

doi:10.16104/j.issn.1673-1891.2021.02.004

“西芋 3 号”高产栽培密度和施肥量研究

李佩华¹, 李 锐¹, 毛慧颖², 方志荣¹, 清 源¹, 蔡光泽¹, 彭正松^{1*}

(1.西昌学院, 四川 西昌 615013; 2.雅安市农科所, 四川 雅安 625000)

摘 要: [目的] 研究适宜于川西南高海拔山区马铃薯肥料施用及种植密度的优化种植技术模式。 [方法] 采用二次正交旋转组合设计, 研究 N、P、K 肥及种植密度对“西芋 3 号”产量、主茎数及净光合速率的影响。 [结果] 各试验因子对净光合速率影响的重要程度为: 氮肥>磷肥>钾肥>种植密度; 对主茎数的影响重要程度为: 氮肥>种植密度>磷肥>钾肥; 对产量影响的重要程度为: 钾肥>氮肥>磷肥>种植密度。产量大于 2 000 kg/667 m²、净光合速率大于 16 μmol/(m²·s) 及主茎数在 3~6 个/穴的试验方案共计 39 套。 [结论] 高产栽培应合理控密控氮, 施足磷肥, 增施钾肥。马铃薯“西芋 3 号”最适农艺措施为: 种植密度 4 317~4 529 株/667 m²、N 施用量 6.39~7.52 kg/667 m²、P₂O₅ 施用量 5.00~5.83 kg/667 m²、K₂O 施用量 24.94~28.66 kg/667 m²。

关键词: 马铃薯; 净光合速率; 主茎数; 产量

中图分类号: S532.048 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-1891(2021)02-0023-08

Study on High Yield Cultivation Density and Fertilizer Application Rate of “Xiyu 3”

LI Peihua¹, LI Kun¹, MAO Huiying², FANG Zhirong¹,
QING Yuan¹, CAI Guangze¹, PENG Zhengsong^{1*}

(1.Xichang University, Xichang, Sichuan 615013, China;

2. Ya'an Institute of Agricultural Science, Ya'an, Sichuan 625000, China)

Abstract: [Purpose] The optimal planting technology model of potato fertilizer application and planting density in high altitude mountain area of southwest Sichuan was studied. [Method] The effects of N, P, K fertilizers and planting density on yield, main stem number and net photosynthetic rate of "Xiyu3" were studied by quadratic orthogonal rotation combination design. [Result] The effect on net photosynthetic rate represented as: Nitrogenous fertilizer> Phosphate fertilizer> Planting density> Potassic fertilizer. The effect on the number of main stems represented as: Nitrogenous fertilizer> Planting density> Phosphate fertilizer> Potassic fertilizer. The effect of each experimental factor on the yield was shown as: Potassic fertilizer> Nitrogenous fertilizer> Phosphate fertilizer> Planting density. A total of 39 sets of test schemes with the yield higher than 2 000 kg/667 m², the net photosynthetic rate of more than 16 μmol/(m²·s) and the number of main stems of 3~6 per hole was designed. [Conclusion] In high-yield cultivation, nitrogen should be controlled reasonably; enough phosphate fertilizer and potassium fertilizer should be applied. The agronomic measures of potato "Xiyu3" should come as the following: planting density 4 607~4 861 plant/667 m², N application rate 6.39~7.52 kg/667 m², P₂O₅ application rate 5.00~5.83 kg/667 m², K₂O application rate 24.92~28.66 kg/667 m².

Keywords: potato; net photosynthetic rate; main stem number; yield

收稿日期: 2021-01-31

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); 四川省主要粮食作物农业气象指标研究(省重点实验室 2018-重点-05-01)。

作者简介: 李佩华(1975—), 男, 四川邛崃人, 研究员, 博士生, 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: 植物遗传学。

0 引言

凉山州位于四川西南部,光热资源丰富,昼夜温差较大,独特的自然资源十分利于马铃薯生产^[1]。马铃薯是凉山州,特别是高寒山区的主要粮食作物之一,其产量和面积常年位居四川第一位^[2]。目前马铃薯产业已成为彝区农民脱贫致富的主要途径之一,同时马铃薯产量高、适应性强、营养价值高,能一定程度缓解粮食压力^[3-4]。

在马铃薯的研究中,大都以农艺性状与薯块产量动态变化为研究方向,但缺少部分性状与产量关联的研究;其次生理上对马铃薯的研究较为孤立,有对马铃薯光合现象、生理变化研究,但没有将性状与生理结合。从多个方面分析展开,研究其主要性状、光合生理与产量关系的变化,最终得出植株性状与光合生理的配合方式,为达到提高产量采取相应技术措施提供科学借鉴^[4]。李德明等^[5]、崔学开等^[6]、石小红^[7]在不同地区开展了马铃薯密度与氮(N)、磷(P₂O₅)、钾(K₂O)肥配套栽培的试验,而关于种植密度与氮(N)、磷(P₂O₅)、钾(K₂O)肥配套对净光合速率和主茎数相关研究的报道几乎没有。西芋 3 号(审定编号:川审薯 2016003)品种适应性好、抗晚疫病、高抗病毒病、耐贮藏。采用二次正交旋转组合设计本试验^[8-10],采用贡献率法^[9-12]分析主因子效应,降维法^[5-7, 10]分析单因子效应及因子互作效应,统计频数法^[10, 13-14]对试验结果进行模拟寻优。本文旨在得出西芋 3 号的高产栽培措施,同时为川西南高山地区的马铃薯高产栽培提供参考意见。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于四川省普格县五道箐乡。试验地土壤为:全氮质量分数 3.52 g/kg,碱解氮 305 mg/kg,全磷质量分数 1.93 g/kg,全钾质量分数 13.58 g/kg,有机质质量分数 3.6%;土壤肥力中上。

1.2 试验材料

种薯:西芋 3 号优质种薯(50~100 g)3 300 粒。

肥料:尿素(ω (N) \geq 46.4%,中化化肥有限公司),过磷酸钙(ω (P₂O₅) \geq 16.0%,云南如春农资有限公司),硫酸钾(ω (K₂O) \geq 52.0%,四川川化青上化工有限公司)。

仪器:XK3100-B2+电子秤(上海友声衡器有限公司),CIRAS-3 便携式光合仪(汉莎科学仪器有限公司)。

1.3 试验方法

1.3.1 试验设计

以种植密度(X_1)、N(X_2)、P₂O₅(X_3)、K₂O(X_4)为试验因子,采用二次正交旋转组合设计本试验(表 1)。运用 DPS9.01 设计出各处理的因素水平,共 36 个小区,6 个非重复性区组,每个非重复性区组包括 6 个试验小区,区组方向与肥水方向一致。小区面积 13.33 m²,每小区起 3 垄,垄距 85 cm,每垄播 2 行,株距随密度变化,小区宽 2.55 m,小区长 5.23 m。小区间开 30 cm 浅沟,区组间及四周开 50 cm 深沟,四周设置保护行,试验面积 620.9 m²。

表 1 因子与水平编码表

因素	变化区间	因子水平				
		-2	-1	0	1	2
种植密度(X_1) /(株·667 m ²)	500	3 500	4 000	4 500	5 000	5 500
N(X_2)/(kg·667 m ²)	2.3	2.3	4.6	6.9	9.2	11.5
P ₂ O ₅ (X_3)/(kg·667 m ²)	1.6	1.6	3.2	4.8	6.4	8.0
K ₂ O(X_4)/(kg·667 m ²)	7.8	10.4	18.2	26.0	33.8	41.6

1.3.2 田间种植

2018 年 3 月 8 日播种,7 月 26 号成熟,8 月 25 日收获。

1.3.3 测定项目和方法

净光合速率测定:于盛花期上午 8:00—11:00 测定,测定叶片为健康植株中上部复叶的顶小叶或第一对侧小叶,每小区重复 3 次。

主茎数测定:每小区按五点取样测定 10 穴。

产量测定:于收获日对每一小区进行完全测产。

2 结果及分析

2.1 数学模型的建立

对净光合速率(Y_1)、主茎数(Y_2)及产量(Y_3)的试验数据(表 2)进行处理分析,得到相应的回归模型及净光合速率、主茎数及产量方差分析结果表(表 3)。由表 3 可知,净光合速率 $F_1 = 0.349 < F_{0.05}(10, 11) = 2.86$,未达显著水平, $F_2 = 3.773^{**} > F_{0.01}(14, 21) = 3.07$,达到极显著水平;主茎数 $F_1 = 2.229 < F_{0.05}(10, 11) = 2.86$,未达显著水平, $F_2 = 5.184^{**} > F_{0.01}(14, 21) = 3.07$,达到极显著水平;产量 $F_1 = 0.553 < F_{0.05}(10, 11) = 2.86$,未达到显著水平, $F_2 = 4.58^{**} > F_{0.01}(14, 21) = 3.07$,达到极显著水平。据 F 检验的结果可知, F_1 达显著水平说明回归模型(方程)达显著水平, F_2 未达显著水平说明方程拟合程度较高,建立的回归模型可用于效应分析及模拟寻优。

表 2 各小区净光合速率、主茎数及产量

小区 编号	种植密度、氮肥、磷肥、 钾肥设计方案				净光合速率/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	主茎数/ (个· 穴 ⁻¹)	产量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)
	X_1	X_2	X_3	X_4			
1	1	1	1	1	17.01	4.8	2 266.5
2	1	1	1	-1	16.94	2.4	1 908.0
3	1	1	-1	1	15.55	3.6	2 050.5
4	1	1	-1	-1	15.80	2.8	1 908.0
5	1	-1	1	1	14.96	7.2	2 022.0
6	1	-1	1	-1	14.30	5.8	1 728.0
7	1	-1	-1	1	15.95	6.0	1 968.0
8	1	-1	-1	-1	15.40	4.8	1 812.5
9	1	-1	1	1	17.38	3.8	2 076.0
10	-1	1	1	-1	17.01	3.0	2 094.0
11	-1	1	-1	1	16.37	5.0	1 926.5
12	-1	1	1	-1	15.58	3.2	2 022.0
13	-1	-1	1	1	15.69	3.6	1 933.5
14	-1	-1	1	-1	14.96	3.0	2 018.5
15	-1	-1	-1	1	15.58	5.2	1 808.5
16	-1	-1	-1	-1	14.39	5.6	1 878.0
17	-2	0	0	0	14.92	4.0	1 878.0
18	2	0	0	0	13.20	4.6	1 948.5
19	0	-2	0	0	15.60	3.4	1 889.0
20	0	2	0	0	16.61	3.8	1 729.5
21	0	0	-2	0	14.96	4.2	1 915.5
22	0	0	2	0	15.58	4.4	2 028.0
23	0	0	0	-2	15.80	3.2	1 806.5
24	0	0	0	2	16.35	5.6	1 818.0
25	0	0	0	0	17.78	4.0	2 130.0
26	0	0	0	0	16.10	4.8	2 202.0
27	0	0	0	0	17.82	4.4	2 334.5
28	0	0	0	0	16.24	5.4	2 106.0
29	0	0	0	0	16.10	3.2	2 160.0
30	0	0	0	0	17.16	4.0	2 178.0
31	0	0	0	0	18.04	4.4	2 319.5
32	0	0	0	0	18.48	3.6	2 203.5
33	0	0	0	0	15.58	4.6	1 936.5
34	0	0	0	0	17.34	4.0	2 252.5
35	0	0	0	0	18.00	3.4	2 326.5
36	0	0	0	0	16.24	3.6	2 100.0
34	0	0	0	0	17.34	4.0	2 252.5
35	0	0	0	0	18.00	3.4	2 326.5
36	0	0	0	0	16.24	3.6	2 100.0

净光合速率(Y_1)、主茎数(Y_2)及产量(Y_3)的回归模型(方程)分别为:

$$Y_1 = 17.072\ 00 - 0.186\ 08X_1 + 0.517\ 92X_2 + 0.202\ 58X_3 + 0.217\ 25X_4 - 0.682\ 23X_1^2 - 0.170\ 73X_2^2 -$$

表 3 方差分析结果

变异 来源	净光合速率		主茎数		产量	
	F 值	P 值	F 值	P 值	F 值	P 值
X_1	1.272 3	0.272 1	3.720 0	0.067 3(*)	0.007 8	0.930 4
X_2	9.855 9	0.005 0**	6.620 0	0.017 7*	1.885 4	0.184 2
X_3	1.507 9	0.233 0	0.030 0	0.870 0	2.605 3	0.121 4
X_4	1.734 2	0.202 1	31.680 0	0.000 1**	1.611 1	0.218 2
X_1^2	22.802 1	0.000 1**	0.000 5	0.981 7	7.215 0	0.013 8
X_2^2	1.428 0	0.245 4	6.878 8	0.015 9*	15.855 5	0.000 7**
X_3^2	7.064 2	0.014 7*	4.267 1	0.051 4(*)	3.849 3	0.063 2(*)
X_4^2	1.569 4	0.224 1	0.155 7	0.697 1	15.584 2	0.000 7**
X_1X_2	0.102 3	0.752 2	4.693 2	0.041 9*	0.073 9	0.788 4
X_1X_3	0.655 8	0.427 1	12.567 0	0.001 9**	0.438 9	0.514 9
X_1X_4	0.400 5	0.533 6	0.620 6	0.439 6	7.204 8	0.013 9*
X_2X_3	3.975 8	0.059 3*	0.785 4	0.385 5	0.199 0	0.660 1
X_2X_4	0.435 7	0.516 4	0.475 1	0.498 2	0.041 3	0.840 9
X_3X_4	0.020 4	0.887 7	0.087 3	0.770 6	0.838 8	0.370 2
失拟 F_1	0.349	0.955 6	2.229	0.058 6	0.968	0.492 6
回归 F_2	3.773	0.006 9**	5.184	0.001 4**	4.101	0.004 6**

注:标 ** 表示 $P \leq 0.01$, 标 * 表示 $0.01 < P \leq 0.05$, 标 (*) 表示 $0.05 < P \leq 0.1$ 。

$$0.379\ 73X_3^2 - 0.178\ 98X_4^2 - 0.064\ 63X_1X_2 - 0.163\ 63X_1X_3 - 0.127\ 88X_1X_4 + 0.402\ 87X_2X_3 - 0.133\ 38X_2X_4 - 0.028\ 88X_3X_4,$$

$$Y_2 = 4.541\ 67 + 0.200\ 00X_1 - 0.266\ 67X_2 + 0.016\ 67X_3 + 0.583\ 33X_4 + 0.002\ 08X_1^2 - 0.235\ 42X_2^2 - 0.185\ 42X_3^2 - 0.035\ 42X_4^2 - 0.275\ 00X_1X_2 + 0.450\ 00X_1X_3 + 0.100\ 00X_1X_4 + 0.112\ 50X_2X_3 + 0.087\ 50X_2X_4 - 0.037\ 50X_3X_4,$$

$$Y_3 = 2\ 187.400\ 0 + 2.050\ 00X_1 + 31.858\ 33X_2 + 37.450\ 00X_3 + 29.450\ 00X_4 - 53.972\ 92X_1^2 - 80.010\ 42X_2^2 - 39.422\ 92X_3^2 - 79.322\ 92X_4^2 + 7.725\ 00X_1X_2 - 18.825\ 00X_1X_3 + 76.275\ 00X_1X_4 + 12.675\ 00X_2X_3 + 5.775\ 00X_2X_4 + 26.025\ 00X_3X_4.$$

2.2 主因子效应分析

可通过贡献率法来判断各试验因素对试验结果的影响重要程度,贡献率计算公式为:

$$\delta = \begin{cases} 0 & F \leq 1, \\ 1 - 1/F & F > 1, \end{cases}$$

$$\Delta_j = \delta_j + \delta_{jj} + \frac{1}{2} \sum_{i < j}^p \delta_{ij} (i, j = 1, 2, 3, \dots, p).$$

据表 4 可知,对净光合速率的影响重要程度为:氮肥>磷肥>密度>钾肥;对主茎数的影响重要程度为:氮肥>密度>磷肥>钾肥;对产量影响的重要程度为:钾肥>氮肥>磷肥>密度。

表 4 贡献率表

因子	Δ_1	Δ_2	Δ_3	Δ_4
净光合速率	1.170 1	1.572 5	1.568 5	0.782 6
主茎数	1.585 1	2.097 0	1.225 8	0.968 4
产量	1.292 0	1.406 5	1.356 2	1.745 7

2.3 单因子效应分析

对 Y_1 进行降维处理,即将 N、 P_2O_5 和 K_2O 三个因子固定在零水平,得到种植密度与净光合速率的关系: $Y_{1-1} = 17.072 00 - 0.186 08X_1 - 0.682 23X_1^2$ 。同理可得到 N、 P_2O_5 和 K_2O 与净光合速率的关系分别为: $Y_{1-2} = 17.072 00 + 0.517 92X_2 - 0.170 73X_2^2$; $Y_{1-3} = 17.072 00 + 0.202 58X_3 - 0.379 73X_3^2$; $Y_{1-4} = 17.072 00 + 0.217 25X_4 - 0.178 98X_4^2$ 。种植密度、N、 P_2O_5 和 K_2O 与主茎数的关系分别为: $Y_{2-1} = 4.541 67 + 0.200 00X_1 + 0.002 08X_1^2$; $Y_{2-2} = 4.541 67 - 0.266 67X_2 - 0.235 42X_2^2$; $Y_{2-3} = 4.541 67 + 0.016 67X_3 - 0.185 42X_3^2$; $Y_{2-4} = 4.541 67 + 0.583 33X_4 - 0.035 42X_4^2$ 。种植密度、N、 P_2O_5 和 K_2O 与产量的关系分别为: $Y_{3-1} = 2 187.400 00 + 2.050 00X_1 - 53.972 92X_1^2$; $Y_{3-2} = 2 187.400 00 + 31.858 33X_2 - 80.010 42X_2^2$; $Y_{3-3} = 2 187.400 00 + 37.450 00X_3 - 39.422 92X_3^2$; $Y_{3-4} = 2 187.400 00 + 29.450 00X_4 - 79.322 92X_4^2$ 。

2.3.1 净光合速率的单因子效应分析

据 $Y_{1-1} \sim Y_{1-4}$ 做出图 1,可知种植密度、 P_2O_5 及 K_2O 在水平取值为 0 时净光合速率均有最大值;净光合速率在 -2~0 水平内随水平值增加而增加,在 0~2 水平内随水平值增加反而减小,且种植密度水平大于 1 时净光合速率下降趋势较大。N 在水平取值为 1 时净光合速率有最大值,净光合速率在 -2~1 水平内随水平值增加而增加,在 1~2 水平内基本保持不变。

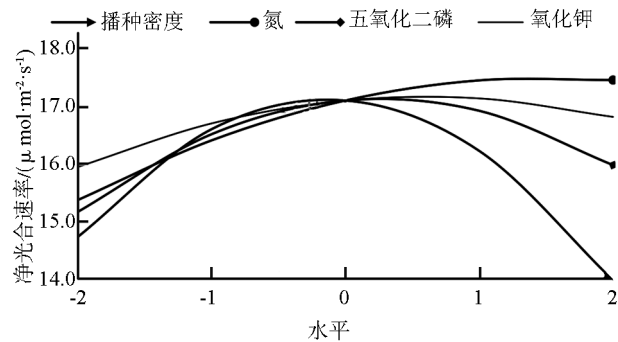


图 1 净光合速率单因子效应分析

2.3.2 主茎数的单因子效应分析

据 $Y_{2-1} \sim Y_{2-4}$ 做出图 2,可知种植密度及 K_2O 施用量在水平取值为 2 时主茎数均有最大值,且抛物

线趋近于直线。N 施用量在水平取值为 -1 时主茎数有最大值;主茎数在 -2~-1 水平内随 N 施用量增加而增加,在 -1~2 水平内主茎数随 N 施用量增加而减少。 P_2O_5 施用量在 0 水平时主茎数有最大值;主茎数在 -2~0 水平内随 P_2O_5 施用量增加而增加,在 0~2 水平内随 P_2O_5 施用量水平增加反而减小。

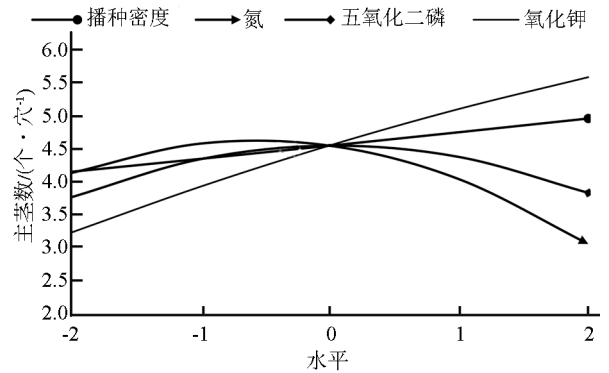


图 2 主茎数单因子效应分析

2.3.3 产量的单因子效应分析

据 $Y_{3-1} \sim Y_{3-4}$ 做出图 3,可知种植密度、N、 P_2O_5 及 K_2O 均在水平取值为 0 时产量有最大值;产量在 -2~0 水平内随水平值增加而增加,在 0~2 水平内随水平值增加反而降低,且种植密度、N 及 K_2O 在 1~2 水平下降趋势较大。

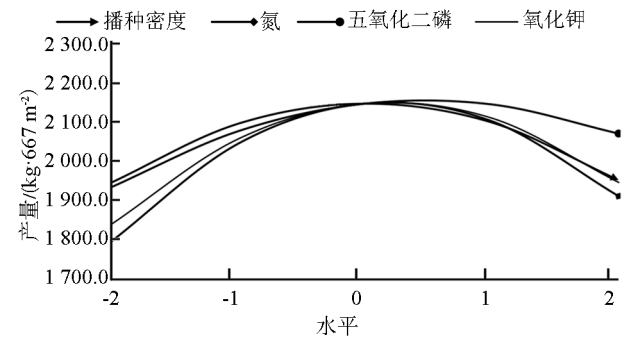


图 3 产量单因子效应分析

2.4 交互效应分析

2.4.1 净光合速率的交互效应分析

由表可知,在一定显著水平 ($\alpha = 0.1$) 下,只有 X_2X_3 达到了显著水平且为负效应。将种植密度与 K_2O 固定在零水平,得到 X_2X_3 交互作用的回归模型为:

$$Y_4 = 17.072 00 + 0.517 92X_2 + 0.202 58X_3 - 0.170 73X_2^2 - 0.379 73X_3^2 + 0.402 87X_2X_3。$$

由方程 Y_4 计算 X_2X_3 交互效应的净光合速率于表 5。可知在低 N 水平下,净光合速率随 P_2O_5 增加而降低;在中高 N 施用量水平下,净光合速率随 P_2O_5 施用量增加而增加。 P_2O_5 在各水平下,净光合

表 5 氮肥与磷肥互作效应的净光合速率

P ₂ O ₅ 施用量 水平	N 施用量水平					标准 差	净光合速率/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}$ $\cdot \text{s}^{-1}$)
	-2	-1	0	1	2		
2	14.98	16.92	18.11	18.53	18.20	1.46	17.35
1	15.27	16.81	17.59	17.61	16.88	0.95	16.83
0	15.55	16.69	17.07	16.69	15.55	0.71	16.31
-1	15.84	16.58	16.55	15.77	14.23	0.95	15.79
-2	16.13	16.46	16.04	14.85	12.91	1.46	15.28
标准差	0.46	0.18	0.82	1.46	2.09		
净光合速率/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	15.55	16.69	17.07	16.69	15.55		

速率随 N 的增加呈先增加后减少的趋势。当 P₂O₅ 在 2 水平、N 在 1 水平时净光合速率有较大值。

2.4.2 主茎数的互作效应分析

由表 3 可知,在一定显著水平($\alpha=0.1$)下,只有 X₁X₂ 与 X₁X₃ 达到了显著水平,且 X₁X₂ 的互作效应为负效应, X₁X₃ 的互作效应为正效应。运用降维法得到 X₁X₂ 与 X₁X₃ 互作效应的回归模型分别为: $Y_5 = 4.541\ 67 + 0.200\ 00X_1 - 0.266\ 67X_2 + 0.002\ 08X_1^2 - 0.235\ 42X_2^2 - 0.275\ 00X_1X_2$; $Y_6 = 4.541\ 67 + 0.200\ 00X_1 + 0.016\ 67X_3 + 0.002\ 08X_1^2 - 0.185\ 42X_3^2 + 0.450\ 00X_1X_3$ 。

由方程 Y₅ 与 Y₆ 分别计算 X₁X₂ 与 X₁X₃ 互作效应的主茎数分别如表 6 和表 7 所示。由表 6 可知,在高 N 水平下,主茎数随种植密度的水平增加而减小;在中低 N 水平下,主茎数随种植密度的增加先增加后减小。在中低种植密度水平下,主茎数随 N 施用量的增加而增加;而在较高种植密度时却相反。在低种植密度水平、高 N 施用量水平下,主茎数有最高值。

表 6 氮肥与种植密度互作效应的主茎数

N 施用量水平	种植密度水平					标准 差	平均主茎数/ (个·穴 ⁻¹)
	-2	-1	0	1	2		
2	5.6	5.5	4.9	3.9	2.4	1.36	4.5
1	4.9	5.0	4.7	4.0	2.7	0.96	4.3
0	4.1	4.6	4.5	4.0	3.1	0.61	4.1
-1	3.4	4.1	4.3	4.1	3.4	0.44	3.9
-2	2.6	3.6	4.1	4.2	3.8	0.63	3.7
标准差	1.19	0.75	0.32	0.12	0.55		
平均主茎数/ (个·穴 ⁻¹)	4.1	4.6	4.5	4.0	3.1		

由表 7 可知,在高 P₂O₅ 水平下,主茎数随种植密度增加而增加;在中低 P₂O₅ 水平下,主茎数随种植密度增加而减小。在较低种植密度时,主茎数随 P₂O₅ 施用量的增加而增加;在中高种植密度时与之相反。在种植密度与 P₂O₅ 施用量均在较高水平时有最大值。

表 7 钾肥与种植密度互作效应的主茎数

P ₂ O ₅ 施用量 水平	种植密度水平					标准 差	平均主茎数/ (个·穴 ⁻¹)
	-2	-1	0	1	2		
2	2.4	3.9	4.9	5.7	6.0	1.46	4.6
1	3.1	4.1	4.7	5.0	4.9	0.79	4.4
0	3.8	4.4	4.5	4.4	3.8	0.35	4.2
-1	4.5	4.6	4.3	3.7	2.7	0.79	4.0
-2	5.2	4.9	4.1	3.1	1.6	1.46	3.8
标准差	1.11	0.40	0.32	1.03	1.74		
平均主茎数/ (个·穴 ⁻¹)	3.8	4.4	4.5	4.4	3.8		

2.4.3 产量的互作效应分析

由表 3 可知,在一定显著水平($\alpha=0.1$)下,只有 X₁X₄ 达到了显著水平且为正效应,由降维法可得 X₁X₄ 交互作用的回归模型为: $Y_7 = 2\ 187.400\ 00 + 2.050\ 00X_1 + 29.450\ 00X_4 - 53.972\ 92X_1 - 79.322\ 92X_4^2 + 76.275\ 00X_1X_4$ 。

据方程 Y₇ 计算 X₁X₄ 互作效应的产量于表 8,可知在各密度水平时,产量随 K₂O 施用量的增加呈先增加后减少的趋势。K₂O 在各水平下,产量均随种植密度的增加先增加后减小。在种植密度与 K₂O 施用量水平均在 0 取值时,有较高产量。

2.5 模拟寻优

对回归模型 Y₃ 进行田间模拟寻优,产量大于 2 000 kg/667 m² 的方案共计 102 套,但部分方案不合理。故再对回归方程 Y₁ 与 Y₂ 进行田间模拟寻优,共筛选出 39 套符合条件的田间模拟方案,统计计算结果于表 9。可知要使产量大于 2 000 kg/667 m²、同时净光合速率大于 16 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ 、主茎数在 3~6 个/穴¹ 的农艺措施为:种植密度 4 317~4 529 株/667 m²、N 施用量 6.39~7.52 kg/667 m²、P₂O₅ 施用量 5.00~5.83 kg/667 m²、K₂O 施用量 24.94~28.66 kg/667 m²。

表 8 钾肥与种植密度互作效应的产量

K ₂ O 施用量水平	种植密度水平					标准差	平均产量/ (kg · 667 m ⁻²)
	-2	-1	0	1	2		
2	1 349.12	1 739.64	1 971.51	2 044.74	1 959.32	283.20	1 812.86
1	1 663.59	1 977.83	2 133.43	2 130.38	1 968.69	191.23	1 974.78
0	1 870.11	2 108.08	2 187.40	2 108.08	1 870.11	148.40	2 028.75
-1	1 968.69	2 130.38	2 133.43	1 977.83	1 663.59	191.23	1 974.78
-2	1 959.32	2 044.74	1 971.51	1 739.64	1 349.12	283.20	1 812.86
标准差	261.49	157.29	100.97	157.29	261.49		
平均产量/(kg · 667 m ⁻²)	1 762.16	2 000.13	2 079.45	2 000.13	1 762.16		

表 9 频数统计结果

水平	X ₁ (种植密度)		X ₂ (N 施用量)		X ₃ (P ₂ O ₅ 施用量)		X ₄ (K ₂ O 施用量)	
	频数	频率	频数	频率	频数	频率	频数	频率
-2	0	0.000 0	0	0.000 0	0	0.000 0	0	0.000 0
-1	12	0.214 3	11	0.196 4	5	0.089 3	9	0.160 7
0	21	0.375 0	16	0.285 7	17	0.303 6	17	0.303 6
1	6	0.107 1	12	0.214 3	14	0.250 0	13	0.232 1
2	0	0.000 0	0	0.000 0	3	0.053 6	0	0.000 0
\bar{X}	-0.153 8		0.025 6		0.384 6		0.102 6	
<i>s</i>	0.106 0		0.122 9		0.128 8		0.119 1	
95%置信区间	-0.365 8~0.058 1		-0.220 2~0.271 4		0.127 0~0.642 2		-0.135 7~0.340 8	
农艺措施	4 317~4 529 株 · 667 m ⁻²		6.39~7.52 kg · 667 m ⁻²		5.00~5.83 kg · 667 m ⁻²		24.94~28.66 kg · 667 m ⁻²	

3 讨论

马铃薯薯块 90% 以上的干物质来源于光合产物,其产量的高低与光合产物的积累有关,而光合产物的积累主要与净光合速率有关^[3]。石小红^[7]、陈华等^[15]研究发现过低过高的氮、磷、钾肥均能抑制马铃薯净光合速率。Fleisher^[16]研究发现高磷和低磷处理均降低马铃薯光合速率和气孔导度。田再民等^[17]研究发现马铃薯净光合速率需要合理密度才能达到最大值,过高过低均不利于光合作用。Fang^[18]研究发现净光合速率随氮肥施用量与种植密度的增加先增加后减少。本试验结论为:净光合速率随种植密度、氮、磷、钾施用量的增加均呈先增加后减少的趋势,且随氮肥的减小趋势不明显。Hu^[19]研究发现适当的 N/K 比例能提高光合作用和光合面积,从而提高作物产量。本试验条件下净光合速率的氮肥与钾肥交互作用未达显著水平,只有氮肥与磷肥的互作达到了显著水平且为正效应,表明适当增施氮肥的同时增施磷肥能提高净光合速率。各试验因子对净光合速率影响重要程度为:氮肥>磷肥>种植密度>钾肥。合理控制种植密度,适当增施氮、磷、钾肥有利于提高“西芋 3 号”净光合速率。用净光合速率来反应马铃薯生长发育情况,

应充分考虑当地的气候条件^[3,20]。同时应当考虑光合面积与光合时间^[21]。

Negero^[22]研究发现单穴主茎数与马铃薯块茎产量呈显著正相关。主茎数与叶面积系数、单株产量及单株结薯数均正相关,而单株重又是马铃薯产量构成的重要因素^[21, 23-24]。马铃薯茎数能比播种量更好地反应马铃薯密度^[25-26],一定范围内主茎数的增加有利于产量的增加,但过多反而会导致田间通风透光不良,产量反而降低^[21]。金光辉等^[27]研究表明单穴主基数随种植密度的减小而减小。张静^[28]等人的研究表明单穴主茎数随氮肥、磷肥及钾肥施用量的增加先增加后减少。本试验结论为:单穴主茎数随种植密度的增加而增加,随氮、磷、钾施用量的增加先增加后减少。互作效应分析表明在减小密度的同时增施氮肥,增加密度的同时增施磷肥的情况下均利于“西芋 3 号”主茎数增加。在试验条件下各试验因子对主茎数影响重要程度为:氮肥>种植密度>磷肥>钾肥。因此在实际生产中可合理的增密控肥来提高“西芋 3 号”主茎数,但应依据不同的品种、栽培及气象条件来确定合理的主茎数。

Nurmanov^[29]研究表明在任何条件下都不能得出最佳施氮量,土壤中硝态氮调至较低的最佳水平(22 mg/kg 土壤),可能获得马铃薯的最大产量。

Zhang 等^[30]研究发现适当增施钾肥能提高马铃薯块茎产量和改善淀粉的理化性质。Mello 等^[31]研究发现马铃薯产量随施钾的增加而呈线性增加。李德明等^[5]、崔学开等^[6]、杨胜先等^[32]等人的研究表明产量随种植密度、氮肥、磷肥及钾肥施用量的增加呈先增加后减少的趋势。本试验结果为产量随种植密度、氮肥、磷肥及钾肥施用量的增加呈先增加后减少的趋势,且种植密度过大产量下降的趋势较大。互作效应分析表明增密的同时增施钾肥可以提高马铃薯产量。对产量影响的重要程度为:钾肥>氮肥>磷肥>种植密度。因此控密控氮,增施磷钾肥有利于提高马铃薯产量。

川西南凉山州立体气候特征明显,可周年生产。有机肥与化肥结合达到增产、改善作物品质、改良土壤的效果^[25,33-35],由于不同的生态气候类型,马铃薯秋播与冬播技术应独立开展试验^[25]。产量的形成与群体结构存在很大的关系,同时,追求较高光合效率,形成较理想光合势;在获得较高生

物学产量情况下,控上促下来提升经济系数,从而提高马铃薯产量^[21,25]。产量与形态指标(主茎数、分枝数、叶面积系数、株高、茎粗等)、生理指标(净光合速率、蒸腾速率、胞间二氧化碳浓度、叶绿素含量等)存在相关性^[23-24,36],也需要考量彼此相关。

4 结论

西芋 3 号植株矮健,通过田间模拟寻优可知,产量大于 2 000 kg/667 m²、净光合速率大于 16 μmol/(m²·s)及主茎数在 3~6 个/穴的试验方案共计 39 套。采用频数统计法分析得出相关农艺措施为:种植密度 4 317~4 529 株/667 m²、N 施用量 6.39~7.52 kg/667 m²、P₂O₅施用量 5.00~5.83 kg/667 m²、K₂O 施用量 24.94~28.66 kg/667 m²,此时 N、P₂O₅与 K₂O 比值为 1:0.79:3.83。高产栽培应合理控密控氮,施足磷肥,增施钾肥,可为西南地区高山类似生态区的马铃薯种植提供参考。

参考文献:

- [1] 李军.促进凉山州马铃薯比较优势向竞争优势转化的对策[J].中国马铃薯,2007(1):59-61.
- [2] 李佩华,彭徐.马铃薯遮光处理的效应研究[J].中国农学通报,2007(4):220-227.
- [3] 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.
- [4] PEIHUA L, QINGLONG T, ZHENGSONG P, et al. Main agronomic traits and photosynthetic pathways of potatoes [J]. International Journal of Design & Nature and Ecodynamics, 2020, 15(3):431-439.
- [5] 李德明,潘晓春,张俊杰,等.“定薯 1 号”马铃薯高产栽培技术[J].中国马铃薯,2015,29(1):14-17.
- [6] 崔学开,陈建林,王明义,等.不同施肥和密度对马铃薯产量的影响[J].中国马铃薯,2010,(6):360-363.
- [7] 石小红.马铃薯高产优质栽培技术及高产机理研究[D].西宁:青海大学,2010.
- [8] 唐启义.DPS 数据处理系统[M].北京:科学出版社,2010.
- [9] 张吴平,杨坚.食品试验设计与统计分析[M].北京:中国农业出版社,2017.
- [10] 明道绪.高级生物统计[M].北京:中国农业出版社,2006.
- [11] 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.
- [12] 窦明明,雷飞益,石峰,等.配方施肥对川泽泻主要药效成分含量的影响[J].核农学报,2018,32(12):2462-2470.
- [13] 刘铁梅,邹薇,张迁维,等.应用数学模型对矮秆大麦 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.
- [14] 梁琴,陈兴福,李瑶,等.化肥与有机肥配施对川芎产量的影响[J].中药材,2015(10):2015-2020.
- [15] 陈华,刘孟君,刘如霞.不同施肥水平对菜用马铃薯农艺性状及营养品质的影响[J].西北农业学报,2016,25(2):220-226.
- [16] FLEISHER D H, WANG Qinguo, TIMLIN D J, et al. Response of potato gas exchange and productivity to phosphorus deficiency and carbon dioxide enrichment [J]. Crop Science, 2012, 52(4):1803-1815.
- [17] 田再民,龚学臣,祁利潘,等.不同种植密度对冀张薯 8 号光合特性的影响[J].湖北农业科学,2014,53(13):2995-2998.
- [18] FANG Xiaomei, LI Yingshuang, NIE Tiao, et al. Effects of nitrogen fertilizer and planting density on the leaf photosynthetic characteristics, agronomic traits and grain yield in common buckwheat (*Fagopyrum esculentum* M.) [J]. Field Crops Research, 2018, 218:160-168.
- [19] HU Wenshi, REN Tao, MENG Fanjin, et al. Leaf photosynthetic capacity is regulated by the interaction of nitrogen and potassium through coordination of CO₂ diffusion and carboxylation [J]. Physiologia Plantarum, 2019, 169(3):418-432.

- [20] 刘政,秦仲麒,伍涛,等.梨树光合作用研究进展[J].湖北农业科学,2016,55(24):6327-6330.
- [21] 门福义,刘梦芸.马铃薯栽培生理[M].北京:中国农业出版社,1995.
- [22] NEGERO F W. Yield and yield components of potato (*Solanum tuberosum* L.) as influenced by planting density and rate of nitrogen application at Holeta, West Oromia region of Ethiopia[J]. African Journal of Agricultural Research, 2017, 12(26): 2242-2258.
- [23] 孙继英,王岫,肖本彦,等.不同施肥量马铃薯主要农艺性状的变化及与产量性状相关性的研究[J].安徽农学通报(上半月刊),2009,15(11):100-101+64.
- [24] 何虎翼,谭冠宁,何新民,等.63份马铃薯品种(系)资源农艺性状的主成分与聚类分析[J].江苏农业学报,2017,33(1):27-33.
- [25] 李佩华.攀西马铃薯高产栽培[M].成都:四川大学出版社,2014.
- [26] 孙磊,田静俔,于洪涛,等.密度及密度调控方式对马铃薯农艺性状及产量的影响[J].中国马铃薯,2018,32(6):345-350.
- [27] 金光辉,高幼华,刘喜才,等.种植密度对马铃薯农艺性状及产量的影响[J].东北农业大学学报,2015,46(7):16-21.
- [28] 张静.氮磷钾施用量对马铃薯产量、品质及肥料利用特性的影响[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2012.
- [29] NURMANOV Y T, CHERNENOK V G, KUZDANOVA, et al. Potato in response to nitrogen nutrition regime and nitrogen fertilization[J]. Field Crops Research, 2019, 231: 115-121.
- [30] ZHANG Wei, LIU Xinwei, WANG Qiaolan, et al. Effects of potassium fertilization on potato starch physicochemical properties [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 117: 467-472.
- [31] MELLO S D C, PIERCE F J, TONHATI, et al. Potato response to polyhalite as a potassium source fertilizer in Brazil: yield and quality [J]. HortScience, 2018, 53(3): 373-379.
- [32] 杨胜先,龙国,张绍荣,等.喀斯特冷凉山区不同种植密度及氮、磷、钾配施对马铃薯产量的影响[J].江苏农业科学,2015,43(7):85-88.
- [33] 沈宝云,余斌,王文,等.腐植酸铵、有机肥、微生物肥配施在克服甘肃干旱地区马铃薯连作障碍上的应用研究[J].中国土壤与肥料,2011(2):68-70.
- [34] 穆俊祥,曹兴明,弓建国,等.氮磷钾和有机肥配合施用对马铃薯淀粉含量和产量的影响[J].土壤,2009,41(5):844-848.
- [35] 杨丽辉,蒙美莲,陈有君,等.肥料配施对马铃薯产量和品质的影响[J].中国农学通报,2013,29(12):136-140.
- [36] 韩忠才,张胜利,徐飞,等.雾培马铃薯产量性状相关性分析[J].东北农业科学,2018,43(6):36-39.