

长期养分亏缺对木薯农艺性状、产量及淀粉含量的影响

魏云霞, 韦卓文, 黄洁*, 许瑞丽

中国热带农业科学院热带作物品种资源研究所/农业农村部木薯种质资源保护与利用重点实验室, 海南海口 571101

摘要: 通过研究长期养分亏缺对木薯农艺性状及产量、淀粉含量的影响, 为木薯连作科学施肥提供理论依据。在长期定位田间试验时间轴上, 选取 2019—2021 年(连作 28~30 年)的试验材料, 对 CK(施氮磷钾肥)、-N(不施氮肥)、-P(不施磷肥)和-K(不施钾肥)4 个处理, 测定木薯品种 SC205 和 SC124 的农艺性状及产量、淀粉含量。结果表明: (1) 与 CK 相比, -N、-K 均显著降低木薯的株高, -N、-P 和-K 显著降低木薯的茎径, -K 显著降低叶片 SPAD 值; 主体间效应检验表明, 品种和施肥对各农艺性状均有显著影响, 但二者的交互作用影响不显著。(2) 与 CK 相比, -N 显著提高 2021 年的鲜薯淀粉含量; -K 显著降低鲜薯淀粉含量, 3 年平均降幅为 14.2%。(3) -N、-P、-K 较 CK 均显著降低鲜薯产量、淀粉产量、单株结薯数和单条薯重, 各养分亏缺处理鲜薯产量的 3 年平均降幅均大于 40.0%, 各养分亏缺处理间的产量效应差异不显著; -K 淀粉产量的 3 年平均降幅为 53.3%, 降幅显著高于-N、-P。(4) 相关性分析结果表明, 鲜薯产量、淀粉产量均与单株结薯数呈极显著正相关, 与单条薯重呈显著正相关。综合分析结果显示, 氮、磷、钾亏缺均显著抑制木薯生长, 连作前期氮是木薯产量的首要限制因素, 钾其次, 磷效应不明显, 随连作年限延长, 钾、磷效应逐渐显著, 氮、钾上升为最主要的限制因素, 而后, 氮、磷、钾肥间的鲜薯产量效应无显著差异, 三者均同等重要。

关键词: 木薯; 长期定位施肥; 养分亏缺; 产量; 淀粉

中图分类号: S533; S365 文献标志码: A

Effects of Long-term Nutrient Deficiency on Agronomic Characters, Yield and Starch Content of Cassava

WEI Yunxia, WEI Zhuowen, HUANG Jie*, XU Ruili

Tropical Crops Genetic Resources Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences / Key Laboratory of Conservation and Utilization of Cassava Genetic Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Haikou, Hainan 571101, China

Abstract: The effects of long-term nutrient deficiency on cassava agronomic characters, yield and starch content were studied to provide scientific basis for fertilization of continuous cropping. In this study, experimental materials in 2019 to 2021 (continuous cropping in 28th-30th years) were selected from the time axis of long-term fertilization trials. CK (with NPK), -N (without N), -P (without P), -K (without K) combined with two cassava varieties SC205 and SC124 were selected. The SPAD value, plant height, stem diameter and starch content, yield, starch yield of the fresh storage root (FSR) were measured and evaluate. Compared to CK, -N and -K significantly reduced plant height, and -N, -P and -K significantly reduced stem diameter of cassava. Meanwhile, -K significantly reduced SPAD value of leaves. Test of between-subjects effect showed that, variety or fertilization had significant effects on agronomic characters, but the interaction effect between them was not significant. The starch content of FSR, compared to CK, -N significantly improved in 2021. -K significantly reduced, the three-year average decrease was 14.2%. Compared to CK, -N, -P and -K significantly reduced the yield, starch yield of FSR, storage root number per plant (SRNPP) and weight per storage root (WPSR). The yield of FSR reduced by more than 40.0% under different nutrient deficiency, while the yield effects were insignificantly different among nutrient deficiency treatments. The starch yield of FSR under -K decreased by 53.3%,

收稿日期 2023-05-29; 修回日期 2023-08-02

基金项目 海南省自然科学基金项目(No. 321QN317); 国家现代农业产业技术体系项目(No. CARS-11-hnhj)。

作者简介 魏云霞(1989—), 女, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 木薯高产高效栽培与养分管理。*通信作者(Corresponding author): 黄洁(HUANG Jie), E-mail: hnhjcn@163.com。

the decrease was significantly higher than that of $-N$ and $-P$. The correlation analysis showed that yield, starch yield of FSR were extremely significantly positively correlated with the SRNPP, and significantly positively correlated with the WPSR. $-N$, $-P$ and $-K$ significantly inhibited cassava growth. N was the primary limiting factor for cassava fresh storage root yield in the early stage of continuous cropping, followed by K , but P effect was not obvious. With the extension of continuous cropping years, the effects of K and P effect gradually became more significant, and N , K became the main limiting factors, then there was no significant difference on the fresh storage root yield effect among N , P and K , there were equally important.

Keywords: cassava; long-term fertilization; nutrient deficiency; yield; starch

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2024.07.012

木薯 (*Manihot esculenta* Crantz) 是热带和亚热带地区主要的粮食作物及淀粉、酒精生产原料, 是全球近 10 亿人的主要食粮^[1], 其块根淀粉含量约占干物质重的 80%^[2]。在我国, 木薯作为经济作物, 主要分布在广西、广东、海南等华南 8 省(区), 木薯地土壤肥力水平以低和极低等级为主^[3], 较低的土壤肥力极大地限制了木薯的生长发育和产量的提升^[4-5], 且养分供应不足是造成农民田间实际产量与木薯潜在产量差距较大的主要原因之一^[6]。

长期不施肥或施肥不均衡会导致木薯产量低, 而科学合理施肥是木薯增产提质增效的有效途径^[7]。林洪鑫等^[8]研究发现, 施氮显著提高木薯单株结薯数、单株薯重和鲜薯产量, 但降低淀粉含量。SIEVERDING 等^[9]研究表明, 土壤中较低的磷含量明显限制木薯产量。ROSA 等^[4]研究发现, 施磷增加了酸性土壤中的木薯地上部生物量、增粗薯径、提高单条薯重, 且木薯对施磷的反应因基因型而异。作为喜钾植物, 钾是长期连作木薯产量的重要限制养分因子, 且随连作年限的延长而增强^[10]。魏云霞等^[5]研究表明, 施钾比不施钾显著提高木薯株高、茎径、单条薯重, 增产鲜薯 51.4% 以上, 促进可溶性糖向淀粉转化; HOWELER^[11]通过长期施肥试验发现, 长期缺钾造成木薯产量显著下降。黄洁等^[12]通过 12 年木薯长期定位试验的研究表明, 随施钾量增加, 鲜薯产量和淀粉含量均呈显著增加的趋势。此外, 陆小静等^[13]、张永发等^[14]通过 1~2 年试验结果表明, 氮、磷、钾肥对木薯增产效应为钾>氮>磷, 陆小静等^[13]指出氮、磷、钾肥对其淀粉含量影响不大, 而张永发等^[14]指出对其淀粉含量影响的主次顺序为氮>磷>钾。综上, 科学的施肥管理, 对保障木薯生产力具有重要意义, 但国内外关于木薯氮、磷、钾养分亏缺的研究局限在中短期的 10 年内^[10, 15-19], 而针对较长期的亏缺效应研究极少^[12, 20]。为此, 本研究在 28 年木薯长期定位施肥试验的基础上, 以华

南地区主推的 2 个木薯品种 SC205 和 SC124 为研究对象, 明确长期氮、磷、钾肥亏缺对木薯农艺性状、产量以及淀粉含量的影响, 以期为长期连作的木薯高产优质栽培提供科学施肥依据。

1 材料与方法

1.1 材料

长期定位试验于 1992 年开始在海南省儋州市宝岛新村中国热带农业科学院热带作物品种资源研究所(品资所)木薯试验基地进行。在试验时间轴上选取 2019—2021 年(连作 28~30 年)的试验材料作为本研究的内容。试验地土壤为花岗岩发育的砖红壤, 1992 年的试验初始土壤基础理化性质为: pH 5.35, 有机质 8.40 g/kg, 全氮 0.25 g/kg, 有效磷 24.6 mg/kg, 速效钾 36.9 mg/kg。

供试木薯品种为 SC205 和 SC124, 均由品资所提供。供试肥料为尿素(含 N 46%)、过磷酸钙(含 P_2O_5 12%)、氯化钾(含 K_2O 60%)。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 选取 4 个施肥处理: (1) CK (氮磷钾肥配施)、(2) $-N$ (不施氮肥)、(3) $-P$ (不施磷肥)、(4) $-K$ (不施钾肥), 其中, CK 的施肥量为 N 100 kg/hm²、 P_2O_5 50 kg/hm²、 K_2O 100 kg/hm²。 $-N$ 、 $-P$ 、 $-K$ 分别在 CK 的基础上进行相应的缺肥处理, 所有肥料均在木薯植后 45~60 d 一次性穴施。试验按裂区设计, 主区为不同施肥处理, 副区为 2 个木薯品种, 主处理 4 次重复。F 表示施肥处理, V 表示品种。木薯株行距为 80 cm × 80 cm, 植后 300~330 d 调查农艺性状、收获鲜薯, 每个重复选取 5 株代表性植株调查、收获。田间管理措施一致。

1.2.2 项目测定 (1) 农艺性状调查。收获前, 调查各重复的 SPAD 值、株高、茎径。其中, 使用 SPAD-502 叶绿素仪测定植株顶部第 3、第 4 片完全展开叶 SPAD 值, 平均值作为该植株的

SPAD 值；采用卷尺测量地面到顶端心叶的高度即为株高；采用游标卡尺测量距离地面 5 cm 高处主茎的直径即为茎径。

（2）鲜薯产量及其构成因子。收获期，对各重复计数单株结薯数、称重单株薯重，并换算单条鲜薯重，以实收的 5 株木薯鲜薯重换算每公顷鲜薯产量（t/hm²）。

（3）鲜薯淀粉含量。用泰国生产的鲜薯淀粉测定仪测定鲜薯中淀粉含量。称鲜薯重后，选取 5 kg 左右的代表性鲜薯，按照国际热带农业中心制定的公式计算鲜薯淀粉含量^[21]，计算公式如下：

$$S_c=210.8\times[m_1/(m_1-m_2)]-213.4$$
（1）

式中，S_c为鲜薯淀粉含量，单位为%；m₁为鲜薯在空气中的质量，单位为 g；m₂为鲜薯在水中的质量，单位为 g。

（4）淀粉产量。

$$S_y=R_y\times S_c$$
（2）

式中，S_y为淀粉产量，单位为 t/hm²；R_y为鲜薯产量，单位为 t/hm²。

1.3 数据处理

所有试验数据采用 SPSS 19.0 软件进行裂区方差分析，采用 Duncan’s 新复极差法进行多重比较，Origin 8.0 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 农艺性状

主体间效应检验结果表明（表 1），施肥和品

种对 3 年试验的木薯叶片 SPAD 值、株高和茎径影响显著，从 SPAD 值的效应来看，3 年的施肥影响均大于品种的影响；株高和茎径效应来看，2019 年施肥影响大于品种的影响，而 2020 和 2021 年施肥影响则小于品种的影响。施肥和品种的交互作用对各指标影响不显著。多重比较结果表明（表 2），主区因素中，SPAD 值表现为 -P 和 CK 均显著高于 -K，其中，-K 与 CK 相比，3 年降幅为 7.9%~13.6%；株高表现为 CK 显著高于 -N 和 -K，其中，-N 的 3 年降幅为 12.9%~18.2%，-K 的 3 年降幅为 15.7%~20.2%；茎径表现为 CK 显著高于缺肥处理，其中，-N、-P、-K 较 CK 的 3 年降幅分别为 13.9%~17.8%、10.0%~16.5% 和 10.4%~11.7%。副区因素中，2 个品种间株高差异显著，表现为 SC124>SC205。

2.2 鲜薯淀粉含量

主体间效应检验表明（表 3），施肥对 3 年试验的鲜薯淀粉含量影响显著，品种对鲜薯淀粉含量无显著影响，而施肥和品种间交互作用对淀粉含量有显著影响。多重比较结果表明（表 4），主区因素中，鲜薯淀粉含量表现为：2019 和 2020 年，-K 显著低于 CK、-N 和 -P，2021 年，-K 显著低于 CK 和 -P，三者均显著低于 -N；与 CK 相比，-K 鲜薯淀粉含量的 3 年降幅为 8.4%~23.4%，平均降幅为 14.2%。副区因素中，-K 下，品种间淀粉含量差异显著，表现为 SC124 显著高于 SC205。

表 1 不同处理下木薯农艺性状的主体间效应检验
Tab.1 Test of between-subjects effect under different treatments for agronomic characters of cassava

年份 Year	裂区设计 Split plot design	变异来源 Source of variation	SPAD 值 SPAD value		株高 Plant height/cm		茎径 Stem diameter/mm	
			F	P	F	P	F	P
2019	主区	区组	1.338	0.322	14.923	0.001	8.016	0.007
	裂区	F	10.691	0.003	28.220	0.000	19.910	0.000
		V	4.592	0.053	24.088	0.000	13.530	0.003
		F×V	3.408	0.053	1.584	0.245	3.471	0.051
2020	主区	区组	1.830	0.212	0.651	0.602	0.127	0.941
	裂区	F	15.798	0.001	7.856	0.007	8.436	0.006
		V	12.853	0.004	84.766	0.000	10.068	0.008
		F×V	0.657	0.594	1.693	0.221	1.263	0.331
2021	主区	区组	0.093	0.962	0.154	0.924	4.259	0.039
	裂区	F	29.266	0.000	3.935	0.048	8.156	0.006
		V	4.319	0.060	168.338	0.000	15.679	0.002
		F×V	0.097	0.960	1.081	0.394	1.106	0.385

表 2 不同施肥条件不同品种木薯的农艺性状

Tab. 2 Agronomic characters for different varieties of cassava under different fertilization treatments

处理 Treatment	品种 Variety	SPAD 值 SPAD value			株高 Plant height/cm			茎径 Stem diameter/mm		
		2019	2020	2021	2019	2020	2021	2019	2020	2021
CK	SC205	42.5 ^a	41.4 ^a	44.1 ^b	228.8 ^a	193.5 ^b	220.8 ^b	25.6 ^a	24.5 ^a	26.4 ^a
	SC124	41.3 ^a	43.4 ^a	46.1 ^a	279.1 ^a	254.6 ^a	259.9 ^a	25.7 ^a	23.0 ^b	24.7 ^a
	平均	41.9 ^A	42.4 ^A	45.1 ^A	254.0 ^A	224.1 ^A	240.3 ^A	25.6 ^A	23.7 ^A	25.5 ^A
-N	SC205	39.0 ^a	43.3 ^a	42.0 ^a	191.8 ^b	168.5 ^b	193.3 ^b	23.1 ^a	20.7 ^a	22.6 ^a
	SC124	40.9 ^a	45.2 ^a	43.9 ^a	223.9 ^a	207.1 ^a	225.4 ^a	20.2 ^a	18.3 ^b	21.3 ^a
	平均	40.0 ^B	44.3 ^A	42.9 ^B	207.9 ^B	187.8 ^B	209.3 ^B	21.7 ^B	19.5 ^B	22.0 ^B
-P	SC205	43.9 ^a	44.3 ^a	46.3 ^a	202.2 ^a	189.2 ^b	221.1 ^b	23.0 ^a	21.3 ^a	24.3 ^a
	SC124	41.0 ^b	45.7 ^a	47.2 ^a	215.2 ^a	239.0 ^a	262.1 ^a	19.8 ^a	19.7 ^a	21.7 ^a
	平均	42.5 ^A	45.0 ^A	46.7 ^A	208.7 ^B	214.1 ^A	241.6 ^A	21.4 ^B	20.5 ^B	23.0 ^B
-K	SC205	40.0 ^a	37.2 ^a	38.1 ^a	189.9 ^a	172.7 ^b	178.9 ^b	22.9 ^a	21.3 ^a	23.0 ^a
	SC124	36.6 ^b	40.9 ^a	39.8 ^a	215.5 ^a	204.6 ^a	226.5 ^a	22.4 ^a	21.3 ^a	22.3 ^a
	平均	38.3 ^B	39.0 ^B	39.0 ^C	202.7 ^B	188.6 ^B	202.7 ^B	22.6 ^B	21.3 ^B	22.7 ^B

注：同一品种同列数据后不同小写字母表示该品种处理间差异显著（ $P<0.05$ ），同列数据后不同大写字母表示2个品种的均值在处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。

Note: Different lowercase letters after the same column of data in the same variety indicate significant difference among treatments ($P<0.05$), different capital letters indicate the average value of the two varieties significant difference among treatments ($P<0.05$).

表 3 不同处理下鲜薯淀粉含量的主体间效应检验

Tab. 3 Test of between-subjects effect under different treatments for starch content of fresh storage root

裂区设计 Split plot design	变异来源 Source of variation	2019		2020		2021	
		<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
主区	区组	3.598	0.059	13.541	0.001	3.988	0.046
裂区	F	12.226	0.002	11.488	0.002	89.180	0.000
	V	3.275	0.095	0.245	0.630	0.007	0.935
	F×V	4.746	0.021	8.641	0.003	89.180	0.000

表 4 不同施肥条件不同品种木薯的鲜薯淀粉含量

Tab. 4 Starch content of fresh storage root for different varieties of cassava under different fertilization treatments%

处理 Treatment	品种 Variety	2019	2020	2021
CK	SC205	30.2 ^a	26.4 ^a	22.3 ^a
	SC124	29.5 ^a	26.5 ^a	22.5 ^a
	平均	29.9 ^A	26.5 ^A	22.4 ^B
-N	SC205	32.7 ^a	27.6 ^a	27.7 ^a
	SC124	30.5 ^a	25.5 ^a	26.1 ^a
	平均	31.6 ^A	26.6 ^A	26.9 ^A
-P	SC205	29.2 ^b	27.1 ^a	22.3 ^a
	SC124	34.1 ^a	26.6 ^a	21.9 ^a
	平均	31.6 ^A	26.8 ^A	22.1 ^B
-K	SC205	25.5 ^b	21.5 ^b	16.2 ^b
	SC124	29.2 ^a	24.6 ^a	18.2 ^a
	平均	27.4 ^B	23.1 ^B	17.2 ^C

注：同一品种同列数据后不同小写字母表示该品种处理间差异显著（ $P<0.05$ ），同列数据后不同大写字母表示2个品种的均值在处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。

Note: Different lowercase letters after the same column of data in the same variety indicate significant difference among treatments ($P<0.05$), different capital letters indicate the average value of the two varieties significant difference among treatments ($P<0.05$).

2.3 鲜薯产量、淀粉产量

主体间效应检验表明（表 5），施肥处理对 3 a 试验的鲜薯产量和淀粉产量均有极显著影响，品种对鲜薯产量和淀粉产量无显著影响，2020 和 2021 年二者交互作用对鲜薯产量影响显著，2019 和 2020 年二者交互作用对淀粉产量影响显著。多重比较结果表明（表 6），主区因素中，养分亏缺均显著降低鲜薯产量和淀粉产量，与 CK 相比，2019—2021 年，-N、-P 和 -K 分别减产 24.1%~70.7%、25.5%~61.6%和 37.3%~64.8%，3 a 平均减产分别为 45.1%、43.3%、47.5%；-N、-P 和 -K 淀粉产量降幅分别为 19.9%~65.1%、24.7%~40.8%和 43.7%~53.3%，3 年平均降幅分别为 39.6%、40.8%和 53.3%，-K 的淀粉产量降幅显著高于 -N 和 -P。副区因素中，-K 下，2021 年，SC205 鲜薯产量显著高于 SC124；2019 和 2020 年，SC124 淀粉产量显著高于 SC205。

表 5 不同处理下鲜薯产量和淀粉产量的主体间效应检验
Tab. 5 Test of between-subjects effect under different treatments for yield and starch yield of fresh storage root

年份 Year	裂区设计 Split plot design	变异来源 Source of variation	鲜薯产量 Fresh storage root yield		淀粉产量 Starch yield of fresh storage root yield	
			F	P	F	P
2019	主区	区组	2.148	0.164	0.295	0.828
		裂区	F	94.307	0.000	52.827
		V	0.413	0.533	4.119	0.065
		F×V	1.823	0.197	9.493	0.002
2020	主区	区组	1.174	0.373	11.386	0.002
		裂区	F	59.064	0.000	126.626
		V	3.308	0.094	3.715	0.078
		F×V	22.058	0.000	26.377	0.000
2021	主区	区组	0.895	0.481	3.033	0.086
		裂区	F	236.316	0.000	256.583
		V	4.403	0.058	2.378	0.149
		F×V	6.258	0.008	1.019	0.419

表 6 不同施肥条件不同品种木薯的鲜薯产量和淀粉产量
Tab. 6 Yield and starch yield of fresh storage root for different varieties of cassava under different fertilization treatments

处理 Treatment	品种 Variety	鲜薯产量 Fresh storage root yield/(t·hm ⁻²)			淀粉产量 Starch yield of fresh storage root yield/(t·hm ⁻²)		
		2019	2020	2021	2019	2020	2021
CK	SC205	26.2 ^a	26.3 ^a	28.2 ^a	7.9 ^a	7.0 ^a	6.3 ^a
	SC124	24.7 ^a	29.0 ^a	30.3 ^a	7.3 ^a	7.7 ^a	6.8 ^a
	平均	25.4 ^A	27.7 ^A	29.3 ^A	7.6 ^A	7.3 ^A	6.6 ^A
-N	SC205	19.3 ^a	14.9 ^b	7.9 ^b	6.3 ^a	4.1 ^a	2.2 ^a
	SC124	19.3 ^a	19.8 ^a	9.2 ^a	5.9 ^a	5.1 ^a	2.4 ^a
	平均	19.3 ^B	17.4 ^C	8.6 ^C	6.1 ^B	4.6 ^C	2.3 ^B
-P	SC205	14.3 ^a	23.5 ^a	9.7 ^b	4.2 ^b	6.3 ^a	2.2 ^a
	SC124	15.5 ^a	17.7 ^b	12.7 ^a	5.3 ^a	4.7 ^b	2.8 ^a
	平均	14.9 ^C	20.6 ^B	11.2 ^B	4.7 ^C	5.5 ^B	2.5 ^B
-K	SC205	14.8 ^a	16.4 ^a	11.5 ^a	3.8 ^b	3.5 ^b	1.9 ^a
	SC124	16.3 ^a	18.3 ^a	9.1 ^b	4.8 ^a	4.5 ^a	1.7 ^a
	平均	15.6 ^C	17.3 ^C	10.2 ^{BC}	4.3 ^C	4.0 ^C	1.8 ^C

注：同一品种同列数据后不同小写字母表示该品种处理间差异显著（ $P<0.05$ ），同列数据后不同大写字母表示2个品种的均值在处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。

Note: Different lowercase letters after the same column of data in the same variety indicate significant difference among treatments ($P<0.05$), different capital letters indicate the average value of the two varieties significant difference among treatments ($P<0.05$).

2.4 产量构成因子

主体间效应检验表明（表 7），施肥、品种以及二者的交互作用极显著影响各年度的单株结薯

数和单条薯重。多重比较结果表明（表 8），主区因素中，2019 年，-N 较 CK 显著增加单株结薯数，但单条薯重显著降低，2020 年，-N 较 CK 显著降低单株结薯数，而单条薯重显著增加；2020 和 2021

表 7 不同处理下木薯产量构成因子的主体间效应检验
Tab. 7 Test of between-subjects effect under different treatments for yield components of cassava

年份 Year	裂区设计 Split plot design	变异来源 Source of variation	单株结薯数 Storage root number per plant		单条薯重 Weight per storage root	
			F	P	F	P
2019	主区	区组	0.233	0.871	1.117	0.392
		裂区	F	7.804	0.007	29.173
		V	83.886	0.000	16.005	0.002
		F×V	5.684	0.012	6.781	0.006
2020	主区	区组	0.227	0.875	0.225	0.877
		裂区	F	68.149	0.000	53.501
		V	67.887	0.000	132.161	0.000
		F×V	8.771	0.002	11.887	0.001
2021	主区	区组	0.328	0.805	0.343	0.795
		裂区	F	481.131	0.000	51.030
		V	265.189	0.000	823.868	0.000
		F×V	32.434	0.000	33.153	0.000

表 8 不同施肥条件不同品种木薯的产量构成因子
Tab. 8 Yield components for different varieties of cassava under different fertilization treatments

处理 Treatment	品种 Variety	单株结薯数 Storage root number per plant			单条薯重/g Weight per storage root/g		
		2019	2020	2021	2019	2020	2021
CK	SC205	6.7 ^a	7.8 ^a	11.5 ^a	268.7 ^a	217.2 ^b	157.3 ^b
	SC124	5.0 ^b	5.8 ^b	7.4 ^b	406.5 ^b	330.8 ^a	263.8 ^a
	平均	5.8 ^B	6.8 ^A	9.5 ^A	337.6 ^A	274.0 ^B	210.6 ^A
-N	SC205	7.6 ^a	3.7 ^a	3.7 ^a	169.5 ^a	268.7 ^b	133.8 ^b
	SC124	5.9 ^b	2.8 ^b	2.8 ^b	215.8 ^b	468.7 ^a	225.0 ^a
	平均	6.8 ^A	3.3 ^C	3.2 ^D	192.6 ^B	368.7 ^A	179.4 ^B
-P	SC205	5.8 ^a	7.0 ^a	4.4 ^a	173.5 ^b	196.7 ^b	128.3 ^b
	SC124	5.3 ^a	4.2 ^b	3.3 ^b	205.0 ^a	277.8 ^a	238.1 ^a
	平均	5.5 ^B	5.6 ^B	3.8 ^C	189.2 ^B	237.2 ^C	183.2 ^B
-K	SC205	5.9 ^a	5.5 ^a	5.5 ^a	170.7 ^b	192.7 ^b	138.5 ^b
	SC124	5.2 ^a	5.1 ^a	3.3 ^b	210.9 ^a	238.4 ^a	174.1 ^a
	平均	5.5 ^B	5.3 ^B	4.4 ^B	190.8 ^B	215.6 ^C	156.3 ^C

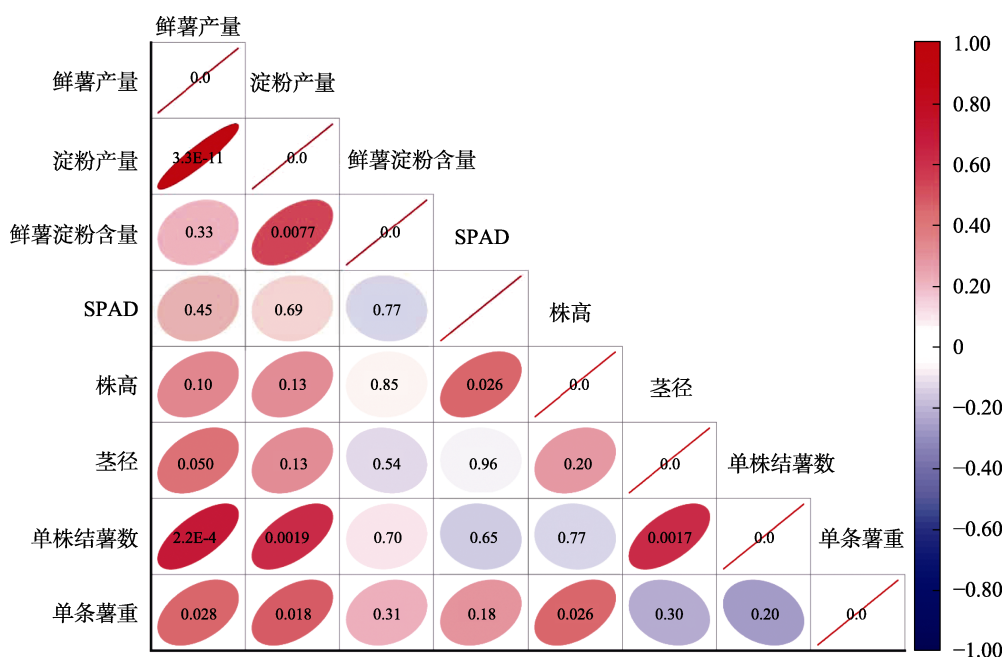
注：同一品种同列数据后不同小写字母表示该品种处理间差异显著（ $P<0.05$ ），同列数据后不同大写字母表示2个品种的均值在处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。

Note: Different lowercase letters after the same column of data in the same variety indicate significant difference among treatments ($P<0.05$), different capital letters indicate the average value of the two varieties significant difference among treatments ($P<0.05$).

年, -P 和 -K 较 CK 的单株结薯数显著降低, 降幅分别为 17.8%~59.8%和 22.1%~53.6%; 2019—2021 年, -P 和 -K 较 CK 的单条薯重均显著降低, 降幅分别为 13.0%~43.9%和 21.3%~43.5%。副区因素中, 2 个品种间单株结薯数和单条薯重差异显著, 单株结薯数表现为 SC205>SC124, 而单条薯重表现为 SC205<SC124。

2.5 相关性分析

各因子相关性分析表明 (图 1), 鲜薯产量、淀粉产量均与单株结薯数呈极显著正相关, 与单条薯重呈显著正相关。淀粉产量还与鲜薯淀粉含量呈极显著正相关, 鲜薯淀粉含量与单条薯重、SPAD 值与株高呈显著正相关, 单株结薯数与茎径呈极显著正相关。



格中数值表示行与列的相关系数 P , $P < 0.05$ 表示行与列显著相关, $P < 0.01$ 表示行与列极显著相关,

颜色越红表示正相关性越强, 越蓝表示负相关性越强。

The correlation coefficient expressed as P-value in each grid, less than 0.05 indicate significant correlation and less than 0.01 indicate extremely significant correlation between row and column. The more red, the more positive correlation, and the more blue, the more negative correlation.

图 1 木薯农艺性状、鲜薯淀粉含量、产量构成因素及产量间的相关性分析

Fig. 1 Correlation analysis among agronomic characters, starch content, yield components and yield

3 讨论

3.1 长期养分亏缺对农艺性状的影响

叶绿素是光合作用过程中最重要的色素, 参与光能的吸收、传递和转化^[22]。本研究中, 2 个木薯品种间的 SPAD 值无显著差异, 而不同施肥处理间 SPAD 值的影响达极显著水平, 其中, -K 显著降低 SPAD 值, 可能与 -K 造成叶绿体的体积和数目减少, 叶绿体结构受到明显的影响, 从而限制光合色素的合成^[23], 降低木薯叶片叶绿素含量^[24]有关。本研究结果表明, -N 和 -K 显著降低木薯的株高, 品种间株高差异显著, 表现为 SC124>SC205, 这与前期研究结果相似^[5]。本研究各养分亏缺处理均显著降低木薯茎径, -N 的茎径降幅最大, 进一步说明 N 是木薯茎径的主要限

制因子^[25]。

3.2 长期养分亏缺对鲜薯淀粉含量的影响

提高块根淀粉含量是木薯栽培的首要品质目标, 主要受品种特性和栽培技术的影响^[26]。本研究中, -N 显著提高 2021 年木薯的块根淀粉含量, -P 对淀粉含量无显著影响, -K 显著降低淀粉含量, 与本试验连作 4、7、12 年的研究结果一致^[10, 12, 17], 也与 NGUYEN^[20]在越南东奈不同养分亏缺连作第 19 年的 -N、-K 效应一致, 但与其 -P 显著降低鲜薯淀粉含量的效应不同, 这可能与试验的木薯品种^[16]有关。-N 提高块根淀粉含量可能与 -N 条件下蔗糖合成与糖酵解能力下降, 淀粉合成酶活性增强, 促进糖主要用于合成淀粉^[27]有关; -K 降低块根淀粉含量, 可能是由于 -K 限

制木薯 CO_2 同化, 抑制淀粉合成酶的活性, 也可能是限制次生木质部生长, 不利于淀粉沉淀, 制约光合产物从叶片向块根转移^[28], 这值得进一步研究。总之, 氮、钾可显著影响鲜薯淀粉含量, 而磷对淀粉含量无显著影响。

3.3 长期养分亏缺对木薯产量的影响

在长期定位试验中, 张伟特等^[10]的 1992—1995 年研究表明, $-\text{N}$ 、 $-\text{K}$ 的 4 年间平均减产幅度分别为 37.2%、23.4%, $-\text{P}$ 对鲜薯产量无影响; 黄洁等^[17]的 1992—1998 年分析表明, $-\text{N}$ 、 $-\text{K}$ 的 7 年间平均减产幅度分别为 34.3%、24.9%, $-\text{P}$ 对鲜薯产量尚无影响, 而后对 1992—2003 年^[12]的研究表明, $-\text{N}$ 、 $-\text{P}$ 、 $-\text{K}$ 的 12 年间平均减产幅度分别为 40.6%、9.5%、32.2%, $-\text{P}$ 表现出明显影响; 本研究发现, 在连作第 28—30 年的 3 年间, N 、 P 、 K 肥的长期亏缺均显著降低鲜薯产量, 3 年间平均降幅均在 40% 以上, 但不同养分亏缺处理间及品种间差异均不显著; 总之, $-\text{N}$ 从试验初期即显著减产鲜薯, 连作 12 年内减产幅度均表现为 $-\text{N} > -\text{K} > -\text{P}$, $-\text{K}$ 、 $-\text{P}$ 的减产幅度随连作年限延长明显提高。前人的多数研究认为, 氮是影响木薯鲜薯产量的第一限制因素^[8, 15, 29], $-\text{N}$ 抑制茎叶生长和光合产物分配^[30-31]而降低鲜薯产量; 木薯根系耐低磷、吸磷能力强^[32], 纤维根与土壤菌根高效共生吸磷^[33], 因此, 生产中较少出现不施磷减产的现象, 但随连作年限增加, 土壤磷含量逐渐降低, 磷肥效应愈加明显^[18]; 本研究连作初期, $-\text{P}$ 对鲜薯产量影响较小, 与初始土壤磷含量较高有关^[10], 随连作年限延长, 其土壤磷素逐渐耗竭至低于临界值, $-\text{P}$ 的减产效应明显增强, 故连作木薯前期可不施或少施磷肥, 后期需注重施磷; 据 HOWELER 在全球各地组织的木薯长期定位试验综合研究, 木薯块根的钾占全株的 60%, 收获块根从土壤中带走的 K 明显高于 N 和 P , 故施钾效应随连作年限延长而显著增强, 钾逐渐上升为连作木薯的主要产量限制因子^[19, 33]。综合分析本研究及前人结果, 木薯连作前期, 氮是木薯产量的首要限制因子, 钾其次, 磷效应不明显, 随连作年限延长, 钾、磷效应逐渐显著, 氮、钾成为最主要的限制因子, 而后, 氮、磷、钾肥间的鲜薯产量效应无显著差异, 氮、磷、钾同等重要。氮、磷、钾肥在长期连作中肥效的年限阈值及影响有待进一步分析研究。

本研究中, 鲜薯产量和淀粉产量均与单株结

薯数呈极显著正相关, 与单条薯重呈显著正相关, 这与黄渝岚等^[34]的研究结果相似。

4 结论

氮、磷、钾亏缺均显著抑制木薯生长, 其中, 缺钾显著降低叶片 SPAD 值, 氮是木薯茎径增粗的主要限制因子, 氮、钾可显著影响鲜薯淀粉含量, 而磷对鲜薯淀粉含量无显著影响。连作前期, 氮是木薯产量的首要限制因子, 钾其次, 磷效应不明显, 随连作年限延长, 钾、磷效应逐渐显著, 氮、钾成为最主要的限制因子, 而后氮、磷、钾肥间的鲜薯产量效应无显著差异, 氮、磷、钾均同等重要。

参考文献

- [1] LATIF S, MÜLLER J. Potential of cassava leaves in human nutrition: a review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2015, 44(2): 147-158.
- [2] EL-SHARKAWY M, TAFUR S. Comparative photosynthesis, growth, productivity, and nutrient use efficiency among tall- and short-stemmed rain-fed cassava cultivars[J]. Photosynthetica, 2010, 48(2): 173-188.
- [3] 魏云霞, 王熊飞, 刘丽娟, 李凤兰, 郑永清, 林洪鑫, 黄洁. 华南主产区木薯地土壤肥力现状分析[J]. 热带农业科学, 2021, 41(4): 36-42.
WEI Y X, WANG X F, LIU L J, LI F L, ZHENG Y Q, LIN H X, HUANG J. Status of cassava field fertility in southern China[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2021, 41(4): 36-42. (in Chinese)
- [4] ROSA B H S, FERNANDES A M, GAZOLA B, NUNES J G S, SORATTO R P. Liming and phosphorus fertilization increase cassava root yield without affecting its cooking time[J]. Agronomy Journal, 2021, 113(5): 4386-4395.
- [5] 魏云霞, 王娟, 李天, 刘丽娟, 黄洁, 郑永清. 施钾改善木薯农艺性状及淀粉组分[J]. 热带作物学报, 2021, 42(1): 102-109.
WEI Y X, WANG J, LI T, LIU L J, HUANG J, ZHENG Y Q. Potassium application improved the agronomic properties and starch components of cassava[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2021, 42(1): 102-109. (in Chinese)
- [6] EZUI K S, FRANKE A C, MANDO A, AHIABOR B D K, TETTEH F M, SOGBEDJI J, JANSSEN B H, GILLER K E. Fertiliser requirements for balanced nutrition of cassava across eight locations in West Africa[J]. Field Crop Research, 2016, 185: 69-78.
- [7] ADIELE J G, SCHUT A G T, VAN DEN BEUKEN R P M,

- EZUI K S, PYPERS P, ANO A O, EGESI C N, GILLER K E. Towards closing cassava yield gap in West Africa: agro-economic efficiency and storage root yield responses to NPK fertilizers[J]. *Field Crops Research*, 2020, 253: 107820.
- [8] 林洪鑫, 潘晓华, 袁展汽, 肖运萍, 刘仁根, 汪瑞清. 施氮和木薯-花生间作对作物产量和经济效益的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(4): 947-958.
- LIN H X, PAN X H, YUAN Z Q, XIAO Y P, LIU R G, WANG R Q. Effects of nitrogen application and cassava-peanut intercropping patterns on crop yields and economic benefit[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(4): 947-958. (in Chinese)
- [9] SIEVERDING E, HOWELER R H. Influence of species of VA mycorrhizal fungi on cassava yield response to phosphorus fertilization[J]. *Plant and Soil*, 1985, 88(2): 213-221.
- [10] 张伟特, 林雄, 李开绵, 黄洁, 许瑞丽. 木薯长期定位肥料试验总结(1992—1995 年)[J]. *热带农业科学*, 1997(2): 27-32.
- ZHANG W T, LIN X, LI K M, HUANG J, XU R L. Summary of cassava long-term positioning fertilizer experiment (1992-1995)[J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 1997(2): 27-32. (in Chinese)
- [11] HOWELER R H. Long-term effect of cassava cultivation on soil productivity[J]. *Field Crops Research*, 1991, 26: 1-18.
- [12] 黄洁, 叶剑秋, 许瑞丽, 王萍, 李开绵, 唐燕琼. 长期施肥对木薯农艺性状、鲜薯产量和淀粉质量分数的影响[J]. *热带作物学报*, 2004, 25(4): 42-49.
- HUANG J, YE J Q, XUR L, WANG P, LI K M, TANG Y Q. Fresh cassava yield or starch content and agronomic characters in the long-term fertilizer application trial[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2004, 25(4): 42-49. (in Chinese)
- [13] 陆小静, 许瑞丽, 闫庆祥, 李开绵, 叶剑秋, 黄洁. 氮磷钾配施对木薯产量和淀粉含量的效应研究[J]. *热带作物学报*, 2013, 34(12): 2331-2335.
- LU X J, XU R L, YAN Q X, LI K M, YE J Q, HUANG J. Effect of N, P, K combined application on the yield and quality of cassava[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2013, 34(12): 2331-2335. (in Chinese)
- [14] 张永发, 杜前进, 张冬明, 唐树梅. 平衡施肥对木薯产量及品质的影响初报[J]. *热带作物学报*, 2009, 30(4): 435-439.
- ZHANG Y F, DU Q J, ZHANG D M, TANG S M. Effect of balanced fertilization on yield and quality of cassava[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2009, 30(4): 435-439. (in Chinese)
- [15] 高志红, 陈晓运, 林昌华, 张宇鹏, 何永胜. 不同施肥水平对木薯氮磷钾养分积累、分配及其产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(8): 1637-1645.
- GAO Z H, CHEN X Y, LIN C H, ZHANG Y P, HE Y S. Effect of fertilizer application rates on cassava N, P, K accumulations and allocation and yield in sloping lands of north Guangdong[J]. *Scientia Agricultural Sinica*, 2011, 44(8): 1637-1645. (in Chinese)
- [16] 黄巧义, 唐拴虎, 陈建生, 张发宝, 解开治, 黄旭, 蒋瑞萍, 李苹. 木薯氮磷钾营养特性及其施肥效应研究[J]. *中国生态农业学报*, 2014, 22(10): 1156-1164.
- HUANG Q Y, TANG S H, CHEN J S, ZHANG F B, XIE K Z, HUANG X, JIANG R P, LI P. Cassava nutritive characteristics of NPK and effect of fertilizer application[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(10): 1156-1164. (in Chinese)
- [17] 黄洁, 林雄, 李开绵, 张伟特, 许瑞丽. 木薯施肥效应研究[J]. *广西热作科技*, 2000(3): 1-3.
- HUANG J, LIN X, LI K M, ZHANG W T, XU R L. Study on the fertilization effect of cassava[J]. *Guangxi Science & Technology of Tropical Crops*, 2000(3): 1-3. (in Chinese)
- [18] NGUYEN H, SCHOENAU J J, NGUYEN D, VAN R K, BOEHM M. Effect of long-term nitrogen, phosphorus, and potassium fertilization on cassava yield and plant nutrient composition in North Vietnam[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2002, 25(3): 425-442.
- [19] HOWELER R H, CADAVID L F. Short-and long-term fertility trials in Colombia to determine the nutrient requirements of cassava[J]. *Fertilizer Research*, 1990, 26: 61-80.
- [20] NGUYEN H H. The dang and tong quoc an. soil fertility maintenance and erosion control research in Vietnam[C]//HOWELER R H. A new future for cassava in Asia. Its use as food, feed and fuel to benefit the poor. Vientiane: Proc. of 8th Regional Workshop, 2010: 263-274.
- [21] 中华人民共和国农业部. 热带作物品种区域试验技术规程木薯: NY/T 2446—2013[S]. 北京: 中国农业出版社, 2014.
- Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Technical regulations for the regional tests of tropical crop varieties-Cassava: NY/T 2446—2013[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2014. (in Chinese)
- [22] 薛娴, 许会敏, 吴鸿洋, 沈应柏, 肖建伟, 万迎郎. 植物光合作用循环电子传递的研究进展[J]. *植物生理学报*, 2017, 53(2): 145-158.
- XUE X, XU H M, WU H Y, SHEN Y B, XIAO J W, WANG Y L. Research progress of cyclic electron transport in plant photosynthesis[J]. *Plant Physiology Journal*, 2017, 53(2): 145-158. (in Chinese)
- [23] 薛欣欣, 吴小平, 罗雪华, 王文斌, 王大鹏, 张永发, 赵春梅. 钾镁胁迫对巴西橡胶树花药苗生理特性及叶绿体超微结构的影响[J]. *热带作物学报*, 2019, 40(8): 1507-1514.

- XUE X X, WU X P, LUO X H, WANG W B, WANG D P, ZHANG Y F, ZHAO C M. Effects of potassium and magnesium deficiency on leaf physiological characteristics and chloroplast ultrastructure of anther culture seedling of rubber tree (*Hevea brasiliensis*)[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2019, 40(8): 1507-1514. (in Chinese)
- [24] 魏云霞, 李天, 黄洁, 徐海强, 苏必孟, 闫庆祥, 宋恩亮. 施钾对木薯产量及钾养分吸收的影响[J]. 土壤, 2018, 50(5): 902-909.
- WEI Y X, LI T, HUANG J, XU H Q, SU B M, YAN Q X, SONG E L. Effects of potassium fertilization on fresh root yield and potassium absorption of Cassava[J]. Soils, 2018, 50(5): 902-909. (in Chinese)
- [25] 姜舒雅, 孙彬杰, 林萱, 刘文杰, 朱杰辉, 宋勇. 不同氮素形态对木薯生长及根际土壤养分与酶活性的影响[J]. 热带作物学报, 2024, 45(3): 632-640.
- JIANG S Y, SUN B J, LIN X, LIU W J, ZHU J H, SONG Y. Effects of different nitrogen forms on cassava growth, rhizosphere soil nutrients and enzyme activities[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2024, 45(3): 632-640. (in Chinese)
- [26] 韦彩会, 何永群, 李婷婷, 张野, 何铁光, 莫成恩, 韦家华, 李忠义, 曾向阳, 黄伟彬. 施肥与耕作技术集成对木薯养分积累、分配及淀粉含量的影响[J]. 南方农业学报, 2016, 47(5): 632-637.
- WEI C H, HE Y Q, LI T T, ZHANG Y, HE T G, MO C E, WEI J H, LI Z Y, ZENG X Y, HUANG W B. Effects of fertilization-tillage technology integration on nutrient accumulation and distribution, and starch content of cassava[J]. Journal of Southern Agriculture, 2016, 47(5): 632-637. (in Chinese)
- [27] 袁夏君. 氮缺乏对人参淀粉积累的调控及其机制研究[D]. 吉林: 北华大学, 2020.
- YUAN X J. The regulatory mechanism of nitrogen deficiency on starch accumulation of *Panax ginseng*[D]. Jilin: Beihua University, 2020. (in Chinese)
- [28] JOHN K S, VENUGOPAL V K, SARASWATHI P. Yield maximization in cassava through a systematic approach in fertilizer use[J]. Communications in Soil Science & Plant Analysis, 2007, 38(5/6): 779-794.
- [29] 黄巧义, 唐拴虎, 陈建生, 张发宝, 解开治, 黄旭, 蒋瑞萍, 李苹. 木薯物质累积特征及其施肥效应[J]. 作物学报, 2013, 39(1): 126-132.
- HUANG Q Y, TANG S H, CHEN J S, ZHANG F B, XIE K Z, HUANG X, JIANG R P, LI P. Characteristics of dry matter accumulation and effect of fertilizer application in cassava[J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(1): 126-132. (in Chinese)
- [30] CRUZ J L, MOSQUIM P R, PELACANIL C R. Photosynthesis impairment in cassava leaves in response to nitrogen deficiency[J]. Plant and Soil, 2003, 257: 417-423.
- [31] JOHN S K, VENUGOPAL V K, MANIKANTAN N M. Crop growth, yield and quality parameters associated with maximize yield research (MYR) in cassava[J]. Journal of Root Crop, 2005, 31(1): 14-21.
- [32] EL-SHARKAWY M A. Cassava biology and physiology[J]. Plant Molecular Biology, 2004, 56(4): 481-501.
- [33] HOWELER R H. Cassava mineral nutrition and fertilization[M]//HILLOCKS R J, THRESH J M, BELLOTI A C. Cassava: biology, production and utilization. Wallingford, UK: CAB International, 2002.
- [34] 黄渝岚, 龙盛风, 叶兴枝, 李艳英, 申章佑, 周佳, 周灵芝, 劳承英, 韦本辉. 木薯在湖北恩施的农艺性状及产量品质研究[J]. 中国农业科技导报, 2021, 23(9): 46-55.
- HUANG Y L, LONG S F, YE X Z, LI Y Y, SHEN Z Y, ZHOU J, ZHOU L Z, LAO C Y, WEI B H. Study on the agronomic characters, yield and quality of cassava in Enshi of Hubei province[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2021, 23(9): 46-55. (in Chinese)