

张玉洁, 王荣华, 王茂芋. 氧化型谷胱甘肽引发对甜菜种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. 江苏农业学报, 2025, 41( 10 ): 1899-1906.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2025.10.003

# 氧化型谷胱甘肽引发对甜菜种子萌发及幼苗生理特性的影响

张玉洁<sup>1</sup>, 王荣华<sup>2</sup>, 王茂芋<sup>1</sup>

(1. 黑龙江大学现代农业与生态环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 石河子农业科学研究院, 新疆 石河子 832099)

**摘要:** 为明确氧化型谷胱甘肽(GSSG)引发对甜菜种子萌发能力及幼苗生理特征的影响, 本研究以甜菜品种801的种子为材料, 设置6个不同质量浓度(10 mg/L、20 mg/L、50 mg/L、100 mg/L、200 mg/L、500 mg/L) GSSG溶液和2个浸种时间(16 h和24 h)的引发处理, 分析不同质量浓度GSSG溶液及不同引发时间对甜菜种子萌发能力及幼苗生理指标的影响。结果表明, 与未引发对照(CK)相比, 不同质量浓度GSSG引发16 h和24 h处理总体上能显著提高甜菜种子发芽指数和活力指数, 降低甜菜种子电导率, 而对发芽率无显著影响。不同引发处理甜菜幼苗抗氧化酶活性、丙二醛(MDA)含量、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>含量存在较大变化。与CK相比, 20 mg/L、50 mg/L、100 mg/L GSSG引发24 h处理总体上能显著提升甜菜幼苗抗氧化酶活性、降低H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>含量和MDA含量, 而10 mg/L和20 mg/L GSSG引发16 h处理、200 mg/L和500 mg/L GSSG引发24 h处理则总体上能降低抗氧化酶活性, 增加H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>含量和MDA含量。大部分引发处理甜菜幼苗的可溶性糖含量和可溶性蛋白含量呈增加趋势。总之, 大部分GSSG引发处理能修复细胞膜损伤、调控氧化应激和促进渗透物质积累来提升种子活力, 其中, 20 mg/L GSSG引发24 h的处理效果较好。

**关键词:** 甜菜; 氧化型谷胱甘肽; 种子引发; 萌发; 幼苗生理

**中图分类号:** S566.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2025)10-1899-08

## Effects of oxidized glutathione priming on seed germination and seedling physiological characteristics of sugar beet

ZHANG Yujie<sup>1</sup>, WANG Ronghua<sup>2</sup>, WANG Maoqian<sup>1</sup>

(1. College of Advanced Agriculture and Ecological Environment, Heilongjiang University, Harbin 150080, China; 2. Shihezi Academy of Agricultural Sciences, Shihezi 832099, China)

**Abstract:** To clarify the effects of oxidized glutathione (GSSG) priming on seed germination ability and seedling physiological characteristics of sugar beet, the seeds of sugar beet 801 were used as the experimental material in this study.

Six different mass concentrations (10 mg/L, 20 mg/L, 50 mg/L, 100 mg/L, 200 mg/L, 500 mg/L) of GSSG solution and two durations (16 h and 24 h) of priming treatment were set up to analyze their effects on seed germination ability and seedling physiological indexes of sugar beet. The results showed that compared with the non-soaked control (CK), the germination index and vigor index of sugar beet seeds were significantly increased, and the conductivity of sugar beet seeds was decreased by priming with different concentrations of GSSG solution for 16 h and 24 h, but there was no significant effect on germination rate. Under different priming treatments, the antioxidant enzyme activity, malondialdehyde (MDA) content and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> con-

收稿日期: 2025-04-24

**基金项目:** 师市计划项目(2024ZDNY11); 财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系(糖料)子项目(CARS-17011004、CARS-170113-1); 财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系(糖料)建设项目(CARS-170102); 国家自然科学基金面上项目(32272148); 黑龙江省博士后面上项目(LBH-Z22246)

**作者简介:** 张玉洁(2001-), 女, 山西晋城人, 硕士研究生, 研究方向为甜菜种子引发和遗传育种。(E-mail) 1917699718@qq.com

**通讯作者:** 王茂芋, (E-mail) haixiang80@166.com

tent of sugar beet seedlings changed greatly. Compared with CK, treatments with 20 mg/L, 50 mg/L, 100 mg/L GSSG solution for priming 24 h could significantly improve the antioxidant enzyme activity of sugar beet seedlings, reduce  $H_2O_2$  content and MDA content, while treatments with 10 mg/L and 20 mg/L GSSG solution for priming 16 h, 200 mg/L and 500 mg/L GSSG solution for priming 24 h could reduce the antioxidant enzyme activity, increase  $H_2O_2$  content and MDA content. The soluble sugar content and soluble protein content of sugar beet seedlings under most priming treatments showed an increasing trend. In conclusion, most GSSG priming treatments can improve seed vigor by repairing membrane damage, regulating oxidative stress and promoting the accumulation of osmotic substances. Among them, the treatment with 20 mg/L GSSG solution for 24 h is identified as the most effective.

**Key words:** sugar beet; oxidized glutathione; seed priming; germination; seedling physiology

甜菜(*Beta vulgaris* L.)是全球仅次于甘蔗的重要糖料作物。作为中国糖料供给的核心作物之一,甜菜已被纳入国家战略物资体系,对保障食糖供应、维护农产品产业链安全稳定具有关键作用<sup>[1]</sup>。此外,甜菜制糖的副产物,如糖蜜、甜菜粕、滤泥等在乙醇、甘油、饲料和肥料的生产中有广泛应用<sup>[2]</sup>。目前,中国的甜菜种植区主要集中在西北、华北和东北等地区,新疆、内蒙古和黑龙江3个省的甜菜种植面积和甜菜糖产量均居全国前列<sup>[3]</sup>。目前,中国甜菜糖产量约占全国食糖总产量的13%<sup>[4]</sup>,全球甜菜糖产量占全球糖产量的35%。提高甜菜产量、品质、抗逆性和适应性的关键是改善种质资源,但是甜菜种子普遍存在发芽缓慢、整齐度低、抗逆能力差等问题,因此,如何提高甜菜种子发芽质量是目前生产中急需解决的关键问题。

引发的种子一般具有较强的抗病性、较高的活力、萌发率、抗逆能力及较好的出苗整齐度和成活率,因此种子引发技术在作物生产中已得到广泛应用<sup>[5]</sup>。目前,种子引发技术在甜菜等作物生产中已大量应用。刘祚源等<sup>[6]</sup>的研究结果表明,低剂量(100 Gy)的<sup>60</sup>Co- $\gamma$ 射线辐射能有效提升二倍体甜菜种子的发芽能力,而高剂量(300 Gy)的辐射则对种子萌发产生严重抑制。王仁汉等<sup>[7]</sup>研究发现,亚精胺引发处理可缓解NaCl胁迫对甜菜种子萌发的抑制,能显著提升甜菜种子的发芽活力及耐盐性,适宜的亚精胺引发浓度为1.0 mmol/L。张冰<sup>[8]</sup>的研究结果表明,20 mg/L纳米硒与亚硒酸钠引发处理可显著促进甜菜种子发芽,叶面喷硒处理能提高甜菜块根硒含量,并调控营养元素积累。孙梦媛等<sup>[9]</sup>比较了3种引发剂对甜菜种子萌发及幼苗生长的影响,结果显示,100 mg/L赤霉素(GA)处理甜菜种子发芽势、发芽率及幼苗生长指标均显著高于水杨酸处理和褪黑素处理。毕生斌<sup>[10]</sup>的研究结果表明,现蕾期

喷施15%氧化型谷胱甘肽(GSSG)水溶肥能显著提升马铃薯商品率和产量。周德等<sup>[11]</sup>的研究结果表明,外源还原型谷胱甘肽(GSH)可以缓解镉污染对紫花苜蓿的毒害作用,降低植株的氧化损伤。

氧化型谷胱甘肽与还原型谷胱甘肽一起构成植物的氧化还原缓冲体系,参与植物多种生理过程,在植物应对环境逆境过程中发挥重要作用。GSSG与GSH通过谷胱甘肽还原酶(GR)和还原型烟酰胺腺嘌呤二核苷酸磷酸(NADH)的协同作用实现动态平衡。氧化应激条件下,GSH被氧化为GSSG以中和活性氧(ROS),无氧化胁迫时,GSSG被还原为GSH,维持细胞内还原性环境。GSSG的积累可激活氧化还原敏感的转录因子,促进超氧化物歧化酶(SOD)基因和过氧化氢酶(CAT)基因的表达。GSSG还参与光呼吸途径中甘氨酸代谢,影响线粒体和叶绿体的能量转换效率,从而调节碳氮平衡。GSSG不仅是植物应对氧化应激的缓冲剂,还在重金属解毒、低温保护、信号传导等过程中发挥核心作用。针对GSSG在甜菜生产中应用较少的现状,本研究拟通过不同浓度的GSSG溶液引发甜菜种子处理,分析其对甜菜种子萌发、幼苗生理指标的影响,旨在提升甜菜生产水平。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试材料甜菜品种801由黑龙江大学甜菜遗传育种课题组提供。纯度 $\geq 98\%$ 的氧化性谷胱甘肽(GSSG)购自美国Sigma-Aldrich公司。分别称取10 mg、20 mg、50 mg、100 mg、200 mg、500 mg GSSG,用蒸馏水定容至1 L,得到质量浓度分别为10 mg/L、20 mg/L、50 mg/L、100 mg/L、200 mg/L和500 mg/L的GSSG溶液。

### 1.2 试验方法

1.2.1 种子萌发试验及萌发能力测定 试验于

2024年3月至9月在黑龙江大学现代农业与生态环境学院进行。2024年3月,首先使用0.1%次氯酸钠溶液对发芽盒浸泡消毒30 min,蒸馏水冲洗晾干后,铺设2层发芽纸(底层为普通发芽纸,上层为50格定位纸),放入紫外灭菌箱中。然后以未引发的种子为对照(CK),以质量浓度为10 mg/L、20 mg/L、50 mg/L、100 mg/L、200 mg/L和500 mg/L的GSSG溶液分别进行甜菜种子引发处理,引发时间设16 h和24 h(表1)。将引发的种子和未引发的种子分别放入发芽盒,每格2粒,每盒用34 mL蒸馏水均匀润湿发芽纸。再将发芽盒放入温度24 ℃、相对湿度70%的培养箱中进行培养,每24 h补充1次蒸馏水,保持发芽纸润湿。每处理设3次重复。每日记录各处理甜菜种子发芽数(以胚根从种皮中长出为准),第7 d各处理随机选取10个样本测量胚根和胚轴总长度,计算发芽势、发芽率、发芽指数和活力指数。方法如下:

$$\text{种子发芽率} = \frac{7 \text{ d 内正常萌发种子数}}{\text{供试种子数}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{种子发芽势} = \frac{5 \text{ d 内正常萌发种子数}}{\text{供试种子数}} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{发芽指数} = \sum \frac{\text{对应的每天发芽种子数}}{\text{发芽日数}} \quad (3)$$

$$\text{活力指数} = (\text{胚轴长度} + \text{胚根长度}) \times \text{发芽指数} \quad (4)$$

1.2.2 不同引发处理的种子电导率测定 分别从不同引发处理及对照中随机选取浸种后形态完整甜菜种子50粒,经0.1%次氯酸钠表面消毒后置于灭菌烧杯中,加入200 mL超纯水,300 r/min磁力搅拌1 min,25 ℃恒温静置24 h,得到不同处理的浸提液。使用LC-100便携式电导率仪(上海力辰仪器科技有限公司产品)测定浸提液电导值,每个处理设3次生物学重复。

1.2.3 甜菜幼苗生理指标测定 将引发后自然晾干的甜菜种子播种于12 cm×12 cm的花盆中,每盆5粒种子,每处理3盆,待幼苗生长至30 d时,选取不同引发处理及对照生长状态一致的幼苗,每株取完全展开的功能叶片,采用氮蓝四唑(NBT)光化还原法<sup>[12]</sup>测定超氧化物歧化酶(SOD)活性,采用愈创木酚-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>显色体系<sup>[12]</sup>测定过氧化物酶(POD)活性,

采用紫外分光光度法<sup>[12]</sup>测定过氧化氢酶(CAT)活性,采用NADPH氧化法<sup>[13]</sup>测定谷胱甘肽还原酶(GR)活性,采用硫代巴比妥酸(TBA)显色反应<sup>[14]</sup>测定丙二醛(MDA)含量,采用钛试剂法<sup>[14]</sup>测定过氧化氢(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)含量,采用考马斯亮蓝G-250结合法<sup>[14]</sup>测定可溶性蛋白(SP)含量,采用蒽酮-硫酸比色法<sup>[14]</sup>测定可溶性糖(SS)含量。

表1 氧化型谷胱甘肽(GSSG)浸种方案

Table 1 Protocol for seed priming with oxidized glutathione (GSSG)

编号	氧化型谷胱甘肽 浸种质量浓度(mg/L)	浸种时间 (h)
处理1	10	16
处理2	20	16
处理3	50	16
处理4	100	16
处理5	200	16
处理6	500	16
处理7	10	24
处理8	20	24
处理9	50	24
处理10	100	24
处理11	200	24
处理12	500	24
CK	0	0

### 1.3 数据分析

利用Excel软件进行数据处理及图表绘制。利用SPSS软件进行处理间差异显著性分析( $P < 0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同质量浓度GSSG引发处理对甜菜种子萌发的影响

不同质量浓度GSSG引发处理对甜菜种子萌发的影响如表2所示。从表中可以看出,50 mg/L、100 mg/L GSSG浸种16 h以及200 mg/L GSSG浸种24 h的发芽势显著高于未引发对照(CK),分别比CK高9.33个百分点、8.33个百分点和9.00个百分点,其他处理发芽势与CK无显著差异。各处理发芽率与CK均无显著差异。各处理发芽指数均显著高于CK。其中,GSSG浸种16 h的处理1~处理6发芽指数分别比CK增加32.46%、32.08%、51.39%、51.66%、43.97%、26.08%,GSSG浸种24 h的处理7~处理12

发芽指数分别比 CK 增加 38.24%、30.82%、48.88%、48.06%、57.72%、34.37%。GSSG 浸种 16 h 的处理 2~处理 5 活力指数分别比 CK 增加 57.21%、74.68%、80.07%、64.96%，GSSG 浸种 24 h 的处理 9~处理 12 活力指数分别比 CK 增加 133.28%、79.01%、95.09%、53.65%。

### 2.2 不同质量浓度 GSSG 浸种处理对甜菜种子电导率的影响

不同质量浓度 GSSG 浸种处理后,甜菜种子浸

提液电导率均呈现显著下降趋势(表 2)。GSSG 浸种 16 h 的处理 1~处理 6 电导率分别比 CK 降低 77.40%、78.37%、80.24%、76.65%、78.32%、80.71%，GSSG 引发 24 h 的处理 7~处理 12 电导率分别比 CK 降低 79.29%、79.24%、79.14%、78.10%、76.64%、77.31%。500 mg/L 质量浓度下,浸种 24 h 处理的电导率显著高于浸种 16 h 处理,其他相同质量浓度下,不同浸种时间处理间电导率差异不显著。

表 2 氧化型谷胱甘肽(GSSG)引发处理对甜菜种子萌发的影响

Table 2 Effects of oxidized glutathione (GSSG) priming on sugar beet seed germination

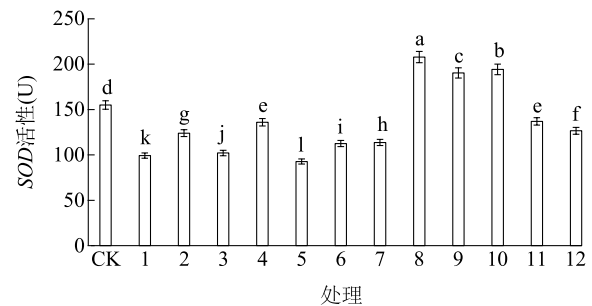
处理	发芽势 (%)	发芽率 (%)	发芽指数	活力指数	电导率 (μS/cm)
处理 1	73.67±0.88abcd	77.33±2.03a	24.28±0.16bcd	240.06±5.80bc	62.37±2.12bc
处理 2	73.33±2.19abcd	78.00±3.21a	24.21±0.61bcd	249.64±5.61b	59.70±0.79bcde
处理 3	78.33±1.33a	80.67±0.88a	27.75±0.33ab	277.37±8.01b	54.53±1.42de
处理 4	77.33±0.67ab	78.67±1.45a	27.80±0.07ab	285.93±11.47b	64.43±2.23b
处理 5	74.67±3.38abc	76.67±3.84a	26.39±0.64abcd	261.94±12.38b	59.83±0.86bcde
处理 6	67.33±2.19d	71.67±3.76a	23.11±0.32d	237.71±8.49bc	53.23±0.70e
处理 7	71.33±1.20bcd	74.67±1.20a	25.34±1.05abcd	249.28±5.43b	57.17±0.77cde
处理 8	67.67±0.88d	71.00±0.58a	23.98±0.28cd	238.58±3.65bc	57.30±1.05cde
处理 9	75.33±2.73abc	76.67±3.53a	27.29±2.59abc	370.43±77.41a	57.57±2.59bcde
处理 10	73.33±2.33abcd	76.33±2.60a	27.14±0.81abc	284.25±8.70b	60.43±0.93bcd
处理 11	78.00±1.53ab	80.33±2.60a	28.91±0.26a	309.78±7.82ab	64.47±2.26b
处理 12	69.67±2.85cd	75.00±2.08a	24.63±1.96bcd	243.98±21.90b	62.63±2.14bc
CK	69.00±1.15cd	74.00±1.00a	18.33±0.45e	158.79±8.18c	276.00±4.36a

CK、处理 1~处理 12 见表 1。同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。

### 2.3 GSSG 引发处理对甜菜幼苗抗氧化酶活性的影响

GSSG 引发处理对甜菜幼苗超氧化物歧化酶(SOD)活性的影响如图 1 所示。从图中可以看出,不同处理甜菜幼苗超氧化物歧化酶(SOD)活性存在显著差异。20 mg/L、50 mg/L、100 mg/L GSSH 溶液浸种 24 h 后,甜菜幼苗的 SOD 活性显著高于 CK,分别比 CK 增加 34.01%、22.75%和 25.25%,说明这些处理能有效激活甜菜幼苗的抗氧化防御系统。而其他处理 SOD 活性显著低于 CK。其中,处理 5、处理 1、处理 3、处理 6、处理 7 的 SOD 活性比 CK 显著降低 40.19%、35.97%、34.17%、27.44%、26.66%,降幅较大;处理 2、处理 4、处理 11、处理 12 SOD 活性分别比 CK 降低 20.02%、12.35%、11.73%、18.73%,说明这些处理能抑制甜菜幼苗的 SOD 活性。

GSSG 引发处理对甜菜幼苗 CAT 活性的影响如



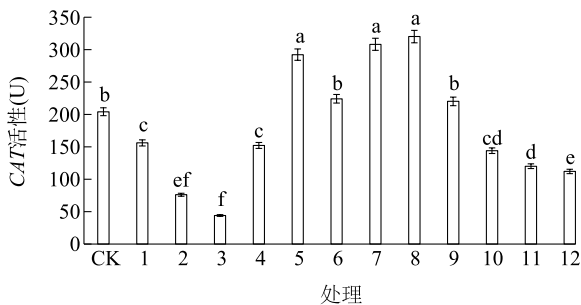
CK、处理 1~处理 12 见表 1。图柱上不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。

图 1 氧化型谷胱甘肽(GSSG)引发处理对甜菜幼苗超氧化物歧化酶(SOD)活性的影响

Fig.1 Effects of oxidized glutathione (GSSG) priming on superoxide dismutase (SOD) activity in sugar beet seedlings

图 2 所示。从图中可以看出,不同处理甜菜幼苗

CAT 活性存在显著差异。其中,处理 8、处理 7、处理 5 CAT 活性分别比 CK 提高 56.87%、50.98%、43.14%,增加显著,说明这些处理能有效增强幼苗的过氧化氢清除能力。处理 6、处理 9 甜菜幼苗的 CAT 活性与 CK 无显著差异,而处理 3、处理 2、处理 12、处理 1、处理 4、处理 10、处理 11 的 CAT 活性分别比 CK 降低 78.43%、62.74%、45.10%、23.53%、25.49%、29.41%、41.18%,说明这些处理能削弱幼苗清除过氧化氢的能力,使幼苗更易受到氧化损伤。综合来看,不同处理 CAT 活性的变化较大,说明不同处理对甜菜幼苗过氧化氢代谢调控的特异性,而处理 8、处理 7、处理 5 在增强幼苗抗氧化防御系统方面具有优势,特别是处理 8 同时具备较高的 CAT 和 SOD 活性。



CK、处理 1~处理 12 见表 1。图柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

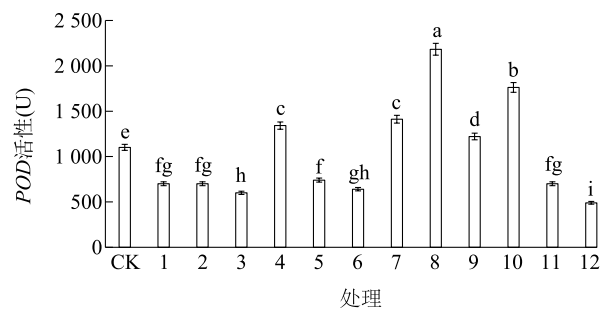
图 2 氧化型谷胱甘肽 (GSSG) 引发处理对甜菜幼苗过氧化氢酶 (CAT) 活性的影响

Fig.2 Effects of oxidized glutathione (GSSG) priming on catalase (CAT) activity in sugar beet seedlings

GSSG 引发处理对甜菜幼苗 POD 活性的影响如图 3 所示。从图中可以看出,不同处理对 POD 活性的调控呈现显著差异。其中,处理 8 甜菜幼苗 POD 活性比 CK 增加 98.18%,提高最为显著,说明该处理具有极强的 POD 诱导效应。处理 10、处理 7、处理 4、处理 9 甜菜幼苗 POD 活性分别比 CK 增加 60.00%、28.18%、21.82%、10.91%,亦表现出明显的促进作用。处理 12、处理 3、处理 6、处理 1、处理 2、处理 5、处理 11 甜菜幼苗 POD 活性分别比 CK 降低 55.45%、45.45%、41.82%、36.36%、36.36%、32.73%、36.36%。

从图 1~图 3 还可以看出,与 CK 相比,不同处理 SOD 活性、CAT 活性、POD 活性有不同的表现模式。处理 8 甜菜幼苗 SOD 活性、CAT 活性、POD 活

性均显著高于 CK,处理 9 甜菜幼苗 SOD 活性、CAT 活性、POD 活性均不低于 CK,处理 1、处理 2、处理 3、处理 11、处理 12、处理 6 甜菜幼苗 SOD 活性、CAT 活性、POD 活性均不高于 CK。处理 4 POD 活性高于 CK,而 CAT 活性、SOD 活性低于 CK;处理 5 CAT 活性高于 CK,而 SOD 活性和 POD 活性低于 CK;处理 7 CAT 活性和 POD 活性高于 CK,而 SOD 活性低于 CK;处理 10 SOD 活性、POD 活性高于 CK,而 CAT 活性低于 CK,这个现象可能反映不同抗氧化酶在应对氧化胁迫时的响应优先级差异。



CK、处理 1~处理 12 见表 1。图柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

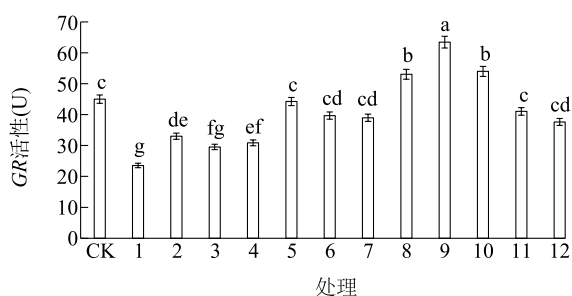
图 3 氧化型谷胱甘肽 (GSSG) 引发处理对甜菜幼苗过氧化物酶 (POD) 活性的影响

Fig.3 Effects of oxidized glutathione (GSSG) priming on peroxidase (POD) activity in sugar beet seedlings

GSSG 引发处理对甜菜幼苗 GR 活性的影响如图 4 所示。从图中可以看出,不同处理甜菜幼苗 GR 活性呈现不同的变化特征。处理 9 甜菜幼苗 GR 活性比 CK 增加 40.92%,提升最为显著;处理 8 和处理 10 甜菜幼苗 GR 活性比 CK 增加 17.85% 和 19.94%,说明这些处理能通过特定途径有效激活抗氧化防御系统的关键酶。处理 5、处理 6、处理 7、处理 11、处理 12 的 GR 活性与 CK 无显著差异。其他处理 GR 活性均低于 CK,其中,处理 1 GR 活性比 CK 降低 47.71%,处理 3 和处理 4 GR 活性亦分别比 CK 下降 30% 以上,说明这些处理可能通过干扰谷胱甘肽代谢途径或酶蛋白表达影响 GR 功能。

#### 2.4 GSSG 引发处理对甜菜幼苗 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量的影响

不同质量浓度 GSSG 引发处理对甜菜幼苗 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量的影响如图 5 所示。从图中可以看出,处理 4、处理 6、处理 12 甜菜幼苗 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量分别比 CK 增加 36.09%、58.70%、56.40%,处理 11、处理 1、处理 2 甜菜幼苗 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量分别比 CK 增加 19.09%、

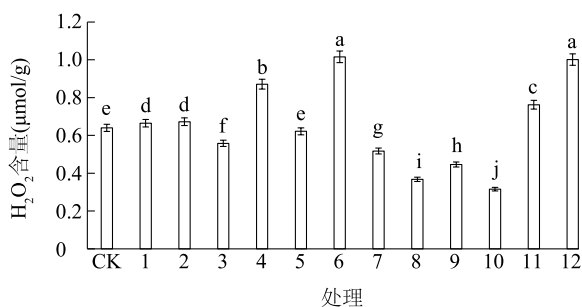


CK、处理 1~处理 12 见表 1。图柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图 4 氧化型谷胱甘肽 (GSSG) 引发处理对甜菜幼苗谷胱甘肽还原酶 (GR) 活性的影响

Fig.4 Effects of oxidized glutathione (GSSG) priming on glutathione reductase (GR) activity in sugar beet seedlings

3.82%、5.07%,说明这些处理能诱导较强的氧化应激反应,处理 5 甜菜幼苗  $H_2O_2$  含量与 CK 无显著差异,其他处理甜菜幼苗  $H_2O_2$  含量均低于 CK,其中,处理 8 和处理 10 甜菜幼苗  $H_2O_2$  含量分别比 CK 降低 42.59%、50.67%,处理 3、处理 7、处理 9 甜菜幼苗  $H_2O_2$  含量分别比 CK 降低 12.82%、17.31%、30.32%,说明这些处理可能存在高效的抗氧化酶激活或非酶促抗氧化系统的增强。上述结果表明,不同处理可能通过调控 NADH 或抗氧化防御系统的效率,显著影响甜菜幼苗的  $H_2O_2$  稳态,进而影响其氧化还原状态。



CK、处理 1~处理 12 见表 1。图柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

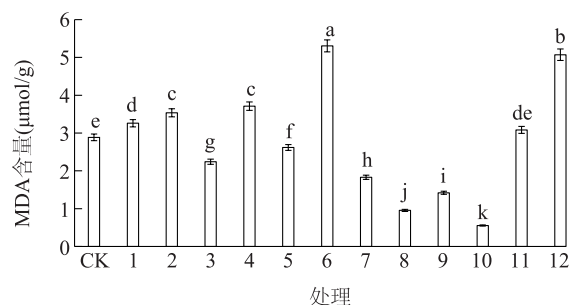
图 5 氧化型谷胱甘肽 (GSSG) 引发处理对甜菜幼苗  $H_2O_2$  含量的影响

Fig.5 Effects of oxidized glutathione (GSSG) priming on  $H_2O_2$  content in sugar beet seedlings

## 2.5 GSSG 引发处理对甜菜幼苗 MDA 含量的影响

不同质量浓度 GSSG 引发处理对甜菜幼苗 MDA 含量的影响如图 6 所示。从图中可以看出,处理 10 甜菜幼苗 MDA 含量比 CK 显著降低 80.80%,

效果最为明显,处理 8、处理 9、处理 7、处理 3、处理 5 甜菜幼苗 MDA 含量分别比 CK 降低 66.98%、50.79%、36.64%、22.36%、9.26%,说明这些处理能增加甜菜幼苗抗氧化能力。而处理 6 和处理 12 甜菜幼苗 MDA 含量分别比 CK 增加 83.84%和 75.70%,处理 4、处理 2、处理 1 甜菜幼苗 MDA 含量分别比 CK 增加 28.64%、22.48%、12.94%,说明这些处理能加剧甜菜幼苗细胞膜脂过氧化损伤。MDA 含量的大幅变动说明不同处理对幼苗细胞膜脂过氧化程度的调控作用存在本质区别,为进一步分析不同处理对幼苗细胞抗氧化系统和膜稳定性影响的分子机制提供了重要线索。



CK、处理 1~处理 12 见表 1。图柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

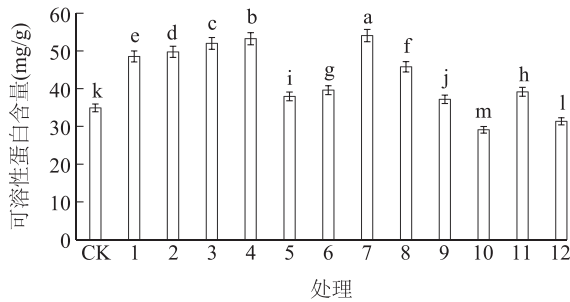
图 6 氧化型谷胱甘肽 (GSSG) 引发处理对甜菜幼苗丙二醛 (MDA) 含量的影响

Fig.6 Effects of oxidized glutathione (GSSG) priming on malondialdehyde (MDA) content in sugar beet seedlings

## 2.6 GSSG 引发处理对甜菜幼苗可溶性蛋白含量的影响

不同质量浓度 GSSG 引发处理对甜菜幼苗可溶性蛋白含量的影响由图 7 所示。由图可知,处理 7 甜菜幼苗可溶性蛋白含量比 CK 增加 54.88%,提高最为显著。处理 4、处理 3、处理 2、处理 1、处理 8 甜菜幼苗可溶性蛋白含量分别比 CK 增加 52.49%、48.98%、42.53%、39.08%和 31.14%,说明这些处理均能有效促进蛋白质合成。处理 5、处理 6、处理 9、处理 11 甜菜幼苗可溶性蛋白含量分别比 CK 增加 8.71%、13.47%、6.45%、12.19%,表明这些处理亦能促进蛋白质的积累。处理 10 和处理 12 甜菜幼苗可溶性蛋白含量分别比 CK 降低 16.62%和 10.24%,说明这 2 个处理能抑制蛋白质合成。整体上看,不同处理可溶性蛋白含量波动较大,最高值(处理 7)是最低值(处理 10)的 1.86 倍,说明不同

处理对蛋白质代谢影响较为显著。



CK、处理1~处理12见表1。图柱上不同小写字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ )。

图7 氧化型谷胱甘肽(GSSG)引发处理对甜菜幼苗可溶性蛋白含量的影响

Fig.7 Effects of oxidized glutathione (GSSG) priming on soluble protein content in sugar beet seedlings

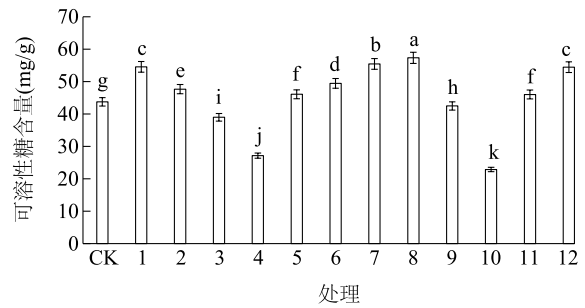
## 2.7 GSSG 引发处理对甜菜幼苗可溶性糖含量的影响

不同质量浓度 GSSG 引发处理对甜菜幼苗可溶性糖含量的影响如图8所示。由图可知,处理8甜菜幼苗可溶性糖含量比CK增加31.03%,提高最为显著,处理7、处理1、处理12甜菜幼苗可溶性糖含量比CK增加26.72%、24.67%、24.47%,增效次之,处理6、处理2、处理5、处理11甜菜幼苗可溶性糖含量比CK增加13.01%、8.97%、5.33%、5.19%。处理10和处理4甜菜幼苗可溶性糖含量比CK降低47.76%、37.97%,减少最为明显,处理3和处理9甜菜幼苗可溶性糖含量比CK降低10.90%和2.87%。

处理8能同时增加甜菜幼苗可溶性糖含量和可溶性蛋白含量,而处理4虽然能大幅度增加可溶性蛋白含量(52.49%),但亦能大幅降低可溶性糖含量(37.97%),这种相反的变化趋势可能与碳氮代谢的重新分配相关,处理10则能导致甜菜幼苗可溶性糖含量和可溶性蛋白含量同时下降。处理间不同的可溶性糖含量和可溶性蛋白含量变化模式为进一步分析植物碳氮代谢的调控机制提供了重要线索。

## 3 讨论与结论

GSSG 引发能显著提高作物种子萌发能力和幼苗生理特性。本研究结果表明,总体上16h和24h的引发处理均能有效提高甜菜种子的发芽指数和活



CK、处理1~处理12见表1。图柱上不同小写字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ )。

图8 氧化型谷胱甘肽(GSSG)引发处理对甜菜幼苗可溶性糖含量的影响

Fig.8 Effects of oxidized glutathione (GSSG) priming on soluble sugar content in sugar beet seedlings

力指数。其中,24h引发处理的整体效果更好,这表明较长的引发时间更有利于种子代谢活动的充分进行,从而增强甜菜种子萌发能力。此外,不同质量浓度GSSG引发处理的种子电导率都显著低于对照,这说明GSSG引发处理能有效修复甜菜种子细胞膜结构,减少电解质渗漏,这有利于种子活力的提升。

本研究还发现,甜菜种子发芽指数和活力指数的提升与抗氧化酶活性的变化呈现不完全一致的模式,这与苏昀等<sup>[15]</sup>的研究结果一致。本研究中,引发后的甜菜种子发芽指数和活力指数总体均高于CK,但不同处理抗氧化酶活性呈现不同的表现模式。处理1~处理3、处理6、处理11、处理12抗氧化酶活性总体均低于CK,而处理8~处理10抗氧化酶活性总体均高于CK。不同引发处理幼苗 $H_2O_2$ 含量、MDA含量与抗氧化酶活性总体表现为抗氧化酶活性高于CK、氧化物质含量低于CK的特征,但仍然出现处理3和处理5抗氧化酶活性总体低于CK、氧化物质( $H_2O_2$ 、MDA)含量亦低于CK的现象。这种非一致性可能是由于GSSG的作用机制并非单纯依赖抗氧化酶系统的激活,而是通过多种途径共同发挥作用。一方面,GSSG可通过谷胱甘肽循环等非酶促抗氧化机制来缓解氧化损伤;另一方面,膜稳定性的增强和渗透调节物质的积累在提高种子活力方面亦发挥重要作用。

本研究结果表明,GSSG引发处理对缓解氧化损伤起一定作用,处理3、处理7~处理10甜菜幼苗 $H_2O_2$ 含量和MDA含量均低于CK,而其他处理总体

高于 CK,说明不同 GSSG 质量浓度和引发时间对缓解氧化损伤的作用影响较大。总体看,较长的引发时间、中低 GSSG 质量浓度更有利于缓解氧化损伤。

GSSG 引发能促进甜菜幼苗渗透调节物质的积累。本研究中大部分质量浓度、引发时间的 GSSG 引发处理种子培育的幼苗可溶性糖含量和蛋白质含量高于对照,这些渗透调节物质的积累不仅有助于维持细胞渗透平衡,还能为种子萌发和幼苗生长提供必要的能量和营养物质,这与 Singhal 等<sup>[16]</sup>、焦芳菊等<sup>[17]</sup>、刘珏文等<sup>[18]</sup>的研究结果一致。本研究结果也进一步说明 GSSG 引发能通过多途径协同作用来改善种子性能。

因此,GSSG 引发能激活抗氧化防御系统和促进渗透调节物质积累,有效缓解氧化损伤,其中 24 h 引发处理在维持细胞膜稳定性和增强抗氧化能力方面更具优势。

#### 参考文献:

- [1] 解林昊,兰西,宁艳东,等. 内蒙古兴安盟地区甜菜生产现状与对策建议[J]. 农业科技管理,2025,44(3):81-84.
- [2] 宋松泉,唐翠芳,程红焱,等. 种子萌发调控的研究进展[J]. 中国科学:生命科学,2024,54(7):1226-1253.
- [3] 胡素雅. 中国甜菜糖产业国际竞争力研究[D]. 哈尔滨:黑龙江大学,2019.
- [4] 孙海艳,史梦雅,李荣德,等. 我国甜菜种业发展现状分析及对策建议[J]. 中国种业,2021(3):1-4.
- [5] 韩秉进,陈渊. 黑龙江产区甜菜糖业面临的问题与对策[J]. 农业系统科学与综合研究,2001,17(3):227-229.
- [6] 刘祚源,孙培琳,斯琴图雅,等. 60Co- $\gamma$  辐射对甜菜种子萌发的影响[J]. 黑龙江科学,2025,16(16):16-19.
- [7] 王仁汉,胡海洲,刘蕾,等. 亚精胺对盐胁迫下甜菜种子萌发的影响[J]. 安徽农业科学,2025,53(8):129-132.
- [8] 张冰. 外源硒对甜菜种子萌发、幼苗生长及品质的影响[D]. 哈尔滨:黑龙江大学,2023.
- [9] 孙梦媛,张必周,张辉,等. 不同引发剂对甜菜种子萌发的影响[J]. 北方农业学报,2024,52(6):60-67.
- [10] 毕生斌. 氧化型谷胱甘肽有机水溶肥对冬马铃薯生长及产量的影响[J]. 现代农业科技,2024(21):35-37.
- [11] 周德,黄薇,唐卿雁,等. 外源谷胱甘肽对镉胁迫下 4 种紫花苜蓿光合作用和抗氧化酶活性的影响[J]. 饲料研究,2024,47(14):75-80.
- [12] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社,2000.
- [13] 陈刚,李胜. 植物生理学实验[M]. 北京:高等教育出版社,2016.
- [14] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
- [15] 苏响,王建军,邢焯,等. 食盐溶液对青稞种子的引发效果[J]. 云南农业大学学报(自然科学),2020,35(2):366-370.
- [16] SINGHAL R K, PANDEY S, BOSE B. Seed priming with  $Mg(NO_3)_2$  and  $ZnSO_4$  salts triggers physio-biochemical and antioxidant defense to induce water stress adaptation in wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. Plant Stress,2021,2:100037.
- [17] 焦芳菊,郝晓佳,王晶艺,等. 外源褪黑素、吡啶丁酸钾、 $\gamma$ -氨基丁酸引发对老化玉米种子萌发及生理特性的影响[J]. 草地学报,2025,33(8):2494-2501.
- [18] 刘珏文,李燕辉,杨天旭,等.  $CeO_2$  纳米颗粒调控活性氧稳态和一氧化氮水平提高水稻耐旱能力[J]. 中国生物化学与分子生物学报,2023,39(7):991-999.

(责任编辑:石春林)