

氮磷与硅钙肥配施对辣椒产量和品质的影响

李子双¹, 王薇¹, 张世文², 贺洪军¹, 赵同凯¹, 黄元仿^{3*}

(1 德州市农业科学研究院, 山东德州 253015; 2 安徽理工大学地球与环境学院, 安徽淮南 231001,

3 中国农业大学资源与环境学院, 农业部华北耕地保育重点实验室,

国土资源部农用地质量与监控重点实验室, 北京 100094)

摘要:【目的】长期高纯度化肥施用导致作物其他养分供应的不平衡, 中微量元素已成为越来越多作物产量和品质限制因子。本文旨在通过开展硅钙肥、氮肥和磷肥配施对辣椒产量和品质的影响研究, 确定硅钙肥、氮肥和磷肥在干辣椒中最佳配施方案。【方法】借助于 DPS 软件, 采用三因素二次饱和 D-最优设计方法分析研究了氮磷与硅钙肥配施对辣椒产量和品质的影响, 整个研究过程分为回归建模、模型解析和模型决策三个步骤, 首先, 根据 2013 年获得的辣椒产量和品质数据, 进行优化多项式回归分析, 得出辣椒产量、品质分别与硅钙肥、氮肥、磷肥之间的回归方程。其次, 对两个方程进行 *F* 检验, 对回归系数进行 *t* 检验, 确定模型可行性, 模型分析包括因子主效应分析、单因子效应分析和因子互作效应分析。最后进行模型决策, 通过计算机模拟运算, 提出辣椒高产与优质的施肥方案。【结果】通过对模型进行检验分析得出: 硅钙肥、氮肥、磷肥对辣椒的产量和品质均有显著的影响, 并且因素间存在显著的互作效应。以硅钙肥、氮肥交互效应为例, 在编码范围内, 辣椒的产量较好的互作空间是中等的硅钙肥配较高氮肥水平; 辣椒的品质较好的互作空间是较高的硅钙肥水平配中等的氮肥施用水平。三因素对产量的影响顺序为: 氮肥 > 磷肥 > 硅钙肥, 而对品质影响则相反。在本研究区地力水平下, 辣椒的产量和品质会随着硅钙肥、氮肥、磷肥的用量增加而升高; 当用量过高, 产量和品质反而会下降。通过计算机模拟运算, 产量在 4500 ~ 6000 kg/hm² 之间, 品质综合得分 95 分以上时, 施肥方案为硅钙肥 304.76 ~ 398.24 kg/hm², 氮肥 220.05 ~ 263.26 kg/hm², 磷肥 44.80 ~ 64.50 kg/hm²。经边际效应分析, 在经济效益和产量达到最大, 即分别为 80548.64 元/hm² 和 5916.23 kg/hm² 时, 硅钙肥、氮肥、磷肥最佳施用量组合为 332.66、250.58、57.75 kg/hm², 配施比例为 1: 0.75: 0.17。【结论】硅钙肥、氮肥、磷肥具有提高辣椒产量和品质, 调节辣椒营养元素吸收等功能, 但应适量施用, 过多施用反而会造成产量降低、品质下降等现象的产生。本文构建的模型可以详细地解释三种肥料对辣椒产量和品质的影响, 通过模型模拟可以得到三种肥料之间的联系。

关键词: 辣椒; 氮肥; 磷肥; 硅钙肥; 产量; 品质; 优化施肥

中图分类号: S641.3; S606⁺.2 文献标识码: A 文章编号: 1008-505X(2015)02-0458-09

Effect of nitrogen, phosphorus and silicon calcium fertilizer on yield and quality of pepper

LI Zi-shuang¹, WANG Wei¹, ZHANG Shi-wen², He Hong-jun¹, ZHAO Tong-kai¹, HUANG Yuan-fang^{3*}

(1 Dezhou Academy of Agricultural Sciences, Dezhou, Shandong 253015, China; 2 School of Earth and Environment,

Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China; 3 College of Resources and Environmental

Sciences, China Agricultural University, Key Laboratory of Arable Land Conservation (North China), Ministry of Agriculture, Key Laboratory of Agricultural Land Quality, Monitoring and Control, the Ministry of Land and Resources, Beijing 100094, China)

Abstract: 【Objectives】 Long-term unreasonable use of concentrated chemical fertilizers brings unbalance supply of other nutrients, calcium, magnesium, sulfur, silicon and other trace elements fertilizers emerge as crop yield limiting and quality factors. This article is aimed to determine the optimum fertilization of silicon-calcium fertilizer

收稿日期: 2014-01-26 接受日期: 2014-10-26

基金项目: 山东省现代农业产业技术体系项目 (SDAIT-02-022-03); 国家公益性农业行业专项 (201103004); 国家自然科学基金 (41071153, 41471186); 农业部科研杰出人才及创新团队资助项目 (2012) 资助。

作者简介: 李子双 (1979—), 女, 山东平原县人, 硕士研究生, 主要从事土壤水分、养分模型与植物营养方面研究。

E-mail: zishuangli@163.com. * 通信作者 Tel: 010-62732963, E-mail: yfhuang@cau.edu.cn

(SiCa), nitrogen fertilizer (N) and phosphate fertilizer (P) in pepper. **【Methods】** A secondary saturation D – optimal design with three factors was applied to analyze the effect of nitrogen, phosphorus and silicon calcium fertilizer on yield and quality of pepper using the DPS software. According to data of pepper yield and quality got in 2013, regression equation between the pepper yield and quality and nitrogen, phosphorus and silicon calcium fertilizers was set up through optimizing the polynomial regression analysis first. Then, the feasibility of model, including main and single factors and factor interaction, was tested using F test of the equations and t test of the regression coefficients. The model decision was finally simulated by computer, and the fertilization scheme was put forward for the high yield and good quality of the pepper. **【Results】** The results of model analyses show that the impacts of Si-Ca, N and P fertilizers on the yield and quality of pepper are significant, and the interaction between the any two factors are also significant. In the coding range, taking the interaction effect of Si-Ca and N for a case, the interaction space with higher pepper yield is medium Si-Ca level with high N level, while the interaction space with better pepper quality is high Si-Ca level with medium N level. The affected orders of three factors on pepper yield are: $N > P > \text{Si-Ca}$, while the influences on the quality are opposite. Pepper yield and quality are improved with the applied amounts of Si-Ca, N and P increasing under the soil fertility level, and decreased under the high fertilization level. Through the computer simulation, when the yield reaches 4500 – 6000 kg/ha and the comprehensive score of quality is above 95, the optimal fertilization amounts of Si-Ca, N and P are 304.76–398.24 kg/ha, 220.05–263.26 kg/ha and 44.80–64.50 kg/ha respectively. Considering marginal utility, when the yield reaches 5916.23 kg/ha and the maximum economic benefit is 80548.64 yuan/ha, the optimal fertilization amounts of SiCa, N and P are 332.66 kg/ha, 250.58 kg/ha, 57.75 kg/ha respectively, and the ratio is 1 : 0.75 : 0.17. **【Conclusions】** The proper application of Si-Ca, N and P can increase the yield and quality, and regulate pepper nutrient absorption and other functions, but excessive application can cause a reduced yield, quality and so on. The model constructed can explain in detail the influence of three kinds of fertilizers on the yield and quality of pepper, and the interaction of the three fertilizers can be obtained through the simulation model.

Key words: pepper; nitrogen fertilizer; phosphate fertilizer; silicon calcium fertilizer; yield; quality; optimum fertilization

辣椒作为一种重要的蔬菜,在全世界 60 多个国家和地区均有种植^[1-3],辣椒整个生育期吸肥量较大,氮磷钾的施用量可以显著影响辣椒的产量和品质^[4-5]。邢素芝等研究表明,栽培辣椒适宜的 NPK 肥用量配比应为 $N : P_2O_5 : K_2O = 1 : 0.33 : 0.51$ ^[5];李士敏等研究表明,合适的配施氮、磷、钾增产效果显著,钾素含量较高的土壤栽种朝天椒的最佳施肥配比为 $N : P_2O_5 : K_2O = 1 : 0.4 \sim 0.5 : 1.0 \sim 1.1$,钾素含量较低的土壤施肥配比为 $N : P_2O_5 : K_2O = 1 : 0.9 : 2$ 时增产增收效益明显^[6]。不同的土壤、辣椒品种和环境条件,对辣椒施肥方案的确定影响较大。中微量元素作为作物生长必需的营养元素,同样会影响作物产量和品质,比如我国部分地区土壤有效硅含量低于临界值(100 mg/kg SiO_2),已成为限制作物产量和品质的因素之一,因此,研究中微量元素与氮磷钾大量元素配施方案具有重要的意义^[7-9]。近年来,有关植物生长发育所必需的中量营养元素硅肥、钙肥以及硅肥与钙肥分别与其他元素的交互

作用研究相对较多^[10],有研究表明,硅与多种营养元素存在交互作用:施硅可使土壤中磷酸根的吸附量减少,解吸量增加^[11-12],硅还可提高作物的耐氮性能,促进氮的同化,使果实含氮量增加^[13-15];钙不仅能维持细胞壁、细胞膜的稳定性,且能调节植物体内部各种生理生化过程^[16]。例如,增加钙供应,花生的产量及品质明显提高^[17];钙能有效促进青蒜苗生长,增加叶片色素含量,改善光合特性,并明显提高假茎和叶片中大蒜素、可溶性糖、Vc、游离氨基酸及可溶性蛋白的含量^[18];土施或喷施硝酸钙均可增加大白菜、生菜、芹菜、甘蓝的 Ca、Mg、Fe 含量,显著提高产量,还可明显降低大白菜干烧心病和番茄脐腐病的发病率^[19];外源 Ca^{2+} 可通过调节辣椒幼苗根系内呼吸代谢来缓解淹水胁迫对植株的伤害^[20]。

硅钙肥是一种近年来发展起来的以硅钙为主的矿质肥料,该肥料富含硅、钙、镁、硫、铁、锌、硼、锰等多种中微量元素,能够给土壤补充作物生长必需的营养元素。目前,硅钙肥在农业生产中还未大量应

用,且硅钙肥的理化性质及在农作物上的施用效果、方法和与其他肥料的配合施用等方面研究甚少^[21]。硅钙肥、氮肥和磷肥配施对辣椒产量和品质的影响以及三种肥料的交互作用还未见报道。本文开展了硅钙肥、氮肥和磷肥配施对辣椒产量和品质的影响研究,旨在为辣椒的合理施肥提供参考。

三因素二次饱和 D-最优设计作为一种较好的设计方案,在小麦、玉米、蔬菜等各种农作物肥料配施方案中应用非常广泛^[22-26]。其特点是预测值精度较高,对选择最佳生产措施有较强的实用性。饱和 D 最优设计是回归方程中参数数目与试验处理组合数目相等的设计,回归自由度与总自由度相等达到饱和。采用这种设计试验处理数少,获得的信息量大,误差小,精确度高。为完善辣椒施肥技术,本文采用这种方法,分析研究硅钙肥、氮肥和磷肥配施对辣椒产量和品质的影响,提出硅钙肥、氮肥和磷肥在干辣椒中的最佳配施方案。

1 材料与方法

1.1 试验设计

经过 2012 年一年的匀地,2013 年在德州市德城区黄河涯德州市农科院科技园进行。试验土壤为砂质壤土,其 0—20 cm 土层基础肥力为: pH 值为 7.81、全氮 1.418 g/kg、速效磷 16.54 mg/kg、速效钾 81.70 mg/kg、有机质 14.2 g/kg、有效硅 128 mg/kg、交换性钙 3152 mg/kg,根据我国第二次土壤普查及有关标准,试验田的氮磷养分含量属于 3 级水平,速效钾和有机质的含量属于 4 级水平,肥力状况总体中等;供试辣椒品种为干椒 3 号,露地蔬菜。2013 年 5 月 10 日进行幼苗移栽,行距为 60 cm,株距 25 cm,小区面积是 15 m²。试验设计采用二次饱和 D-最优设计,重复 3 次,随机排列,具体方案及肥料用量见表 1。

所用氮、磷及硅钙肥料分别为尿素(N 46%)、过磷酸钙(P₂O₅ 12%)、硅钙肥(SiO₂ 20%、CaO 20%)。施用方法:基肥分别施入设计总量的 50%、100%、100%,开花期施入 50%、0、0,钾肥施入量按常规统一施入,其他管理方式按常规进行。

表 1 辣椒氮肥、磷肥、硅肥试验设计方案

Table 1 Test design of N, P, and silicon fertilizers for pepper

处理 Treatment	X ₁ (Si-Ca)		X ₂ (N)		X ₃ (P ₂ O ₅)	
	编码 Code	(kg/hm ²)	编码 Code	(kg/hm ²)	编码 Code	(kg/hm ²)
T1	-1	0	-1	0	-1	0
T2	1	660	-1	0	-1	0
T3	-1	0	1	408.6	-1	0
T4	-1	0	-1	0	1	108.45
T5	0.1925	393.53	0.1925	243.63	-1	0
T6	0.1925	393.53	-1	0	0.1925	64.66
T7	-1	0	0.1925	243.63	0.1925	64.66
T8	-0.2912	233.9	1	408.6	1	108.45
T9	1	660	-0.2912	144.81	1	108.45
T10	1	660	1	408.6	-0.2912	38.43

注(Note): 二次饱和 D-最优设计中编码矩阵由 DPS 数据处理系统试验设计得出 The coding matrix of secondary saturation D-optimal design is derived by the experimental design of DPS data processing system.

1.2 测定项目与方法

2013 年 8 月 20 日分小区进行辣椒整秧收获、晾晒,辣椒果含水量降至 20% 左右时进行采果,采果后进行辣椒果晾干,含水量达 14% 左右进行测产,并折算为单产。Vc 含量用 2,6-二氯酚测定

法测定^[27];辣椒素含量采用高效液相色谱法(HPLC)^[28];可溶性蛋白含量用考马斯亮蓝 G-250 染色法测定^[29];可溶性糖含量用蒽酮比色法测定^[29];干物质以及含量采用 105℃ 下烘 30 分钟,后 70℃ 烘干至恒重测得。

1.3 数据处理

辣椒品质综合评分标准:根据辣椒生产要求,参考宋春风等^[25,30]对作物品质的评分标准,将各品质指标均以最佳处理值为100分,某处理该指标测定值占最佳处理值的百分数即为该处理指标的实际得分;各处理所有品质指标得分权重值之和,即为该处理的品质综合评分。参考文献与专家意见,设定可溶性蛋白和可溶性糖含量权重均为0.1,Vc含量、辣椒素、干物质及单果重含量权重均为0.2。

数据分析采用DPS数据处理系统^[31]。

2 结果与分析

2.1 回归模型的建立

硅钙肥、氮肥和磷肥配施对辣椒产量和品质的影响见表2。以表1中 X_1 (Si-Ca)、 X_2 (N)、 X_3 (P_2O_5)编码值为自变量,表2中产量(Y_1)为因变量,进行二次多项式回归分析,得出辣椒产量与硅钙肥、氮肥、磷肥之间的回归方程:

表2 不同肥料处理对辣椒产量和品质的影响

Table 2 Effects of different fertilizer treatments on yield and quality of pepper

处理 Treatment	产量 Yield (kg/hm ²)	Vc (mg/100 g)	辣椒素 Capsaicin (mg/100 g)	干物质含量 Dry matter content (%)	单果干重(g) Single fruit dry weight	可溶性糖 Soluble sugar (%)	可溶性蛋白 Soluble protein (%)	品质综合得分 Comprehensive quality score
T1	3505.77 ± 15.70	28.13 ± 0.55	12.4 ± 0.53	1.20 ± 0.05	2.78 ± 0.08	12.58 ± 0.40	68.46 ± 0.19	28.13 ± 0.55
T2	4098.58 ± 19.49	36.30 ± 0.53	14.33 ± 0.58	1.41 ± 0.01	3.97 ± 0.05	14.59 ± 0.58	82.94 ± 1.04	36.30 ± 0.53
T3	4463.83 ± 6.89	41.37 ± 0.64	14.00 ± 1.00	1.46 ± 0.01	3.99 ± 0.06	14.99 ± 1.01	86.18 ± 0.92	41.37 ± 0.64
T4	4096.45 ± 60.00	32.43 ± 1.56	17.00 ± 1.00	1.54 ± 0.04	3.79 ± 0.12	14.68 ± 0.41	85.71 ± 1.90	32.43 ± 1.56
T5	4836.38 ± 13.42	37.87 ± 0.95	15.70 ± 0.52	1.85 ± 0.04	3.49 ± 0.13	14.65 ± 0.56	90.53 ± 0.54	37.87 ± 0.95
T6	5154.79 ± 13.90	34.10 ± 3.30	16.33 ± 1.15	1.90 ± 0.08	3.91 ± 0.10	14.98 ± 0.50	92.92 ± 2.99	34.10 ± 3.30
T7	5705.98 ± 56.45	35.37 ± 1.11	16.00 ± 1.00	1.92 ± 0.08	3.44 ± 0.08	15.81 ± 0.86	89.72 ± 1.17	35.37 ± 1.11
T8	4830.18 ± 58.93	42.67 ± 1.43	14.67 ± 1.15	1.48 ± 0.03	3.57 ± 0.18	15.66 ± 0.52	89.63 ± 1.45	42.67 ± 1.43
T9	4954.75 ± 49.77	38.37 ± 1.88	16.77 ± 0.40	1.91 ± 0.03	3.61 ± 0.26	15.85 ± 0.59	93.32 ± 1.10	38.37 ± 1.88
T10	5419.40 ± 22.97	40.10 ± 1.00	15.33 ± 0.58	1.77 ± 0.06	4.08 ± 0.08	15.99 ± 0.31	92.46 ± 0.73	40.10 ± 1.00

$$Y_1 = 5872.0077 + 106.2698X_1 + 277.8389X_2 + 166.1728X_3 - 126.2639X_1^2 - 488.8341X_2^2 - 940.6135X_3^2 - 131.0791X_1X_2 - 59.0546X_1X_3 - 70.1101X_2X_3 \quad (1)$$

其中 Y_1 为辣椒的产量; X_1 为施硅钙肥对应的编码值; X_2 为施氮肥对应的编码值; X_3 为施磷肥对应的编码值。

对方程进行有重复的 F 检验^[32], $F = 847.78 > F_{0.01}(9,20) = 3.46$,回归关系极显著。说明该方程能够反映辣椒产量与肥料之间的关系,因此模型对辣椒的产量有良好的预测作用。对各回归系数进行 t 检验, $t_{0.05}(20) = 2.086$, $t_{0.01}(20) = 2.845$, $t(X_1) = 6.67^{**}$, $t(X_2) = 17.43^{**}$, $t(X_3) = 10.42^{**}$, $t(X_1^2) = 4.11^{**}$, $t(X_2^2) = 15.90^{**}$, $t(X_3^2) = 30.59^{**}$, $t(X_1X_2) = 6.91^{**}$, $t(X_1X_3) = 3.11^{**}$, $t(X_2X_3) = 3.70^{**}$,经比较,均大于 $t_{0.01}(20) =$

2.845,各回归系数差异均达极显著水平,表明硅钙肥、氮肥、磷肥三种肥料均对产量有显著影响,而且肥料间的交互效应显著。

以表1中 X_1 (Si-Ca)、 X_2 (N)、 X_3 (P_2O_5)编码值为自变量,表2中综合品质(Y_2)为因变量,进行二次多项式回归分析,得出辣椒综合品质与硅钙肥、氮肥、磷肥之间的回归方程:

$$Y_2 = 95.6166 + 3.2575X_1 + 2.1679X_2 + 2.8738X_3 - 3.9723X_1^2 - 2.6443X_2^2 - 4.0279X_3^2 - 2.4617X_1X_2 - 1.5208X_1X_3 - 4.2304X_2X_3 \quad (2)$$

其中 Y_2 为辣椒的综合品质; X_1 为施硅钙肥对应的编码值; X_2 为施氮肥对应的编码值; X_3 为施磷肥对应的编码值。

对方程进行有重复的 F 检验, $F = 74.14 > F_{0.01}(9,20) = 3.46$,回归关系极显著。说明该方程能够

反映辣椒品质与肥料之间的关系,因此模型对辣椒的品质有良好的预测作用。对各回归系数进行 t 检验, $t(X_1) = 5.46^{**}$, $t(X_2) = 3.64^{**}$, $t(X_3) = 4.83^{**}$, $t(X_1^2) = 3.46^{**}$, $t(X_2^2) = 2.30^*$, $t(X_3^2) = 3.51^{**}$, $t(X_1X_2) = 3.48^{**}$, $t(X_1X_3) = 2.15^*$, $t(X_2X_3) = 5.97^{**}$,除了 $t(X_2^2)$ 、 $t(X_1X_3)$ 是达到显著水平,其他的都达到极显著水平,因此硅钙肥、氮肥、磷肥对辣椒品质也有显著影响,交互效应显著。

2.2 模型解析

2.2.1 因子主效应分析 由于硅钙肥、氮、磷肥对产量的回归方程已经过无量纲编码代换,故直接比较各偏回归系数绝对值的大小,可反映各因子的重要程度。从硅钙肥、氮、磷肥与产量、品质回归模型的一次项可以看出,硅钙肥、氮、磷肥的偏回归系数绝对值分别为 106.2698、277.8389、166.1728 与 3.2575、2.1679、2.8738,说明氮肥对辣椒产量的影响较大而对品质影响较小,硅钙肥对辣椒的品质影响较大而对产量影响较小。

2.2.2 单因子效应分析

对模型采用“降维法”,将任意两个因子定在零码值,可以得到剩余自变量与目标函数的关系,即求出硅钙肥、氮肥、磷肥与辣椒产量及品质的单因子效应方程。由产量效应方程得到:

$$Y_{11} = 5872.0077 + 106.2698X_1 - 126.2639X_1^2$$

$$Y_{12} = 5872.0077 + 277.8389X_2 - 488.8341X_2^2 \quad (3)$$

$$Y_{13} = 5872.0077 + 166.1728X_3 - 940.6135X_3^2$$

由品质效应方程得到:

$$Y_{21} = 95.6166 + 3.2575X_1 - 3.9723X_1^2$$

$$Y_{22} = 95.6166 + 2.1679X_2 - 2.6443X_2^2 \quad (4)$$

$$Y_{23} = 95.6166 + 2.8738X_3 - 4.0279X_3^2$$

方程组(3)和(4)中, X_1 、 X_2 和 X_3 代表硅钙肥、氮肥和磷肥的编码, Y_{11} 、 Y_{12} 、 Y_{13} 分别表示产量与硅钙肥、氮肥和磷肥效应方程, Y_{21} 、 Y_{22} 、 Y_{23} 分别表示综合品质与硅钙肥、氮肥和磷肥效应方程,根据方程,将各个单因子效应方程绘制成图(图1)。

由图1可以看出,在本研究区地力水平下,辣椒的产量(图a)均随着硅钙肥、氮肥、磷肥的增加而增加,达到最高值后,又随着施用量的增加而降低。辣椒的品质(图b)也是如此,在地力水平较低的情况下,随着硅钙肥、氮肥、磷肥的增加而增加,但肥料的过量施用又会导致品质降低。在本试验结果中,硅

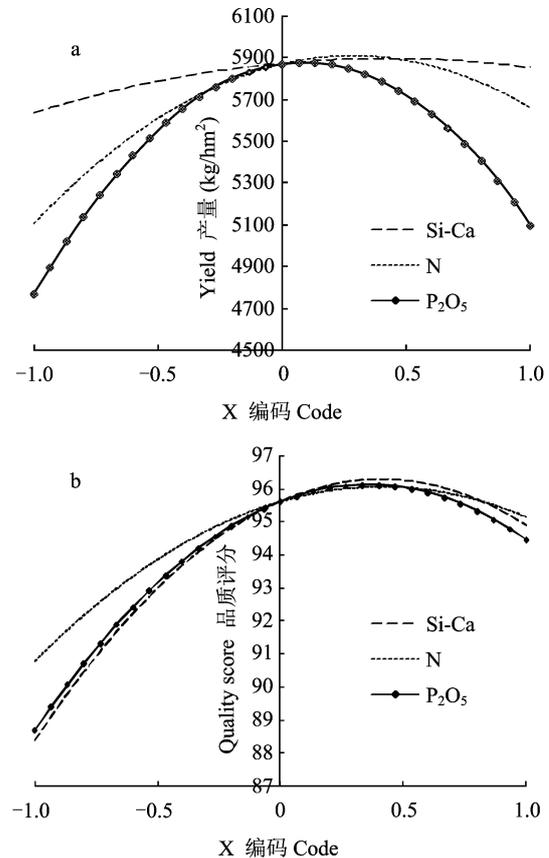


图1 单因子效应曲线图

Fig. 1 Single-factor effect line

钙肥、氮肥、磷肥单因子效应方程均存在极大值。

2.2.3 因子交互效应分析 本试验确定的辣椒产量和品质回归模型(方程(1)和(2)),均存在交互项,且其回归系数均达显著水平。说明在综合施肥条件下,产量和品质的变化,不单纯是各因子单独效应,还存在交互效应。将一个因子定在零码值,得出其他两个因子的交互效应方程。以硅钙肥、氮肥交互效应为例,说明其对产量和品质的影响。分别将产量、品质回归方程中的磷编码(X_3)设为0,得到以下两个交互效应方程:

$$Y_1 = 5872.0077 + 106.2698X_1 + 277.8389X_2 - 126.2639X_1^2 - 488.8341X_2^2 - 131.0791X_1X_2 \quad (5)$$

$$Y_2 = 95.6166 + 3.2575X_1 + 2.1679X_2 - 3.9723X_1^2 - 2.6443X_2^2 - 2.4617X_1X_2 \quad (6)$$

方程(5)和(6)中, X_1 代表硅钙肥编码, X_2 代表氮肥编码, Y_1 表示产量, Y_2 表示综合得分。

根据三因子交互效应方程绘制交互效应曲面图(图2),从图2看出,在编码范围内,辣椒的产量(图

a)较好的互动空间是:中等的硅钙肥配较高氮肥水平;辣椒的品质(图 b)较好的互动空间是较高的硅钙肥水平配中等的氮肥施用水平。

2.3 模型决策

2.3.1 高产优化方案分析 通过计算机模拟运算,提出辣椒产量与品质的施肥方案。由表 3 得出产量在 4500–6000 kg/hm² 之间的施肥方案为硅钙肥 269.28 ~ 398.24 kg/hm²,氮肥 220.05 ~ 263.26 kg/hm²,磷肥 44.80 ~ 64.50 kg/hm²;同理可以得到辣椒品质在 95 分以上的最佳施肥范围为硅钙肥 304.76 ~ 512.82 kg/hm²,氮肥 146.32 ~ 303.37 kg/hm²,磷肥 44.07 ~ 82.78 kg/hm²。

2.3.2 最高产量和最佳品质 对产量和品质的效应方程进行边际分析,可得最高产量和最佳品质。本试验条件下的最高产量为 5926.27 kg/hm²,所对应的施肥量为:硅钙肥 422.04 kg/hm²,氮肥 253.69 kg/hm²,磷肥 58.05 kg/hm²。本试验条件下的最佳品质得分为 96.61,所对应的施肥量为:硅钙肥 445.17 kg/hm²,氮肥 209.53 kg/hm²,磷肥 69.27 kg/hm²。

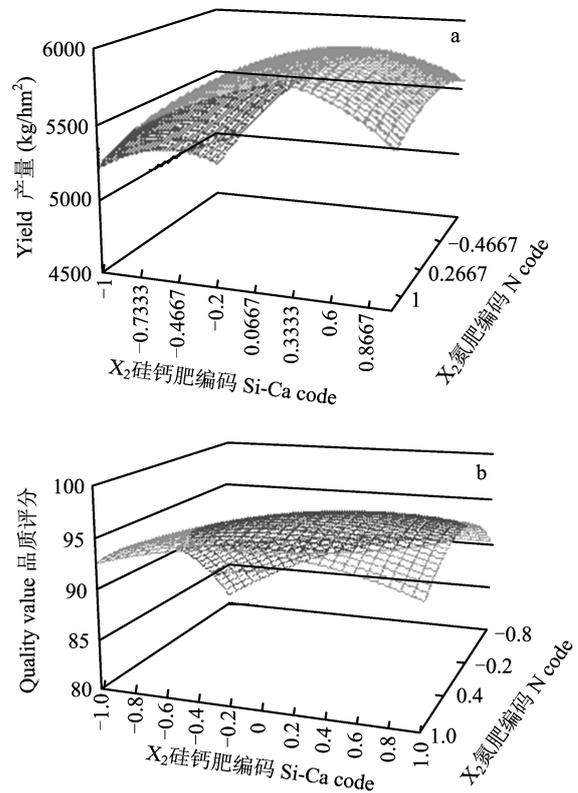


图 2 硅钙肥、氮肥交互效应曲面图

Fig. 2 Interaction surfaces of SC and N

表 3 辣椒产量 4500 ~ 6000 kg/hm² 之间各因素的频次分布表

Table 3 Frequency distribution of the factors for pepper yield among 4500–6000 kg/hm²

变量因子 Variable factor	X ₁		X ₂		X ₃		
	次数 Count	频数 Frequency	次数 Count	频数 Frequency	次数 Count	频数 Frequency	
编码值 Code	-1	12	22.22	8	14.81	10	18.52
	-0.2912	14	25.93	15	27.78	16	29.63
	0.1925	14	25.93	16	29.63	16	29.63
	1	14	25.93	15	27.78	12	22.22
平均值 Average		0.0114		0.1058		0.0078	
标准误 Standard error		0.7162		0.6703		0.6659	
95% 置信区间 95% confidence interval		-0.1840 ~ 0.2068		0.0771 ~ 0.2886		-0.1739 ~ 0.1895	
施肥方案 (kg/hm ²) Fertilization scheme		269.28 ~ 398.24		220.05 ~ 263.26		44.80 ~ 64.50	

2.3.3 最佳经济效益施肥量 在实际生产中,不仅要考虑作物的产量和品质,还要考虑投入产出比,即生产成本与产值,因此要计算经济效益。为确定最佳经济施肥方案,必须根据农产品的价格和肥料成本进行分析。干辣椒的市场价为 14 Yuan/kg,硅

钙肥料价格为 1.2 Yuan/kg,含纯硅钙肥 40%,即纯硅钙肥的价格为 3.0 元;尿素价格为 1.6 Yuan/kg,含纯氮 46%,即纯氮的价格是 3.478 Yuan/kg;过磷酸钙价格 0.85 Yuan/kg,含 P₂O₅ 为 12%,即 P₂O₅ 的价格为 7.083 Yuan/kg,根据肥料的实际用量,回

归方程可转化为:

$$Y_1 = 3505.7710 + 1.6634X_1 + 7.1301X_2 + 40.1396X_3 - 0.0012X_1^2 - 0.0117X_2^2 - 0.3199X_3^2 - 0.0019X_1X_2 - 0.0033X_1X_3 - 0.0063X_2X_3 \quad (7)$$

扣除肥料成本后得到纯收益函数模型为:

$$Y_1 = (3505.7710 + 1.6634X_1 + 7.1301X_2 + 40.1396X_3 - 0.0012X_1^2 - 0.0117X_2^2 - 0.3199X_3^2 - 0.0019X_1X_2 - 0.0033X_1X_3 - 0.0063X_2X_3) \times 14 - 3.0X_1 - 3.478X_2 - 7.083X_3 \quad (8)$$

方程(7)和(8)中 Y_1 为辣椒的产量; X_1 为硅钙肥施用量; X_2 为氮肥施用量; X_3 为磷肥施用量。

最终得到的目标函数值(最大经济效益值)为 80548.64 Yuan/hm², 最佳产量为 5916.23 kg/hm², 最佳施肥用量为硅钙肥 332.66 kg/hm²、氮肥 250.58 kg/hm²、磷肥 57.75 kg/hm²。

3 讨论

与 20 多年前第二次土壤普查时相比, 种植业结构、作物产量、施肥习惯和施肥水平等均发生了较大变化, 而多数研究尚还集中于土壤氮磷钾的状况。在过去的 50 年间, 我国粮食产量与化肥消费量呈显著正相关^[33], 随着作物产量不断提高, 从土壤中带走的中、微量元素也必然在不断增加; 同时, 由于长期连续过量施用氮肥, 土壤持续酸化, 正在逐渐丧失生产能力, 钙、镁、硫、硅等也已成为越来越多土壤的产量限制因子和“品质元素”。所以, 急需对我国的中微量元素水平及其对作物影响机制进行研究, 以便有针对性的补充土壤养分, 使我国的作物产量再上一个新台阶^[34]。本文就是在此背景下进行的探索性研究。

从单因素考虑, 本试验研究结果影响产量的顺序为氮肥 > 磷肥 > 硅钙肥, 三种肥料均能提高辣椒的产量, 但达到一定量之后, 就会随着肥料的增加, 产量逐渐减少。氮磷肥的结论与之前邢素芝认为的 NPK 在适量范围内均能提高辣椒的产量, 但过量施用就会造成减产的说法是一致的^[5], 适量硅钙肥能提高辣椒的产量与品质的试验结果, 与前人在杂交稻^[35]、爆裂玉米^[36] 和大豆^[37] 等作物上的研究一致。但是硅钙肥里面的哪种元素起的作用还有待进一步研究, 刘吉振认为硅并不一定能增加所有辣椒的干质量, 只是对部分辣椒有增产效应^[38], 钙素对辣椒幼苗的调控效应也具有两面性, 一定浓度范围内成正效应, 过高反而成负效应^[20], 因此硅钙肥的影响效应还有待进一步研究讨论。同时, 本研究得

出影响辣椒综合品质的顺序为硅钙肥 > 磷肥 > 氮肥, 氮磷肥对辣椒品质的影响与前人研究并不完全一致, 黄科认为氮肥对辣椒品质的影响较大, 而磷肥的影响较小^[39], 辣椒品质中磷肥效应增强是由于肥效互作引起的还是本试验地养分含量引起的, 还有待进一步探讨。

不同的土壤肥力, 不同的水分管理, 不同的栽培品种都可能引起最佳施肥方案的不同^[5,6]。可见, 确定辣椒的最佳合理施肥方案应根据其品种生长特性, 当地土壤肥力以及水分管理情况进行。硅钙肥、氮肥、磷肥虽会提高产量和品质, 调节辣椒营养元素吸收等功能, 但应适量施用, 过多施用反而会造成产量降低、品质下降等现象的产生。本文的试验结果受基础土壤肥力的影响, 今后还需要增加定位试验, 进一步进行充分深入的研究。

4 结论

通过采用三因子二次饱和 D - 最优设计, 本试验建立了以硅钙肥、氮肥、磷肥为因变量, 辣椒产量与品质为目标函数的三元二次数学模型。通过对模型进行检验分析得出: 硅钙肥、氮肥、磷肥对辣椒的产量和品质均有显著的影响, 并且因素间存在显著的互作效应。三因素对产量的影响顺序分别为: 氮肥 > 磷肥 > 硅钙肥, 而对品质影响则相反。

在低用量条件下, 辣椒的产量和品质会随着硅钙肥、氮肥、磷肥的用量增加而升高; 当用量过高, 产量和品质会下降。通过计算机模拟运算, 产量在 4500 ~ 6000 kg/hm² 之间, 品质综合得分 95 分以上时, 施肥方案为硅钙肥 304.76 ~ 398.24 kg/hm², 氮肥 220.05 ~ 263.26 kg/hm², 磷肥 44.80 ~ 64.50 kg/hm²。经边际效应分析, 在经济效益和产量达到最佳, 即分别为 80548.64 Yuan/hm² 和 5916.23 kg/hm² 时, 硅钙肥、氮肥、磷肥最佳施用量组合为 332.66 kg/hm²、250.58 kg/hm²、57.75 kg/hm², 配施比例为 1 : 0.75 : 0.17。

参考文献:

- [1] Rosso F, Zoppellari F, Sala G *et al.* Effect of rhizospheric microorganisms inoculum on sweet pepper quality [J]. *Journal of Biotechnology*, 2010, 150: 163-165.
- [2] Cao S F, Yang Z F, Zheng Y H. Effect of 1-methylcyclopene on senescence and quality maintenance of green bell pepper fruit during storage at 20°C [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2012, 70: 1-6.
- [3] 庄灿然, 吕金殿, 梁耀琦. 中国制干辣椒 [M]. 北京: 中国农

- 业科学技术出版社, 1995.
- Zhuang C R, Lü J D, Liang Y Q. Chinese dried pepper [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1995.
- [4] 王彦飞, 曹国藩. 不同施肥方式对辣椒产量和经济效益的影响研究[J]. 中国农学通报, 2010, 26(20): 234-237.
- Wang Y F, Cao G F. Effect of different fertilization methods on yield and economic benefit of pepper [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(20): 234-237.
- [5] 邢素芝, 汪建飞, 姚春芬. 辣椒 NPK 肥料配施数学模型的研究[J]. 土壤通报, 2003, 34(3): 238-240.
- Xing S Z, Wang J F, Yao C F. Study on the mathematical model of combined NPK fertilizer application in pepper [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2003, 34(3): 238-240.
- [6] 李士敏. 氮、磷、钾肥料施用对辣椒产量和经济效益的影响[J]. 土壤肥料, 2005, (1): 14-16.
- Li S M. Effect of N, P and K fertilizers application on the yield and economic efficiency of chili [J]. Soil and Fertilizer, 2005, (1): 14-16.
- [7] 马同生, 冯亚军, 梁永超, 等. 江苏沿江地区水稻土硅素供应力与硅肥施用[J]. 土壤, 1994, (3): 154-156.
- Ma T S, Feng Y J, Liang Y C *et al.* Silicon supplying capacity and the silicon fertilizer application in paddy soil of Jiangsu province along the Yangtze River [J]. Soil, 1994, (3): 154-156.
- [8] 郭彬, 娄运生, 梁永超, 等. 氮硅肥配施对水稻生长、产量及土壤肥力的影响[J]. 生态学杂志, 2004, 23(6): 33-36.
- Guo B, Lou Y S, Liang Y C *et al.* Effect of nitrogen and silicon application on rice growth, yield and soil fertility [J]. Journal of Ecology, 2004, 23(6): 33-36.
- [9] Hua W Q. Available silicon contents of paddy soils and the effect of silicon fertilization on rice in Sichuan province [J]. Pedosphere, 1994, 4(1): 67-78.
- [10] 严明建, 成善美, 陈国斌, 等. 施硅及氮、磷、硅配施对水稻生产的影响[J]. 耕作与栽培, 1993, (1): 55-56.
- Yan M J, Cheng S M, Chen G B *et al.* Application of silicon and nitrogen, phosphorus, silicon fertilizer on rice production [J]. Tillage and Cultivation, 1993, (1): 55-56.
- [11] 胡克伟, 关连珠, 颜丽, 等. 施硅对水稻土磷素吸附与解吸特性的影响研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(2): 214-218.
- Hu K W, Guan L Z, Yan L *et al.* Effect of supply silicon on adsorption and desorption action of phosphorus in paddy soil [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2002, 8(2): 214-218.
- [12] Nagabovanali B, Nagarajh P *et al.* Effect of recycling of plant silicon for sustainable rice farming in South India [A]. 17th WCSS [C]. Bangkok, Thailand, 2002. 14-21.
- [13] 申义珍, 张秀英, 常龙福, 等. 砂壤质石灰性土壤水稻硅肥效果及氮硅互作效应的研究[J]. 土壤通报, 1992, 23(3): 124-126.
- Shen Y Z, Zhang X Y, Chang L F *et al.* Effect of silicon fertilizer and its interaction with nitrogen on rice in loamy sandy calcareous soil [J]. Chinese Journal of Soil Science, 1992, 23(3): 124-126.
- [14] Ma J F, Nishimura K, Takahashi E. Effect of silicon on the growth of rice plant at different growth stages [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 1989, 35: 347-356.
- [15] Savant N K, Snyder G H, Damoff L E. Silicon management and sustainable rice production [J]. Advances in Agronomy, 1996, 58: 151-199.
- [16] 陆景陵. 植物营养学(第2版) [M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2003. 61-65.
- Lu J L. Plant nutrition (Second Edition) [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2003. 61-65.
- [17] 张君诚, 张海平, 官德义, 等. 不同钙水平水培花生的生长表现及研究方法探讨[J]. 种子, 2006, 25(10): 51-52.
- Zhang J C, Zhang H P, Guan D Y *et al.* Study of different calcium levels on growth of peanut and research methods [J]. Seed, 2006, 25(10): 51-52.
- [18] 李贺, 刘世琦, 陈祥伟. 钙对水培青蒜苗生长、光合特性及品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(5): 1118-1128.
- Li H, Liu S Q, Chen X W. Effects of calcium on growth, photosynthetic characteristics and quality of hydroponic garlic seedlings [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2013, 19(5): 1118-1128.
- [19] 林葆, 朱海舟, 周卫. 硝酸钙对蔬菜产量与品质的影响[J]. 土壤肥料, 2000, 2: 20-22.
- Lin B, Zhu H Z, Zhou W. Effects of calcium nitrate on the yield and quality of vegetables [J]. Soil and Fertilizer, 2000, 2: 20-22.
- [20] 张恩让, 任媛媛, 胡华群, 等. 钙对淹水胁迫下辣椒幼苗根系生长和呼吸代谢的影响[J]. 园艺学报, 2009, 36(12): 1749-1754.
- Zhang E R, Ren Y Y, Hu H Q *et al.* Effects of calcium on growth and respiratory metabolism of hot pepper seedling roots under waterlogging stress [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2009, 36(12): 1749-1754.
- [21] 李卫, 徐福利. 施硅钙钾肥对日光温室黄瓜生长与产量的影响[J]. 北方园艺, 2012, 36(6): 41-43.
- Li W, Xu F L. Effect of silicon calcium potassium fertilizer on the growth and yield of cucumber in solar greenhouse [J]. Northern Horticulture, 2012, 36(6): 41-43.
- [22] 安成立, 张改生, 王寿山. 杂交小麦超高产模式研究[J]. 中国农业大学学报, 2012, 17(2): 25-30.
- An C L, Zhang G S, Wang S S. Study on super high yield model of hybrid wheat [J]. Journal of China Agricultural University, 2012, 17(2): 25-30.
- [23] 刘新伦, 王哲笃, 张睿, 等. 旱地地膜小麦高产栽培优化数学模型研究[J]. 麦类作物学报, 2004, 24(4): 154-157.
- Liu X L, Wang Z D, Zhang R *et al.* Optimum mathematical model of film mulched high yield wheat cultivation in dry land [J]. Journal of Triticeae Crops, 2004, 24(4): 154-157.
- [24] 洪晓强. 秦巴山区春玉米丰产栽培模式研究[J]. 河南农业大学学报, 2001, 35(S1): 7-10.
- Hong X Q. Study on cultivation pattern of high yield spring corn

- in Qinba Mountain area [J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2001, 35(S1): 7-10.
- [25] 袁亭亭, 杨建平, 徐坤. 秋延迟番茄氮、磷、钾优化施肥方案研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(5): 1246-1251.
Yuan T T, Yang J P, Xu K. Optimization scheme for nitrogen, phosphorus, potassium fertilizer in autumn greenhouse tomato [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(5): 1246-1251.
- [26] 赵锴, 李瑾. 氮磷钾配施对洋葱产量和品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(3): 558-563.
Zhao K, Li J. Effect of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer on yield and quality of onion [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(3): 558-563.
- [27] 刘春生, 杨守祥. 农业化学分析[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 1996, 179-181.
Liu C S, Yang S X. *Agricultural chemical analysis* [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 1996, 179-181.
- [28] GBT21266-2007, 辣椒及辣椒制品中辣椒素类物质测定及辣度表示方法[S].
GBT21266-2007, Method for determination of capsaicinoids in spicy pepper and hot pepper products [S].
- [29] 张志良, 瞿伟菁. 植物生理学实验指导(第三版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
Zhang Z L, Qu W J. *Experimental manual of plant physiology (Third Edition)* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2003.
- [30] 宋春风. 氮钾配施对芋头产量和品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(2): 167-170.
Song C F. Effect of nitrogen and potassium on yield and quality of taro [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 10(2): 167-170.
- [31] 唐启义. DPS 数据处理系统: 实验设计、统计分析及数据挖掘(第2版)[M]. 北京: 科学出版社, 2010, 263-269.
Tang Q Y. *DPS data processing system: experimental design, statistical analysis and data mining (Second Edition)* [M]. Beijing: Science Press, 2010, 263-269.
- [32] 焦志勇. 二次饱和 D—最优设计[J]. *山东农业科学*, 1989, 21(2): 46-49.
Jiao Z Y. Two saturation D optimum design [J]. *Shandong Agricultural Science*, 1989, 21(2): 46-49.
- [33] 金继运, 李家康, 李书田, 等. 化肥与粮食安全[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(5): 601-609.
Jin J Y, Li J K, Li S T *et al.* Chemical fertilizer and food safety [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(5): 601-609.
- [34] 刘晓燕. 我国农田土壤肥力和养分平衡状况研究[D]. 北京: 中国农业科学院博士学位论文, 2008.
Liu X Y. *Study on the farmland soil fertility and nutrient balance in our country* [D]. Beijing: PhD dissertation of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2008.
- [35] 许松林. 硅钙肥对杂交稻的肥效研究[J]. *土壤通报*, 1993, 24(6): 264-266.
Xu S L. Study on effect of silicon calcium fertilizer on hybrid rice [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1993, 24(6): 264-266.
- [36] 张丽阳, 史振声, 王志斌. 硅钙肥对爆裂玉米品质和生理指标的影响分析[J]. *种子*, 2009, 28(4): 21-23.
Zhang L Y, Shi Z S, Wang Z B. Analysis of effect of silicon calcium fertilizer on popping quality and physiological index of corn [J]. *Seed*, 2009, 28(4): 21-23.
- [37] 林蔚刚, 吴俊江, 董德健, 等. 施用硅钙肥对大豆生长发育和产量的作用[J]. *作物杂志*, 2007, (2): 37-39.
Lin W G, Wu J J, Dong D J *et al.* Effect of silicon calcium fertilizer on growth and yield of soybean [J]. *Crops*, 2007, (2): 37-39.
- [38] 刘吉振, 徐卫红, 王慧先. 硅对不同辣椒品种生理特性、镉积累及化学形态的影响[J]. *中国蔬菜*, 2011, 1(10): 69-75.
Liu J Z, Xu W H, Wang H X. Effect of silicon on physiological characteristics, cadmium accumulation and chemical forms of different pepper cultivars [J]. *China Vegetables*, 2011, 1(10): 69-75.
- [39] 黄科, 刘明月, 蔡雁平, 等. 氮磷钾施用量与辣椒品质的相关性研究[J]. *江西农业大学学报*, 2002, 24(3): 363-368.
Huang K, Liu M Y, Cai Y P *et al.* Correlation between rates of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer and the quality of hot pepper [J]. *Journal of Jiangxi Agricultural University*, 2002, 24(3): 363-368.