

凉薯97马铃薯原种的扩繁优化模式研究

李佩华¹, 阿来阿呷², 毛慧颖³, 方志荣¹, 蔡光泽¹, 清源¹, 彭正松^{1*}

(1.西昌学院, 四川 西昌 615013; 2.会理县农业农村局, 四川 会理 615013;

3.雅安市农业科学研究所, 四川 雅安 625000)

摘要: 试验旨在优化川西南生态条件下马铃薯原种扩繁技术, 通过采用二次正交旋转组合设计, 以种植密度(X_1)、农家肥(X_2)、复合肥(X_3)、种薯大小(X_4)做决策变量, 分别以单株产量、株高、单位面积产量作目标函数, 建立各因素与目标函数间的数学模型, 研究凉薯97马铃薯原种扩繁优化模式。结果表明:(1)各因素对凉薯97单株产量的影响为:复合肥>种薯大小>种植密度>农家肥;对株高的影响为:农家肥>种薯大小>种植密度>复合肥;对单位面积产量的影响为:种植密度>复合肥>种薯大小>农家肥。(2)试验获得了最高单位面积产量2 405.6 kg/667 m²和最高单株产量0.55 kg/株。通过模拟寻优获得最高的单株产量0.62 kg/株的因素组合为:种植密度为5 000株/667 m²、农家肥2 250 kg/667 m², 复合肥50 kg/667 m², 种薯大小100 g;获得最高单位面积产量2 489.78 kg/667 m²的因素组合为:种植密度5 500株/667 m²、农家肥2 250 kg/667 m²、复合肥50 kg/667 m²、种薯大小80 g。

关键词: 凉薯97; 原种; 扩繁; 优化; 数学模型

中图分类号: S532.74 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-1891(2020)04-0008-09

Study on the Micropropagation and Optimization Model of the Original Seed Potato No.97

LI Peihua¹, ALAI Aga², MAO Huiying³, FANG Zhirong¹, CAI Guangze¹,
QIN Yuan¹, PENG Zhengsong^{1*}

(1.Xichang University, Xichang, Sichuan 615013, China; 2. Huili Agricultural and Rural Bureau, Huili, Sichuan, 615013 China; 3. Yaan Institute of Agricultural Science, Yaan, Sichuan, 625000, China)

Abstract: The experiment aims to optimize the propagation technology of potato stock seed under the ecological conditions in southwest Sichuan province. Quadratic orthogonal rotation combination design is used with decision variables of planting density (X_1), organic fertilizer (X_2), compound fertilizer (X_3) and seed potato size (X_4), and objective functions of yield per plant, plant height and yield so the mathematical model between each factor and the objective function can be established to develop the high yield cultivation model of Liangshan potato No.97. The results of mathematical model show that:(1) The ranking of different effects of each factor on potato yield per plant is as follows: compound fertilizer > seed potato size > density > organic fertilizer; ranking of the effects on plant height is: organic fertilizer > seed potato size > density > compound fertilizer; that on yield is: density > compound fertilizer > seed potato size > organic fertilizer. (2)The highest yield per unit area is 2 405.6 kg/667 m² and the highest yield per plant is 0.55 kg/plant. Using DPS (V9.01 edition) to simulate optimization, the highest yield of 0.62 kg/plant is obtained with density 5 000 plants/667 m², organic fertilizer 2 250 kg /667 m², compound fertilizer 50 kg/667 m², seed potato size 100 g; The highest yield of 2 489.78 kg/667 m² is obtained with density 5 500 plants /667 m², organic fertilizer 2 250 kg/667 m², compound fertilizer 50 kg/667 m², and seed potato size 80 g.

Keywords: Liangshu No.97; original seed; micropropagation; optimization; mathematical model

0 前言

马铃薯的主粮化,对改善人民的饮食结构和

粮食安全有着重要的作用,针对川西南生态特点研究本地马铃薯主栽品种的配套栽培技术有着重要意义^[1-5]。

收稿日期:2020-08-06

基金项目:四川省科技计划项目(2016NZ0056);四川省“十三五”薯类育种攻关项目(2016NYZ0032-4);国家现代农业产业技术体系四川薯类创新团队(川财教[2019]59号)。

作者简介:李佩华(1975—),男,四川邛崃人,研究员,硕士,研究方向:马铃薯育种、栽培、良繁。*通信作者:彭正松(1964—),男,四川安岳人,教授,博士,研究方向:作物遗传育种。

凉山州位于四川省西南部,地形复杂,海拔高,昼夜温差大^[6],适合马铃薯的生长,产量高且品质好。长期以来,马铃薯都是川西南山区彝族人民的主要粮食作物,更是农民经济来源的支撑,种植马铃薯是农户脱贫致富的重要渠道。这一地区关于马铃薯的栽培技术研究较为单一,不能满足生产实际的要求,为此开展筛选马铃薯栽培措施最佳组合方案,对农户降低生产成本及获得高产有着积极的理论指导意义。凉薯97品种^[7]在凉山地区种植较为广泛,此研究旨在进一步为凉薯97科学种植提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于凉山州普格县五道箐镇采洛洛博村,平均海拔2 080 m(东经102°33',北纬27°22'),年平均温度18℃,年平均降雨量910 mm,降雨时间集中在6~8月,无霜期313天。前茬为春玉米,周边为农业种植区。土壤肥力较好,部分灰褐色土壤,其土壤理化性质表现为试验地土壤pH 6.5,全氮(N)3.53 g/kg、全磷(P)1.93 g/kg、全钾(K)13.58 g/

kg、碱解氮(N)305 mg/kg,有机质质量分数3.6%。

1.2 供试材料

供试材料:凉薯97马铃薯原种,种薯块茎大小分别为20、40、60、80、100 g,种薯由西昌学院马铃薯课题组提供。

肥料:农家肥(纯羊粪)和复合肥(总养分≥46%,N-P₂O₅-K₂O 硫酸钾型)^[8]。

1.3 试验方法

1.3.1 试验设计

采用二次正交旋转组合设计,设置种植密度(X_1)、农家肥(X_2)、复合肥(X_3)、种薯大小(X_4)4个因素,每个因素设置5个水平^[9]。试验因素与水平编码表如表1所示,按照设计要求设置36个试验处理小区^[10],36个小区具体的试验实施方案如表2所示。

表1 试验因素与水平编码

试验因素	变化 区间	变量设计水平				
		-2	-1	0	1	2
种植密度(X_1)/(株·667 m ²)	500	4 500	5 000	5 500	6 000	6 500
农家肥(X_2)/(kg·667 m ²)	750	750	1 500	2 250	3 000	3 750
复合肥(X_3)/(kg·667 m ²)	20	10	30	50	70	90
种薯大小(X_4)/g	20	20	40	60	80	100

表2 处理因素实施表

处 理	试验因素				处 理	试验因素			
	种植密度/ (株·667 m ²)	农家肥/ (kg·667 m ²)	复合肥/ (kg·667 m ²)	种薯大小/g		种植密度/ (株·667 m ²)	农家肥/ (kg·667 m ²)	复合肥/ (kg·667 m ²)	种薯大小/g
1	6 000	3 000	70	80	19	5 500	3 750	50	60
2	6 000	3 000	70	40	20	5 500	3 750	50	60
3	6 000	3 000	30	80	21	5 500	2 250	10	60
4	6 000	3 000	30	40	22	5 500	2 250	90	60
5	6 000	1 500	70	80	23	5 500	2 250	50	40
6	6 000	1 500	70	40	24	5 500	2 250	50	100
7	6 000	1 500	30	80	25	5 500	2 250	50	60
8	6 000	1 500	30	40	26	5 500	2 250	50	60
9	5 000	3 000	70	80	27	5 500	2 250	50	60
10	5 000	3 000	70	40	28	5 500	2 250	50	60
11	5 000	3 000	30	80	29	5 500	2 250	50	60
12	5 000	3 000	30	40	30	5 500	2 250	50	60
13	5 000	1 500	70	80	31	5 500	2 250	50	60
14	5 000	1 500	70	40	32	5 500	2 250	50	60
15	5 000	1 500	30	80	33	5 500	2 250	50	60
16	5 000	1 500	30	40	34	5 500	2 250	50	60
17	4 500	2 250	50	60	35	5 500	2 250	50	60
18	6 500	2 250	50	60	36	5 500	2 250	50	60

每个小区面积为13.3 m²,开沟垄土,双行种植,每区3垄,长2.55 m,宽5.23 m,垄距0.85 m,株距随

着密度的变化而变化^[3]。小区间开0.3 m的小沟,四周及区组间开0.5 m深沟,四周种2行保护行,所有

肥料作为底肥施入穴中。

1.3.2 试验实施

2018年3月15日播种,2018年8月25日收获,常规管理。试验的设计以及数据的分析均采用DPS(V9.01版)软件^[11]和Excel软件。

1.3.3 数据记录

在结薯期间,每个小区随机选择30株马铃薯,测量株高,然后折算平均值。收获期期间,每个小区随机选择30株分别称量其单株重,依据称量算出平均单株产量。称量小区总产量,依据小区测产结果,计算亩产量。

2 结果与分析

2.1 单株产量的数学模型及应用

2.1.1 单株产量数学模型的建立

依据试验结果(表3),用DPS(V9.01版)统计分析得出试验4因素与凉薯97单株产量的回归方程如式(1)所示:

$$\begin{aligned}
 Y= & 0.488\ 33+0.010\ 42X_1+0.01375X_2+0.012\ 92X_3+ \\
 & 0.020\ 42X_4-0.028\ 44X_1^2-0.000\ 94X_2^2- \\
 & 0.024\ 69X_3^2-0.009\ 69X_4^2-0.008\ 12X_1X_2+ \\
 & 0.026\ 88X_1X_3-0.016\ 88X_1X_4+0.014\ 38X_2X_3- \\
 & 0.004\ 37X_2X_4-0.041\ 88X_3X_4 \quad (1)
 \end{aligned}$$

式(1)回归方程中,常数项表示各试验因素均在零水平时获得的单株产量,一次项系数(b_1 、 b_2 、 b_3 、

表3 马铃薯高产栽培试验各处理的测量指标

处理	单株产量 (kg·株 ⁻¹)	株高 /cm	单位面积产量 (kg·667 m ⁻²)	处理	单株产量 (kg·株 ⁻¹)	株高 /cm	单位面积产量 (kg·667 m ⁻²)
1	0.47	121.1	2 025.0	19	0.52	123.8	1 992.9
2	0.48	127.3	2 095.3	20	0.48	131.2	2 283.4
3	0.49	118.4	2 311.0	21	0.29	131.4	2 112.0
4	0.42	133.2	1 598.6	22	0.49	124.4	1 463.7
5	0.53	110.2	1 534.1	23	0.41	129.8	1 487.1
6	0.53	110.8	1 431.4	24	0.52	109.4	1 654.7
7	0.44	129.4	2 047.3	25	0.48	115.6	2 318.5
8	0.41	120.6	1 709.0	26	0.55	125.6	2 188.6
9	0.51	126.2	1 693.4	27	0.45	122.2	2 405.6
10	0.55	128.2	1 745.2	28	0.42	126.6	1 829.6
11	0.49	134.6	1 596.5	29	0.46	131.2	1 972.4
12	0.43	131.4	1 349.7	30	0.51	127.8	1 947.1
13	0.35	125.4	1 415.2	31	0.42	121.4	2 244.6
14	0.32	125.4	1 187.0	32	0.41	122.8	2 030.4
15	0.49	131.1	1 975.8	33	0.45	119.6	2 004.9
16	0.35	128.4	1 497.5	34	0.46	120.2	2 360.0
17	0.41	129.8	1 485.1	35	0.45	124.6	1 973.7
18	0.47	119.4	1 640.3	36	0.43	125.4	1 966.8

b_4)表示各试验因素对单株产量的影响程度,二次项系数反映各因素增施用量时对单株产量的影响,交互项系数(b_{12} 、 b_{13} 、 b_{14} 、 b_{23} 、 b_{24} 、 b_{34})反映因素间交互效益。系数的正负表示报酬递增、递减效益。方程是否能够用于模拟分析,还需要对方程进行失拟性和显著性检验。

2.1.2 模型失拟性及显著性检验

对单株产量回归方程进行方差分析和显著性检验。用DPS(V9.01版)软件进行分析数据,得出的结果如表4所示。

表4 单株产量方差分析表

变异来源	平方和	自由度	均方	比值F	P值
X_1	0.002 6	1	0.002 6	0.782 6	0.386 4
X_2	0.004 5	1	0.004 5	1.363 7	0.256 0
X_3	0.004 0	1	0.004 0	1.203 4	0.285 1
X_4	0.010 0	1	0.010 0	3.006 6	0.097 6
X_1^2	0.025 9	1	0.025 9	7.777 3*	0.011 0
X_2^2	0.000 0	1	0.000 0	0.008 5	0.927 6
X_3^2	0.019 5	1	0.019 5	5.861 4*	0.024 6
X_4^2	0.003 0	1	0.003 0	0.902 5	0.352 9
X_1X_2	0.001 1	1	0.001 1	0.317 4	0.579 1
X_1X_3	0.011 6	1	0.011 6	3.473 1	0.076 4
X_1X_4	0.004 6	1	0.004 6	1.369 3	0.255 0
X_2X_3	0.003 3	1	0.003 3	0.993 6	0.330 2
X_2X_4	0.000 3	1	0.000 3	0.092 0	0.764 6
X_3X_4	0.028 1	1	0.028 1	8.431 9**	0.008 5
回归	0.118 4	14	0.008 5	$F_2=2.542$ *	0.038 6
剩余	0.069 9	21	0.003 3		
失拟	0.042 5	10	0.004 3	$F_1=1.709$	0.144 6
误差	0.027 4	11	0.002 5		
总和	0.188 3	35			

注: $F_{0.05(10,11)}=2.86$, $F_{0.05(14,21)}=2.20$,**表示1%显著水平,*表示5%显著水平。

由表4可知: $F_1=1.709 < F_{0.05(10,11)}=2.86$,失拟性不显著,说明试验设计合理,无失拟误差, $F_2=2.542 > F_{0.05(14,21)}=2.2$,达显著水平,回归方程有效,所建立的数学模型与实际生产试验拟合较好,回归方程可用于模拟试验结果^[12]。

2.1.3 单株产量数学模型的分析

2.1.3.1 主效应分析

利用表4中回归系数的F值计算各因素对应变量的贡献值,可分析回归方程中各因素的重要性。使用贡献值计算公式计算,得到各因素对马铃薯单株产量的贡献值如表5所示。

由表5可看出 $\Delta_3 > \Delta_4 > \Delta_1 > \Delta_2$,所以各因素对马铃薯单株产量的影响为:复合肥>种薯大小>种植密度>农家肥。

表5 单因素对单株产量贡献值

因素	X_1	X_2	X_3	X_4
贡献值(Δ_j)	0.871	0.267	1.270	1.108

注:贡献值计算公式为 $\delta_j=0(F \leq 1)$ 或 $\delta_j=1(F \geq 1)$; $\Delta_j = \delta_j + 1/2 \sum_{i=j}^m \delta_{ij} + \delta_{ij}$ 。

2.1.3.2 单因素效应分析

采用“降维法”^[13]对因素的主效益进一步分析。确定其他3个因素为零水平,得出这一因素对单株产量关系的数学模型^[14]。以观察单株产量在此因素的不同水平下的变化趋势。各因素与单株产量的方程关系式为式(2)~(5):

$$Y_1 = 0.48833 + 0.01042X_1 - 0.02844X_1^2 \quad (2)$$

$$Y_2 = 0.48833 + 0.01375X_2 - 0.00094X_2^2 \quad (3)$$

$$Y_3 = 0.48833 + 0.01292X_3 - 0.02469X_3^2 \quad (4)$$

$$Y_4 = 0.48833 + 0.02042X_4 - 0.00969X_4^2 \quad (5)$$

将各水平编码值代入以上各方程式得出表5,然后以各水平为横轴,在该水平下对应的因素效益作为纵轴画出各个二次函数的抛物线,如图1所示,观察单株产量的变化趋势。

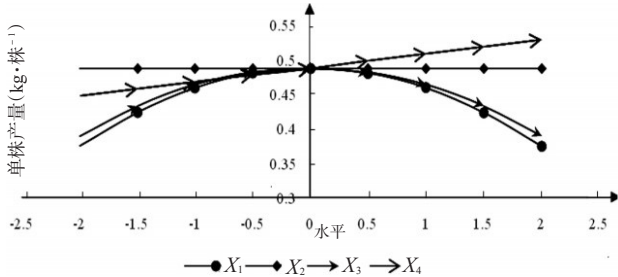


图1 单株产量效益分析图

由图1可看出,在控制其他水平均为零水平时, X_2 、 X_4 的抛物线图形呈递增趋势,说明在所设计的水平下,增加农家肥施用量、增大种薯大小会提高马铃薯单株平均产量。而继续增加密度,增加复合肥施用量会降低马铃薯单株平均产量。

2.1.3.3 交互效应分析

由表5方差分析表中可看出, X_3X_4 交互项显著,说明马铃薯的单株平均产量不仅跟种植密度、农家肥、复合肥、种薯大小的单因素效益有关,还与交互效益有关,运用降维法控制 X_1 、 X_2 的水平为零水平,得到 X_3 、 X_4 交互作用的偏回归解析数学子模型为式(6):

$$Y = 0.48833 + 0.01292X_3 + 0.02042X_4 - 0.02469X_3^2 - 0.00969X_4^2 - 0.04188X_3X_4 \quad (6)$$

由式(6)可得出产量值(表6),随着复合肥(X_3)的减少,种薯大小(X_4)的增大,马铃薯的单株平均产量随之增加,当 X_3 编码水平为-1.5、 X_4 编码水平为2时获得最高单株产量为0.5992 kg/株。

表6 复合肥与种薯大小2因素的互作效应

水平 X_3	X_4 编码值								
	-2.0	-1.5	-1.0	-0.5	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0
2.0	0.5162	0.4846	0.4529	0.4212	0.3896	0.3579	0.3262	0.2946	0.2629
1.5	0.5176	0.4964	0.4752	0.4540	0.4328	0.4116	0.3904	0.3692	0.3480
1.0	0.5066	0.4958	0.4851	0.4744	0.4636	0.4529	0.4422	0.4315	0.4207
0.5	0.4832	0.4829	0.4827	0.4824	0.4822	0.4819	0.4816	0.4814	0.4811
0.0	0.4475	0.4577	0.4679	0.4781	0.4883	0.4985	0.5088	0.5190	0.5292
-0.5	0.3995	0.4201	0.4408	0.4615	0.4822	0.5028	0.5235	0.5442	0.5649
-1.0	0.3391	0.3702	0.4014	0.4325	0.4636	0.4948	0.5259	0.5571	0.5882
-1.5	0.2663	0.3079	0.3496	0.3912	0.4328	0.4744	0.5160	0.5576	0.5992
-2.0	0.3275	0.3600	0.3925	0.4250	0.4575	0.4900	0.5225	0.5550	0.5875

由单株产量的曲面图(图2)也可以得出,当 X_3 编码水平为-1.5、 X_4 编码水平为2时获得最高单株产量为0.5992 kg/667 m²。

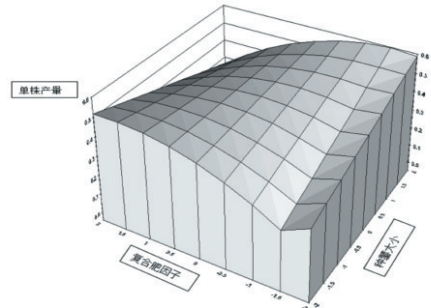


图2 单株产量曲面图

2.1.3.4 最高单株产量的因素组合

用DPS(V9.01版)软件处理数据可直接得出:当 X_1 编码水平为-1、 X_2 编码水平为-2、 X_3 编码水平为-2、 X_4 编码水平为2时,方程(1)有最大值0.62。即在所设计的[-2,2]水平内,种植密度为5000株/667 m²、农家肥为750 kg/667 m²、复合肥为10 kg/667 m²、种薯大小为100 g时,可以获得0.62 kg/株的马铃薯最高单株产量。

2.1.3.5 单株产量的优化方案

采用频数分析法^[12],依据建立的株高数学模型,在各因素的编码水平为[-2,2],各变量步长均取为1^[12]。在计算机上,用DPS(V9.01版)软件进行模拟寻优获得马铃薯单株产量大于0.45 kg/株的技术方案有210个,各项参数及主要因素措施如表7所示。

表7 马铃薯原种产量高于0.45 kg/株的综合因素措施

	因素			
	X_1	X_1	X_1	X_1
加权平均数	0.000	0.000	-0.0950	0.2380
标准误差	0.0740	0.0980	0.0890	0.1010
95%置信区间	-0.145~0.145	-0.191~0.191	-0.269~0.079	0.041~0.436
优化产量方案	5427.5~5572	2106.7~2393	44.6~55	60.8~68.7

由表7分析得出,马铃薯凉薯97单株产量高于0.45 kg/株的优化方案为:密度为5 427.5~5 572株/667 m²、农家肥为2 106.7~2 393 kg/667 m²、复合肥为44.6~55 kg/667 m²、种薯大小为60.8~68.7 g。

2.2 马铃薯株高的数学模型及应用

2.2.1 株高的数学模型的建立

根据试验结果(表3)用DPS软件求得试验4因素与凉薯97株高的回归方程式(7):

$$Y=123.583\ 33-3.354\ 17X_1+2.245\ 83X_2-2.770\ 83X_3-2.070\ 83X_4+0.288\ 54X_1^2+1.013\ 54X_2^2+1.113\ 54X_3^2-0.961\ 46X_4^2+1.181\ 25X_1X_2-0.743\ 75X_1X_3-1.043\ 75X_1X_4+1.431\ 25X_2X_3-1.918\ 75X_2X_4-0.543\ 75X_3X_4 \quad (7)$$

在式(7)中,常数项表示各试验因素均在零水平时获得的株高,一次项系数表示各试验因素对株高的影响程度,二次项系数反映各因素增施用量时对株高的影响,交互项系数反映因素间的交互效益。其中系数的正负表示报酬递增,递减效益。方程是否能够用于模拟分析,还需要对方程进行失拟性方差和显著性方差检验。

2.2.2 数学模型失拟性及显著性检验

对株高回归数学模型进行方差分析和显著性检验。用DPS(V9.01版)软件进行分析数据,得到的结果如表8所示。

表8 株高试验结果方差分析表

变异来源	平方和	自由度	均方	比值F	P值
X ₁	270.010 4	1	270.010 4	12.140 4**	0.002 2
X ₂	121.050 4	1	121.050 4	5.442 8*	0.029 7
X ₃	184.260 4	1	184.260 4	8.284 9**	0.009 0
X ₄	102.920 4	1	102.920 4	4.627 6*	0.043 3
X ₁ ²	2.664 2	1	2.664 2	0.119 8	0.732 7
X ₂ ²	32.872 5	1	32.872 5	1.478 0	0.237 6
X ₃ ²	39.679 2	1	39.679 2	1.784 1	0.195 9
X ₄ ²	29.580 9	1	29.580 9	1.330 0	0.261 8
X ₁ X ₂	22.325 6	1	22.325 6	1.003 8	0.327 8
X ₁ X ₃	8.850 6	1	8.850 6	0.397 9	0.535 0
X ₁ X ₄	17.430 6	1	17.430 6	0.783 7	0.386 0
X ₂ X ₃	32.775 6	1	32.775 6	1.473 7	0.238 2
X ₂ X ₄	58.905 6	1	58.905 6	2.648 6	0.118 6
X ₃ X ₄	4.730 6	1	4.730 6	0.212 7	0.649 4
回归	928.057 2	14	66.289 8	F ₂ =2.981*	0.020 0
剩余	467.052 5	21	22.240 6		
失拟	275.415 8	10	27.541 6	F ₁ =1.581	0.180 6
误差	191.636 7	11	17.421 5		
总和	1 395.109 7	35			

注:F_{0.05(10,11)}=2.86,F_{0.05(14,21)}=2.20,**表示1%显著水平,*表示5%显著水平。

由表8可知:F₁=1.581<F_{0.05(10,11)}=2.86,失拟性不显著,说明试验设计合理,无失拟误差;F₂=2.981>F_{0.05(14,21)}=2.2,回归达5%显著水平,回归方程有效。结合二者,说明建立的数学模型与实际生产试验拟合较好,回归方程可用于分析试验结果。

2.2.3 株高数学模型的分析

2.2.3.1 主效应分析

利用表8中回归系数的F值计算各因素对应变量的贡献值,可分析回归方程中各因素的重要性。使用贡献值计算公式计算,得到各因素对马铃薯株高的贡献值如表9所示。

表9 单因素对株高的贡献值

因素	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
贡献值(Δ _j)	0.920	1.453	0.439	1.095

注:贡献值计算公式为δ_j=0(F≤1)或δ_j=1(F≥1);Δ_j=δ_j+

$$1/2 \sum_{i=1}^m \delta_{ij} + \delta_{ij}。$$

由表9可看出,Δ₂>Δ₄>Δ₁>Δ₃,所以各因素对马铃薯株高的影响为农家肥>种薯大小>种植密度>复合肥。

2.2.3.2 单因素效应分析

采用“降维法”对因素的主效益进一步分析。确定其他3个因素为零水平,可得出这一因素对株高关系的数学模型^[14]。以观察株高在此因素的不同水平下的变化规律。各个因素与株高的方程关系式为式(8)~(11):

$$Y_1=123.583\ 33-3.354\ 17X_1+0.288\ 54X_1^2 \quad (8)$$

$$Y_2=123.583\ 33+2.245\ 83X_2+1.013\ 54X_2^2 \quad (9)$$

$$Y_3=123.583\ 33-2.770\ 83X_3+1.113\ 54X_3^2 \quad (10)$$

$$Y_4=123.583\ 33-2.070\ 83X_4-0.961\ 46X_4^2 \quad (11)$$

将各水平编码带入式(8)~(11),然后以各水平为横轴,在该水平下的因素效益作为纵轴画出各个二次函数的抛物线,观察株高的变化趋势,如图3所示。

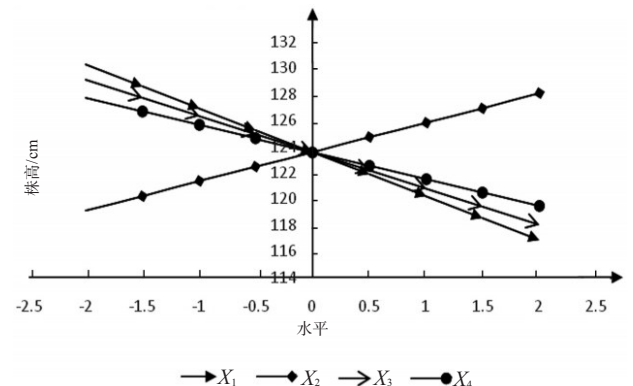


图3 株高效益分析

从图3可知, X_2 因素抛物线变化趋势为递增。说明在本文设计的试验范围内, 农家肥在其他因素零水平时株高会随着农家肥的增加而增加; 而 X_1 、 X_3 、 X_4 增加, 株高呈现递减趋势, 说明扩大种植密度, 增施复合肥、增大种薯大小会降低株高。

2.2.3.3 株高试验因素的交互效应

从方差分析(表8)中可看出, 因素间的交互项未达显著水平, 但因素间的交互效益对株高还是有影响的; 回归方程的系数中, X_2X_3 项的系数为正值, 说明因素间呈正相关, 说明在一定范围内, 种植密度与农家肥、种植密度与种薯大小搭配使用量可增加马铃薯的株高; X_1X_2 、 X_1X_3 、 X_1X_4 、 X_2X_4 、 X_3X_4 的系数负值, 说明因素间呈负相关, 则种植密度与农家肥、农家肥与复合肥增加、农家肥与种薯大小、复合肥与种薯大小间具有互补作用。

2.2.3.4 株高优化方案

采用频数分析法, 根据试验所建立的株高数学模型, 在各因素的编码水平为[-2, 2]时, 各变量步长均取为 1^[13]。用 DPS(V9.01 版) 软件进行分析获得马铃薯株高技术方案有 625 个, 其中进行模拟优化得出株高在 110 cm 以下的方案有 29 个, 各项参数及主要因素措施如表 10 所示。

表 10 株高 102.7 ~ 110 cm/株的综合因素措施

	X_1	X_2	X_3	X_4
置信区间	1.483 ~ 1.971	-1.714 ~ -0.922	-1.329 ~ 1.853	0.922 ~ 1.714
优化株高方案	6241 ~ 6485	964 ~ 1558	23 ~ 87	78 ~ 94

对模型分析得, 凉薯 97 株高在 102.7 ~ 110 cm/株的优化方案为: 种植密度 6 241 ~ 6 485 株/667 m²、农家肥 964 ~ 1 558 kg/667 m²、复合肥 23 ~ 87 kg/667 m²、种薯大小 78 ~ 94 g。

2.3 凉薯 97 产量的数学模型及应用

2.3.1 产量的数学模型的建立

根据试验结果(表3), 用 DPS(V9.01 版) 软件统计分析得试验 4 因素与凉薯 97 产量的回归方程式如式(12)所示:

$$Y = 2\ 103.504\ 17 + 108.406\ 25X_1 + 91.597\ 92X_2 - 93.97708X_3 + 96.664\ 58X_4 - 145.892\ 19X_1^2 - 2.029\ 69X_2^2 - 89.604\ 69X_3^2 - 143.854\ 69X_4^2 + 62.428\ 12X_1X_2 - 12.596\ 88X_1X_3 + 11.353\ 12X_1X_4 + 147.815\ 63X_2X_3 - 19.396\ 87X_2X_4 - 97.934\ 38X_3X_4 \quad (12)$$

式(12)中常数项表示各试验因素均在零水平时获得的产量, 一次项系数(b_1 、 b_2 、 b_3 、 b_4)表示各试验因素对产量的影响, 二次项系数反映各因素增施用量对产量的影响, 交互项系数(b_{12} 、 b_{13} 、 b_{14} 、 b_{23} 、 b_{24} 、

b_{34})反映互作效益。其中系数的正负表示报酬递减效益。方程是否能用于模拟分析, 还需要对方程进行失拟性和显著性检验。

2.3.2 数学模型失拟性及显著性检验

对产量数学模型进行方差分析和显著性检验。用 DPS(V9.01 版) 软件进行分析数据, 得出产量的方差分析, 如表 11 所示。

表 11 产量试验结果方差分析表

变异来源	平方和	自由度	均方	比值 F	P 值
X_1	282 045.960 9	1	282 045.960 9	8.9054**	0.007 1
X_2	201 364.280 1	1	201 364.280 1	6.358*	0.019 8
X_3	211 960.612 6	1	211 960.612 6	6.6925*	0.017 2
X_4	224 257.000 1	1	224 257.000 1	7.0808*	0.014 6
X_1^2	681 104.972 0	1	681 104.972 0	21.5055**	0.000 1
X_2^2	131.828 2	1	131.828 2	0.0042	0.949 2
X_3^2	256 928.000 7	1	256 928.000 7	8.1124**	0.009 6
X_4^2	662 213.475 7	1	662 213.475 7	20.909**	0.000 2
X_1X_2	62 356.332 7	1	62 356.332 7	1.9689	0.175 2
X_1X_3	2 538.900 2	1	2 538.900 2	0.0802	0.779 9
X_1X_4	2 062.295 2	1	2 062.295 2	0.0651	0.801 1
X_2X_3	349 591.343 9	1	349 591.343 9	11.0382**	0.003 2
X_2X_4	6 019.820 2	1	6 019.820 2	0.1901	0.667 3
X_3X_4	153 458.268 9	1	153 458.268 9	4.8454*	0.039 0
回归	3 096 033.091 0	14	221 145.220 8	$F_2=6.983**$	0.000 3
剩余	665 094.988 7	21	31 671.189 9		
失拟	267 452.441 5	10	26 745.244 1	$F_1=0.740$	0.680 8
误差	397 642.547 3	11	36 149.322 5		
总和	3 761 128.080 0	35			

注: $F_{0.05(10,11)}=2.86$, $F_{0.05(14,21)}=2.20$, **表示 1% 显著水平, *表示 5% 显著水平。

由表 11 可知, $F_1=0.740 < F_{0.05(10,11)}=2.86$, 失拟性不显著, 说明试验设计合理, 无失拟误差, $F_2=6.983 > F_{0.05(14,21)}=2.2$, 回归方程达 5% 显著水平, 数学模型有效。综合二者, 说明建立的数学模型与实际生产试验拟合较好, 可用于测量分析试验结果。

2.3.3 产量数学模型的分析

2.3.3.1 主效应分析

利用回归系数的 F 值计算各因素对应变量的贡献值, 可分析回归方程中各因素的重要性。使用贡献值计算公式计算, 得到各因素对马铃薯产量的贡献值如表 12 所示。

表 12 单因素对产量贡献值

因素	X_1	X_2	X_3	X_4
贡献值(Δ_j)	2.087	1.089	1.274	1.256

注: 贡献值计算公式为 $\delta_j=0 (F \leq 1)$ 或 $\delta_j=1 (F \geq 1)$; $\Delta_j=\delta_j+$

$$1/2 \sum_{j=1}^m \delta_{ij} + \delta_{ij}。$$

由表 12 可看出, $\Delta_1 > \Delta_3 > \Delta_4 > \Delta_2$, 所以各因素对马铃薯产量的影响为: 种植密度 > 复合肥 > 种薯大小 > 农家肥。

2.3.3.2 单因素效应分析

采用“降维法”^[13]对因素的主效益进一步分析。确定其他 3 个因素为零水平, 可得出这一因素对产量关系的数学模型^[14]。以观察此因素在不同水平下产量的变化规律。各个因素与产量的方程关系式为式(13)~(16):

$$Y_1 = 2\ 103.504\ 17 + 108.406\ 25X_1 - 145.892\ 19X_1^2 \quad (13)$$

$$Y_2 = 2\ 103.504\ 17 + 91.597\ 92X_2 - 2.029\ 69X_2^2 \quad (14)$$

$$Y_3 = 2\ 103.504\ 17 - 93.977\ 08X_3 - 89.604\ 69X_3^2 \quad (15)$$

$$Y_4 = 2\ 103.504\ 17 + 96.664\ 58X_4 - 143.854\ 69X_4^2 \quad (16)$$

将各水平编码带入以上各方程式, 然后以各水平为横轴, 在该水平下的因素效益作为纵轴画出各个二次函数的抛物线, 观察产量的变化趋势, 如图 4 所示。

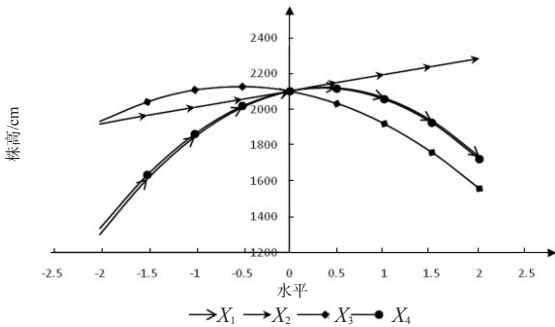


图 4 产量效益分析图

图 4 可看出, X_1, X_3, X_4 抛物线变化趋势为先递增, 后递减, 出现了最高点。说明所设计的试验范围内, 说明种植密度、复合肥、种薯大小 3 个因素在其他因素为零水平时能达到最高产量, 继续增加密度, 增加复合肥使用量, 种薯大小增加会减少马铃薯的产量, 而 X_2 只呈现递增趋势, 说明在其他因素为零水平时还未出现峰值, 继续增加施用量可提高马铃薯产量。

2.3.3.3 交互效应的分析

由表 11 方差分析表中可看出, X_2X_3 与 X_3X_4 交互项显著, 说明马铃薯的产量不仅跟种植密度、农家肥、复合肥、种薯大小的单因素效益有关, 还与交互效益有关, 运用降维法控制 X_1, X_4 的水平为零水平, 得到 X_2, X_3 交互作用的偏回归解析数学子模型为式(17):

$$Y = 2\ 103.504\ 17 + 91.597\ 92X_2 - 93.977\ 08X_3 - 2.029\ 69X_2^2 - 89.604\ 69X_3^2 + 147.815\ 63X_2X_3 \quad (17)$$

式(17)可得出产量值(表 13), 随着农家肥(X_2)的增加, 复合肥(X_3)的增加, 马铃薯的产量随之增加, 当 X_2 编码水平为 2、 X_3 编码水平为 1 时获得最高产量为 2 398.7 kg/667 m²。

表 13 农家肥与复合肥两因素的交互效益

X_2 编码	X_3 编码									
	-2.0	-1.5	-1.0	-0.5	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	
2.0	1525.0	1782.6	1995.4	2163.5	2286.7	2365.1	2398.7	2387.6	2331.6	
1.5	1627.0	1847.7	2023.6	2154.6	2240.9	2282.4	2279.0	2230.9	2138.0	
1.0	1729.0	1912.7	2051.7	2145.8	2195.1	2199.6	2159.3	2074.2	1944.4	
0.5	1831.0	1977.8	2079.8	2136.9	2149.3	2116.9	2039.6	1917.6	1750.7	
0.0	1933.0	2042.9	2107.9	2128.1	2103.5	2034.1	1919.9	1760.9	1557.1	
-0.5	2035.1	2107.9	2136.0	2119.2	2057.7	1951.4	1800.2	1604.3	1363.5	
-1.0	2137.1	2173.0	2164.1	2110.4	2011.9	1868.6	1680.5	1447.6	1169.9	
-1.5	2239.1	2238.0	2192.2	2101.6	1966.1	1785.9	1560.8	1290.9	0976.3	
-2.0	2341.1	2303.1	2220.3	2092.7	1920.3	1703.1	1441.1	1134.3	0782.7	

产量曲面图如图 5 所示, 也可以得出当 X_2 编码水平为 2、 X_3 编码水平为 1 时获得最高产量为 2 398.7 kg/667 m²。

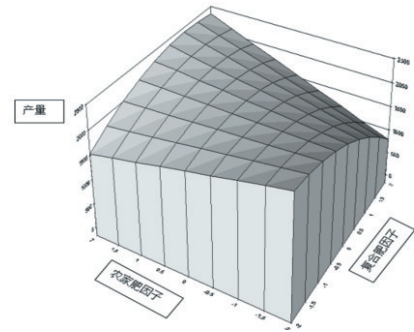


图 5 农家肥与复合肥交互对产量的影响

运用降维法控制 X_1, X_2 的水平为零水平, 得到 X_3, X_4 交互作用的偏回归解析数学子模型为式(18):

$$Y = 2\ 103.504\ 17 - 93.977\ 08X_3 + X_4 - 89.604\ 69X_3^2 - 143.854\ 69X_4^2 - 97.934\ 38X_3X_4 \quad (18)$$

式(18)可得出, 复合肥与种薯大小交互项呈负相关, 编码值取相反方向时会提高产量。当 X_3 编码水平为 1、 X_4 编码水平为 0.5 时获得最高产量为 2 169.2 kg/667 m²(表 14)。

表 14 复合肥与种薯大小 2 因素的交互效益

X_3 编码	X_4 编码									
	-2.0	-1.5	-1.0	-0.5	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	
2.0	1180.1	1382.3	1512.5	1570.8	1557.1	1471.6	1314.1	1084.7	783.3	
1.5	1286.0	1512.6	1667.3	1750.1	1760.9	1699.8	1566.8	1361.9	1085.0	
1.0	1347.0	1598.2	1777.3	1884.6	1919.9	1883.3	1774.8	1594.3	1342.0	
0.5	1363.3	1638.9	1842.6	1974.3	2034.1	2022.0	1938.0	1782.0	1554.1	
0.0	1334.8	1634.8	1863.0	2019.2	2103.5	2115.9	2056.3	1924.8	1721.4	
-0.5	1261.4	1586.0	1838.6	2019.3	2128.1	2164.9	2129.9	2022.9	1843.9	
-1.0	1143.3	1492.3	1769.4	1974.6	2107.9	2169.2	2158.6	2076.1	1921.7	
-1.5	980.3	1353.8	1655.4	1885.1	2042.9	2128.7	2142.6	2084.5	1954.6	
-2.0	772.6	1170.6	1496.7	1750.8	1933.0	2043.3	2081.7	2048.2	1942.7	

由曲面图(图6)可知,当 X_3 编码水平为1、 X_4 编码水平为0.5时获得最高产量为2 169.2 kg/667 m²。

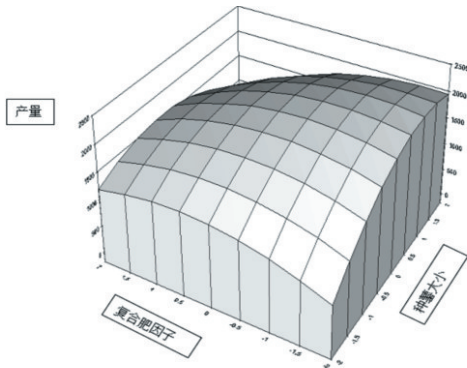


图6 复合肥与种薯大不互作对产量的影响

2.3.3.4 最高产量的因素组合

用DPS(V9.01)软件处理数据可得出:当 X_1 编码水平为0、 X_2 编码水平为-2、 X_3 编码水平为-2、 X_4 编码水平为1时,方程有最大值2 489.78。在所设计的[-2,2]水平内,种植密度为5 500株/667 m²、农家肥为2 250 kg/667 m²、复合肥为50 kg/667 m²,种薯大小为80 g,可以获得2 489.78 kg/667 m²的马铃薯产量。

2.3.3.5 高产优化方案

采用频数分析法,根据试验结果建立的产量数学模型,在各因素的编码水平为[-2,2]时,各变量步长均取为1^[12]。用DPS(V9.01版)软件进行模拟寻优获得马铃薯产量的技术方案有256个,各项参数及主要因素措施如表15所示。

表15 马铃薯原种产量的综合因素措施

产量 (kg·667 m ²)	因素			
	种植密度(X_1) /(株·667 m ²)	农家肥(X_2) /(kg·667 m ²)	复合肥(X_3) /(kg·667 m ²)	种薯大小(X_4) /g
>2 000	5 603~5 808	2 114~2 643	37~48	64~73
1 700~2 000	5 391~5 656	2 230~2 602	44~54	57~67
1 300~1 700	5 330~5 606	2 229~2 622	48~59	54~65
<1 300	5 123~5 334	2 158~2 627	52~65	63~75

通过对以上数学模型的频数分析得出,凉薯97产量高于2 000 kg/667 m²的优化方案有49套,即:种植密度5 603~5 808株/667 m²、农家肥2 114~2 643 kg/667 m²、复合肥37~48 kg/667 m²、种薯大小为64~73 g。产量在1 700~2 000 kg/667 m²时有73套,即种植密度为5 391~5 656株/667 m²、农家肥为2 230~2 602 kg/667 m²、复合肥为44~54 kg/667 m²、种薯大小为57~67 g。产量在1 300~1 700 kg/667 m²时有83套,即种植密度为5 330~5 606株/667 m²、农家肥为2 229~2 622

kg/667 m²、复合肥为48~59 kg/667 m²、种薯大小为54~65 g。产量在1 300 kg/667 m²以下时有51套,即种植密度为5 123~5 334株/667 m²、农家肥为2 158~2 627 kg/667 m²、复合肥为52~65 kg/667 m²、种薯大小为63~75 g。

3 结论与讨论

3.1 结论

3.1.1 单株产量

各因素对马铃薯单株产量影响大小为:复合肥>种植密度>种薯大小>农家肥。获得最高单株产量0.62 kg/株的因素组合为:种植密度5 000株/667 m²、农家肥750 kg/667 m²,复合肥10 kg/667 m²,种薯大小100 g。凉薯97单株产量高于0.45 kg/株的优化方案为:种植密度5 427.5~5 572株/667 m²、农家肥2 106.7~2 393 kg/667 m²、复合肥44.6~55 kg/667 m²、种薯大小60.8~68.7 g。

3.1.2 株高

各因素对株高影响大小为:农家肥>种薯大小>种植密度>复合肥。凉薯97株高在102.7~110 cm/株的优化方案为:种植密度6 241~6 485株/667 m²、农家肥964~1 558 kg/667 m²、复合肥23~87 kg/667 m²、种薯大小78~94 g。

3.1.3 单位面积产量

根据贡献值,各因素对马铃薯单位面积产量的影响为种植密度>复合肥>种薯大小>农家肥。获得最高单位面积产量2 489.78 kg/667 m²时各个因素的组合为:种植密度5 500株/667 m²、农家肥750 kg/667 m²,复合肥10 kg/667 m²,种薯大小80 g。马铃薯凉薯97单位面积产量高于2 000 kg/667 m²的优化方案有49套,即种植密度5 603~5 808株/667 m²、农家肥2 114~2 643 kg/667 m²、复合肥37~48 kg/667 m²、种薯大小64~73 g。单位面积产量在1 700~2 000 kg/667 m²时有73套,即种植密度5 391~5 656株/667 m²、农家肥2 230~2 602 kg/667 m²、复合肥44~54 kg/667 m²、种薯大小57~67 g。单位面积产量在1 300~1 700 kg/667 m²时有83套,即种植密度5 330~5 606株/667 m²、农家肥2 229~2 622 kg/667 m²、种薯大小54~65 g。单位面积产量在1 300 kg/667 m²以下时有51套,即种植密度5 123~5 334株/667 m²、农家肥2 158~2 627 kg/667 m²、复合肥52~65 kg/667 m²、种薯大小63~75 g。

3.2 讨论

用二次正交旋转组合设计方法设计,以马铃薯

种植密度、农家肥、复合肥及种薯大小做变量,分别以马铃薯的单株产量、株高、单位面积产量为目标函数。研究凉薯97马铃薯原种高产栽培模式,各试验因素的影响都达到5%显著水平。对数学模型进行分析得出:复合肥对马铃薯单株产量影响最大、农家肥对马铃薯株高影响最大、种植密度对马铃薯单位面积产量影响最大。

种植密度、农家肥、复合肥、种薯大小都影响着单株产量、株高以及单位面积产量,且在农户种植生产中,单株产量和株高也会间接影响马铃薯的单位面积产量。通常,单株产量越高,单位面积产量越高,株高在适宜范围内单位面积产量最高,所以在生产过程中应该适当提高单株产量,控制株高在一定范围内,从而获得马铃薯高产。此外,种植密度、农家肥、复合肥、种薯大小会直接影响马铃薯

薯的单位面积产量,通常在种植密度 4 500 ~ 7 500 株 /667 m²随着种植密度的增加产量呈上升趋势^[15];农家肥与复合肥也是农户经常使用的肥料,适当施用农家肥、氮肥以及磷肥都与产量成正效应^[16];种薯大小也是马铃薯产量的关键因素,通常农户为节约成本,会将马铃薯切块或者选择较小的马铃薯进行种植,但是马铃薯的产量会随着种薯大小等的增大而增大^[17]。所以这些因素间的搭配使用,直接影响了马铃薯的产量,进而影响了农户的经济收入。这些因素除了各自的主效应外,还有它们的互作效应对马铃薯农艺性状也有重要影响,因此合理搭配这些因素的使用技术,也具有关键作用。本试验的研究可为西南高山生态马铃薯肥料协同使用提供参考。

参考文献:

[1] 陈雨,杨正明,石峰,等.微肥配施对瓦布贝母产量和总生物碱含量的影响[J].核农学报,2018,32(11):2258-2266.

[2] 继凤,冯霞,王悦,等.湘春豆25号秋播高产栽培技术研究[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2007(5):530-534.

[3] 黄科,叶纨芝,余小林,等.农杆菌介导的芥蓝遗传转化体系的建立[J].细胞生物学杂志,2007(1):147-152.

[4] 李佩华.四川省凉山州马铃薯生产现状及发展对策思考[J].中国马铃薯,2002(6):376-377.

[5] 张毅,方志荣,彭正松,等.马铃薯高产栽培的最优平衡不完全区组试验设计与分析[J].西昌学院学报(自然科学版),2018,32(3):20-23.

[6] 朱红秀,曹艳秋,房鹏.凉山州2012年马铃薯晚疫病偏重发生的气候特征[J].西昌学院学报(自然科学版),2013,27(2):11-15.

[7] 肖仲然,刘一民.马铃薯新品种凉薯97简介[J].中国马铃薯,1992(1):64.

[8] 成玛丽,樊艳,玫秀.脱毒马铃薯费乌瑞它高产栽培技术研究[J].耕作与栽培,2009(2):17-18.

[9] 刘铁梅,邹薇,张迁维,等.应用数学模型对矮啤大麦S500高产栽培及经济效应的研究[J].生物数学学报,2008,23(4):695-702.

[10] 胡建凤,刘桂华,张丽君.毕节中海拔地区马铃薯超高产栽培的数学模型研究[J].贵州农业科学,2015,43(6):191-194.

[11] 张恩盈,赵永厚,宋希云.DPS统计软件在试验设计与统计方法课程教学中的应用[J].教育现代化,2017,4(13):48-49.

[12] 王朝海,张绍荣,龙国,等.费乌瑞它马铃薯原种高产栽培模式研究[J].现代农业科技,2010(1):116-117.

[13] 刘铁梅,邹薇,刘铁芳,等.不同冬油菜品种比叶面积的多因子分析[J].作物报,2006(7):1083-1089.

[14] 梁金平,张志勇,吴文明,等.马铃薯新品种闽薯1号高产栽培农艺措施研究[J].中国马铃薯,2008(1):28-30.

[15] 金传旭,王达群,杨元慈.不同种植密度对平塘县脱毒马铃薯产量的影响[J].农技服务,2017,34(19):40-41.

[16] 李国琴,李秉雄,王顺江.农家肥、氮肥、磷肥配施对马铃薯产量的影响[J].中国马铃薯,2005(5):10-13.

[17] 李阳,刘世海,丁世成,等.整薯大小与栽培密度对马铃薯生长发育及产量的影响[J].湖南农业科学,2011(11):49-52+55.

[18] 张亚琴,雷飞益,陈雨,等.锌硼钼配施对川白芷药材农艺性状与产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2018,24(3):769-778.

[19] 赵玉霞,周芳,李雪芳,等.氮硫配施对冬小麦氮硫吸收转运及利用效率的影响[J].中国生态农业学报,2014,22(9):1020-1028.