系产量和养分吸收量均高于根系分隔,证明套作体系具有明显的种间根部效应优势。

套作产量优势在作物营养方面的生物学基础主要是养分吸收量的增加和养分利用效率的提高 (Chowdhury & Rosario, 1994)。本研究表明,线辣椒/玉米套作的氮磷钾吸收量超过了相应作物单作时的吸收量,也高于单作吸收量按套作比例加权的平均吸收量,表现出氮、磷、钾吸收套作优势。这与其它学者对黑麦/豌豆 (Karpenstein-Machan & Stuelpnagel, 2000) 和玉米/花生 (焦念元 等, 2008) 间套作体系的研究结果一致。不同作物间套作,种间根际作用活化养分,促进养分吸收,但玉米/线辣椒套作体系中养分的种间促进作用机制有待进一步研究。有报道指出,增施氮肥可以促进玉米/线辣椒套作体系氮磷钾的吸收积累,提高磷、钾吸收利用效率,但中高施氮量和种间互

作使作物发生氮素“奢侈吸收”现象(李玉英等, 2008), 本试验中套作施氮后氮肥利用率下降的原因可能是氮肥施用量偏高。进一步分析氮磷钾吸收利用对线辣椒玉米套作优势的贡献, 氮磷钾吸收对套作优势的贡献率均为正效应; 除不施氮肥处理的钾养分利用效率对套作优势的贡献率为正效应, 氮磷钾交互作用对套作优势的贡献率为负效应外, 其余氮磷钾养分利用效率对间作优势的贡献率均为负效应, 氮磷钾交互作用对套作优势的贡献率均为正效应。这说明线辣椒、玉米套作产量优势主要来自养分吸收量的增加, 而非养分利用效率的提高。与单作相比, 套作对线辣椒、玉米的氮、磷、钾收获指数影响也不尽相同, 这是套作体系中线辣椒、玉米的氮、磷、钾养分吸收和利用的元素间差异较大的原因。

套作在一起的作物有着复杂的相互作用, 可分为地上部相互作用和地下部相互作用两部分, 但生态系统中地上部与地下部通过养分循环存在着不可分割的紧密联系(Wardle et al., 2004)。套作的产量优势大小不仅与套作体系有关, 还与地上部、地下部相互作用有关, 而种间根系分隔技术被认为是研究地上部和地下部因素对套作优势贡献的有效方法(Li et al., 1999)。本试验结果显示, 玉米/线辣椒套作体系的产量优势中以地上部相互作用贡献为主, 地下部相互作用贡献为辅, 其它套作体系也获得了相似的结果(Zhang & Li, 2003; 刘广才, 2005)。这说明此套作种植模式中, 生产管理应以进一步提高地上部因素对产量优势的贡献为重点。

References

- Bao Shi-dan. 2000. Agrochemistry analysis of soil (3rd Ed). Beijing: China Agriculture Press. (in Chinese)
- 鲍士旦. 2000. 土壤农化分析. 第3版. 北京: 中国农业出版社.
- Chowdhury M K, Rosario E L. 1994. Comparison of nitrogen, phosphorus and potassium utilization efficiency in maize / mung bean intercropping. *J Agric Sci (Camb)*, 122: 193–199.
- Ghanbari A, Dahmardeh M, Siahpar B A, Ramroudi M. 2010. Effect of maize (*Zea mays* L.) – cowpea (*Vigna unguiculata* L.) intercropping on light distribution, soil temperature and soil moisture in arid environment. *International Journal of Food, Agriculture & Environment*, 8 (1): 102–108.
- Gunes A, Inal A, Adak M S, Alpaslan M, Bagci E G, Erol T, Pilbeam D J. 2007. Mineral nutrition of wheat, chickpea and lentil as affected by mixed cropping and soil moisture. *Nutr Cycl Agroecosyst*, 78: 83–96.
- Hauggaard-Hielsen H, Ambus P, Jensen E S. 2001. Interspecific competition, N use and interference with weeds in pea-barley intercropping. *Field Crop Research*, 70: 101–109.
- Inal A, Gunes A, Zhang F, Cakmak I. 2007. Peanut/maize intercropping induced changes in rhizosphere and nutrient concentrations in shoots. *Plant Physiology and Biochemistry*, 45 (5): 350–356.
- Jiao Nian-yuan, Ning Tang-yuan, Zhao Chun, Hou Lian-tao, Li Zeng-jia, Li You-jun, Fu Guo-zhan, Han Bin. 2008. Effect of nitrogen application and planting pattern on N and P absorption and use in maize – peanut intercropping system. *Acta Agronomica Sinica*, 34 (4): 706–712. (in Chinese)
- 焦念元, 宁堂原, 赵 春, 侯连涛, 李增嘉, 李友军, 付国占, 韩 宾. 2008. 施氮量和玉米—花生间作模式对氮磷吸收与利用的影响. *作物学报*, 34 (4): 706–712.
- Karpenstein-Machan M, Stuelpnagel R. 2000. Biomass yield nitrogen fixation of legumes monocropped and intercropped with rye and rotation effects on a subsequent maize crop. *Plant and Soil*, 218: 215–232.
- Knörzer H, Graeff-Hönniger S, Guo Bu-qing, Wang Pu, Claupein W. 2009. The Rediscovery of Intercropping in China: A traditional cropping system for future Chinese agriculture — A Review//Lichtfouse. *Sustainable Agriculture Reviews (Volume 2): Climate change, intercropping, pest control and beneficial microorganisms*. Springer Press: 13–44.
- Li L, Li S M, Sun J H, Zhou L L, Bao X G, Zhang H G, Zhang F S. 2007. Diversity enhances agricultural productivity via rhizosphere phosphorus facilitation on phosphorus deficient soils. *PNAS*, 104 (27): 11192–11196.

- Li L, Sun J, Zhang F, Guo T, Bao X, Smith F A, Smith S E. 2006. Root distribution and interactions between intercropped species. *Oecologia*, 147 : 280 – 290.
- Li L, Sun J, Zhang F, Li X, Yang S, Rengel Z. 2001. Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping I. Yield advantage and interspecific interactions on nutrients. *Field Crops Research*, 71 (2) : 123 – 137.
- Li L, Yang S C, Li X L, Zhang F S, Peter Christie. 1999. Interspecific complementary and competitive interactions between intercropped maize and faba bean. *Plant and Soil*, 212 : 105 – 114.
- Li Long, Li Xiao-lin, Zhang Fu-suo, Sun Jian-hao, Yang Si-cun, Lu Man-ji. 2000. Uptake and utilization of nitrogen, phosphorus and potassium as related to yield advantage in wheat/soybean intercropping. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 6 (2) : 140 – 146. (in Chinese)
- 李 隆, 李晓林, 张福锁, 孙建好, 杨思存, 芦满济. 2000. 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. *植物营养与肥料学报*, 6 (2) : 140 – 146.
- Li Shu-min. 2004. Mechanism of interspecific facilitation on phosphorus uptake by crops in intercropping systems [Ph. D. Dissertation]. Beijing : China Agricultural University. (in Chinese)
- 李淑敏. 2004. 间作物吸收磷的种间促进作用机制研究 [博士论文]. 北京 : 中国农业大学.
- Li Xue-min. 1994. Ecological effect of maize/pepper intercropped population in summer. *Hebei Agricultural Science*, 12 (4) : 25 – 27. (in Chinese)
- 李学敏. 1994. 夏玉米辣椒间作的植群生态效应研究. *河北农业科学*, 12 (4) : 25 – 27.
- Li Yu-ying, Yu Chang-bing, Sun Jian-hao, Li Chun-jie, Li Long, Cheng Xu. 2008. Nitrogen environmental endurance and economically-ecologically appropriate amount of nitrogen fertilizer in faba bean / maize intercropping system. *Transactions of CSAE*, 24 (3) : 223 – 227. (in Chinese)
- 李玉英, 余常兵, 孙建好, 李春杰, 李 隆, 程 序. 2008. 蚕豆 / 玉米间作系统经济生态施氮量及对氮素环境承受力. *农业工程学报*, 24 (3) : 223 – 227.
- Liu Guang-cai. 2005. Difference and its mechanism of interspecific nutrition competition in different intercropping systems [Ph. D. Dissertation]. Lanzhou : Gansu Agricultural University. (in Chinese)
- 刘广才. 2005. 不同间套作系统种间营养竞争的差异性及其机理研究 [博士论文]. 兰州 : 甘肃农业大学.
- Midmore D J, Yang S, Kleinhenz V, Green S, Tsay J. 1992. Intercropping chilli peppers with maize/Hock C B, Hong L W, Rejab M, Syed A R. Conference on Chilli Pepper Production in the Tropics. Kuala Lumpur : 37 – 51.
- Morris R A, Garrity D P. 1993. Resource capture and utilization in intercropping : Non-nitrogen nutrients. *Field Crops Research*, 34 : 319 – 334.
- Mushagalusa G N, Jean-François L, Draye X. 2008. Shoot and root competition in potato/maize intercropping : Effects on growth and yield. *Environmental and Experimental Botany*, 64 (2) : 180 – 188.
- Sun Yan, Zhou Tian-fu, Wang Yun-yue, Chen Jian-bin, He Xia-hong, Li Cheng-yun, Zhu You-yong. 2006. Effect of intercropping on disease management and yield of chilli pepper and maize. *Acta Horticulturae Sinica*, 33 (5) : 995 – 1000. (in Chinese)
- 孙 雁, 周天富, 王云月, 陈建斌, 何霞红, 李成云, 朱有勇. 2006. 辣椒玉米间作对病害的控制作用及其增产效应. *园艺学报*, 33 (5) : 995 – 1000.
- Trenbath B R. 1986. Resource Use by Intercrops/Francis C A. Multiple cropping systems. New York : Macmillan Publishing Company.
- Wardle D A, Bardgett R D, Klironomos J N, van der Putten W H, Wall D H. 2004. Ecological linkages between aboveground and belowground biota. *Science*, 304 : 1629 – 1633.
- Wien H C, Tripp K E, Hernandez-Armenta R, Turner A D. 1989. Abscission of reproductive structures in pepper : Causes, mechanisms and control/Green S K, Griggs T D, McLean B T. Tomato and pepper production in the tropics. Taiwan : AVRDC : 150 – 165.
- Xu Qiang, Cheng Zhi-hui, Meng Huan-wen, Zhang Yu. 2007. Relationships between soil nutrients and rhizospheric soil microbial communities and enzyme activities in a maize/capsicum intercropping system. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 18 (12) : 2747 – 2754. (in Chinese)
- 徐 强, 程智慧, 孟焕文, 张 昱. 2007. 玉米 / 线辣椒套作系统中土壤养分与根际土壤微生物、酶活性的关系. *应用生态学报*, 18 (12) : 2747 – 2754.
- Zhang F S, Li L. 2003. Using competitive and facilitative interacts in intercropping systems enhance crop productivity and nutrients-use efficiency. *Plant and Soil*, 248 : 305 – 312.
- Zhang L, van der Werf W, Bastiaans L, Zhang S, Li B, Spiertz J H. 2008. Light interception and utilization in relay intercrops of wheat and cotton. *Field Crops Research*, 107 (1) : 29 – 42.