

中图分类号：S532 文献标识码：A 文章编号：1672-3635(2010)03-0156-03

马铃薯氮磷钾肥配施数学模型构建与优化研究

张东昱¹，张文斌^{2*}，夏叶¹，王俊梅¹，张荣²

(1. 甘肃张掖市经济作物技术推广站，甘肃 张掖 734000；2. 张掖市农产品质量监测检验中心，甘肃 张掖 734000)

摘要：本研究采用 3 因素二次回归通用旋转组合设计研究氮肥、磷肥、钾肥对马铃薯产量的影响。结果表明：3 因素影响马铃薯产量的顺序依次为氮肥、钾肥、磷肥。各因素间存在交互作用。经过计算机模拟，得到马铃薯公顷产量达到最高值 44.85 t 时，其相应氮肥、磷肥、钾肥用量分别为每公顷 465.00 kg、398.85 kg、479.10 kg。对试验结果进行的验证表明，模型选优所得氮肥、磷肥和钾肥配比的产量最高，每公顷施肥成本、施肥利润、肥料投资效率分别为 6 900 元、10 800 元和 1.57%，栽培效果明显优于其它配比。证明构建的模型准确可靠。

关键词：马铃薯；氮肥；磷肥；钾肥；产量；数学模型

Establishment and Optimization of Mathematic Model for N, P and K Fertilizer Application to Potatoes

ZHANG Dongyu¹, ZHANG Wenbin², XIA Ye¹, WANG Junmei¹, ZHANG Rong²

(1. Zhangye Cash-crop Technology Extension Station, Zhangye, Gansu 734000, China;
2. Zhangye Agricultural Products Quality Monitor and Inspection Center, Zhangye, Gansu 734000, China)

Abstract: A mathematic model to describe the effect of N, P and K fertilizer on potato yields was established using three factors universal quadratic rotation combination design. It indicated that the rank of factor effects on potato yields was N > K > P, and the interaction among the three factors was found. Based on computer analysis, N 465.00 kg · ha⁻¹, P₂O₅ 398.85 kg · ha⁻¹ and K₂O 479.10 kg · ha⁻¹ were needed to reach the peak value of potato yield, 44.85 t · ha⁻¹. By testing the result in a field trial, the application of N, P₂O₅ and K₂O selected based on the mathematic model gave the highest yield, with fertilizer cost, profit and efficiency of fertilizer investment being 6 900 Yuan · ha⁻¹, 10 800 Yuan · ha⁻¹ and 1.57%, respectively, and the cultivation efficiency was much higher than those of other applications.

Key Words: potato; nitrogen fertilizer; phosphorus fertilizer; potassium fertilizer; yield; mathematic model

随着马铃薯市场空间的不断扩大，种植效益不断提升，使张掖市马铃薯生产规模逐年扩大，目前种植面积已达到 2.33 万 hm²。马铃薯已成为张掖市沿山地区农业增效和农民增收的支柱产业。近年来，由于人们施肥观念的偏差，认为高投入就会高产，不顾及作物需求平衡和土壤供给养分状况，盲目大量施肥^[1-3]，导致土壤硝酸盐淋失，微量元素缺乏及环境污染，马铃薯产量、品质下降，发病率高。为此，我们开展马铃薯配方施肥

技术研究，建立数学模型并分析氮、磷、钾 3 因素对产量的影响，以此为马铃薯的高产、高效栽培提供科学施肥依据。

1 材料与方法

1.1 材料

试验于 2008~2009 年在甘肃民乐县三堡村进行。供试土壤是耕灌灰钙土，0~20 cm 耕层理化性质：有机质含量 12.6 g · kg⁻¹，碱解氮 56.0 mg · kg⁻¹，速效

收稿日期：2010-03-03

基金项目：国家科技发展星火项目(2008G80001)。

作者简介：张东昱(1965-)，男，高级农艺师，主要从事农作物栽培与生理方面的研究。

* 通信作者：张文斌，研究员，主要从事农业技术推广与农产品质量安全监管，E-mail：zhangr411@126.com。

磷 31.3 mg·kg⁻¹, 速效钾 198.00 mg·kg⁻¹, pH 8.12, 全盐 1.20 g·kg⁻¹, CEC 10.8 cmol·kg⁻¹, 容重 1.25 g·cm⁻³, 总孔隙度 48.06%, 土壤质地为沙壤土。

供试肥料: K₂SO₄ (含 K₂O 50%、利用率 35%); CO(NH₂)₂ (含 N 46%, 利用率 40%); NH₄H₂PO₄ (含 N 18%, 利用率 40%, P₂O₅ 46%, 利用率 30%)。

参试品种: 马铃薯品种大西洋。

1.2 方法

试验采用 3 因素二次回归通用旋转组合设计, 以产量为目标函数, 以施氮量、施磷量、施钾量 3 因素为因变量, 构建数学模型。3 因素不同水平的编码值见表 1。

表 1 全生育期氮、磷、钾肥试验因素水平编码 (kg·hm⁻²)
Table 1 Coding value of examined factors

变量 Variable	尿素 Urea	磷酸二氢铵 Ammonium biphosphate	硫酸钾 Potassium sulfate
+ r	583.20	500.40	958.20
+ 1	465.00	398.85	763.93
0	291.60	250.20	479.10
- 1	116.70	101.40	194.26
- r	0	0	0

试验共设计 20 个处理, 试验小区面积 12 m² (1.2 m × 10 m), 3 次重复。高垄双行覆膜栽培, 垄距 110 cm, 株距 20 cm, 行距 35 cm, 播深 15 cm 左右。公顷保苗数 9.0 × 10⁴ 株。磷、钾肥 1 次施入作基肥; 氮肥 70% 做基肥, 30% 结合苗期灌溉追施, 其它管理同常规生产。

试验于 2008 年 4 月 21 日播种, 8 月 30 日收获; 2009 年 4 月 28 日播种, 8 月 28 日收获。试验处理方案见表 2。

1.3 模型的验证

试验于 2009 年 4~10 月在原试验地进行。为了确保模型的可靠性和准确性, 试验依据模型寻优得到的最佳组合 A、最差组合 B 和生产上一般施肥量 CK, 共设 3 个处理, 各处理设置同前, 3 次重复, 随机排列, 进行模型的验证试验。各处理氮肥、磷肥、钾肥施用量见表 3。

2 结果与分析

2.1 产量目标函数数学模型的建立与检验

根据表 4 试验结果, 以产量为目标函数(Y), 以氮肥(X₁)、磷肥(X₂)、钾肥(X₃) 3 因素为控制变

表 2 各试验处理方案

Table 2 Experimental treatment program

处理 Treatment	X ₁ (N)	X ₂ (P ₂ O ₅)	X ₃ (K ₂ O)	处理 Treatment	X ₁ (N)	X ₂ (P ₂ O ₅)	X ₃ (K ₂ O)
1	1	1	1	11	0	r	0
2	1	1	-1	12	0	-r	0
3	1	-1	1	13	0	0	r
4	1	-1	-1	14	0	0	-r
5	-1	1	1	15	0	0	0
6	-1	1	-1	16	0	0	0
7	-1	-1	1	17	0	0	0
8	-1	-1	-1	18	0	0	0
9	r	0	0	19	0	0	0
10	-r	0	0	20	0	0	0

表 3 各处理氮、磷、钾施用量(kg·hm⁻²)

Table 3 Different application rates of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer

处理 Treatment	尿素 Urea	磷酸二氢铵 Ammonium biphosphate	硫酸钾 Potassium sulfate
A	465.00	398.85	479.10
B	291.60	500.40	479.10
CK	628.24	423.68	586.82

量, 对数据进行计算机处理, 得到马铃薯产量对 3 因素的回归数学模型:

$$Y = 40.311 + 2.269X_1 + 1.655X_2 + 1.977X_3 - 1.221X_1^2 - 4.471X_2^2 - 0.471X_3^2 + 0.334X_1X_2 - 0.654X_1X_3 - 3.696X_2X_3$$

经显著性检验: $F_1 = 4.865 < F_{0.05} = 8.89$, 失拟不显著, 拟合很好。 $F_2 = 5.237 > F_{0.01} = 4.12$, 表明方程回归关系达到极显著水平。 F 检验说明, 产量与各因素拟合很好, 方程有效, 可以进行效应分析及预测。剔除 $\alpha = 0.10$ 不显著项后, 简化后的回归方程为:

$$Y = 40.311 + 2.269X_1 + 1.655X_2 + 1.977X_3 - 1.221X_1^2 - 4.471X_2^2 - 0.471X_3^2 - 3.696X_2X_3$$

2.2 各因素及其交互作用与产量之间的关系

2.2.1 主效应分析

回归模型本身已经过无量纲形编码代换, 其偏回归系数已经标准化, 故可以直接从其绝对值的大小来判断各因素对目标函数的相对重要性。因此, 3 因素对产量的影响程度大小为氮肥 > 钾肥 > 磷肥。

2.2.2 单因子效应分析

将回归模型中的氮、磷、钾肥 3 因子中的两个固定在零水平, 求得单因素对产量的偏回归子模型, 分别获得各因素在不同水平下的产量预测值。施氮

表 4 各处理产量结果 (t·hm⁻²)
Table 4 Yield of different treatments

处理 Treatment	产量 Yield	处理 Treatment	产量 Yield
1	35.31	11	25.02
2	44.70	12	27.34
3	37.33	13	44.02
4	28.22	14	30.89
5	35.33	15	39.45
6	38.28	16	42.50
7	34.92	17	39.28
8	26.91	18	37.99
9	41.51	19	40.53
10	29.20	20	42.20

注：表中同一处理的产量为 3 次重复的平均值。
Note: Yield was the average value over three replicates.

量： $Y_1 = 40.311 + 2.269 X_1 - 1.221 X_1^2$ ，施磷量： $Y_2 = 40.311 + 1.655 X_2 - 4.471 X_2^2$ ，施钾量： $Y_3 = 40.311 + 1.977 X_3 - 0.471 X_3^2$ 。分别对其求导，令 $dY_i / dX_i = 0$ ，求得 Y_i 达极大值时各要素单独施用的最适量，可得 $X_1 = 0.929$ ， $X_2 = 0.185$ ， $X_3 = 2.098$ 。当 X_1 、 X_2 、 X_3 编码值分别为 0.929、0.185、2.098 水平时，马铃薯产量达最高；在其施肥水平分别高于或低于极值点 0.929、0.185、2.098 时，马铃薯产量都会降低。

2.2.3 三因子的交互效应分析

对产量模型解析，分别得到氮与磷、氮与钾、磷与钾的交互效应分界点。在其施肥水平分别低于 0.929 和 0.185、0.929 和 2.098、0.185 和 2.098 时，对产量存在正相关关系，高于此水平时则呈负相关。

2.2.4 氮、磷、钾肥的优化组合及相应产量

通过对产量模型的解析，分析了氮、磷、钾肥各因子对产量的影响程度，得出最佳组合：氮、磷、钾水平分别为 1、1、0 时，其相对应氮、磷、钾肥用量为每公顷 465.00 kg、398.85 kg 和 479.1 kg，以此量化指标栽培马铃薯，产量可达最高值 44.85 t。

2.3 模型验证及经济效益分析

不同施肥量对马铃薯产量影响很大，由表 5 可以看出， $A > CK > B$ ，差异达极显著水平。说明由模型选优所得氮、磷和钾肥配比的产量最高，每公顷施肥成本、施肥利润、肥料投资效率分别为 6 900 元、10 800 元和 1.57%，栽培效果明显优于其它配比。生产上普遍采用的施肥量产量居中，而由模型选出的较差组合产量最低，说明氮、磷、钾肥配比失衡，影响了马铃薯生长发育。由此证明，构建的模型准确可靠。

表 5 不同处理对马铃薯产量的影响

Table 5 Effect of different treatments on potato yield

处理 Treatment	小区产量 (kg) Yield per plot	公顷产量 (t) Yield per hectare	增产量 (t·hm ⁻²) Increased yield	增产值 (yuan·hm ⁻²) Increased output value	施肥成本 (yuan·hm ⁻²) Fertilizer cost	施肥利润 (yuan·hm ⁻²) Profit	肥料投资效率 (%) Efficiency of fertilizer investment
B	39.10	32.58cC					
CK	46.01	38.34bB	5.76	9200	3700	5500	1.49
A	52.38	43.65aA	11.07	17700	6900	10800	1.57

3 讨论

施用不同配比的氮、磷、钾肥，可使马铃薯产量发生明显变化，随着施肥量的增大，可以显著提高马铃薯产量，当用量达到一定水平时产量开始下降，增产效果则随用量的增加呈近似抛物曲线型变化。在同等栽培条件下，氮、磷、钾肥的适宜用量和最佳配比，可获得马铃薯最高产量。

施用最佳配比的氮、磷、钾肥时，三因素影响马铃薯产量的顺序为氮 > 钾 > 磷。在对构建的模型验证试验中，生产上每公顷常用的氮、磷、钾量分别为 628.24 kg、423.68 kg 和 586.82 kg，比由模型寻优得到的用量分别高出 163.24 kg、24.83 kg 和

107.72 kg，而产量却要低 5.31 t，说明氮、磷、钾肥配比失衡，影响马铃薯生长发育，这主要由于肥料浓度较高时，同化作用受抑制所致，导致产量下降。

土壤的理化性质和质地不同，氮、磷、钾肥配比应不同，针对不同的土壤条件和品种，马铃薯氮、磷、钾肥施用的最佳配比还有待于进一步深入研究。

[参 考 文 献]

[1] 葛晓光. 菜田土壤与施肥[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002: 259~261.

[2] 袁志发, 周静芋. 试验设计与分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 366~385.

[3] 陈修斌, 潘林, 王勤礼. 温室番茄水肥耦合数学模型及其优化方案研究[J]. 南京农业大学学报, 2006, 29(3): 138~141.