

DOI:10.19462/j.cnki.zgzy.20241014007

# 马铃薯希森6号产量与栽培密度、 肥料施用量的关系研究

王珍珍<sup>1,2</sup> 崔长磊<sup>1,2</sup> 孙莎莎<sup>1,2</sup> 孔海明<sup>1,2</sup> 李学洋<sup>1,2</sup> 胡柏耿<sup>1,2</sup>( <sup>1</sup> 国家马铃薯工程技术研究中心,山东乐陵 253600; <sup>2</sup> 乐陵希森马铃薯产业集团有限公司,山东乐陵 253600 )

**摘要:**采用二次回归通用旋转组合设计方法,以马铃薯产量为目标,以栽培密度及氮磷钾肥的施用量为探讨对象,建立了马铃薯希森6号的产量与栽培密度、肥料施用量间关系的数学模型: $Y=40.0485718+1.3954X_1+1.96625X_2+2.05875X_3+1.44875X_4-3.2137X_1^2-2.54495X_2^2-2.05745X_3^2-0.97245X_4^2+1.83437X_1X_2+2.41562X_1X_3+1.85062X_2X_3$ 。通过模拟寻优,提出马铃薯希森6号产量 $\geq 40.00\text{t}/\text{hm}^2$ 的相应农艺措施是每667m<sup>2</sup>种植密度为5500~6500株,平均6000株;施氮肥25~30kg,平均27.5kg;施磷肥30~40kg,平均35kg;施钾肥40~50kg,平均45kg。

**关键词:**马铃薯;产量;栽培密度;肥料;农艺措施;数学模型

## Study on the Relationship Between Yield, Cultivation Density and Fertilizer Application Rate of Potato Variety Xisen No. 6

WANG Zhenzhen<sup>1,2</sup>, CUI Changlei<sup>1,2</sup>, SUN Shasha<sup>1,2</sup>,  
KONG Haiming<sup>1,2</sup>, LI Xueyang<sup>1,2</sup>, HU Baigeng<sup>1,2</sup>( <sup>1</sup> National Engineering Technology Research Center for Potato, Laoling 253600, Shandong;<sup>2</sup> Laoling Xisen Potato Industry Group Co., Ltd., Laoling 253600, Shandong )

马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)是仅次于玉米、水稻、小麦的第四大主粮,也是粮菜兼用的重要经济作物<sup>[1]</sup>。据统计,中国的马铃薯种植面积和鲜薯产量均位于世界前列<sup>[2]</sup>,其总产量大约占据了全球马铃薯总产量的1/4<sup>[3]</sup>。伴随着产业链的日益完善,马铃薯产业为中国农村经济的发展、粮食安全的保障以及农民收入的提高做出了重要贡献<sup>[4]</sup>。2015年我国提出马铃薯主粮化发展战略<sup>[5]</sup>,把马铃薯列为国家第四大粮食作物<sup>[6]</sup>,因此马铃薯优良品种的选育对调整种植业结构、保障粮食安全及消除贫困具有深远意义。早春马铃薯播种于1~2月,收获

于4~6月,因其能占领马铃薯市场空缺而较其他季节的马铃薯价格高、市场稳定、种植效益好,深受种植户的青睐<sup>[7]</sup>。为了提高马铃薯的单产水平,促进马铃薯产业化水平的提高,本试验以希森6号为试验品种,在内蒙古商都县对马铃薯产量与栽培密度以及肥料施用量间的关系进行探究,以期为进一步提高马铃薯产量、优化高产高效栽培技术提供科学依据。

### 1 材料与方法

**1.1 试验材料** 以马铃薯品种希森6号为试验材料,希森6号是国家马铃薯工程技术研究中心和乐陵希森马铃薯产业集团有限公司以夏波蒂为母本、XS9304为父本,通过有性杂交系统选育而成的品种<sup>[8]</sup>,于2017年进行登记,登记编号为GPD马铃薯(2017)370005。该品种为中晚熟、鲜食及加工

崔长磊为共同第一作者

基金项目:山东省重点研发计划(重大科技创新工程)项目  
(2022CXGC010604)

通信作者:胡柏耿

兼用类型,适宜在内蒙古自治区、黑龙江、河北北部、山西北部、陕西北部、宁夏等北方一季作区,山东、河北南部、山西南部、四川等中原二季作区种植,被农业农村部列为农业主导品种之一。试验所用微型薯单薯重均大于15g,共计5625粒。试验肥料:尿素(N:46%)26kg;磷酸二铵( $P_2O_5$ :46%,N:16%)82kg;硫酸钾( $K_2O$ :50%)100kg。

**1.2 试验设计** 试验在内蒙古自治区乌兰察布市商都县西坊子村进行,采用4因素5水平二次回归通用旋转组合设计<sup>[9]</sup>。4个因素分别为种植密度、氮肥、磷肥和钾肥,5个水平分别为-2、-1、0、1、2(水平编码值见表1),根据大田种植经验,共设计31个处理(表2)。各处理组合随机排列,肥料作为基肥一次性施入(表3),其他田间管理同一般大田生产。每小区设5行区,每行长6.0m,行距0.9m,小区面积为27.0m<sup>2</sup>。收获时每小区收中间3行计产,并计算折合每hm<sup>2</sup>产量。田间实施处理组合及理论产量见表4。数据处理采用DPS处理系统<sup>[10]</sup>。

表1 试验因素及其设计水平

因素	间距	设计水平( $r=2$ )				
		-2	-1	0	1	2
$X_1$ (密度)	1000	2500	3500	4500	5500	6500
$X_2$ (尿素)	5	10	15	20	25	30
$X_3$ (磷酸二铵)	10	10	20	30	40	50
$X_4$ (硫酸钾)	15	10	25	40	55	70

密度单位为株/667m<sup>2</sup>,肥料单位为kg/667m<sup>2</sup>

## 2 结果与分析

**2.1 试验结果及数学模型建立** 根据多项式回归方程 $Y=b_0+\sum b_iX_i+\sum b_{ij}X_iX_j+\sum X_{ii}^2$ ,按表4理论产量结果计算出拟合方程的各项系数,从而得到马铃薯产量( $Y$ )与各试验因子间的回归数学模型。具体结果如下: $Y=40.0485718+1.3954X_1+1.96625X_2+2.05875X_3+1.44875X_4-3.2137X_1^2-2.54495X_2^2-2.05745X_3^2-0.97245X_4^2+1.83437X_1X_2+2.41562X_1X_3+1.85062X_2X_3$ 。对所见模型进行方差分析,结果见表5。

表2 试验设计方案

小区编号	设计水平				小区编号	设计水平			
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$		$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
1	5500	25	40	55	17	2500	20	30	40
2	5500	25	40	25	18	6500	20	30	40
3	5500	25	20	55	19	4500	10	30	40
4	5500	25	20	25	20	4500	30	30	40
5	5500	15	40	55	21	4500	20	10	40
6	5500	15	40	25	22	4500	20	50	40
7	5500	15	20	55	23	4500	20	30	10
8	5500	15	20	25	24	4500	20	30	70
9	3500	25	40	55	25	4500	20	30	40
10	3500	25	40	25	26	4500	20	30	40
11	3500	25	20	55	27	4500	20	30	40
12	3500	25	20	25	28	4500	20	30	40
13	3500	15	40	55	29	4500	20	30	40
14	3500	15	40	25	30	4500	20	30	40
15	3500	15	20	55	31	4500	20	30	40
16	3500	15	20	25					

表3 各小区密度及肥料用量

小区编号	株距(cm)	每行株数	小区株数	尿素用量(kg)	磷酸二铵用量(kg)	硫酸钾用量(kg)
1	13.5	45	225	0.976	3.520	4.453
2	13.5	45	225	0.976	3.520	2.024
3	13.5	45	225	1.588	1.760	4.453
4	13.5	45	225	1.588	1.760	2.024
5	13.5	45	225	0.096	3.520	4.453
6	13.5	45	225	0.096	3.520	2.024
7	13.5	45	225	0.708	1.760	4.453
8	13.5	45	225	0.708	1.760	2.024
9	21.2	28	140	0.976	3.520	4.453
10	21.2	28	140	0.976	3.520	2.024
11	21.2	28	140	1.588	1.760	4.453
12	21.2	28	140	1.588	1.760	2.024
13	21.2	28	140	0.096	3.520	4.453
14	21.2	28	140	0.096	3.520	2.024
15	21.2	28	140	0.708	1.760	4.453
16	21.2	28	140	0.708	1.760	2.024
17	29.6	20	100	0.842	2.640	3.238
18	11.4	53	265	0.842	2.640	3.238
19	16.5	36	180	0.038	2.640	3.238
20	16.5	36	180	1.722	2.640	3.238
21	16.5	36	180	1.454	0.880	3.238
22	16.5	36	180	0.230	4.400	3.238
23	16.5	36	180	0.842	2.640	0.810
24	16.5	36	180	0.842	2.640	5.667
25	16.5	36	180	0.842	2.640	3.238
26	16.5	36	180	0.842	2.640	3.238
27	16.5	36	180	0.842	2.640	3.238
28	16.5	36	180	0.842	2.640	3.238
29	16.5	36	180	0.842	2.640	3.238
30	16.5	36	180	0.842	2.640	3.238
31	16.5	36	180	0.842	2.640	3.238

表4 试验设计矩阵及理论产量结果

小区编号	设计水平				理论产量 (t/hm <sup>2</sup> )
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	
1	1	1	1	1	45.65
2	1	1	1	-1	42.03
3	1	1	-1	1	31.21
4	1	1	-1	-1	29.01
5	1	-1	1	1	29.78
6	1	-1	1	-1	31.46
7	1	-1	-1	1	33.37
8	1	-1	-1	-1	21.22
9	-1	1	1	1	35.04
10	-1	1	1	-1	26.53
11	-1	1	-1	1	32.32
12	-1	1	-1	-1	27.12
13	-1	-1	1	1	27.76
14	-1	-1	1	-1	28.05
15	-1	-1	-1	1	31.79
16	-1	-1	-1	-1	30.69
17	-2	0	0	0	24.57
18	2	0	0	0	29.10
19	0	-2	0	0	26.41
20	0	2	0	0	32.61
21	0	0	-2	0	26.50
22	0	0	2	0	36.42
23	0	0	0	-2	34.81
24	0	0	0	2	36.79
25	0	0	0	0	40.84
26	0	0	0	0	39.13
27	0	0	0	0	39.37
28	0	0	0	0	39.31
29	0	0	0	0	38.87
30	0	0	0	0	40.92
31	0	0	0	0	41.90

表5 回归模拟的方差分析

变异来源	平方和	自由度	均方	F值	P值
回归	997.7609	11	90.7055	15.6946	0
残差	109.8087	19	5.7794	-	-
失拟性检验	101.7564	13	7.8274	5.8324	0.02
误差	8.0523	6	1.3420	-	-
总变异	1107.5696	30	-	-	-

通过对试验结果进行方差分析,回归方程显著性检验  $F_2=15.6946>F_{0.05}(11,19)$ ,说明得到的回归方程显著;失拟性检验  $F_1=5.8324<F_{0.05}(13,6)$ ,说明回归方程无失拟因素存在,回归方程与实测值能较好的拟合,较好地反映马铃薯产量与密度及氮磷钾肥施用量这4个主要可控因子的关系,可用模型进行模拟寻优。

**2.2 主效应分析** 采用DPS软件对变量、样本及各因素组合对理论产量的影响进行分析(表6~8)。根据表中回归系数绝对值的大小可以直接比较各因素一次项对马铃薯产量的影响,各因素对产量影响的大小顺序为磷肥( $X_3$ )>氮肥( $X_2$ )>钾肥( $X_4$ )>密度( $X_1$ )。

表6 变量分析

变量	平方和	回归系数	标准回归系数	t值	P值
X <sub>1</sub>	46.7325	1.3954	0.2054	2.8436	0.0104
X <sub>2</sub>	92.7873	1.9663	0.2894	4.0068	0.0008
X <sub>3</sub>	101.7228	2.0588	0.3031	4.1953	0.0005
X <sub>4</sub>	50.3730	1.4488	0.2133	2.9523	0.0082
X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	303.8402	-3.2137	-0.5238	7.1485	0
X <sub>2</sub> <sup>2</sup>	190.5432	-2.5450	-0.4148	5.6609	0
X <sub>3</sub> <sup>2</sup>	124.5357	-2.0575	-0.3353	4.5766	0.0002
X <sub>4</sub> <sup>2</sup>	27.8210	-0.9725	-0.1585	2.1631	0.0435
X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	53.8389	1.8344	0.2205	3.0522	0.0066
X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	93.3639	2.4156	0.2903	4.0193	0.0007
X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	54.7970	1.8506	0.2224	3.0792	0.0062

相关系数  $R=0.949134$ , 决定系数  $R^2=0.9009$ , 剩余标准差  $SSE=2.4040$ , 调整样本系数  $Ra=0.918399$

**2.3 单因素分析** 采用降维法<sup>[11]</sup>,将建立的回归方程中4个因素中的3个固定在0水平,得到其余某一个因素的一元偏回归模型。密度:  $Y_1=40.0485718+1.3954X_1-3.2137X_1^2$ ; 氮肥:  $Y_2=40.0485718+1.96625X_2-2.54495X_2^2$ ; 磷肥:  $Y_3=40.0485718+2.05875X_3-2.05745X_3^2$ ; 钾肥:  $Y_4=40.0485718+1.44875X_4-0.97245X_4^2$ 。从以上各式可以看出,各因素对产量的影响均呈开口向下的二次抛物线。当在-2水平时产量均较低,但产量随着取值水平的升高而增加。

从表9、表10和图1可以看出,在设计范围内,栽培密度及氮磷钾肥施用量对产量的影响均随取值水平的变化而变化,呈先上升后下降的变化趋势。

表7 样本分析

样本	观察值	拟合值	拟合误差	相对误差(%)	样本	观察值	拟合值	拟合误差	相对误差(%)
1	45.65	44.2298	1.4202	3.1111	17	24.57	24.4029	0.1671	0.6800
2	42.03	41.3323	0.6977	1.6600	18	29.10	29.9846	-0.8846	3.0398
3	31.21	31.5798	-0.3698	1.1848	19	26.41	25.9363	0.4738	1.7938
4	29.01	28.6823	0.3277	1.1296	20	32.61	33.8013	-1.1912	3.6530
5	29.78	32.9273	-3.1473	10.5685	21	26.50	27.7013	-1.2013	4.5330
6	31.46	30.0298	1.4302	4.5461	22	36.42	35.9363	0.4838	1.3283
7	33.37	27.6798	5.6902	17.0519	23	34.81	33.2613	1.5488	4.4492
8	21.22	24.7823	-3.5623	16.7874	24	36.79	39.0563	-2.2662	6.1600
9	35.04	32.9390	2.1010	5.9961	25	40.84	40.0486	0.7914	1.9379
10	26.53	30.0415	-3.5115	13.2358	26	39.13	40.0486	-0.9186	2.3475
11	32.32	29.9515	2.3685	7.3284	27	39.37	40.0486	-0.6786	1.7236
12	27.12	27.0540	0.0660	0.2435	28	39.31	40.0486	-0.7386	1.8788
13	27.76	28.9740	-1.2140	4.3730	29	38.87	40.0486	-1.1786	3.0321
14	28.05	26.0765	1.9735	7.0358	30	40.92	40.0486	0.8714	2.1296
15	31.79	33.3890	-1.5990	5.0298	31	41.90	40.0486	1.8514	4.4187
16	30.69	30.4915	0.1985	0.6469					

Durbin-Watson 统计量  $d=2.8424$ 

表8 各因素组合对理论产量的影响

样本	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	实际产量 ( $t/hm^2$ )	样本	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	实际产量 ( $t/hm^2$ )
1	5500	25	40	55	27.30	17	2500	20	30	40	29.14
2	5500	25	40	25	36.06	18	6500	20	30	40	38.21
3	5500	25	20	55	42.43	19	4500	10	30	40	44.83
4	5500	25	20	25	38.01	20	4500	30	30	40	25.23
5	5500	15	40	55	39.56	21	4500	20	10	40	33.01
6	5500	15	40	25	42.92	22	4500	20	50	40	32.84
7	5500	15	20	55	46.74	23	4500	20	30	10	41.61
8	5500	15	20	25	42.44	24	4500	20	30	70	33.59
9	3500	25	40	55	12.07	25	4500	20	30	40	41.67
10	3500	25	40	25	19.07	26	4500	20	30	40	50.27
11	3500	25	20	55	16.64	27	4500	20	30	40	38.74
12	3500	25	20	25	20.24	28	4500	20	30	40	38.62
13	3500	15	40	55	35.51	29	4500	20	30	40	25.75
14	3500	15	40	25	36.10	30	4500	20	30	40	25.84
15	3500	15	20	55	43.57	31	4500	20	30	40	25.81
16	3500	15	20	25	41.38						

表9 单因素效应分析

水平	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	水平	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
-2	24.4029	25.9363	27.7013	33.2613	0.4	40.0925	40.4279	40.5429	40.4725
-1.6	29.5888	30.3875	31.4875	35.2411	0.8	39.1081	39.9928	40.3788	40.5852
-1.2	33.7463	34.0243	34.6153	36.9097	1.2	37.0953	38.7433	39.5563	40.3867
-0.8	36.8755	36.8468	37.0848	38.2672	1.6	34.0542	36.6795	38.0755	39.8771
-0.4	38.9762	38.8549	38.8959	39.3135	2	29.9846	33.8013	35.9363	39.0563
0	40.0486	40.0486	40.0486	40.0486					

表 10 单因子效应分析(其他因子为 0 水平)

编号	$X_1$	$Y$	$X_2$	$Y$	$X_3$	$Y$	$X_4$	$Y$
1	-2.0000	24.4029	-2.0000	25.9363	-2.0000	27.7013	-2.0000	33.2613
2	-1.8667	26.2458	-1.8667	27.5105	-1.8667	29.0365	-1.8667	33.9558
3	-1.7333	27.9745	-1.7333	28.9942	-1.7333	30.2986	-1.7333	34.6157
4	-1.6000	29.5888	-1.6000	30.3875	-1.6000	31.4875	-1.6000	35.2411
5	-1.4667	31.0889	-1.4667	31.6903	-1.4667	32.6033	-1.4667	35.8319
6	-1.3333	32.4748	-1.3333	32.9025	-1.3333	33.6459	-1.3333	36.3881
7	-1.2000	33.7463	-1.2000	34.0243	-1.2000	34.6153	-1.2000	36.9097
8	-1.0667	34.9036	-1.0667	35.0556	-1.0667	35.5116	-1.0667	37.3968
9	-0.9333	35.9467	-0.9333	35.9965	-0.9333	36.3348	-0.9333	37.8493
10	-0.8000	36.8755	-0.8000	36.8468	-0.8000	37.0848	-0.8000	38.2672
11	-0.6667	37.6900	-0.6667	37.6066	-0.6667	37.7616	-0.6667	38.6505
12	-0.5333	38.3902	-0.5333	38.2760	-0.5333	38.3653	-0.5333	38.9993
13	-0.4000	38.9762	-0.4000	38.8549	-0.4000	38.8959	-0.4000	39.3135
14	-0.2667	39.4479	-0.2667	39.3433	-0.2667	39.3533	-0.2667	39.5931
15	-0.1333	39.8054	-0.1333	39.7412	-0.1333	39.7375	-0.1333	39.8381
16	0	40.0486	0	40.0486	0	40.0486	0	40.0486
17	0.1333	40.1775	0.1333	40.2655	0.1333	40.2865	0.1333	40.2245
18	0.2667	40.1922	0.2667	40.3919	0.2667	40.4513	0.2667	40.3658
19	0.4000	40.0925	0.4000	40.4279	0.4000	40.5429	0.4000	40.4725
20	0.5333	39.8787	0.5333	40.3733	0.5333	40.5613	0.5333	40.5446
21	0.6667	39.5505	0.6667	40.2283	0.6667	40.5066	0.6667	40.5822
22	0.8000	39.1081	0.8000	39.9928	0.8000	40.3788	0.8000	40.5852
23	0.9333	38.5515	0.9333	39.6668	0.9333	40.1778	0.9333	40.5536
24	1.0667	37.8805	1.0667	39.2503	1.0667	39.9036	1.0667	40.4875
25	1.2000	37.0953	1.2000	38.7433	1.2000	39.5563	1.2000	40.3867
26	1.3333	36.1959	1.3333	38.1459	1.3333	39.1359	1.3333	40.2514
27	1.4667	35.1821	1.4667	37.4579	1.4667	38.6423	1.4667	40.0815
28	1.6000	34.0542	1.6000	36.6795	1.6000	38.0755	1.6000	39.8771
29	1.7333	32.8119	1.7333	35.8106	1.7333	37.4356	1.7333	39.6381
30	1.8667	31.4554	1.8667	34.8511	1.8667	36.7225	1.8667	39.3644
31	2.0000	29.9846	2.0000	33.8013	2.0000	35.9363	2.0000	39.0563

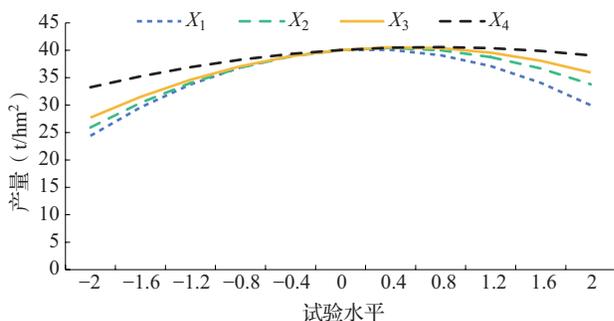


图 1 单因素与产量的关系

当因子编码值小于 0 时,随着密度和磷肥施用量的增加,产量相应增加,至 0 水平时达到最大值,之后随着各因子水平的继续增加,产量逐渐下降;当因子编码值小于 1 时,随着磷肥和钾肥施用量的增加,产量相应增加,至 1 水平时达到最大值,随着各因子水平的继续增加,产量逐渐下降。以上结果说明,栽培密度及氮磷钾施用量存在一个适宜的变化幅度,超过此范围,反而会减产。

2.4 交互作用效应分析 从表 11~16 可以看出, 因子间的交互效应对马铃薯的产量有一定的影响。 $X_1X_2$ 、 $X_1X_3$ 、 $X_2X_3$  的回归系数为正, 表明在一定范围内, 在提高栽培密度的同时增加氮肥、钾肥用量, 或同时增加氮肥、磷肥用量, 或同时增加磷肥、钾肥用

量, 都可以增加马铃薯产量。 $X_1X_4$ 、 $X_2X_4$  的回归系数均为负, 表明密度与钾肥以及氮肥与钾肥的施用量之间有一定的互补作用。在马铃薯生产中, 只有合理密植并结合氮、磷、钾肥的科学施用才能实现高产。

表 11 两因子效应分析  $X_1X_2$  (其他因子为 0 水平)

水平	-2	-1.6	-1.2	-0.8	-0.4	0	0.4	0.8	1.2	1.6	2
-2	17.6281	20.6118	22.7812	24.1361	24.6767	24.4029	23.3147	21.4121	18.6952	15.1638	10.8181
-1.6	21.3465	24.6237	27.0866	28.7350	29.5691	29.5888	28.7941	27.1850	24.7616	21.5237	17.4715
-1.2	24.0365	27.6073	30.3636	32.3056	33.4331	33.7463	33.2451	31.9296	29.7996	26.8553	23.0965
-0.8	25.6981	29.5624	32.6122	34.8477	36.2688	36.8755	36.6678	35.6457	33.8092	31.1584	27.6931
-0.4	26.3314	30.4891	33.8325	36.3614	38.0760	38.9762	39.0620	38.3334	36.7905	34.4331	31.2614
0	25.9363	30.3875	34.0243	36.8468	38.8549	40.0486	40.4279	39.9928	38.7433	36.6795	33.8013
0.4	24.5127	29.2575	33.1878	36.3038	38.6054	40.0925	40.7654	40.6238	39.6678	37.8975	35.3127
0.8	22.0608	27.0990	31.3229	34.7324	37.3274	39.1081	40.0744	40.2264	39.5639	38.0870	35.7958
1.2	18.5805	23.9123	28.4296	32.1326	35.0211	37.0953	38.3551	38.8006	38.4316	37.2483	35.2505
1.6	14.0718	19.6971	24.5079	28.5044	31.6865	34.0542	35.6075	36.3464	36.2709	35.3811	33.6768
2	8.5348	14.4535	19.5578	23.8478	27.3234	29.9846	31.8314	32.8638	33.0818	32.4855	31.0748

表 12 两因子效应分析  $X_1X_3$  (其他因子为 0 水平)

水平	-2	-1.6	-1.2	-0.8	-0.4	0	0.4	0.8	1.2	1.6	2
-2	21.7181	23.5718	24.7672	25.3041	25.1827	24.4029	22.9647	20.8681	18.1132	14.6998	10.6281
-1.6	24.9715	27.2117	28.7936	29.7170	29.9821	29.5888	28.5371	26.8270	24.4586	21.4317	17.7465
-1.2	27.1965	29.8233	31.7916	33.1016	33.7531	33.7463	33.0811	31.7576	29.7756	27.1353	23.8365
-0.8	28.3931	31.4064	33.7612	35.4577	36.4958	36.8755	36.5968	35.6597	34.0642	31.8104	28.8981
-0.4	28.5614	31.9611	34.7025	36.7854	38.2100	38.9762	39.0840	38.5334	37.3245	35.4571	32.9314
0	27.7013	31.4875	34.6153	37.0848	38.8959	40.0486	40.5429	40.3788	39.5563	38.0755	35.9363
0.4	25.8127	29.9855	33.4998	36.3558	38.5534	40.0925	40.9734	41.1958	40.7598	39.6655	37.9127
0.8	22.8958	27.4550	31.3559	34.5984	37.1824	39.1081	40.3754	40.9844	40.9349	40.2270	38.8608
1.2	18.9505	23.8963	28.1836	31.8126	34.7831	37.0953	38.7491	39.7446	40.0816	39.7603	38.7805
1.6	13.9768	19.3091	23.9829	27.9984	31.3555	34.0542	36.0945	37.4764	38.1999	38.2651	37.6718
2	7.9748	13.6935	18.7538	23.1558	26.8994	29.9846	32.4114	34.1798	35.2898	35.7415	35.5348

表 13 两因子效应分析  $X_1X_4$  (其他因子为 0 水平)

水平	-2	-1.6	-1.2	-0.8	-0.4	0	0.4	0.8	1.2	1.6	2
-2	17.6156	19.5954	21.2641	22.6215	23.6678	24.4029	24.8268	24.9395	24.7411	24.2314	23.4106
-1.6	22.8015	24.7813	26.4500	27.8074	28.8537	29.5888	30.0127	30.1254	29.9270	29.4173	28.5965
-1.2	26.9590	28.9389	30.6075	31.9650	33.0112	33.7463	34.1702	34.2830	34.0845	33.5749	32.7540
-0.8	30.0881	32.0680	33.7366	35.0941	36.1404	36.8755	37.2994	37.4121	37.2136	36.7040	35.8831
-0.4	32.1889	34.1687	35.8374	37.1948	38.2411	38.9762	39.4001	39.5128	39.3144	38.8047	37.9839
0	33.2613	35.2411	36.9097	38.2672	39.3135	40.0486	40.4725	40.5852	40.3867	39.8771	39.0563
0.4	33.3052	35.2851	36.9537	38.3112	39.3575	40.0925	40.5165	40.6292	40.4307	39.9211	39.1002
0.8	32.3208	34.3006	35.9693	37.3268	38.3730	39.1081	39.5320	39.6448	39.4463	38.9366	38.1158
1.2	30.3080	32.2879	33.9565	35.3140	36.3602	37.0953	37.5192	37.6320	37.4335	36.9239	36.1030
1.6	27.2668	29.2467	30.9153	32.2728	33.3191	34.0542	34.4781	34.5908	34.3923	33.8827	33.0618
2	23.1973	25.1771	26.8457	28.2032	29.2495	29.9846	30.4085	30.5212	30.3227	29.8131	28.9923

表 14 两因子效应分析  $X_2X_3$  (其他因子为 0 水平)

水平	-2	-1.6	-1.2	-0.8	-0.4	0	0.4	0.8	1.2	1.6	2
-2	20.9914	23.2972	24.9445	25.9335	26.2641	25.9363	24.9501	23.3055	21.0025	18.0412	14.4214
-1.6	23.9622	26.5640	28.5075	29.7925	30.4192	30.3875	29.6974	28.3489	26.3421	23.6768	20.3532
-1.2	26.1185	29.0165	31.2560	32.8372	33.7599	34.0243	33.6303	32.5780	30.8672	28.4981	25.4705
-0.8	27.4605	30.6545	33.1902	35.0674	36.2863	36.8468	36.7489	35.9926	34.5780	32.5049	29.7735
-0.4	27.9881	31.4782	34.3099	36.4833	37.9983	38.8549	39.0531	38.5929	37.4743	35.6974	33.2621
0	27.7013	31.4875	34.6153	37.0848	38.8959	40.0486	40.5429	40.3788	39.5563	38.0755	35.9363
0.4	26.6001	30.6824	34.1063	36.8719	38.9791	40.4279	41.2183	41.3503	40.8239	39.6392	37.7961
0.8	24.6845	29.0629	32.7830	35.8446	38.2479	39.9928	41.0793	41.5074	41.2772	40.3885	38.8415
1.2	21.9545	26.6291	30.6452	34.0030	36.7023	38.7433	40.1259	40.8502	40.9160	40.3235	39.0725
1.6	18.4102	23.3808	27.6931	31.3469	34.3424	36.6795	38.3582	39.3785	39.7405	39.4440	38.4892
2	14.0514	19.3182	23.9265	27.8765	31.1681	33.8013	35.7761	37.0925	37.7505	37.7502	37.0914

表 15 两因子效应分析  $X_2X_4$  (其他因子为 0 水平)

水平	-2	-1.6	-1.2	-0.8	-0.4	0	0.4	0.8	1.2	1.6	2
-2	19.1489	21.1288	22.7974	24.1549	25.2012	25.9363	26.3602	26.4729	26.2744	25.7648	24.9439
-1.6	23.6002	25.5800	27.2487	28.6061	29.6524	30.3875	30.8114	30.9241	30.7257	30.2160	29.3952
-1.2	27.2370	29.2169	30.8855	32.2430	33.2892	34.0243	34.4482	34.5610	34.3625	33.8528	33.0320
-0.8	30.0595	32.0393	33.7080	35.0654	36.1117	36.8468	37.2707	37.3834	37.1850	36.6753	35.8545
-0.4	32.0676	34.0474	35.7160	37.0735	38.1198	38.8549	39.2788	39.3915	39.1930	38.6834	37.8626
0	33.2613	35.2411	36.9097	38.2672	39.3135	40.0486	40.4725	40.5852	40.3867	39.8771	39.0563
0.4	33.6406	35.6204	37.2890	38.6465	39.6928	40.4279	40.8518	40.9645	40.7660	40.2564	39.4356
0.8	33.2055	35.1853	36.8540	38.2114	39.2577	39.9928	40.4167	40.5294	40.3310	39.8213	39.0005
1.2	31.9560	33.9359	35.6045	36.9620	38.0082	38.7433	39.1672	39.2800	39.0815	38.5719	37.7510
1.6	29.8922	31.8720	33.5407	34.8981	35.9444	36.6795	37.1034	37.2161	37.0177	36.5080	35.6872
2	27.0139	28.9938	30.6624	32.0199	33.0662	33.8013	34.2252	34.3379	34.1394	33.6298	32.8089

表 16 两因子效应分析  $X_3X_4$  (其他因子为 0 水平)

水平	-2	-1.6	-1.2	-0.8	-0.4	0	0.4	0.8	1.2	1.6	2
-2	20.9139	22.8938	24.5624	25.9199	26.9662	27.7013	28.1252	28.2379	28.0394	27.5298	26.7089
-1.6	24.7002	26.6800	28.3487	29.7061	30.7524	31.4875	31.9114	32.0241	31.8257	31.3160	30.4952
-1.2	27.8280	29.8079	31.4765	32.8340	33.8802	34.6153	35.0392	35.1520	34.9535	34.4439	33.6230
-0.8	30.2975	32.2773	33.9460	35.3034	36.3497	37.0848	37.5087	37.6214	37.4230	36.9133	36.0925
-0.4	32.1086	34.0884	35.7570	37.1145	38.1608	38.8959	39.3198	39.4325	39.2340	38.7244	37.9036
0	33.2613	35.2411	36.9097	38.2672	39.3135	40.0486	40.4725	40.5852	40.3867	39.8771	39.0563
0.4	33.7556	35.7354	37.4040	38.7615	39.8078	40.5429	40.9668	41.0795	40.8810	40.3714	39.5506
0.8	33.5915	35.5713	37.2400	38.5974	39.6437	40.3788	40.8027	40.9154	40.7170	40.2073	39.3865
1.2	32.7690	34.7489	36.4175	37.7750	38.8212	39.5563	39.9802	40.0930	39.8945	39.3849	38.5640
1.6	31.2882	33.2680	34.9367	36.2941	37.3404	38.0755	38.4994	38.6121	38.4137	37.9040	37.0832
2	29.1489	31.1288	32.7974	34.1549	35.2012	35.9363	36.3602	36.4729	36.2744	35.7648	34.9439

表 17 各因素组合对实际产量的影响

频数	$X_1$	频率	$X_2$	频率	$X_3$	频率	$X_4$	频率
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	4	0.12
3	7	0.21	6	0.18	2	0.06	10	0.30
4	17	0.52	15	0.45	16	0.48	12	0.36
5	9	0.27	12	0.36	15	0.45	7	0.21

**2.5 最佳模拟寻优** 经计算机模拟,在本试验范围内,马铃薯希森6号的最高产量为45.5604t/hm<sup>2</sup>,对应的组合方案为 $X_1$ 的系数为1.4344, $X_2$ 的系数为1.6312, $X_3$ 的系数为2.0000, $X_4$ 的系数为0.7432。对其每hm<sup>2</sup>产量大于40.00t的31个方案进行频数分析(表17),结果表明马铃薯产量大于40.00t的栽培方案中每667m<sup>2</sup>种植密度为5500~6500株,平均6000株;施氮肥25~30kg,平均27.5kg;施磷肥30~40kg,平均35kg;施钾肥40~50kg,平均45kg。

### 3 讨论与结论

肥料在马铃薯的生长发育过程中扮演着重要的角色,在作物增产方面起到了不可替代的作用<sup>[12]</sup>,合理施肥可以减轻化肥施用对土壤的压力,建立和谐的生态环境,进而提升土壤质量<sup>[13]</sup>。研究表明,适量的氮肥可以通过提高土壤有机质和促进根系生长来增强0~20cm土层土壤团聚体的形成和稳定性<sup>[14]</sup>,适量施用钾肥能够提高马铃薯块茎的产量<sup>[15]</sup>。合理施用肥料可以使单位面积粮食产量提高55%,总产量提高30%<sup>[16]</sup>。

种植密度是作物栽培的一个重要指标,马铃薯栽培中超过适宜栽培密度会造成一定范围的减产<sup>[17]</sup>。在不增加肥料等其他物质投入的前提下,通过改变栽培密度可以调节群体结构与光能利用,对植株各器官间碳水化合物的转运与积累产生作用,进而影响马铃薯块茎的形态建成<sup>[18-20]</sup>。适当增加栽培密度有助于马铃薯地上部分生长,主茎数和分枝数的增加使马铃薯最大叶面积指数较早形成,增大植株上层对光能的利用率。光合产物积累较早,有利于物质的运输和分配,从而增加产量。但密度过大会导致马铃薯植株徒长,茎秆变细、不抗倒伏<sup>[21]</sup>,出现植株之间相互缠绕的情况,导致通风透光性和光能利用率下降,影响其生长发育。马燕燕等<sup>[22]</sup>研究栽培密度对华薯1号、兴佳2号秋马铃薯生长的影响,发现随马铃薯栽培密度的增加,植株的

株高和主茎数呈现显著增加的趋势,而茎粗和SPAD值呈下降趋势。雷尊国等<sup>[23]</sup>研究不同栽培密度对宣薯2号的结果表明,栽培密度对其生育时期、株高、茎粗、单株结薯数的影响均不显著,但可导致叶重、根重、茎重、单薯重和产量差异显著。金光辉等<sup>[24]</sup>对垦薯1号进行不同密度下农艺性状比较,发现马铃薯主茎数随栽培密度减小呈递减趋势。综上所述,在马铃薯高产栽培措施中要进行合理密植,种植密度过大则会造成土地资源的不合理配置,同时增加肥料、土地等资源的投入,种植密度过小则会导致植株间相互遮荫,不能高效利用光能,导致产量降低。

本研究通过试验建立了希森6号马铃薯产量与密度及氮磷钾肥施用量之间的优化数学模型,模型的拟合性较好。对模型解析得知,各因素对马铃薯产量的影响均呈开口向下抛物线关系。根据所建模型进行模拟寻优获得马铃薯产量 $\geq 40.00\text{t}/\text{hm}^2$ 相应的农艺措施是马铃薯每667m<sup>2</sup>种植密度为5500~6500株,平均6000株;施氮肥25~30kg,平均27.5kg;施磷肥30~40kg,平均35kg;施钾肥40~50kg,平均45kg。

### 参考文献

- [1] 王丽丽,杨采青,王瑛,李欣海,万方浩,张爱兵. 全球入侵物种马铃薯块茎蛾生态位转移及适生区扩展. 应用生态学报,2024,35(3):797-805
- [2] 朱武斌,邓廷彬,刘永霞,李文佳,李振霞,管青霞,夏建红. 干旱半干旱地区马铃薯品种(系)引进与筛选试验. 中国种业,2024(10):113-120
- [3] 罗其友,伦闰琪,高明杰,刘洋. 2021-2025年我国马铃薯产业高质量发展战略路径. 中国农业资源与区划,2022,43(3):37-45
- [4] 贾楠. 马铃薯与几种主要农作物的间作套种技术. 农家参谋·种业大观,2010(12):44
- [5] 张庆柱,张彩霞. 实施我国马铃薯主粮化的战略. 农业科技与装备,2015(7):80-81
- [6] 王珍珍,孙莎莎,张志凯,崔长磊,杨芸,李学洋,王越,吕健,王悦,

(下转第110页)

对较大,玉米种植以夏播为主。本试验于2023年在淄博市桓台县开展,在种植过程中,6月和7月整体持续高温,降水少,光照强,生长速度快,蒸腾作用旺盛,需及时浇水防止旱情出现;8月和9月有5次较大降雨,整体气温偏高且未出现连续阴雨天气,未影响玉米授粉,病虫害轻。台风过境山东,只有细雨,没有出现强风和倒伏。茎腐病等发生较晚且轻,整体气候条件对玉米产量的形成有利,各品种生育期较适宜。

本研究对40个参试品种的生育期、农艺性状、产量相关性状等方面进行比较分析,以丰产性、抗病性作为主要考核指标,其他性状作为参考进行综合评价筛选,结果表明鑫瑞25、硕秋702、京农玉658、鲁星702、鲁单608、九衡517、MC921、中农大178、龙华389、鑫星321、吉星1号、美达108、德单145、德单163、郑单5179、京农玉281、桓丰109这17个品种与对照郑单958相比,产量均增加5.0%以上,但是鉴于京农玉658、京农玉281、MC921、九衡517、德单163出现不同程度的茎腐病,因此建议推广剩余12个品种。参试品种鑫瑞25在抗病性、

增产方面表现突出,产量与对照郑单958相比增加19.3%,该品种在2014-2015年参加山东省夏玉米品种早熟组区域试验时,2年平均产量747.1kg/667m<sup>2</sup>,比对照郑单958增产10.8%,25个试点全部增产,与本研究增产趋势一致,在40个参试品种中仍具有较大优势。本试验为筛选适宜淄博市种植的玉米品种提供了科学依据,下一步将配套高产栽培技术,在淄博区域内推广种植,以推动淄博玉米产业高质量发展。

#### 参考文献

- [1] 李少昆. 我国玉米机械粒收质量影响因素及粒收技术的发展方向. 石河子大学学报:自然科学版,2017,35(3):265-271
- [2] 杨红旗,路凤银,郝仰坤,董兵. 中国玉米产业现状与发展问题探讨. 中国农学通报,2011,27(6):368-373
- [3] 孙传仁,魏清岗. 山东省玉米产业发展现状与展望. 农业展望,2020,16(5):34-37
- [4] 张丽,罗汉民,孟琳,陈凤龙,公丕峰,荆延东. 山东省淄博市玉米种业现状及发展建议. 中国种业,2021(10):39-41
- [5] 张运校. 对加快推进运城现代种业发展的思考. 种子科技,2012,30(5):14-15

(收稿日期:2024-11-01)

#### (上接第102页)

- 龚丽娟,胡柏耿. 马铃薯太空育种的发展及其展望 // 中国作物学会马铃薯专业委员会. 马铃薯产业与大食物观(2024). 黑龙江:黑龙江科学技术出版社,2024:318-320
- [7] 金璟,龙蔚,张德亮,李学坤. 云南省冬早马铃薯产业发展探讨. 农村经济与科技,2014,25(3):34-35
  - [8] 朱炎辉,崔长磊,王敏,孔海明,黄兆文,屈海东,田恒林,孙莎莎,冯玉钿,谢开云. 马铃薯新品种希森6号的选育. 中国马铃薯,2017,31(5):317-318
  - [9] 徐中儒. 农业试验最优回归设计. 哈尔滨:黑龙江科学技术出版社,1988
  - [10] 唐启义,冯明光. DPS数据处理系统. 北京:科学出版社,2006
  - [11] 陈娟,王平,谢成俊,孙振荣. 陇中旱作区氮磷钾肥施用量对马铃薯生长与产量的影响. 中国土壤与肥料,2023(9):128-135
  - [12] 王晓斌. 引进马铃薯种质资源的综合评价. 兰州:甘肃农业大学,2017
  - [13] 李跃森,洪佳敏,吴妙鸿,林宝妹,李海明. 不同施肥模式对蕉园土壤及香蕉品质的影响. 中国果菜,2024,44(10):57-60
  - [14] 朱树伟. 耕作方式与施氮量对土壤有机碳积累和小麦玉米产量的影响. 泰安:山东农业大学,2022
  - [15] 韩羽,杨亚亚,吴娜,刘吉利,满本菊,杨永森. 施钾量对宁夏旱区马铃薯干物质积累及养分利用特性的影响. 江苏农业科学,2023,51(9):119-124
  - [16] 朱兆良,金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题. 植物营养与肥料

学报,2013,19(2):259-273

- [17] 张永成,张风军. 马铃薯产量与栽培密度及氮磷钾肥施用量的关系研究. 中国种业,2010(9):68-70
- [18] Allen E J, Scott R K. An analysis of growth of the potato crop. The Journal of Agricultural Science, 1980, 94(3):583-606
- [19] 薛占奎,胡谷琅,徐晶晶,施佳炜,金丽. 栽培密度及肥料运筹对马铃薯产量及经济性状的影响. 浙江农业科学,2017,58(6):953-955
- [20] 杨雁华. 种植密度对马铃薯农艺性状及产量的影响. 农业开发与装备,2017(6):174
- [21] 邓振鹏,向颖,杨晓璐,王星,陈子恒,林茜,赵勇,易小平,周克有,舒进康,李明聪,王季春. 密度和行距配置对马铃薯生长发育、产量和光合特性的影响 // 中国作物学会马铃薯专业委员会. 马铃薯产业与种业创新(2022). 黑龙江:黑龙江科学技术出版社,2022:321-323
- [22] 马燕燕,姜艳芳,贡丹敏,蔡林志,秦玉芝,周华兰,熊兴耀,胡新喜. 不同种植密度对秋马铃薯生长及产质量的影响. 湖南农业科学,2022(1):22-25
- [23] 雷尊国,邓宽平,彭慧元. 栽培密度对马铃薯宣薯2号农艺性状及产量的影响. 贵州农业科学,2011,39(12):80-82
- [24] 金光辉,高幼华,刘喜才,尤晗,姜丽丽,孙静,冯玉钿,牟芮,吴立萍,李雅南. 栽培密度对马铃薯农艺性状及产量的影响. 东北农业大学学报,2015,46(7):16-21

(收稿日期:2024-10-14)