

河西走廊加工型马铃薯水肥耦合效应量化管理指标研究^①

张东昱¹, 成军花², 夏叶², 张文斌^{2*}, 张爱霞², 陈修斌³, 李翊华³

(1 甘肃张掖市种子管理稽查站, 甘肃张掖 734000; 2 甘肃张掖市经济作物技术推广站, 甘肃张掖 734000;

3 甘肃河西学院农业与生物技术学院, 甘肃张掖 734000)

摘要: 采用 4 因素二次回归通用旋转组合设计, 研究了灌水量、氮肥、磷肥、钾肥对加工型马铃薯产量的影响, 得到了相应的回归数学模型。结果表明: 4 因素影响加工型马铃薯产量的顺序为灌水量>氮肥>钾肥>磷肥, 各因素间存在交互作用。经过计算机模拟, 得到加工型马铃薯产量达到最高值 46.75 t/hm² 时, 其相对应 H₂O、氮、磷、钾肥用量分别为 2 520 m³/hm²、457.5 kg/hm²、825.0 kg/hm² 和 247.5 kg/hm²。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, 施肥成本、施肥利润、肥料投资效率分别为 0.86 万元/hm²、1.88 万元/hm² 和 2.19 元/元, 栽培效果明显优于其他配比。

关键词: 马铃薯; 水肥耦合; 管理指标

中图分类号: S532

张掖市位于河西走廊中段, 加工型马铃薯是当地主要栽培作物之一, 随着农业产业化结构的战略性调整, 加工型马铃薯市场空间的不断扩大, 种植效益不断提升, 使加工型马铃薯基地规模逐年膨胀, 目前种植面积已达到 3.00 万 hm², 加工型马铃薯已成为当地农业增效和农民增收的支柱产业。近年来, 由于栽培模式单一, 管理技术粗放, 传统管理中的大肥大水的投入, 不仅造成水资源和肥料的浪费, 而且还导致土壤硝酸盐淋失, 微量元素缺乏及环境的污染, 加工型马铃薯产量品质下降、发病率高。目前, 国内外对农作物的水肥耦合技术进行了研究^[1-3], 取得了很大的成绩, 但这些研究大多集中于旱地作物的棉花和设施蔬菜作物方面。而在露地滴灌条件下, 加工型马铃薯的水肥耦合技术研究尚未见系统报道。本研究以加工型马铃薯为材料, 分析灌水量、氮肥、磷肥及钾肥与加工型马铃薯产量的关系, 定量研究水肥耦合效应对加工型马铃薯产量的影响, 从而为加工型马铃薯高产、优质、高效栽培及节水灌溉提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2009—2010 年在甘肃民乐县三堡镇三堡村二社进行。供试土壤是耕灌灰钙土, 0~20 cm 耕层

理化性质: 有机质含量为 11.6 g/kg, 碱解氮 54.0 mg/kg, 速效磷 30.3 mg/kg, 速效钾 192.00 mg/kg, pH 为 8.12, 全盐 1.150 g/kg, CEC 10.8 cmol/kg, 体积质量 1.28 g/cm³, 总孔隙度 49.06%, 土壤质地为沙壤土。

马铃薯参试品种: 大西洋。

1.2 试验设计

试验采用 4 因子 (1/2 实施) 二次回归通用旋转组合设计^[4], 应用 DPS 分析软件, 对试验数据进行分析; 以产量为目标函数, 以灌水量 (m³/hm²)、施氮量 (kg/hm²)、施磷量 (kg/hm²)、施钾量 (kg/hm²) 4 因素为因变量, 构建数学模型。4 因素不同水平的编码值见表 1。

试验设计共 20 个处理, 大垄双行, 试验小区面积 12 m² (1.2×10), 3 次重复。播种时间 2009 年 4 月 15 日, 垄距 110 cm, 垄高 30 cm, 株距 25 cm, 播深 15 cm 左右, 并用细土封好孔口。保苗数 7.50 万株/hm²。滴灌管布置在中间, 滴头间距 0.25 m, 滴头距植株 0.10 cm, 滴头流量 0.98 L/h。滴灌时按各处理灌水定额, 分别计算滴灌延续时间, 然后用闸阀控制, 精确记载流量、灌水量。每次灌水前后测定各处理土壤含水量, 作为灌溉依据。

供试肥料: 氮肥为尿素 (含氮 46%, 经试验得出氮利用率 40%), 计算公式^[5]: 氮肥的利用率 (%) = [(氮

①基金项目: 中央财政支持农业技术推广项目 (2009) 和甘肃农业科技创新项目 (GNCX2011-12) 资助。

* 通讯作者 (zhangwb882003@yahoo.com.cn)

作者简介: 张东昱 (1965—), 男, 甘肃会宁人, 高级农艺师, 主要从事农作物栽培与生理方面的研究。E-mail: zdy6508zdy@sina.com

表 1 全生育期灌水量、氮肥、磷肥、钾肥试验因素水平编码

Table 1 Growth period irrigation and level codes of nitrogen, phosphorus and potassium test levels

变量 (Z_j)	灌水量 (m^3/hm^2)	尿素 (kg/hm^2)	磷酸二氢铵 (kg/hm^2)	硫酸钾 (kg/hm^2)
上星号臂水平 (1.682)	3 525.75	508.65	927.3	323.19
上水平 (1)	3 270.00	457.5	825	292.5
零水平 (0)	2 895.00	382.5	675	247.5
下水平 (-1)	2 520.00	307.5	525	202.5
下星号臂水平 (-1.682)	2 264.25	0	0	0
Δ_j	375	75	150	45

磷钾区植株氮吸收量 - 磷钾区植株氮吸收量) / 肥料氮用量] $\times 100$ (下同); $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ (含 N 18%, 利用率 40%; P_2O_5 46%, 利用率 30%); K_2SO_4 (含 K_2O 50%, 利用率 35%); 氮肥 30% 做基肥, 追肥平均分 2 次,

分别在营养生长初期、盛花期施入; 磷酸二氢铵、硫酸钾做基肥一次施入; 其他田间管理同常规生产。9 月 20 日开始采收, 采收时按各处理分别统计产量。试验处理方案见表 2。

表 2 试验方案

Table 2 Experiment design

处理	X_1 (H_2O)	X_2 (N)	X_3 (P_2O_5)	X_4 (K_2O)	处理	X_1 (H_2O)	X_2 (N)	X_3 (P_2O_5)	X_4 (K_2O)
1	-1	-1	-1	-1	11	0	-1.682	0	0
2	-1	-1	1	1	12	0	1.682	0	0
3	-1	1	-1	1	13	0	0	-1.682	0
4	-1	1	1	-1	14	0	0	1.682	0
5	1	-1	-1	1	15	0	0	0	-1.682
6	1	-1	1	-1	16	0	0	0	1.682
7	1	1	-1	-1	17	0	0	0	0
8	1	1	1	1	18	0	0	0	0
9	-1.682	0	0	0	19	0	0	0	0
10	1.682	0	0	0	20	0	0	0	0

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 3 试验结果, 以产量为目标函数 (Y), 以灌水量 (X_1)、氮肥 (X_2)、磷肥 (X_3)、钾肥 (X_4) 4 因素为控制变量, 对数据进行计算机处理, 得到马铃薯产量对 4 因素的回归数学模型: $Y = 43.52 + 2.86X_1 + 2.27X_2 + 1.76X_3 + 1.98X_4 - 1.34X_1^2 - 1.23X_2^2 - 4.46X_3^2 - 0.57X_4^2 + 0.75X_1X_2 - 1.24X_1X_3 + 0.98X_1X_4 + 0.34X_2X_3 + 0.68X_2X_4 - 3.57X_3X_4$ 。经显著性检验: $F_1 = 4.785 < F_{0.05} = 7.98$, 失拟不显著, 拟合很好。 $F_2 = 5.425 > F_{0.01} = 4.35$, 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: $Y = 43.52 + 2.86X_1 + 2.27X_2 + 1.76X_3 + 1.98X_4 - 1.34X_1^2 - 1.23X_2^2 - 4.46X_3^2 - 0.57X_4^2 - 1.24X_1X_3 - 3.57X_3X_4$ 。

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, 4 因素对产量的影响程度大小为 $X_1 > X_2 > X_4 > X_3$, 即灌水量 > 氮肥 > 钾肥 > 磷肥。

2.2.2 单因子效应分析 将回归模型中的灌水量、氮肥、磷肥、钾肥 4 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。灌水量: $Y_1 = 43.52 + 2.86X_1 - 1.34X_1^2$, 施氮量: $Y_2 = 43.52 + 2.27X_2 - 1.23X_2^2$, 施磷量: $Y_3 = 43.52 + 1.76X_3 - 4.46X_3^2$, 施钾量: $Y_4 = 43.52 + 1.98X_4 - 0.57X_4^2$ 。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 $X_1 = 1.067$, $X_2 = 0.922$, $X_3 = 0.197$, $X_4 = 1.737$ 。当 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 编码值分别为 1.067、0.922、0.197、1.737 水平时, 马铃薯产量达最高; 在其施用水平分别高于或低于极值点 1.067、0.922、0.197、1.737 时, 马铃薯产量都会降低。

表3 各处理产量结果

Table 3 Potato yields of different treatments

处理	产量 (t/hm ²)	处理	产量 (t/hm ²)
1	37.44	11	29.47
2	46.83	12	27.15
3	39.46	13	46.15
4	30.35	14	33.02
5	37.46	15	41.58
6	40.41	16	44.63
7	37.05	17	41.41
8	29.04	18	40.12
9	43.64	19	42.66
10	31.33	20	44.33

注：表中同一处理的产量为3次重复的平均值。

2.2.3 4因子的交互效应分析 对产量模型解析，分别得到 H₂O 与 N、H₂O 与 P、H₂O 与 K、N 与 P、N 与 K、P 与 K 的交互效应分界点。在其施用水平分别低于 1.067 和 0.922、1.067 和 0.197、1.067 和 1.737、0.922 和 0.197、0.922 和 1.737、0.197 和 1.737 时，对产量存在正相关关系，高于此水平时又会呈负相关关系^[6]。

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，分析了灌水量、氮肥、磷肥、钾肥各因子对产量的影响程度，得出最佳组合：H₂O、N、P、K 水平分别为 -1、1、1、0 时，其相对应 H₂O、N、P、K 用量为 2 520 m³/hm²、457.5 kg/hm²、825.0 kg/hm² 和 247.5 kg/hm²，以此量化指标栽培马铃薯，产量可达到最高值 46.75 t/hm²。

3 模型验证及经济效益分析

3.1 试验概况与试验设计

试验于 2010 年 4—10 月在原试验地进行。供试土壤为耕灌灰钙土，0~20 cm 耕层有机质含量为 11.3 g/kg，碱解氮 54.0 mg/kg，速效磷 28.9 mg/kg，速效钾 176.00 mg/kg，pH 为 7.12。

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，重复 3 次，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 4。

表4 各处理灌水量、氮肥、磷肥、钾肥施用量

Table 4 Amount of irrigated water, nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers

处理	灌水量 (m ³ /hm ²)	尿素 (kg/hm ²)	磷酸二氢铵 (kg/hm ²)	硫酸钾 (kg/hm ²)
A	2 520.00	457.50	825.00	247.50
B	2 895.00	508.65	675.00	247.50
CK	2 895.00	382.50	675.00	247.50

3.2 试验结果与分析

不同灌水施肥量对马铃薯产量影响很大，由表 5 可以看出，处理间 A>CK>B，差异达极显著水平。说明由模型选优所得灌水量、氮肥、磷肥和钾肥配比的产量最高，施肥成本、施肥利润、肥料投资效率分别为 0.86 万元/hm²、1.88 万元/hm² 和 2.19 元/元，栽培效果明显优于其他配比。生产上普遍采用的施肥量，产量居中^[7-8]，而由模型选出的较差组合产量最低，说明灌水量、氮肥、磷肥、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。

4 讨论

本试验结果表明，在河西走廊耕灌灰钙土上，马铃薯产量达到最高值 46.75 t/hm² 时，其相对应 H₂O、N、P、K 肥用量分别为 2 520 m³/hm²、457.5 kg/hm²、825.0 kg/hm² 和 247.5 kg/hm²。各因素间存在交互作用，分别得到 H₂O 与 N、H₂O 与 P、H₂O 与 K、N 与 P、N 与 K、P 与 K 的交互效应分界点。在其施肥水平分别低于 1.067 和 0.922、1.067 和 0.197、1.067 和 1.737、0.922 和 0.197、0.922 和 1.737、0.197 和 1.737 时对产量存在正相关关系，高于此水平时又会呈负相关关

表5 不同处理对马铃薯产量的影响

Table 5 Effects of different treatments on potato yield

处理	小区产量 (kg/小区)	产量 (t/hm ²)	增产量 (t/hm ²)	增产值 (万元/hm ²)	施肥成本 (万元/hm ²)	施肥利润 (万元/hm ²)	肥料投资效率 (元/元)
A	51.84	43.22 a A	9.77	2.74	0.86	1.88	2.19
B	40.12	33.45 c C					
CK	45.32	37.76 b B	4.31	1.21	0.58	0.63	1.09

注：马铃薯和水肥价格：马铃薯 2 800 元/t，水价为 1.2 元/m³，尿素 1 450 元/t，磷酸二氢铵 2 900 元/t，硫酸钾 1 820 元/t。

系。灌水量、氮、磷、钾肥 4 因素影响马铃薯产量的顺序为灌水量>氮肥>钾肥>磷肥。

试验结果还证明：在对构建的模型验证试验中，由模型选出的较差组合产量最低，模型选出的最好组合产量最高，而生产上一般肥水用量产量居中，说明灌水量、氮肥、磷肥、钾肥配比失衡，影响了马铃薯生长发育，这主要是由于肥料浓度较高时，同化作用受到抑制所致^[9]，导致产量下降。土壤的理化性质和质地不同，H₂O、N、P、K 肥配比也不同，在河西走廊其他性质的土壤上，马铃薯对 H₂O、N、P、K 最佳配比还有待于进一步深入研究。

参考文献：

- [1] 冯绍元, 王广兴. 滴灌棉花水肥耦合效应的田间试验研究. 中国农业大学学报, 1998, 3(6): 59-62
- [2] 杨丽娟, 张玉龙, 须晖. 设施栽培条件下节水灌溉技术. 沈阳农业大学学报, 2000, 31(1): 130-132
- [3] 杨彬, 陈修斌, 鄂利锋, 许耀照. 温室辣椒水肥耦合效应研究. 土壤, 2009, 41(2): 278-281
- [4] 袁志发, 周静芋. 试验设计与分析. 1 版. 北京: 高等教育出版社, 2000: 366-385
- [5] 白纲义, 黄德明. 蔬菜配方施肥新技术. 1 版. 北京: 中国农业出版社, 1999: 36-38
- [6] 陈修斌, 潘林, 王勤礼, 谢鑫星. 温室番茄水肥耦合数学模型及其优化方案研究. 南京农业大学学报, 2006, 29(3): 138-141
- [7] 井立军, 邹志荣, 刘建辉, 张合一, 刘晓辉. 中棚番茄产量的氮磷钾效应模式及最优施肥参数的确定. 华北农学报, 1999, 14(3): 86-90
- [8] 汪建飞, 邢素芝, 于群英, 李孝良. 结球甘蓝 NKMg 肥配施数学模型的研究. 土壤, 2004, 36(4): 412-415, 429
- [9] 葛晓光. 菜田土壤与施肥. 北京: 中国农业出版社, 2002: 259-261

Study on Quantitative Management Indicators of Water-fertilizer Coupling Effect for Hexi Corridor Processing Potato

ZHANG Dong-yu¹, CHENG Jun-hua², XIA Ye², ZHANG Wen-bin², ZHANG Ai-xia², CHEN Xiu-bin³, LI Yi-hua³

(1 *The Seed Inspection Station, Zhangye, Gansu 734000, China*; 2 *Economic Crops Technology Promotion Stations of Zhangye City, Zhangye, Gansu 734000, China*; 3 *Hexi College of Agriculture and Biotechnology Institute, Zhangye, Gansu 734000, China*)

Abstract: With 4-factor quadratic regression general rotation design, the effects of irrigation, nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers on yield of processing potato were studied and the corresponding regression model were obtained. The results showed that: the effect of the four factors on potato yield was in an order of irrigation>N>K>P. There was interaction between the four factors. The maximum yield of processing potato simulated by computer was 46.75 t/hm², corresponding to irrigated water, N, P, K fertilizer usages of 2 520 m³/hm², 457.5 kg/hm², 825.0 kg/hm² and 247.5 kg/hm². The optimal selection model from nitrogen, phosphorus and potassium ratio of the highest yield, fertilizer costs, fertilizer profits, investment efficiency of fertilizer were 0.86 × 10⁴ Yuan/hm², 1.88 × 10⁴ Yuan/hm² and 2.19 Yuan/Yuan.

Key words: Potato, Water-fertilizer coupling, Management indices