

施氮量和种植密度对甘薯封垄期干物质积累和分配及收获期产量的影响

陈 玥¹, 梁清干^{2*}, 王蒙召¹, 陈艳丽¹, 朱国鹏^{1**}

1. 海南大学三亚南繁研究院, 海南海口 572025; 2. 广东省科学院南繁种业研究所, 广东广州 510310

摘 要: 为探讨氮肥用量和种植密度对甘薯封垄期干物质积累和分配及收获期产量的影响, 提升海南地区甘薯栽培技术, 于 2019—2020 年进行田间试验, 以鲜食型甘薯品种高系 14 为试验材料, 设置 3 个种植密度, 即 47 600 株/hm² (D₁)、71 400 株/hm² (D₂)、142 900 株/hm² (D₃); 4 个施氮量, 即 0 kg/hm² (N₀)、60 kg/hm² (N₁)、120 kg/hm² (N₂)、180 kg/hm² (N₃), 采用双因素裂区设计, 以种植密度为主区, 施氮量为副区, 研究不同种植密度和施氮量组合对高系 14 封垄期的光合特性、叶绿素相对含量 (SPAD)、茎叶生长、源库干物质积累与分配特性、封垄期结薯特性、收获期产量及其构成因素和商品性的影响。结果表明: 在同一种植密度下, 甘薯封垄期的叶片净光合速率 (P_n)、茎叶鲜重、分枝数、最长蔓长、单株结薯数及商品薯单薯重随施氮量的增加先增加后降低, 在 N₁ 处理时最大; 甘薯产量随施氮量的增加先增加后降低, 在 N₂ 处理时最大, 较 N₀ 提高了 32.0%, 但 N₂ 与 N₁ 处理间无显著差异; 在同一施氮量下, 甘薯块根干物质分配比随种植密度的增加先增加后降低, D₂ 处理达到最大但 D₂ 与 D₃ 处理间无显著差异; 根冠比和产量随种植密度的增加显著增加, 在 D₃ 处理时最大, 其中 D₃ 产量较 D₁、D₂ 分别提高了 30.9% 和 24.1%。相关性分析结果表明, 在对块根干物质积累和分配的影响效应中, 施氮量和种植密度均有显著影响, 而对甘薯收获期产量的影响效应中, 种植密度与收获期产量呈极显著正相关, 相关系数为 0.704。综合本试验结果, 当施氮量为 60 kg/hm²、种植密度为 142 900 株/hm² 处理 (D₃N₁) 时, 高系 14 的产量最高, 达到 30.1 t/hm², 其对应薯块商品率为 94.3%, 均为所有处理中最佳。

关键词: 甘薯; 施氮量; 种植密度; 干物质积累; 分配; 产量

中图分类号: S531 文献标志码: A

Effects of Nitrogen Application Rate and Planting Density on Dry Matter Accumulation and Distribution at Ridge Sealing Stage and Yield at Harvest Stage of Sweetpotato

CHEN Yue¹, LIANG Qinggan^{2*}, WANG Mengzhao¹, CHEN Yanli¹, ZHU Guopeng^{1**}

1. Sanya Nanfan Research Institute of Hainan University, Sanya, Hainan 572025, China; 2. Institute of Nanfan & Seed Industry, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong 510310, China

Abstract: In order to explore the effects of nitrogen fertilizer application rate and planting density on the source-sink relationship and yield of sweet potato during ridge-sealing period, and to improve the cultivation techniques of sweet potato in Hainan, a field experiment was carried out from 2019 to 2020. The fresh-eating sweet potato variety Gaoxi14 was used as the test material, and three planting densities were set up, namely 47 600 plants/hm² (D₁), 71, 400 plants/hm² (D₂) and 142 900 plants/hm² (D₃). Four nitrogen application rates (0 kg/hm² (N₀), 60 kg/hm² (N₁), 120 kg/hm² (N₂), 180 kg/hm² (N₃)) were designed in a double-factor split plot design with planting density as the main plot and nitrogen application rate as the subplot to study the effects of different planting densities and nitrogen application rates on pho-

收稿日期 2022-11-02; 修回日期 2023-03-07

基金项目 海南省重点研发计划项目 (No. ZDFY2020226); 国家甘薯产业技术体系项目 (No. CARS-10-sweetpotato)。

作者简介 陈 玥 (1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 作物栽培生理; *同等贡献作者: 梁清干 (1995—), 男, 硕士, 助理农艺师, 研究方向: 作物栽培生理。**通信作者 (Corresponding author): 朱国鹏 (ZHU Guopeng), E-mail: guopengzhu@163.com。

tosynthetic characteristics, the relative chlorophyll content (SPAD), stem and leaf growth, dry matter accumulation and distribution in source and sink, tuber characteristics in ridge-sealing period, yield and its components and commodity in harvest period of Gaoxi14. Under the same planting density, the net photosynthetic rate (P_n), fresh weight of stem and leaf, number of branches, longest vine length, number of tubers per plant and single tuber weight of commercial sweet potato increased first and then decreased with the increase of nitrogen application rate, and reached the maximum at N_1 treatment. The yield of sweet potato increased first and then decreased with the increase of nitrogen application rate, and reached the maximum under N_2 treatment, which was 32.0% higher than that under N_0 treatment, but there was no significant difference between N_2 and N_1 treatments. Under the same nitrogen application rate, the dry matter distribution ratio of sweet potato roots increased first and then decreased with the increase of planting density. The D_2 treatment reached the maximum but there was no significant difference between D_2 and D_3 treatments. The root shoot ratio and yield increased significantly with the increase of planting density, and reached the maximum at D_3 treatment. The yield of D_3 was 30.9% and 24.1% higher than that of D_1 and D_2 , respectively. The results of correlation analysis showed that the nitrogen application rate and planting density had significant effects on the dry matter accumulation and distribution of root tubers, while the planting density had a significant positive correlation with the yield of sweet potato at harvest stage, and the correlation coefficient was 0.704. Based on the results of this experiment, when the nitrogen application rate was 60 kg/hm^2 and the planting density was $142\ 900 \text{ plants/hm}^2$ (D_3N_1), the yield of Gaoxi 14 was the highest, reaching 30.1 t/hm^2 , and the corresponding potato commodity rate was 94.3%, which was the best among all treatments.

Keywords: sweetpotato; nitrogen application rate; planting density; dry matter accumulation; distribution; yield

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2024.04.012

甘薯 [*Ipomoea batatas* (L.) Lam] 是世界三大薯类作物之一, 是我国第四大粮食作物^[1]。甘薯块根产量由栽植密度, 单株结薯数, 单薯重共同决定, 栽植密度一定时, 单株结薯数对产量贡献较大^[2-3]。甘薯单株结薯数在封垄期趋于稳定, 其与块根商品性和外观性状密切相关^[4]。研究表明增加甘薯单株结薯数, 可明显改善块根外观性状、商品性和产量^[5]。

源库关系的建立、发展和平衡, 对作物产量形成具有重要的意义。一方面, “源”的生长决定光合产物的多少及其运转能力, 为“源”的形成和发育提供必要的物质基础; 另一方面, “源”的形成和发育反馈“源”的光合产物合成和运输, 从而调节“源”的生长^[6]。甘薯具有典型的源库关系, 源库协调发展是甘薯获得高产的重要前提。氮素是甘薯生长发育所必须的大量营养元素^[7], 在甘薯生长前期, 合理的氮素运筹可促进源端光合同化物的合成、分配和积累^[8]。如果氮素施用量过低或过多则导致源叶发育失衡, 光合产物的合成、分配和积累受阻, 抑制块根分化建成^[9-10]。种植密度是调节作物群体结构的有效手段, 良好的群体结构, 可优化作物个体的光合特性^[11]。合理的种植密度可以提高水肥利用效率, 促进源叶生长, 提高干物质分配比, 促进库的形成^[12-14]。氮肥和种植密度综合管理是优化作物群体结构、

促进养分吸收、提高生产能力、改善品质、增加产量的有效措施^[15-16]。因此生产上可通过氮肥和种植密度运筹 (简称: 氮密运筹。下同) 的途径提高作物干物质生产能力和产量。

截至目前, 有关氮肥或种植密度单因素对甘薯产量和品质影响的研究较多, 其二者互作效应对甘薯干物质积累特性和产量的影响鲜有报道。因此, 本试验以海南省主栽品种高系 14 为研究材料, 探究氮密运筹对甘薯生长前期光合特性、茎叶发育、干物质分配和结薯特性的影响以及收获期产量的影响, 为甘薯高产高效栽培生产技术的研究与应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

试验于 2019 年在海南省土壤总站琼海中原基地 ($19^{\circ}09'89''\text{N}$, $110^{\circ}51'27''\text{E}$) 进行。供试品种为鲜食型品种高系 14。供试土壤为沙壤土 (含沙量 50.4%), 0~30 cm 土壤基本理化性状为: pH 6.8, 有机质 1.2%, 碱解氮 52.6 mg/kg , 有效磷 9.0 mg/kg , 速效钾 80.6 mg/kg 。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 大田试验采用双因素裂区设计, 主区为种植密度 (D), D_1 : $47\ 600 \text{ 株/hm}^2$ (株距: 30 cm); D_2 : $71\ 400 \text{ 株/hm}^2$ (株距: 20 cm);

D₃: 142 900 株/hm² (株距: 10 cm)。副区为氮肥水平 (N), N₀: 不施氮肥; N₁: 施纯氮 60 kg/hm²; N₂: 施纯氮 120 kg/hm²; N₃: 施纯氮 180 kg/hm²。3 次重复, 小区面积 20 m²。2019 年 11 月 3 日种植, 同时一次性施入 P₂O₅ 120 kg/hm²、K₂O 120 kg/hm², 氮、磷、钾肥分别为尿素 (含 N 46%)、过磷酸钙 (含 P₂O₅ 12%) 和硫酸钾 (含 K₂O 50%), 2020 年 3 月 4 日收获。全生育期管理同一般大田生产。

1.2.2 指标测定 栽后茎叶封垄期, 晴天上午 9:00—11:00, 利用 Li-6400 型便携式光合作用测定仪, 测定功能叶 (茎尖第 4 片完全展开叶) 净光合速率 (P_n)、胞间 CO₂ 浓度 (C_i)、气孔导度 (G_s)、蒸腾速率 (T_r)。利用 SPAD-502 便携式叶绿素测定仪 (日本 Konica Minolta 公司生产), 测定功能叶 (茎尖第 4 片完全展开叶) 叶绿素相对含量 (SPAD) 值。每次测定 5 株取其平均值, 每小区重复 3 次。水分利用效率 (WUE) = 净光合速率 (P_n) / 蒸腾速率 (T_r)^[17]。

栽后茎叶封垄期, 每小区随机选取具有代表性植株 5 株, 分别调查甘薯地上部和地下部农艺性状。地上部农艺性状包括单株的茎叶鲜重、分枝数、最长蔓长、茎粗等; 地下部农艺性状包括块根鲜重和结薯数, 根据 WANG 等^[18]划分方式, 将块根分为不定根粗根 ($2 < \Phi \leq 5$ mm), 膨大根 ($5 < \Phi \leq 20$ mm) 和贮藏根 ($\Phi > 20$ mm), 调查后将茎叶和块根分别装入信封, 105 °C 烘箱中杀青 30 min, 晾干后, 80 °C 烘干至恒重, 称量干重并计算干物质分配比及根冠比 (R/T 值)。干物质分配比 = 植株某部位干重 / 植株总干重; R/T = 甘薯地下部干重 / 甘薯地上部干重。

栽后 120 d 收获并进行测产。根据汪宝卿等^[5]划分标准, 将块根直径达到 1.0 cm 以上且有明显膨大部位的甘薯块根为有效薯块。将所有薯块完整挖出, 记录每个试验小区的有效株数、有效薯块数量和薯块鲜重, 统计单株结薯数, 单株薯重, 单薯重和产量。另外每小区选取 5 株代表性植株, 调查块根商品性, 将具有明显膨大部位的直径 1.0 cm、单薯重 50 g 以上的薯块为商品薯。近年来在鲜薯市场交易中, 将 50~100 g 的块根为小型薯块; 100~250 g 为中型薯块; 250 g 以上为大型薯块。

1.3 数据处理

试验数据利用 Microsoft Excel 2021 和 SPSS

19.0 软件进行统计分析, 采用 Duncan's 新复极差法进行差异显著性分析, 采用 Pearson 进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同施氮量和种植密度对甘薯封垄期光合特性和 SPAD 的影响

由方差分析结果 (表 1) 可知, 种植密度对甘薯封垄期的 P_n 、 G_s 存在极显著影响, 施氮量对甘薯封垄期的 SPAD、WUE 和 P_n 、 G_s 、 T_r 、 C_i 均有显著影响, 密度和施氮量二者交互作用对甘薯 G_s 、 T_r 存在极显著作用, 对 SPAD、 P_n 、WUE 存在显著作用。随着施氮量的增加, 各处理间差异显著: 其中 SPAD 呈现逐渐增加的趋势, 其均值在 N₃ 处理达到最大; P_n 、 G_s 、 C_i 、 T_r 、WUE 均呈先增加后降低的趋势, 在 N₁ 处理时达到最大。随着种植密度的增加, 对甘薯的 SPAD 和 T_r 值的影响差异不显著; P_n 、 G_s 均呈现先增加后降低的趋势, 其均值在 D₂ 处理达到最大值; WUE 呈现先增加后降低的趋势, 其均值也在 D₂ 处理达到最大。

2.2 不同施氮量和种植密度对甘薯封垄期茎叶生长的影响

由表 2 可知, 不同的氮肥施用量对甘薯封垄期叶鲜重、茎鲜重、最长蔓长和分枝数等影响显著, 而种植密度和施氮量二者交互作用仅在叶鲜重和茎鲜重的影响差异显著。随着施氮量的增加, 茎叶鲜重、茎粗、主茎长和分枝数呈先增加后降低的趋势, 其中 N₁ 处理下, 叶鲜重、茎鲜重、茎粗、最长蔓长和分枝数均值最高, 较处理 N₀ 分别增加了 57.6%、56.9%、15.9%、29.0% 和 30.2%。随着种植密度的增加, 叶鲜重、茎鲜重和最长蔓长逐渐下降, 在 D₁ 处理下, 叶鲜重、茎鲜重、主茎长和分枝数均值较高, 较处理 D₃ 各指标分别增加了 57.6%、57.3%、25.1% 和 30.5%。

2.3 不同施氮量和种植密度对甘薯封垄期不同部位干物质积累与分配的影响

由表 3 可知, 随着施氮量的增加, 甘薯封垄期叶干重、茎干重、根干重呈先增加后降低的趋势, 其均值在 N₁ 处理下达到最大; 干物质茎叶分配比呈逐渐增加的趋势, N₃ 处理的干物质叶分配比显著高于 N₀、N₁、N₂ 处理; 干物质根分配比例和根冠比呈逐渐降低的趋势, 其均值在 N₀ 处理下达到最大。随着种植密度的增加, 甘薯封垄期叶

表 1 不同施氮量和种植密度处理下封垄期甘薯的光合特性和 SPAD 值
Tab. 1 Photosynthetic characteristics and SPAD values of sweet potato at ridge closure stage under different nitrogen application rates and planting densities

处理 Treatment		SPAD	$P_n/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	$G_s/(\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	$C_i/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	$T_r/(\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	WUE/ $(\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1})$
D ₁	N ₀	41.7±0.4 ^{cd}	12.8±0.3 ^{de}	0.3±0.0 ^{cd}	278.3±14.6 ^{bc}	4.0±0.6 ^{cd}	3.3±0.5 ^{bcd}
	N ₁	44.1±1.3 ^{abc}	17.5±1.0 ^b	0.5±0.2 ^b	294.0±12.8 ^b	5.2±0.7 ^b	3.4±0.3 ^{bcd}
	N ₂	42.6±0.6 ^{cd}	11.7±0.6 ^{ef}	0.2±0.0 ^{cd}	274.3±17.6 ^{bc}	3.4±0.4 ^{cde}	3.5±0.5 ^{abc}
	N ₃	41.7±1.1 ^{cd}	8.5±1.2 ^g	0.1±0.0 ^d	272.3±14.7 ^{bc}	3.2±0.5 ^{de}	2.7±0.4 ^d
D ₂	N ₀	42.3±1.0 ^{cd}	14.4±0.3 ^{cd}	0.3±0.0 ^c	278.7±4.2 ^{bc}	5.2±0.3 ^b	2.8±0.2 ^d
	N ₁	43.2±0.5 ^{bcd}	19.4±0.7 ^a	1.0±0.1 ^a	328.0±3.6 ^a	4.7±0.5 ^c	4.1±0.3 ^a
	N ₂	43.9±2.6 ^{abc}	15.3±0.4 ^c	0.3±0.0 ^c	282.3±8.5 ^{bc}	4.2±0.3 ^c	3.6±0.3 ^{abc}
	N ₃	45.9±2.1 ^{ab}	10.4±0.6 ^f	0.2±0.0 ^{cd}	268.3±5.7 ^c	2.8±0.1 ^e	3.7±0.2 ^{abc}
D ₃	N ₀	40.6±3.5 ^d	14.6±0.5 ^{cd}	0.3±0.1 ^{bc}	287.3±19.8 ^{bc}	4.1±0.8 ^c	3.6±0.7 ^{abc}
	N ₁	42.4±0.8 ^{cd}	19.4±1.6 ^a	1.0±0.2 ^a	330.0±2.7 ^a	7.1±0.5 ^a	2.7±0.1 ^d
	N ₂	44.3±0.5 ^{abc}	11.3±0.4 ^{ef}	0.1±0.0 ^{cd}	268.7±21.5 ^c	3.0±0.3 ^e	3.9±0.3 ^{ab}
	N ₃	46.6±1.3 ^a	10.7±2.3 ^f	0.2±0.1 ^{cd}	271.7±2.3 ^{bc}	3.5±0.7 ^{cde}	3.1±0.1 ^{cd}
P	D	ns	**	**	ns	ns	ns
	N	**	**	**	**	**	**
	D×N	*	*	**	ns	**	*

注: 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。*表示处理间差异显著 ($P<0.05$), **表示处理间差异极显著 ($P<0.01$), ns 表示差异不显著。D: 种植密度; N: 施氮量; D×N: 种植密度和施氮量互作。

Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference ($P<0.05$). * indicate significant difference among treatments ($P<0.05$), ** indicate extremely significant difference among treatments ($P<0.01$), ns indicate not significant difference among treatments. D: Planting density; N: N application rate; D×N: Planting density and N application rate interaction.

表 2 不同施氮量和种植密度处理下封垄期甘薯的单株茎叶生长
Tab. 2 Stem and leaf growth of sweetpotato at ridge sealing stage under different nitrogen application rates and planting densities

处理 Treatment		叶鲜重 Leaf fresh weight/g	茎鲜重 Stem fresh weight/g	茎粗 Stem diameter/mm	最长蔓长 Longest vine length/cm	分枝数 Number of branching
D ₁	N ₀	91.8±9.7 ^{cd}	23.5±4.9 ^{cd}	7.0±0.8 ^{abc}	25.5±0.7 ^{cde}	4.7±0.6 ^{bcd}
	N ₁	181.6±8.6 ^{ab}	49.4±10.2 ^{ab}	8.4±1.1 ^a	44.1±5.9 ^a	7.7±1.5 ^a
	N ₂	206.1±43.3 ^a	55.7±12.1 ^{ab}	8.0±0.8 ^{ab}	39.8±0.4 ^{ab}	5.7±1.5 ^{bc}
	N ₃	184.0±61.0 ^{ab}	61.2±14.6 ^a	6.3±0.7 ^{bc}	40.4±3.0 ^{ab}	6.0±0.0 ^{ab}
D ₂	N ₀	64.0±8.4 ^{cd}	15.1±2.1 ^{cd}	6.3±0.8 ^{bc}	22.8±3.6 ^e	4.0±0.0 ^{cd}
	N ₁	209.6±76.8 ^a	46.8±5.3 ^b	7.9±0.6 ^{ab}	31.9±0.5 ^{cd}	6.0±1.0 ^{ab}
	N ₂	112.2±23.5 ^c	28.4±2.2 ^c	5.9±0.5 ^c	33.6±2.8 ^{bc}	5.7±1.5 ^{bc}
	N ₃	122.1±21.5 ^{bc}	24.7±3.7 ^{cd}	7.2±0.9 ^{abc}	30.0±5.4 ^{cde}	5.0±0.0 ^{bcd}
D ₃	N ₀	44.8±12.9 ^d	12.5±4.8 ^d	6.9±1.5 ^{abc}	26.7±9.1 ^{cde}	3.7±0.6 ^d
	N ₁	81.3±29.8 ^{cd}	22.5±6.2 ^{cd}	7.7±1.4 ^{ab}	29.6±4.9 ^{cde}	4.0±1.0 ^{cd}
	N ₂	89.9±16.9 ^{cd}	22.7±2.4 ^{cd}	6.8±0.3 ^{abc}	30.9±3.2 ^{cde}	4.0±0.0 ^{cd}
	N ₃	92.6±26.8 ^{cd}	23.3±4.5 ^{cd}	6.9±0.5 ^{abc}	25.0±3.0 ^{de}	5.0±1.0 ^{bcd}
P	D	**	**	ns	**	**
	N	**	**	*	**	**
	D×N	*	**	ns	ns	ns

注: 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。*表示处理间差异显著 ($P<0.05$), **表示处理间差异极显著 ($P<0.01$), ns 表示差异不显著。D: 种植密度; N: 施氮量; D×N: 种植密度和施氮量互作。

Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference ($P<0.05$). * indicate significant difference among treatments ($P<0.05$), ** indicate extremely significant difference among treatments ($P<0.01$), ns indicate not significant difference among treatments. D: Planting density; N: N application rate; D×N: Planting density and N application rate interaction.

表 3 不同施氮量和种植密度处理下的封垄期甘薯干物质积累与分配
Tab. 3 Dry matter accumulation and distribution of sweetpotato under different nitrogen application and planting density treatments at ridge closure stage

处理 Treatment		干重 Dry weigh/(g·plant ⁻¹)			干物质分配比 Dry matter distribution ratio			根冠比
		叶 Leaf	茎 Steam	根 Root	叶 Leaf	茎 Steam	根 Root	Root-top ratio (R/T)
D ₁	N ₀	11.6±0.4 ^{cd}	3.7±0.4 ^e	30.5±5.2 ^{ab}	0.3±0.0 ^e	0.1±0.0 ^e	0.7±0.0 ^{ab}	2.0±0.1 ^a
	N ₁	20.3±1.2 ^b	5.8±0.8 ^c	31.3±8.0 ^{bc}	0.4±0.1 ^{bc}	0.1±0.0 ^{bc}	0.5±0.1 ^{de}	1.0±0.4 ^{cd}
	N ₂	20.8±2.2 ^b	7.2±1.4 ^a	51.8±3.6 ^a	0.3±0.0 ^e	0.1±0.0 ^{bcd}	0.7±0.0 ^{abc}	1.9±0.3 ^{ab}
	N ₃	25.8±1.1 ^a	6.9±0.7 ^{ab}	9.6±0.7 ^f	0.6±0.0 ^a	0.2±0.0 ^a	0.2±0.0 ^f	0.3±0.0 ^e
D ₂	N ₀	8.3±1.1 ^d	2.4±0.0 ^c	19.5±1.1 ^{de}	0.3±0.0 ^{de}	0.1±0.0 ^{cde}	0.7±0.0 ^{abc}	1.8±0.1 ^{ab}
	N ₁	19.4±4.2 ^b	6.2±0.1 ^e	37.8±3.8 ^b	0.3±0.1 ^{cde}	0.1±0.0 ^{bc}	0.6±0.1 ^{bcd}	1.5±0.3 ^{bc}
	N ₂	12.8±2.3 ^c	3.6±0.0 ^d	22.0±7.5 ^d	0.3±0.0 ^{cd}	0.1±0.0 ^{bc}	0.6±0.1 ^{cd}	1.3±0.3 ^{cd}
	N ₃	12.5±0.3 ^c	3.0±0.2 ^{de}	21.0±6.7 ^d	0.4±0.1 ^{bc}	0.1±0.0 ^{bcd}	0.6±0.1 ^{cd}	1.4±0.4 ^{cd}
D ₃	N ₀	4.6±0.0 ^e	1.5±0.1 ^f	12.6±1.0 ^{ef}	0.2±0.0 ^e	0.1±0.0 ^{cde}	0.7±0.0 ^{ab}	2.1±0.2 ^a
	N ₁	9.0±2.7 ^d	2.5±0.1 ^e	24.8±1.4 ^{cd}	0.3±0.1 ^e	0.1±0.0 ^{de}	0.7±0.1 ^a	2.2±0.5 ^a
	N ₂	9.8±1.1 ^{cd}	2.7±0.1 ^e	10.7±0.4 ^f	0.4±0.0 ^b	0.1±0.0 ^b	0.5±0.0 ^e	0.9±0.1 ^d
	N ₃	8.2±0.8 ^d	3.7±0.2 ^d	10.8±0.6 ^f	0.4±0.0 ^{bc}	0.2±0.0 ^a	0.5±0.0 ^e	0.9±0.1 ^d
P	D	**	**	**	**	ns	**	ns
	N	**	**	**	**	**	**	**
	D×N	**	**	**	**	**	**	**

注：同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。**表示处理间差异极显著（ $P<0.01$ ），ns 表示差异不显著。D：种植密度；N：施氮量；D×N：种植密度和施氮量互作。
Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference ($P<0.05$). ** indicate extremely significant difference among treatments ($P<0.01$), ns indicate not significant difference among treatments. D: Planting density; N: N application rate; D×N: Planting density and N application rate interaction.

干重、茎干重、根干重、干物质叶分配比均呈逐渐减少的趋势，其均值在 D₁ 处理下均值达到最大且显著高于 D₂、D₃ 处理；干物质茎分配比呈逐渐增加的趋势，其均值在 D₃ 处理下最大；干物质根分配比例呈先增加后降低的趋势，其均值在 D₂ 处理达到最大且显著高于 D₁ 处理，但 D₂ 与 D₃ 处理间无显著差异；根冠比呈逐渐增加的趋势，其均值在 D₃ 处理下达到最大。由此可见，在本试验条件下，不同的种植密度对甘薯封垄期叶干重、茎干重、根干重、干物质叶分配比和干物质根分配比有显著影响，施氮量以及种植密度和施氮量二者交互作用均对甘薯封垄期叶干重、茎干重、根干重、干物质叶分配比、干物质茎分配比、干物质根分配比、根冠比有显著影响。

2.4 不同施氮量和种植密度对甘薯封垄期结薯特性的影响

由表 4 可知，随着施氮量的增加，甘薯封垄期的块根直径、贮藏根、单株薯重、单株结薯数和单薯重呈先增加后下降的趋势，其中块根直径、贮藏根、单株薯重、单株结薯数均值在 N₁ 处理达

到最大，单薯重均值在 N₂ 处理达到最大；膨大根呈逐渐降低的趋势。随着种植密度的增加，甘薯封垄期的块根直径、单株薯重、单株结薯数和单薯重逐渐降低，其均值均在 D₁ 处理下最大；膨大根呈现先降低后增加的趋势，其均值在 D₃ 处理下最大；贮藏根呈先增加后降低的趋势，其均值在 D₂ 处理下最大。施氮量以及施氮量和种植密度二者交互作用对单株结薯数有显著影响。施氮量对甘薯封垄期结薯特性的影响高于种植密度。

2.5 不同施氮量和种植密度对甘薯收获期产量及其构成因素的影响

由收获期整个试验小区调查与统计分析结果可知（表 5），随着施氮量的增加，甘薯单株结薯数和产量均呈先增加后降低的趋势，单株结薯数的均值在 N₁ 时达到最大，较 N₀ 时增加了 19.2%；甘薯产量均值在 N₂ 时达到最大，较 N₀ 增加了 32.0%。随着种植密度的增加，甘薯单株结薯数、单株薯重和单薯重呈逐渐降低的趋势，其均值均在 D₁ 处理时达到最大，较 D₃ 增加了 20.6%、46.7% 和 33.2%；甘薯产量呈逐渐增加的趋势，其均值

表 4 不同施氮量和种植密度处理下的甘薯封垄期结薯特性

Tab. 4 Characteristics of sweetpotato in ridge-closing period under different nitrogen application rates and planting densities

处理 Treatment	块根直径 Storage root diameter/mm	径级分布 Root diameter distribution		单株薯重 Single plant yield/g	单株结薯数 Single storage root numbers	单薯重 Single root weight/g
		5~20 mm	>20 mm			
D ₁	N ₀	19.0±2.1 ^{ab}	4.0±1.7 ^{ab}	1.7±0.6 ^{ab}	124.3±21.1 ^{ab}	6.3±2.3 ^a
	N ₁	21.9±6.4 ^a	1.7±1.5 ^{bc}	1.3±0.6 ^{ab}	98.8±51.7 ^{ab}	3.0±1.0 ^c
	N ₂	20.8±4.8 ^{ab}	1.3±1.2 ^{bc}	2.0±1.7 ^{ab}	144.4±105.5 ^a	3.3±1.5 ^c
	N ₃	18.0±0.8 ^{ab}	2.3±0.6 ^{abc}	0.7±0.6 ^b	55.6±24.3 ^{ab}	3.0±1.0 ^c
D ₂	N ₀	20.1±1.7 ^{ab}	2.3±1.5 ^{abc}	1.3±0.6 ^{ab}	63.4±35.3 ^{ab}	3.3±1.5 ^c
	N ₁	22.2±1.7 ^a	2.0±1.0 ^{abc}	2.7±0.6 ^a	145.5±44.4 ^a	4.7±1.5 ^{abc}
	N ₂	17.8±2.3 ^{ab}	3.0±1.0 ^{abc}	1.0±0.0 ^{ab}	67.6±62.0 ^{ab}	4.0±1.0 ^{abc}
	N ₃	18.5±2.8 ^{ab}	1.3±0.6 ^{bc}	1.7±1.2 ^{ab}	73.0±48.4 ^{ab}	3.0±1.0 ^c
D ₃	N ₀	15.3±0.6 ^b	2.3±2.1 ^{abc}	1.3±0.6 ^{ab}	59.3±14.0 ^{ab}	3.7±1.5 ^{bc}
	N ₁	17.1±0.2 ^{ab}	4.7±2.1 ^a	1.0±1.0 ^{ab}	74.7±27.6 ^{ab}	6.0±1.0 ^{ab}
	N ₂	17.1±3.3 ^{ab}	2.3±1.2 ^{abc}	0.7±0.6 ^b	48.8±15.3 ^b	2.7±0.6 ^c
	N ₃	18.9±5.8 ^{ab}	1.0±1.7 ^c	1.3±1.2 ^{ab}	47.2±2.8 ^b	2.3±0.6 ^c
P	D	ns	ns	ns	ns	ns
	N	ns	ns	ns	*	ns
	D×N	ns	ns	ns	*	ns

注：同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。*表示处理间差异显著 ($P<0.05$)，ns 表示差异不显著。D：种植密度；N：施氮量；D×N：种植密度和施氮量互作。

Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference ($P<0.05$). * indicate significant difference among treatments ($P<0.05$), ns indicate not significant difference among treatments. D: Planting density; N: N application rate; D×N: Planting density and N application rate interaction.

表 5 不同施氮量和种植密度处理下的甘薯收获期产量及其构成因素

Tab. 5 Yield and its components of sweet potato at harvest under different nitrogen application rates and planting densities

处理 Treatment	单株结薯数 Storage root numbers per plant	单株薯重 Root weight per plant/g	单薯重 Single root weight/g	产量 Root yield/(t·hm ⁻²)
D ₁	N ₀	4.7±0.6 ^{ab}	271.2±109.2 ^{bcde}	60.8±32.8 ^{ab}
	N ₁	5.7±0.6 ^a	327.0±63.1 ^{abc}	57.6±7.6 ^{ab}
	N ₂	5.7±0.6 ^a	381.4±101.8 ^{ab}	68.4±22.0 ^{ab}
	N ₃	5.0±1.0 ^{ab}	428.6±112.0 ^a	88.8±29.6 ^a
D ₂	N ₀	4.0±1.0 ^b	229.3±24.0 ^{cde}	58.8±8.8 ^{ab}
	N ₁	5.3±0.6 ^a	283.8±21.3 ^{bcde}	53.4±3.4 ^b
	N ₂	5.0±0.0 ^{ab}	276.5±81.6 ^{bcde}	55.3±16.3 ^{ab}
	N ₃	4.7±0.6 ^{ab}	293.7±76.6 ^{bcd}	63.9±19.1 ^{ab}
D ₃	N ₀	4.0±0.0 ^b	150.3±5.7 ^c	37.6±1.4 ^b
	N ₁	4.7±0.6 ^{ab}	189.9±6.1 ^{de}	41.1±5.6 ^b
	N ₂	4.0±1.0 ^b	235.7±33.1 ^{cde}	61.5±18.8 ^{ab}
	N ₃	4.0±0.0 ^b	175.3±68.7 ^{de}	43.8±17.2 ^b
P	D	**	**	*
	N	*	ns	ns
	D×N	ns	ns	ns

注：同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。*表示处理间差异显著 ($P<0.05$)，**表示处理间差异极显著 ($P<0.01$)，ns 表示差异不显著。D：种植密度；N：施氮量；D×N：种植密度和施氮量互作。

Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference ($P<0.05$). * indicate significant difference among treatments ($P<0.05$), ** indicate extremely significant difference among treatments ($P<0.01$), ns indicate not significant difference among treatments. D: Planting density; N: N application rate; D×N: Planting density and N application rate interaction.

在 D₃ 处理时达到最大。种植密度对甘薯单株结薯数、单株薯重、单薯重和产量达到显著影响，施氮量对甘薯单株结薯数和产量达到显著影响，种植密度和施氮量二者交互作用对其影响均不显著。综合产量结果分析，甘薯产量在 D₃N₁ 时最大，达到 30.1 t/hm²；在 D₁N₀ 时最低，仅 12.8 t/hm²。

2.6 不同施氮量和种植密度对甘薯收获期块根商品性的影响

试验小区 5 株代表性植株商品薯调查结果见表 6。由表 6 可知，随着施氮量的增加，甘薯单薯重呈先增加后降低的趋势，其均值在 N₁ 时达到最大，N₀ 时最小；甘薯小型薯率呈先降低后增加

的趋势，其均值在 N₀ 时达到最大；甘薯大中型薯率呈现先增加后降低的趋势，其均值在 N₁ 处理最大，在 N₀ 处理时最小。随着种植密度的增加，甘薯单株薯重、单株结薯数呈逐渐降低的趋势，其均值均在 D₁ 处理时达到最大，在 D₃ 处理时最小；甘薯小型薯率呈先降低后增加的趋势，其均值在 D₃ 处理时达到最大；甘薯大中型薯率呈现先增加后降低的趋势，其均值在 D₂ 处理时达到最大。种植密度对甘薯单株薯重、单株商品结薯数有显著影响，施氮量对甘薯单薯重有显著影响。综合商品率的结果分析，甘薯商品率在 D₃N₁ 时最大，达到 94.3%；在 D₃N₀ 时最低，达到 43.0%。

表 6 不同施氮量和种植密度处理下的甘薯收获期块根商品性
Tab. 6 Commodity of sweet potato root at harvest stage under different nitrogen application and planting density treatments

处理 Treatment		单株薯重 Single plant yield/g	单薯重 Single root weight/g	单株商品结薯数 Commercial storage root numbers	小型薯率 Small potato rate/%	大中型薯率 Large and medium size rate/%	商品率 Commodity rate/%
D ₁	N ₀	275.1±73.3 ^{abcd}	91.7±24.4 ^{abc}	3.0±0.0 ^{ab}	67.0±0.0 ^{ab}	33.0±0.0 ^{ab}	90.7±2.6 ^a
	N ₁	348.8±79.1 ^{abc}	104.6±17.2 ^{abc}	3.3±0.6 ^a	69.7±4.6 ^{ab}	30.3±4.6 ^{ab}	69.3±1.1 ^{ab}
	N ₂	358.0±108.9 ^{ab}	140.1±5.2 ^{ab}	2.3±0.6 ^{abc}	61.0±3.5 ^{ab}	39.0±3.5 ^{ab}	67.0±1.5 ^{ab}
	N ₃	411.8±122.4 ^a	122.0±15.8 ^{abc}	3.3±0.6 ^a	41.7±2.2 ^b	58.3±2.2 ^a	81.7±1.6 ^{ab}
D ₂	N ₀	218.6±70.6 ^{bcde}	92.7±8.3 ^{abc}	2.0±1.0 ^{bc}	72.3±2.5 ^{ab}	27.7±2.5 ^{ab}	77.0±1.4 ^{ab}
	N ₁	213.2±36.2 ^{bcde}	116.2±7.1 ^{abc}	2.0±0.0 ^{bc}	33.3±2.9 ^b	66.7±2.9 ^b	74.3±1.2 ^{ab}
	N ₂	243.6±99.0 ^{abcde}	148.1±33.9 ^a	1.7±0.6 ^c	33.3±2.9 ^b	66.7±2.9 ^b	63.3±1.6 ^{ab}
	N ₃	296.7±101.6 ^{abcd}	91.6±1.2 ^{abc}	3.0±1.0 ^{ab}	52.7±2.1 ^{ab}	47.3±2.1 ^{ab}	73.0±1.0 ^{ab}
D ₃	N ₀	81.8±48.8 ^c	58.8±9.4 ^c	1.3±0.6 ^c	100.0±0.0 ^a	0.0±0.0 ^b	43.0±6.6 ^b
	N ₁	169.1±172.0 ^{cde}	126.8±45.1 ^{ab}	1.3±1.2 ^c	50.0±0.0 ^{ab}	50.0±0.0 ^{ab}	94.3±1.9 ^a
	N ₂	154.0±87.6 ^{de}	124.9±91.6 ^{ab}	1.3±0.6 ^c	66.7±5.8 ^{ab}	33.3±5.7 ^{ab}	70.0±4.9 ^{ab}
	N ₃	111.0±84.7 ^{de}	76.3±25.4 ^{bc}	1.3±0.6 ^c	83.3±2.9 ^{ab}	16.7±2.9 ^{ab}	46.3±1.5 ^b
P	D	**	ns	**	ns	ns	ns
	N	ns	*	ns	ns	ns	ns
	D×N	ns	ns	ns	ns	ns	ns

注：同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 (P<0.05)。*表示处理间差异显著 (P<0.05)，**表示处理间差异极显著 (P<0.01)，ns 表示差异不显著。D：种植密度；N：施氮量；D×N：种植密度和施氮量互作。
Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference (P<0.05). * indicate significant difference among treatments (P<0.05), ** indicate extremely significant difference among treatments (P<0.01), ns indicate not significant difference among treatments. D: Planting density; N: N application rate; D×N: Planting density and N application rate interaction.

2.7 施氮量和种植密度与甘薯农艺性状的相关性分析

对甘薯施氮量、种植密度及农艺性状进行 Pearson 相关性分析(表 7)可见，施氮量与 SPAD、干物质叶分配比、干物质茎分配比和收获期产量均呈极显著正相关，相关系数分别为 0.520、0.629、0.670 和 0.489；与茎鲜重、叶干重和茎干重均呈显著正相关，相关系数分别为 0.359、0.354 和 0.388；与净光合速率和根干物质分配比呈极显

著负相关，相关系数分别为-0.576 和-0.667。种植密度与收获期产量呈极显著正相关，相关系数为 0.704；与叶鲜重、茎鲜重、主茎长、分枝数、叶干重、茎干重和根干重均呈极显著负相关，相关系数分别为-0.574、-0.593、-0.447、-0.541、-0.712、0.601 和-0.521。净光合速率与根干重呈显著正相关，与干物质根分配比呈极显著正相关，相关系数分别为 0.353 和 0.523，说明提高光合速率有利于块根干物质积累与分配，促进块根形成。

表 7 施氮量和种植密度与甘薯农艺性状的相关性分析

Tab. 7 Correlation analysis of nitrogen application rate and planting density with agronomic traits of sweet potato

项目 Item	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆
X ₁	1.000															
X ₂	0.000	1.000														
X ₃	0.097	-0.576**	1.000													
X ₄	0.121	0.520**	-0.177	1.000												
X ₅	-0.574**	0.319	0.049	0.122	1.000											
X ₆	-0.593**	0.359*	-0.073	0.035	0.901**	1.000										
X ₇	-0.081	-0.091	0.338*	0.191	0.362*	0.355*	1.000									
X ₈	-0.447**	0.307	0.004	-0.076	0.628**	0.722**	0.188	1.000								
X ₉	-0.541**	0.239	0.114	0.128	0.649**	0.643**	0.306	0.612**	1.000							
X ₁₀	-0.712**	0.354*	-0.110	-0.008	0.862**	0.933**	0.253	0.722**	0.661**	1.000						
X ₁₁	-0.601**	0.388*	-0.072	0.028	0.871**	0.933**	0.329*	0.666**	0.625**	0.904**	1.000					
X ₁₂	-0.521**	-0.216	0.353*	-0.075	0.552**	0.421*	0.433**	0.310	0.348*	0.410*	0.470**	1.000				
X ₁₃	-0.175	0.629**	-0.516**	0.122	0.313	0.477**	-0.176	0.418*	0.298	0.550**	0.417*	-0.504**	1.000			
X ₁₄	0.080	0.670**	-0.440**	0.271	0.229	0.367*	-0.113	0.222	0.233	0.293	0.454**	-0.482**	0.733**	1.000		
X ₁₅	0.108	-0.667**	0.523**	-0.160	-0.300	-0.467**	0.167	-0.384*	-0.293	-0.505**	-0.438**	0.534**	-0.985**	-0.838**	1.000	
X ₁₆	0.704**	0.489**	0.022	0.337*	-0.124	-0.152	0.023	0.073	-0.135	-0.228	-0.181	-0.324	0.140	0.255	-0.184	1.000

注：X₁~X₁₆ 分别代表种植密度、施氮量、P_n、SPAD、叶鲜重、茎鲜重、茎粗、主茎长、分枝数、叶干重、茎干重、根干重、干物质叶分配比、干物质茎分配比、干物质根分配比、收获期产量。*表示处理间差异显著 (P<0.05)，**表示处理间差异极显著 (P<0.01)。

Note: X₁~X₁₆ represent planting density, nitrogen application rate, net photosynthetic rate (P_n), SPAD, leaf fresh weight, stem fresh weight, stem diameter, main stem length, branch number, leaf dry weight, stem dry weight, root dry weight, dry matter leaf distribution ratio, dry matter stem distribution ratio, dry matter root distribution ratio, yield at harvest. * indicate significant difference among treatments (P<0.05), ** indicate extremely significant difference among treatments (P<0.01).

甘薯干物质根分配比和产量与叶鲜重、茎鲜重、分枝数、叶干重、茎干重均呈负相关关系，表明甘薯地上部旺盛生长不利于干物质向块根转运和块根产量的形成。

3 讨论

3.1 施氮量和种植密度处理对甘薯干物质分配的影响

地上部茎蔓和地下部块根的协调生长是甘薯取得高产的关键，而氮肥对茎蔓的生长和块根的形成以及二者的协调生长有较大的影响^[19]。研究表明，适量施氮可增加甘薯叶片净光合速率和叶绿素含量，促进地上部快速生长，保障干物质生产及其合理分配，从而提高块根产量^[20]。本研究中，适当增施氮肥（60 kg/hm²）可以促进甘薯 SPAD 和净光合速率，增加茎叶鲜重、茎粗、最长蔓长和分枝数，从而促进地上部“源”的建成，为干物质合成奠定基础，而继续提高氮肥施用量则抑制甘薯茎叶生长，这与窦怀良等^[21]部分研究结果相一致。水肥运筹与干物质和氮素的吸收、转移及分配有着紧密联系且存在显著交互作用^[22-23]。

本研究还发现，施纯氮量为 60 kg/hm²时有助于单株干物质积累，促进干物质向地下部分配，有效提高甘薯产量。适量施氮明显提高土壤有效水分的利用、作物的蒸腾效率 and 水分利用效率^[24]。本研究表明，适宜的氮密处理能够提高甘薯对土壤水分的利用，D₂N₁ 处理的水分利用效率最高，与不施氮肥低密度（D₁N₀）相比增加了 21.3%，这是由于适量施肥能够提高作物的渗透调节能力，显著抑制甘薯叶片蒸腾失水，并且促进甘薯冠层发育，增加了蒸腾量，减少了蒸发量，使水分利用效率显著提高。也证实了适量施氮使甘薯地上部分生长前期快速生长，提高群体光合性能，保障干物质生产及其合理分配，从而提高块根产量^[25-26]。

甘薯是以收获块根为目的的作物，甘薯地上部茎叶不断制造和运输光合产物，形成了甘薯的“源”，地下部块根积累碳水化合物，即为甘薯的“库”，而合理的栽植密度是提高库容的前提^[15]。研究表明，增加种植密度，提高“库”容，才能承接更多地上部合成的光合产物，然而密度过高会使甘薯的根系受到抑制，薯块变小，不利于提高产量^[27-28]。本研究中，随着种植密度的增加，

叶片净光合速率先增加后降低, 植株间生长紧凑, 通风透光不良, 造成最长蔓长、茎叶干鲜重呈降低趋势, 但同时块根干物质分配比、根冠比和产量逐渐增加。这表明, 在一定范围内, 随着种植密度的增加, 植株冠层结构较为合理, 光合产物向地下部的分配比例增加, 为甘薯后期块根膨大提供较多的光合产物。这与宁运旺等^[9]的部分研究结果一致。

3.2 施氮量和种植密度互作对甘薯产量和商品性的影响

甘薯块根的产量由种植密度、单株结薯数和单株薯重3个要素构成, 在种植密度一定时, 单株结薯数对产量的影响最大^[2]。已有研究表明, 增施氮肥可以提高甘薯干物质生产能力和块根产量, 施氮过高会延迟结薯, 导致地上部旺盛, 块根产量降低^[29]; 增加种植密度可以提高甘薯块根膨大过程中光合产物的转运能力, 提高光合产物向块根中的分配比率, 促进块根膨大, 从而增加甘薯单株结薯数和商品薯率, 提高甘薯块根产量^[30-31]。本研究发现, 高系14的单株结薯数随着氮肥施用量的增加呈现先提高后降低的趋势, N_1 较 N_0 处理增加了19.2%; 增加种植密度显著降低甘薯单株结薯数、单株薯重和单薯重。当施氮量为 60 kg/hm^2 和种植密度为 $142\ 900\text{ 株/hm}^2$ 处理(D_3N_1)时, 高系14的产量及商品性均达到最大。这与杜祥备等^[32]、刘明等^[11]的部分研究结果相一致。

甘薯块根的大小、长度、直径、整齐度等与其外观品质密切相关, 而块根的外观品质是影响鲜食型甘薯市场认可度的重要因素^[33]。研究表明, 甘薯结薯数多的品种, 小型和大型薯块的比例较低, 中型薯块的比例较高, 块根的外观商品性较好^[34]。本研究发现, 在一定范围内, 适当增施氮肥(60 kg/hm^2)增加甘薯收获期的单株结薯数和大中型薯率, 但随着种植密度的增加, 地下部因为竞争空间和营养, 甘薯单薯重呈逐渐降低的趋势, 而在本研究中, 将具有明显膨大部位的直径 1.0 cm 、单薯重 50 g 以上的薯块定义为商品薯, 因此种植密度增加与单株商品薯较低呈负相关关系, 即随着种植密度增加, 单株非商品薯数量也增加。虽然 D_3 处理种植密度单株商品薯数量较小, 但是其种植株数较多, 因此其商品薯产量仍然较高。

4 结论

综上所述, 当施氮量为 60 kg/hm^2 、种植密度为 $142\ 900\text{ 株/hm}^2$ 处理(D_3N_1)时, 高系14的产量最高。相关性分析表明, 种植密度对产量的相关系数高于施氮量。适宜的氮密处理可改善甘薯封垄期光合特性, 有利于源端光合碳转化和分配, 促进块根干物质积累, 提高根冠比, 促进甘薯块根形成, 增加了块根数量, 提高甘薯块根产量和改善块根商品性, 为甘薯高效生产奠定基础。

参考文献

- [1] 王欣, 李强, 曹清河, 马代夫. 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.
WANG X, LI Q, CAO Q H, MA D F. Current status and future prospective of sweetpotato production and seed industry in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(3): 483-492. (in Chinese)
- [2] 孙哲, 刘桂玲, 郑建利, 田昌庚, 赵丰玲. 优化种植密度下的甘薯产量形成特性研究[J]. 山东农业科学, 2016, 48(11): 61-64.
SUN Z, LIU G L, ZHENG J L, TIAN C G, ZHAO F L. Yield formation characteristics of sweetpotato under optimized plant density[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2016, 48(11): 61-64. (in Chinese)
- [3] SI C C, SHI C Y, LIU H J, ZHAN X D, LIU Y C, WANG D D, MENG D, TANG L X. Influence of two nitrogen forms on hormone metabolism in potential storage roots and storage root number of sweetpotato[J]. Crop Science, 2018, 58(6): 2558-2568.
- [4] SI C C, LIANG Q G, LIU H J, WANG N, KUMAR S, CHEN Y L, ZHU G P. Response mechanism of endogenous hormones of potential storage root to phosphorus and its relationship with yield and appearance quality of sweetpotato[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 872422.
- [5] 汪宝卿, 杜召海, 张海燕, 解备涛, 王庆美, 张立明. 甘薯根系生物学性状的相关性、主成分和灰色关联度分析[J]. 中国农学通报, 2014, 30(21): 106-112.
WANG B Q, DU Z H, ZHANG H Y, XIE B T, WANG Q M, ZHANG L M. Correlation, principal component and grey relation analysis of sweetpotato roots on biological traits[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(21): 106-112. (in Chinese)
- [6] 梁清干, 陈艳丽, 刘永华, 王建伟, 王宁, 曾丽萍, 朱国鹏, 司成成. 磷素对甘薯生长前期源库关系建立和平衡的影响[J]. 热带作物学报, 2021, 42(10): 2915-2923.
LIANG Q G, CHEN Y L, LIU Y H, WANG J W, WANG N,

- ZENG L P, ZHU G P, SI C C. Effects of phosphorus application on the establishment of source-sink balance at the initial stage of sweetpotato root development[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2021, 42(10): 2915-2923. (in Chinese)
- [7] KIM S H, MIZUNO K, SAWADA S, FUJIMUAR T. Regulation of tuber formation and ADP-glucose pyrophosphorylase (AGPase) in sweetpotato [*Ipomoea batatas* (L.) Lam.] by nitrate[J]. Plant Growth Regul, 2002, 37(3): 207-213.
- [8] BALIGAR V C, FAGERIA N K, HE Z. Nutrient use efficiency in plants[J]. Communications in Soil Science & Plant Analysis, 2001, 32(7/8): 921-950
- [9] 宁运旺, 马洪波, 张辉, 汪吉东, 许仙菊, 张永春. 甘薯源库关系建立、发展和平衡对氮肥用量的响应[J]. 作物学报, 2015, 41(3): 432-439.
- NING Y W, MA H B, ZHANG H, WANG J D, XU X J, ZHANG Y C. Response of sweetpotato in source-sink relationship establishment, expanding, and balance to nitrogen application rates[J]. Acta Agronomica Sinica, 2015, 41(3): 432-439. (in Chinese)
- [10] 蒋强, 康亮, 张晓, 姚一华, 梁琼月, 顾明华, 何冰. 不同施氮水平对木薯源库关系的影响[J]. 西南农业学报, 2016, 29(9): 2162-2166.
- JIANG Q, KANG L, ZHANG X, YAO Y H, LIANG Q Y, GU M H, HE B. Effects of nitrogen level on source-sink relationship of cassava[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2016, 29(9): 2162-2166. (in Chinese)
- [11] 刘明, 李洪民, 张爱君, 陈晓光, 靳容, 蒋薇, 唐忠厚. 不同氮肥与密度水平对鲜食甘薯产量和品质的影响[J]. 华北农学报, 2020, 35(1): 122-130.
- LIU M, LI H M, ZHANG A J, CHEN X G, JIN R, JIANG W, TANG Z H. Effects of nitrogen fertilizer and density on yield and quality of fresh edible type sweetpotato[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2020, 35(1): 122-130. (in Chinese)
- [12] 韩美坤, 刘兰服, 胡亚亚, 高志远, 焦伟静, 田晴, 马志民. 不同栽植措施对冀薯 332 叶片光合特性及产量的影响[J]. 江苏师范大学学报(自然科学版), 2020, 38(1): 37-41.
- HAN M K, LIU L F, HU Y Y, GAO Z Y, JIAO W J, TIAN Q, MA Z M. Effect of different cultivation measures on photosynthetic characteristics and yield of sweetpotato Jishu 332[J]. Journal of Jiangsu Normal University (Natural Science Edition), 2020, 38(1): 37-41. (in Chinese)
- [13] ZHANG H Y, XIE B T, WANG B Q, WANG Q M, DONG S X, LI A X, HOU F Y, DUAN W X, ZHANG L M. Effects of planting density on yield and source-sink characteristics of sweetpotato [*Ipomoea batatas* (L.) Lam.][J]. Agricultural Science & Technology, 2015, 16(8): 1628-1633, 1642
- [14] 闫会, 李强, 张允刚, 后猛, 唐维, 王欣, 刘亚菊, 马代夫. 基因型和栽插密度对甘薯农艺性状及结薯习性的影响[J]. 西南农业学报, 2017, 30(8): 1739-1745.
- YAN H, LI Q, ZHANG Y G, HOU M, TANG W, WANG X, LIU Y J, MA D F. Effects of genotype and planting density on agronomic traits and storage root of sweetpotato[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2017, 30(8): 1739-1745. (in Chinese)
- [15] 吴海云, 侯松, 刘庆, 李欢. 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.
- WU H Y, HOU S, LIU Q, LI H. Effect of nitrogen application rate and planting density on population development and yield production of sweetpotato[J]. Journal of Jiangsu Normal University (Natural Science Edition), 2019, 37(1): 35-39. (in Chinese)
- [16] ACRECHE M M, BRICEÑO-FÉLIX G, SÁNCHEZ J A M, SLAFER G A. Radiation interception and use efficiency as affected by breeding in Mediterranean wheat[J]. Field Crops Research, 2009, 110(2): 91-97.
- [17] 于贵瑞, 王秋凤. 植物光合、蒸腾与水分利用的生理生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- YU G R, WANG Q F. Ecophysiology of plant photosynthesis, transpiration, and water use[M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese)
- [18] WANG H, YANG J, ZHANG M, FAN W, ZHANG P. Altered phenylpropanoid metabolism in the maize Lc-expressed sweetpotato (*Ipomoea batatas*) affects storage root development[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 18645.
- [19] 贾赵东, 马佩勇, 边小峰, 郭小丁, 谢一芝. 氮钾配施和栽插密度对甘薯干物质积累及产量形成的影响[J]. 华北农学报, 2012, 27(增刊 1): 320-327.
- JIA Z D, MA P Y, BIAN X F, GUO X D, XIE Y Z. The effects of different N and K fertilizer ratio and planting density on yield and dry matter accumulation of sweetpotato[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2012, 27(Suppl. 1): 320-327. (in Chinese)
- [20] LONG S P, ZHU X G, NAIDU S L, ORT D R. Can improvement in photosynthesis increase crop yields?[J]. Plant Cell & Environment, 2010, 29(3): 315-330.
- [21] 窦怀良, 史衍玺, 刘庆, 李欢. 不同土壤肥力水平下施氮对甘薯产量与氮肥利用率的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(4): 235-240.
- DOU H L, SHI Y X, LIU Q, LI H. Effects of nitrogen application on yield and nitrogen use efficiency of sweetpotato under different soil fertility[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(4): 235-240. (in Chinese)
- [22] 李玉斌, 马忠明. 水氮互作对膜下滴灌玉米产量及水氮利

- 用的影响[J]. 玉米科学, 2018, 26(2): 102-109.
- LI Y B, MA Z M. Effect of irrigation and nitrogen amount on yield, water and nitrogen use efficiency of maize under plastic mulched drip irrigation[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2018, 26(2): 102-109. (in Chinese)
- [23] 姜小凤, 郭建国, 董博, 郭天文, 王淑英. 水氮互作对旱地春小麦氮肥利用效率和经济产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2018, 38(9): 1105-1111.
- JIANG X F, GUO J G, DONG B, GUO T W, WANG S Y. Effect of interaction between water and nitrogen utilization efficiency and economic yield of spring wheat in dryland region[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2018, 38(9): 1105-1111. (in Chinese)
- [24] YANG K J, WANG F X, CLINTON C S. Potato performance as influenced by the proportion of wetted soil volume and nitrogen under drip irrigation with plastic mulch[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 38(9): 1105-1111.
- [25] 陈晓光, 丁艳锋, 唐忠厚, 魏猛, 史新敏, 张爱君, 李洪民. 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.
- CHEN X G, DING Y F, TANG Z H, WEI M, SHI X M, ZHANG A J, LI H M. Suitable nitrogen rate for storage root yield and quality of sweetpotato[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(4): 979-986. (in Chinese)
- [26] HARTEMINK A E. Intergrated nutrient management research with sweetpotato in Papua New Guinea[J]. *Outlook on Agriculture*, 2003, 32(3): 173-182.
- [27] HALL M R, 张黎玉. 甘薯秧苗的长度、扦插的节数和方向与薯块产量的关系[J]. 国外农学-杂粮作物, 1987(2): 38-39.
- HALL M R, ZHANG L Y. The relationship between the length of sweetpotato seedlings, the number and direction of cuttings and the yield of sweetpotato tubers[J]. *Horticulture & Seed*, 1987(2): 38-39. (in Chinese)
- [28] 段文学, 汪进丽, 张海燕, 解备涛, 汪宝卿, 张立明. 栽培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.
- DUAN W X, WANG J L, ZHANG H Y, XIE B T, WANG B Q, ZHANG L M. Effects of planting method and density on the dry matter accumulation, distribution, root yield, and quality of fresh edible sweetpotatoes[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2018, 33(4): 167-174. (in Chinese)
- [29] 唐忠厚, 李洪民, 张爱君, 史新敏, 魏猛, 陈晓光, 丁艳锋. 甘薯叶光合特性与块根主要性状对氮素供应形态的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(6): 1494-1501.
- TANG Z H, LI H M, ZHANG A J, SHI X M, WEI M, CHEN X G, DING Y F. Responses of nitrogen supply forms on leaf photosynthetic characteristics and root characters of sweetpotato[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2013, 19(6): 1494-1501. (in Chinese)
- [30] ZHAO D, OOSTERHUIS D M, BEDNARZ C W. Influence of potassium deficiency on photosynthesis, chlorophyll content, and chloroplast ultrastructure of cotton plants[J]. *Photosynthetica*, 2001, 39(1): 103-109.
- [31] 刘中华, 许泳清, 邱永祥, 邱思鑫. 栽培密度对优质鲜食型甘薯农艺性状及产量的影响[J]. 热带作物学报, 2016, 37(8): 1452-1457.
- LIU Z H, XU Y Q, QIU Y X, QIU S X. Effects of planting density on agronomic traits and yield of high quality fresh edible sweetpotato[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2016, 37(8): 1452-1457. (in Chinese)
- [32] 杜祥备, 刘小平. 氮肥减量分施促进甘薯根系分化与块根膨大[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(10): 1702-1709.
- DU X B, LIU X P. Lowering rate and split application of nitrogen fertilizer promote root differentiation and storage root enlargement of sweetpotato[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(10): 1702-1709. (in Chinese)
- [33] 刘倩, 侯松, 刘庆, 李欢, 史衍玺. 移栽时期对食用型甘薯品种烟薯 25 号产量和品质的影响[J]. 作物杂志, 2017(5): 136-141.
- LIU Q, HOU S, LIU Q, LI H, SHI Y X. Effects of transplanting date on yield and quality of edible sweetpotato cv. Yanshu No.25[J]. *Crops*, 2017(5): 136-141. (in Chinese)
- [34] 王翠娟, 史春余, 刘娜, 刘双荣, 余新地. 结薯数差异显著的甘薯品种生长前期根系特性及根叶糖组分比较[J]. 作物学报, 2016, 42(1): 131-140.
- WANG C J, SHI C Y, LIU N, LIU S R, YU X D. Comparison of root characteristics and sugar components in root and leaf at early growth phase of sweetpotato varieties with significant difference in valid storage root number[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2016, 42(1): 131-140. (in Chinese)