

## 华北平原粮田替代型复合种植模式生态经济比较研究

张伟,陈源泉,隋鹏,高旺盛,刘海军

(中国农业大学农学与生物技术学院区域农业发展研究中心,北京 100094)

**摘要:**通过定位试验,从生态经济角度对不同间作复合种植模式与传统种植模式进行对比分析,以寻求经济高效、生态安全的替代型种植模式,结果表明:(1)间作改善了作物的生长环境,提高了资源利用率,因而间作复合种植模式间作季节表现出明显的产量优势,间作复合种植模式单作季节产量明显增加。(2)禾豆间作不仅通过直接影响当季作物的产量形成来提高土地利用率,而且还通过对后作作物产量的积极影响来提高后作作物的土地利用率,从而提高复合种植模式整体的土地利用率。研究得出间作复合种植模式土地利用率全年提高了4.0%~7.0%。(3)间作复合种植模式在间作季及全年的农机械、农药、化肥的经济投入量减少,农机械、农药等措施的减少,降低了对农田土壤理化性状等的外来干扰,这对改善农田生态环境来说意义重大。(4)间作复合种植模式提高了各季及全年的经济效益和经济产投比。全年经济效益最高可达25067.7元/hm<sup>2</sup>,比对照提高了18.97%。综合以上结果,从改善农田生态、提高资源循环利用效率与提高经济效益等方面整体评价,禾豆间作复合种植模式可以作为传统麦玉连作的替代模式之一。

**关键词:**间作;生产力;土地当量比

**中图分类号:**S3 **文献标识码:**A

### Research of Eco-economy on Substitution Planting Patterns in the North China Plain

Zhang Wei, Chen Yuanquan, Sui Peng, Gao Wangsheng, Liu Haijun

(Regional Agricultural Research Center, College of Agronomy and Biotechnology,  
China Agricultural University, Beijing 100094)

**Abstract:** According to the fixed position experiment, the eco-economy of different intercropping patterns was studied in one year. The results indicated that: (1) The economical yield and the biomass yield of different intercropping patterns were higher than CK. (2) The land equivalent ratio of different intercropping patterns was higher than mono-cropping pattern, because of the legumes and cereals intercropped, and the land utilization efficiency increased by from 4.0% to 7.0%. (3) The pesticide, chemical fertilizer and agricultural mechanical inputs of different intercropping patterns were reduced, which was important to improve the farmland ecological environment. (4) The benefits and the ratio of economical output to input of the different intercropping patterns were improved much more than CK. The annual economical benefit was raised to 25067.7 yuan per hectare, and increased by 18.97% at most. We concluded that the intercropping pattern was the optimum substitution pattern to adjust the planting structure and to improve the farmland ecological environment.

**Key words:** intercropping patterns, productivity, land equivalent ratio

**基金项目:**“十一五”国家科技支撑计划“粮食主产区农田生态健康管理关键技术与示范”(2006BAD02A15、2007BAD89B01)课题资助。

**第一作者简介:**张伟,男,1975年出生,河南新乡人,硕士研究生,主要从事农业生态研究。通信地址:100094 北京海淀区圆明园西路2号, Tel: 010-62731163, E-mail: hnxzhangwei@163.com。

**通讯作者:**高旺盛,中国农业大学农学与生物技术学院教授、博士生导师,主要从事宏观农业与区域农业、农业生态系统管理以及农业发展战略政策等方面研究。E-mail: wshgao@cau.edu.cn; 隋鹏,中国农业大学农学与生物技术学院副教授、硕士生导师,主要从事生态农业、节水种植制度研究。E-mail: suipengye@cau.edu.cn。

**收稿日期:**2009-02-11, **修回日期:**2009-02-26。

## 0 引言

华北平原粮食主产区是中国重要的粮食生产基地,长期以来,一年两熟的集约化种植模式造成了农田生态系统结构愈益简单、光热等自然资源综合循环利用率降低、土壤质量退化、系统整体抗逆自我调节功能弱化等生态问题日益突出,引起了广泛的关注。因而,建立多功能的生态复合系统,优化资源配置,提高农田生态系统对光热水肥等自然资源的高效循环利用,成为现代农业的发展方向和重点之一。针对一年两熟的集约化种植模式所带来的问题,备受研究者关注的禾豆间作<sup>[1-5]</sup>是较为理想的替代种植模式。对一年两熟制地区的禾豆间作已有很多研究<sup>[6-9]</sup>,主要集中于夏玉米季间作模式研究,小麦季间作特别是针对周年内不同禾豆间作复合种植模式比较的研究较少,同时对间作复合系统的生态健康评价尚处于初期阶段。此文选择传统麦玉复种单作的典型代表区-太行山前平原粮食主产区为例,设置禾豆间作复合种植模式与当地麦玉传统种植模式的对比试验,分析间作复合种植

模式的生产力与经济效益增长的潜力及其原因,为进一步对间作复合种植模式的农田生态健康综合评价提供理论与实证的依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地自然概况

试验在河北石家庄中科院栾城农业生态野外实验站(37°50'N, 114°40'E)进行,海拔 50.1 m。实验站多年平均降水量 480.7 mm,主要集中在 7、8、9 月份,雨热同期,属暖温带半湿润、半干旱季风气候。光热资源丰富,年总辐射量 5433 KJ/cm<sup>2</sup>,年日照时数 2608 h,年平均气温 12.3 °C,≥0°C 的积温 7410 °C。其光温条件完全满足一年两熟(麦玉两熟所需最低积温 4400 °C)的需求。试验田土层深厚,土壤为褐土类灰黄土种,饱和体积含水量为 44.1%,田间体积持水量为 35.4%,凋萎体积含水量为 13.2%<sup>[10]</sup>。此区种植制度以一年两熟或两年三熟为主,主要作物除小麦、玉米外,花生、大豆等豆科作物在该区也有种植。

表 1 种植模式比较定位试验方案

种植模式代号	模式描述			备注
	2007年6月—10月	2007年10月—2008年6月	2008年6月—10月	
MW-IC	夏玉米  花生	冬小麦	夏玉米  花生	单作-间作
IW-IC	夏玉米  花生	豌豆  冬小麦	夏玉米  花生	间作-间作
IW-MC	夏玉米	豌豆  冬小麦	夏玉米	间作-单作
MW-MC(CK)	夏玉米	冬小麦	夏玉米	单作-单作

注: M代表 mono-crop; W代表 wheat; I代表 intercrop; C代表 corn。

### 1.2 田间试验设计

试验方案如表 1。试验阶段为 2007 年 10 月—2008 年 10 月,以模式 MC-MC(传统麦玉两熟)作为对照,模式 IC-IC 中冬小麦前、后茬均为花生,豌豆前、后茬均为夏玉米。小麦播种时间 07 年 10 月 16 日,收获时间 08 年 6 月 13 日,豌豆播种时间 08 年 3 月 8 日,收获时间 08 年 6 月 15 日,夏玉米、夏花生播种时间 08 年 6 月 16 日,夏玉米收获时间 08 年 10 月 2 日,夏花生收获时间 08 年 10 月 10 日。小区面积 15×7 m<sup>2</sup>,每个处理 3 个重复,间作处理中,幅宽为 5 m,其中小麦带、豌豆带(或玉米带、花生带)各 2.5 m。各处理水肥等田间管理均按常规管理。

### 1.3 实验方法

1.3.1 作物经济产量、生物学产量测定 冬小麦收获时,取 1 m<sup>2</sup>样方,每个间作带取 3 个,每个处理共 9 个重复,风干后测定产量;豌豆、花生收获时,取 1 m 长 3 行,每个间作带取 3 个,每个处理共 9 个重复,风干后测定产

量;夏玉米收获时,取 5 m 长 4 行的玉米,每个间作带取 3 个,每个处理共 9 个重复,风干后测定产量。最后将产量折合成单位产量。

1.3.2 土地当量比的计算 土地当量比(Land Equivalent Ratio)<sup>[11]</sup>  $LER=L_a+L_b$ ,

其中, $L_a$ =间作小麦(或玉米)产量/单作(CK)小麦(或玉米)产量;

$L_b$ =间作豌豆(或花生)产量/单作(CK)豌豆(或花生)产量。

某处理全年土地当量比=该处理小麦季土地当量比×2/3+该处理玉米季土地当量比×1/3。

### 1.4 数据分析

不同处理的试验结果,利用 SPASS 统计软件在 0.05%水平进行显著性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同间作复合种植模式生物学产量比较

间作复合种植模式间作季节间作禾本科作物的生

物学产量比同面积单作的高, 而间作豆科作物的生物学产量比同面积单作的低, 但是禾本科作物产量的增加量远远高于豆科作物产量的减少量, 表现为明显的产量优势(见表2)。在小麦季, 间作小麦比同面积单作小麦的生物学产量增加了 543.3~1032.3 kg/hm<sup>2</sup>, 提高了 8.87%~17.96%, 间作豌豆比同面积单作豌豆生物学产量减少了 267.5~362.5 kg/hm<sup>2</sup>, 降低了 12.70%~17.21%。玉米季, 间作玉米比同面积单作玉米的生物学产量增加了 1559.9~2395.1 kg/hm<sup>2</sup>, 提高了 18.12%~29.13%。间作花生生物学产量比单作花生分别减少了 222.5~290.5 kg/hm<sup>2</sup>, 降低了 8.28%~10.81%。其原因可能是禾豆间作条件下, 种间竞争禾本科具有优势, 能够充分利用间作的光热等条件, 促进其生物量的形成, 因而表现为禾豆间作对禾本科的生物学产量形成产生积极影响, 对豆科作物的生物学产量产生消极影响。

表2 不同种植模式生物学产量比较 (kg/hm<sup>2</sup>)

处理	产量			
	小麦季		玉米季	
	小麦	豌豆	玉米	花生
MW-IC	12245.3b	—	10169.9a	2397.0b
IW-IC	6780.3a	1838.5b	10617.3a	2465.0b
IW-MC	6666.0a	1743.5b	17220.0ab	—
MW-MC(CK)	11496.1b	—	16444.4b	—
*	—	4212.0a	—	5375.0a

注: \* 同一季节单作豆科作物的试验产量; 不同字母表示  $P \leq 0.05\%$  水平显著。

间作复合种植模式单作季节禾本科作物生物学产量明显高于同季节的传统种植模式。模式 MC-IC 单作小麦的生物学产量比对照模式 MC-MC 增加了 749.2 kg/hm<sup>2</sup>, 提高了 6.52%; 模式 IC-MC 单作玉米的生物学产量比对照模式 MC-MC 增加了 775.6 kg/hm<sup>2</sup>, 提高了 4.72%。其原因可能是由于前作的禾豆间作改善了土壤环境, 促进了后茬作物生物学产量的形成。

### 2.2 不同间作复合种植模式经济产量比较

间作复合种植模式间作季节间作禾本科作物的经济产量比同面积单作的高, 而间作豆科作物的经济产量比同面积单作的低, 但是禾本科作物产量的增加量远远高于豆科作物产量的减少量, 表现为明显的产量优势(见表3)。在小麦季, 间作小麦比同面积单作小麦的经济产量增加了 208.5~394.5 kg/hm<sup>2</sup>, 提高了 7.39%~14.76%, 间作豌豆比同面积单作豌豆的经济产量减少了 31~61 kg/hm<sup>2</sup>, 降低了 4.42%~8.69%。玉米季, 间作玉米比同面积单作玉米的经济产量增加了 942.5~1462.5 kg/hm<sup>2</sup>, 提高了 18.82%~30.68%, 间作花

生的经济产量比同面积单作花生减少了 91~119 kg/hm<sup>2</sup>, 降低了 8.23%~10.76%。其原因可能是禾豆间作条件下, 种间竞争禾本科具有优势, 能够充分利用间作的光热等条件, 促进其经济产量的形成, 因而表现为禾豆间作对禾本科的经济产量形成产生积极影响, 对豆科作物的经济产量产生消极影响。

表3 不同种植模式经济产量 (kg/hm<sup>2</sup>)

处理	产量			
	小麦季		玉米季	
	小麦	豌豆	玉米	花生
MW-IC	5643b	—	5950ab	987b
IW-IC	3068a	671b	6230a	1015b
IW-MC	3030a	641b	10015ab	—
MW-MC(CK)	5347b	—	9535b	—
*	—	1404a	—	2212a

注: \* 同一季节单作豆科作物的试验产量; 不同字母表示  $P \leq 0.05\%$  水平显著。

间作复合种植模式单作季节禾本科作物经济产量明显高于同季节的传统种植模式。模式 MW-IC 单作小麦的经济产量比对照模式 MW-MC 增加了 296 kg/hm<sup>2</sup>, 提高了 5.54%; 模式 IW-MC 单作玉米的经济产量比对照模式 MC-MC 增加了 480 kg/hm<sup>2</sup>, 提高了 5.03%。而且模式 MW-IC 中小麦—花生带的小麦经济产量为 2867 kg/hm<sup>2</sup>, 小麦—玉米带的小麦经济产量为 2776 kg/hm<sup>2</sup>, 比同面积对照模式 MW-MC 小麦经济产量分别增加了 193.5 kg/hm<sup>2</sup>、102.5 kg/hm<sup>2</sup>, 提高了 7.24%、3.83%; 模式 IW-MC 中小麦—玉米带的玉米经济产量为 4988 kg/hm<sup>2</sup>, 豌豆—玉米带的玉米经济产量为 5027 kg/hm<sup>2</sup>, 比同面积对照模式 MW-MC 玉米经济产量分别增加了 220.5 kg/hm<sup>2</sup>、259.5 kg/hm<sup>2</sup>, 提高了 4.63%、5.44%。其原因可能是由于前作的禾豆间作改善了土壤环境, 促进了后茬作物经济产量的形成, 豆科作物间作带的影响更为明显。

### 2.3 不同间作复合种植模式土地当量比比较

与对照模式 MC-MC 相比, 间作复合种植模式提高了土地当量比(见表4)。模式 MW-IC、IW-IC、IW-MC 的土地利用率在小麦季分别提高了 6.0%、5.0%、3.0%, 在玉米季分别提高了 7.0%、11.0%、5.0%, 全年分别提高了 6.0%、7.0%、4.0%。其原因与不同间作复合模式的经济产量形成有关, 可见, 禾豆间作不仅通过直接影响当季作物的产量形成来提高土地利用率, 而且还通过对后作作物产量的积极影响来提高后作作物的土地利用率, 从而提高复合种植模式整体的土地利用率。

表4 不同模式土地当量比及其组成

处理	季节	作物带	季节土地当量比		全年土地当量比
MW-IC	小麦季	小麦	1.06		1.06
	玉米季	花生带	0.62	1.07	
		玉米带	0.45		
IW-IC	小麦季	小麦带	0.57	1.05	1.07
		豌豆带	0.48		
	玉米季	花生带	0.65	1.11	
		玉米带	0.46		
IW-MC	小麦季	小麦带	0.57	1.03	1.04
		豌豆带	0.46		
	玉米季	玉米	1.05		
MW-MC(CK)	小麦季	小麦	1.00		1.00
	玉米季	玉米	1.00		

间作复合种植模式中,模式IW-IC全年土地当量比最高,原因一方面是各季均间作提高各季的土地当量比,另一方面是禾本科豆科轮作的积极影响使小麦季豌豆带的土地利用效率比模式IW-MC豌豆带提高了4.35%,玉米季玉米带的土地利用效率比模式MW-IC玉米带提高了4.84%。由此推断,全年禾豆间作兼禾豆轮作,对改善作物生长环境效果更明显。比较模式IW-MC与模式MW-IC全年及各季的土地当量比可以推断出,玉米季间作对作物生长环境的影响要高于小麦季间作的影响。

2.4 不同间作复合种植模式经济效益比较

在成本投入结构中,间作复合种植模式在间作季

及全年的农机械、农药、化肥的投入量减少(见表5)。一方面由于间作不利于机械化操作,另一方面间作改变了禾本科、豆科的种群密度,并且病虫害减少了,如间作复合种植的小麦蚜虫从对照的每百株1100头降到每百株460~600头(2008年5月23日调查结果),间作复合种植的玉米螟虫从对照的每百株15头降到每百株5~9头(2008年9月20日调查结果),间作花生地下害虫如蛴螬从对照的每平米4头减少到1~2头(收获时调查结果)。病害小麦的白粉病、锈病从对照的每平米1400株减少到650~1180株。豌豆白粉病从对照的每平米5株减少到1~2株(2008年5月23日调查结果)。表明间

表5 不同模式经济产投比及组成

(元/ hm<sup>2</sup>)

项目		MW-IC		IW-IC		IW-MC		MW-MC(CK)	
		小麦季	玉米季	小麦季	玉米季	小麦季	玉米季	小麦季	玉米季
成本	种子	270	922.5	495	922.5	495	405	270	405
	机械	1425	712.5	1012.5	712.5	1012.5	825	1425	825
投入	人工	340	630	480	630	480	510	340	510
	农用电	316	105.6	316	105.6	316	105.6	316	105.6
	化肥	2580	608	2580	608	2580	856	2580	856
	农药	225	90	105	90	105	180	225	180
总投入		5156	3068.6	4988.5	3068.6	4988.5	2881.6	5156	2881.6
年总投入		8224.6		8057.1		7870.1		8037.6	
产 出	籽粒	9028.8b	18403.0a	9606.8a	19103.0a	9335.0a	16024b	8552b	15256b
	秸秆	2508.9	2392.9	1936	2479.9	1877.8	2882	2335.8	2763.8
总产出		11537.7b	20795.9ab	11541.9a	21582.9a	11212.8a	18906b	11088.8b	18019.8b
年总产出		32333.6a		33124.8a		30118.8b		29108.6b	
经济效益		6381.7ab	17727.3b	6553.4a	18514.3a	6224.3bc	16024.4c	5932.8c	15138.2d
年经济效益		24109.0a		25067.7a		22248.7b		21071.0b	
经济产投比		2.24a	6.78ab	2.31a	7.03a	2.25a	6.56b	2.11b	6.25c
年经济产投比		3.93a		4.11a		3.83a		3.62b	

注:①.表中各项投入、产出的价格均按照栾城县08年物价为准计算。②.投入项目中,种子价格为:小麦2.00元/kg、豌豆8.00元/kg、玉米4.50元/kg、花生仁12.00元/kg;③.产出项目中,籽粒价格为:小麦1.60元/kg、豌豆7.00元/kg、玉米1.60元/kg、花生仁9.00元/kg;秸秆价格为:小麦秸秆0.38元/kg、豌豆秸秆0.45元/kg、玉米秸秆0.40元/kg、花生秸秆0.50元/kg。④.不同字母表示P≤0.05%水平显著。

作复合种植模式下作物的生长环境得到了改善,作物的抗逆性增强,从而减少了农药的使用量,另外农机械、农药等措施的减少,降低了对农田土壤理化性状等的外来干扰,这对改善农田生态环境来说意义重大。

间作复合种植模式各季及全年的产值、经济产投比和经济效益均高于对照传统种植模式,模式IW-IC的产值、经济产投比和经济效益均最高,模式MW-IC产值、经济效益均高于模式IW-MC(见表5)。间作复合种植模式的产值在小麦季增加了124.0~453.1元/hm<sup>2</sup>,提高了1.12%~4.09%,在玉米季增加了886.2~3563.1元/hm<sup>2</sup>,提高了4.92%~19.77%,全年增加了1010.2~4016.2元/hm<sup>2</sup>,提高了3.47%~13.80%;经济效益在小麦季增加了291.5~620.6元/hm<sup>2</sup>,提高了4.91%~10.46%,在玉米季增加了886.2~3376.1元/hm<sup>2</sup>,提高了5.85%~22.30%,全年增加了1177.7~3996.7元/hm<sup>2</sup>,提高了5.59%~18.97%。其原因一方面由于间作复合模式具有明显的产量优势,另一方面豆科作物与禾本科作物的经济价格之间存在着差异。也正是这些因素的影响,间作复合模式的产投比在各季及全年均高出传统种植模式。

模式IW-IC在小麦季、玉米季及全年的产值、经济产投比和经济效益均高于其它模式。究其原因可能是模式IW-IC两季都间作,且禾本科豆科轮作,使其在产量上优势更明显。

模式MW-IC与模式IW-MC相比,产值在小麦季增加了324.9元/hm<sup>2</sup>,提高了2.90%,在玉米季增加了1889.9元/hm<sup>2</sup>,提高了10.00%,全年增加了2214.8元/hm<sup>2</sup>,提高了7.35%;经济效益在小麦季增加了157.4元/hm<sup>2</sup>,提高了2.53%,在玉米季增加了1702.9元/hm<sup>2</sup>,提高了10.63%,全年增加了1860.3元/hm<sup>2</sup>,提高了8.36%。分析其原因可能是玉米季禾豆间作对改善农田环境的影响较大。

### 3 结论和讨论

(1)同传统种植模式相比,禾豆间作复合种植模式间作季节表现出明显的产量优势;间作复合种植模式单作季节的产量有所增加,如小麦季模式MC-IC增产了296 kg/hm<sup>2</sup>,产量提高了5.54%,玉米季模式IC-MC增产了480 kg/hm<sup>2</sup>,产量提高了5.03%,这些结果同Fujita等<sup>[12]</sup>(1992)的研究结果相似。其原因可能由于间作通过光热等条件的改变,改善了作物的生长环境,提高了资源利用率<sup>[3,12-13]</sup>。

(2)间作复合种植模式提高了各季及全年的土地当量比。土地利用率先小麦季提高了3.0%~6.0%,玉米季提高了5.0%~11.0%,全年提高了4.0%~7.0%。可见,禾豆间作不仅通过直接影响当季作物的产量形成

来提高土地利用率,而且还通过对后作物产量的积极影响来提高后作物的土地利用率,从而提高复合种植模式整体的土地利用率。

(3)间作复合种植模式在间作季及全年的农机械、农药、化肥的经济投入量减少,农机械、农药等措施的减少,降低了对农田土壤理化性状等的外来干扰,这对改善农田生态环境来说意义重大。

(4)间作复合种植模式提高了各季及全年的经济效益和经济产投比。全年经济效益最高可达25067.7元/hm<sup>2</sup>,提高了18.97%。

因此,针对集约高产粮田的现状,从改善农田生态、提高资源循环利用等方面来说,禾豆间作复合种植模式不失为较好的替代模式;但是间作种植中诸如田间管理不统一,人工投入过多、不利于机械化操作等局限性,在实际应用中很难大面积推广。因而因地制宜的发展间作复合种植模式是调整种植结构,提高经济收入的一项有利措施。

### 参考文献

- [1] 刘巽浩.面向21世纪的中国农作制.河北科学技术出版社.1998:35-87.
- [2] 佟屏亚.试论耕作栽培科学的发展趋势和研究重点.耕作与栽培,1993,64(4):1-7.
- [3] 许海涛,许波,王友华,等.不同种植方式玉米大豆产量和产值试验研究初报.北京农业,2007,(1):1-3.
- [4] 肖焱波,李隆,张福锁.豆科/禾本科间作系统中氮营养的研究进展.中国农业科技导报,2003,5(6):44-49.
- [5] Mandal B.K., S Dagupta and P K Ray. Yield of wheat, mustard and chickpea grown as sole crop and intercrop with 4 moisture regimes. Indian Journal of Agricultural Sciences, 1986, 56(3):187-193.
- [6] Li L., F. S. Zhang, X. L. Li, P. et al. Interspecific facilitation of nutrient uptake by intercropped maize and faba-bean. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2003, 65: 61-71.
- [7] 叶优良.间作对氮素和水分利用的影响[D].北京:中国农业大学,2003.
- [8] 沈其荣,褚贵新,曹金留,等.从氮素营养的角度分析旱作水稻与花生间作系统的产量优势.中国农业学报,2004,37(8):1177-1182.
- [9] Tsubo M., S. Walker, E. Mukhala. Comparisons of radiation use efficiency of mono-intercropping systems with different row orientations. Field Crops Research, 2001, 71: 17-29.
- [10] 张喜英,袁小良,由懋正.太行山山前平原土壤水分动态规律.见:王绍仁,曾江海,吕富保主编.生态农业实验研究.北京:中国科学技术出版社,1994:106-112.
- [11] Mead, R., Willey, R.W., The concept of a 'land equivalent ratio' and advantages in yields from intercropping. Exp. Agric. 1980, 16: 217-228.
- [12] Fujita K., Ofoso-Budu K. G, Oganta S. Biological nitrogen fixation in mixed legume-cereal cropping system. Plant and Soil, 1992, 141: 155-157.
- [13] Guenaelle Corre-Hellou, Joelle Fustec, Yves Crozat. Interspecific competition for soil N and its interaction with N<sub>2</sub> fixation, leaf expansion and crop growth in pea-barley intercrops. Plant and Soil, 2006, 282:195-208.