

华南春大豆氮磷钾肥配施效应及用量研究

陈怀珠,杨守臻,唐向民,孙祖东,曾维英,蔡昭艳,赖振光

(广西农业科学院 经济作物研究所,广西 南宁 530007)

摘要:为探明华南春大豆生产的适宜施肥量,采用“3414”肥效试验设计,选用桂春豆 106 开展了氮磷钾肥配施效应和推荐施肥量研究。结果表明:氮、磷、钾肥料配施可明显提高华南春大豆产量,各肥料因素对大豆产量的增产效应依次为磷>氮>钾,氮、磷、钾三因素之间存在互作效应,效应大小依次为氮磷>磷钾>氮钾;经模型最优分析表明采用三元肥效函数模型做出施肥决策是合理可行的,经回归模型的拟合得出推荐施肥量,达到最高产量时氮(N)、磷(P₂O₅)和钾(K₂O)的施肥量分别为 80.6、21.6 和 58.4 kg·hm⁻²,达到最佳经济产量时氮(N)、磷(P₂O₅)、钾(K₂O)的施肥量分别为 75.5、21.3 和 54.1 kg·hm⁻²。这些研究结果将为华南地区春大豆合理施肥提供指导,为下一步建立施肥指标体系提供依据。

关键词:春大豆;“3414”肥效试验;肥效模型;产量;施肥量

中图分类号:S565.1 **文献标识码:**A **DOI:**10.11861/j.issn.1000-9841.2018.01.0117

Study on the Effects and Amounts of Combined Application of Nitrogen, Phosphorus and Potassium Fertilizers for Spring Soybean in Southern China

CHEN Huai-zhu, YANG Shou-zhen, TANG Xiang-min, SUN Zu-dong, ZENG Wei-ying, CAI Zhao-yan, LAI Zhen-guang

(Cash Crops Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China)

Abstract: To find out the appropriate amount of fertilizer for spring soybean production in South China, we carried out the study on the effects of combined application of N, P and K fertilizers and recommended fertilizers amount according to the ‘3414’ fertilizer experiment design using Guichundou 106 as material. The results showed that: (1) Nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers could significantly increase the yield of spring soybean in South China. The yield increasing effect was P>N>K. Interaction effect also existed between nitrogen, phosphorus and potassium. The interaction effect of these three fertilizers on soybean yield was NP>PK>NK. (2) The model optimal analysis showed that it is reasonable and feasible to make the fertilization decision by using the three element fertilizer function model. The recommended fertilization amount was obtained through the regression model. The maximum soybean yield could be reached when N, P₂O₅ and K₂O were applied with 80.6, 21.6 and 58.4 kg·hm⁻² respectively. The optimum economic yield could be achieved when N, P₂O₅ and K₂O were applied with 75.5, 21.3, 54.1 kg·hm⁻² respectively. These results provide guidance for the rational fertilization of spring soybean in South China, and provide the basis for the establishment of fertilization index system in the future.

Keywords: Spring soybean; “3414”fertilizer experiment; Fertilizer model; Yield; Fertilization

大豆原产于中国,是主要的油料作物之一,其种植面积占油料作物总面积的 60% 以上。施肥作为影响大豆产量和效益的关键因素之一,长期受到关注,20 世纪 20 年代,东北开始进行大豆三要素试验,20 世纪 50 年代以来,全国大豆产区相继对氮磷钾肥单用及配施对大豆物质积累、产量及品质影响方面开展了大量研究^[1-12],对大豆生产具有一定的指导意义。华南是我国多作大豆区,地处热带和亚热带,地域辽阔,光、热、水条件优越,无霜期长,≥10℃活动积温7 500~9 000℃,该区域南部一年四季均可种植大豆,其它地区可种植春、夏、秋大豆^[13]。但华南地区大豆栽培粗放,栽培技术落后于

我国北方、黄淮海流域大豆产区,大豆栽培凭经验施肥,施肥不当现象普遍,大豆品种的生产潜力难以发挥,因此,通过合理施肥来提高产量对该地区大豆生产十分重要。目前,华南地区关于大豆施肥方面的系统研究比较少,徐昌等^[14]研究了氮肥和有机肥对广西大豆的增产效应,何子平等^[15]研究了春大豆在广西红壤上的生长表现及氮、磷、钾营养特性,对于氮磷钾肥适宜施用量的相关研究鲜见报道。在美国,一般根据“3414”试验建立肥料效应方程求得大豆施肥量,在我国北方大豆产区,孙景玲^[10]、王志刚^[11]和崔文华等^[12]均通过“3414”试验的肥料效应方程分别研究出符合黑龙江、吉林和呼

收稿日期:2017-08-11
基金项目:广西科技攻关计划(桂科攻 1598006-5-2);广西重点研发计划(桂科 AB16380041)。
第一作者简介:陈怀珠(1967-),女,研究员,主要从事大豆遗传育种和栽培研究。E-mail: chhuaizhu@sina.com。

伦贝尔盟岭东地区大豆生产情况的施肥量,建立了本地区配方施肥指标体系。“3414”试验方案吸收了回归最优设计处理少、效率高的优点,又符合肥料试验和施肥决策的专业要求,在国内外应用广泛。本试验采用“3414”试验设计,研究氮磷钾配施对华南春大豆主要农艺性状和产量的影响,构建施肥模型,探索氮磷钾肥适宜施用量,为本地区肥料的合理施用提供指导,为下一步建立施肥指标体系提供依据。

表 1 供试田块耕层土壤基本化学性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of top soils of the fields in the experiment

年份 Year	pH	有机质 Organic matter /(g·kg ⁻¹)	水解氮 Hydrolysable N /(mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available P /(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K /(mg·kg ⁻¹)
2015	5.6	13.9	83.0	18.0	128.0
2016	5.7	12.5	82.0	16.5	130.0

1.2 材料

大豆品种为桂春豆 106,该品种 2015 年通过广西农作物品种审定委员会审定。氮肥为尿素(广西河池化工股份有限公司,N≥46.4%),磷肥为过磷酸钙(云南云天化国际化工股份有限公司,P₂O₅≥44%),钾肥为氯化钾(中化中资公司,K₂O≥60%)。

1.3 试验设计

采用农业部《测土配方施肥技术规范》推荐的

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验于 2015 ~ 2016 年在广西农业科学院武鸣里建科研基地进行。试验区的年降雨量为1 200 ~ 1 400 mm,无霜期 294 ~ 365 d,年平均气温 21℃。试验地土壤为红壤,供试田块耕层为 0 ~ 20 cm,基本理化性质见表 1。

“3414”施肥试验方案,设氮、磷、钾 3 个因素,4 个水平(0 ~ 3),0 水平为不施肥处理,2 水平为当地习惯施肥量,1 水平为 2 水平施肥量减半(减量施肥水平),3 水平为 2 水平施肥量的 1.5 倍(过量施肥水平),共 14 个试验处理。试验小区面积 20 m²,每小区 20 行,行长 2.5 m,随机区组排列,3 次重复。试验方案及肥料用量见表 2。

表 2 “3414”试验方案

Table 2 “3414” experimental program

/(kg·hm⁻²)

编号 No.	处理 Treatment	施肥量 Application amount		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O
1	N ₀ P ₀ K ₀	0	0	0
2	N ₀ P ₂ K ₂	0	18.8	46.9
3	N ₁ P ₂ K ₂	37.5	18.8	46.9
4	N ₂ P ₀ K ₂	75.0	0	46.9
5	N ₂ P ₁ K ₂	75.0	9.4	46.9
6	N ₂ P ₂ K ₂	75.0	18.8	46.9
7	N ₂ P ₃ K ₂	75.0	28.1	46.9
8	N ₂ P ₂ K ₀	75.0	18.8	0
9	N ₂ P ₂ K ₁	75.0	18.8	23.4
10	N ₂ P ₂ K ₃	75.0	18.8	70.3
11	N ₃ P ₂ K ₂	112.5	18.8	46.9
12	N ₂ P ₁ K ₁	75.0	9.4	23.4
13	N ₁ P ₂ K ₁	37.5	18.8	23.4
14	N ₁ P ₁ K ₂	37.5	9.4	46.9

2015 年 3 月 12 日播种,6 月 26 日成熟收获;2016 年 3 月 15 日播种,7 月 1 日成熟收获。2 年均采用等距点播,行距 0.4 m,穴距 0.17 m,每穴 2 株,

种植密度为 29.4 万株·hm⁻²;每小区按试验设计进行施肥,其中,磷、钾肥全部作基施,氮肥 40% 作基施,60% 在大豆开花期结合中耕培土作追肥。试验

其它田间管理按常规进行。

大豆成熟收获期,每小区选小区中间行连续取 15 株单株室内考种,分别测定株高、分枝数、单株有效荚数、单株粒数、单株粒重、百粒重;每小区去除边行边株实收 12 m² 计算产量。

1.4 土壤养分评定

选取表 2 中的不施肥处理(处理 1,N₀P₀K₀)、缺氮处理(处理 2,N₀P₂K₂)、缺磷处理(处理 4,N₂P₀K₂)、缺钾处理(处理 8,N₂P₂K₀)和全肥处理(习惯施肥,处理 6,N₂P₂K₂)的施肥量及产量数据进行分析,以土壤养分丰缺指标^[16]为土壤养分评定标准:以相对产量(缺素区平均产量与全肥区平均产量的比值)在 50% 以下的土壤为“极缺”,50% ~ 70% 为“缺乏”,70% ~ 90% 为“中等”,>90% 为“丰富”。

1.5 数据分析

试验数据采用 Excel 2010 进行统计分析。通过三元二次、二元二次和一元二次函数方程进行产量和施肥量拟合,根据拟合结果选取合适的方程计算相关施肥量。

2 结果与分析

2.1 试验区土壤基础肥力

从供试土壤肥力(表 1)看,供试土壤属中等肥

力水平。供试区土壤养分分析显示:空白对照区(不施肥处理)大豆产量为2 416.3 kg·hm⁻²,全肥施肥区产量为3 281.5 kg·hm⁻²,空白对照区产量为全肥施肥区产量的 73.6%,表明试验区土壤基础肥力中等;氮、磷、钾缺乏区的大豆产量分别为2 631.6、2 587.9 和 2 830.4 kg·hm⁻²,分别是全肥施肥区(N₂P₂K₂)产量(3 281.5 kg·hm⁻²)的 80.2%、78.9% 和 86.3%,表明试验区土壤供氮、磷、钾水平均属中等,供钾水平>供氮水平>供磷水平。

2.2 施肥处理对大豆主要农艺性状、产量和经济效益的影响

2.2.1 施肥处理对大豆主要农艺性状的影响 不同处理大豆主要农艺性状见表 3。从表 3 可以看出,施肥处理的大豆株高、有效分枝、单株荚数、单株粒数、单株产量均比不施肥处理(N₀P₀K₀)有所增加。施肥处理的大豆株高为 47.1 ~ 51.7 cm,分别比不施肥处理增加 0.1 ~ 4.7 cm;有效分枝为 1.6 ~ 2.0 个,分别比不施肥处理增加 0.1 ~ 0.5 个;单株荚数为 29.0 ~ 30.1 荚,分别比不施肥处理增加 0.5 ~ 1.6 荚;单株粒数为 63.1 ~ 66.3 粒,分别比不施肥处理增加 0.4 ~ 3.6 粒;单株粒重为 9.0 ~ 11.0 g,分别比不施肥处理增加 0.8 ~ 2.8 g。可见,施肥能促使大豆植株变高,分枝变多,单株荚数、粒数、粒重提高。

表 3 不同处理大豆农艺性状对比

Table 3 Comparison of soybean agronomic traits in treatments

编号	处理	株高	有效分枝	单株荚数	单株粒数	单株粒重
No.	Treatment	Plant height /cm	Effective branch	Pods per plant	Seeds per plant	Yield per plant/g
1	N ₀ P ₀ K ₀	47.0 eD	1.5 eE	28.5 gF	62.7 eF	8.2 dC
2	N ₀ P ₂ K ₂	47.1 eD	1.6 eE	29.0 fEF	63.1 deDEF	9.0 cdBC
3	N ₁ P ₂ K ₂	47.5 eD	1.7 edD	29.4 deCDE	63.6 cdBCDE	9.8 bcAB
4	N ₂ P ₀ K ₂	47.8 eCD	1.8 cCD	29.2 efDE	63.6 cdBCDE	9.5 bcBC
5	N ₂ P ₁ K ₂	47.8 eCD	1.8 cCD	29.6 cdeBCD	63.2 deDEF	9.6 bcBC
6	N ₂ P ₂ K ₂	49.8 cB	1.9 bcAB	29.8 bcdBCD	63.1 deDEF	9.8 bcAB
7	N ₂ P ₃ K ₂	49.8 cB	1.8 cCD	30.1 bAB	63.0 fdeE	9.4 bcBC
8	N ₂ P ₂ K ₀	48.7 dC	1.8 cCD	30.0 bABC	63.3 deDEF	10.0 bcAB
9	N ₂ P ₂ K ₁	51.0 bA	2.0 aA	30.5 aA	66.3 aA	11.0 aA
10	N ₂ P ₂ K ₃	49.9 cB	1.9 abAB	29.9 bcBC	63.9 bcBCD	9.9 abcAB
11	N ₃ P ₂ K ₂	51.7 aA	1.8 cCD	29.3 efDE	63.6 cdBCDE	9.4 bcBC
12	N ₂ P ₁ K ₁	47.3 eD	1.8 cCD	29.8 bcdBCD	64.3 bB	9.9 abcAB
13	N ₁ P ₂ K ₁	47.7 eD	1.7 edD	30.0 bcABC	64.1 bcBC	10.1 abAB
14	N ₁ P ₁ K ₂	47.3 eD	1.8 cCD	29.3 efDE	63.4 dcDEF	9.6 bcBC

不同大小写字母分别表示不同处理间在 0.01 和 0.05 水平差异显著。下同。
Different capital and lowercase indicate significant differences between different treatments at 0.01 and 0.05 level, respectively. The same below.

2.2.2 施肥处理对大豆产量和经济效益的影响

不同处理大豆两年平均产量列于表4。从表4可以看出,各施肥处理大豆产量均高于不施肥处理($N_0P_0K_0$),施肥增产率为7.1%~35.8%。处理3、5~14增产明显,增产效果达极显著水平,其中,处

理6($N_2P_2K_2$)增产率最大,达到了35.8%,产量达到3 281.5 $kg\cdot hm^{-2}$,其次为处理10($N_2P_1K_2$),增产率为33.3%,产量达到3 220.9 $kg\cdot hm^{-2}$;施肥处理中增产不显著的是处理2和4,这两个处理分别是不施氮处理和不施磷处理。

表4 不同处理大豆产量、收益对比

Table 4 Comparison of soybean yield and profit in treatments

编号	处理	平均产量	增产量	增产率	化肥总花费	大豆总收益	相对净收益
No.	Treatment	Average yield /($kg\cdot hm^{-2}$)	Yield increment /($kg\cdot hm^{-2}$)	Yield increment rate/%	Total fertilizer cost /($yuan\cdot hm^{-2}$)	Total income of soybean /($yuan\cdot hm^{-2}$)	Net income /($yuan\cdot hm^{-2}$)
1	$N_0P_0K_0$	2416.3 eE	—	—	—	16914.4	16914.4
2	$N_0P_2K_2$	2631.6 deCDE	215.2	8.9	417.2	18421.2	18004.0
3	$N_1P_2K_2$	3109.5 abcAB	693.2	28.7	634.7	21766.5	21131.8
4	$N_2P_0K_2$	2587.9 deDE	171.6	7.1	683.4	18115.4	17432.0
5	$N_2P_1K_2$	3162.0 abAB	745.6	30.9	767.8	22133.9	21366.1
6	$N_2P_2K_2$	3281.5 aA	865.2	35.8	852.2	22970.8	22118.6
7	$N_2P_3K_2$	3182.7 abAB	766.4	31.7	936.6	22279.0	21342.5
8	$N_2P_2K_0$	2830.4 cdBCD	414.0	17.1	603.8	19812.6	19208.8
9	$N_2P_2K_1$	3107.7 abcAB	691.3	28.6	727.8	21753.9	21026.1
10	$N_2P_2K_3$	3220.9 abAB	804.6	33.3	976.4	22546.3	21569.9
11	$N_3P_2K_2$	3071.4 abcAB	655.0	27.1	1069.7	21499.7	20430.0
12	$N_2P_1K_1$	2972.6 bcABC	556.2	23.0	643.4	20808.0	20164.6
13	$N_1P_2K_1$	3016.9 abcAB	600.6	24.9	510.3	21118.3	20608.0
14	$N_1P_1K_2$	3011.7 abcAB	595.3	24.6	550.3	21081.8	20531.5

试验期间近3年市场销售均价,大豆为7.0元· kg^{-1} ,氮肥(N)、磷肥(P_2O_5)和钾肥(K_2O)分别为5.8、9.0和5.3元· kg^{-1} ,按市场价计算种豆经济效益,其中,相对净收益为总收益减去肥料总花费(由于各处理的田间耕作管理成本一致,故不计入)。施肥处理的平均相对净收益为17 432.0~22 118.6元· hm^{-2} ,分别比不施肥处理增加517.6~5 204.2元· hm^{-2} ,各施肥处理相对净收益均高于不施肥处理($N_0P_0K_0$)(表4)。结果表明氮磷钾配施能不同程度的增加大豆产量,提高种豆经济效益。

2.3 肥效函数模型的建立与分析

2.3.1 三元二次肥效模型 本试验产量的方差分析表明施肥有不同程度的增产效果,以氮、磷、钾的施肥量为自变量,大豆产量为因变量,对试验14个处理的施肥量及产量进行拟合,建立氮磷钾肥对大豆产量的三元肥效函数方程:

$$Y = -0.1197X_1^2 - 1.6316X_2^2 - 0.1538X_3^2 + 8.4150X_1 + 31.9008X_2 + 6.6219X_3 + 0.3004X_1X_2$$

$$+ 0.0753X_1X_3 + 0.2442X_2X_3 + 2411.183 \quad (1)$$

式中, Y 代表大豆产量, X_1 、 X_2 、 X_3 分别代表 N 、 P_2O_5 、 K_2O 施用量(下同)。

对方程进行显著性检验, $F_{NPK} = 39.5816 > F_{0.05} = 0.0015$, $R^2_{NPK} = 0.9889$,产量与施肥量之间有显著的回归关系,方程二次项系数均为负,一次项系数均为正,符合肥料报酬递减律,方程拟合成功。

由方程(1)可知,氮磷钾肥配施对大豆的产量效应有主效应亦有互作效应,氮肥、磷肥、钾肥的主效应系数分别为8.4150、31.9008、6.6219,氮肥与磷肥、氮肥与钾肥、磷肥与钾肥的交互效应系数分别为0.3004、0.0753、0.2442,主效应和互作效应均表现为正效应,且主效应系数均大于互作效应系数,说明主效应作用明显,效应大小:磷肥主效应>氮肥主效应>钾肥主效应,氮磷互作效应>磷钾互作效应>氮钾互作效应。

求解该方程各阶顺序主子行列式,获得 $|A1| = -0.2394$, $|A2| = 0.6910$, $|A3| = -0.2091$,奇数

级主子式小于零,偶数级主子式大于零,矩阵 A 为负定,方程(1)有极大值,回归方程为典型函数,可采用边际分析方法进行寻优做出施肥推荐^[17]。

当肥料的边际产量等于零时,获得大豆最高产量及对应最高施肥量,最高产量为3 290.9 kg·hm⁻²,最高施肥量为氮肥(N)80.6 kg·hm⁻²,磷肥(P₂O₅)21.6 kg·hm⁻²,钾肥(K₂O)58.4 kg·hm⁻²。

当边际收益等于边际成本时,肥料的边际利润为零,获得最佳经济产量及对应最佳经济施肥量,最佳经济产量为3 287.2 kg·hm⁻²,最佳经济施肥量为氮肥(N)75.5 kg·hm⁻²,磷肥(P₂O₅)21.3 kg·hm⁻²,钾肥(K₂O)54.1 kg·hm⁻²。

2.3.2 一元二次肥效模型 王圣瑞等^[18]研究指出,“3414”设计方案不仅可以作为一个完整的三因素试验用于建立三元二次肥料效应回归方程,而且还可以作为三个二因素或三个单因素试验建立二元或一元肥料效应回归方程,为施肥决策提供更多的信息量;“3414”试验设计中,一般将第2水平作为可能的最佳用量,研究单因素的肥料效应时不应该受到其它因素因不足或过量而造成的影响(对于N、P、K而言,轻微的过量一般不会造成大的影响)。在进行一元肥料效应函数拟合分析时,选取处理2、3、6和11(P、K均为2水平)进行氮肥拟合,处理4、5、6和7(N、K均为2水平)进行磷肥拟合,处理8、9、6和10(N、P均为2水平)进行钾肥拟合,分别得到氮、磷、钾对大豆产量的一元二次肥效函数方程:

$$Y = -0.1223X_1^2 + 17.7373X_1 + 2627.7832 \quad (2)$$

$$Y = -1.9149X_2^2 + 74.1374X_2 + 2599.5029 \quad (3)$$

$$Y = -0.1539X_3^2 + 16.5611X_3 + 2823.9403 \quad (4)$$

对肥效函数方程(2)、(3)、(4)进行分析,得知 $F_N = 395.4064 > F_{0.05} = 0.0355, R_N^2 = 0.9987, F_P = 54.3493 > F_{0.05} = 0.0955, R_P^2 = 0.9909, F_K = 70.7476 > F_{0.05} = 0.0838, R_K^2 = 0.9930$,大豆产量与氮、磷、钾均有显著的回归关系,方程二次项系数均为负,一次项系数均为正,符合肥料报酬递减律,方程拟合成功,为典型效应函数。

根据不同氮、磷、钾施肥量及相应产量数据制作散点图(图1~3)。从这3个图可以看出,大豆产量与氮、磷、钾施肥量之间均呈开口向下的抛物线曲线关系,求函数曲线上任意一点增(减)产的瞬时速率,结果如表5所示。

从曲线图和表5可看出,大豆产量均随着氮、磷、钾肥料施入量的增加而增加,达到最大产量后随着施肥量的继续增加而减少,呈现先升后降的趋势;氮、磷、钾3种肥料对大豆的增产瞬时速率均随

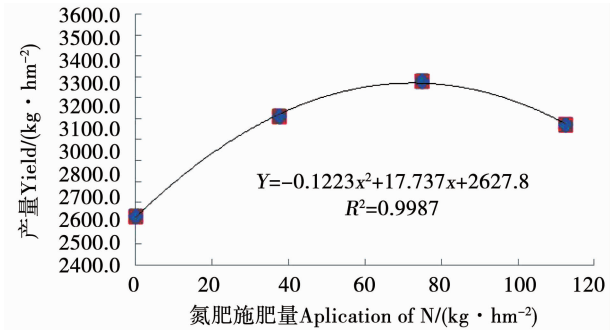


图1 氮肥增产效应

Fig.1 Effect of N fertilizer on yield increase

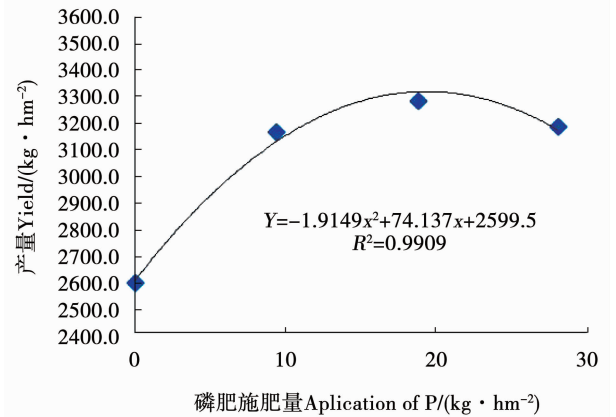


图2 磷肥增产效应

Fig.2 Effect of P fertilizer on yield increase

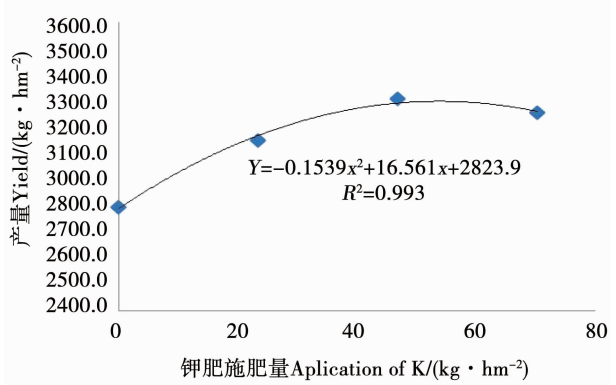


图3 钾肥增产效应

Fig.3 Effect of K fertilizer on yield increase

着施肥量的增加逐渐下降,表现为:0水平时最高,1水平时次之,施肥量超过极大值后增产瞬时速率为负值(如氮肥超过极大值72.5 kg·hm⁻²后,磷肥超过极大值19.4 kg·hm⁻²后,钾肥超过极大值53.8 kg·hm⁻²后),可见,氮磷钾肥适量施用可以增加大豆产量,过量施用反而降低产量,这可能与过多施肥造成了茎叶徒长有关。从增产瞬时速率可以看出,过量施肥后产量的下降以磷肥(P₂O₅)最快,氮肥(N)次之,钾肥(K₂O)较慢。

对回归方程(2)、(3)、(4)采用边际分析方法进行计算,获得氮磷钾肥单独施用(另外两种肥料适量施用,取 2 水平)的最高施肥量和最佳经济施肥量:

氮肥(N)施用量为 72.5 kg·hm⁻²时达到预期最高产量,为3 270.9 kg·hm⁻²;施用量为 71.3 kg·hm⁻²时达到预期最佳经济产量,为3 270.7 kg·hm⁻²。

磷肥(P₂O₅)施用量为 19.4 kg·hm⁻²时达到预期最高产量,为3 317.1 kg·hm⁻²;施用量为 18.6 kg·hm⁻²时达到预期最佳经济产量,为 3 316.0 kg·hm⁻²。

钾肥(K₂O)施用量为 53.8 kg·hm⁻²时达到预期最高产量,为3 270.9 kg·hm⁻²;施用量为 52.5 kg·hm⁻²时达到预期最佳经济产量,为3 270.7 kg·hm⁻²。

表 5 氮、磷、钾肥单因素效应模型理论产量变异与增(减)产瞬时速率
Table 5 Theoretical yield variation and increase (decrease) yield momentary rate
for single factor effect model of N, P, K

因子 Factor		水平 Levels				极大值 Maximal value
		0	1	2	3	
N	施肥量 Fertilizer amount	0	37.5	75.0	112.5	72.5
	理论产量 Theoretical yield	2627.8	3120.9	3270.1	3157.6	3270.9
	瞬时速率 Momentary rate	17.7	8.6	-0.6	-9.8	
P ₂ O ₅	施肥量 Fertilizer amount	0	9.4	18.8	28.1	19.4
	理论产量 Theoretical yield	2599.5	3127.2	3316.5	3170.7	3317.1
	瞬时速率 Momentary rate	74.1	40.1	6.0	-28.1	
K ₂ O	施肥量 Fertilizer amount	0	23.4	46.9	70.3	53.8
	理论产量 Theoretical yield	2823.9	3127.2	3239.0	3227.6	3269.5
	瞬时速率 Momentary rate	16.6	9.4	2.2	-5.0	

2.3.3 二元二次肥效模型 在进行氮磷钾肥对大豆产量的二元肥料效应函数拟合分析时,通过处理 4~10 和 12(N 固定在 2 水平),进行氮肥适量基础上的磷钾肥效拟合,通过处理 2、3、6、8~11 和 13(P 固定在 2 水平),进行磷肥适量基础上的氮钾肥效拟合,通过处理 2、3、4、5、6、7、11 和 14(K 固定在 2 水平),进行钾肥适量基础上的氮磷肥效拟合,可分别建立磷钾、氮钾、氮磷对大豆产量的二元肥料效应函数方程:

$$Y = -1.7897X_2^2 - 0.1789X_3^2 + 68.9507X_2 + 18.0772X_3 + 0.0255X_2X_3 + 2151.9579 \quad (5)$$

$$Y = -0.1991X_1^2 - 0.1524X_3^2 + 15.2775X_1 + 13.1562X_3 + 0.0438X_1X_3 + 2348.6959 \quad (6)$$

$$Y = -0.1313X_1^2 - 1.8182X_2^2 + 2.6713X_1 + 6.3925X_2 + 0.8621X_1X_2 + 3142.6689 \quad (7)$$

对方程(5)、(6)、(7)进行分析,得知 $F_{PK} = 24.4932 > F_{0.05} = 0.0397$ 、 $R_{PK}^2 = 0.9839$, $F_{NK} = 144.6969 > F_{0.05} = 0.0069$ 、 $R_{NK}^2 = 0.9972$, $F_{NP} = 38.3027 > F_{0.05} = 0.0256$ 、 $R_{NP}^2 = 0.9897$,大豆产量与磷钾施肥量之间、氮钾施肥量之间、氮磷施肥量之间均有显著的回归关系,其偏回归系数均达到显著水平,说明磷钾、氮钾、氮磷交互效应对大豆产量产生显著影响;这 3 个方程二次项系数均为负,一次

项系数均为正,符合肥料报酬递减律,方程拟合成功;方程奇数级主子式均小于零,偶数级主子式均大于零,回归方程为典型函数,方程均有极大值,对方程求导,获得最高施肥量及大豆最高产量,将最高施肥量和各施肥水平(0~3)大豆理论产量列于表 6。

从表 6 可看出,磷钾交互效应,在氮肥适量基础上,大豆产量随着磷、钾肥施用量的增加而增加,在 2 水平和 3 水平之间,当磷肥(P₂O₅)为 19.6 kg·hm⁻²,钾肥(K₂O)为 51.9 kg·hm⁻²时,大豆达到最大产量 3 482.6 kg·hm⁻²,随后随着施肥量的继续增加大豆产量反而减少,呈现出先升后降的趋势。氮钾交互效应、氮磷交互效应亦表现出与磷钾交互效应相似的趋势;前者,在磷肥适量基础上,施氮肥(N)为 0~74.0 kg·hm⁻²,钾肥(K₂O)为 0~53.8kg·hm⁻²过程中,大豆产量随着施肥量的增加而增加,达到最大产量3 268.1 kg·hm⁻²,随后随着施肥量的继续增加而减少;后者,在钾肥适量基础上,施氮肥(N)为 0~71.9 kg·hm⁻²,磷肥(P₂O₅)为 0~18.8 kg·hm⁻²过程中,大豆产量随着施肥量的增加而增加,达到最大产量3 298.8 kg·hm⁻²,随后随着施肥量的继续增加而减少。

表 6 肥料两因素施肥量及大豆理论产量

Table 6 Two factors fertilizer amount and theoretical soybean yield

(kg·hm⁻²)

	因子 Factor	水平 Levels				极大值 Maximal value
		0	1	2	3	
PK	施肥量(P ₂ O ₅ ,K ₂ O)	(0,0)	(9.4,23.4)	(18.8,46.9)	(28.1,70.3)	(19.6,51.9)
	Fertilizer amount(P ₂ O ₅ ,K ₂ O)					
	大豆理论产量	2336.4	3157.1	3477.0	3297.9	3482.6
	Theoretical soybean yield					
NK	施肥量(N,K ₂ O)	(0,0)	(37.5,23.4)	(75,46.9)	(112.5,70.3)	(74.0,53.8)
	Fertilizer amount(N,K ₂ O)					
	大豆理论产量	2348.7	3017.0	3260.4	3078.2	3268.1
	Theoretical soybean yield					
NP	施肥量(N,P ₂ O ₅)	(0,0)	(37.5,9.4)	(75,18.8)	(112.5,28.1)	(71.9,18.8)
	Fertilizer amount(N,P ₂ O ₅)					
	大豆理论产量	3142.7	3235.5	3297.6	3250.7	3298.8
	Theoretical soybean yield					

以边际收益等于边际成本原则计算二元肥料效应函数最佳经济施肥量:

方程(5):最佳经济施肥量磷肥(P₂O₅)为19.4 kg·hm⁻²,钾肥(K₂O)为48.2 kg·hm⁻²,预期最佳经济产量可达3 480.1 kg·hm⁻²。

方程(6):最佳经济施肥量氮肥(N)为68.0 kg·hm⁻²,钾肥(K₂O)为48.6 kg·hm⁻²,预期最佳经济产量可达3 261.0 kg·hm⁻²。

方程(7):最佳经济施肥量氮肥(N)为47.9 kg·hm⁻²,磷肥(P₂O₅)为12.9 kg·hm⁻²,预期最佳经济产量可达3 282.0 kg·hm⁻²。

2.3.4 模型最优分析 由上述回归模型分析可知,以上建立的3类7种函数模型均能表达本试验施肥与产量的回归关系,各模型均符合肥料报酬递减律,为典型效应函数,有极大值,各模型得出的推荐施肥量见表7。

表 7 各类肥料效应模型推荐的施肥量和产量

Table 7 Fertilizer amount and yield of various fertilizer function models

(kg·hm⁻²)

函数类型 Function type	最高 Maximum				最经济 Economic			
	施肥量 Fertilizer amounts			产量 Yield	施肥量 Fertilizer amounts			产量 Yield
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
(1)NPK	80.6	21.6	58.4	3290.9	75.5	21.3	54.1	3287.2
(2)N	72.5	18.8	46.9	3270.9	71.3	18.8	46.9	3270.7
(3)P	75.0	19.4	46.9	3317.1	75.0	18.6	46.9	3316.0
(4)K	75.0	18.8	53.8	3270.9	75.0	18.8	52.5	3269.2
(5)PK	75.0	19.6	51.9	3482.6	75.0	19.4	48.2	3480.1
(6)NK	74.0	18.8	53.8	3268.1	68.0	18.8	48.6	3261.0
(7)NP	71.9	18.8	46.9	3298.8	47.9	12.9	46.9	3282.0

单因素模型中另二因素均取2水平,两因素模型中另一因素取2水平。

Another factor in the single factor model and two factors model was taken as the level 2.

由表7可看出,在3类模型中,一元肥效函数模型和二元肥效函数模型推荐的最高施肥量和最佳经济施肥量均低于三元肥效函数模型。究其原因,一元肥效函数模型、二元肥效函数模型分别是设定第2水平为可能的最佳用量的基础上建立的,由表5和表6可知,2水平并不是施肥极大值,故而第2

水平并不是最佳用量,因此,另二因素和另一因素取2水平的基础上建立的一元肥效函数模型和二元肥效函数模型得出的施肥推荐或多或少存在偏差,在三元肥效拟合成功且为典型函数的情况下,采用三元肥效函数模型做出施肥决策应是合理可行的。在这一施肥决策下,最高产量施肥量:氮肥(N)为

80.6 kg·hm⁻², 磷肥 (P₂O₅) 为 21.6 kg·hm⁻², 钾肥 (K₂O) 为 58.4 kg·hm⁻²; 最佳经济产量施肥量: 氮肥 (N) 为 75.5 kg·hm⁻², 磷肥 (P₂O₅) 为 21.3 kg·hm⁻², 钾肥 (K₂O) 为 54.1 kg·hm⁻²。

3 结论与讨论

大豆的生长发育受遗传和环境因子协同作用, 不同地区使用不同品种研究大豆的施肥效应, 结论不一致。孙振宁等^[9]在黑龙江省鹤山研究得出, 氮磷钾肥对大豆产量的效应排序为氮肥 > 磷肥 > 钾肥, 氮肥是产量的极显著影响因素 (P = 0), 是影响大豆产量的主导因子, 磷肥在 0.10 水平上有显著影响 (P = 0.09), 钾肥则对产量无显著影响 (P = 0.48)。魏丹等^[19]的研究则表明, 平衡施肥对黑龙江省大庆、绥化、黑河地区大豆产量有极显著增产作用, OPT (由国际植物营养研究所北京办事处对土壤化验后, 采用土壤养分分级法与目标产量法相结合推荐施肥量) 比 CK (不施肥) 平均产量提高 10.7% ~ 25.5%, 缺钾对产量减产影响最大, 缺氮对产量不同地区影响不一致, 缺磷对产量减产效果影响较小。王政等^[20]在山东青岛的研究显示, 氮磷钾肥对大豆增产效应氮肥 > 钾肥 > 磷肥, 氮磷肥之间对大豆产量表现为正交互作用, 氮钾肥之间呈负交互作用, 而磷钾之间不存在交互作用。

本研究结果表明: 氮磷钾配施影响大豆株高、分枝、荚数、粒数和粒重, 不同程度增加大豆产量和种豆经济效益, 施肥处理比不施肥处理平均产量提高 7.1% ~ 35.8%, 平均相对净收益增加 517.6 ~ 5 204.2 元·hm⁻²; 氮磷钾肥三因素对大豆的效应有主效应亦有互作效应, 主效应大小为磷 > 氮 > 钾, 互作效应大小为氮磷 > 磷钾 > 氮钾; 单因素效应分析表明, 大豆产量均随着氮、磷、钾肥料施入量的增加而增加, 达到最大产量后随着施肥量的继续增加而减少, 呈现先升后降的趋势, 3 种肥料的增产速率在 0 水平时最高, 随着施肥量的增加增产速率均逐渐下降, 以磷肥 (P₂O₅) 增产速率下降最大, 氮肥 (N) 次之, 钾肥 (K₂O) 最小; 多因素互作效应分析表明, 氮磷交互效应、氮钾交互效应、磷钾交互效应大豆产量均随着氮磷、氮钾、磷钾肥料施入量的增加而增加, 达到最大产量后随着施肥量的继续增加而减少, 呈现先升后降的趋势。在氮磷钾主效应上, 本研究结果是磷肥对大豆产量的效应最大, 这与北方大豆产区氮肥最大、钾肥最大和黄淮海流域大豆产区氮肥最大的结果不一致^[9, 19-20], 这可能与华南地区土壤磷的供应满足程度低^[21], 磷是限制大豆生

长的主要养分因子有关。在互作效应方面, 本研究氮磷钾肥之间存在正互作, 氮磷、磷钾效应高过氮钾, 与王振等^[20]的研究结果有差异, 这可能与试验所处区域土壤基础肥力不同有关。

在本试验条件下, 分析各拟合方程的施肥量可知, 华南中等肥力地块上, 春大豆最高产量施肥量, 氮肥 (N) 为 80.6 kg·hm⁻², 磷肥 (P₂O₅) 为 21.6 kg·hm⁻², 钾肥 (K₂O) 为 58.4 kg·hm⁻², 施肥比例 N:P₂O₅:K₂O 为 3.7:1.0:2.7; 最佳经济产量施肥量, 氮肥 (N) 为 75.5 kg·hm⁻², 磷肥 (P₂O₅) 为 21.3 kg·hm⁻², 钾肥 (K₂O) 为 54.1 kg·hm⁻², 施肥比例 N:P₂O₅:K₂O 为 3.5:1.0:2.5。在实际生产中, 施肥量的多少因不同地力水平不同品种类型而不同, 鉴于本试验的地域土壤条件限制, 在以后的工作中还需针对不同区域、地力等条件进一步开展研究, 获得更加全面的氮磷钾肥施用参数和技术, 为生产提供服务。

参考文献

- [1] 何志华, 夏燕, 李清超, 等. 主成分分析在大豆“3414”最佳施肥配比试验中的应用[J]. 湖北农业科学, 2016, 55(17): 4447-4450. (He Z H, Xiao Y, Li Q C, et al. Application of principal component analysis in the experiment of “3414” best fertilization ratio in soybean[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2016, 55(17): 4447-4450.)
- [2] 李文龙, 李喜焕, 王瑞霞, 等. 河北省夏播早熟区不同施肥水平和种植密度对大豆产量及品质的影响[J]. 河南农业科学, 2015, 44(3): 40-44. (Li W L, Li X H, Wang R X, et al. Effects of different fertilizer levels and planting densities on yield and quality of soybean in early mature soybean region of Hebei[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2015, 44(3): 40-44.)
- [3] 朱宝国, 于忠和, 王囡囡, 等. 有机肥和化肥不同比例配施对大豆产量和品质的影响[J]. 大豆科学, 2010, 29(1): 97-100. (Zhu B G, Yu Z H, Wang N N, et al. Effect of different proportion combined application of organic and chemical fertilizer on soybean yield and quality[J]. Soybean Science, 2010, 29(1): 97-100.)
- [4] 郭庆元, 李志玉, 涂学文. 大豆高产优质施肥研究与应用[J]. 中国农学通报, 2003, 19(3): 89-96, 104. (Guo Q Y, Li Z Y, Tu X W. Studing and application of fertilization techniques for high-yield and good quality in soybean [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2003, 19(3): 89-96, 104.)
- [5] 蔡柏岩, 葛菁萍, 祖伟. 磷素水平对不同大豆品种产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(1): 65-70. (Cai B Y, Ge J P, Zu W. Yield and quality of different soybean varieties as affected by different phosphorus supplies[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2008, 14(1): 65-70.)
- [6] 李植, 王伟, 周春喜, 等. 不同钾营养型大豆主要形态、生理及产量指标的研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2007, 38(4): 483-487. (Li Z, Wang W, Zhou C X, et al. Morphological and physi-

ological characters and yield of different potassium efficient soybean varies[J]. Journal of Shenyang Agricultural University,2007, 38(4):483-487.)

[7] 裴桂英,刘健,马赛飞,等. 配方施肥对大豆产量的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2007, 33:123-126. (Pei G Y, Liu J, Ma S F, et al. The effect of balanced fertilization on yield of soybean [J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences),2007,33:123-126.)

[8] 田卫东. 氮磷钾肥不同施用量对不同土壤肥力大豆产量的影响[J]. 安徽农学通报,2011,17(3):111-112. (Tian W D. Effects of different application amounts of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer on yield of soybean in different soil fertility [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2011, 17(3):111-112.)

[9] 孙振宁,李晶,段兴武,等. 氮磷钾施肥水平对大豆产量及性状的影响[J]. 作物杂志, 2012(5):135-139. (Sun Z N, Li J, Duan X W, et al. Effects of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer on yield and characters of soybean [J]. Crop, 2012(5): 135-139.)

[10] 孙景玲,魏丹,马星竹,等. 黑龙江省黑土区大豆测土配方施肥指标体系的建立[J]. 大豆科学, 2013, 32(4):512-516. (Sun J L, Wei D, Ma X Z, et al. Establishing fertilization recommendation index of soybean in black soil region of Heilongjiang province[J]. Soybean Science, 2013, 32(4): 512-516.)

[11] 王志刚,高强,冯国忠. 吉林省大豆施肥指标体系初步建立[J]. 大豆科学, 2010,29(4):669-672. (Wang Z G, Gao Q, Feng G Z. Preliminary raising fertilization index system for soybean in Jilin province [J]. Soybean Science, 2010, 29(4): 669-672.)

[12] 崔文华. 呼伦贝尔盟岭东地区大豆施肥模型的建立及应用判别技术[J]. 土壤通报, 1994, 25(5): 213-215. (Cui W H. Soybean fertilization model and application of identification technology in Hulunbeier of inner mongolia[J]. Chinese Journal of Soil Science,1994, 25(5): 213-215.)

[13] 周新安,年海,杨文钰,等. 南方间套作大豆生产发展的现状与对策(I)[J]. 大豆科技,2010(3):1-2. (Zhou X A, Nian H, Yang W Y, et al. Current situation and countermeasures of intercropping soybean in Southern China(I) [J]. Soybean Science & Technology, 2010(3):1-2.)

[14] 徐昌,魏菊宋. 广西大豆综合栽培技术开发研究初报[J]. 广西农业科学,1988(4): 9-12. (Xu C,Wei J S. Preliminary report of comprehensive cultivation techniques of soybean in Guangxi [J]. Guangxi Agricultural Sciences,1988(4):9-12.)

[15] 何子平,蒙炎成,吕维莉,等. 桂早一号早熟黄豆在新垦红壤中的生长发育及营养特性[J]. 广西农业科学,2000(3):132-134. (He Z P, Meng Y C, Lyu W L, et al. Growth and nutritional characteristics of Guizao 1 early maturing soybean in the new cultivated red soil[J]. Guangxi Agricultural Sciences, 2000(3): 132-134.)

[16] 宋朝玉,宫明波,李振清,等. “3414”肥料试验结果统计方法的讨论与分析[J]. 天津农业科学, 2012, 18(6): 38-42. (Song C Y, Gong M B, Li Z Q, et al. Discussion and analysis on the statistical method of the “3414” experiment[J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2012,18(6):38-42.)

[17] 徐中儒. 回归分析与试验设计[M]. 北京:中国农业出版社, 1997. (Xu Z R, Regression analysis and experimental[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1997.)

[18] 王圣瑞,陈新平,高祥照,等. “3414”肥料试验模型拟合的探讨[J]. 植物营养与肥科学报, 2002, 8(4): 409-413. (Wang S R, Chen X P, Gao X Z, et al. Study on simulation of “3414” fertilizer experiments [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2002,8(4):409-413.)

[19] 魏丹,李艳,李玉梅,等. 氮磷钾元素对黑龙江不同地区大豆产量和品质的影响[J]. 大豆科学, 2017, 36(1): 87-91. (Wei D, Li Y, Li Y M, et al. Effect of N, P, K fertilization on yield and quality of soybean in Heilongjiang province [J]. Soybean Science, 2017, 36(1): 87-91.)

[20] 王政,高瑞凤,姜涛,等. 氮磷钾肥配施对大豆产量的影响研究[J]. 青岛农业大学学报(自然科学版), 2008, 25(2): 131-134. (Wang Z, Gao R F, Jiang T, et al. Study on the effect of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer combined use for the yield of soybean[J]. Journal of Qingdao Agricultural University (Natural science), 2008, 25(2):131-134.)

[21] 汪涛,杨元合,马文红. 中国土壤磷库的大小、分布及其影响因素[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2008, 44(6): 945-952. (Wang T, Yang Y H, Ma W H. Storage, patterns and environmental controls of soil phosphorus in china[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2008, 44(6): 945-952.)