

邹宜芯, 李 慧, 任玉欣, 等. 硫代葡萄糖苷浸种对青花菜种子萌发及生理特性的影响[J]. 江苏农业学报, 2024, 40(8): 1379-1388.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2024.08.003

硫代葡萄糖苷浸种对青花菜种子萌发及生理特性的影响

邹宜芯, 李 慧, 任玉欣, 赵凯文

(天津农学院园艺园林学院, 天津 300392)

摘要: 以青花菜种子为试验材料, 采用培养皿进行发芽试验, 设置蒸馏水、200 mmol/L NaCl 和 15% PEG-6000 3 种培养条件, 研究不同质量浓度[0 $\mu\text{g/mL}$ (CK)、0.94 $\mu\text{g/mL}$ 、1.88 $\mu\text{g/mL}$ 、3.75 $\mu\text{g/mL}$ 、7.50 $\mu\text{g/mL}$ 、15.00 $\mu\text{g/mL}$] 硫代葡萄糖苷浸种对青花菜种子萌发指标、幼苗形态指标及生理指标的影响。研究表明, 与 CK 相比, 蒸馏水培养下, 硫代葡萄糖苷浸种对青花菜种子的发芽率和发芽势没有显著影响, 7.50 $\mu\text{g/mL}$ 硫代葡萄糖苷浸种的青花菜根冠比显著提高; 1.88~7.50 $\mu\text{g/mL}$ 硫代葡萄糖苷浸种的青花菜 *POD* 活性显著高于对照, 其中 3.75 $\mu\text{g/mL}$ 硫代葡萄糖苷浸种能显著提高青花菜的 *SOD* 和 *CAT* 活性, 且 MDA 含量显著低于对照。盐胁迫下, 7.50 $\mu\text{g/mL}$ 硫代葡萄糖苷浸种能显著提高青花菜的 *SOD*、*POD* 活性, 显著降低 MDA 含量。干旱胁迫下, 硫代葡萄糖苷浸种均能显著提高青花菜种子萌发指标, 显著降低青花菜 MDA 含量; 0.94 $\mu\text{g/mL}$ 硫代葡萄糖苷浸种能显著增加青花菜的主根长, 1.88 $\mu\text{g/mL}$ 和 3.75 $\mu\text{g/mL}$ 硫代葡萄糖苷浸种能显著提高青花菜的根冠比; 15.00 $\mu\text{g/mL}$ 硫代葡萄糖苷浸种能显著增加青花菜的 *POD* 活性。隶属函数分析结果表明, 蒸馏水培养和干旱胁迫下 3.75 $\mu\text{g/mL}$ 硫代葡萄糖苷浸种及盐胁迫下 7.50 $\mu\text{g/mL}$ 硫代葡萄糖苷浸种的隶属函数值最高。综上所述, 硫代葡萄糖苷浸种能有效缓解青花菜种子萌发期和幼苗期旱害和盐害, 干旱胁迫下浸种最适质量浓度为 3.75 $\mu\text{g/mL}$, 盐胁迫下浸种最适质量浓度为 7.50 $\mu\text{g/mL}$ 。

关键词: 青花菜; 硫代葡萄糖苷; 种子萌发; 生理特性; 抗逆性

中图分类号: S635.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2024)08-1379-10

Effects of soaking seeds with glucosinolates on seed germination and physiological characteristics of broccoli

ZOU Yixin, LI Hui, REN Yuxin, ZHAO Kaiwen

(College of Horticulture and Landscape Architecture, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300392, China)

Abstract: In this study, broccoli seeds were used as experimental materials, and germination experiments were carried out using culture dishes. Three culture conditions of distilled water, 200 mmol/L NaCl and 15% PEG-6000 were set up. Six different concentrations of glucosinolates were set as 0 $\mu\text{g/mL}$ (CK), 0.94 $\mu\text{g/mL}$, 1.88 $\mu\text{g/mL}$, 3.75 $\mu\text{g/mL}$, 7.50 $\mu\text{g/mL}$ and 15.00 $\mu\text{g/mL}$. The effects of different mass concentrations of glucosinolates on seed germination indices, seedling morphological indices and physiological indices of broccoli were studied. The results showed that compared with CK, soaking seeds with glucosinolates had no significant effect on the germination rate and germination potential of broccoli

收稿日期: 2023-10-16

基金项目: 天津市科技计划种业科技重大专项(18ZXZYN00160); 天津市大学生创新训练计划项目(202210061104)

作者简介: 邹宜芯(1999-), 女, 四川成都人, 硕士研究生, 主要从事蔬菜栽培生理研究。(E-mail) 913788290@qq.com

通讯作者: 李 慧, (E-mail) lihui@tjau.edu.cn

under distilled water culture, but the root-shoot ratio of broccoli in the treatment of soaking seeds with 7.50 $\mu\text{g/mL}$ glucosinolates was significantly increased. The *POD* activity of broccoli in the treatment of soaking seeds with 1.88~7.50 $\mu\text{g/mL}$ glucosinolates was significantly higher than that in the control, and the *SOD* and *CAT* ac-

activities of broccoli in the treatment of soaking seeds with 3.75 $\mu\text{g/mL}$ glucosinolates were significantly increased, and the MDA content was significantly lower than that in the control. Under salt stress, soaking seeds with 7.50 $\mu\text{g/mL}$ glucosinolates could significantly increase the activities of *SOD* and *POD*, and significantly reduce the content of MDA in broccoli. Under drought stress, soaking seeds with glucosinolates could significantly improve the germination indices of broccoli seeds and significantly reduce the MDA content of broccoli. Soaking seeds with 0.94 $\mu\text{g/mL}$ glucosinolates could significantly increase the main root length of broccoli, and soaking seeds with 1.88 $\mu\text{g/mL}$ and 3.75 $\mu\text{g/mL}$ glucosinolates could significantly increase the root-shoot ratio of broccoli. Soaking seeds with 15.00 $\mu\text{g/mL}$ glucosinolates could significantly increase the *POD* activity of broccoli. The results of membership function analysis showed that the membership function values of 3.75 $\mu\text{g/mL}$ glucosinolate soaking treatment under distilled water culture and drought stress and 7.50 $\mu\text{g/mL}$ glucosinolate soaking treatment under salt stress were the highest. In summary, soaking seeds with glucosinolates can effectively alleviate the drought and salt damage of broccoli during seed germination and seedling stage, the optimum concentration of glucosinolates for soaking seeds under drought stress is 3.75 $\mu\text{g/mL}$, and the optimum concentration of glucosinolates for soaking seeds under salt stress is 7.50 $\mu\text{g/mL}$.

Key words: broccoli; glucosinolates; seed germination; physiological characteristics; stress resistance

青花菜 (*Brassica oleracea* var. *italica*) 是十字花科芸薹属植物, 又名西兰花, 原产于意大利, 19 世纪末传入中国, 现世界各地皆有栽培^[1]。其口感清脆、营养价值高且富含抗癌活性成分萝卜硫素, 被誉为“蔬菜皇冠”^[2]。硫代葡萄糖苷是青花菜中一类重要次生代谢产物, 在内源黑芥子酶的作用下水解生成多种活性物质。硫代葡萄糖苷及其降解物具有抗癌、抗菌等活性^[3-4], 可作为防御性物质广泛参与十字花科植物体内的防御反应, 在植物应对环境改变的过程中具有重要作用^[5]。

已有研究表明, 拟南芥在干旱胁迫下可通过诱导 IAA5/6/19 蛋白使体内硫代葡萄糖苷水平提高, 调控气孔在干旱胁迫响应中发挥重要作用^[6]。在高盐、高温胁迫下, 十字花科植物可以通过提高体内硫代葡萄糖苷的含量, 进而提高对高盐、高温的耐受能力^[7-8]。李向果等^[9]对青花菜中硫代葡萄糖苷的降解产物异硫氰酸酯 (isothiocyanates, ITCS) 进行抗菌试验, 结果表明 ITCS 具有一定的体外和体内抗菌作用。张睿等^[10]对青花菜中硫代葡萄糖苷的主要存在形式萝卜硫代葡萄糖苷 (GRAE) 的抑菌及体外免疫活性进行了初步探究, 结果表明 GRAE 对 3 株致病菌均有一定的抑制作用, 且对大肠杆菌和沙门氏菌的抑制效果优于金黄色葡萄球菌。而有关硫代葡萄糖苷对青花菜种子萌发、幼苗生长及抗逆性影响方面的研究较少。

种子萌发是植物积累活性物质和次生代谢产物的重要手段之一, 萌发不仅会改变种子形状, 并且会在种子中不断合成新的物质^[11]。研究发现 NaCl 胁迫

是最常见的非生物胁迫方式之一^[12]; 聚乙二醇 (PEG) 是模拟干旱胁迫的一种生物大分子, 通常被用作干旱机理研究及植物抗旱性评价^[13]。高盐和干旱胁迫对青花菜的萌发和生长极为不利, 可导致青花菜种子的发芽率和发芽势降低, 抑制根系活力, 严重影响青花菜的生长发育^[14]。基于此, 本研究以青花菜种子为材料, 研究不同浓度硫代葡萄糖苷浸种对青花菜种子萌发及幼苗生理特性的影响。通过测定种子发芽指标 (发芽率、发芽势、发芽指数)、幼苗形态指标 (根冠比、主根长、茎粗) 及生理指标 (抗氧化酶活性、丙二醛含量) 筛选最适的硫代葡萄糖苷浸种浓度, 以期利用硫代葡萄糖苷浸种提升青花菜综合抗逆性提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

青花菜为天津科润农业科技股份有限公司蔬菜研究所江汉民博士惠赠, 品种为 KJ-18, 试验在天津农学院园艺中心实验室进行。外施所用硫代葡萄糖苷为实验室提取所得。

1.2 试验设计

将健康的青花菜种子浸于 2% 次氯酸钠中消毒 10 min, 用蒸馏水冲洗 6 遍, 每遍 2 min。所有种子分成 6 份, 分别在加入 0 $\mu\text{g/mL}$ 、0.94 $\mu\text{g/mL}$ 、1.88 $\mu\text{g/mL}$ 、3.75 $\mu\text{g/mL}$ 、7.50 $\mu\text{g/mL}$ 、15.00 $\mu\text{g/mL}$ 的硫代葡萄糖苷溶液 (记为 CK、T1、T2、T3、T4、T5) 中浸种 24 h, 后置于直径 9 cm 的玻璃培养皿中, 每皿放 2 层滤纸和 30 粒青花菜种子进行萌发试验。萌

发试验设置蒸馏水(正常条件)、200 mmol/L NaCl 溶液(盐胁迫)、15% PEG-6000 溶液(干旱胁迫)3 种培养条件下的不同处理,即蒸馏水条件下 CK、T1、T2、T3、T4、T5 处理,200 mmol/L NaCl 溶液盐胁迫下 CK、T1、T2、T3、T4、T5 处理和 15% PEG-6000 溶液干旱胁迫下 CK、T1、T2、T3、T4、T5 处理,每个培养皿内加 5 mL 对应溶液,每个处理 4 次生物学重复,3 次技术重复。将处理好的培养皿置于 25 ℃、光照 16 h/黑暗 8 h 的培养箱中培养并每天更换滤纸和溶液。连续 10 d 统计发芽数,用于计算种子萌发相关指标,并在 10 d 结束时,将植株用液氮速冻后存放于-80 ℃环境下用于测定相关生理指标。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 种子萌发指标的测定 参照《农作物种子检验规程》^[15]对种子萌发指标进行统计,从培养皿放入培养箱培养 24 h 后开始统计,直至萌发第 10 d。按照下列公式计算发芽率(GR)、发芽势(GP)和发芽指数(GI)。

$GR = n/N \times 100\%$ 。式中, n 为前 n d 萌发种子数; N 为供试种子数。

$GP = SN_m/SN_0 \times 100\%$ 。式中, SN_m 为前 5 d 萌发种子数; SN_0 为供试种子数。

$GI = \sum (G_t/D_t)$ 。式中, G_t 为前 t d 种子发芽数; D_t 为发芽天数。

1.3.2 形态指标的测定 参照《农作物种子检验规程》^[15]测定培养 10 d 后各处理组青花菜幼苗的主根长和茎粗,每个处理组测量不少于 30 株。

称量法测定鲜重,并计算其根冠比。

根冠比=地下部重量/地上部重量。

1.3.3 幼苗生理指标的测定 取培养至第 10 d 的青花菜幼苗测定生理指标,MDA 含量采用硫代巴比妥酸法测定^[16];SOD 活性采用氮蓝四唑光还原法测定^[17];POD 活性采用愈创木酚法测定^[18];CAT 活性采用紫外分光光度法测定^[19]。

1.3.4 隶属函数计算 隶属函数计算公式: $U(x) = (x - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min})$;反隶属函数计算公式: $U(x) = 1 - (x - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min})$ 。式中, x 表示各指标值; x_{\min} 表示对应指标的最小值; x_{\max} 表示对应指标的最大值。其中 MDA 含量采用反隶属函数计算,其余指标均采用隶属函数计算。

1.4 数据分析

采用 SPSS 26.0 对试验数据进行分析;采用单

因素方差分析各处理间差异的显著性,使用 Duncan's 法进行不同处理间均值的显著性差异比较($P < 0.05$);应用 Origin 2021 软件进行图形绘制。

2 结果与分析

2.1 硫代葡萄糖苷浸种对青花菜种子发芽进度的影响

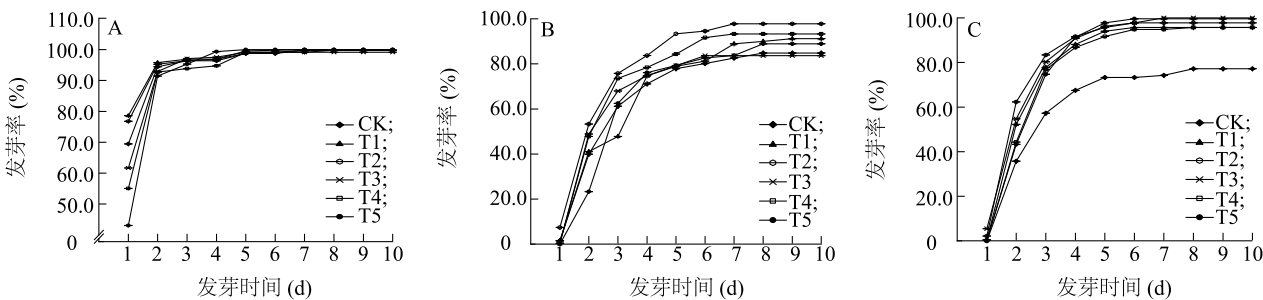
由图 1 可知,蒸馏水培养条件下,发芽早期,与 CK 相比低浓度 T1、T2 处理硫代葡萄糖苷处理发芽率增速快,高浓度 T3、T4 和 T5 处理硫代葡萄糖苷处理发芽率增速相对较慢,第 2 d 时各处理发芽率在 92.5% 左右,第 2~10 d 各处理发芽率与 CK 相比没有显著差异(图 1A)。盐胁迫下发芽第 1 d T2 处理的发芽率显著高于 CK 和其他处理;发芽第 2~4 d,与 CK 相比,T2~T4 处理均能提高青花菜种子发芽率;发芽第 4~10 d,T2 处理发芽率最高,显著高于 CK 和其他处理,T4 处理的发芽率次之,显著高于 CK 以及 T1、T3、T5 处理(图 1B)。干旱胁迫下,发芽第 2 d,T1~T5 处理的发芽率及其增速都高于 CK,其中 T2 处理的发芽率增速最快;发芽中后期,与 CK 相比,各处理均能提高青花菜种子的发芽率,且后续随着发芽时间的增长,效果愈发明显,第 6 d 后各处理发芽率趋于稳定(图 1C)。

2.2 硫代葡萄糖苷浸种对青花菜种子萌发指标的影响

蒸馏水培养下,不同浓度硫代葡萄糖苷浸种对青花菜种子的发芽率和发芽势均没有显著性影响(表 1)。盐胁迫下,T2 处理的发芽率、发芽势和发芽指数均显著高于 CK(表 2)。干旱胁迫下,各处理的发芽率、发芽势和发芽指数均显著高于 CK,其中 T3 处理的发芽率最高,比 CK 提高了 29.53%(表 3)。

2.3 硫代葡萄糖苷浸种对青花菜幼苗形态指标的影响

由图 2 可以看出,不同培养条件下青花菜幼苗形态差异较大。由表 4~表 6 可知,蒸馏水培养下,与 CK 相比,T4 处理的根冠比显著增加;各处理间茎粗无显著性差异(表 4)。盐胁迫下,各处理根冠比及茎粗与 CK 无显著性差异,但 T1 和 T3 处理的主根长显著低于 CK(表 5)。干旱胁迫下,T2 和 T3 处理的根冠比显著高于 CK,其他处理与 CK 没有显著性差异;T1 处理的主根长显著高于 CK;T1 处理茎粗显著低于 CK 和其他处理(表 6)。



A:蒸馏水培养;B:盐胁迫培养;C:干旱胁迫培养。CK:对照;T1:0.94 $\mu\text{g/mL}$ 硫代葡萄糖苷;T2:1.88 $\mu\text{g/mL}$ 硫代葡萄糖苷;T3:3.75 $\mu\text{g/mL}$ 硫代葡萄糖苷;T4:7.50 $\mu\text{g/mL}$ 硫代葡萄糖苷;T5:15.00 $\mu\text{g/mL}$ 硫代葡萄糖苷。

图 1 不同质量浓度硫代葡萄糖苷浸种后青花菜种子的发芽进度

Fig.1 Germination progress of broccoli seeds after soaking with different concentrations of glucosinolates

表 1 蒸馏水培养条件下不同浓度硫代葡萄糖苷浸种对青花菜种子发芽指标的影响

Table 1 Effects of soaking seeds with different concentrations of glucosinolates on germination indicators of broccoli seeds under distilled water culture

处理	发芽率 (%)	发芽势 (%)	发芽指数
CK	99.79±0.21a	98.77±0.44a	76.47±1.41ab
T1	99.79±0.21a	98.77±0.44a	79.38±0.44a
T2	100.00±0a	99.57±0.43a	78.91±0.82a
T3	98.16±0.28a	99.16±0.28a	74.15±1.34ab
T4	99.79±0.21a	99.16±0.28a	71.71±2.55bc
T5	100.00±0a	100.00±0a	67.97±2.73c

CK、T1、T2、T3、T4、T5 见图 1 注。同列数据后不同字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

表 2 盐胁迫下不同浓度硫代葡萄糖苷浸种对青花菜种子发芽指标的影响

Table 2 Effects of soaking seeds with different concentrations of glucosinolates on germination indicators of broccoli seeds under salt stress

处理	发芽率 (%)	发芽势 (%)	发芽指数
CK	84.84±0.29b	77.85±0.07b	38.82±1.63b
T1	91.18±0.04ab	78.98±0.08b	38.93±1.58b
T2	97.82±0.6a	93.33±0a	48.35±1.52a
T3	83.64±0.22b	79.20±0.26b	40.90±2.79ab
T4	93.30±1.87ab	84.36±1.55ab	42.73±4.28ab
T5	88.94±0.03ab	83.42±0.07ab	37.32±2.68b

CK、T1、T2、T3、T4、T5 见图 1 注。同列数据后不同字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

2.4 硫代葡萄糖苷浸种对青花菜幼苗抗氧化酶活性的影响

2.4.1 硫代葡萄糖苷浸种对青花菜幼苗 SOD 活性的影响

由图 3 可知,蒸馏水培养下,T3 处理的 SOD 活性显著高于 CK、T1、T2 和 T4 处理,比 CK 提高了 52.55%。盐胁迫下,T4 处理 SOD 活性显著高于 CK 和其他处理,且 T4 处理 SOD 活性比 CK 提高了 44.28%。干旱胁迫下,T3 处理 SOD 活性显著高于 T1、T2 和 T4 处理,而与 CK 和 T5 处理没有显著性差异。由此表明,蒸馏水培养条件下,3.75 $\mu\text{g/mL}$ 硫代葡萄糖苷浸种 (T3 处理) 和盐胁迫下 7.50 $\mu\text{g/mL}$ 硫代葡萄糖苷浸种 (T4 处理) 分别较对照 (CK) 能显著提高青花菜 SOD 活性。

表 3 干旱胁迫下不同浓度硫代葡萄糖苷浸种对青花菜种子发芽指标的影响

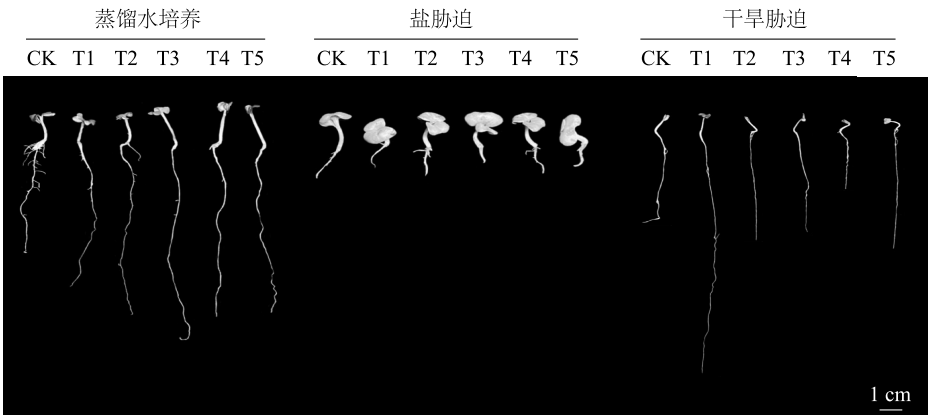
Table 3 Effects of soaking seeds with different concentrations of glucosinolates on germination indicators of broccoli seeds under drought stress

处理	发芽率 (%)	发芽势 (%)	发芽指数
CK	77.20±0.49c	73.27±1.23b	34.98±6.04b
T1	95.68±0.07b	94.02±0.40a	46.64±0.75a
T2	97.82±0.60ab	95.68±0.07a	49.96±0.67a
T3	100.00±0a	96.27±0.97a	48.98±2.78a
T4	95.68±0.07b	91.66±0.32a	44.71±1.96a
T5	99.63±0.37ab	97.82±0.60a	46.06±0.95a

CK、T1、T2、T3、T4、T5 见图 1 注。同列数据后不同字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

2.4.2 硫代葡萄糖苷浸种对青花菜幼苗 POD 活性的影响

由图 4 可知,蒸馏水培养下,T3 处理的 POD 活性显著高于 CK 和其他处理,且比 CK 的 POD 活性高 79.80%。盐胁迫下,T4 处理 POD 活性显著高于 CK、T1、T2 和 T5 处理。干旱胁迫下,T5 处理的 POD 活性显著高于 CK 和其他处理。由此表明,中高浓度的硫代葡萄糖苷浸种可提高青花菜 POD 活性。



CK、T1~T5 见图 1 注。

图 2 不同浓度硫代葡萄糖苷浸种对青花菜幼苗形态的影响

Fig.2 Effects of soaking seeds with different concentrations of glucosinolates on the morphology of broccoli seedlings

表 4 蒸馏水培养条件下不同浓度硫代葡萄糖苷浸种对青花菜幼苗形态的影响

Table 4 Effects of soaking seeds with different concentrations of glucosinolates on the morphology of broccoli seedlings under distilled water culture

处理	根冠比	主根长 (mm)	茎粗 (mm)
CK	0.18±0.03b	57.50±6.61a	0.89±0.04a
T1	0.20±0.07ab	65.22±5.28a	0.83±0.04a
T2	0.26±0.03ab	71.36±5.94a	0.92±0.03a
T3	0.28±0.04ab	75.72±5.01a	0.90±0.04a
T4	0.31±0.03a	66.99±5.07a	0.95±0.04a
T5	0.29±0.04ab	65.25±2.96a	0.87±0.04a

CK、T1、T2、T3、T4、T5 见图 1 注。同列数据后不同字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

表 5 盐胁迫下不同浓度硫代葡萄糖苷浸种对青花菜幼苗形态的影响

Table 5 Effects of soaking seeds with different concentrations of glucosinolates on the morphology of broccoli seedlings under salt stress

处理	根冠比	主根长 (mm)	茎粗 (mm)
CK	0.06±0.01ab	17.90±2.86a	1.26±0.06ab
T1	0.07±0.02ab	10.47±1.82b	1.00±0.15b
T2	0.07±0.01ab	15.82±1.67ab	1.12±0.05ab
T3	0.08±0.01a	10.91±0.74b	1.29±0.07a
T4	0.07±0.01ab	15.54±1.36ab	1.27±0.08a
T5	0.05±0b	15.30±1.95ab	1.25±0.10ab

CK、T1、T2、T3、T4、T5 见图 1 注。同列数据后不同字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

2.4.3 硫代葡萄糖苷浸种对青花菜幼苗 CAT 活性的影响 由图 5 可知,蒸馏水培养下,T3 处理的

CAT 活性显著高于 CK 和其他处理,且比 CK 提高 153.97%;T4 处理的 CAT 活性显著高于 CK、T1、T2 和 T5 处理。盐胁迫下,T3 处理 CAT 活性显著高于 CK 和其他处理,且比 CK 活性提高了 38.79%。干旱胁迫下,T3 处理 CAT 活性显著高于 CK 和其他处理,且比 CK 高了 150.00%。由此表明,应用 3.75 $\mu\text{g/mL}$ 硫代葡萄糖苷浸种 (T3 处理) 可显著提高青花菜 CAT 的活性。

表 6 干旱胁迫下不同浓度硫代葡萄糖苷浸种对青花菜幼苗形态的影响

Table 6 Effects of soaking seeds with different concentrations of glucosinolates on the morphology of broccoli seedlings under drought stress

处理	根冠比	主根长 (mm)	茎粗 (mm)
CK	0.19±0.02cd	39.11±6.35bc	0.92±0.04a
T1	0.27±0.06bc	121.69±4.91a	0.73±0.06b
T2	0.32±0.04ab	44.92±5.27b	0.95±0.08a
T3	0.39±0.05a	48.22±7.07b	0.92±0.03a
T4	0.11±0.01d	24.59±5.03c	1.03±0.09a
T5	0.19±0.02cd	45.99±6.19b	0.97±0.06a

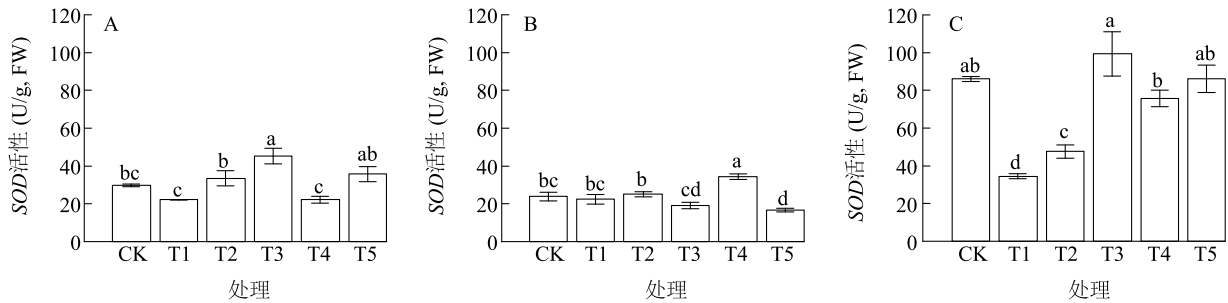
CK、T1、T2、T3、T4、T5 见图 1 注。同列数据后不同字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

2.5 硫代葡萄糖苷浸种对青花菜幼苗 MDA 含量的影响

由图 6 可知,蒸馏水培养下,T3、T4 和 T5 处理的 MDA 含量显著低于 CK 和其他处理组,且 T3、T4、T5 处理间 MDA 含量差异不显著。盐胁迫下,T4

处理 MDA 含量显著低于 CK 和其他处理。干旱胁迫下, T3 和 T4 处理 MDA 含量显著低于 CK 和其他处理, 且 T3 处理 MDA 含量比 CK 低了 46.26%。由

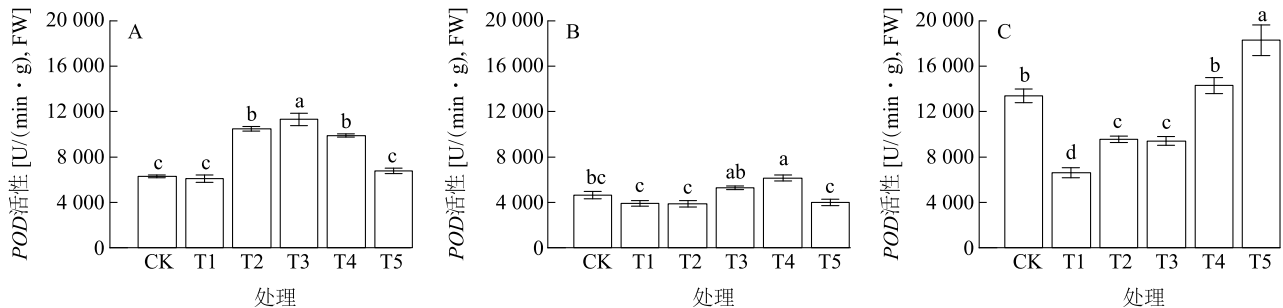
此可见, 3 种培养条件下, 7.50 $\mu\text{g/mL}$ 硫代葡萄糖苷浸种 (T4 处理) 均能显著降低青花菜 MDA 含量。



A: 蒸馏水培养; B: 盐胁迫; C: 干旱胁迫。CK、T1~T5 见图 1 注。同一培养条件下图柱上不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 3 不同浓度硫代葡萄糖苷浸种对青花菜幼苗 SOD 活性的影响

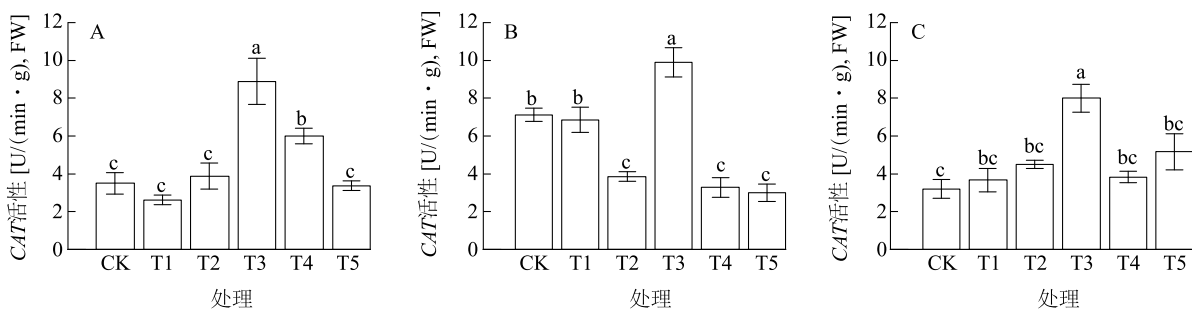
Fig.3 Effects of soaking seeds with different concentrations of glucosinolates on SOD activity of broccoli seedlings



A: 蒸馏水培养; B: 盐胁迫; C: 干旱胁迫。CK、T1~T5 见图 1 注。同一培养条件下图柱上不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 4 不同浓度硫代葡萄糖苷浸种对青花菜幼苗 POD 活性的影响

Fig.4 Effects of soaking seeds with different concentrations of glucosinolates on POD activity of broccoli seedlings



A: 蒸馏水培养; B: 盐胁迫; C: 干旱胁迫。CK、T1~T5 见图 1 注。同一培养条件下图柱上不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

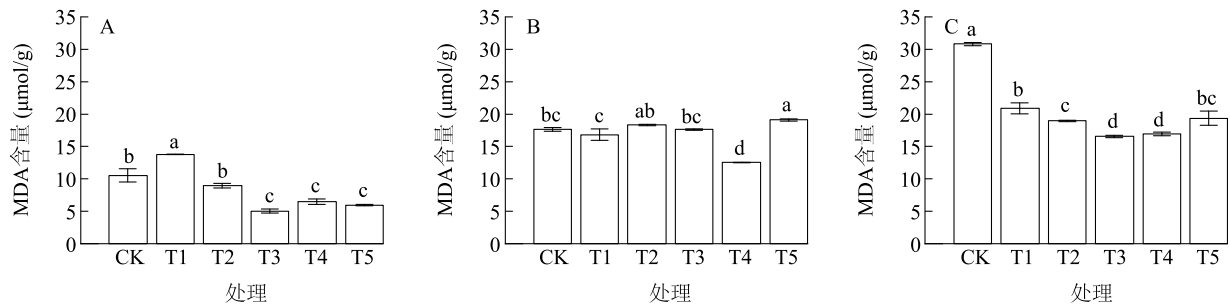
图 5 不同浓度硫代葡萄糖苷浸种对青花菜幼苗 CAT 活性的影响

Fig.5 Effects of soaking seeds with different concentrations of glucosinolates on CAT activity of broccoli seedlings

2.6 隶属函数分析硫代葡萄糖苷浸种对青花菜种子萌发、幼苗形态及生理指标的影响

通过隶属函数分析发现, 蒸馏水培养下硫代葡萄糖苷浸种的 T2、T3、T4 和 T5 处理的平均隶属函数值均高于 CK, 且 T3 处理的平均隶属函数值

最高 (表 7); 盐胁迫下 T2、T3 和 T4 处理的平均隶属函数值高于 CK, 且 T4 处理的平均隶属函数值最高 (表 8); 干旱胁迫下各处理的平均隶属函数值均高于 CK, 其中 T3 处理的平均隶属函数值最高 (表 9)。



A:蒸馏水培养;B:盐胁迫;C:干旱胁迫。CK、T1~T5 见图 1 注。同一培养条件下图柱上不同字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

图 6 不同浓度硫代葡萄糖苷浸种对青花菜幼苗 MDA 含量的影响

Fig.6 Effects of soaking seeds with different concentrations of glucosinolates on MDA content of broccoli seedlings

表 7 蒸馏水培养下硫代葡萄糖苷浸种对青花菜种子萌发、幼苗形态及生理指标影响的隶属函数值

Table 7 Membership function values of the effects of soaking seeds with glucosinolates on the germination, morphological and physiological indicators of broccoli seedlings under distilled water culture

处理	SOD 活性	POD 活性	CAT 活性	MDA 含量	主根长	茎粗	根冠比	发芽率	发芽势	发芽指数	平均数	排序
CK	0.33	0.04	0.14	0.37	0	0.52	0	0.75	0	0.75	0.29	5
T1	0	0	0	0	0.42	0	0.15	0.75	0	1.00	0.23	6
T2	0.49	0.84	0.20	0.55	0.76	0.70	0.65	1.00	0.65	0.96	0.68	2
T3	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.54	0.74	0	0.32	0.54	0.71	1
T4	0	0.73	0.54	0.84	0.52	1.00	1.00	0.75	0.32	0.33	0.60	3
T5	0.59	0.13	0.12	0.90	0.43	0.27	0.84	1.00	1.00	0.00	0.53	4

CK、T1~T5 见图 1 注。

表 8 盐胁迫下硫代葡萄糖苷浸种对青花菜种子萌发、幼苗形态及生理指标影响的隶属函数值

Table 8 Membership function values of the effects of soaking seeds with glucosinolates on the germination, morphological and physiological indicators of broccoli seedlings under salt stress

处理	SOD 活性	POD 活性	CAT 活性	MDA 含量	主根长	茎粗	根冠比	发芽率	发芽势	发芽指数	平均数	排序
CK	0.40	0.33	0.60	0.22	1.00	0.89	0.28	0.08	0	0.14	0.39	4
T1	0.32	0.02	0.56	0.35	0	0	0.87	0.53	0.07	0.15	0.29	5
T2	0.47	0	0.12	0.12	0.72	0.42	0.93	1.00	1.00	1.00	0.58	2
T3	0.14	0.62	1.00	0.23	0.06	1.00	1.00	0	0.09	0.32	0.45	3
T4	1.00	1.00	0.04	1.00	0.68	0.95	0.76	0.68	0.42	0.49	0.70	1
T5	0	0.05	0	0	0.65	0.86	0	0.37	0.36	0	0.23	6

CK、T1~T5 见图 1 注。

表 9 干旱胁迫下硫代葡萄糖苷浸种对青花菜种子萌发、幼苗形态及生理指标影响隶属函数值

Table 9 Membership function values of the effects of soaking seeds with glucosinolates on the germination, morphological and physiological indicators of broccoli seedlings under drought stress

处理	SOD 活性	POD 活性	CAT 活性	MDA 含量	主根长	茎粗	根冠比	发芽率	发芽势	发芽指数	平均数	排序
CK	0.79	0.58	0	0	0.15	0.64	0.28	0	0	0	0.24	6
T1	0	0	0.10	0.70	1.00	0	0.57	0.81	0.85	0.78	0.48	5
T2	0.20	0.25	0.27	0.83	0.21	0.73	0.75	0.90	0.91	1.00	0.61	3
T3	1.00	0.24	1.00	1.00	0.24	0.64	1.00	1.00	0.94	0.93	0.80	1
T4	0.63	0.66	0.13	0.97	0	1.00	0	0.81	0.75	0.65	0.56	4
T5	0.80	1.00	0.41	0.80	0.22	0.81	0.28	0.98	1.00	0.74	0.70	2

CK、T1~T5 见图 1 注。

3 讨论

硫代葡萄糖苷是广泛存在于十字花科植物中的一类富含氮、硫元素的次生代谢产物。次生代谢产物调控是植物应对胁迫的主要方法之一,当植物受到不利因素胁迫时,会产生更多的次生代谢产物来应对^[20]。硫代葡萄糖苷在应对生物胁迫和非生物胁迫中都具有重要作用^[21]。

种子的萌发对植物的生长和产量形成有重大影响。种子萌发是植物生命史上的一个重要阶段,也是衡量植物抗逆性的重要时期之一^[22]。本研究结果表明,蒸馏水培养下,青花菜发芽率为 99.79%,明显高于盐和干旱胁迫下的发芽率,说明盐和干旱胁迫对种子的萌发有明显抑制作用^[23-26]。蒸馏水培养下,硫代葡萄糖苷浸种对青花菜种子的发芽率和发芽势未有显著影响,7.50 $\mu\text{g/mL}$ (T4 处理) 硫代葡萄糖苷浸种的根冠比显著高于对照;盐胁迫下,硫代葡萄糖苷浸种应控制在一定的质量浓度下,其中 1.88 $\mu\text{g/mL}$ 硫代葡萄糖苷浸种 (T2 处理) 的萌发指标显著高于对照,这与胡竞渝等^[27]发现盐胁迫下腐胺浸种对菜豆种子萌发的影响和苏金强等^[28]发现盐胁迫下赤霉素浸种对百香果种子萌发的影响结果相似。干旱胁迫下,硫代葡萄糖苷浸种均能显著提高青花菜种子的萌发指标,这与干旱胁迫下不同浓度的 5-氨基乙酰丙酸浸种对紫花苜蓿种子萌发^[29]和不同浓度 CaCl_2 浸种对于干旱胁迫下花生种子萌发^[30]等研究结果相似。

通过长期的系统进化,植物细胞内形成防御活性氧 (ROS) 和自由基毒害的保护机制, *SOD*、*POD*、*CAT* 是酶促防卫体系的主要成员^[31-32]。盐胁迫下,植物体内过量的活性氧积累会导致细胞大分子功能和细胞膜系统受损,增加细胞膜的通透性并产生大量 MDA,加大胁迫的破坏力^[33]。过量 O_2^- 和 H_2O_2 的增加激活了清除 ROS 的保护酶系统,从而增强 *SOD*、*POD* 和 *CAT* 的活性^[34], *SOD* 催化 O_2^- 反应生成 H_2O_2 , *POD* 催化 H_2O_2 与酚类反应间接清除胁迫产生的大量 ROS,而 *CAT* 可直接催化 H_2O_2 生成 H_2O 和 O_2 ,防止活性氧对细胞膜造成损伤^[35]。植物体内 MDA 的含量可反映植物抗逆水平,在逆境胁迫下,植物体内 MDA 含量越低,表明植物抗逆性越强^[36]。

蒸馏水培养下,与 CK 相比,中等质量浓度 3.75

$\mu\text{g/mL}$ 硫代葡萄糖苷浸种 (T3 处理) 显著提高了青花菜 *SOD*、*POD* 和 *CAT* 的活性,显著降低了 MDA 含量,提高了青花菜的抗逆能力,这与卢环等^[37]研究不同质量浓度烯效唑浸种对绿豆 *SOD*、*POD* 活性及 MDA 含量影响的结果相似。盐胁迫下,与 CK 相比 3.75 $\mu\text{g/mL}$ (T3 处理) 硫代葡萄糖苷浸种的青花菜 *CAT* 活性显著提高,7.50 $\mu\text{g/mL}$ (T4 处理) 硫代葡萄糖苷浸种的青花菜 *SOD* 和 *POD* 活性显著提高且 MDA 含量显著降低,表明 7.50 $\mu\text{g/mL}$ 硫代葡萄糖苷浸种可通过 *SOD* 催化 O_2^- 反应生成 H_2O_2 , *POD* 催化 H_2O_2 与酚类反应间接清除胁迫产生的大量 ROS,清除因盐胁迫累积的过量 O_2^- 和 H_2O_2 ,膜脂过氧化程度降低,从而使 MDA 含量显著下降。试验结果表明,在盐胁迫下硫代葡萄糖苷可通过提高抗氧化酶活性,有效清除植物体内过量的 ROS。张成冉等^[38]发现盐胁迫下中等浓度的糖 (葡萄糖、果糖等) 浸种能明显提高玉米 *SOD* 和 *POD* 活性,且显著降低 MDA 含量;张亮等^[39]发现盐胁迫下中等浓度的异甜菊醇浸种明显提高了油菜的 *SOD*、*POD* 和 *CAT* 活性,这均与本研究结果相似。干旱胁迫下,硫代葡萄糖苷浸种处理能显著降低青花菜 MDA 含量,表明干旱胁迫下通过硫代葡萄糖苷浸种可显著提高青花菜的抗逆性,这与范小玉等^[40]发现在干旱胁迫下不同浓度的 CaCl_2 均能提高花生抗干旱能力的结果相似。其中 15.00 $\mu\text{g/mL}$ 硫代葡萄糖苷浸种 (T5 处理) 能显著提高 *POD* 活性。表明干旱胁迫下应用高质量浓度硫代葡萄糖苷浸种可在一定程度上提高抗氧化酶活性,进而提升青花菜抗逆性。

隶属函数分析结果显示,在蒸馏水、200 mmol/L NaCl 以及 15% PEG-6000 3 种培养条件下,适宜质量浓度的硫代葡萄糖苷浸种均能提高青花菜的综合抗逆能力,其中蒸馏水培养和干旱胁迫下 3.75 $\mu\text{g/mL}$ 硫代葡萄糖苷浸种提高青花菜综合抗逆能力较好;盐胁迫下 7.50 $\mu\text{g/mL}$ 硫代葡萄糖苷浸种提高青花菜综合抗逆能力的效果最好。该研究仅比较了青花菜种子应用 0~15.00 $\mu\text{g/mL}$ 硫代葡萄糖苷浸种 24 h 后,在蒸馏水、200 mmol/L NaCl 和 15% PEG-6000 3 种培养条件下,对其萌发及生理特性的影响。本试验在处理浓度和胁迫条件方面有一定的局限性,使用其他质量浓度 (如 0.5 $\mu\text{g/mL}$ 、20 $\mu\text{g/mL}$ 、50 $\mu\text{g/mL}$ 等) 硫代葡萄糖苷浸种在不同胁迫时间 (如 2 h、4 h、6 h、8 h 等) 和不同程度盐胁迫 (如 100

mmol/L NaCl、300 mmol/L NaCl、400 mmol/L NaCl等)条件下的应用效果有待进一步探究。

4 结 论

青花菜种子萌发时易遭受盐胁迫和干旱胁迫,导致其发芽率和发芽势降低,抑制胚根生长,严重影响青花菜后期生长发育。本研究结果表明,蒸馏水培养下,3.75 $\mu\text{g/mL}$ 硫代葡萄糖苷浸种可以显著提高青花菜幼苗的抗氧化酶活性,降低丙二醛含量;盐胁迫下,7.50 $\mu\text{g/mL}$ 硫代葡萄糖苷浸种可显著提升青花菜幼苗 SOD、POD 活性;干旱胁迫下,3.75 $\mu\text{g/mL}$ 硫代葡萄糖苷浸种可显著提高青花菜种子的发芽率及根冠比,降低丙二醛含量。由此可见,通过硫代葡萄糖苷浸种可提高青花菜种子发芽品质及耐盐、耐旱性,该研究结果可为利用硫代葡萄糖苷浸种提升青花菜综合抗逆性提供理论依据。

参考文献:

- [1] 刘炳仁. 特种蔬菜高产栽培新技术[M]. 天津:天津科学技术出版社,2006:93-94.
- [2] 张振超,潘永飞,戴忠良,等. 青花菜越冬设施高产栽培技术[J]. 长江蔬菜,2021(11):24-26.
- [3] 杨佳航. 西兰花中萝卜硫苷的提取和纯化研究[D]. 杭州:浙江工商大学,2018.
- [4] 江 敏. 萝卜硫苷的分离纯化工艺研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2012.
- [5] 梁志乐,汪宽鸿,杨 静,等. 硫代葡萄糖苷在十字花科植物应对非生物胁迫中的作用[J]. 园艺学报,2022,49(1):200-220.
- [6] SALEHIN M, LI B, TANG M, et al. Auxin-sensitive Aux/IAA proteins mediate drought tolerance in *Arabidopsis* by regulating glucosinolate levels[J]. Nature Communications, 2019, 10(1):4021.
- [7] MARTÍNEZ-BALLESTA M, MORENO-FERNÁNDEZ D A, CASTEJÓN D, et al. The impact of the absence of aliphatic glucosinolates on water transport under salt stress in *Arabidopsis thaliana*[J]. Frontiers in Plant Science, 2015, 6:524.
- [8] GUO R, WANG X, HAN X, et al. Comparative transcriptome analyses revealed different heat stress responses in high- and low-GS *Brassica alboglabra* sprouts[J]. BMC Genomics, 2019, 20(1):269.
- [9] 李向果,汝应俊,年 芳,等. 西兰花中硫代葡萄糖苷酸水解产物的体外和体内抗菌试验[J]. 甘肃农业大学学报,2014,49(2):55-60.
- [10] 张 睿,于建丽,宋 璇,等. 西兰花萝卜硫苷提取物的抑菌及体外免疫活性探究[J]. 食品研究与开发,2021,42(4):1-7.
- [11] GAN R Y, LUI W Y, WU K, et al. Bioactive compounds and bioactivities of germinated edible seeds and sprouts:an updated review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 59:1-14.
- [12] LINIC I, ŠAMEC D, GRÚZ J, et al. Involvement of phenolic acids in short-term adaptation to salinity stress is species-specific among brassicaceae[J]. Plants, 2019, 8(6):155.
- [13] 张 毅,韩玉娥,张银乐,等. PEG-6000 模拟干旱胁迫下 3 个青稞品种的萌发特性及抗旱性评价[J]. 江苏农业科学,2019, 47(15):139-142.
- [14] 聂荫恩,宁 娜,张一中,等. 褪黑素对盐胁迫下高粱种子萌发的缓解效应及生理机制[J]. 种子, 2023, 42(4):31-40, 63.
- [15] 支巨振,毕辛华,杜克敏,等. 农作物种子检验规程 GB/T 3543.1-3543.7-1995[M]. 北京:中国标准出版社,1995.
- [16] 李子芳,吴锡冬. 植物丙二醛含量测定试验设计方案[J]. 天津农业科学,2016, 22(9):49-51.
- [17] GIANNOPOLITIS C N, RIES S K. Superoxide Dismutases[J]. Plant Physiology, 1977, 59(2):309-314.
- [18] KOCHBA J, LAVEE S, SPIEGEL-ROY P. Differences in peroxidase activity and isoenzymes in embryogenic and non-embryogenic 'Shamouti' orange ovular callus lines1[J]. Plant and Cell Physiology, 1977, 18(2):463-467.
- [19] YANG Y, LIU Q, WANG G X, et al. Germination, osmotic adjustment, and antioxidant enzyme activities of gibberellin-pretreated *Picea asperata* seeds under water stress[J]. New Forests, 2009, 39(2):231-243.
- [20] ENDARA M J, COLEY P D. The resource availability hypothesis revisited: a meta-analysis[J]. Functional Ecology, 2011, 25(2):389-398.
- [21] SÁNCHEZ-PUJANTE P J, BORJA-MARTÍNEZ M, PEDREÑO M Á, et al. Biosynthesis and bioactivity of glucosinolates and their production in plant *in vitro* cultures[J]. Planta, 2017, 246(1):19-32.
- [22] 舒思晨. 外源 MeJA 和 BR 对番茄种子萌发的作用及其干旱胁迫下对幼苗生长的影响[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2023.
- [23] SANJAYA G, ISOBEL A P, STEPPUHN H, et al. Seedling, early vegetative, and adult plant growth of oilseed rapeseed (*Brassica napus* L.) under saline stress[J]. Canadian Journal of Plant Science, 2019, 99(6):927-941.
- [24] 魏茜雅,林欣琪,梁腊梅,等. 褪黑素引发处理提高朝天椒种子萌发及幼苗耐盐性的生理机制[J]. 江苏农业学报, 2022, 38(6):1637-1647.
- [25] MOHAMED Z, KADDA H, INES T, et al. Effect of salinity and drought on the germination of *Lygeum spartum* L. in the region of saida (western algerian steppe)[J]. Ekológia(Bratislava), 2023, 42(2):159-164.
- [26] 龙卫华,浦惠明,张洁夫,等. 甘蓝型油菜发芽期的耐盐性筛选[J]. 中国油料作物学报, 2013, 35(3):271-275.
- [27] 胡竞渝,冯国军,刘大军,等. 外源腐胺对盐胁迫下菜豆种子萌发及抗性的影响[J]. 中国农学通报, 2023, 39(15):52-58.
- [28] 苏金强,谢晓清,林秋金,等. 外源赤霉素对盐胁迫下百香果种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 广东农业科学, 2023, 50(10):66-74.

- [29] 蔚胜利,王秋雁,张群琰,等. 5-ALA 浸种对干旱胁迫下紫花苜蓿种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 草学,2022(6):22-31.
- [30] 范小玉,陈雷,刘卫星,等. 氯化钙浸种对干旱胁迫下花生种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(8):101-105.
- [31] 邬燕. 模拟干旱胁迫下葡萄的抗旱生理生化机理研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2023.
- [32] 孙三杰,李建明,姚勇哲,等. 亚低温与干旱胁迫对番茄幼苗渗透调节物质与抗氧化酶活性的影响[J]. 干旱地区农业研究,2012,30(3):154-158,164.
- [33] MENG X, CAI J, DENG L, et al. S1STE1 promotes abscisic acid-dependent salt stress-responsive pathways via improving ion homeostasis and reactive oxygen species scavenging in tomato[J]. Journal of Integrative Plant Biology,2020,62(12):1942-1966.
- [34] 李新蕾,李叶芳,李凤荣,等. 干旱胁迫对扁核木种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学),2020,35(4):682-687.
- [35] 刘建新,王金成,王瑞娟,等. 外源过氧化氢提高燕麦耐盐性的生理机制[J]. 草业学报,2016,25(2):216-222.
- [36] 赵野,刘威,王贺,等. 外源 CaCl_2 对盐胁迫下西伯利亚白刺活性氧代谢的影响[J]. 植物生理学报,2021,57(5):1105-1112.
- [37] 卢环,王成,曾玲玲,等. 不同浓度烯效唑浸种对绿豆生理及生长的影响[J]. 黑龙江农业科学,2023(8):50-57.
- [38] 张成冉,徐广海,宋朝玉,等. 糖浸种对盐胁迫玉米种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 种子,2021,40(8):51-56.
- [39] 张亮,李玉婷,夏文静,等. 盐胁迫下异甜菊醇浸种对油菜种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 福建农业学报,2020,35(8):883-890.
- [40] 范小玉,陈雷,刘卫星,等. 氯化钙浸种对干旱胁迫下花生种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(8):101-105.

(责任编辑:黄克玲)