

氮磷钾配施对芸豆产量的效应研究

曾玲玲,崔秀辉,李清泉,刘 峰,王 成,闫 锋,季生栋  
(黑龙江省农业科学院 齐齐哈尔分院,黑龙江 齐齐哈尔 161006)

**摘要:**为探讨芸豆合理施肥方案,应用三因素五水平二次正交旋转组合设计,研究氮、磷、钾配施对芸豆的产量效应,并建立氮、磷、钾施用量与芸豆产量关系的肥料效应函数模型。结果表明:三因素对芸豆产量影响的大小顺序为磷肥>氮肥>钾肥,且氮钾、磷钾的交互作用达到显著水平,通过方程模拟寻优得出,芸豆产量大于 2 300 kg·hm<sup>-2</sup>的施肥方案为 N 施用量 63.8~94.0 kg·hm<sup>-2</sup>,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>施用量 118.5~152.8 kg·hm<sup>-2</sup>,K<sub>2</sub>O 施用量 74.7~125.4 kg·hm<sup>-2</sup>。N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O 的比例为 1:1.72:1.27。  
**关键词:**芸豆;氮、磷、钾肥;产量;效应  
**中图分类号:**S529.06      **文献标识码:**A      **文章编号:**1002-2767(2013)02-0039-05

芸豆在中国栽培历史悠久,分布广泛,常年栽培面积约 40 万~50 万 hm<sup>2</sup><sup>[1]</sup>,芸豆籽粒营养丰富,含有大量的蛋白和氨基酸,是重要的植物蛋白质来源,同时有一定的药用价值,可以提高人体自身的免疫能力,增强抗病能力,在医学领域有很高的应用效用<sup>[2-3]</sup>。芸豆具有较强抗旱性、耐瘠、生育期短、适应性广等特点,在农业种植结构调整和优质高效型农业发展中具有不可替代的重要作用<sup>[4]</sup>。我国是芸豆的主产国,也是主要的出口国,出口量不断扩大,且随着种植业调整,芸豆生产已成为我国在国际市场上最具有竞争力的优势产业之一<sup>[5]</sup>。当前在芸豆种植过程中,施肥不合理导致肥效不能充分发挥,从而影响芸豆产量大幅提高、品质变劣,甚至造成土壤理化性状变劣。为了克服施肥的盲目性,提高产量,建设可持续发展农业,探讨芸豆合理优化施肥是十分必要的。

1 材料与方法

1.1 材料

试验于 2012 年春季在黑龙江省农业科学院齐齐哈尔分院试验地进行,土壤类型为碳酸盐黑钙土。土壤有机质含量 2.5%,全氮含量 0.14%,碱解氮 95.3 mg·kg<sup>-1</sup>,速效磷 14.6 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾 130.0 mg·kg<sup>-1</sup>,pH 为 7.2。前作为玉米,供试芸豆品种为奶花芸豆。供试肥料分别为尿素(含 N 46%),重过磷酸钙(含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 40%)和硫酸钾(含 K<sub>2</sub>O 50%)。

1.2 方法

采用三因素五水平二次正交旋转组合设计<sup>[6]</sup>。共设 23 个处理,3 次重复,小区面积 13 m<sup>2</sup>,行距 0.65 m。磷、钾肥作种肥一次性施用,1/3 氮肥作种肥,2/3 氮肥于芸豆初花期作追肥施用,试验因子水平及编码见表 1。

表 1 试验因子水平及编码  
Table 1 Levels of experiment factors and coding

试验因子 Factor	代号 Code	设计水平 Designed levels				
		-1.6818	-1	0	1	1.6818
N/kg·hm <sup>-2</sup>	X <sub>1</sub>	6	30	65	100	124
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /kg·hm <sup>-2</sup>	X <sub>2</sub>	6	50	115	180	224
K <sub>2</sub> O/kg·hm <sup>-2</sup>	X <sub>3</sub>	3	40	95	150	187

2 结果与分析

2.1 模型的建立

根据试验结果(见表 2),以芸豆产量(Y)为目标函数,以 X<sub>1</sub>、X<sub>2</sub>、X<sub>3</sub> 为决策变量,建立二次回归模型,并对试验结果进行方差分析(见表 3)。经

收稿日期:2012-11-19  
基金项目:现代农业产业技术体系资助项目(CARS-09)  
第一作者简介:曾玲玲(1982-),女,黑龙江省密山市人,硕士,助理研究员,从事土壤肥料与作物栽培研究。E-mail: zengling\_8225@163.com。

回归分析建立的二次回归模型：

$$Y = 2\,364.84 + 24.89X_1 + 40.95X_2 + 10.65X_3 - 30.80X_1^2 - 60.91X_2^2 - 30.59X_3^2 + 22.05X_1X_2 + 44.55X_1X_3 - 30.55X_2X_3 \quad (1)$$

表 3 的方差分析结果表明，失拟项均方  $F_1 = 2.983 < F_{0.05(5,8)} = 3.69$ ，失拟不显著，所以二次模型是合适的。故以合并均方即剩余均方作为被比

量，测验各回归平方和的显著性（用  $F_2$  表示），在  $\alpha = 0.10$  水平上， $X_1$ 、 $X_2$  的一次效应， $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$  的二次效应和  $X_1X_3$ 、 $X_2X_3$  的一级互作效应显著，故在  $\alpha = 0.10$  水平予以保留，得到方程：

$$Y = 2\,364.84 + 24.89X_1 + 40.95X_2 - 30.80X_1^2 - 60.91X_2^2 - 30.59X_3^2 + 44.55X_1X_3 - 30.55X_2X_3 \quad (2)$$

表 2 二次正交旋转组合设计试验方案及产量结果

Table 2 The quadratic rotational combination design and yield results

处理 Treatment	编码值 Coded value			施肥量/kg·hm <sup>2</sup> Fertilizer amount			产量/kg·hm <sup>2</sup> Yield
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	
1	1	1	1	100	180	150	2388.0
2	1	1	−1	100	180	40	2300.2
3	1	−1	1	100	50	150	2295.7
4	1	−1	−1	100	50	40	2169.9
5	−1	1	1	30	180	150	2120.5
6	−1	1	−1	30	180	40	2295.1
7	−1	−1	1	30	50	150	2200.6
8	−1	−1	−1	30	50	40	2168.8
9	−1.6818	0	0	6	115	95	2286.6
10	1.6818	0	0	124	115	95	2269.4
11	0	−1.6818	0	65	6	95	2106.5
12	0	1.6818	0	65	224	95	2279.2
13	0	0	−1.6818	65	115	3	2256.4
14	0	0	1.6818	65	115	187	2300.8
15	0	0	0	65	115	95	2367.3
16	0	0	0	65	115	95	2364.7
17	0	0	0	65	115	95	2304.5
18	0	0	0	65	115	95	2344.9
19	0	0	0	65	115	95	2385.2
20	0	0	0	65	115	95	2400.5
21	0	0	0	65	115	95	2359.6
22	0	0	0	65	115	95	2355.7
23	0	0	0	65	115	95	2401.1

2.2 模型解析

2.2.1 主因子效应分析 主效应分析旨在表明各因子对产量影响的主次地位。回归系数绝对值的大小可以判断因子的重要程度。从方程(1)中的一次项看，三因子对产量的影响为：磷肥(b =

40.95) > 氮肥(b = 24.89) > 钾肥(b = 10.65)。将其它因子固定在零水平，可由方程(2)得到下列方程：

$$Y(X_1) = 2\,364.84 + 24.89X_1 - 30.80X_1^2 \quad (3)$$

$$Y(X_2) = 2\,364.84 + 40.95X_2 - 60.91X_2^2 \quad (4)$$

$$Y(X_3)=2364.84-30.57X_3^2 \tag{5}$$

将各因子的不同水平值分别代入(3)(4)(5)方程,得出各因子在不同水平下的产量(见图 1)。由图 1 可知, $X_1$ (氮肥)、 $X_2$ (磷肥)和  $X_3$ (钾肥)与芸豆产量的关系曲线均为明显的抛物线,即在

$[-1.681\ 8,0]$ 水平区域内,随着  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$  水平的增加,芸豆产量随之增加,在 0 水平时,芸豆产量达到最大值  $2\ 364.8\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ;在  $[0,1.681\ 8]$  水平区域内,随着三因子水平的增加,芸豆产量呈下降趋势。

表 3 方差分析

Table 3 Analysis of variance

变异来源 Variation source	平方和 SS	自由度 df	均方 MS	F	$F_{0.05}$	$F_{0.01}$
$X_1$	8458.30	1	8458.30	5.3639		
$X_2$	22901.00	1	22901.00	14.5230		
$X_3$	1549.55	1	1549.55	0.9827		
$X_1^2$	15075.03	1	15075.03	9.5600		
$X_2^2$	58943.91	1	58943.91	37.3801		
$X_3^2$	14868.10	1	14868.10	9.4288		
$X_1X_2$	3889.62	1	3889.62	2.4667		
$X_1X_3$	15877.62	1	15877.62	10.0690		
$X_2X_3$	7466.42	1	7466.42	4.7349		
回归 Regression	148016.37	9	16446.26	$F_2=10.430$	2.72	4.19
剩余 Resistance	20499.46	13	1576.88			
失拟 Lack of fit	13342.92	5	2668.58	$F_1=2.983$	3.69	6.63
误差 Error	7156.54	8	894.57			
总和 Total	168515.82	22				

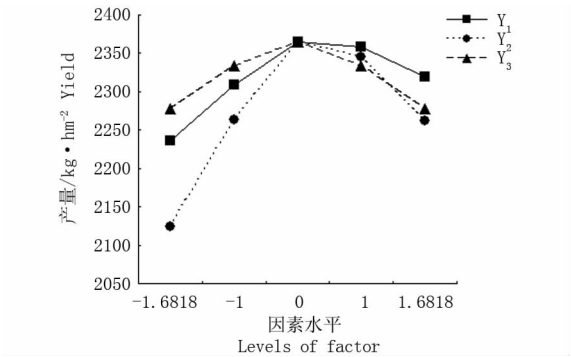


图 1 芸豆产量与三因素的对应函数关系  
Fig. 1 Functional relation between yield and the three factors

2.2.2 因子间交互效应的分析 由方程(1)中偏回归系数的绝对值可以看出,各因子间交互作用大小依次为  $X_1X_3>X_2X_3>X_1X_2$ ,从方差分析结果来看,变量中达到显著水平的交互项为  $X_1X_3$  和

$X_2X_3$ (见表 3),采用“降维法”得出氮肥( $X_1$ )与钾肥( $X_3$ )因素间的交互作用编码方程,磷肥( $X_2$ )与钾肥( $X_3$ )效应互作编码方程:

$$Y_{13}=2\ 364.84+24.89X_1-30.80X_1^2-30.59X_3^2+44.55X_1X_3 \tag{6}$$

$$Y_{23}=2\ 364.84+40.95X_2-60.91X_2^2-30.59X_3^2-30.55X_2X_3 \tag{7}$$

根据方程(6)和(7)得出表 4,可以看出:

(1)在氮肥水平下,芸豆产量随着钾肥用量的增加表现出先增加后降低的趋势;钾肥在  $[-1.681\ 8,1]$  水平区域内,即钾肥用量  $3\sim150\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,芸豆产量随着氮肥水平的增加表现出先增加后降低的趋势,当钾肥水平为  $1.681\ 8$  时,即钾肥用量为  $187\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,芸豆产量随氮肥水平的增加而增加。

(2)在钾肥水平下,芸豆产量随磷肥水平的增加表现出先增加后降低的趋势;同样在磷肥水平

下,芸豆产量随钾肥水平的增加表现出先增加后降低的趋势。磷肥在 $[0,1]$ 水平区域内,钾肥在 $[-1,0]$ 水平区域内,即磷肥用量 $115\sim 180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和钾肥用量 $40\sim 95\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,产量函数值可达到较高值。

2.3 最佳施肥措施的确定

模型(2)中目标函数 $Y$ 的最优解,要通过产量频率分析求得。在 $-1.6818\leq X_i\leq 1.6818$ 区间内共得出125套组合方案,其中芸豆产量 $\geq 2\,300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的组合有22套,占18%(见表5)。

表 4 因素间互作分析  
Table 4 Analysis of the interaction between the factors

因素 Factor		X <sub>3</sub>				
		-1.6818	-1	0	1	1.6818
X <sub>1</sub>	-1.6818	2275.36	2280.20	2235.87	2130.36	2023.34
	-1	2297.56	2323.12	2309.16	2234.02	2147.71
	0	2278.32	2334.25	2364.84	2334.25	2278.32
	1	2197.48	2283.79	2358.93	2372.89	2347.33
	1.6818	2107.05	2214.06	2319.58	2363.91	2359.06
X <sub>2</sub>	-1.6818	1950.78	2041.74	2123.70	2144.49	2123.59
	-1	2125.09	2201.85	2262.99	2262.95	2227.85
	0	2278.32	2334.25	2364.84	2334.25	2278.32
	1	2309.75	2344.85	2344.89	2283.75	2206.99
	1.6818	2261.33	2282.23	2261.44	2179.47	2088.51

表 5 高产施肥方案 Xi 取值频率分布及优选结果  
Table 5 Xi frequency distribution of high yield fertilizer application scheme and preferred results

编码 Code	X <sub>1</sub>		X <sub>2</sub>		X <sub>3</sub>	
	次数 Times	频率 Frequency	次数 Times	频率 Frequency	次数 Times	频率 Frequency
-1.6818	1	0.046	0	0	3	0.136
-1	4	0.182	2	0.091	4	0.182
0	6	0.273	11	0.500	6	0.273
1	6	0.273	9	0.409	6	0.273
1.6818	5	0.227	0	0	3	0.136
合计 Total	22	1	22	1	22	1
加权均数 Mean	0.397	0.318	0.091			
标准误 Standard error	0.22	0.135	0.235			
95%置信区间 95% confidence limit	-0.035~0.829	0.054~0.582	-0.370~0.552			
施肥量/kg·hm <sup>2</sup> Fertilizer amount	63.8~94.0	118.5~152.8	74.7~125.4			
中心值/kg·hm <sup>2</sup> Central value	78.9	135.7	100.0			
N:P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> :K <sub>2</sub> O	1	1.72	1.27			

由表 5 可知,在该试验条件下,芸豆产量 $\geq 2\ 300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的施肥量为:N 施用量  $63.8\sim 94.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , $\text{P}_2\text{O}_5$ 施用量  $118.5\sim 152.8\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , $\text{K}_2\text{O}$ 施用量  $74.7\sim 125.4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。施肥量的中心值为 N: $78.9\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$ : $135.7\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ : $100.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,N: $\text{P}_2\text{O}_5$ : $\text{K}_2\text{O}$  的比例为 1:1.72:1.27。

### 3 结论

在该试验条件下,三因子对芸豆产量影响大小的顺序表现为磷肥>氮肥>钾肥,三者与芸豆产量的关系曲线均为明显的抛物线,即芸豆产量随三因子水平的增加呈现出先增加后降低的趋势。

各因子间交互作用大小依次为  $X_1X_3>X_2X_3>X_1X_2$ ,其中  $X_1X_3$  和  $X_2X_3$  交互作用显著,钾肥在 $[-1.681\ 8,1]$ 水平区域内,即钾肥用量  $3\sim 150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,芸豆产量随着氮肥水平的增加表现出先增加后降低的趋势;磷肥在 $[0,1]$ 水平区域内,钾肥在 $[-1,0]$ 水平区域内,即磷肥用量  $115\sim$

$180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和钾肥用量  $40\sim 95\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,可得到较高的芸豆产量。

通过对氮磷钾综合效应的分析,提出了芸豆产量大于  $2\ 300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的施肥方案:N 施用量  $63.8\sim 94.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , $\text{P}_2\text{O}_5$ 施用量  $118.5\sim 152.8\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , $\text{K}_2\text{O}$ 施用量  $74.7\sim 125.4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。N: $\text{P}_2\text{O}_5$ : $\text{K}_2\text{O}$  的比例为 1:1.72:1.27。

### 参考文献:

- [1] 林华,高金锋,高小丽,等.不同基因型芸豆品种丰产性及稳定性分析[J].干旱地区农业研究,2009,27(2):108-112.
- [2] 林汝法,柴岩,廖琴,等.中国小杂粮[M].北京:中国农业科学技术出版社,2002:242-272.
- [3] 宗绪晓.食用豆类高产栽培与食品加工[M].北京:中国农业技术出版社,2002:227-250.
- [4] 郑殿升,方嘉禾.高品质小杂粮作物品种及栽培[M].北京:中国农业出版社,2001:174-187.
- [5] 柴岩,万富世.中国小杂粮产业发展报告[M].北京:中国农业科学技术出版社,2007:84-90.
- [6] 茆诗松.回归分析及其试验设计[M].上海:华东师范大学出版社,1983:191-230.

## Study on the Effects of Application Ratios of Nitrogen, Phosphorus and Potassium on Yield of Kidney Bean

ZENG Ling-ling, CUI Xiu-hui, LI Qing-quan, LIU Feng, WANG Cheng, YAN Feng, JI Sheng-dong

(Qiqihar Branch of Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Qiqihar, Heilongjiang 161006)

**Abstract:** In order to discuss rational fertilizer application scheme for kidney bean, the effect of the compound of N, P and K fertilizer on the yield of kidney bean was studied using the 3-factor-5-level quadratic rotational combination design. And the fertilizer response models were established between the N, P and K fertilizer and yield of kidney bean. Based on the model, the best fertilized plan was determined. The results indicated that the effects of N, P and K on the yield followed the order:  $P>N>K$ , and the interactive effects between N and K, P and K were significant. According to the model, the fertilized plans which the yield of kidney bean over  $2\ 300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  were  $63.8\sim 94.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  N,  $118.5\sim 152.8\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$   $\text{P}_2\text{O}_5$  and  $74.7\sim 125.4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$   $\text{K}_2\text{O}$ . The ratios of N: $\text{P}_2\text{O}_5$ : $\text{K}_2\text{O}$  was 1:1.72:1.27.

**Key words:** kidney bean; N P K fertilizer; yield; effect