



徐紫薯 8 号优选栽插密度与氮钾施肥方案研究

刘 明, 靳 容, 于永超, 赵 鹏, 张强强, 朱晓亚, 王 静, 唐忠厚*

(江苏徐淮地区徐州农业科学研究所 / 国家土壤质量徐州观测实验站, 江苏 徐州 221131)

摘 要:为筛选徐紫薯 8 号适宜的栽插密度和氮钾肥施用水平, 选取栽插密度 (D, 5.25 万、6.00 万和 6.75 万株 $\cdot$ hm^{-2})、施氮量 (N, 0、45、90 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 和施钾 (K_2O) 量 (K, 0、120、240 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 作为影响因素, 设计三因素三水平正交试验, 通过极差分析、方差分析和多重比较, 评价不同处理组合对徐紫薯 8 号产量、营养品质和淀粉糊化特征的影响, 以确定最佳的栽培方案。结果表明, (1) 密度和钾肥水平对徐紫薯 8 号块根产量有显著影响, 密度水平对地上部生物量和根冠比有显著影响。2022 和 2023 年块根产量均为 D3N1K3 处理组最高, 分别比最低组 D1N1K1 显著高出 44.1% 和 28.8%。极差分析结果表明影响块根产量的 3 个因素主次顺序为 $D>K>N$, 最优组合为 D3N2K3。(2) 氮肥对淀粉、还原糖和蛋白质含量的影响最大 (R 值分别为 24.9、15.9 和 9.0), 密度对可溶性糖含量的影响最大 ($R=20.1$)。还原糖和可溶性糖含量最高的组合为 D3N1K3, 多重比较与极差分析结果一致。(3) 块根淀粉糊化的最高黏度、热浆黏度和冷浆黏度均在处理组 D3N3K2 最高 (分别为 6578、3252 和 4349 cP), 而极差分析预测最高的为 D3N3K3。(4) 回归曲线方程显示, 密度、施氮量和施钾量分别为 6.75 万株 $\cdot$ hm^{-2} (D3)、48 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (接近 N2) 和 240 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (K3) 时, 可获得最大块根产量 27.07 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 但营养品质和淀粉品质受到一定影响。综上, 以徐紫薯 8 号产量为目标的最佳处理组合为密度 6.75 万株 $\cdot$ hm^{-2} 、N 48 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 K_2O 240 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 可根据鲜食或淀粉用途对氮肥用量进行适当调整。

关键词: 紫薯; 密度; 氮钾配比; 产量; 品质

甘薯 (*Ipomoea batatas*) 是我国重要的粮食作物, 也是重要的饲料及工业原料, 年种植面积为 215.7 万 hm^2 , 总产量 4683 万 t, 均居世界首位^[1-2]。紫甘薯富含花青素、黄酮类、多糖等功能性成分, 具有提高人体抗氧化能力、延缓衰老、改善血糖血脂、预防心血管疾病等功能, 是一种食药兼用的理想作物^[3-4]。徐紫薯 8 号由江苏徐淮地区徐州农业科学研究所育成, 具有高产、高花青素含量、早熟、口感好等特点, 是集鲜食与加工为一体的全能型紫甘薯新品种^[5]。据统计, 徐紫薯 8 号种植面积占全国紫甘薯种植面积的 10% 以上^[6], 且栽种范围广泛, 北到内蒙中部、南到海南、西到新疆中部等区域均有种植^[7]。因此, 探索徐紫薯 8 号高产稳产和品质调优的栽培技术, 对徐紫薯 8 号增产增效、促进紫甘薯产业发展具有重要意义。

农业生产中, 通常把提高种植密度和增施氮肥作为提高单产的主要途径。然而, 氮肥过量施用不仅会导致甘薯地上部旺长、延迟结薯、降低块根产量, 也会降低肥料利用率, 造成资源浪费和环境污染^[8]。此外, 高氮使甘薯积累大量蛋白质及氨基酸, 不利于淀粉和糖的积累, 对甘薯品质造成不良影响^[9]。研究表明, 叶菜型甘薯茎尖产量主要由种植密度决定, 且产量随着密度增加呈上升趋势^[10], 但大部分甘薯是以收获块根为目的, 种植密度低使单个薯块重量增加, 但结薯数受到影响; 而种植密度过大会造成单薯重偏小, 同样影响产量^[11-12]。因此, 探寻合适的氮肥用量和种植密度, 对于优化群体结构、提高甘薯生产能力十分必要。甘薯是典型“喜钾”作物, 甘薯对钾肥的需求量高于氮肥和磷肥^[13]。钾肥不仅影响甘薯块根膨大和产量建成, 适宜的钾用量也有助于改善其营养品质^[14]。研究表明, 种植密度和钾肥施用量互作对甘薯维生素 C、可溶性蛋白、果糖、蔗糖和淀粉含量有极显著或显著影响^[15]。目前, 关于徐紫薯 8 号品种特性和环境影响已有部分研究^[16-17], 然而, 关于徐紫薯 8 号产量和品质最适栽插密度和氮钾肥配比仍缺

收稿日期: 2024-06-03; 录用日期: 2024-07-23

基金项目: 财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系建设专项 (CARS-10); 江苏省重点研发计划项目 (BE2021311)。

作者简介: 刘明 (1989-), 助理研究员, 硕士, 主要从事甘薯养分管理与品质调控研究。E-mail: liuming0506@163.com。

通讯作者: 唐忠厚, E-mail: zhonghoutang@sina.com。

乏报道。

因此,本研究以栽插密度、氮肥用量和钾肥用量作为主要因素,设计三因素三水平正交试验,通过极差分析、方差分析、多重比较,探究不同因素不同水平对徐紫薯8号产量及品质的影响,以期筛选出适宜徐紫薯8号产量提升和品质调优的栽培模式,为徐紫薯8号的大面积推广和产业化栽培提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验材料为徐紫薯8号。由江苏徐淮地区徐州农业科学研究所选育和提供。

1.2 试验设计

试验于2022—2023年在江苏徐淮地区徐州农业科学研究所江庄甘薯科创基地试验田(江苏省徐州市贾汪区江庄镇,34°30'N,117°22'E)中

进行。土壤为黄潮土,质地为砂壤。试验前土壤的基本性质:有机质15.11 g·kg⁻¹,全氮1.54 g·kg⁻¹,有效磷18.68 mg·kg⁻¹,速效钾134 mg·kg⁻¹,pH值6.55。种植方式为单垄单行,垄距为80 cm,垄高30 cm,每小区2垄,长度20 m,小区面积为32 m²。相邻两个小区间隔2 m(同一垄)或空1垄(不同垄)作为隔离。

试验共设置栽插密度(D)、施氮量(N,按N用量计算)、施钾量(K,按K₂O用量计算)3个因素,每个因素取3个水平,采用L₉(3³)正交试验设计,共计9个处理,每处理3小区重复,试验参数及编号见表1。除氮肥和钾肥外,每小区均按P₂O₅90 kg·hm⁻²施用磷肥。试验所用尿素(N46%)、过磷酸钙(P₂O₅12.0%)、硫酸钾(K₂O52%)均在起垄前一次性施入。2022年5月5日移栽,9月20日收获;2023年4月13日移栽,9月7日收获。

表1 正交试验设计

编号	密度(万株) (D)	施氮量(kg·hm ⁻²) (N)	施钾量(K ₂ O kg·hm ⁻²) (K)	处理组
1	1(5.25)	1(0)	1(0)	D1N1K1
2	1(5.25)	2(45)	2(120)	D1N2K2
3	1(5.25)	3(90)	3(240)	D1N3K3
4	2(6.00)	1(0)	2(120)	D2N1K2
5	2(6.00)	2(45)	3(240)	D2N2K3
6	2(6.00)	3(90)	1(0)	D2N3K1
7	3(6.75)	1(0)	3(240)	D3N1K3
8	3(6.75)	2(45)	1(0)	D3N2K1
9	3(6.75)	3(90)	2(120)	D3N3K2

1.3 样品采集与分析

1.3.1 产量指标

收获时每个小区取连续5 m长度作为采样区,将全部茎蔓割下并称重,记录地上部生物量;薯块全部挖出称重,并折算每公顷产量。根冠比按照薯块产量/地上部生物量计算。每个小区取6~8个大小均匀的薯块用于营养品质和淀粉黏度测定。

1.3.2 营养品质

薯块洗干净后去皮,用擦丝器擦成细丝,取100 g放入80℃烘箱烘干。用福斯CT410旋风磨磨成细粉并过0.18 mm筛网,然后用VECTOR22/N型近红外分析仪(BRUKER Co., Germany)测定薯块

淀粉、还原糖、可溶性糖和蛋白质含量^[18]。

1.3.3 块根淀粉黏度

通过水洗法制备淀粉,将甘薯浆与水混合后进行搅拌,然后通过沉淀和过滤将淀粉分离出来。湿淀粉烘干后过0.18 mm筛,称取3 g放入快速黏度分析仪专用铝盒内并加入25 mL超纯水混匀,采用快速黏度分析仪(PERTEN Newport Scientific Co., Tech-master)测定淀粉糊化特征^[19]。

1.4 数据处理与分析

数据录入和整理以及极差分析采用Excel 2016进行。方差分析、回归曲线建立采用SPSS 20.0进行,不同处理间的多重比较采用Duncan's新复极



差法。营养品质和淀粉糊化特性均使用 2023 年的样品进行分析。图表中数据为平均值 $\pm$ 标准差。

2 结果与分析

2.1 不同密度和氮、钾肥水平对徐紫薯 8 号产量指标的影响

由方差分析（表 2）结果可知，D 和 K 因素对块根产量影响显著，D、N、K 因素对地上部生物量均有显著影响，两年结果一致；2022 年，D、N、K 因素也对根冠比有显著影响，但 2023 年仅

有 N 因素对根冠比有显著影响。多重比较结果显示，块根产量最高的处理组为 D3N1K3，2022 和 2023 年分别比产量最低的处理组 D1N1K1 显著高出 44.1% 和 28.8%。2022 年地上部生物量最高的处理组为 D2N3K1，比最低的处理组 D2N2K3 显著高出 31.1%；2023 年地上部生物量最高的处理组为 D3N1K3，比最低的处理组 D1N1K1 显著高出 12.8%。两年试验中处理组 D3N1K3 的根冠比最高，分别比根冠比最低的处理组 D2N1K2（2022 年）和 D1N3K3（2023 年）显著高出 47.6% 和 15.1%。

表 2 不同密度和氮、钾肥水平对徐紫薯 8 号产量影响的方差分析

处理	块根产量 ($t \cdot hm^{-2}$)		地上部生物量 ($t \cdot hm^{-2}$)		根冠比	
	2022 年	2023 年	2022 年	2023 年	2022 年	2023 年
D1N1K1	19.10 $\pm$ 0.67d	21.48 $\pm$ 1.28d	28.88 $\pm$ 0.88def	39.93 $\pm$ 0.29c	0.66 $\pm$ 0.03d	0.54 $\pm$ 0.03bc
D1N2K2	23.19 $\pm$ 0.44bc	23.55 $\pm$ 0.94c	29.09 $\pm$ 1.53def	42.18 $\pm$ 0.35bc	0.80 $\pm$ 0.06bc	0.56 $\pm$ 0.02abc
D1N3K3	21.29 $\pm$ 1.40c	22.87 $\pm$ 0.48cd	31.94 $\pm$ 2.00cd	43.52 $\pm$ 0.78ab	0.67 $\pm$ 0.08d	0.53 $\pm$ 0.01c
D2N1K2	22.67 $\pm$ 1.53bc	24.32 $\pm$ 0.38bc	36.00 $\pm$ 1.00ab	40.96 $\pm$ 1.03c	0.63 $\pm$ 0.06d	0.59 $\pm$ 0.01ab
D2N2K3	24.00 $\pm$ 1.50b	25.72 $\pm$ 1.06b	27.83 $\pm$ 1.61f	44.98 $\pm$ 1.66a	0.86 $\pm$ 0.07ab	0.57 $\pm$ 0.03abc
D2N3K1	23.25 $\pm$ 0.75bc	24.04 $\pm$ 0.35bc	36.50 $\pm$ 0.50a	43.71 $\pm$ 1.80ab	0.64 $\pm$ 0.01d	0.55 $\pm$ 0.03bc
D3N1K3	27.53 $\pm$ 0.57a	27.67 $\pm$ 0.47a	28.69 $\pm$ 2.92ef	45.06 $\pm$ 1.50a	0.93 $\pm$ 0.05a	0.61 $\pm$ 0.03a
D3N2K1	24.19 $\pm$ 0.56b	24.62 $\pm$ 1.42bc	31.31 $\pm$ 1.81cde	45.04 $\pm$ 2.00a	0.78 $\pm$ 0.06bc	0.55 $\pm$ 0.06bc
D3N3K2	23.44 $\pm$ 1.97bc	23.95 $\pm$ 1.13c	33.38 $\pm$ 1.72bc	44.46 $\pm$ 1.35ab	0.70 $\pm$ 0.04cd	0.54 $\pm$ 0.03bc
F (D)	12.19**	14.92*	6.03**	12.00**	5.24*	2.11
F (N)	1.07	2.15	10.00**	7.22**	9.23**	4.09*
F (K)	3.59*	7.95*	6.10**	6.05**	8.84**	1.43

注：F 值为有重复无交叉的正交试验方差分析结果。* 表示差异显著 ($P<0.05$)，** 表示差异极显著 ($P<0.01$)。同列中不同小写字母表示 5% 差异显著。表 4、表 6 同。

根据极差值 R（表 3）可知，3 个因素对块根产量的影响由大到小排序为 D>K>N，密度为主要影响因素。随栽植密度和钾肥施用量的增加，块根产量呈增加趋势；而随着氮肥施用量的增加，块根产量先升后降，理论最优组合为 D3N2K3，两年结果一致。3 个因素对地上部生物量的影响在两年间表现不一致，2022 年 N 因素影响最大 ($R=4.53$)，而 2023 年 D 因素最大 ($R=2.99$)，K 因素均为最低，与方差分析结果一致。3 个因素对根冠比的影响在两年间表现也不一致，2022 年根冠比的理论最优组合为 D3N2K3，而 2023 年最优组合为 D2N1K3。综合表 2、表 3 结果认为，徐紫薯 8 号产量最高的最优组合为 D3N2K3。

2.2 不同密度和氮、钾肥水平对徐紫薯 8 号块根品质的影响

方差分析结果（表 4）显示，D、N、K 3 个因素均对还原糖和可溶性糖含量有显著影响，N 和 K 因素对淀粉含量影响显著，而 D 和 N 因素对蛋白质含量影响显著。由图 1 可知，淀粉含量最高的处理组为 D1N1K1，比最低的处理组 D3N1K3 显著高出 14.2%。还原糖、可溶性糖含量均在 D3N1K3 处理组中含量最高（分别为 10.0% 和 15.6%），蛋白质含量在 D1N3K3 中最高（8.8%）。还原糖和蛋白质含量均在 D1N1K1 处理组中最低（分别为 6.1% 和 6.7%），可溶性糖在 D1N3K3 处理组中含量最低（9.9%）。

表 3 不同密度和氮、钾肥水平对徐紫薯 8 号产量影响的极差分析

指标	块根产量 (t · hm ⁻²)						地上部生物量 (t · hm ⁻²)						根冠比					
	2022 年			2023 年			2022 年			2023 年			2022 年			2023 年		
	D	N	K	D	N	K	D	N	K	D	N	K	D	N	K	D	N	K
	D	N	K	D	N	K	D	N	K	D	N	K	D	N	K	D	N	K
K1	190.75	207.89	199.63	203.70	220.42	210.42	269.72	283.50	290.06	376.88	377.85	386.04	6.39	6.67	6.22	4.87	5.24	4.91
K2	209.75	214.13	207.88	222.27	221.67	215.48	301.00	264.72	295.41	388.94	396.60	382.79	6.40	7.32	6.40	5.15	5.04	5.08
K3	225.45	203.94	218.45	228.71	212.57	228.77	282.94	305.44	268.19	403.70	395.07	400.70	7.22	6.03	7.39	5.11	4.85	5.14
k1	21.19	23.10	22.18	22.63	24.49	23.38	29.97	31.19	32.23	41.87	41.98	42.89	0.71	0.74	0.69	0.54	0.58	0.55
k2	23.31	23.79	23.10	24.70	24.63	23.94	33.44	29.41	32.82	43.22	44.07	42.53	0.71	0.81	0.71	0.57	0.56	0.57
k3	25.05	22.66	24.27	25.41	23.62	25.42	31.13	33.94	29.49	44.86	43.90	44.52	0.80	0.67	0.82	0.57	0.54	0.57
R	3.86	1.13	2.09	2.78	1.01	2.04	3.47	4.53	3.33	2.99	2.09	1.99	0.09	0.14	0.11	0.03	0.04	0.02
因素主次	D>K>N			D>K>N			N>D>K			D>N>K			D>K>N			N>D>K		
最佳水平	D3	N2	K3	D3	N2	K3	D2	N3	K2	D3	N2	K3	D3	N2	K3	D2	N1	K3

注: K1、K2、K3 值指每个因素下对应水平为 1、2、3 的试验结果之和, k=k/9, R 是每个因素下 k 值的最大值与最小值之差。表 5、表 7 同。

表 4 不同密度和氮、钾肥水平对徐紫薯 8 号块根品质影响的方差分析

因素	淀粉	还原糖	可溶性糖	蛋白质
<i>F</i> (D)	2.39	9.29**	7.71**	6.96**
<i>F</i> (N)	3.84*	9.74**	4.58*	8.92**
<i>F</i> (K)	4.13*	3.87*	3.80*	2.51

根据极差分析结果 (表 5) 可知, N 因素对淀粉、还原糖和蛋白质的影响最大 (*R* 值分别为 24.9、15.9 和 9.0)。随氮肥水平的提高, 淀粉含量呈先降后升趋势, 蛋白质含量呈升高趋势, 而还原糖和可溶性糖含量均呈下降趋势。D 因素对可溶性糖的影响最大 (*R*=20.1), 可溶性糖含量随

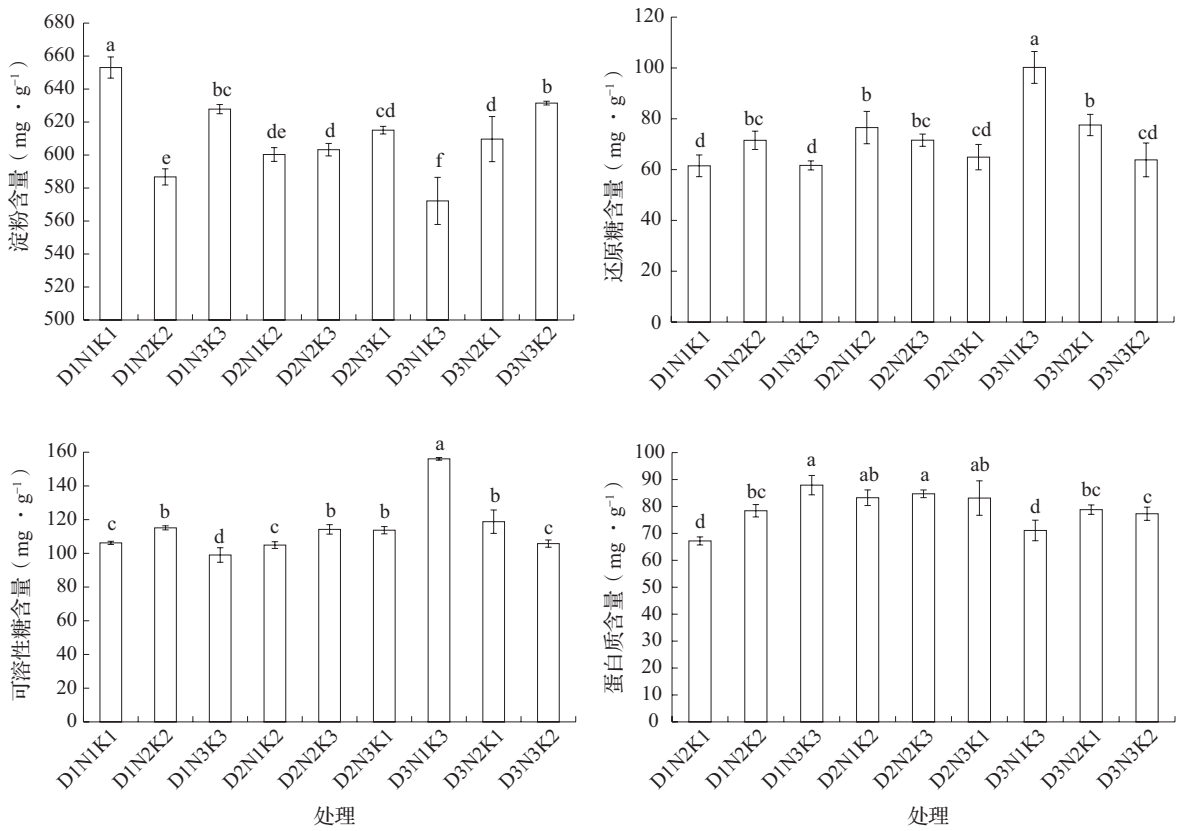


图 1 不同密度和氮、钾肥水平对徐紫薯 8 号块根营养品质的影响

注: 不同小写字母表示差异显著 (*P*<0.05), 下同。



密度的增加而升高。钾肥对还原糖、可溶性糖和蛋白质含量的影响均最小 (R 值分别为 9.8、14.5 和 4.8)。根据 k 值判断还原糖和可溶性糖含量最高的理论最优组合为 D3N1K3, 淀粉含量最高的最优组合为 D1N3K1, 而蛋白质含量最高的最优组合为 D2N3K3。鲜薯的可溶性糖通常被作为评价甘薯甜度或食用品质的指标, 因此综合以上结果认为徐紫薯 8 号块根品质的最优组合为 D3N1K3。

表 5 不同密度和氮、钾肥水平对徐紫薯 8 号营养品质影响的极差分析 (mg · g⁻¹)

指标	淀粉			还原糖			可溶性糖			蛋白质		
	D	N	K	D	N	K	D	N	K	D	N	K
K1	5603.0	5476.7	5633.4	584.0	714.7	611.8	961.1	1101.6	1016.2	700.6	664.6	687.4
K2	5456.0	5399.0	5455.7	639.0	661.9	635.7	998.5	1044.4	977.4	753.2	725.8	716.9
K3	5440.0	5623.2	5409.9	724.7	571.1	700.3	1141.9	955.6	1107.9	681.6	745.0	731.1
k1	622.6	608.5	625.9	64.9	79.4	68.0	106.8	122.4	112.9	77.8	73.8	76.4
k2	606.2	599.9	606.2	71.0	73.5	70.6	110.9	116.0	108.6	83.7	80.6	79.7
k3	604.4	624.8	601.1	80.5	63.5	77.8	126.9	106.2	123.1	75.7	82.8	81.2
R	18.2	24.9	24.8	15.6	15.9	9.8	20.1	16.2	14.5	8.0	9.0	4.8
因素主次	N>K>D			N>D>K			D>N>K			N>D>K		
最佳水平	D1	N3	K1	D3	N1	K3	D3	N1	K3	D2	N3	K3

2.3 不同密度和氮、钾肥水平对徐紫薯 8 号淀粉糊化特征的影响

由方差分析结果 (表 6) 可知, 密度对块根淀粉的最高黏度、热浆黏度和冷浆黏度均有显著影响, 氮肥仅对最高黏度和热浆黏度有显著影响, 而钾肥对块根淀粉糊化各项指标均无显著影响。由图 3 可知, 最高黏度、热浆黏度和冷浆黏度

均在处理组 D3N3K2 最高 (分别为 6578、3252 和 4349 cP), 最高黏度和热浆黏度均在处理组 D1N1K1 最低 (分别为 5994、2585 cP), 冷浆黏度在处理组 D1N2K2 最低 (3705 cP)。崩解值在处理组 D1N3K3 最高 (3587 cP), 回复值在处理组 D1N1K1 最高 (1285 cP), 在处理组 D2N3K1 最低 (1003 cP)。

表 6 不同密度和氮、钾肥水平对徐紫薯 8 号淀粉糊化特征影响的方差分析

因素	最高黏度	热浆黏度	崩解值	冷浆黏度	回复值
$F(D)$	9.19**	21.77**	0.99	5.6 [*]	1.46
$F(N)$	4.24 [*]	6.54**	1.17	0.5	2.64
$F(K)$	0.25	1.25	0.25	0.5	0.52

由极差分析结果 (表 7) 可以看出, D 因素对最高黏度、热浆黏度和冷浆黏度的影响最大; 随密度水平的提高, 最高黏度、热浆黏度和冷浆黏度均呈升高趋势。 N 因素对崩解值和回复值的影响最大, 而对冷浆黏度的影响最小; 随氮肥水平的提高, 最高黏度、热浆黏度、冷浆黏度呈升高趋势, 回复值呈下降趋势。 K 因素对最高黏度、热浆黏度、崩解

值和回复值的影响均最小。根据 k 值判断最高黏度、热浆黏度和冷浆黏度最高的处理组合为 D3N3K3; 而崩解值和回复值最高的处理组合分别为 D1N3K1 和 D1N1K2, 最低的处理组合分别为 D2N2K3 和 D3N3K3。通常认为黏度高, 而崩解值、回复值和糊化温度低的淀粉品质较优, 因此综合各项指标来看, 徐紫薯 8 号淀粉品质最优的组合为 D3N3K3。

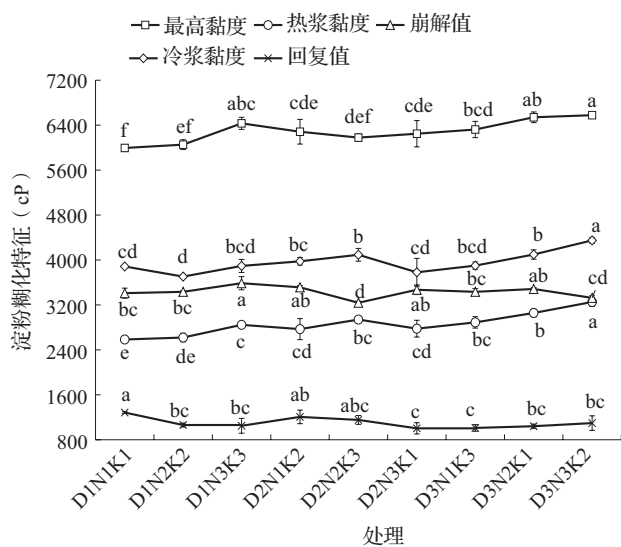


图3 不同密度和氮、钾肥水平对徐紫薯8号淀粉糊化特征的影响

表7 不同密度和氮、钾肥水平对徐紫薯8号淀粉糊化特征影响的极差分析 (cP)

指标	最高黏度			热浆黏度			崩解值			冷浆黏度			回复值		
	D	N	K	D	N	K	D	N	K	D	N	K	D	N	K
K1	55439	55800	56347	24151	24732	25258	31288	31069	31089	34450	35282	35290	10187	10506	9986
K2	56127	56315	56741	25461	25848	25925	30667	30467	30817	35551	35685	36090	10090	9770	10099
K3	58322	57773	56800	27595	26627	26024	30727	31146	30776	37039	36073	35660	9444	9446	9636
k1	6160	6200	6261	2683	2748	2806	3476	3452	3454	3828	3920	3921	1132	1167	1110
k2	6236	6257	6305	2829	2872	2881	3407	3385	3424	3950	3965	4010	1121	1086	1122
k3	6480	6419	6311	3066	2959	2892	3414	3461	3420	4115	4008	3962	1049	1050	1071
R	320	162	50	383	211	86	69	76	34	287	88	89	83	117	51
因素主次	D>N>K			D>N>K			N>D>K			D>K>N			N>D>K		
最佳水平	D3	N3	K3	D3	N3	K3	D2	N2	K2	D3	N3	K2	D3	N3	K3

注：最高黏度、热浆黏度和冷浆黏度最高的为最佳水平；崩解值和回复值最低的为最佳水平。

时，最大产量为 27.07 (t · hm⁻²)，进一步提高施钾量，块根产量继续增加。

2.4.2 栽插密度、氮钾肥与甘薯块根品质的多元回归分析

对甘薯块根淀粉 (Y₂)、还原糖 (Y₃)、可溶性糖 (Y₄) 和蛋白质 (Y₅) 与栽插密度 (X₁)、施氮量 (X₂) 和施钾量 (X₃) 关系进行多元回归分析，得到以下回归方程：

$$Y_2=620.941-0.056X_2+0.008X_2^2-0.013X_3 \quad (2)$$

$$Y_3=12.641+10.427X_1-0.177X_2+0.041X_3 \quad (3)$$

$$Y_4=27.392+14.914X_1+0.803X_2-0.904X_3$$

2.4 栽插密度、氮钾肥与甘薯产量和品质的多元回归分析

2.4.1 栽插密度、氮钾肥与甘薯块根产量的多元回归分析

对 2023 年的甘薯块根产量 (Y₁) 与栽插密度 (X₁)、施氮量 (X₂) 和施钾量 (X₃) 关系进行多元非线性回归分析，得到以下回归方程：

$$Y_1=-36.398+17.298X_1+0.162X_2+0.005X_3-1.196X_1^2-0.024X_1X_2 \quad (1)$$

对该二项式方程求导，得出使 Y₁ 达到最大值时，X₁ 取 6.75 (万株 · hm⁻²)，X₂ 取 48 (kg · hm⁻²)。由于 Y₁ 与 X₃ 呈正线性，本试验条件下 X₃ 取最大值 240 (kg · hm⁻²) 时，Y₁ 可获得最大值，为 27.07 (t · hm⁻²)。表明若使徐紫薯 8 号获得最大块根产量时，最适栽插密度为 6.75 (万株 · hm⁻²)，最适施氮量为 48 (kg · hm⁻²)；当施钾量为 240 (kg · hm⁻²)

$$-0.464X_1X_2+0.15X_1X_3 \quad (4)$$

$$Y_5=-354.1+145.85X_1+0.010X_2-12.271X_1^2 \quad (5)$$

根据方程估算，施氮量 X₂ 取 35.31 (kg · hm⁻²)，施钾量 X₃ 取 0 (kg · hm⁻²) 时 (栽插密度 X₁ 与 Y₂ 相关度低，公式中剔除)，淀粉含量 Y₂ 可获得最大值 628.94 (mg · g⁻¹)。栽插密度 X₁ 取 6.75 (万株 · hm⁻²)，施氮量 X₂ 取 0 (kg · hm⁻²)，施钾量 X₃ 取 240 (kg · hm⁻²) 时，还原糖含量 Y₃ 可获得最大值 92.86 (mg · g⁻¹)。栽插密度 X₁ 取 6.04 (万株 · hm⁻²)，施氮量 X₂ 取 34.09 (kg · hm⁻²)，施钾量 X₃ 取 6.02 (kg · hm⁻²) 时，可溶性糖含量 Y₄ 可



获得最大值 $117.50 (\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$ 。栽插密度 X_1 取 $5.94 (\text{万株} \cdot \text{hm}^{-2})$, 施氮量 X_2 取 $90 (\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$ (施钾量 X_3 与 Y_5 相关度低, 公式中剔除) 时, 蛋白质含量 Y_5 可获得最大值 $181.06 (\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$ 。

2.4.3 栽插密度、氮钾肥与甘薯块根淀粉糊化特征值的多元回归分析

块根淀粉糊化特征值中, 仅有最高黏度和热浆黏度与栽插密度和施氮量显著相关且呈线性相关, 因此对最高黏度 (Y_6) 和热浆黏度 (Y_7) 与栽插密度 (X_1)、施氮量 (X_2) 进行多元线性回归分析, 得到以下回归方程:

$$Y_6 = 4901.204 + 213.556X_1 + 2.436X_2 \quad (6)$$

$$Y_7 = 1223.528 + 255.111X_1 + 2.34X_2 \quad (7)$$

当栽插密度 X_1 和施氮量 X_2 分别取最大值 $6.75 (\text{万株} \cdot \text{hm}^{-2})$ 和 $90 (\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$ 时, 最高黏度 Y_6 和热浆黏度 Y_7 最大值分别为 $6561.95 (\text{cP})$ 和 $3156.13 (\text{cP})$ 。

将公式 (1) 中 Y_1 取得最大值时的 X_1 、 X_2 、 X_3 的取值代入公式 (2)、(3)、(4)、(5)、(6)、(7), 可知理论上块根产量最大时, 相应的淀粉 Y_2 、还原糖 Y_3 、可溶性糖 Y_4 、蛋白质 Y_5 含量分别为 587.53 、 84.37 、 138.31 、 $76.03 (\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$; 相应的最高黏度 Y_6 和热浆黏度 Y_7 分别为 6459.64 和 $3057.85 (\text{cP})$ 。

3 讨论

3.1 栽插密度、氮钾肥与甘薯生物量

研究表明, 密度过高会使甘薯膨大受阻, 块根变小, 不利提高产量; 而密度过低, 叶面积指数较小, 光合产物不足也不利于块根 (即甘薯的“库”) 的干物质的积累^[20-21]。因此, 选择合理的栽插密度才能更好地协调茎蔓和块根的生长, 对甘薯能否取得高产具有关键作用。本研究结果表明, 徐紫薯 8 号在 D3 密度 ($6.75 \text{万株} \cdot \text{hm}^{-2}$) 下块根产量最高 (表 3), 与建立的回归曲线方程得出的结果一致。前人研究结果以 $6 \text{万} \sim 7.5 \text{万株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 为最适甘薯栽插密度的较为多见, 但在不同地区和不同品种间均有差别^[11, 22], 说明本研究结果在合理密度区间内。此外, 地上部生物量在 D2 ($6 \text{万株} \cdot \text{hm}^{-2}$) 和 D3 密度下明显高于 D1 ($5.25 \text{万株} \cdot \text{hm}^{-2}$), 但根冠比均在 D3 密度下最高, 这可能与徐紫薯 8 号中短蔓的特性有关, 高密度下其茎叶数量的增加对提高光合产物具有促进作用, 而秧蔓较短也不会引起

地上部旺长。

合适的氮钾肥配比, 能够协调甘薯地上部与地下部生长, 促进块根快速膨大, 提高甘薯块根产量^[23]。本研究正交试验结果表明, 徐紫薯 8 号均在 $N_2 (45 \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$ 水平获得最高产量, 不施氮 ($N_1, 0 \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 或氮肥过高 ($N_3, 90 \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 均对产量形成不利, 而通过回归曲线方程得出的最适氮肥用量为 $48 \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 结果较为吻合。在前人的研究中也发现紫甘薯在含氮量较高的肥沃土壤上种植时, 对氮肥的需求量较低^[24]; 当氮肥施用量超过 $60 \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 后甘薯的理论产量显著降低^[25]。本研究中种植前土壤氮含量处于中上等水平, 因此本研究得出的最佳氮施用水平与前人相对一致, 在实际生产中适当少施氮肥不仅可以提高产量, 还有利于提高肥料利用率、节省成本。甘薯对钾的需求量高于氮肥和磷肥, 施用钾肥甘薯增产效应显著。统计学研究表明, 当钾施用量低于 $375 \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 甘薯增产率随施用量的增加而不断增加, 最高增产率为 24.3% ; 当钾施用量超过 $375 \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 增产率下降, 但仍有 19% 的增产率^[13]。在本试验中, 块根产量随施钾量的增加而增加, 均在 K3 ($240 \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 条件下最高, 比不施钾肥 (K1) 显著增产 9.4% (2022 年) 和 8.7% (2023 年), 回归曲线方程也表明块根产量与施钾量呈正线性关系。这说明为使徐紫薯 8 号获得高产, 钾肥施用量仍可继续增加。前人试验表明, 高肥力地块应不施或少施氮肥, 并配合施用钾肥以获得高产^[26], 这与本试验中在 N_2K_3 氮钾配比下产量最高相一致。然而, 在低肥力地区, 过多施钾不利于甘薯对钾肥的吸收和利用, 不仅造成鲜薯产量下降, 还会造成资源的浪费^[27]。因此, 钾肥的施用仍需要根据当地土壤肥力而定。

3.2 栽插密度、氮钾肥与甘薯块根营养品质

从块根的营养品质来看, 氮肥水平对淀粉、还原糖和蛋白质的影响均高于密度和钾肥 (表 3)。增施氮肥提高了蛋白质含量, 这是由于施氮促进碳氮代谢, 有利于蛋白质的合成^[28]。施氮同样提高了淀粉含量, 在 N_3 水平下高于 N_1 和 N_2 , 与李成阳等^[29]氮肥处理显著提高甘薯地下部淀粉积累量的结果一致; 其原因可能与施氮在块根膨大后期提高 α -淀粉酶和 β -淀粉酶活性有关^[30]。前人研究表明低密度和低钾肥也有利于淀粉的积累^[31], 这与本研究中低密度 (D1) 和低钾肥 (K1) 条件

下淀粉含量最高相一致,回归曲线方程也显示淀粉含量与钾肥施用量呈负相关。甘薯中可溶性糖包括还原糖(果糖、葡萄糖、麦芽糖)和非还原糖(蔗糖),是甘薯的重要食用品质指标^[32]。在本试验中,N1水平下还原糖和可溶性糖含量最高,增施氮肥使还原糖和可溶性糖含量下降,可能不利于徐紫薯8号蒸煮食味品质。增施钾肥则有利于鲜食型甘薯糖类物质的积累^[26],在本研究中虽然K3水平下的还原糖最高,与前人研究一致,但回归方程显示可溶性糖含量与施钾量并非单纯的线性关系,此外,极差分析显示,钾肥的优先程度低于氮肥和密度,说明钾肥对还原糖和可溶性糖含量的提升作用有限。

3.3 栽插密度、氮钾肥与甘薯淀粉糊化特征

淀粉的糊化特性对甘薯食味品质和加工质量有直接影响。一般认为最高黏度、热浆黏度、冷浆黏度较高,而崩解值、回复值和糊化温度较低的淀粉品质较好^[32]。本研究中,施氮显著提高最高黏度和热浆黏度,在N3水平下其最高黏度、热浆黏度、冷浆黏度均最高,与陈晓光等^[19]研究结果有相同之处,表明施氮有助于提高淀粉品质。除氮肥外,增加密度也提高了最高黏度、热浆黏度和冷浆黏度,在D3水平下最高,表明适当密植也有利于提高淀粉品质。回归曲线方程也显示,最高黏度、热浆黏度与栽插密度和施氮量呈正线性。但本研究中设计的密度、氮肥等梯度较少,继续增大密度和氮肥对糊化特征如何影响尚需要进一步验证。前人研究表明适量增施钾肥通过增加支链淀粉含量改善块根的糊化特性,但最适钾肥用量存在品种间差异^[33]。而本研究中,钾肥对淀粉各项糊化特征影响均不显著,这可能与本研究中钾肥均作为基肥施用有关,因为有报道指出追施钾肥显著提高支链淀粉含量,而基施钾肥对直、支链淀粉含量影响不大^[34]。钾肥对徐紫薯8号直、支链淀粉含量及淀粉糊化特征的影响需要进一步深入研究。此外,需要进一步增加每个因素的试验水平,利于更好地找到最佳组合。

4 结论

根据极差分析结果,在D3N2K3处理组合下,徐紫薯8号可获得最高的块根产量;在D3N1K3处理组合下,可溶性糖和还原糖含量最高,徐紫薯8号鲜薯品质较优;在D3N3K3处理组合

下,最高黏度、热浆黏度、冷浆黏度等块根淀粉糊化特征值较高,徐紫薯8号淀粉品质较优。结合回归曲线方程,徐紫薯8号获得高产的最优栽插密度和钾肥水平分别D₃和K₃(即密度6.75万株·hm⁻²和K₂O 240 kg·hm⁻²),最适施氮量约为N 48 kg·hm⁻²(与N2接近),但在此条件下块根营养品质和淀粉品质将受到一定影响。关于栽插密度和氮钾肥对徐紫薯8号品质的影响尚需要深入研究。

参考文献:

- [1] 王欣,李强,曹清河,等.中国甘薯产业和种业发展现状与未来展望[J].中国农业科学,2021,54(3):483-492.
- [2] Food and Agriculture Organization (FAO). Food and agriculture data of FAOSTAT [DB/OL]. (2023-12-27) [2024-03-06]. <https://www.fao.org/faostat/en/#home>.
- [3] 何霭如,陈胜勇,余小丽,等.高花青素甘薯品种湛紫薯3号的选育及栽培技术[J].热带农业科学,2022,42(10):39-42.
- [4] 夏家平,刘小平,程鹏,等.鲜食型紫甘薯新品种皖苏361的选育[J].中国种业,2023(10):117-119.
- [5] 刘明,张允刚,李洪民,等.紫薯新品种徐紫薯8号及保优栽培技术[J].作物研究,2020,34(1):49-52.
- [6] 陆建珍,徐雪高,汪翔,等.中国紫甘薯产业发展分析[J].农业展望,2020,16(8):81-89.
- [7] 后猛,张允刚,刘亚菊,等.优质鲜食及加工型甘薯新品种徐紫薯8号生产力及特性鉴定[J].西南农业学报,2020,33(1):21-25.
- [8] 兰孟焦,张辉,肖满秋,等.不同施肥处理对甘薯产量及土壤肥力与氮素利用的影响[J].西北农业学报,2023,32(1):44-52.
- [9] 段文学,张海燕,解备涛,等.甘薯氮素营养研究进展[J].西北农业学报,2015,24(12):14-23.
- [10] 曾新宇,徐茜,李保证,等.不同密肥及种苗配置对叶菜型甘薯产量、光合特性及品质影响的研究[J].中国土壤与肥料,2023(1):110-125.
- [11] 段文学,汪进丽,张海燕,等.栽插方式和密度对鲜食型甘薯品种干物质积累分配、块根产量及品质的影响[J].华北农学报,2018,33(4):167-174.
- [12] 史婵,李秋卓,张茜,等.栽培密度、肥料对优质鲜食型甘薯‘万薯10号’产量及品质的影响[J].中国农学通报,2018,34(34):7-13.
- [13] 卞倩倩,王雁楠,陈金金,等.施钾对我国甘薯产量和土壤钾素平衡影响的Meta分析[J].植物营养与肥料学报,2022,28(8):1509-1519.
- [14] 密扬,陈剑秋,王瑞霞,等.不同施钾量对淀粉型甘薯光合特性、淀粉含量及产量的影响[J].江苏农业科学,2020,48(12):68-74.



- [15] 周奕廷, 李俊良, 梁斌, 等. 种植密度与钾肥对鲜食甘薯产量、品质及钾肥利用率的影响 [J]. 山东农业科学, 2020, 52 (7): 60-66.
- [16] 闫会, 张允刚, 刘亚菊, 等. 生育期对徐紫薯 8 号品质及结薯性的影响 [J]. 江苏农业学报, 2019, 35 (1): 9-14.
- [17] Song W, Li C, Kou M, et al. Different regions and environments have critical roles on yield, main quality and industrialization of an industrial purple-fleshed sweet potato [*Ipomoea batatas* L. (Lam.)] "Xuzishu8" [J]. Heliyon, 2024, 10 (4): e25328.
- [18] 唐忠厚, 李洪民, 李强, 等. 基于近红外光谱技术预测甘薯块根淀粉与糖类物质含量 [J]. 江苏农业学报, 2013, 29 (6): 1260-1265.
- [19] 陈晓光, 丁艳锋, 唐忠厚, 等. 氮肥施用量对甘薯产量和品质性状的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21 (4): 979-986.
- [20] 苏明, 黄洁, 甘学德, 等. 不同株行距对甘薯生长和产量性状的影响 [J]. 江西农业学报, 2011, 23 (5): 6-9.
- [21] 吴海云, 侯松, 刘庆, 等. 施氮量和栽插密度对甘薯群体发育和产量形成的影响 [J]. 江苏师范大学学报 (自然科学版), 2019, 37 (1): 35-39.
- [22] Zhang H Y, Xie B T, Wang B Q, et al. Effects of planting density on yield and source-sink characteristics of sweet potato [*Ipomoea batatas* (L.) Lam] [J]. Agricultural Science Technology, 2015, 16 (8): 1628-1633, 1642.
- [23] 孙哲, 田昌庚, 陈路路, 等. 氮钾配施对甘薯茎叶生长、产量形成及干物质分配的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2021 (4): 186-191.
- [24] 吴春红, 刘庆, 孔凡美, 等. 氮肥施用量对不同紫甘薯品种产量和氮素效率的影响 [J]. 作物学报, 2016, 42 (1): 113-122.
- [25] 宁运旺, 曹炳阁, 马洪波, 等. 氮肥用量对滨海滩涂区甘薯干物质积累、氮素效率和钾钠吸收的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2012, 20 (8): 982-987.
- [26] 王萌, 房增国, 梁斌, 等. 高肥力土壤氮钾配施对鲜食型甘薯产量及品质的影响 [J]. 华北农学报, 2016, 31 (5): 199-204.
- [27] 张海燕, 董顺旭, 解备涛, 等. 钾肥用量对瘠薄地甘薯产量和钾肥利用率的影响 [J]. 核农学报, 2020, 34 (10): 2299-2306.
- [28] 唐忠厚, 李洪民, 张爱君, 等. 长期定位施肥对甘薯块根产量及其主要品质的影响 [J]. 浙江农业学报, 2010, 22 (1): 57-61.
- [29] 李成阳, 柴沙沙, 刘意, 等. 不同氮素形态配比对甘薯块根形成及光合产物运输分配的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2022 (7): 29-40.
- [30] 吴世雨, 陈匡稷, 吕尊富, 等. 施氮量对甘薯块根膨大过程中淀粉含量及特性的影响 [J]. 作物学报, 2023, 49 (4): 1090-1101.
- [31] 黄艳霞, 林子龙, 陈根辉, 等. 密度和钾肥对鲜食型甘薯产量与品质的影响 [J]. 江西农业学报, 2020, 32 (12): 50-54.
- [32] 张毅, 孙健, 钮福祥, 等. 甘薯中糖组分含量与甜度的相关性分析 [J]. 江苏农业科学, 2021, 49 (23): 190-194.
- [33] 靳艳玲, 何素兰, 李育明, 等. 不同品种甘薯淀粉产量及糊化特性的比较研究 [J]. 江苏师范大学学报 (自然科学版), 2018, 36 (1): 17-20, 79.
- [34] 陈龙, 史春余, 孟迪, 等. 硫酸钾对甘薯块根烤后口感品质的影响 [J]. 中国粮油学报, 2021, 36 (7): 40-46.

Research on optimal planting density and nitrogen and potassium fertilization scheme of Xuzishu 8

LIU Ming, JIN Rong, YU Yong-chao, ZHAO Peng, ZHANG Qiang-qiang, ZHU Xiao-ya, WANG Jing, TANG Zhong-hou* (Xuzhou Institute of Agricultural Sciences in Jiangsu Xuhuai District/National Agricultural Experimental Station for Soil Quality in Xuzhou, Xuzhou Jiangsu 221131)

Abstract: To screen the suitable planting density and nitrogen and potassium fertilizer application level of Xuzishu 8, planting density (D, 52500, 60000, and 67500 plants $\cdot$ hm⁻²), nitrogen fertilizer (N, 0, 45, and 90 kg $\cdot$ hm⁻²), and potassium (K₂O) fertilizer (K, 0, 120, and 240 kg $\cdot$ hm⁻²) were chosen as influential factors, and an orthogonal experiment with three factors was devised. The impact of various treatment combinations on the yield, nutritional quality and starch paste characteristics of Xuzishu 8 were assessed through range analysis, variance analysis, and multiple comparison. Subsequently, an optimal cultivation strategy was determined. The results revealed that, (1) Planting density and potassium fertilizer levels significantly influenced the storage root yield of Xuzishu 8, and planting density level had a significant effect on the shoot biomass and root-shoot ratio. In both years studied (2022 and 2023), the highest yield was observed in treatment group D3N1K3, which was significantly higher than that in the lowest yield group D1N1K1 by 44.1% and 28.8%, respectively. The results of range analysis showed that the three factors affecting the tuber yield were in the order of density > potassium fertilizer > nitrogen fertilizer, and the optimal combination was D3N2K3. (2) Nitrogen fertilizer had the greatest effect on the contents of starch, reducing sugar and protein (*R* values were 24.9, 15.9 and 9.0, respectively), and density had the greatest effect on the content of soluble sugar (*R*=20.1). The combination with the highest content of reducing sugar and soluble sugar was D3N1K3, and the results of multiple comparison analysis and range analysis was consistent. (3) The

peak viscosity, hot pulp viscosity and cold pulp viscosity of starch paste were the highest in D3N3K2 treatment group (6578, 3252 and 4349 cP, respectively), while the highest treatment combination predicted by range analysis was D3N3K3. (4) The regression curve equation revealed that the maximum storage root yield of $27.07 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ could be achieved at a density of 67500 plants (D3), nitrogen level of $48 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (close to N2), and potassium level of $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (K3). However, there was some impact on the nutritional and starch quality. In conclusion, the optimal treatment combination with the yield of Xuzishu 8 as the target was D3N2K3 (density 67500 plants $\cdot \text{hm}^{-2}$, N $48 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, and K_2O $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), and the amount of nitrogen fertilizer should be adjusted according to the edible or starch quality requirements.

Key words: purple sweet potato; planting density; nitrogen-potassium ratio; yield; quality