

# 氮钾肥运筹对花生 —油菜轮作作物产量及养分效率的影响

李银水,余常兵\*,谢立华,胡小加,秦璐,雷永,廖星

(中国农业科学院油料作物研究所/农业部油料作物生物学与遗传育种重点实验室,湖北武汉,430062)

**摘要:**通过4年(2010-2013年)6季田间定位试验,研究了不同氮钾肥分配方式对花生-油菜轮作作物产量、植株氮钾素累积量、氮钾肥吸收利用效率、土壤氮钾素平衡和施肥经济效益的影响。试验设空白对照(CK)、农户习惯施肥(FB)和轮作周年氮(N)、磷( $P_2O_5$ )、钾( $K_2O$ )单季均衡施肥(花生90-90-120,油菜180-90-120)、花生低氮油菜高氮(花生45-90-120,油菜225-90-120)、花生高钾油菜低钾(花生90-90-180,油菜180-90-60)和花生低钾油菜高钾(花生90-90-60,油菜180-90-180)等6个处理。结果表明:(1)施用氮磷钾肥花生、油菜和轮作周年产量平均分别提高10.9%、118.0%和32.1%,其中花生以花生高钾油菜低钾处理表现最好,油菜以花生低氮油菜高氮处理表现最好。(2)施用氮磷钾肥能显著提高花生和油菜的氮、钾素累积量,与单季均衡施肥相比,花生低氮油菜高氮处理能显著提高花生氮肥偏生产力和氮素吸收效率,花生高钾油菜低钾处理能显著提高油菜钾肥偏生产力和钾素吸收效率。(3)试验结束后,空白对照与农户习惯施肥的土壤氮、钾素均表现为亏缺,4种氮钾肥分配方式的土壤氮、钾素均表现为盈余(分别盈余36.1kg/hm<sup>2</sup>和24.0kg/hm<sup>2</sup>)。(4)在经济效益上,花生、油菜和轮作周年的产投比均以花生高钾油菜低钾处理最高(花生2.12、油菜3.13、周年2.59)。综合考虑认为,湖北省花生和油菜的氮肥适宜用量是90kg/hm<sup>2</sup>和180kg/hm<sup>2</sup>,在轮作周年钾肥总用量有限条件下,将钾肥适当前移至花生季有利于提高肥料利用率和经济效益。

**关键词:**花生-油菜轮作;氮钾肥;产量;养分效率

中图分类号:S565.406 文献标识码:A 文章编号:1007-9084(2016)06-0817-07

## Effect of different nitrogen and potassium fertilizers application allocation on yields and nutrient efficiency in peanut-rapeseed rotation system

LI Yin-shui, YU Chang-bing\*, XIE Li-hua, HU Xiao-jia, QIN Lu, LEI Yong, LIAO Xing  
(Oil Crops Research Institute of the Chinese Academy of Agricultural Sciences / Key Laboratory of Biology & Genetic Improvement of Oil Crops, Ministry of Agriculture, Wuhan 430062, China)

**Abstract:** Effects of different nitrogen (N) and potassium (K) fertilizer allocation strategies on crops yield, N and K uptake in plant, fertilizer use efficiency, soil NK balance and economic benefit were studied by using a 6 season-four-year (2010-2013) located experiment in peanut-rapeseed cropping system. Six treatments were set as no fertilizer control (CK), farmer's practice (FP), balanced fertilizer (BF with N,  $P_2O_5$  and  $K_2O$  rates of 90, 90, 120kg/hm<sup>2</sup> in peanut, and 180, 90, 120kg/hm<sup>2</sup> in rapeseed respectively), postponing N (PN with N,  $P_2O_5$  and  $K_2O$  rates of 45, 90, 120kg/hm<sup>2</sup> in peanut, and 225, 90, 120kg/hm<sup>2</sup> in rapeseed respectively), beforehand K (BK with N,  $P_2O_5$  and  $K_2O$  rates of 90, 90, 180kg/hm<sup>2</sup> in peanut, and 180, 90, 60kg/hm<sup>2</sup> in rapeseed respectively) and postponing K (PK, means N,  $P_2O_5$  and  $K_2O$  rates were 90, 90, 60kg/hm<sup>2</sup> in peanut, and 180, 90, 180kg/hm<sup>2</sup> in rapeseed respectively). The results showed that: (1) compared with the control, all treatments with NPK fertilizer increased the yields of peanut, rapeseed and annual by 10.9%, 118.0% and 32.1% respectively. Among these treatments, the highest yield of peanut was obtained by BK treatment, and the highest yield of rapeseed was obtained by

收稿日期:2016-04-22

基金项目:国家花生现代产业技术体系(CARS-14);国际植物营养研究所项目(IPNI-Hubei-28);公益性行业(农业)科研专项(201503123-09)

作者简介:李银水(1979-),女,白族,助理研究员,从事植物营养与施肥研究,E-mail:lysh@webmail.hzau.edu.cn

\*通讯作者:余常兵(1976-),男,助理研究员,从事植物营养与施肥研究,E-mail:cbyu123@163.com

PN treatment respectively. (2) applying NPK fertilizer could significantly increase crop N and K uptakes. Compared to BF treatment, the highest N partial factor productivity and N - uptake efficiency of peanut were obtained by PN treatment, the highest K partial factor productivity and K - uptake efficiency of rapeseed were obtained by BK treatment respectively. (3) the apparent N balance and the apparent K balance in the soil - crop system were negative in CK and FP treatments after the four - year peanut - rapeseed cropping, while positive balance were obtained in the other 4 treatments ( $36.1 \text{ kg/hm}^2 \text{ N}$  and  $24.0 \text{ kg/hm}^2 \text{ K}_2\text{O}$ ). (4) the economic return index indicating by ratios of income to input of NPK fertilizer was the highest in BK treatment with the value of 2.12 for peanut, 3.13 for rapeseed and 2.59 for the whole year. The overall results suggested that the appropriate N application rates were  $90 \text{ kg/hm}^2$  in peanut and  $180 \text{ kg/hm}^2$  in rapeseed respectively. And under the condition of K fertilizer shortage, K fertilizer was preferred to applying in peanut season to improve fertilizer use efficiency and economic benefits in this peanut - rapeseed cropping system.

**Key words:** Peanut - rapeseed rotation; Nitrogen and potassium application; Yield; Nutrient efficiency

湖北省地处长江中游,是我国重要的粮油生产基地,油菜和花生常年种植面积分别为  $116.6 \text{ 万 hm}^2$  和  $18.4 \text{ 万 hm}^2$ ,年均总产  $232.6 \text{ 万 t}$  和  $64.5 \text{ 万 t}$ ,总产常年分别位于全国第一和第七位<sup>[1]</sup>。轮作是充分利用土地资源、增加农产品供给、提高农户收入的重要途径。夏花生轮作冬油菜为“双油”种植模式,能充分利用土地温光水等资源,有利于增油增收<sup>[2]</sup>。我们对农户施肥调查结果表明,花生 - 油菜轮作是湖北省油菜主要轮作模式之一,种植面积仅次于水稻 - 油菜和棉花 - 油菜轮作,且随着花生比较效益增加,油菜 - 花生轮作面积有扩大趋势。但由于农户种植花生重在自给自足,该轮作模式下周年氮、磷、钾肥总用量仅为  $258.9$ 、 $136.3$  和  $50.7 \text{ kg/hm}^2$ ,且仅有  $41.3\%$ 、 $40.0\%$  和  $29.6\%$  的氮、磷、钾肥施用于花生季,花生肥料用量明显不足<sup>[3]</sup>。平衡施肥是提高花生产量、改善品质和增加经济效益的重要措施,在国际植物营养研究所 (IPNI) 的资助下,笔者从 2006 年开始开展了湖北省花生平衡施肥技术研究并取得了良好进展<sup>[4~10]</sup>。本研究在 4 年 6 季定位试验基础上,根据该区域同期的农户肥料施用状况调查<sup>[7]</sup>、花生养分需求规律<sup>[8]</sup> 及氮素适宜用量<sup>[9]</sup> 等研究成果,结合氮、钾肥料的产量效应、养分吸收和利用效率及土壤氮、钾素平衡状况,探讨了花生 - 油菜轮作制中氮、钾肥的合理分配问题,以期对湖北省花生、油菜合理的养分管理提供技术支持。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验概况

田间试验于 2010 ~ 2013 年(6 季作物)在襄阳市农业科学院试验基地进行。该地区属于亚热带季风气候,年均气温  $15.4^\circ\text{C}$ ,年均降水量  $878.3 \text{ mm}$ ,年均无霜期  $241 \text{ d}$ 。供试土壤为黄棕壤,粘土土质。

2010 年 5 月开始定位试验前取土测试,土壤基本理化性状为 pH 6.8,有机质  $1.32\%$ ,碱解氮  $143.0 \text{ mg/kg}$ ,速效磷  $18.7 \text{ mg/kg}$ ,速效钾  $121.5 \text{ mg/kg}$ 。种植方式为花生 - 油菜轮作。花生在每年的 6 月 10 ~ 12 日播种,9 月 15 ~ 25 日收获,供试品种分别为中花 16 号、远杂 9102 和中花 16 号;油菜 10 月 10 ~ 12 日播种,次年 5 月 10 ~ 14 日收获,供试品种分别为德油杂 58 号、中双 11 号和中双 9 号。

### 1.2 试验设计

试验设空白对照 (CK)、农户习惯施肥 (FP)、轮作周年氮 (N)、磷 ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) 钾 ( $\text{K}_2\text{O}$ ) 肥总量 ( $270$ 、 $180$ 、 $240 \text{ kg/hm}^2$ ) 下单季均衡施肥 (花生  $90 - 90 - 120$ ,油菜  $180 - 90 - 120$ ,Balanced fertilizer 简写 BF)、花生低氮油菜高氮 (花生  $45 - 90 - 120$ ,油菜  $225 - 90 - 120$ ,即将花生 50% 氮肥后移至油菜,Postponing N 简写 PN)、花生高钾油菜低钾 (花生  $90 - 90 - 180$ ,油菜  $180 - 90 - 60$ ,即将油菜 50% 钾肥前移至花生,Beforehand K 简写 BK)、花生低钾油菜高钾 (花生  $90 - 90 - 60$ ,油菜  $180 - 90 - 180$ ,即将花生 50% 钾肥后移至油菜,Postponing K 简写 PK) 等 6 个处理 (表 1)。氮、磷、钾肥品种分别为尿素 (含  $\text{N}46\%$ )、过磷酸钙 (含  $\text{P}_2\text{O}_5 12\%$ ) 和氯化钾 (含  $\text{K}_2\text{O} 60\%$ )。全部磷、钾肥和 60% 的氮肥作基肥在整地时撒施翻盖,40% 的氮肥花生在初花期 (7 月 5 日左右) 追施,油菜在春节前 (1 月 20 日左右) 追施。小区面积  $14.4 \text{ m}^2$  (长宽  $8.0 \text{ m} \times 1.8 \text{ m}$ ),3 次重复,随机区组排列。花生每小区种 20 行 (行株距  $40 \text{ cm} \times 18 \text{ cm}$ ),每行 10 穴,每穴 2 粒。油菜每小区种 27 行 (行株距  $30 \text{ cm} \times 18 \text{ cm}$ ),每行 10 株,直播,适时间苗,3 叶期定苗。花生播种前用根瘤菌拌种。其它栽培管理措施均按当地常规方法进行。

表 1 花生、油菜肥料处理方案  
Table 1 Fertilizer application rates in experiment

处理 Treatment	花生 Peanut/(kg/hm <sup>2</sup> )			油菜 Rapeseed/(kg/hm <sup>2</sup> )			周年 Annual/(kg/hm <sup>2</sup> )		
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
对照 CK	0	0	0	0	0	0	0	0	0
农户习惯 FP	72.8	62.5	0	72.8	62.5	0	145.6	125	0
均衡施肥 BK	90	90	120	180	90	120	270	180	240
花生低氮油菜高氮 PN	45	90	120	225	90	120	270	180	240
花生高钾油菜低钾 BK	90	90	180	180	90	60	270	180	240
花生低钾油菜高钾 PK	90	90	60	180	90	180	270	180	240

Note:FP;farmer's practice; BK;Balanced fertilizer; PN;Postponing N; BK;Beforehand K; PK;Postponing K. Same as below

### 1.3 测定项目与方法

作物成熟后收获前(花生9月12日左右,油菜5月8日左右)取8株代表性植株,花生分叶片、枝茎、果壳、果仁和根系,油菜分茎秆、果壳、籽粒和根系,在网袋中风干、称重,粉碎,过筛。样品经浓H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>消煮处理后,全氮含量用凯氏定氮仪(KDY-9820)测定,全钾含量用电感耦合等离子发射光谱仪(Optima-7000)测定。

小区产量单打单收,分别计产。

有关参数的计算方法如下<sup>[11]</sup>:

氮肥偏生产力(N partial factor productivity, kg/kg) = 施氮区籽粒产量/氮肥用量

氮肥吸收效率(N - uptake efficiency, kg/kg) = 施氮区氮素总累积量/氮肥用量

氮肥利用效率(N - use efficiency, kg/kg) = 施氮区籽粒产量/氮素总累积量

土壤氮素表观平衡值(kg/hm<sup>2</sup>) = 氮肥投入量 - 作物氮素累积携出量。

钾肥计算方法同上。

试验数据在Excel2007中整理,显著性差异(P < 0.05)采用DPSv-7.01软件的LSD法进行统计。

## 2 结果分析

### 2.1 不同氮钾肥分配方式对花生油菜产量的影响

表2结果显示,与完全不施肥相比,施肥能显著提高花生和油菜产量,在轮作周年氮磷钾肥总用量一定条件下,氮钾肥分配方式对花生和油菜产量的影响表现不同。花生季各施肥处理相对于不施肥处理,不同年份的增产效果均达到了5%的显著性水平。轮作3年后,各施肥处理较空白增产变幅为5.7%~16.8%,平均为10.9%。各处理中花生高钾油菜低钾增产幅度最大,为16.8%,较均衡施肥增产2.1%。可见适当增加花生季钾肥用量花生产量会有所提高。

油菜季各施肥处理相对于不施肥处理,不同年份的增产效果均超过了10%,达到极显著水平。轮作3年后,各施肥处理较对照增产变幅为70.2%~147.3%,平均高达118.0%。各处理中花生低氮油菜高氮增产幅度最大,为147.3%,较均衡施肥增产5.5%。可见适当增加油菜季氮肥用量同样能提高油菜产量。

表 2 不同处理对花生和油菜产量的影响

Table 2 Effects of different treatments on yields of peanut from 2010 to 2012 and yields of rapeseed from 2011 to 2013

处理 Treatment	不同年份花生产量 Yield of peanut in each year/(kg/hm <sup>2</sup> )			平均 Average/(kg/hm <sup>2</sup> )	增产率 Increased rate/%
	2010	2011	2012		
对照 CK	4 134 ± 70 e	3 588 ± 33 e	3 648 ± 90 d	3 790	-
农户习惯 FP	4 361 ± 132 bcd	3 884 ± 124 bcd	3 778 ± 132 cd	4 008	5.7
均衡施肥 BK	4 514 ± 116 ab	3 868 ± 129 cd	4 621 ± 65 a	4 334	14.4
花生低氮油菜高氮 PN	4 227 ± 112 de	4 007 ± 116 abc	4 072 ± 104 b	4 102	8.2
花生高钾油菜低钾 BK	4 438 ± 43 abc	4 128 ± 101 a	4 713 ± 49 a	4 426	16.8
花生低钾油菜高钾 PK	4 287 ± 151 cde	4 049 ± 114 ab	4 086 ± 49 b	4 141	9.3
处理 Treatment	不同年份油菜籽粒产量 Yield of rapeseed in each year/(kg/hm <sup>2</sup> )			平均产量 Average/(kg/hm <sup>2</sup> )	增产率 Increased rate/%
	2011	2012	2013		
对照 CK	1 100 ± 35 d	905 ± 38 e	812 ± 42 d	939	-
农户习惯 FP	2 046 ± 152 c	1 415 ± 81 d	1 332 ± 68 c	1 598	70.2
均衡施肥 BK	2 671 ± 79 a	2 316 ± 145 bc	1 616 ± 59 ab	2 201	134.4
花生低氮油菜高氮 PN	2 649 ± 116 a	2 608 ± 52 a	1 708 ± 97 a	2 322	147.3
花生高钾油菜低钾 BK	2 338 ± 109 b	2 331 ± 63 bc	1 704 ± 60 ab	2 124	126.2
花生低钾油菜高钾 PK	2 147 ± 39 c	2 230 ± 106 c	1 593 ± 51 b	1 990	111.9

注:同列数据后不同字母表示差异达5%显著水平,下同

Note: Values followed by different letters in the same column indicate significance at 5% level. Same as below

周年总产量(表3)在轮作4年后,各施肥处理较对照增产变幅为18.5%~38.5%,平均为32.1%。在轮作周年氮磷钾肥(270、180、240kg/hm<sup>2</sup>)总用量一

定条件下,两季均衡施肥或花生高钾油菜低钾处理的产量相当(6 535kg/hm<sup>2</sup>和6 551kg/hm<sup>2</sup>),均高于花生低氮油菜高氮或花生低钾油菜高钾处理。

表3 不同处理下花生油菜轮作周年总产量

Table 3 Total yields of peanut and rapeseed rotation from 2010 to 2013 with different treatments

处理 Treatment	不同年份总产量 Total yield in each year/(kg/hm <sup>2</sup> )			平均产量 Average/(kg/hm <sup>2</sup> )	增产率 Increased rate/%
	2010-2011	2011-2012	2012-2013		
对照 CK	5 235 ± 100 e	4 493 ± 59 e	4 461 ± 132 e	4 730	-
农户习惯 FP	6 407 ± 275 d	5 299 ± 128 d	5 110 ± 200 d	5 606	18.5
均衡施肥 BK	7 185 ± 120 a	6 185 ± 206 c	6 236 ± 106 a	6 535	38.2
花生低氮油菜高氮 PN	6 877 ± 181 b	6 615 ± 67 a	5 780 ± 95 b	6 424	35.8
花生高钾油菜低钾 BK	6 776 ± 152 bc	6 459 ± 162 ab	6 417 ± 61 a	6 551	38.5
花生低钾油菜高钾 PK	6 434 ± 144 cd	6 278 ± 46 bc	5 679 ± 90 bc	6 130	29.6

## 2.2 不同氮钾肥分配方式对花生油菜氮钾素累积量的影响

表4结果显示,施用氮磷钾肥能显著提高花生和油菜的氮、钾素累积量。与完全不施肥相比,农户习惯施肥、均衡施肥、花生低氮油菜高氮、花生高钾油菜低钾和花生低钾油菜高钾处理,氮素累积量花生分别增加11.7%、27.0%、25.0%、25.8%和18.8%,油菜分别增加26.0%、84.9%、96.1%、62.9%和76.9%;钾素累积量花生分别增加11.0%、40.8%、50.4%、63.5%和56.4%,油菜分别增加23.8%、60.7%、64.5%、46.5%和43.5%。从轮作试验4年6季的综合结果来看,受花生固氮等因素的影响,减少花生季氮肥用量不会降低花生

对氮素的吸收和累积量,但增加钾肥在花生季的分配能促进花生对钾素的吸收和累积量,与均衡施肥相比,花生高钾油菜低钾处理花生的钾素累积量增加16.1%。

## 2.3 不同氮钾肥分配方式对花生油菜氮钾肥效率的影响

表5结果显示,氮钾肥用量显著影响花生、油菜的氮钾肥利用效率。氮素利用效率中,氮肥偏生产力花生以花生低氮油菜高氮处理最高,显著高于农户习惯施肥、均衡施肥、花生高钾油菜低钾和花生低钾油菜高钾等处理;油菜则以农户习惯施肥最高,显著高于其它4个处理;氮肥吸收效率与偏生产力表现相一致。作物养分效率是吸收效率和利用效率的

表4 不同处理下花生油菜氮钾素累积量

Table 4 N and K accumulation of peanut and rapeseed from 2010 to 2013 with different treatments

处理 Treatment	氮素累积量 N accumulation/(kg/hm <sup>2</sup> )			钾素累积量 K <sub>2</sub> O accumulation/(kg/hm <sup>2</sup> )		
	花生 Peanut	油菜 Rapeseed	周年 Annual	花生 Peanut	油菜 Rapeseed	周年 Annual
对照 CK	109.8 ± 30.2 c	54.2 ± 24.1 b	163.9 ± 6.9 c	28.2 ± 8.4 b	112.4 ± 49.3 d	140.6 ± 42.4 c
农户习惯 FP	122.6 ± 23.2 bc	68.3 ± 13.8 b	190.9 ± 10.7 b	31.3 ± 5.5 b	139.1 ± 35.4 c	170.4 ± 35.2 b
均衡施肥 BK	139.4 ± 33.7 a	100.2 ± 4.0 a	239.6 ± 37.8 a	39.7 ± 8.8 a	180.6 ± 30.8 ab	220.3 ± 22.1 a
花生低氮油菜高氮 PN	137.3 ± 31.7 a	106.3 ± 3.8 a	243.5 ± 31.3 a	42.4 ± 12.4 a	184.9 ± 35.7 a	227.3 ± 30.5 a
花生高钾油菜低钾 BK	138.1 ± 32.2 a	88.3 ± 11.8 a	226.3 ± 24.7 a	46.1 ± 11.6 a	164.7 ± 40.5 ab	210.9 ± 30.2 a
花生低钾油菜高钾 PK	130.4 ± 27.6 ab	95.9 ± 12.3 a	226.3 ± 15.4 a	44.1 ± 16.4 a	161.3 ± 33.1 bc	205.4 ± 20.5 a

注:表中数据是3季作物平均值,以下同

Note: Data in this table was the average of 3 seasons' crop. Same as below

表5 不同处理下花生油菜及周年氮钾肥效率

Table 5 NK efficiency of peanut and rapeseed from 2010 to 2013 with different treatments / (kg/kg)

处理 Treatment	氮肥偏生产力 N partial factor productivity			氮肥吸收效率 N uptake efficiency			氮肥利用效率 N use efficiency		
	花生 Peanut	油菜 Rapeseed	周年 Annual	花生 Peanut	油菜 Rapeseed	周年 Annual	花生 Peanut	油菜 Rapeseed	周年 Annual
农户习惯 FP	55.1 ± 4.3 b	21.9 ± 5.4 a	38.5 ± 4.8 a	1.68 ± 0.31 b	0.81 ± 0.37 a	1.24 ± 0.06 a	33.5 ± 6.8 a	24.2 ± 8.5 a	29.5 ± 4.4 a
均衡施肥 BK	48.2 ± 4.5 c	12.2 ± 3.0 b	24.2 ± 2.1 b	1.43 ± 0.19 b	0.47 ± 0.12 b	0.79 ± 0.06 b	31.9 ± 4.9 ab	21.1 ± 6.0 a	27.7 ± 4.8 ab
花生低氮油菜高氮 PN	91.2 ± 2.5 a	10.3 ± 2.4 b	23.8 ± 2.1 b	3.07 ± 0.74 a	0.47 ± 0.02 b	0.90 ± 0.12 b	30.9 ± 6.4 b	21.9 ± 5.1 a	26.8 ± 5.4 b
花生高钾油菜低钾 BK	49.2 ± 3.3 c	11.8 ± 2.0 b	24.3 ± 0.7 b	1.53 ± 0.35 b	0.54 ± 0.07 ab	0.87 ± 0.14 b	32.8 ± 5.1 ab	24.1 ± 3.6 a	29.2 ± 3.7 a
花生低钾油菜高钾 PK	46.0 ± 1.4 c	11.1 ± 1.9 b	22.7 ± 1.5 b	1.49 ± 0.39 b	0.53 ± 0.07 ab	0.85 ± 0.08	32.7 ± 6.5 ab	20.7 ± 1.0 a	27.2 ± 3.4 ab

  

处理 Treatment	钾肥偏生产力 K partial factor productivity			钾肥吸收效率 K uptake efficiency			钾肥利用效率 K use efficiency		
	花生 Peanut	油菜 Rapeseed	周年 Annual	花生 Peanut	油菜 Rapeseed	周年 Annual	花生 Peanut	油菜 Rapeseed	周年 Annual
均衡施肥 BK	36.1 ± 3.4 b	18.3 ± 4.5 b	27.2 ± 2.3 a	0.29 ± 0.01 b	1.41 ± 0.42 b	0.85 ± 0.21 a	111.8 ± 20.9 a	12.1 ± 1.3 a	29.8 ± 3.0 a
花生低氮油菜高氮 PN	34.2 ± 0.9 b	19.3 ± 4.4 b	26.8 ± 2.4 a	0.34 ± 0.07 b	1.52 ± 0.33 b	0.93 ± 0.15 a	102.3 ± 29.7 a	12.6 ± 2.0 a	28.5 ± 3.8 a
花生高钾油菜低钾 BK	24.6 ± 1.6 c	35.4 ± 6.1 a	27.3 ± 0.8 a	0.25 ± 0.05 b	2.93 ± 0.37 a	0.92 ± 0.06 a	99.1 ± 19.7 a	13.1 ± 1.2 a	31.5 ± 4.4 a
花生低钾油菜高钾 PK	69.0 ± 2.1 a	11.1 ± 1.9 c	25.5 ± 1.7 a	0.72 ± 0.25 a	0.89 ± 0.20 c	0.85 ± 0.10 a	103.2 ± 38.7 a	12.4 ± 0.5 a	29.9 ± 2.0 a

综合表现,在本研究条件下,氮肥利用效率花生季以农户习惯施肥处理最高、氮肥后移处理最低,油菜季不同处理间差异不显著。

钾素利用效率中,钾肥偏生产力花生与油菜的表现正好相反,即花生季以花生低钾油菜高钾处理最高,显著高于均衡施肥、花生低氮油菜高氮和花生高钾油菜低钾等处理,油菜以花生高钾油菜低钾处理最高,显著高于其它3个处理;花生与油菜的钾肥吸收效率与偏生产力表现相一致。钾肥利用效率两个作物的4种处理间差异均未达显著水平。

## 2.4 不同氮钾肥分配方式对花生—油菜轮作土壤氮钾素表现平衡的影响

表6结果显示,不同氮钾肥用量显著影响花生—油菜轮作土壤氮、钾素表现平衡。在完全不施肥条件下,轮作周年氮素亏缺163.9 kg/hm<sup>2</sup>、钾素亏缺

140.6 kg/hm<sup>2</sup>。农户习惯施肥处理因每季作物增施氮肥72.8 kg/hm<sup>2</sup>刚好与油菜季收获累积的氮素持平,所以周年氮素亏缺量为45.3 kg/hm<sup>2</sup>,但因施氮磷肥促进了花生和油菜生物量的提高,所以在农户习惯不施钾肥的情况下,土壤钾素亏缺加剧(周年亏缺达170.4 kg/hm<sup>2</sup>)。4种不同氮钾肥分配方式中,单季花生土壤氮素均表现为亏缺,钾素均表现为盈余;油菜土壤氮素均表现为盈余,钾素均表现为亏缺(花生低钾油菜高钾处理除外),周年来看均表现为盈余(氮素平均盈余26.5~43.7 kg/hm<sup>2</sup>,钾素平均盈余12.7~34.6 kg/hm<sup>2</sup>)。整体结果说明,不施肥或农户习惯施肥条件下,花生—油菜轮作体系的土壤养分长期亏缺会导致地力下降,合理施用氮磷钾肥是维持和提高土壤肥力的基础。

表6 不同处理对花生—油菜轮作土壤氮钾素表现平衡的影响

Table 6 Soil N and K surface balance in peanut—rapeseed rotation from 2010 to 2013 with different treatments

处理 Treatment	氮素表现平衡 N apparent balance/(kg/hm <sup>2</sup> )			钾素表现平衡 K <sub>2</sub> O apparent balance/(kg/hm <sup>2</sup> )		
	花生 Peanut	油菜 Rapeseed	周年 Annual	花生 Peanut	油菜 Rapeseed	周年 Annual
对照 CK	-109.8	-54.2	-163.9	-28.2	-112.4	-140.6
农户习惯 FP	-49.8	4.5	-45.3	-31.3	-139.1	-170.4
均衡施肥 BK	-49.4	79.8	30.4	80.3	-60.6	19.7
花生低氮油菜高氮 PN	-92.3	118.7	26.5	77.6	-64.9	12.7
花生高钾油菜低钾 BK	-48.1	91.7	43.7	133.9	-104.7	29.1
花生低钾油菜高钾 PK	-40.4	84.1	43.7	15.9	18.7	34.6

## 2.5 不同氮钾肥分配方式对花生油菜经济效益的影响

表7结果显示,与完全不施肥相比,无论是农户习惯还是平衡施肥,施用氮磷钾肥均能显著增加花生和油菜的经济收益。其中,花生产值和增产值以花生高钾油菜低钾处理最高,油菜以花生低氮油菜

高氮处理最高,但从周年经济收益来看,花生高钾油菜低钾优于其它处理。再从产投比来看,4种不同氮钾肥分配方式中,花生高钾油菜低钾的产投比均为最高。可见在轮作周年氮磷钾肥总用量一定条件下,适当增加花生季钾肥用量能获得相对较高的经济收益。

表7 不同处理的花生油菜经济效益

Table 7 Profits of peanut and rapeseed from 2010 to 2013 of different treatments

处理 Treatment	花生 Peanut/(Yuan/hm <sup>2</sup> )				油菜 Rapeseed/(Yuan/hm <sup>2</sup> )				周年 Annual/(Yuan/hm <sup>2</sup> )			
	产值 Output	投入 Input	增产值 Increase	产投比 Output/Input	产值 Output	投入 Input	增产值 Increase	产投比 Output/Input	产值 Output	投入 Input	增产值 Increase	产投比 Output/Input
对照 CK	25 318	0	-	-	4 475	0	-	-	29 793	0	-	-
农户习惯 FP	26 795	744	1 477	2.00	7 579	744	3 104	4.26	34 374	1 488	4 581	3.13
均衡施肥 BK	29 007	1 700	3 689	2.14	10 471	2 169	5 996	2.78	39 478	3 870	9 685	2.50
花生低氮油菜高氮 PN	27 543	1 466	2 224	1.49	11 079	2 404	6 604	2.76	38 621	3 870	8 828	2.28
花生高钾油菜低钾 BK	29 739	2 054	4 420	2.12	10 154	1 816	5 679	3.13	39 893	3 870	10 100	2.59
花生低钾油菜高钾 PK	27 794	1 347	2 475	1.80	9 521	2 522	5 046	2.00	37 314	3 870	7 521	1.94

注:2010—2013年花生价格分别为5.60、7.60和7.00元/kg,油菜4.40、5.00和5.00元/kg;肥料N 5.00、5.42、5.21元/kg;P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 5.00、5.83和6.67元/kg;K<sub>2</sub>O 6.00、5.83和5.83元/kg

Note: Price of production, unit price of fertilizer (Yuan/kg) in 2010, 2011 and 2012 respectively. Peanut: 5.60, 7.60 and 7.00; Rapeseed: 4.40, 5.00 and 5.00; N: 5.00, 5.42 and 5.21; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: 5.00, 5.83 and 6.67; K<sub>2</sub>O: 6.00, 5.83 and 5.83

## 3 讨论

### 3.1 氮钾肥的产量效应

施肥是改善作物生长,提高作物产量的主要措施<sup>[5]</sup>。本研究结果表明,与完全不施肥相比,施用

氮磷钾肥能显著提高花生和油菜产量,但4种氮钾肥分配方式间存在明显差别。在周年氮磷钾肥总用量一定条件下,花生产量以花生高钾油菜低钾处理最高,3年平均4 426 kg/hm<sup>2</sup>,比均衡施肥平均高2.1%,其中2011年高6.7%,差异达显著水平;油

菜产量则以花生低氮油菜高氮处理最高,3年平均为2322kg/hm<sup>2</sup>,比均衡施肥平均高5.5%。说明在氮磷肥用量一定条件下,适当增加钾肥用量能提高花生产量,在磷钾肥用量一定条件下,适当增加氮肥用量同样能提高油菜产量。

### 3.2 氮钾肥分配方式对轮作体系肥料利用率及土壤养分平衡的影响

肥料偏生产力(PFP)反映的是作物吸收肥料养分和土壤养分后所产生的边际效应,因包括了基础地力的贡献,所以化肥偏生产力与化肥用量之间呈显著的负幂函数相关关系<sup>[12]</sup>。本研究条件下,相对于均衡施肥,花生低氮油菜高氮处理花生季减少氮肥用量而油菜季增加,而使花生的氮肥偏生产力显著增加,油菜的显著下降;花生高钾油菜低钾处理则因钾肥用量花生季增加油菜季减少,而使花生的钾肥偏生产力显著降低,油菜的显著增加。

作物养分效率包括养分吸收效率和养分利用效率<sup>[13]</sup>。在低养分投入下,籽粒产量取决于养分吸收效率,反之养分利用效率起主导作用<sup>[14]</sup>。所以提高基于总消耗养分的各种生理效率,既需要从减少养分的损失入手,又需要提高作物吸收的养分在作物体内的利用效率来实现<sup>[15]</sup>。本研究条件下,4种氮钾肥分配方式中,花生高钾油菜低钾处理因增加花生季钾肥用量会降低花生的钾素吸收和利用效率,但也因减少了油菜的钾肥用量从而使油菜的钾素吸收效率显著提高(提高107.8%),与此同时,使油菜的氮、钾素利用效率分别提高9.0%和8.3%。说明在轮作周年内,将钾肥适当前移至花生季能同时提高油菜的氮、钾肥利用效率。

高效的施肥策略是在高产条件下,保证施肥量与作物带走养分量的大致平衡,这样既不会导致土壤养分库消耗太多,也不会导致土壤养分库积累过高<sup>[15]</sup>。本研究的4种氮钾肥分配方式中,虽然单季作物花生土壤氮素均为亏缺、土壤钾素均为盈余,油菜土壤氮素均为盈余、土壤钾素均为亏缺,但轮作周年的土壤氮、钾均表现为盈余,且4种分配方式中花生高钾油菜低钾处理在保证花生、油菜高产条件下,周年土壤氮、钾素盈余量分别比均衡施肥高43.8%和47.7%。说明在轮作周年内,将钾肥适当前移至花生季不仅能满足花生和油菜的正常生长发育,还有利于培肥土壤。

### 3.3 花生—油菜轮作的氮肥适宜用量

肥料高效管理的实质在于增加产量,维持地力,减少环境影响<sup>[16]</sup>。因营养元素自身的特异性,氮素实时监控、磷钾恒量监测一直是肥料管理的关键。

有关花生、油菜的氮肥适宜用量,有研究认为河南青黑土夏花生的适宜用量为75~115kg/hm<sup>2</sup>,平均为103.2kg/hm<sup>2</sup><sup>[17]</sup>;红壤丘陵区油菜总氮控制在180kg/hm<sup>2</sup>以内,花生施氮103.5kg/hm<sup>2</sup>较为合理<sup>[18]</sup>;在综合评价剖面土壤NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N储量、肥料利用率、经济和产量效益后,也有研究认为红壤旱地油菜和花生的氮肥最佳用量分别为90和69kg/hm<sup>2</sup><sup>[19]</sup>。我们综合考虑土壤供氮能力和发挥花生固氮潜力后也认为,湖北省花生适宜施氮量为60~90kg/hm<sup>2</sup><sup>[9]</sup>;而在油菜上的研究也表明,当前生产条件下,施氮180kg/hm<sup>2</sup>能满足常规油菜和杂交油菜的高产高效生产<sup>[20]</sup>。因此,在轮作周年氮肥总用量270kg/hm<sup>2</sup>条件下,将花生和油菜的氮肥用量分配为90和180kg/hm<sup>2</sup>是较为合理的。当然,由于花生是豆科作物与根瘤菌共生,根瘤在花生氮素代谢过程中发挥着重要作用。已有研究表明,花生氮素营养以根瘤固氮为主,其次为土壤氮,肥料氮最小,三者的比例约为5:3:2<sup>[21]</sup>。我们前期的研究结果也表明,在完全不施氮肥条件下,花生根瘤菌固氮高达121.0/hm<sup>2</sup>,施氮90kg/hm<sup>2</sup>条件下,固氮量为92.9kg/hm<sup>2</sup>,而当氮肥用量增加至150kg/hm<sup>2</sup>时,固氮量降为34.0kg/hm<sup>2</sup>,即施氮后生物固氮比例可从92.9%降至20.1%<sup>[9]</sup>。由此可见,通过充分挖掘根瘤菌的固氮潜力还可以适当降低花生的氮肥用量,这也是花生减氮增效的有效途径。

### 3.4 花生—油菜轮作的钾肥管理

合理耕作管理制度是“以田养田”、“以地养地”和“用养结合”的基础<sup>[22]</sup>。以往研究表明,花生—春玉米轮作中花生高产的首要土壤限制因子是钾素,春玉米则为氮素,连续3年不施氮磷钾肥会使土壤氮磷钾养分含量明显耗竭<sup>[23]</sup>。前期土壤养分调查结果表明,湖北省花生主产区土壤普遍缺氮、部分地区缺磷、大面积缺钾<sup>[4]</sup>,而湖北省农户花生钾肥用量平均仅为25.3kg/hm<sup>2</sup><sup>[7]</sup>。因此,在花生—油菜轮作体系总钾肥用量一定条件下,我们建议将钾肥优先施于花生,油菜主要利用其后效。由于土壤钾素主要来源于土壤矿物钾、作物残体分解和钾素肥料<sup>[24]</sup>。而长期定位试验表明,施有机肥或钾肥对土壤钾素下降有延缓作用(如紫云英加稻草还田就有很好的延缓效果),原因是稻草含钾素较多,是重要的土壤有机钾源<sup>[25]</sup>。据统计,花生和油菜的收获指数平均分别为0.50和0.26,秸秆系数平均为1.14和2.87<sup>[26]</sup>。油菜虽是喜钾作物,但籽粒钾素含量相对稳定(含量在0.8%左右),增施钾肥主要提高了油菜茎秆的钾含量(含量能从1.8%增加到

2.7%)<sup>[27]</sup>。据我们统计,花生、油菜收获后,植株所吸收累积的钾素花生约28.0%左右分配于果仁,油菜约14.0%左右分配于籽粒,其余分配于果壳、茎秆等非经济部位。因此,花生—油菜轮作体系非经济部位累积的钾素资源,应通过秸秆还田或其它途径加以利用,以弥补我国矿质钾肥供应不足的矛盾。

**致谢:**试验实施过程中得到襄阳市农业科学院蒋相国、李红梅等老师的帮助,样品分析过程中得到廖祥生、钱爱清等同事的帮助,在此一并致谢。

#### 参考文献:

[1] 余常兵,廖星,张德才,等.湖北省作物专用复混肥料农艺配方[M].北京:中国农业出版社,2014.

[2] 李林.夏花生—冬油菜高效种植模式[J].湖南农业,2015(4):12-13.

[3] 李银水,余常兵,廖星,等.湖北省不同油菜轮作模式下作物施肥现状调查[J].中国农学通报,2012,28(36):205-211.

[4] 余常兵,李志玉,廖伯寿,等.湖北省花生平衡施肥技术研究 I. 土壤主要养分限制因子[J].湖北农业科学,2009,48(12):2 984-2 986.

[5] 余常兵,李志玉,廖伯寿,等.湖北省花生平衡施肥技术研究 II. 平衡施肥对花生产量及经济效益的影响[J].湖北农业科学,2010,49(6):1 307-1 309.

[6] 余常兵,李志玉,廖伯寿,等.湖北省花生平衡施肥技术研究 III. 平衡施肥对花生品质的影响[J].湖北农业科学,2010,49(11):2 724-2 726.

[7] 余常兵,李银水,谢立华,等.湖北省花生平衡施肥技术研究 IV. 农户花生施肥状况[J].湖北农业科学,2011,50(21):4 354-4 356.

[8] 余常兵,李银水,谢立华,等.湖北省花生平衡施肥技术研究 V. 花生养分积累分配规律[J].湖北农业科学,2012,51(2):236-238.

[9] 余常兵,李银水,谢立华,等.湖北省花生平衡施肥技术研究 VI. 花生氮肥用量[J].湖北农业科学,2012,51(4):677-679.

[10] 余常兵,李银水,谢立华,等.湖北省花生平衡施肥技术研究 VII. 叶片黄化防治及覆膜效果分析[J].湖北农业科学,2013,52(14):3 274-3 276.

[11] Rathke G W, Behrens T, Diepenbrock W. Integrated nitrogen management strategies to improve seed yield, oil content and nitrogen efficiency of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.): a review[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2006, 117: 80-108.

[12] 刘润梅,范茂攀,付云章,等.云南省马铃薯施肥量与化肥偏生产力的关系研究[J].土壤学报,2014,51(4):753-760.

[13] Sattelmacher B, Horst W J, Becker H C. Factors that contribute to genetic variation for nutrient efficiency of crop plants[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 1994, 157: 15-224.

[14] Schulte aE G, Behrens T, Ulas A, et al. Agronomic traits contributing to nitrogen efficiency of winter oilseed rape cultivars[J]. Field Crops Research, 2011, 124: 114-123.

[15] 王火焰,周健民.肥料养分真实利用率计算与施肥策略[J].土壤学报,2014,51(2):216-224.

[16] 巨晓棠.氮肥有效率的观念及意义—兼论对传统氮肥利用率的误解[J].土壤学报,2014,51(5):921-933.

[17] 徐文霞,刘听报.新野县夏花生氮肥最佳经济施用量试验研究[J].现代农业科技,2016(2):19,22.

[18] 孙波,严浩,施建平.基于红壤肥力和环境效应评价的油菜—花生适宜施肥量[J].土壤,2007,39(2):222-230.

[19] 严浩,孙波,施建平,等.红壤旱地氮素的剖面迁移与影响因子[J].农业环境科学学报,2006,25(1):137-142.

[20] Li Y S, Yu C B, Xie L H, et al. Comparison of required nitrogen fertilizers by hybrid cultivar and conventional cultivar of rapeseed (*Brassica napus* L.) [J]. Agricultural Science & Technology, 2015, 16(10):2 231-2 237.

[21] 吴正峰,陈殿绪,郑永美,等.花生不同氮源供氮特性及氮肥利用率研究[J].中国油料作物学报,2016,38(2):207-213.

[22] 王辉,屠乃美.稻田种植制度研究现状与展望[J].作物研究,2006(5):498-503.

[23] 袁维翰,常志军,刘建玲,等.花生—春玉米轮作中氮磷钾的产量效应与养分平衡[J].中国土壤与肥料,2014(2):35-39.

[24] 郑学博,樊剑波,周静,等.沼液化肥肥施对红壤旱地土壤养分和花生产量的影响[J].土壤学报,2016,53(3):675-682.

[25] 李继明,黄庆海,袁天佑,等.长期施用绿肥对红壤稻田水稻产量和土壤养分的影响[J].植物营养与肥料学报,2011,17(3):563-570.

[26] 谢光辉,王晓玉,韩东倩,等.中国非禾谷类大田作物收获指数和秸秆系数[J].中国农业大学学报,2011,16(1):9-17.

[27] 李银水,鲁剑巍,廖星,等.钾肥用量对油菜产量及钾素利用效率的影响[J].中国油料作物学报,2011,33(2):152-156.