

优化小豆产量及产量性状的 NPK 肥模型研究

肖焕玉, 郝曦煜, 梁 杰*, 王英杰, 郭文云

(吉林省白城市农业科学院, 吉林 白城 137000)

摘 要: 小豆的主要产区在东北、华北等地区, 因氮、磷、钾施肥量不平衡导致小豆产量较低。为研究小豆对 3 种元素的需求规律, 探索氮、磷、钾的最佳施肥量及其配比, 本试验采用三因素二次回归正交旋转设计, 研究肥料配施对小豆产量的影响。结果表明, 调整氮、磷、钾施肥量及配比能够显著提高小豆产量, 当 $N:P_2O_5:K_2O = 1:0.55:0.98$ ($N: 76.6 \text{ kg/hm}^2$) 时, 产量达到最大 ($2\ 096.7 \text{ kg/hm}^2$); 当 $N:P_2O_5:K_2O = 1:0.53:0.86$ ($N: 64.3 \text{ kg/hm}^2$) 时, 经济效益最佳 ($12\ 432.73 \text{ 元/hm}^2$)。氮、磷、钾元素对小豆产量互作效应表现为随氮、磷和氮、钾施肥量的增加而逐渐升高至最高点后缓慢降低, 随磷、钾施肥量的增加表现出缓慢增加至最高点后迅速下降。随氮、钾施用量的增加, 小豆单株荚数表现为先增长后下降, 试验范围内磷施用量对小豆单株荚数的影响表现为直线增长; 3 种元素对小豆单荚粒数影响不大, 证明小豆单荚粒数是由品种本身特性决定的; 小豆的百粒重随 3 种肥料的增施而增加。

关键词: 小豆; 产量; 产量因素; 施肥; 氮磷钾; 模型

小豆 [*Vigna angularis* (Willd) Ohwi & Ohashi], 是菜豆族 (Phaseoleae) 豇豆属 (*Vigna*) 植物中的一个栽培种, 起源于中国^[1]。我国栽培小豆的历史悠久, 至今已有 2 000 多年^[2]。小豆在我国种植面积较小, 其产量虽远不及小麦、玉米等大宗作物, 但它在农业生产及人民生活中具有独特作用, 是重要的食品原料, 具有较高的食疗保健作用和药用价值, 主产区集中在东北、华北和江淮地区等, 面积和产量约占全国的 70%^[3]。随着“白红”系列^[4]、“冀红”系列等优质小豆品种对生产上的老旧品种进行更新换代, 小豆产量有了明显的提高, 但我国小豆的单产仍处于较低水平。据国家统计局数据, 近年来, 2012 年的全国小豆平均单产最高, 达 $1\ 768.58 \text{ kg/hm}^2$; 2009 年全国平均单产最低, 为 $1\ 450.07 \text{ kg/hm}^2$ ^[5]。究其原因是由于小豆在我国农业中地位不高, 投入的科研力量较少, 尤其生产上施肥不科学, 主要表现在氮、磷、钾施肥不平衡, 导致小豆生产水平存在很大差异。因此, 如

何科学合理施肥是制约小豆高产的关键因素之一。前人对小豆的施肥量及需肥规律进行了较多研究, 但结论不尽相同^[6-9]。针对小豆粗放的栽培管理方式, 通过人工配施不同氮、磷、钾施肥量的处理, 研究小豆对 3 种营养元素的需求规律, 探索氮、磷、钾的最佳施肥量及其配比, 以求挖掘小豆单产潜力, 为集成小豆高产栽培技术提供科学依据, 提高小豆综合生产能力, 促进小豆产业发展做出贡献。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试品种: 选用吉林省白城市农业科学院培育的小豆品种白红 4 号进行试验。该品种具有产量高, 品质好, 成熟度一致, 直立抗倒能力强等特点, 是东北杂粮主产区主推品种之一。

供试肥料: 氮肥, 尿素 ($N\ 46.4\%$); 磷肥, 过磷酸钙 ($P_2O_5\ 12\%$); 钾肥, 硫酸钾 ($K_2O\ 50\%$)。

1.2 试验地点

本试验于 2011 ~ 2013 年进行, 试验地点设于吉林省白城市农业科学院试验地 ($N45^\circ 38'$, $E122^\circ 50'$), 海拔 155.4 m 。属于温带季风气候, 年均日照时数 $2\ 814 \text{ h}$, 年均降水 374 mm , 年均有效积温 $3\ 005^\circ\text{C}$, $8 \sim 9$ 月昼夜温差可达 $14 \sim 15^\circ\text{C}$ (图 1)。试验地为淡黑钙土, 地势平整, 土壤肥力

收稿日期: 2019-06-15; 录用日期: 2019-09-13

基金项目: 国家食用豆产业技术体系小豆育种岗位 (CARS08-G4); 白城市科技发展计划项目“优质、抗旱小豆新品种选育及配套栽培技术研究” (201905)。

作者简介: 肖焕玉 (1964-), 男, 吉林白城人, 研究员, 学士, 从事食用豆栽培与育种研究。E-mail: xhy2059@163.com。

通讯作者: 梁杰, E-mail: liangjie9669@163.com。

相同, 前茬为高粱。
耕层土壤 (0 ~ 20 cm) 含有机质 20.9 g/kg、全氮 1.7 g/kg、全磷 1.2 g/kg、全钾 1.9 g/kg、碱解氮 116.8 mg/kg、有效磷 83.2 mg/kg、速效钾 139.7 mg/kg, pH 值 7.5。

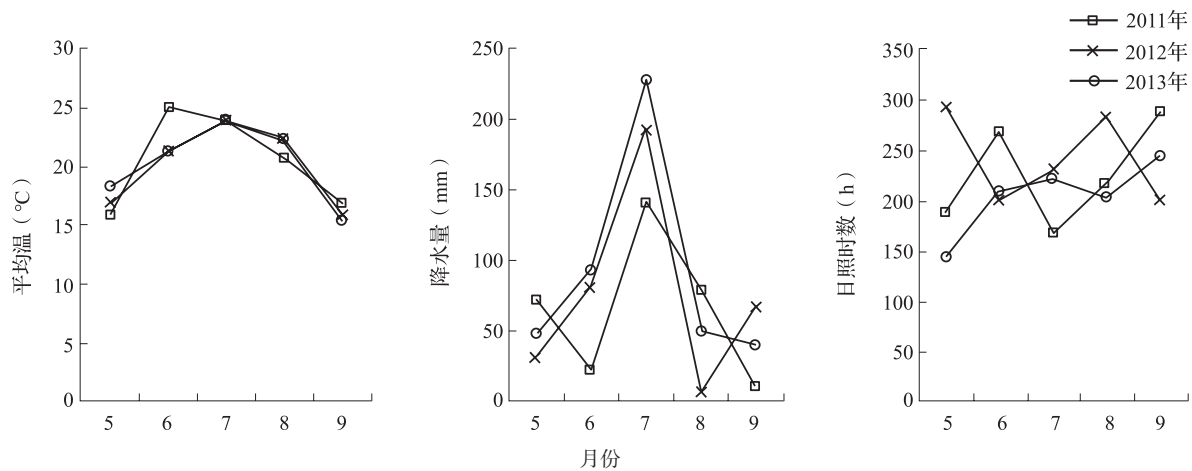


图 1 2011 ~ 2013 年小豆生育期内各月份平均温度、降水量与日照时数

1.3 试验设计

田间试验设计: 本试验对小豆进行 N、P、K 三因素二次回归正交旋转组合设计, 共设 23 个处理, 3 次重复, 完全随机排列, 共 69 个小区。每个处理小区面积 12 m², 行长 5 m, 4 行区, 行距 60 cm。田间管理按当地常规管理进行。

肥料试验处理设计: N、P、K 各个因素水平设计详见表 1; N、P、K 三因素旋转组合施肥量设计详见表 2, N、P、K 全部作为基肥一次性施入。

表 1 因子水平编码水平设计表 (kg/hm²)

因素	x ₁ (N)	x ₂ (P ₂ O ₅)	x ₃ (K ₂ O)
零水平 (0)	66.2	36.5	63.0
变化区间	10.4	5.4	15.0
上水平 (+1)	76.6	41.9	78.0
下水平 (-1)	66.2	36.5	63.0
上星臂号 (+1.682)	83.7	45.6	88.2
下星臂号 (-1.682)	76.6	41.9	78.0

1.4 测定项目与方法

在成熟期每小区取 5 株小豆测量单株荚数、单荚粒数、百粒重等指标; 取每个小区中间 2 行 (测产面积 6 m²) 收获成熟植株, 测定小豆产量。

部分结果分析方法参照李停等^[10]。使用 Excel 2019、DPS 9.5、Design Expert 8.0 进行数据分析及作图。

2 结果与分析

2.1 小豆目标产量、产量性状与 N、P、K 施肥量二次回归模型的建立与优化分析

通过对二次正交旋转组合试验结果的拟合分析, 建立小区平均产量 (y₁) 对 N (x₁)、P (x₂)、K (x₃) 的回归分析模型为:

$$y_1 = 2\,055.190\,68 + 54.017\,88x_1 + 37.385\,56x_2 + 60.995\,72x_3 - 42.894\,82x_1^2 - 36.422\,37x_2^2 - 31.568\,83x_3^2 + 18.138\,12x_1x_2 + 11.777\,37x_1x_3 - 8.623\,87x_2x_3$$

由表 3 可知, 在显著水平 α = 0.10 的条件下通过方差分析求出产量拟合的模型 F₁ (失拟) = 0.78 < F_{0.01 (5, 8)} = 6.63, 表明未知因素对试验结果没有显著影响, 失拟变异是由实验误差等偶然因素引起的。F₂ (回归) = 4.25 > F_{0.05 (9, 13)} = 2.71 达到显著水平, 说明模型成立。预测值和实际较好地吻合, 因此该模型具有较好的预测性。各肥料偏相关系数大小为 K > N > P, 且均为正相关。

在 α = 0.10 显著水平剔除不显著项后, 简化后的回归方程为:

$$y_1 = 2\,055.190\,68 + 54.017\,88x_1 + 37.385\,56x_2 + 60.995\,72x_3 - 42.894\,82x_1^2 - 36.422\,37x_2^2 - 31.568\,83x_3^2 \tag{1}$$

同理得单株荚数 (y₂)、单荚粒数 (y₃) 和百粒重 (y₄) 对 N (x₁)、P (x₂)、K (x₃) 的回归分析模型:

$$y_2 = 31.336\,37 + 1.320\,67x_2 + 1.410\,53x_3 - 1.817\,85x_1^2$$

$$-1.004\ 68x_3^2 \quad (2)$$

$$y_3 = 7.994\ 626 \quad (3)$$

$$y_4 = 7.779\ 25 + 0.079\ 88x_1 + 0.095\ 49x_2 + 0.069\ 3x_3 + 0.098\ 75x_1x_2 \quad (4)$$

由表4可知, 试验中小豆产量最高值 (y_{1max}) 为 2 096.7 kg/hm² 时, $x_1 = 1$ 、 $x_2 = 1$ 、 $x_3 = 1$, 出现频率分别为 38.7%、29%、35.5% (表5), 即 N:P₂O₅:K₂O = 1:0.55:0.98 (N: 76.6 kg/hm²)。

试验中各肥料对单株荚数的偏相关系数大小为 K>P>N, 且均为正相关 (表3)。小豆单株荚数最高值 (y_{2max}) 为 33.96 时, $x_1 = 0$ 、 $x_2 = 1.682$ 、

$x_3 = 1$ (表4), 出现频率分别为 45.4%、36.4%、33.3% (表6), 即 N:P₂O₅:K₂O = 1:0.69:1.18 (N: 66.2 kg/hm²)。

方程(3)中, 单荚粒数 (y_3) 为常数, 表明 N、P、K 对小豆的单荚粒数影响甚微, 间接证明小豆单荚粒数是由品种本身特性决定的。

试验中各肥料对百粒重的偏相关系数大小为 P>N>K, 且均为正相关 (表3)。小豆百粒重最高值 (y_{4max}) 为 8.47 时, $x_1=1.682$ 、 $x_2=1.682$ 、 $x_3=1.682$ (表4), 出现频率分别为 25.4%、27%、31.8% (表7), 即 N:P₂O₅:K₂O = 1:0.54:1.05 (N: 83.7 kg/hm²)。

表2 小豆 N、P、K 三因素旋转组合施肥量设计及产量、产量因素结果

处理号	肥料组成			产量 (kg/hm ²)				单株荚数 (个)	单荚粒数 (个)	百粒重 (g)
	x_1 (N)	x_2 (P ₂ O ₅)	x_3 (K ₂ O)	2011 年	2012 年	2013 年	平均 (y_1)	y_2	y_3	y_4
1	1	1	1	2 310.04	2 078.33	2 152.79	2 180.44 aA	30.7 cdeABC	8.3 aA	8.06 abcAB
2	1	1	-1	2 067.14	1 851.98	2 092.20	2 003.83 abcdABC	29.7 bcdeABC	7.9 abA	8.04 abcAB
3	1	-1	1	2 258.25	1 858.12	2 022.88	2 046.44 abcdABC	27.9 abA	8.1 abA	8.66 abA
4	1	-1	-1	2 003.99	1 751.66	1 802.77	1 852.83 cdABC	26.0 abcdABC	8.0 abA	7.62 abcdAB
5	-1	1	1	1 997.56	2 082.95	1 909.44	1 996.62 abcdABC	29.7 bcdeABC	8.1 abA	8.78 aA
6	-1	1	-1	2 403.24	1 469.17	1 781.42	1 884.61 cdABC	27.9 abcdABC	7.9 abA	8.43 abA
7	-1	-1	1	2 297.85	1 582.26	1 977.91	1 952.67 abcdABC	28.8 cdeABC	8.1 abA	7.69 abcdAB
8	-1	-1	-1	1 887.85	1 604.76	1 873.51	1 788.67 dC	25.0 deABC	7.8 bA	7.49 dAB
9	1.682	0	0	1 918.00	1 655.34	1 900.83	1 824.77 cdBC	24.2 abcdAB	8.1 abA	7.75 abcdAB
10	-1.682	0	0	2 335.11	1 714.43	1 918.35	1 989.33 abcdABC	26.6 deABC	8.2 abA	7.81 abcdAB
11	0	1.682	0	2 075.10	1 745.38	1 879.19	1 899.89 bcdABC	25.8 abcdABC	8.1 abA	7.55 cdAB
12	0	-1.682	0	2 179.27	1 724.35	1 948.79	1 950.83 abcdABC	30.4 deABC	8.1 abA	7.82 abcdAB
13	0	0	1.682	2 106.13	1 630.47	1 914.15	1 883.56 cdABC	24.5 abcA	8.1 abA	7.51 cdB
14	0	0	-1.682	2 380.13	1 536.33	2 067.36	1 994.61 abcdABC	30.9 cdeABC	8.0 abA	7.71 abcdAB
15	0	0	0	2 177.97	1 888.13	2 023.46	2 029.83 abcdABC	29.4 deBC	7.7 bA	7.86 abcdAB
16	0	0	0	2 245.79	2 007.26	1 955.64	2 069.56 abcABC	30.9 cdeABC	7.8 bA	7.97 abcAB
17	0	0	0	1 979.95	2 049.89	1 981.71	2 003.83 abcdABC	28.1 eC	7.9 abA	7.57 bcdAB
18	0	0	0	2 603.79	1 702.15	2 158.64	2 154.86 abAB	28.7 deABC	8.1 abA	7.71 abcdAB
19	0	0	0	2 386.90	1 718.68	2 022.83	2 042.83 abcdABC	29.3 deBC	7.8 bA	7.97 abcAB
20	0	0	0	2 180.36	1 945.88	2 089.04	2 071.73 abcABC	34.3 abcdABC	7.9abA	7.57 cdAB
21	0	0	0	2 073.94	1 879.72	2 036.09	1 996.61 abcdABC	35.4 aA	8.1 abA	7.87 abcdAB
22	0	0	0	2 292.03	2 031.45	2 205.75	2 176.44 aA	33.3 abcdABC	8.2 aA	7.83 abcdAB
23	0	0	0	2 387.08	1 569.49	1 924.14	1 960.23 abcdABC	32.9 abcdABC	8.0 abA	7.67 abcdAB

注: 表中 y_1 为平均产量 (kg/hm²), y_2 为单株荚数 (个), y_3 为单荚粒数 (个), y_4 为百粒重 (g)。不同大、小字母分别表示差异达 0.01、0.05 显著水平。

表 3 以产量 (y_1) 和单株荚数 (y_2)、单荚粒数 (y_3)、百粒重 (y_4) 为指标的二次多项式模型及其各项的方差分析

变异来源	产量 (y_1)				单株荚数 (y_2)				单荚粒数 (y_3)				百粒重 (y_4)			
	平方和	偏相关	F	P	平方和	偏相关	F	P	平方和	偏相关	F	P	平方和	偏相关	F	P
x_1 (N)	39 849.91	0.629	8.503	0.012	3.52	0.225	0.690	0.421	0.02	0.252	0.884	0.364	0.09	0.514	4.676	0.050
x_2 (P_2O_5)	19 087.98	0.488	4.073	0.065	23.82	0.514	4.668	0.050	0.00	0.091	0.110	0.746	0.12	0.583	6.682	0.023
x_3 (K_2O)	50 810.21	0.674	10.841	0.006	27.17	0.539	5.324	0.038	0.05	0.357	1.894	0.192	0.07	0.462	3.519	0.083
x_1^2	29 236.29	-0.569	6.238	0.027	52.51	-0.665	10.289	0.007	0.05	0.349	1.808	0.202	0.00	0.059	0.045	0.836
x_2^2	21 078.96	-0.507	4.498	0.054	11.84	-0.389	2.320	0.152	0.02	0.246	0.835	0.378	0.01	-0.209	0.592	0.456
x_3^2	15 835.42	-0.454	3.379	0.089	16.04	-0.441	3.143	0.100	0.01	0.133	0.233	0.637	0.04	-0.394	2.382	0.147
x_1x_2	2 631.93	0.204	0.562	0.467	0.91	0.116	0.179	0.680	0.00	0.000	0.000	1.000	0.08	0.494	4.186	0.062
x_1x_3	1 109.65	0.134	0.237	0.635	0.91	-0.116	0.179	0.680	0.00	0.000	0.000	1.000	0.03	-0.332	1.611	0.227
x_2x_3	594.97	-0.098	0.127	0.727	1.05	-0.125	0.206	0.657	0.01	0.119	0.187	0.673	0.00	0.093	0.113	0.742
回归	179 353.76	$F_2=4.252$		0.009	136.85	$F_2=2.980$		0.037	0.16	$F_2=0.658$		0.732	0.44	$F_2=2.644$		0.055
剩余	60 928.78				66.34				0.35				0.24			
失拟	19 939.22	$F_1=0.778$		0.592	9.24	$F_1=0.259$		0.923	0.13	$F_1=0.904$		0.523	0.05	$F_1=0.394$		0.840
误差	40 989.56				57.10				0.22				0.19			
总和	240 282.54				203.20				0.51				0.69			

表 4 产量 (y_1) 和单株荚数 (y_2)、单荚粒数 (y_3)、百粒重 (y_4) 最高值的各个因素组合

因素	最大值	x_1 (N)	x_2 (P_2O_5)	x_3 (K_2O)
y_1 (产量)	2 096.70	1	1	1
y_2 (单株荚数)	33.96	0	1.682	1
y_4 (百粒重)	8.47	1.682	1.682	1.682

表 5 N (x_1)、P (x_2)、K (x_3) 取值的频率分布 (产量 $y_1>1 989.35$, 共 31 个方案)

水平	x_1 (N)	频率	x_2 (P_2O_5)	频率	x_3 (K_2O)	频率
-1.682	0	0.000 0	0	0.000 0	0	0.000 0
-1.000	0	0.000 0	5	0.161 3	0	0.000 0
0.000	11	0.354 8	9	0.290 3	9	0.290 3
1.000	12	0.387 1	9	0.290 3	11	0.354 8
1.682	8	0.258 1	8	0.258 1	11	0.354 8

表 6 N (x_1)、P (x_2)、K (x_3) 取值的频率分布 (单株荚数 $y_2>29.15$, 共 33 个方案)

水平	x_1 (N)	频率	x_2 (P_2O_5)	频率	x_3 (K_2O)	频率
-1.682	0	0.000 0	1	0.030 3	0	0.000 0
-1.000	9	0.272 7	3	0.090 9	4	0.121 2
0.000	15	0.454 5	7	0.212 1	10	0.303 0
1.000	9	0.272 7	10	0.303 0	11	0.333 3
1.682	0	0.000 0	12	0.363 6	8	0.242 4

表 7 $N(x_1)$ 、 $P(x_2)$ 、 $K(x_3)$ 取值的频率分布 (百粒重 $y_4 > 7.74$, 共 63 个方案)

水平	$x_1 (N)$	频率	$x_2 (P_2O_5)$	频率	$x_3 (K_2O)$	频率
-1.682	6	0.095 2	5	0.079 4	8	0.127 0
-1.000	10	0.158 7	8	0.127 0	8	0.127 0
0.000	15	0.238 1	16	0.254 0	10	0.158 7
1.000	16	0.254 0	17	0.269 8	17	0.269 8
1.682	16	0.254 0	17	0.269 8	20	0.317 5

2.2 N、P、K 与小豆产量和产量性状单因素效应分析

采用降维法分别研究 $N(x_1)$ 、 $P(x_2)$ 、 $K(x_3)$ 对小豆产量的影响, 即令其余 2 变量处于 0 水平, 分析单一因素的效应, 具体如下:

$$y_{1x1} = 2\,055.190\,68 + 54.017\,88x_1 - 42.894\,82x_1^2 \quad (5)$$

$$y_{1x2} = 2\,055.190\,68 + 37.385\,56x_2 - 36.422\,37x_2^2 \quad (6)$$

$$y_{1x3} = 2\,055.190\,68 + 60.995\,72x_3 - 31.568\,83x_3^2 \quad (7)$$

同理得单株荚数 (y_2)、百粒重 (y_4) 对 $N(x_1)$ 、 $P(x_2)$ 、 $K(x_3)$ 的单因素效应方程:

$$y_{2x1} = 31.336\,37 - 1.817\,85x_1^2 \quad (8)$$

$$y_{2x2} = 31.336\,37 + 1.320\,67x_2 \quad (9)$$

$$y_{2x3} = 31.336\,37 + 1.410\,53x_3 - 1.004\,68x_3^2 \quad (10)$$

$$y_{4x1} = 7.779\,25 + 0.079\,88x_1 \quad (11)$$

$$y_{4x2} = 7.779\,25 + 0.095\,49x_2 \quad (12)$$

$$y_{4x3} = 7.779\,25 + 0.069\,3x_3 \quad (13)$$

根据单因子效应分析结果显示 (图 2), N、P、K 3 个因素对小豆产量的影响曲线均表现出下开口抛物线趋势, 即小豆产量随肥料施用量的增加先

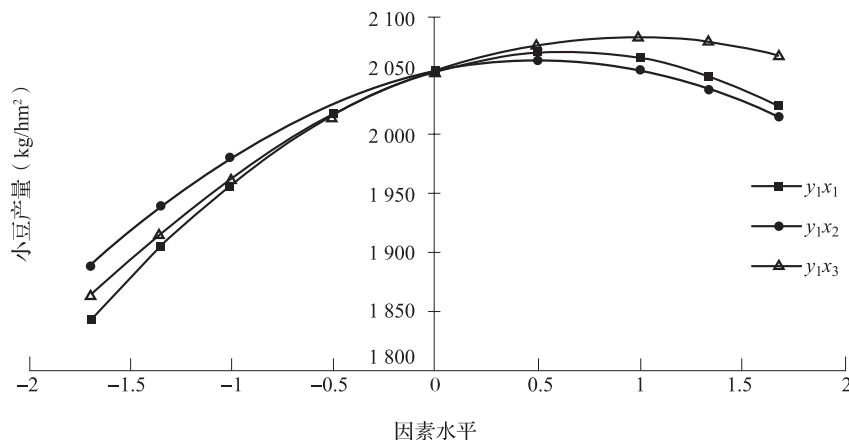
增长后下降。N、P、K 3 个因素对小豆产量的影响曲线的顶点均落在坐标内, 即 3 种肥料分别能在 $(-1.682, 1.682)$ 内取得效果最佳值。当施肥量大于 $x_1 = 0.63$, $x_2 = 0.51$, $x_3 = 0.97$ 时, 对产量 y_1 产生负效应。

由图 3 可知, 试验范围内 N、K 两个因素对小豆单株荚数的影响曲线均表现出下开口抛物线趋势, 即小豆单株荚数随肥料施用量的增加先增长后下降, 其影响曲线的顶点均落在坐标内, 即两种肥料分别能在 $(-1.682, 1.682)$ 内取得效果最佳值; P 对小豆单株荚数的影响表现为直线向上, 即小豆单株荚数在 $x_3 (-1.682, 1.682)$ 表现出随 P 施肥量增加而增加。

由图 4 可知, 试验范围内 N、P、K 3 个因素对小豆百粒重的影响均表现出直线向上, 即小豆百粒重在 $(-1.682, 1.682)$ 内随肥料施用量的增加而增加。

2.3 N、P、K 对小豆产量互作效应分析

由图 5 可知, 小豆产量 (y_1) 表现出随 $N(x_1)$ 和 $P(x_2)$ 施肥量的增加而逐渐升高至最高点后又缓慢降低。N 和 P 对小豆产量的影响相似。当 N 和 P 施肥量较少或较多时, 对小豆产量影响均较少。

图 2 $N(x_1)$ 、 $P(x_2)$ 、 $K(x_3)$ 分别对小豆产量 (y_1) 的影响

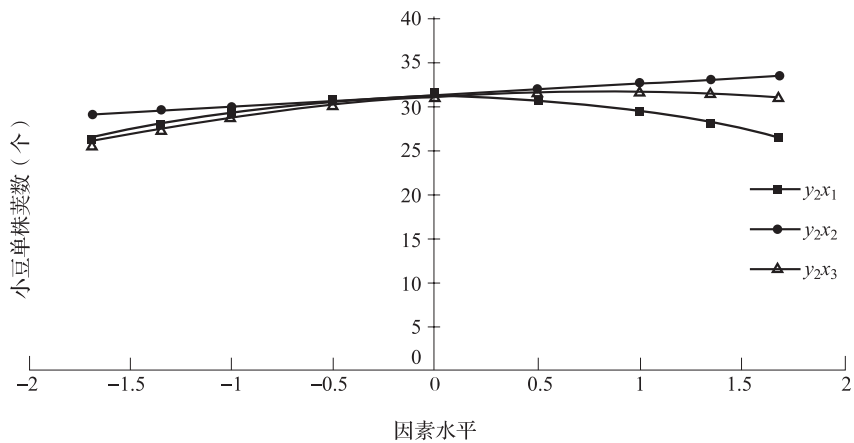


图3 $N(x_1)$ 、 $P(x_2)$ 、 $K(x_3)$ 分别对小豆单株荚数 (y_2) 的影响

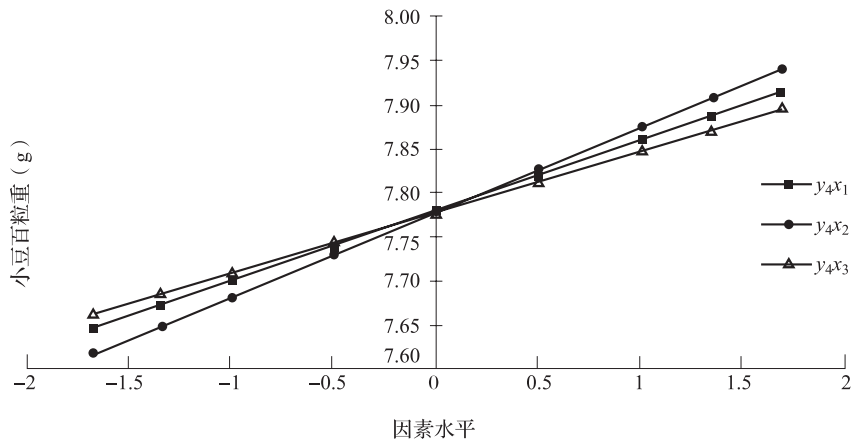


图4 $N(x_1)$ 、 $P(x_2)$ 、 $K(x_3)$ 分别对小豆百粒重 (y_4) 的影响

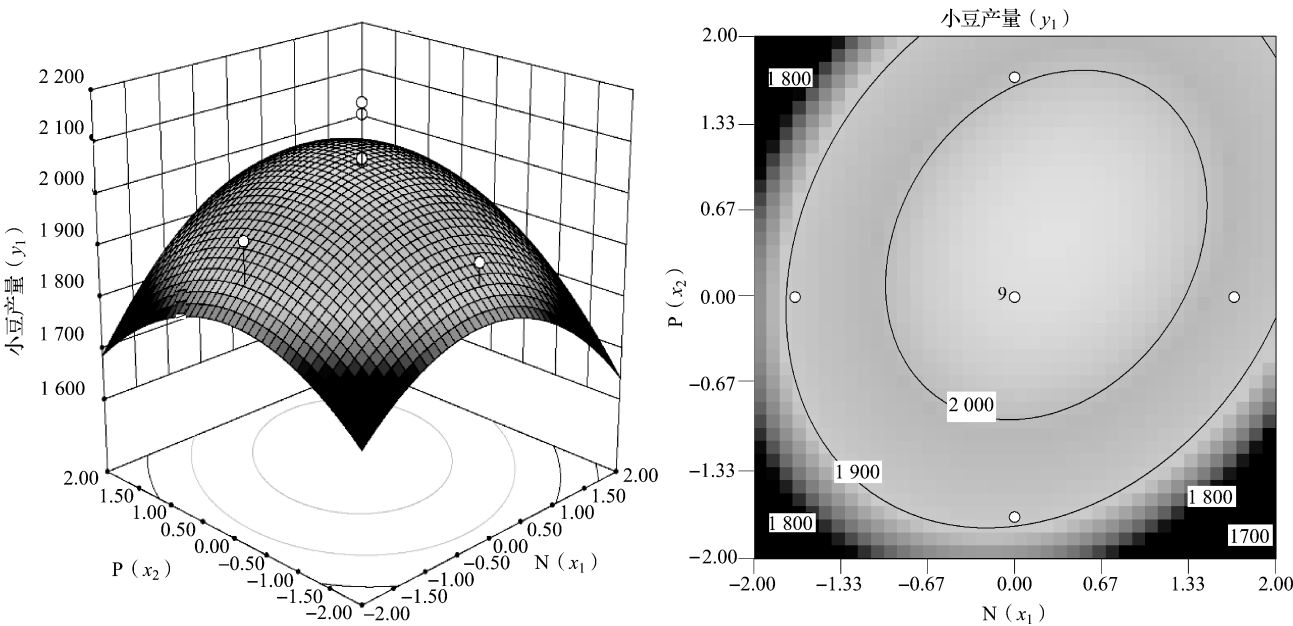


图5 $N(x_1)$ 与 $P(x_2)$ 对小豆产量 (y_1) 的互作效应响应面及其等高线

随着 N 和 P 的增加, 小豆产量逐渐升高至顶点随后下降。由图 6 可知, $N(x_1)$ 和 $K(x_3)$ 对小豆产量影响与 N 和 P 近似。当 K 处于较高水平时, 小豆产量随 N 的增长变化更快。由图 7 可知, 小豆产量随 P 和 K 施

肥量的增加表现出缓慢增加至最高点后迅速下降, P 和 K 对小豆产量的影响相似。当施 P 肥量较少时, 随着 K 的升高小豆产量有一定变化幅度但其值较低。随着 P 的升高, 小豆产量上升较快, 其值较高。

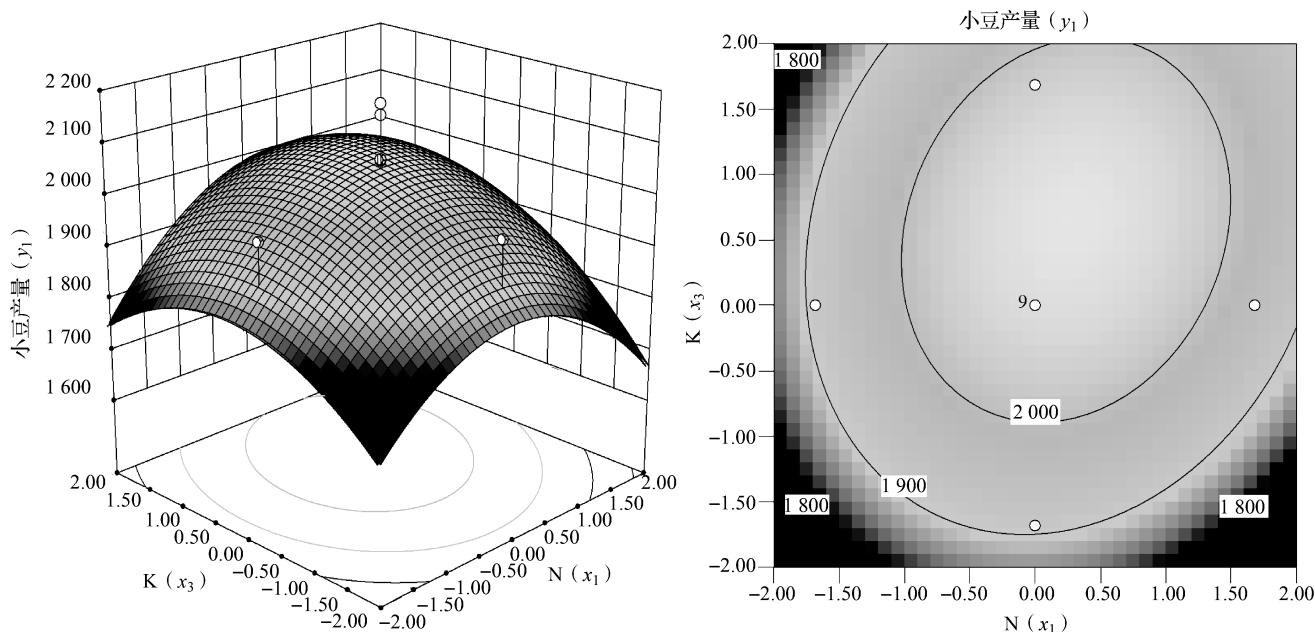


图 6 $N(x_1)$ 与 $K(x_3)$ 对小豆产量 (y_1) 的互作效应响应面图及其等高线

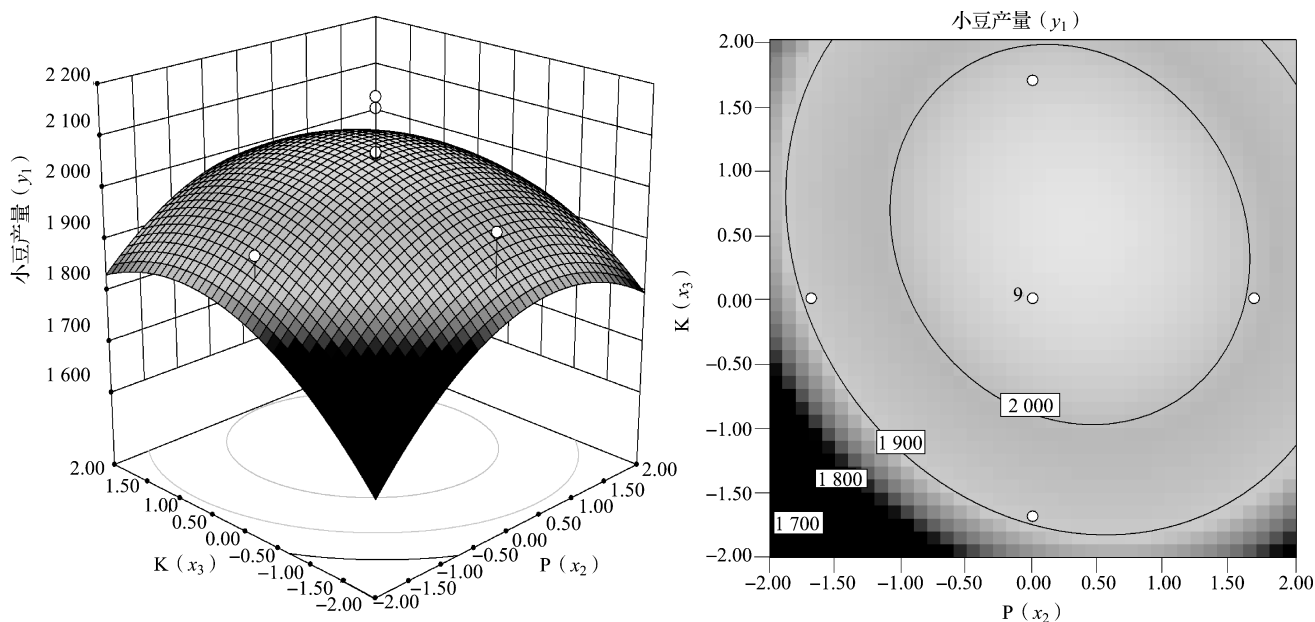


图 7 $P(x_2)$ 与 $K(x_3)$ 对小豆产量 (y_1) 的互作效应响应面图及其等高线

2.4 N、P、K 对小豆经济效益的影响

为确定最佳经济施肥方案, 必须根据小豆价格和肥料成本进行分析。按照小豆价格为 10 元/kg, 一个编码尿素 417 元 (市价每 50 kg 100 元)、过磷

酸钙 420 元 (市价每 50 kg 60 元)、硫酸钾 562 元 (市价每 50 kg 180 元) 计算, 将方程 (1) 减去肥料成本后的纯收益函数模型:

$$y_{\text{效益}} = (2\,055.190\,68 + 54.017\,88x_1 + 37.385\,56x_2 +$$

$$60.99572x_3 - 42.89482x_1^2 - 36.42237x_2^2 - 31.56883x_3^2) \times 10 - 417x_1 - 420x_2 - 562x_3$$

求得 $y_{\text{效益max}} = 12432.73$, $x_1 = -0.18$, $x_2 = -0.44$, $x_3 = -0.51$ 。

即当经济效益达到最大时 ($y_{\text{效益max}} = 12432.73$ 元/hm²), N:P₂O₅:K₂O = 1:0.53:0.86 (N:64.3 kg/hm²)。N、P、K 肥料的施用量分别为尿素 139.8 kg/hm², 过磷酸钙 284.2 kg/hm², 硫酸钾 110.8 kg/hm²。

3 结论与讨论

前人对 N、P、K 施肥的研究大多集中在大宗作物, 针对杂粮杂豆等作物的研究不多。对于红小豆来说, 作为豆科作物氮营养比较复杂, 除人为增施外还应考虑自身固氮因素; 磷在土壤中易被固定, 移动性小, 需要土壤缓慢释放^[11]。红小豆的根系、茎秆、叶片、叶柄的干物质积累量在施氮量 30 kg/hm² 时达到最大值, 同时叶片的叶色值、净光合速率、叶片胞间 CO₂ 浓度、气孔导度也在该施肥量下达到最大^[12]。

本试验中, 与韩彦龙等^[13] 的研究相一致, 各肥料对小豆产量的影响表现为 K>N>P, 通过对小豆产量性状的分析可知, 小豆的单株荚数也对 K 含量的变化更敏感, 而小豆的单荚粒数是由小豆品种本身特性决定, 小豆百粒重对 P 含量的变化更敏感。因此, K 对小豆产量有更大影响是因为 K 对单株荚数的影响大于 P 对百粒重的影响。这与曾玲玲等^[7] 的研究有差异, 这可能是因为试验地点和年份的不同, 土壤成分及降水量和光照时数等气候条件等多种因素的综合影响, 导致试验结果不同。

N、P、K 3 种元素单因素效应及互作效应均表现出先上升后下降, 主要是因为试验范围内 N、K 两个因素对小豆单株荚数随肥料施用量的增加先增长后下降, 而 P 对小豆单株荚数的影响和 N、P、K 3 个因素对小豆百粒重的影响均表现出直线向上, 这表明单株荚数是决定小豆产量的主要因素, N、K 含量的变化对小豆产量的影响更大。虽然合理增施肥料能够起到显著增产作用, 但随着施肥量的加大, 会导致前期营养体生长过旺, 营养生长期较长, 光合产物不能足量地转运到籽粒, 导致产量降低^[14]。而小豆作为能够进行根瘤固氮的作物, N 的施用量过多会对根瘤菌的固氮效率造成影响, 两者之间的关系还需进一步研究。

在本试验中, 综合对各方程的分析, 通过调整 N、P、K 的施用量为 N:P₂O₅:K₂O = 1:0.55:0.98 (N:76.6 kg/hm²) 时, 小豆产量达到最高值 ($y_{\text{Imax}} = 2096.7$ kg/hm²)。在实际生产中除了以高产为目标外, 同时要调整施肥量以达到最佳经济效益。当小豆产量获得最大经济效益 12432.73 元/hm² 时, N:P₂O₅:K₂O = 1:0.53:0.86 (N:64.3 kg/hm²)。

综上所述, 调整 N、P、K 施肥量的配比能够显著提高小豆产量, 试验范围内随 N、P、K 施肥量增加小豆产量表现出先升高后降低, 百粒重表现出一直增加; 随 N、K 施用量的增加, 小豆单株荚数表现为先增长后下降, 随 P 施用量的增加而增加; 而小豆单荚粒数是由品种本身特性决定的。当 N:P₂O₅:K₂O = 1:0.55:0.98 (N:76.6 kg/hm²) 时, 产量达到最大 (2096.7 kg/hm²); 当 N:P₂O₅:K₂O = 1:0.53:0.86 (N:64.3 kg/hm²) 时, 经济效益最佳 (12432.73 元)。

参考文献:

- [1] 龙静宜. 食用豆类作物 [M]. 北京: 科学出版社, 1989. 160.
- [2] 郑卓杰. 中国食用豆类学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1997. 173.
- [3] 林汝法, 柴岩, 廖琴. 中国小杂粮 [M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2002. 210-227.
- [4] 郝曦煜, 尹凤祥, 梁杰, 等. 小豆新品种白红 12 号 [J]. 中国种业, 2016, (7): 77-78.
- [5] 项洪涛, 冯延江, 郑殿峰, 等. 中国红小豆栽培和生理研究现状及展望 [J]. 中国农学通报, 2018, 34 (21): 23-28.
- [6] 王乐政, 华方静, 曹鹏鹏, 等. 夏播红小豆氮磷钾配施效应及推荐施肥量研究 [J]. 山东农业科学, 2018, 50 (11): 91-96.
- [7] 曾玲玲, 季生栋, 王成, 等. 氮、磷、钾配施对红小豆产量的效应研究 [J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2017, 29 (1): 6-10.
- [8] 章淑艳, 李彩菊, 王素花, 等. 不同施肥水平对红小豆生长发育及养分利用率的影响 [J]. 河北农业大学学报, 2016, 39 (4): 12-17.
- [9] 连慧达, 裴红宾, 张永清, 等. 施磷量对不同品种红小豆形态和生理特性的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21 (3): 792-799.
- [10] 李停, 贾永义, 刘士力, 等. 二次正交旋转组合设计优化人工诱导翘嘴鲌雌核发育 [J]. 中国水产科学, 2016, 23 (1): 77-89.
- [11] 赵婷婷, 冯光明, 刘树欣. 红小豆氮磷钾积累与分配规律的研究 [J]. 河北农业大学学报, 2000, (3): 16-19.

- [12] 陈剑, 敖雪, 姚兴东, 等. 施氮肥对不同株型赤豆品种光合生理、干物积累及产量的影响 [J]. 江苏农业科学, 2018, 46 (23): 90-93.
- [13] 韩彦龙, 李晓平, 李洁, 等. 干旱区红小豆施肥效应研究 [J]. 河南农业科学, 2016, 45 (5): 56-60.
- [14] 何萍, 金继运, 林葆, 等. 不同氮磷钾用量下春玉米生物产量及其组分动态与养分吸收模式研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4 (2): 123-130.

Study on model of nitrogen, phosphorus and potassium fertilization to optimize the yield and yield traits of adzuki bean

XIAO Huan-yu, HAO Xi-yu, LIANG Jie*, WANG Ying-jie, GUO Wen-yun (Baicheng Academy of Agricultural Sciences, Baicheng Jilin 137000)

Abstract: The main producing area of adzuki bean is in northeast and north of China. The low yield of adzuki bean is caused by unbalance nitrogen, phosphorus and potassium fertilization. In order to explore the needs and the best fertilization of the three elements, quadratic orthogonal regressive rotation design of three factors was applied to study the effects of fertilizers on the yield. The results showed that the yield was increased by adjusting proportioning and dosage of fertilizers, when $N : P_2O_5 : K_2O = 1 : 0.55 : 0.98$ ($N: 76.6 \text{ kg/hm}^2$), the maximum yield was $2\ 096.7 \text{ kg/hm}^2$; when $N : P_2O_5 : K_2O = 1 : 0.53 : 0.86$ ($N: 64.3 \text{ kg/hm}^2$), the best economic benefit was $12\ 432.73 \text{ yuan/hm}^2$. The interaction effect of the three elements on the yield showed that it increased to the peak gradually then decreased gradually by increasing N and P or P and K fertilization, and it increased gradually then decreased rapidly by increasing P and K fertilization. Pods per plant of adzuki bean rose then fell with increasing N or K fertilization, and it kept on increasing with P fertilization increased in the range of the experiment. The three elements had little effect on seeds of per pod of adzuki bean, which proved that was self-determined by the cultivar. 100-seed weight increased with increasing the N, P and K fertilization.

Key words: adzuki bean; yield; yield traits; fertilization; nitrogen, phosphorus and potassium; model