

# 施氮量对慈姑淀粉积累及淀粉合成酶活性的影响

林志城<sup>1</sup>, 江文<sup>1</sup>, 高美萍<sup>1</sup>, 陶运荣<sup>2</sup>, 杨群芳<sup>2</sup>, 梁玲玲<sup>2</sup>

(1. 广西壮族自治区农业科学院蔬菜研究所 南宁 530007; 2. 平乐县农业科学研究所 广西平乐 542400)

**摘要:** 为提高慈姑淀粉的积累, 改善球茎品质, 明确氮肥对慈姑淀粉积累的影响, 以广西慈姑主栽品种桂慈1号为试验材料, 设置4个不同氮肥水平, 探究不同施氮量对慈姑球茎发育过程中淀粉积累和淀粉合成关键酶活性的影响。结果表明, 增施氮肥对慈姑生长具有显著促进作用。随着施氮量的增加, 球茎中直链、支链及总淀粉含量均呈先增后减的变化趋势, 其中N2水平(240 kg·hm<sup>-2</sup>)处理对提高淀粉含量效果最显著。淀粉合成关键酶活性和淀粉积累速率出现的峰值不受施氮水平的影响, 均在定植后90 d出现。其中, 在定植后75、90 d, N2水平下支链淀粉和总淀粉积累速率达最大值。相关性分析表明, 淀粉积累速率与颗粒淀粉合成酶、可溶性淀粉合成酶活性呈显著正相关, 与腺嘌呤-葡萄糖焦磷酸化酶和淀粉分支酶活性呈极显著正相关。综合分析可知, 桂慈1号在240 kg·hm<sup>-2</sup>施氮量下淀粉含量最高, 合理的氮肥施用有利于慈姑淀粉的积累及其品质提升。

**关键词:** 慈姑; 施氮量; 淀粉积累量; 淀粉合成酶

中图分类号: S645.9

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2025)06-152-06

## Effects of nitrogen application rate on starch accumulation and starch synthetase activity in *Sagittaria sagittifolia*

LIN Zhicheng<sup>1</sup>, JIANG Wen<sup>1</sup>, GAO Meiping<sup>1</sup>, TAO Yunrong<sup>2</sup>, YANG Qunfang<sup>2</sup>, LIANG Lingling<sup>2</sup>

(1. Vegetable Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, Guangxi, China; 2. Pingle County Agricultural Science Research Institute, Pingle 542400, Guangxi, China)

**Abstract:** In order to study the effects of different nitrogen application rates on starch accumulation and the activity of key enzymes of starch synthesis during the development of *Sagittaria sagittifolia*, four different nitrogen application rates were set up with the main variety of *S. sagittifolia* Guici No. 1 in Guangxi as experimental material. With the increase of nitrogen application rate, the content of amylose, amylopectin and total starch in corms increased at first and then decreased, and N2 treatment (240 kg·hm<sup>-2</sup>) had the best effect. The peak time of enzyme activity and starch accumulation rate was not affected by different nitrogen application rates, which occurred in the middle stage of corm expansion (90 days after planting), and the amylopectin and total starch accumulation rate of N2 treatment had the maximum after planting 75 and 90 days. Further correlation analysis showed that the starch accumulation rate was significantly positively correlated with GBSS, SSS, AGPP, and SBE activity. In general, the starch content of Guici No. 1 is the highest under N2 treatment (240 kg·hm<sup>-2</sup>), and the reasonable application of nitrogen fertilizer is conducive to the accumulation of starch in *S. sagittifolia* and improvement of quality.

**Key words:** *Sagittaria sagittifolia*; Nitrogen application rate; Starch accumulation; Starch synthase

慈姑是泽泻科慈姑属直立水生草本植物, 又称慈菇、茨菇等, 原产中国, 食用部分为地下球茎, 供应冬季蔬菜市场。慈姑作为药食两用蔬菜, 不仅具有较高的营养价值, 还含有多种生物活性成分, 有凉血止血、散结解毒、止咳通淋之功效<sup>[1]</sup>。慈姑在中国分布于长江流域及其以南各省份, 太湖沿岸及珠

江三角洲为主产区, 北方有少量栽培<sup>[2]</sup>。目前广西栽培面积最大, 常年种植面积4000 hm<sup>2</sup>以上<sup>[3]</sup>。

淀粉是慈姑球茎的重要组成部分, 含量( $w$ , 后同)约为52.3%(干质量)。淀粉的合成受一系列酶调控, 主要有腺嘌呤-葡萄糖焦磷酸化酶(AGPP)、颗粒淀粉合成酶(GBSS)、可溶性淀粉合成酶(SSS)、

收稿日期: 2024-10-12; 修回日期: 2024-12-28

基金项目: 广西重点研发计划项目(桂科 AB23026151); 广西农业科学院科技发展基金(桂农科 2024YP014, 桂农科 TS202109, 桂农科 2021YT086)

作者简介: 林志城, 男, 农艺师, 主要从事果蔬种苗繁育、栽培生理等研究。E-mail: 150329403@qq.com

通信作者: 高美萍, 女, 研究员, 主要从事水生蔬菜新品种选育及栽培技术推广应用研究。E-mail: 5476581@qq.com

淀粉分支酶(SBE)和去分支酶(DBE)<sup>[4-6]</sup>。诸多研究表明,氮肥能影响淀粉的生物合成。吴世雨等<sup>[7]</sup>在甘薯中研究表明,在块根膨大过程中,施氮量会对甘薯块根膨大过程中淀粉含量及特性产生显著影响,施用氮肥可显著提高心香和商薯 19 两个甘薯品种的淀粉含量。戴明等<sup>[8]</sup>在玉米中研究表明,施氮可显著影响寒区春玉米干物质积累和淀粉合成,在较高的氮水平下,玉米干物质积累量、淀粉合成相关酶活性及淀粉积累速率更高。在马铃薯中,李勇等<sup>[9]</sup>选用高淀粉品种克新 22 号和低淀粉品种克新 19 号进行研究,结果表明,2 个品种块茎的淀粉产量随施氮量的增加则呈先增加后降低的趋势,其中施氮量为 150 kg·hm<sup>-2</sup>时,高淀粉品种克新 22 号块茎的淀粉产量达到最高,为 11.27 t·hm<sup>-2</sup>;施氮量为 225 kg·hm<sup>-2</sup>时,低淀粉品种克新 19 号块茎的淀粉产量达到最高,为 8.99 t·hm<sup>-2</sup>。由此可见,氮肥对不同作物的淀粉生物合成影响不一,具有较大差异。

慈姑淀粉近些年来逐渐被开发利用。日本、韩国等对慈姑片、慈姑淀粉等的需求量不断增加,慈姑种植面积逐年扩大。目前,国内外在慈姑淀粉合成方面的研究较少,而氮肥对慈姑淀粉含量及淀粉合成酶活性的影响至今尚未见报道。鉴于此,笔者以广西主栽慈姑品种桂慈 1 号为试验材料,通过设置 4 个不同施氮水平处理,研究慈姑球茎发育过程中淀粉积累规律及淀粉合成关键酶 AGPP、GBSS、SSS 和 SBE 活性对氮肥的响应,初步探明施氮量对慈姑淀粉积累及淀粉合成酶活性的影响,以期为进一步阐明慈姑淀粉生物合成机制奠定基础,同时有利于指导生产上慈姑氮肥管理和慈姑品质机制进一步研究,从而提升慈姑的产业化发展水平。

## 1 材料与方

### 1.1 材料

试验于 2022 年和 2023 年在广西桂林市平乐县桥亭乡进行。该区属亚热带季风气候区,年均气温 19.9 °C,白天日照时间长,每年有 310 d 无霜期。土壤质地为红壤土,通气、透水性能良好,适宜慈姑球茎生长发育。测定的土壤基本理化性状如下:pH 6.4,有机质含量(w,后同)64.3 g·kg<sup>-1</sup>,全氮含量 2.16 g·kg<sup>-1</sup>,有效磷含量 16.5 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾含量 83 mg·kg<sup>-1</sup>。供试肥料为尿素(N 含量 46%)、氯化钾(K<sub>2</sub>O 含量 60%)、过磷酸钙(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量 16%),均购自当地农资市场。供试植物材料为目前广西慈姑主栽品种桂慈 1 号,由广西农业科学院自主选育。

### 1.2 试验设计

试验采用完全随机区组设计,设置施氮量 4 个水平,分别为不施氮肥处理(CK)、120 kg·hm<sup>-2</sup>(N1)、240 kg·hm<sup>-2</sup>(N2)和 360 kg·hm<sup>-2</sup>(N3)。施用方法:氮肥总量的 50%作基肥(定植前),20%第一次追肥(幼苗期,定植后 30 d),20%第二次追肥(分蘖期,定植后 60 d),10%第三次追肥(膨大初期,定植后 75 d)。具体氮肥施用量和时期见表 1。磷肥总量 30%作基肥,30%作第一次追肥,20%第二次追肥(膨大初期),20%第三次追肥(膨大中期)。钾肥总量 30%作为基肥,20%作第一次追肥,20%第二次追肥(膨大初期),30%第三次追肥(膨大中期)。试验小区面积 30 m<sup>2</sup>,株行距 40 cm×60 cm,种植密度为 2800 株·667 m<sup>2</sup>,3 次重复,共计 12 个小区。试验分别于 2022 年 8 月 20 日和 2023 年 8 月 20 日,移栽至大田定植,12 月 30 日收获,其他田间管理措施按照当地高产栽培要求实施。

表 1 慈姑氮肥施用量和施用时期

Table 1 Different nitrogen application rates and application periods of *S. sagittifolia* (kg·hm<sup>-2</sup>)

| 处理<br>Treatment | 总施氮量<br>Total<br>nitrogen | 基肥<br>Base<br>fertilizer | 幼苗期<br>Seedling<br>stage | 分蘖期<br>Tillering<br>stage | 膨大初期<br>Initial stage<br>of expansion |
|-----------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------------------|
| CK              | 0                         | 0                        | 0                        | 0                         | 0                                     |
| N1              | 120                       | 60                       | 24                       | 24                        | 12                                    |
| N2              | 240                       | 120                      | 48                       | 48                        | 24                                    |
| N3              | 360                       | 180                      | 72                       | 72                        | 36                                    |

### 1.3 测定项目与方法

1.3.1 材料采集 从慈姑移栽定植后 60 d 开始采集样品,每隔 15 d 采集一次,共采集 4 次。试验小区的一半设为采样区,另一半设为考种测量区。所采样品一部分烘干至恒质量,测定干物质含量,另一部分样品经液氮处理后,保存于-80 °C,用于测定相关酶活性。

1.3.2 农艺性状测定 定植后 60 d 测定株高和分蘖数;充分成熟期,去除边际效应,采用 3 点取样法,随机选取 3 个点,每点连续挖取 10 株,称其球茎质量,统计球茎的质量和数量,求出平均单株产量。产量=平均单株产量×667 m<sup>2</sup>株数。

1.3.3 淀粉积累量及关键酶活性测定 参照试剂盒说明书,测定直链、支链、总淀粉含量和淀粉合成关键酶(GBSS、AGPase、SSS 和 SBE)活性,试剂盒均由苏州格锐思生物科技有限公司提供。

### 1.4 数据分析

采用 2 a(年)试验数据的平均值进行分析。采

用 SPSS 20.0 软件进行数据统计分析,采用 Origin 2019 制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 施氮量对慈姑产量及产量构成因素的影响

由表 2 可知,施氮量对慈姑产量及产量构成因素影响显著。不同氮肥水平下,慈姑株高、分蘖数、球茎平均单果质量及产量均显著大于不施氮处理(CK)。随着施氮量的增加,株高和分蘖数呈持续

增加趋势,在 N3 水平下达最大值;慈姑球茎横径、球茎纵径、平均单果质量及产量随施氮量增加呈先上升后下降的趋势,在 N2 水平下达最大值。除不施氮 CK 外,各氮肥处理下,球茎横径和纵径差异并不显著;在低氮(N1)和高氮(N3)水平处理下,平均单果质量差异不显著。以上结果表明,与 CK 相比,一定范围内增施氮肥对慈姑的生长发育具有明显的促进作用,但高施氮下,产量并未增加反而下降。

表 2 施氮量对慈姑产量及产量构成因子的影响

Table 2 Effects of nitrogen application rate on yield and yield components of *S. sagittifolia*

| 处理<br>Treatment | 株高<br>Plant height /cm | 分蘖数<br>Number of tiller | 球茎横径<br>Bulb transverse diameter/cm | 球茎纵径<br>Bulb longitudinal diameter/cm | 平均单果质量<br>Average single fruit mass/g | 产量<br>Yield/(t·hm <sup>2</sup> ) |
|-----------------|------------------------|-------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|
| CK              | 85.8±1.2 c             | 6.9±1.2 c               | 4.5±0.3 b                           | 3.8±0.2 b                             | 62.1±1.2 c                            | 11.38±0.12 d                     |
| N1              | 89.6±1.7 b             | 8.7±1.2 b               | 5.7±0.2 ab                          | 5.2±0.2 ab                            | 76.4±1.9 b                            | 12.63±0.16 c                     |
| N2              | 92.2±1.4 a             | 9.2±1.1 a               | 6.5±0.4 a                           | 5.6±0.3 a                             | 86.2±1.4 a                            | 18.12±0.19 a                     |
| N3              | 94.2±1.2 a             | 10.1±1.4 a              | 6.1±0.3 a                           | 5.4±0.3 a                             | 75.4±1.2 b                            | 14.36±0.13 b                     |

注:不同小写字母表示不同处理在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference among different treatments at 0.05 level. The same below.

### 2.2 施氮量对慈姑球茎淀粉含量和淀粉积累速率的影响

由表 3 可知,随着慈姑球茎膨大过程的推进,球茎中直链淀粉含量呈下降趋势,而支链淀粉和总淀粉含量则一直呈上升趋势。与 CK 相比,一定范围内施用氮肥,能够显著提高慈姑球茎中的直链淀粉、支链淀粉和总淀粉含量,而不施氮肥(CK)的各指标含量较低。其中,N2 水平下直链淀粉、支链淀粉和总淀粉含量提高的效果最显著,直链淀粉含量在球茎膨大初期(定植后 60 d)达到最高 195.6 mg·g<sup>-1</sup>,而支链淀粉和总淀粉含量均在球茎膨大后期(定植后 105 d)达到最高值,分别为 453.7 mg·g<sup>-1</sup>和 555.7 mg·g<sup>-1</sup>。高氮(N3)处理下,直链淀粉、支链淀粉及总淀粉含量显著低于 N2 处理,但高于 CK 和

N1(除支链淀粉含量在定植 90 d 外)。以上结果表明,慈姑对氮肥需求量较大,但过量氮肥也会导致慈姑球茎中直链淀粉、支链淀粉和总淀粉含量下降。

图 1 结果表明,随着慈姑球茎膨大过程的推进,各施氮处理球茎中直链淀粉的积累速率呈先降后升的趋势;N2 处理的支链淀粉的积累速率呈下降趋势,其他处理均呈先升后降的趋势;各处理总淀粉积累速率均符合先升后降的趋势。在施氮各处理中,随着施氮量的增加,直链淀粉在定植 90、105 d 的积累速率呈先上升后下降再上升的趋势,而支链淀粉和总淀粉积累速率在定植 75、90 d 均呈先上升后下降的趋势,总淀粉积累速率在定植 105 d 呈先下降后上升的趋势。其中,在定植 75 和 90 d,N2 水平下支链淀粉和总淀粉积累速率达最大值。当

表 3 施氮量对慈姑球茎膨大过程中直链、支链和总淀粉积累的影响

Table 3 Effects of nitrogen application on amylose, amylopectin and total starch accumulation during

bulb expansion of *S. sagittifolia*

(mg·g<sup>-1</sup>)

| 处理<br>Treatment | w(直链淀粉) Amylose content       |         |         |         | w(支链淀粉) Amylopectin content   |         |         |         | w(总淀粉) Total starch content   |         |         |         |
|-----------------|-------------------------------|---------|---------|---------|-------------------------------|---------|---------|---------|-------------------------------|---------|---------|---------|
|                 | 定植时间<br>Time after planting/d |         |         |         | 定植时间<br>Time after planting/d |         |         |         | 定植时间<br>Time after planting/d |         |         |         |
|                 | 60                            | 75      | 90      | 105     | 60                            | 75      | 90      | 105     | 60                            | 75      | 90      | 105     |
| CK              | 121.6 d                       | 107.6 c | 80.2 c  | 52.3 c  | 121.3 c                       | 168.9 c | 213.5 c | 285.6 c | 242.9 d                       | 276.5 d | 313.7 d | 337.9 d |
| N1              | 132.3 c                       | 114.2 c | 91.4 bc | 76.2 b  | 142.0 b                       | 201.0 b | 293.1 b | 321.1 b | 274.3 c                       | 315.2 c | 384.4 c | 397.3 c |
| N2              | 195.6 a                       | 166.7 a | 132.0 a | 102.0 a | 192.0 a                       | 256.2 a | 340.9 a | 453.7 a | 396.6 a                       | 464.9 a | 522.9 a | 555.7 a |
| N3              | 159.7 b                       | 132.4 b | 101.0 b | 80.1 b  | 159.7 b                       | 221.3 b | 289.3 b | 350.2 b | 317.9 b                       | 347.7 b | 399.3 b | 430.3 b |

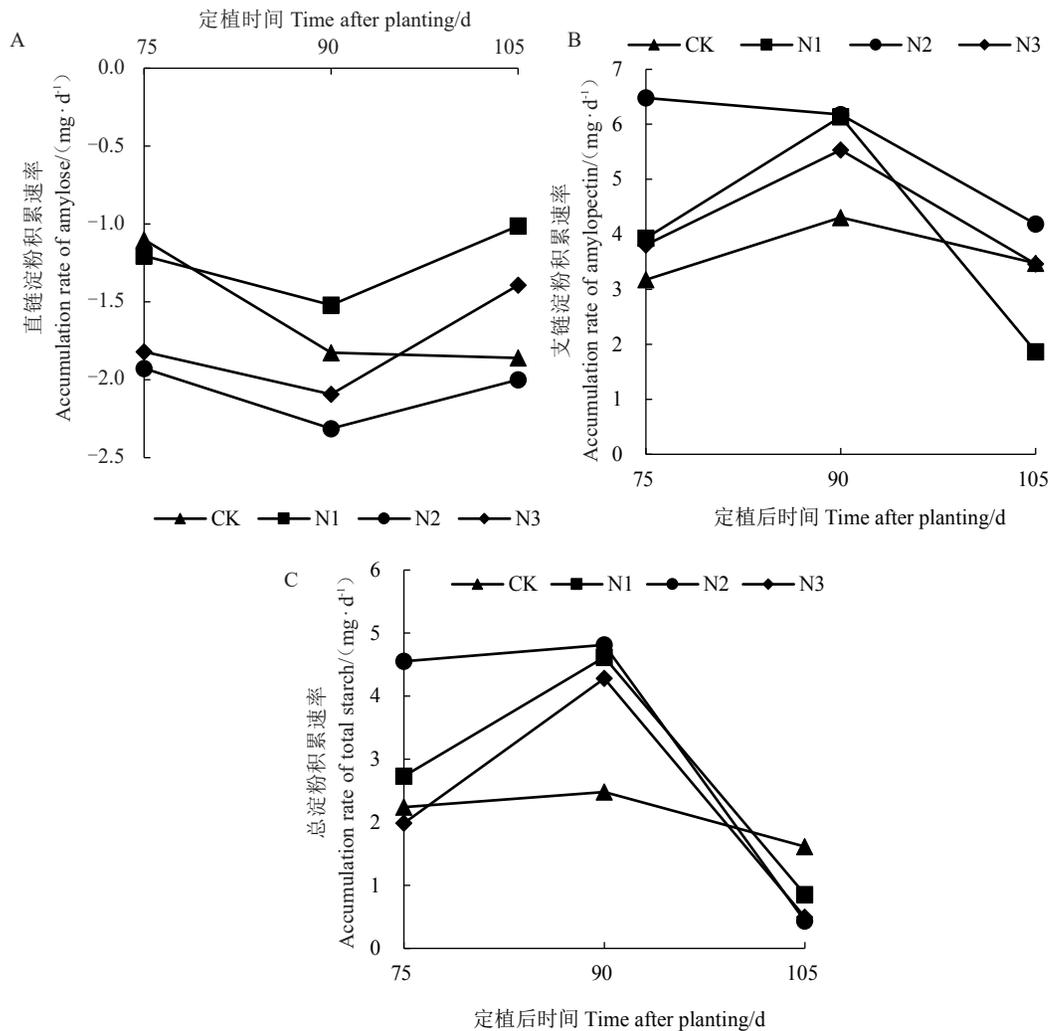


图 1 不同氮肥处理下慈姑直链淀粉(A)、支链淀粉(B)和总淀粉(C)积累速率

Fig. 1 Accumulation rate of amylose(A), amylopectin(B) and total starch(C) in *S. sagittifolia* under different nitrogen fertilizer treatments

施氮达到 N3 水平时,支链淀粉积累速率有所下降,总淀粉积累速率在定植 75、90 d 均有所下降,在 105 d 较 N2 有一定提高。由此可见,不同氮肥处理对球茎中直链、支链和总淀粉积累速率存在不同程度的影响,而不同施氮水平对各淀粉积累速率峰值和谷值出现的时间影响不大,均发生在膨大中期(定植后 90 d)。

### 2.3 施氮量对慈姑球茎淀粉合成关键酶活性的影响

由图 2 可知,在慈姑球茎膨大过程中,GBSS 活性呈先降后升的趋势,而 AGPP、SSS 和 SBE 活性则呈先升后降的趋势。在定植后 60~90 d,随施氮量增加,GBSS、SSS 和 SBE 活性均呈先升后降的趋势,在 N1 或 N2 水平达最高,而 N3 高氮处理下,活性均有所降低。不同氮肥水平对 AGPP、GBSS、SSS 和 SBE 活性峰值或谷值出现的时间影响不大,其中 GBSS 活性谷值出现在膨大中期,而 AGPP、

SSS 和 SBE 活性峰值也均出现在膨大中期。

### 2.4 不同施氮水平下慈姑淀粉积累速率与关键酶活性相关性分析

由表 4 可知,不同氮肥水平下,球茎中淀粉积累速率与 AGPP、GBSS、SSS 和 SBE 活性均呈显著或极显著正相关。其中,GBSS、SSS 活性与淀粉积累速率均呈显著正相关,AGPP、SBE 活性与淀粉积累速率均呈极显著正相关,说明 AGPP 和 SBE 在慈姑球茎淀粉积累中起重要作用。

## 3 讨论与结论

现代作物的高产常常伴随着大量甚至过量的氮肥投入。许多研究表明,过量氮肥施用不利于作物产量和品质提高。笔者对不同施氮量对慈姑产量及构成因子的影响分析表明,施用氮肥能有效促进慈姑生长从而获得较高产量。施氮量为 240 kg·hm<sup>-2</sup>(N2)不仅能

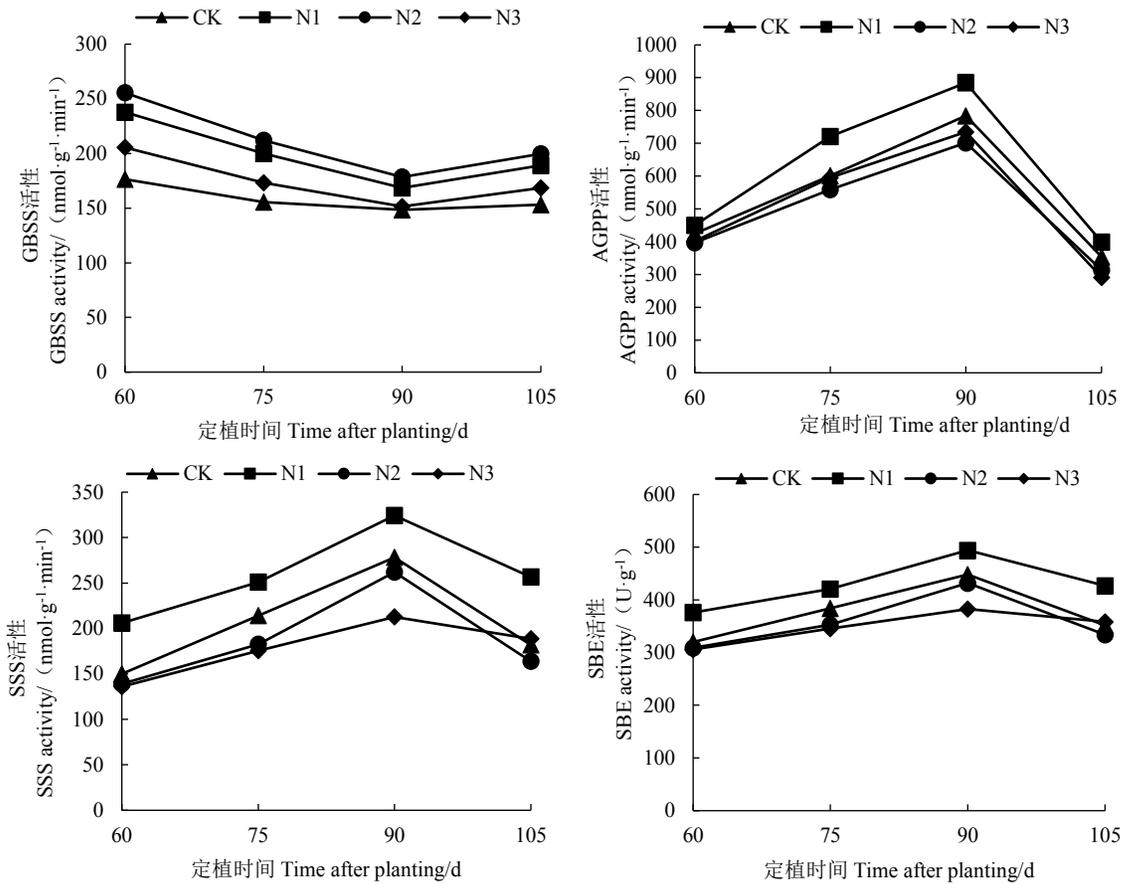


图2 不同氮肥处理对慈姑 AGPP、GBSS、SSS 和 SBE 活性的影响

Fig. 2 Effects of different nitrogen application rates on AGPP、GBSS、SSS and SBE activity in *S. sagittifolia*

表4 不同氮肥处理下慈姑淀粉积累速率与酶活性的相关性分析

Table 4 Correlation analysis of starch accumulation rate and enzyme activity in *S. sagittifolia* under different nitrogen fertilizer treatments

| 酶活性<br>Enzyme activity | 淀粉积累速率 Starch accumulation rate |         |         |         | 所有处理<br>All treatments |
|------------------------|---------------------------------|---------|---------|---------|------------------------|
|                        | CK                              | N1      | N2      | N3      |                        |
| AGPP                   | 0.931**                         | 0.973** | 0.964** | 0.968** | 0.978**                |
| GBSS                   | 0.918*                          | 0.917*  | 0.921*  | 0.922*  | 0.935*                 |
| SSS                    | 0.895*                          | 0.921*  | 0.927*  | 0.926*  | 0.917*                 |
| SBE                    | 0.968**                         | 0.976** | 0.969** | 0.981** | 0.974**                |

注: \*和\*\*分别表示在 0.05 和 0.01 水平显著相关。

Note: \* and \*\* indicate significant correlation at 0.05 and 0.01 level, respectively.

增加分蘖数,还能提高平均单果质量,最终增加产量;而过量施用氮肥(N3)虽增加株高和分蘖数,但平均单果质量下降,球茎产量并未提高,这可能是由于生育后期过量施氮造成慈姑贪青晚熟,无效分蘖增多,不利于增产。韩柏岳等<sup>[10]</sup>研究表明,在高原东部旱作麦区,适宜施氮量(150 kg·hm<sup>-2</sup>)能增加叶面积指数,保证光能利用,最终增加收获指数和产量;而过量施用氮肥(210 kg·hm<sup>-2</sup>)虽增加干物质质量和株高,但叶面

积指数未增加,收获指数下降,籽粒产量下降,这与本研究结果相似,类似报道还见于水稻<sup>[11]</sup>、甘薯<sup>[12]</sup>、芹菜<sup>[13]</sup>、高粱<sup>[14]</sup>等作物。而何嘉辉等<sup>[15]</sup>在水稻中的研究表明,适当减施氮肥和增施氮肥对超级稻玮两优 8612 产量均未造成显著的影响,这可能与自身氮肥利用特性有关。由此可见,不同物种或品种对氮肥响应具有差异性,后续还有待进一步探讨。

淀粉是慈姑球茎中的重要贮藏成分,淀粉的合成涉及多阶段的酶促反应,AGPP、SSS、GBSS、SBE 发挥着关键作用,分析关键酶活性对优化慈姑淀粉合成和提高产量具有重要意义。关于氮肥对淀粉合成关键酶活性的影响已有较多报道,但结果不一。李勇等<sup>[9]</sup>研究认为,氮肥能提升高淀粉品种马铃薯淀粉合成相关酶活性和淀粉的积累量。白文明<sup>[16]</sup>试验表明,前期施氮使淀粉合成酶活性降低,中后期施氮使淀粉合成酶活性提高,而最终淀粉含量无明显变化。余双双<sup>[17]</sup>研究发现,适当增施氮肥能够有效提升小麦灌浆中后期淀粉合成酶活性和淀粉含量,其中 YN301 品种在施氮量为 240 kg·hm<sup>-2</sup>时酶活性综合表现最佳。李双等<sup>[18]</sup>在小麦籽粒中有相似的报告,且指出过量氮肥会

抑制淀粉合成酶活性。本研究结果表明,增施氮肥,能提升淀粉合成酶 GBSS、AGPP、SSS、SBE 的活性,但过量施用反而降低酶活性,其中施氮量为  $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  时的酶活性综合表现最佳。本研究进一步表明,AGPP、SBE 及 SSS 活性随着球茎膨大进程的推进,均呈先升高后降低的趋势,且均在移栽后 90 d 达到峰值,而 GBSS 活性随着球茎膨大进程的推进,均呈先降低后升高的趋势,在移栽后 90 d 达到谷值,其中施氮量为  $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  的处理酶活性最高,与余双双<sup>[17]</sup>的研究结果一致。

淀粉含量及直链/支链淀粉比值对作物产量和品质具有重要影响。李勇等<sup>[9]</sup>研究表明,随着施氮量的增加,克新 22 号马铃薯的块茎直链、支链及总淀粉含量均呈先增加后降低的单峰曲线变化。高美萍等<sup>[19]</sup>对荸荠研究有类似的报道,柳强娟等<sup>[20]</sup>对宁夏旱区马铃薯块茎研究表明,随着施氮量的增加,总淀粉和支链淀粉含量呈先上升后下降的趋势,而直链淀粉含量则随着施氮量的增加呈增加趋势;还有研究表明,提高氮肥水平可以降低直链/支链淀粉的比值,达到改善面条加工品质的效果<sup>[21]</sup>。在本试验中,与 CK 相比,一定范围内施用氮肥,能够显著提高慈姑球茎中的直链淀粉、支链淀粉和总淀粉含量,随着施氮量的增加呈先增后降的趋势,当施氮达到 N3 水平时,均有所下降。上述研究结果与柳强娟等<sup>[20]</sup>、高美萍等<sup>[19]</sup>的研究结果一致。由此可见,不同作物的直链淀粉、支链淀粉和总淀粉含量对氮肥的响应具有差异性,这可能与作物自身对氮肥吸收利用有关,可待后续深入探讨。

淀粉合成酶活性决定着淀粉合成及淀粉积累速率。在玉米中,与不施氮肥或低氮水平相比,较高的氮水平下,玉米氮素吸收量、淀粉合成相关酶活性及淀粉积累速率更高,淀粉合成相关酶活性与淀粉积累速率、淀粉含量和产量均呈显著正相关<sup>[8]</sup>。在马铃薯研究中表明,AGPP、UGPP、SSS、GBSS、SBE 活性与淀粉含量均呈正相关,其中 AGPP 活性对各类淀粉含量的直接贡献最大<sup>[20]</sup>。本研究结果表明,AGPP、GBSS、SSS 和 SBE 活性与淀粉积累速率均呈显著或极显著正相关,进一步表明,AGPP、GBSS、SSS 和 SBE 活性对淀粉合成及淀粉积累速率具有重要影响。

综上所述,施加氮肥会对慈姑球茎膨大过程中直链淀粉、支链淀粉和总淀粉含量及其淀粉合成酶(AGPP、GBSS、SSS 和 SBE)活性产生不同程度的影响。其中桂慈 1 号在  $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  施氮量下淀粉含量

最高,合理施氮有利于慈姑淀粉的积累及其品质提升。

### 参考文献

- [1] GAO M P, ZHANG S W, LUO C, et al. Transcriptome analysis of starch and sucrose metabolism across bulb development in *Sagittaria sagittifolia*[J]. *Gene*, 2018, 649:99-112.
- [2] 吴曼,宗义湘,赵帮宏,等.中国水生蔬菜产业发展现状、存在问题及发展思路[J]. *长江蔬菜*, 2019(2):35-41.
- [3] 陶运荣,高美萍,江文,等.国家地理标志保护产品:平乐慈姑[J]. *长江蔬菜*, 2022(22):32-34.
- [4] HORACIO P, MARTINE-NOEL G. Sucrose signaling in plants: A world yet to be explored[J]. *Plant Signaling and Behavior*, 2013, 8(3):e23316.
- [5] HUANG L C, TAN H Y, ZHANG C Q, et al. Starch biosynthesis in cereal endosperms: An updated review over the last decade[J]. *Plant Communications*, 2021, 2(5):100237.
- [6] GIUBERTI G, ROCCHETTI G, LUCINI L. Interactions between phenolic compounds, amylolytic enzymes and starch: An updated overview[J]. *Current Opinion in Food Science*, 2020, 31(Sup.1):102-113.
- [7] 吴世雨,陈匡稷,吕尊富,等.施氮量对甘薯块根膨大过程中淀粉含量及特性的影响[J]. *作物学报*, 2023, 49(4):1090-1101.
- [8] 戴明,冯鹏羽,郭海滨,等.氮肥运筹对东北寒区春玉米氮素吸收、利用及淀粉合成的影响[J]. *江苏农业科学*, 2024, 52(7):101-109.
- [9] 李勇,吕文河,吕典秋,等.施氮水平对不同淀粉型马铃薯块茎产量和淀粉品质的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2019, 24(3):27-38.
- [10] 韩柏岳,任爱霞, NOOR H, 等.施氮量对旱地小麦花后糖代谢及籽粒产量的影响[J]. *山东农业科学*, 2024, 56(4):81-86.
- [11] 赵霞,刘然方.水稻灌浆期籽粒淀粉合成及其氮素调控作用研究进展[J]. *杂交水稻*, 2021, 36(2):1-7.
- [12] 丁芳,孙喜云,刘广卿,等.不同追肥处理对叶菜型甘薯产量、品质及硝酸盐积累的影响[J]. *中国瓜菜*, 2024, 37(7):156-162.
- [13] 田伟,冯海萍.宁夏六盘山区芹菜栽培对氮肥施用量的响应差异[J]. *中国瓜菜*, 2024, 37(6):126-134.
- [14] 张艳慧,董二伟,王劲松,等.不同株高类型杂交高粱产量、养分吸收及品质对氮肥的响应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(1):68-80.
- [15] 何嘉辉,李艳锋,严天泽,等.氮肥减施对超级稻玮两优 8612 产量及品质的影响[J]. *作物杂志*, 2024(5):73-79.
- [16] 白文明.氮肥对甜荞产量与品质及籽粒淀粉合成关键酶活性的影响[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学, 2019.
- [17] 余双双.施氮水平对高产小麦旗叶衰老及产量、品质形成的影响[D]. 山东烟台:烟台大学, 2024.
- [18] 李双,司转运,申孝军,等.水氮供应对灌浆期冬小麦籽粒淀粉合成相关酶活性及产量的影响[J]. *麦类作物学报*, 2018, 38(4):460-468.
- [19] 高美萍,陶运荣,蒋慧萍,等.不同氮肥处理对荸荠产量、淀粉积累及淀粉合成酶活性的影响[J]. *作物杂志*, 1-8(2024-08-08). <https://link.cnki.net/urlid/11.1808.S.20240807.1502.010>.
- [20] 柳强娟,康建宏,吴佳瑞,等.施氮量对宁夏旱区马铃薯块茎淀粉形成和产量的影响[J]. *核农学报*, 2021, 35(5):1196-1208.
- [21] 董二伟,王媛,王劲松,等.施氮量对谷子产量、氮素利用及小米品质的影响[J]. *中国农业科学*, 2024, 57(2):306-318.