

甘薯源库发育及产量品质对氮源和施氮量的响应

王 宁¹, 孟亚依¹, 姚剑锋¹, 王学彧¹, 李玉鹏¹, 邓宝妮¹, 李永忠¹, 司成成^{1,2*}

1. 海南大学园艺学院/海南省热带园艺作物品质调控重点实验室, 海南海口 570228; 2. 海南大学三亚南繁研究院/海南省崖州湾种子实验室, 海南三亚 572025

摘 要: 通过大田试验研究氮源、施氮量及其互作对鲜食型甘薯明门金时全生育期源库发育及其与产量和品质形成的关系。结果表明: 施氮提高了栽后 70~110 d 功能叶叶绿素 (Chl) 含量和净光合速率 (P_n), 提高了单株结薯数、平均单薯重和产量, 显著增加了可溶性糖 (soluble sugars, SS)、蔗糖、可溶性蛋白 (soluble proteins, SP)、多酚和维生素 C (VC) 的含量, 显著降低了淀粉的含量。在相同氮源下, 栽后 30~120 d, 茎和叶鲜重随施氮量增加而显著增加; 平均单株结薯数、平均单薯重和平均单株薯重随施氮量增加先增加后降低, 在施氮量 120 kg/hm² 时最大; T/R (Top/Root) 随施氮量的增加先降低后升高, 在施氮量 120 kg/hm² 时最低; 施氮量 120 kg/hm² 的单株结薯数和产量最高。在高产施氮量 120 kg/hm² 下, 与酰胺态氮素和硝态氮素相比, 铵态氮素在栽后 70~110 d 显著提高了叶绿素 Chl 含量和 P_n ; 栽后 30 d 显著提高了叶和茎鲜重; 栽后 30~120 d 显著提高了单株结薯数; 栽后 60~120 d 显著提高了单株薯重。在收获时, 铵态氮素 120 kg/hm² 显著提高了商品薯产量, 增产途径主要是显著增加了单株结薯数; 显著提高了 SS 含量、蔗糖含量、SP 含量和 VC 含量, 改善了风味品质。

关键词: 甘薯; 氮源; 施氮量; 源库发育; 产量; 品质

中图分类号: S531 文献标识码: A

Response of Source-sink Development and Yield and Quality of Sweetpotato to Nitrogen Source and Nitrogen Application Rate

WANG Ning¹, MENG Yayi¹, YAO Jianfeng¹, WANG Xueyu¹, LI Yupeng¹, DENG Baoni¹, LI Yongzhong¹, SI Chengcheng^{1,2*}

1. School of Horticulture, Hainan University / Key Laboratory of Quality Regulation of Tropical Horticultural Crop in Hainan Province, Haikou, Hainan 570228, China; 2. Sanya Nanfan Research Institute, Hainan University / Hainan Yazhou Bay Seed Laboratory, Sanya, Hainan 572025, China

Abstract: Field experiments were conducted to study the relationship between nitrogen source, nitrogen application rate and the interaction on the source-sink development during the whole growth period of sweetpotato Mingmenjinshi and its relationship with yield and quality. The results showed that nitrogen application increased the chlorophyll content and net-photosynthetic rate of sweetpotato at 70 to 110 days after planting, the number of storage root per plant, average storage root weight and yield, the content of soluble sugar, sucrose, soluble protein, polyphenols and vitamin C, and significantly decreased the content of starch. Under the same nitrogen source, at 30 to 120 days after planting, the fresh weight of stems and leaves increased significantly with the increase of nitrogen application; the average number of storage root per plant, the average weight of storage root and the average weight of storage root per plant increased first and decreased then with nitrogen application, and were the highest when the nitrogen application rate was 120 kg/hm²; T/R first decreased and then increased with the increase of nitrogen application rate, and was the lowest when the nitrogen application rate was 120 kg/hm²; and the number of storage root per plant and yield was the highest with nitrogen

收稿日期 2022-09-06; 修回日期 2022-11-13

基金项目 海南省自然科学基金青年基金项目 (No. 320QN190); 海南省科技专项 (No. ZDYF2022XDNY264); 国家自然科学基金地区科学基金项目 (No. 32060716)。

作者简介 王 宁 (1997—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 甘薯栽培生理。*通信作者 (Corresponding author): 司成成 (SI Chengcheng), E-mail: sicc9009@163.com。

application of 120 kg/hm². Under the high-yield nitrogen application rate of 120 kg/hm², compared with amide nitrogen and nitrate nitrogen, ammonium nitrogen significantly increased chlorophyll content and net-photosynthetic rate at 70 to 110 days after planting; significantly increased the fresh weight of leaves and stems at 30 days after planting; significantly increased the number of storage root per plant at 30 to 120 days after planting; significantly increased the weight of storage root per plant at 60 to 120 days after planting. At harvest, ammonium nitrogen significantly increased the yield of commercial storage root by significantly increasing the number of storage root per plant, also significantly increased the content of soluble sugar, sucrose, soluble protein and vitamin C, and improved flavor quality.

Keywords: sweetpotato; nitrogen source; nitrogen application rate; source-sink development; yield; quality

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2024.01.009

甘薯 [*Ipomoea batatas* (L.) Lam.] 具有高产稳产、适应性强、营养丰富等特点, 除含有丰富的食用纤维、糖、维生素、矿物质、蛋白质等人体必需的重要营养成分外, 还含有多酚、多糖、花青素等活性成分, 是世界卫生组织推荐的最佳食物^[1]。氮素既是作物重要的结构物质, 又是酶的主要成分, 对作物代谢、生长发育和产量品质形成有重要影响^[2]。硝态氮肥、铵态氮肥和酰胺态氮肥(尿素)是生产上应用最广的 3 种氮肥^[3-4], 其中硝态氮和铵态氮是植物能够从土壤中直接吸收利用的氮素^[5-7], 而酰胺态氮素在土壤中往往需要在脲酶的作用下转化为铵态氮素后再被植物吸收利用^[8]。并且植物对不同形态氮素吸收利用具有偏好性和选择性特点, 部分植物在硝态氮环境下生长较好, 如玉米、小麦等^[4, 9-10]; 而部分植物则在铵态氮环境下生长较好, 如水稻等^[11-12]。合理的施氮量和氮源选择是提高甘薯氮素养分利用效率^[13-15], 促进甘薯生长发育^[16-17], 促进光合产物合成、分配和积累^[16], 协调源库发育^[18-19], 增加甘薯产量和改善品质的有效方法^[20-21], 契合“减肥增效”的绿色农业发展理念。源和库是作物形成经济产量的 2 个重要方面^[22], 对大多数作物而言, 如水稻、玉米、小麦和花生等作物的源库关系都有发展和平衡的过程^[23-26], 甘薯具有典型的源库关系, 源库协调发展是甘薯高产优质的保障^[18]。氮素养分是影响作物源库关系的主要因素之一^[27-32], 解析甘薯源库关系、探明氮肥施用对甘薯源库关系建立、发展和平衡的影响对合理施用氮素肥料、提高甘薯生产水平具有重要意义^[18, 33]。

海南省主栽品种单一, 70%左右为 20 世纪 50 年代初日本育成的鲜食型甘薯品种高系 14^[34-35]。另外, 海南省甘薯种植过程中氮源选择和施氮量管理较为粗放^[34]。针对以上 2 个问题, 本研究选用高系 14 的改良品种‘鸣门金时’为试验材料, 设置 3 种氮源和 4 个施氮量, 探究甘薯全生育期

源库发育及产量品质对氮源和施氮量的响应。本研究结果可为海南省引进鲜食型甘薯鸣门金时提供理论基础和技术支持, 有利于海南省甘薯产业健康发展。

1 材料与方法

1.1 材料

以鲜食型甘薯‘鸣门金时’为试验材料, 引自日本德岛县鸣门市, 是海南省主栽鲜食型甘薯高系 14 的改良品种。供试肥料为尿素(含 N, 46%)、硫酸铵(含 N, 21%)、硝酸钾(含 N, 13.6%; 含 K₂O, 46%)、硫酸钾(含 K₂O, 52%)、过磷酸钙(含 P₂O₅, 16%), 均由中化化肥控股有限公司提供。供试土壤质地为砂壤土, 0~20 cm 土壤含沙量为 48.32%, pH 7.02, 有机质含量为 1.17%, 碱解氮含量为 61.67 mg/kg, 速效磷含量为 14.49 mg/kg, 速效钾含量为 79.18 mg/kg。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 于 2021 年 11 月 15 日至 2022 年 3 月 15 日在海南大学农科基地(20°06'N, 110°33'E)开展大田试验。试验采用两因素裂区设计, 氮源为主区, 分别为铵态氮素(AMN, 硫酸铵)、硝态氮素(NN, 硝酸钾)和酰胺态氮素(AN, 尿素); 纯氮素水平为副区, 分别为 0、60、120、180 kg/hm², 共 10 个处理, 分别为: (1) CK 处理(不施氮); (2) AMN60 处理(铵态氮素 60 kg/hm²); (3) AMN120 处理(铵态氮素 120 kg/hm²); (4) AMN180 处理(铵态氮素 180 kg/hm²); (5) NN60 处理(硝态氮素 60 kg/hm²); (6) NN120 处理(硝态氮素 120 kg/hm²); (7) NN180 处理(硝态氮素 180 kg/hm²); (8) AN60 处理(酰胺态氮素 60 kg/hm²); (9) AN120 处理(酰胺态氮素 120 kg/hm²); (10) AN180 处理(酰胺态氮素 180 kg/hm²), 3 次重复。同时施入磷肥 110 kg/hm²,

施入钾肥平衡各处理 K_2O 为 240 kg/hm^2 。用升华硫粉末平衡各小区硫元素的用量。铵态氮素和酰胺态氮素处理施入硝化抑制剂(3,4-二甲基吡唑膦酸盐, DMPP)抑制硝化作用, 用量为施氮量的 7%^[36]; 酰胺态氮素处理额外施入脲酶抑制剂(N-丁基硫代磷酰三胺, NBPT)减缓尿素分解, 用量为施氮量的 1%^[37]。所有肥料、试剂均基施。垄距 0.80 m, 株距 0.20 m, 小区面积 $4\text{ m}\times 2\text{ m}=8\text{ m}^2$ 。全生育期田间管理同一般高产大田。

1.2.2 指标测定 (1) 植株农艺性状调查。于甘薯块根建成期(栽后 30 d)、茎叶封垄期(栽后 60 d)、块根膨大高峰期(栽后 90 d)和收获期(栽后 120 d)取样。每次取生长健壮, 具有代表性的植株 5 株。叶面 3/4 完好作为正常叶片, 去除干枯茎段作为正常茎, 有明显的膨大部位且膨大部位直径大于 0.5 cm 的根作为块根, 人工分样后用天平称量各器官鲜重。(2) 光合特性测定。根据天气预报, 选择晴天、少云的天气的栽后 50、70、90、110 d 前后 2 d 上午 9:00—11:00 进行, 选择连续 5 株有代表性的甘薯植株的第 5 片功能叶, 用日本 Minolta 公司生产的 SPAD-502 叶绿素含量测定仪测定 SPAD 值; 用美国 LI-COR 公司生产的 LI-6400 光合测定系统测定净光合速率。(3) 商品薯品质测定。用蒽酮比色法测定可溶性糖(soluble sugars, SS)、蔗糖、淀粉含量^[38]。

用 Folin-Ciocalteus 法测定多酚含量^[39]; 用 $\text{NaNO}_2\text{-Al}(\text{NO}_3)_3\text{-NaOH}$ 显色法测定类黄酮含量^[40]; 用二甲苯萃取法测定维生素 C (VC) 含量, 用考马斯亮蓝法测定可溶性蛋白(soluble proteins, SP)含量^[41]。(4) 商品薯产量测定。以具有明显膨大部位、直径大于 1 cm 及重量超过 50 g 的块根作为商品薯进行测产。

1.3 数据处理

利用 Microsoft Excel 2019 和 SPSS 19.0 软件对数据进行整理分析, 采用邓肯新复极差法进行差异显著性分析, Microsoft Excel 2019 软件作图。

2 结果与分析

2.1 氮源和施氮量对甘薯商品薯产量及其构成因素的影响

由表 1 可以看出, 氮源、施氮量对甘薯商品薯单株结薯数、平均单薯重和产量具有显著影响, 氮源、施氮量二者互作主要显著影响单株结薯数。施用氮素可以提高单株结薯数、平均单薯重和产量。在相同的氮源下, 施氮量 120 kg/hm^2 的单株结薯数和产量最大, 与对照处理相比差异达到显著水平($P<0.05$)。在施氮量 120 kg/hm^2 下, 铵态氮素的商品薯增产效果最为显著, 增幅达到 35.96%, 增产途径主要是显著增加了单株结薯数。

表 1 不同氮源和施氮量下甘薯商品薯产量及其构成因素

Tab. 1 Yield and its component factors of commercial sweetpotato under different nitrogen sources and nitrogen application rates

处理 Treatment	单株结薯数 Single storage root number	平均单薯重 Average single storage root weight/g	产量 Yield/(kg·hm ⁻²)	产量增幅 Yield amplitude/%
CK	2.48±0.22 ^{ef}	110.93±15.62 ^d	17145.46±2347.38 ^d	
AMN60	2.63±0.32 ^{de}	122.53±22.3 ^{abc}	20225.12±4563.3 ^{bc}	17.96
AMN120	3.16±0.16 ^a	118.43±15.08 ^{abcd}	23311.62±2240.28 ^a	35.96
AMN180	2.92±0.24 ^b	117.88±14.65 ^{abcd}	21390.23±1658.74 ^{ab}	24.76
NN60	2.47±0.26 ^f	127.40±11.32 ^a	19632.94±2309.07 ^{bc}	14.50
NN120	2.73±0.14 ^{cd}	120.13±11.37 ^{abcd}	20488.23±2341.62 ^b	19.50
NN180	2.55±0.13 ^{ef}	125.63±7.23 ^{ab}	20091.45±1395.28 ^{bc}	17.18
AN60	2.63±0.23 ^{de}	111.79±15.46 ^{cd}	18335.38±2780.19 ^{cd}	6.94
AN120	2.90±0.23 ^b	116.05±15.46 ^{bcd}	20948.98±2780.19 ^b	22.18
AN180	2.84±0.2 ^{bc}	114.11±10.3 ^{cd}	20361.85±3030.45 ^{bc}	18.75
NS	47.83 ^{**}	4.06 [*]	5.68 [*]	
NL	34.91 ^{**}	3.43 [*]	20.62 ^{**}	
NS*NL	3.34 [*]	0.85	1.00	

注: 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。*表示显著相关 ($P<0.05$), **表示极显著相关 ($P<0.01$)。
Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference ($P<0.05$). * indicates significant correlation ($P<0.05$), ** indicates extremely significant correlation ($P<0.01$).

2.2 氮源和施氮量对甘薯商品薯品质的影响

由表 2 可知, 氮源、施氮量及其二者互作对甘薯商品薯中的 SS、蔗糖、淀粉、类黄酮、SP、多酚和 VC 具有极显著影响 ($P<0.01$)。施用氮素显著增加了 SS、蔗糖、SP、多酚和 VC 的含

量, 显著降低了淀粉的含量。在高产施氮量 120 kg/hm^2 下, 铵态氮素处理的 SS 含量、蔗糖含量、SP 含量和 VC 含量均最高, 且与其他处理差异达到显著水平 ($P<0.05$); 铵态氮素淀粉和多酚含量与酰胺态氮素相似, 均显著低于硝态氮素。

表 2 不同处理下甘薯商品薯品质
Tab. 2 Quality of commercial sweetpotato under different nitrogen sources and nitrogen application rates

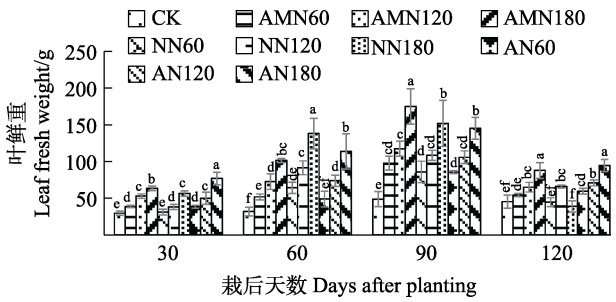
处理 Treatment	可溶性糖 SS/%	蔗糖 Sucrose/%	淀粉 Starch/%	可溶性蛋白 SP/%	多酚 Polyphenols/[g·(100g) ⁻¹]	维生素 C Vitamin C/[mg·(100g) ⁻¹]
CK	1.43±0.03 ^b	1.05±0.03 ^g	24.30±0.60 ^a	3.18±0.08 ^g	0.43±0.01 ^g	40.67±1 ^f
AMN60	2.42±0.05 ^b	1.52±0.03 ^b	23.77±0.61 ^b	5.87±0.15 ^d	0.6±0.02 ^d	45.88±1.18 ^c
AMN120	2.85±0.07 ^a	1.57±0.04 ^a	22.33±0.66 ^d	7.52±0.19 ^a	0.62±0.02 ^c	47.11±1.39 ^b
AMN180	1.77±0.04 ^d	1.18±0.02 ^d	21.32±0.42 ^c	7.33±0.15 ^b	0.6±0.01 ^d	47.65±0.93 ^{ab}
NN60	1.54±0.03 ^g	1.12±0.02 ^f	23.59±0.48 ^{bc}	3.74±0.08 ^f	0.63±0.01 ^b	42.31±0.86 ^c
NN120	1.64±0.05 ^e	1.19±0.03 ^{cd}	23.25±0.68 ^c	7.18±0.21 ^c	0.65±0.02 ^a	43.71±1.27 ^d
NN180	1.59±0.02 ^f	1.14±0.02 ^e	21.30±0.32 ^e	5.84±0.09 ^d	0.63±0.01 ^b	43.75±0.66 ^d
AN60	1.74±0.04 ^d	1.19±0.03 ^{cd}	23.84±0.49 ^b	4.12±0.08 ^e	0.49±0.01 ^e	43.99±0.89 ^d
AN120	1.82±0.05 ^e	1.21±0.04 ^c	22.04±0.57 ^d	7.35±0.21 ^b	0.63±0.02 ^{bc}	45.76±1.18 ^c
AN180	1.66±0.03 ^e	1.06±0.02 ^g	21.30±0.43 ^c	7.07±0.14 ^c	0.45±0.01 ^f	48.02±0.98 ^a
NS	4505.2 ^{**}	3627.54 ^{**}	26.52 ^{**}	1134.49 ^{**}	3137.48 ^{**}	487.05 ^{**}
NL	2231.34 ^{**}	1166.36 ^{**}	354.61 ^{**}	6173.58 ^{**}	1985.26 ^{**}	358.41 ^{**}
NS*NL	841.84 ^{**}	310.88 ^{**}	7.83 ^{**}	239.5 ^{**}	221.21 ^{**}	23.22 ^{**}

注: 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$); *表示显著相关 ($P<0.05$), **表示极显著相关 ($P<0.01$)。
Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference ($P<0.05$); * indicates significant correlation ($P<0.05$), ** indicates extremely significant correlation ($P<0.01$).

2.3 氮源和施氮量对甘薯茎叶发育的影响

图 1 和图 2 显示, 在栽后 30~120 d, 叶鲜重随着甘薯发育呈现先增加后降低的趋势, 最高值出现在栽后 90 d; 茎鲜重随着甘薯发育呈现增加趋势, 其中栽后 30~60 d 增速最快, 90~120 d 增速较慢。表明栽后 90 d 之后茎叶发育进入衰老期。相同氮源下, 在栽后 30~120 d, 与对照处理相比, 施氮可以显著提高茎和叶鲜重, 茎和叶鲜重随施氮量增加而呈显著增加的趋势。而在高产施氮量 120 kg/hm^2 下, 在栽后 30 d, 铵态氮素叶和茎鲜重高于酰胺态氮素, 酰胺态氮素高于硝态氮素, 且差异达到显著水平 ($P<0.05$); 在栽后 60~120 d 各氮源叶鲜重无显著差异, 在栽后 60~90 d 各氮源茎鲜重无显著差异, 而在栽后 120 d, 铵态氮素茎鲜重低于硝态氮素, 硝态氮素低于酰胺态氮素, 且差异达到显著水平 ($P<0.05$)。由此可见, 在甘薯发育前期栽后 30 d 时, 铵态氮素更有利于茎叶发育, 其源端发育强于酰胺态氮素和硝态氮素; 在发育后期 120 d 时, 铵态氮素处理茎鲜重最低,

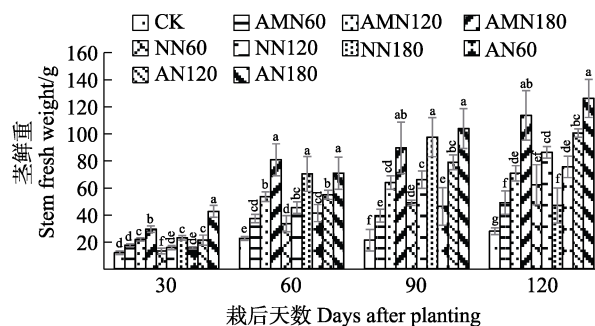
但与其他处理叶鲜重相似, 因此铵态氮素处理在发育后期 120 d 维持了源端光合性能。



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。
Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).
图 1 不同氮源和施氮处理下甘薯叶片发育
Fig. 1 Leaf development of sweetpotato under different nitrogen sources and nitrogen application rates

2.4 氮源和施氮量对块根发育的影响

图 3、图 4 和图 5 显示, 在栽后 30~120 d, 平均单株结薯数随甘薯生长发育呈现先升高后平稳的趋势, 在栽后 60 d 达到最大值, 这与前人研究

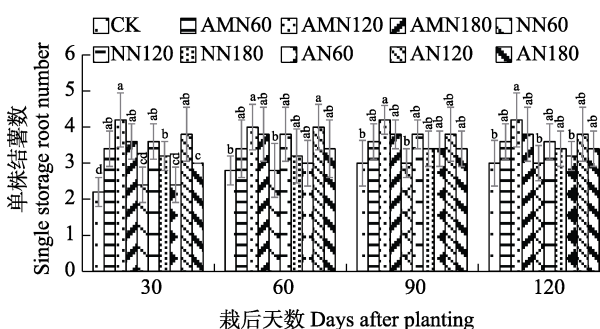


不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

图 2 不同氮源和施氮处理下甘薯茎发育

Fig. 2 Stem development of sweetpotato under different nitrogen sources and nitrogen application rates

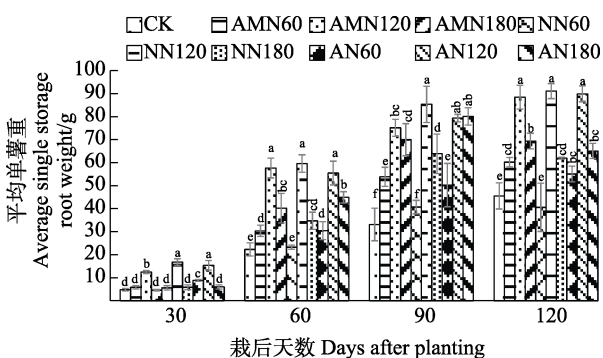


不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

图 3 不同氮源和施氮处理下甘薯单株结薯数

Fig. 3 Number of sweetpotato producing per plant under different nitrogen sources and nitrogen application rates



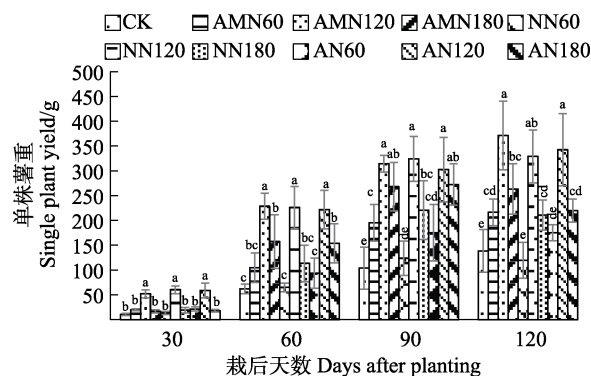
不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

图 4 不同氮源和施氮处理下甘薯单薯重

Fig. 4 Single sweetpotato weight under different nitrogen sources and nitrogen application rates

一致^[17]。平均单薯重和平均单株薯重随甘薯生长发育逐渐升高, 其中栽后 30~60 d 的增幅最大, 栽后 90~120 d 增幅较小。相同氮源下, 与对照处理相比, 施氮可以显著提高平均单株结薯数、平



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

图 5 不同氮源和施氮处理下甘薯单株薯重

Fig. 5 Weight of sweetpotato per plant under different nitrogen sources and nitrogen application rates

均单薯重和平均单株薯重。不同氮源均表现出平均单株结薯数、平均单薯重和平均单株薯重随施氮量增加呈现先增加后降低的趋势, 在高产施氮量 120 kg/hm² 时达到最大且与对照处理差异显著 ($P < 0.05$)。而在高产施氮量 120 kg/hm² 下, 铵态氮素处理的单株结薯数高于酰胺态氮素, 酰胺态氮素高于硝态氮素处理; 硝态氮素处理的平均单薯重最高, 其次为酰胺态氮素处理, 铵态氮素处理最低; 在栽后 30 d, 铵态氮素处理的单株薯重低于酰胺态氮素, 酰胺态氮素低于硝态氮素, 在栽后 60~120 d, 铵态氮素单株薯重高于酰胺态氮素, 酰胺态氮素高于硝态氮素。

2.5 氮源和施氮量对甘薯 T/R (Top/Root) 的影响

由图 6 可知, 在栽后 30~120 d, T/R 随甘薯生长发育逐渐降低, 在栽后 30~60 d 降幅最大。相同氮源下, T/R 随施氮量的增加先降低后升高, 高产施氮量 120 kg/hm² 处理的 T/R 最低。在高产施氮量 120 kg/hm² 下, 栽后 30 d, 铵态氮 T/R 高于酰胺态氮, 酰胺态氮高于硝态氮; 在栽后 60 d, 硝态氮 T/R 高于铵态氮, 铵态氮高于酰胺态氮; 在栽后 90 d, 硝态氮 T/R 高于酰胺态氮, 酰胺态氮高于铵态氮; 在栽后 120 d, 酰胺态氮 T/R 高于硝态氮, 硝态氮高于铵态氮。

2.6 氮源和施氮量对甘薯光合特性的影响

图 7 和图 8 显示, 在栽后 50~110 d, 功能叶绿素含量随着甘薯生长发育呈现略有增加后降低的趋势, 在栽后 70 d 时叶绿素含最高; P_n 随着甘薯生长发育呈现出下降趋势, 在栽后 70~90 d

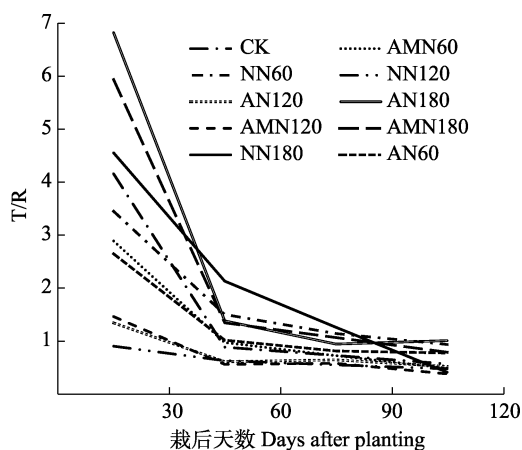
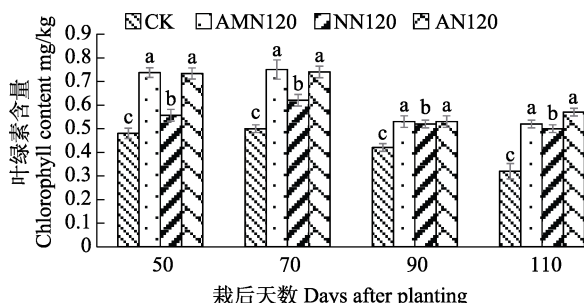


图 6 不同氮源和施氮处理下甘薯 T/R 值

Fig. 6 Sweetpotato T/R under different nitrogen sources and nitrogen application rates



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

图 7 不同氮源和施氮处理下甘薯叶绿素含量

Fig. 7 Chlorophyll content of sweetpotato under different nitrogen sources and nitrogen application rates

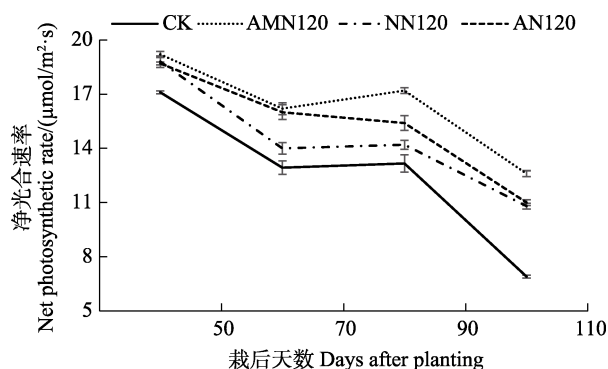


图 8 不同氮源和施氮处理下甘薯 P_n

Fig. 8 Net photosynthetic rate of sweetpotato under different nitrogen sources and nitrogen application rates

的 P_n 较为稳定。在栽后 70~110 d, 与对照处理相比, 施氮可以提高功能叶 Chl 含量和甘薯 P_n 。而在高产施氮量 120 kg/hm^2 下, 不同氮源的 Chl 含量和 P_n 以铵态氮素处理最高, 与硝态氮处理的差异达到了显著水平 ($P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 施氮量对甘薯源库发育及产量的影响

氮肥施用对甘薯源库关系建立、发展和平衡均有显著影响^[18]。本研究结果表明, 在栽后 70~110 d, 施氮提高了甘薯功能叶叶绿素含量和净光合速率, 这与 DU 等^[42]的研究结果相似; 甘薯茎叶鲜重随施氮量的增加而升高, 但甘薯结薯数、平均单薯和平均单株薯重重随施氮量增加呈现出先升高后降低的趋势, 在 120 kg/hm^2 施氮量时达到最大, 且与不施氮对照处理差异显著 ($P < 0.05$); T/R 表现出随施氮量的增加先降低后升高的趋势, 高产施氮量 120 kg/hm^2 处理的 T/R 最低。这说明施氮量 120 kg/hm^2 有利于源库平衡, 低于 120 kg/hm^2 施氮量将导致源端发育不良, 不利于库容扩大, 高于 120 kg/hm^2 施氮量将导致源端发育过剩, 不利于光合产物向库器官分配。

3.2 氮源对甘薯源库发育及产量的影响

植物能够吸收利用的氮素主要有硝态氮 ($\text{NO}_3\text{-N}$)、铵态氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) 和酰胺态氮 [$\text{CO}(\text{NH}_2)_2\text{-N}$] 3 种形态^[43], 但不同植物在不同生长环境、不同发育时期对不同形态氮素选择和利用分配存在差异性^[43]。已有研究表明, 相对于硝态氮素和酰胺态氮素, 甘薯更喜好铵态氮素^[14, 16-18, 20, 44]。本研究结果进一步证实了该结论, 在高产施氮量 120 kg/hm^2 下, 铵态氮素处理在甘薯发育前期 30 d 时叶和茎鲜重高于酰胺态氮素和硝态氮素, 且差异达到显著水平 ($P < 0.05$), 在 60~120 d 氮源对叶鲜重的影响不显著, 说明铵态氮素更有利于甘薯发育前期茎叶发育; 在栽后 50~110 d, 铵态氮素处理的功能叶叶绿素含量和净光合速率最高, 这与唐忠厚等^[16]和李成阳等^[44]研究结果相似, 说明施用铵态氮素有利于甘薯尽早建立较强的源端, 并在全生育期维持较强的光合生产能力, 这将为库端发育提供充足的光合产物。本研究结果表明施用铵态氮素比酰胺态氮素处理的单株结薯数和产量高, 与 SI 研究结果相似^[20]; 本研究进一步发现, 在全生育期, 施用铵态氮素处理的单株结薯数和产量不仅高于酰胺态氮素, 还高于硝态氮素; 然而铵态氮素处理的平均单薯重低于硝态氮素和酰胺态氮素处理; 虽然在栽后 30 d, 铵态氮素处理的单株薯重低于酰胺态氮素和硝态氮素, 但在栽后 60~12 d, 铵态氮素单株薯重高于酰胺态氮素和硝态氮素。这说明铵态氮主要在甘薯块根形成期促进更多块根形成, 奠定了

库的数量基础,进而在甘薯块根膨大期形成较大的库容,进而提高收获的商品薯产量,并为品质改善奠定了基础。已有研究表明,相比于酰胺态氮素,铵态氮素可以促进甘薯块根形成期幼根中蔗糖分解、抑制淀粉合成,同时提高幼根中生长素和玉米素核苷含量、降低幼根中赤霉素含量,进而抑制幼根木质化,从而有利于更多的不定根向块根分化^[20, 45-46]。但是,与硝态氮素相比,铵态氮素提高甘薯块根数量的机制尚不清楚;并且,不同氮素形态对甘薯根际微生态调控的机制以及相关分子机制尚未见报道,有待研究。

3.3 氮素对甘薯品质的影响

淀粉是甘薯细胞中碳水化合物的储藏形式^[47],可溶性糖含量是甘薯块根食用品质和加工性能的重要指标,是影响甘薯甜度、黏度、质地、薯香味等食味指标的重要因子^[48]。因此,鲜食型品种往往追求高可溶性糖含量、低淀粉含量^[49]。维生素C是植物体重要的维生素之一,较高的维生素C含量利于提高鲜食甘薯贮藏时间^[50]。适量的氮肥可以显著提高薯块中可溶性糖、维生素含量和可溶性蛋白含量^[51]。本研究结果进一步支持了前人的观点,施用氮素显著增加了可溶性糖、蔗糖、可溶性蛋白、多酚和维生素C的含量,显著降低了淀粉的含量。在高产施氮量120 kg/hm²下,铵态氮素处理的可溶性糖含量、蔗糖含量、可溶性蛋白含量和维生素C含量均最高,且与其他处理差异达到显著水平($P<0.05$);铵态氮素淀粉和多酚含量与酰胺态氮素相似,均显著低于硝态氮素。这表明,铵态氮素120 kg/hm²处理改善了商品薯的品质,保证了食用型甘薯良好的适口性。

4 结论

本研究结果表明,在不同氮源及施氮量下,铵态氮素120 kg/hm²处理通过协调源库发育,获得了最高的商品薯产量,其增产途径主要是增加了单株结薯数;并且在提高产量的同时,改善了商品薯的品质,保证了食用型甘薯良好的适口性。

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] DUAN W, WANG Q, ZHANG H, XIE B, LIA, HOU F, DONG S, WANG B, QIN Z, ZHANG L. Differences between nitrogen-tolerant and nitrogen-susceptible sweetpotato cultivars in photosynthate distribution and transport under different nitrogen conditions. PLoS One, 2018, 13(3): e194570.
- [3] 于冲冲,高巍,叶优良,冯文静,刘红恩,聂兆君,秦世玉,李畅,赵鹏.氮肥形态对小麦镉吸收及转运的影响[J].西北农业学报,2022,31(1): 15-24.
YU C C, GAO W, YE Y L, FENG W J, LIU H E, NIE Z J, QIN S Y, LI C, ZHAO P. Effect of fertilizer forms on absorption and translocation of cadmium in wheat[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2022, 31(1): 15-24. (in Chinese)
- [4] 卢毅,董放,田田,戴爱斌,齐盛东.不同氮素营养对小麦苗期根系发育及抗旱性的影响[J].山东农业大学学报(自然科学版),2022,53(1): 39-45.
LU Y, DONG F, TIAN T, DAI A B, QI S D. Effects of nitrogen nutrition on wheat seedling root growth and drought resistance[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2022, 53(1): 39-45. (in Chinese)
- [5] 付帅,刘晓明,马阳,李皓,甄怡铭,张子旋,王艳群,门明新,彭正萍.氮素形态对强筋和中筋小麦产量和品质的影响[J].植物营养与肥料学报,2022,28(1): 83-93.
FU S, LIU X M, MA Y, LI H, ZHEN Y M, ZHANG Z X, WANG Y Q, MEN M X, PENG Z P. Effects of nitrogen supply forms on the quality and yield of strong and medium gluten wheat cultivars[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2022, 28(1): 83-93. (in Chinese)
- [6] 高志建,尹飞虎,刘瑜,李晓兰.滴灌棉花光合特性、生物量及产量对铵态氮、酰胺态氮的响应研究[J].新疆农业科学,2015,52(1): 1-6.
GAO Z J, YIN F H, LIU Y, LI X L. Response of photosynthetic characteristics, biomass and yield on drip irrigation cotton to ammonium and amide nitrogen[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2015, 52(1): 1-6. (in Chinese)
- [7] 戴馨,刘楠楠,夏炎,杨磊,郝芃钊,董召荣,车钊.氮素调控对玉米氮素同化过程及产量的影响[J].安徽农业大学学报,2022,49(4): 533-539.
DAI X, LIU N N, XIA Y, YANG L, HAO P F, DONG Z R, CHE Z. Effects of nitrogen regulation on nitrogen assimilation process and yield of maize[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2022, 49(4): 533-539. (in Chinese)
- [8] 苗艳芳,吕静霞,李生秀,王朝辉,李晓涵,罗来超,李娜.铵态氮肥和硝态氮肥施入时期对小麦增产的影响[J].水土保持学报,2014,28(4): 91-96.
MIAO Y F, LYU J X, LI S X, WANG Z H, LI X H, LUO L

- C, LI N. Effects of applied time of ammonium and nitrate N on wheat yield[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(4): 91-96. (in Chinese)
- [9] 罗来超, 苗艳芳, 李生秀, 魏鑫, 都开彬. 氮素形态对小麦幼苗生长及根系生理特性的影响[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2013, 34(4): 81-84, 1.
LUO L C, MIAO Y F, LI S X, WEI X, DU K B. Effect of N forms growth and root physiological characteristics of wheat seedling[J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science), 2013, 34(4): 81-84, 1. (in Chinese)
- [10] 但晨歆, 陈煜林, 冯紫芸, 丘智晃, 涂攀峰, 邓兰生, 赖忠明. 不同氮源配比对沙地水肥一体化玉米生长的影响[J]. 安徽农业科学, 2022, 50(15): 139-142.
DAN C X, CHEN Y L, FENG Z H, QIU Z H, TU P F, DENG L S, LAI Z M. Effects of different nitrogen sources proportion on the growth of maize in sandy land with water and fertilizer integration[J]. Anhui Agriculture Science, 2022, 50(15): 139-142. (in Chinese)
- [11] 俞巧钢, 黄郑宸, 叶静, 孙万春, 林辉, 王强, 王峰, 马军伟. 复合生化抑制剂对稻田氮素转化和水稻生长的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2022, 48(5): 635-643.
YU Q G, HUANG Z C, YE J, SUN W C, LIN H, WANG Q, WANG F, MA J W. Effects of combined biochemical inhibitors on nitrogen transformation and rice growth in paddy fields[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences), 2022, 48(5): 635-643 (in Chinese)
- [12] 刘钰莹, 张妍, 汪哲远, 李廷强. 硝化抑制剂与生物炭配施对水稻土氮素转化及氮肥利用率的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2021, 47(2): 223-232.
LIU Y Y, ZHANG Y, WANG Z Y, LI T Q. Effects of combined application of nitrification inhibitors and biochars on nitrogen transformation and nitrogen use efficiency in paddy soil[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences), 2021, 47(2): 223-232. (in Chinese)
- [13] DU X B, XI M, KONG L C. Split application of reduced nitrogen rate improves nitrogen uptake and use efficiency in sweetpotato[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 14058.
- [14] 史春余, 张晓冬, 张超, 陈晓光. 甘薯对不同形态氮素的吸收与利用[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(2): 389-394.
SHI C Y, ZHANG X D, ZHANG C, CHEN X G. Absorption and utilization of different nitrogen forms for sweet potato[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2010, 16(2): 389-394. (in Chinese)
- [15] 安霞, 董月, 吴建燕, 宁运旺, 许建平, 李传哲, 张永春. 氮肥形态对甘薯产量和养分吸收的影响[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(5): 1049-1054.
AN X, DONG Y, WU J Y, NING Y W, XU J P, LI C Z, ZHANG Y C. Effects of forms of nitrogen fertilizer on yield and nutrient uptake of sweet potato[J]. Jiangsu of Agriculture, 2016, 32(5): 1049-1054. (in Chinese)
- [16] 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)
- [17] 王翠娟, 柴沙沙, 史春余, 朱红, 谭中鹏, 季杰, 任国博. 铵态氮素促进甘薯块根形成的解剖特征及其 *IbEXP1* 基因的表达[J]. 作物学报, 2021, 47(2): 305-319.
WANG C J, CHAI S S, SHI C Y, ZHU H, TAN Z P, JI J, REN G B. Anatomy characteristics and *IbEXP1* gene expression of tuberization under ammonia nitrogen treatment in sweet potato[J]. Acta Agronomica Sinica, 2021, 47(2): 305-319. (in Chinese)
- [18] 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)
- [19] TARENT P, HARPER S, GUNNAR K. Growth and yield response of glasshouse-and field-grown sweetpotato to nitrogen supply[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2017, 108(3): 1-13.
- [20] SI C C, SHI C Y, LIU H J, ZHAN X D, LIU Y C. Effects of nitrogen forms on carbohydrate metabolism and storage-root formation of sweet potato[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2018, 181: 419-428.
- [21] 安建刚, 敬夫, 丁祎, 肖怡, 尚浩浩, 李宏利, 杨晓璐, 唐道彬, 王季春. 氮肥分期运筹对套作甘薯产量、品质及氮素效率的影响[J]. 作物学报, 2018, 44(12): 1858-1866.
AN J G, JING F, DING W, XIAO Y, SHANG H H, LI H L, YANG X L, TANG D B, WANG J C. Effects of split application of nitrogen fertilizer on yield, quality and nitrogen use efficiency of sweetpotato[J]. Acta Agronomica Sinica, 2018, 44(12): 1858-1866. (in Chinese)
- [22] 李强强, 赵玥, 李璠, 朱一鸣, 杨成淦, 曹佳乐, 王志琴, 杨建昌, 顾骏飞. 作物源库关系及其生理调控途径的研究进展[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(9): 50-56.
LI Q Q, ZHAO Y, LI F, ZHU Y M, YANG C G, CAO J L, WANG Z Q, YANG J C, GU J F. Research progress on source-sink relationship and physiological regulatory path-

- ways in crops[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2020, 48(9): 50-56. (in Chinese)
- [23] 李丽, 杨德龙, 栗孟飞, 常磊, 程宏波, 柴守玺, 李唯. 不同水分条件下源库调节对小麦营养器官可溶性碳水化合物和籽粒千粒重的影响[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(7): 1879-1888.
- LI L, YANG D L, LI M F, CHANG L, CHENG H B, CHAI S X, LI W. Effects of source-sink regulation on water soluble carbohydrates of vegetative organs and thousand-grain mass of wheat under different water conditions[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(7): 1879-1888. (in Chinese)
- [24] 李赞堂, 王士银, 姜雯宇, 张帅, 张少斌, 徐江. 穗分化期外施 24-表油菜素内酯(EBR)促进水稻源、库及籽粒灌浆的生理机制[J]. *作物学报*, 2018, 44(4): 581-590.
- LI Z T, WANG S Y, JIANG W Y, ZHANG S, ZHANG S B, XU J. Physiological mechanisms of promoting source, sink, and grain filling by 24-Epibrassinolide (EBR) applied at panicle initiation stage of rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2018, 44(4): 581-590. (in Chinese)
- [25] 李瑞杰, 唐会会, 王庆燕, 许艳丽, 王琦, 卢霖, 闫鹏, 董志强, 张凤路. 5-氨基乙酰丙酸和乙烯利对东北春玉米源库碳平衡的调控效应[J]. *作物学报*, 2020, 46(7): 1063-1075.
- LI R J, TANG H H, WANG Q Y, XU Y L, WANG Q, LU L, YAN P, DONG Z Q, ZHANG F L. Effects of 5-aminolevulinic acid and ethephon compound on carbon balance of source-sink of spring maize in northeast China[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2020, 46(7): 1063-1075. (in Chinese)
- [26] 高芳, 刘兆新, 赵继浩, 汪颖, 潘小怡, 赖华江, 李向东, 杨东清. 北方主栽花生品种的源库特征及其分类[J]. *作物学报*, 2021, 47(9): 1712-1723.
- GAO F, LIU Z X, ZHAO J H, WANG Y, PAN X Y, LAI H J, LI X D, YANG D Q. Source-sink characteristics and classification of peanut major cultivars in north China[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2021, 47(9): 1712-1723. (in Chinese)
- [27] 路海东, 薛吉全, 马国胜, 张仁和, 张兴华. 低氮胁迫对不同基因型夏玉米源库性状和灌浆特性的影响[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(5): 1277-1282.
- LU H D, XUE J Q, MA G S, ZHANG R H, ZHANG X H. Effects of low nitrogen stress on source-sink characters and grain-filling traits of different genotypes summer maize[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(5): 1277-1282. (in Chinese)
- [28] 王雪, 张阔, 孙志梅, 苗泽兰, 刘欢, 马文奇. 氮素水平对萝卜干物质累积特征及源库活性的影响[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(21): 4300-4308.
- WANG X, ZHANG K, SUN Z M, MIAO Z L, LIU H, MA W Q. Effects of nitrogen levels on characteristics of dry matter accumulation and source-sink activities of radish[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(21): 4300-4308. (in Chinese)
- [29] 许蓓蓓, 尤翠翠, 丁艳锋, 王绍华. 源库调节对常规粳稻花后营养器官碳水化合物及氮磷钾转运的影响[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(4): 643-656.
- XU B B, YOU C C, DING Y F, WANG S H. Effects of source-sink manipulation on translocation of carbohydrate and nitrogen, phosphorus, potassium in vegetative organs of conventional japonica rice after anthesis[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(4): 643-656. (in Chinese)
- [30] 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)
- [31] 刘光明, 赵灿, 蒋岩, 赵凌天, 廖平强, 王维领, 霍中洋. 施氮量对水稻源库协同衰老特征的影响[J]. *植物生理学报*, 2022, 58(1): 173-185.
- LIU G M, ZHAO C, JIANG Y, ZHAO L T, LIAO P Q, WANG W L, HUO Z Y. Effects of nitrogen application on the synergistic senescence of rice source and sink[J]. *Plant Physiology Journal*, 2022, 58(1): 173-185. (in Chinese)
- [32] MENG W, ZHANG A J, LI H M, TANG Z H, CHEN X G. Growth and physiological response to nitrogen deficiency and resupply in leaf-vegetable sweetpotato (*Ipomoea batatas* Lam)[J]. *Hortscience*, 2015, 50(5): 754-758
- [33] LI S P, ZHAO L, ZHANG S H, LIU Q, LI H. Effects of nitrogen level and soil moisture on sweetpotato root distribution and soil chemical properties[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2021, 21: 536-546
- [34] 朱红林, 徐靖, 王新华, 韩义胜, 王效宁. 海南省甘薯产业发展情况调研和分析[J]. *农业与技术*, 2019, 39(15): 7-9.
- ZHU H L, XU J, WANG X H, HAN Y S, WANG X N. Hainan province sweetpotato industry development situation investigation and analysis[J]. *Agriculture and Technology*, 2019, 39(15): 7-9. (in Chinese)
- [35] 秦建军, 戴起伟, 汪翔, 陆建珍, 徐雪高. 海南甘薯产业发展特征与前景[J]. *农业展望*, 2020, 16(10): 77-81, 104.
- QIN J J, DAI Q W, WANG X, LU J Z, XU X G. Hainan sweetpotato industry characteristics and its prospect[J]. *Agricultural Outlook*, 2020, 16(10): 77-81, 104. (in Chinese)
- [36] 王雪薇, 刘涛, 褚贵新. 三种硝化抑制剂抑制土壤硝化作用比较及用量研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(1): 54-61.
- WANG X W, LIU T, CHU G X. Inhibition of DCD, DMPP and nitrapyrin on soil nitrification and their appropriate use

- dosage[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2017, 23(1): 54-61. (in Chinese)
- [37] 张文学, 王萍, 孙刚, 王少先, 刘增兵, 罗晓燕, 李祖章, 刘光荣. 脲酶抑制剂不同用量对土壤氮素供应的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2018(6): 38-44, 52.
- ZHANG W X, WANG P, SUN G, WANG S X, LIU Z B, LUO X Y, LI Z Z, LIU G R. Effects of variety succession and soil fertility on wheat yield and phosphorus physiological efficiency[J]. Soil and Fertilizer in China, 2018(6): 38-44, 52. (in Chinese)
- [38] 何照范. 粮油籽粒品质极其分析技术[M]. 北京: 农业出版社, 1985.
- HE Z F. Grain quality and analytical techniques of grain and oil[M]. Beijing: Agricultural Publishing House, 1985. (in Chinese)
- [39] 陆国权, 任韵, 唐忠厚, 吴晓琴. 甘薯黄酮类物质的提取及其基因型差异研究[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2005(5): 541-544.
- LU G Q, REN Y, TANG Z H, WU X Q. Flavonoid extraction and flavonoid content genotypic variation in sweet potato storage roots[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences), 2005(5): 541-544. (in Chinese)
- [40] 陆国权, 赵文静. 甘薯多酚最佳提取工艺及多酚含量的基因型差异研究[J]. 中国粮油学报, 2009, 24(3): 49-52.
- LU G Q, ZHAO W J. Sweetpotato polyphenol optimal extraction condition and genotypic variation in polyphenol content[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2009, 24(3): 49-52. (in Chinese)
- [41] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- WANG X K. Principles and techniques of plant physiological and biochemical experiments[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese)
- [42] DU X B, KONG L C, XI M, ZHANG X Y. Split application improving sweetpotato yield by enhancing photosynthetic and sink capacity under reduced nitrogen condition[J]. Field Crops Research, 2019, 238: 56-63.
- [43] 陶爽, 华晓雨, 王英男, 郭娜, 阎秀峰, 蔺吉祥. 不同氮素形态对植物生长与生理影响的研究进展[J]. 贵州农业科学, 2017, 45(12): 64-68.
- TAO S, HUA X L, WANG Y N, GUO N, YAN X F, LIN J X. Research advance in effects of different nitrogen forms on growth and physiology of plants[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2017, 45(12): 64-68. (in Chinese)
- [44] 李成阳, 柴沙沙, 刘意, 王连军, 雷剑, 杨新笋, 张文英. 不同氮素形态配比对甘薯前期氮代谢的影响及其生理机制[J]. 植物科学学报, 2021, 39(4): 433-445.
- LI C Y, CHAI S S, LIU Y, WANG L J, LEI J, YANG X S, ZHANG W Y. Effects of different nitrogen forms and ratios on nitrogen metabolism in *Ipomoea batatas* (L.) Lam. and their physiological mechanisms[J]. Plant Science Journal, 2021, 39(4): 433-445. (in Chinese)
- [45] 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.
- [46] MENG Y Y, WANG N, SI C C. The application of nitrogen source in regulating lignin biosynthesis, storage root development and yield of sweetpotato[J]. Agronomy, 2022, 12, 2317.
- [47] DU X B, ZHANG X Y, XI M, KONG L C. Split application enhances sweetpotato starch production by regulating the conversion of sucrose to starch under reduced nitrogen supply[J]. Plant Physiol Biochem, 2020, 151: 743-750.
- [48] 沈升法, 项超, 吴列洪, 李兵, 罗志高. 甘薯块根可溶性糖组分特征及其与食味的关联分析[J]. 中国农业科学, 2021, 54(1): 34-45.
- SHEN S F, XIANG C, WU L H, LI B, LUO Z G. Analysis on the characteristics of soluble sugar components in sweetpotato storage root and its relationship with taste[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(1): 34-45. (in Chinese)
- [49] 杨雪, 张丹丹, 李奇岩, 朱虹, 赵春梅, 唐艳艳, 程永峰, 王晶珊, 隋炯明. 淀粉型和鲜食型甘薯品种淀粉与可溶性糖含量的比较分析[J]. 青岛农业大学学报(自然科学版), 2021, 38(4): 240-244.
- YANG X, ZHANG D D, LI Q Y, ZHU H, ZHAO C M, TANG Y Y, CHENG Y F, WANG J S, SUI J M. Comparative analysis on the starch and soluble sugar contents of starch-type and edible varieties of sweetpotato[J]. Journal of Qingdao Agricultural University (Natural Science), 2021, 38(4): 240-244. (in Chinese)
- [50] 闫海锋, 李韦柳, 熊军, 韦民政, 唐秀桦. 不同贮藏温度对甘薯品质及失重率的影响[J]. 湖北农业科学, 2020, 59(2): 137-140.
- YAN H F, LI W L, XIONG J, WEI M Z, TANG X H. Effect of different storage temperature on quality and weight loss rate of sweetpotato[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2020, 59(2): 137-140. (in Chinese)
- [51] 高璐阳, 房增国, 史衍玺. 施氮量对鲜食型甘薯产量、品质及氮素利用的影响[J]. 华北农学报, 2014, 29(6): 189-194.
- GAO L Y, FANG Z G, SHI Y X. Effects of nitrogen application on yield quality and nitrogen utilization of fresh-eating sweetpotato[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2014, 29(6): 189-194. (in Chinese)