

油菜素内酯对低温胁迫下西瓜种子萌发及其抗氧化能力的影响

侯晟灿^{1,2}, 赵展³, 张黎凤¹, 王家发⁴, 罗晓丹^{1,2}, 于玉红¹,
刘红兵^{1,2}, 王中元⁴, 赵津禾¹, 李军华¹

(1. 开封市农林科学研究院 河南开封 475004; 2. 河南省优质抗逆西瓜新种质创制与利用工程技术研究中心 河南开封 475004; 3. 开封大学 河南开封 475000; 4. 西北农林科技大学 陕西杨凌 712100)

摘要: 为了探究外源油菜素内酯(BR)对西瓜种子萌发及其幼苗耐低温的调控机制,以西瓜种子 B6 为试材,研究了不同浓度(ρ , 后同)BR(0.001、0.01、0.05、0.1、1 和 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)浸种处理对低温胁迫条件下西瓜种子萌发及其幼苗生长特性的影响。结果表明,在低温胁迫下,0.05 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 BR 浸种处理效果最好,西瓜种子的发芽率较对照(清水)显著提高了 29.28 个百分点;芽苗的超氧化物歧化酶、过氧化物酶和过氧化氢酶活性分别比对照显著提高了 77.55%、72.90% 和 54.74%;可溶性蛋白、可溶性糖和脯氨酸含量分别比对照显著提高了 167.43%、63.07% 和 66.42%;相对电导率、丙二醛含量、 $\text{O}_2\cdot^-$ 含量和 H_2O_2 含量分别比对照显著降低了 40.96%、50.00%、42.37% 和 40.41%。本研究结果为促进低温胁迫下西瓜种子的萌发及提高幼苗的低温抗性提供了重要的理论依据。

关键词: 西瓜;油菜素内酯;低温胁迫;种子萌发;生理特性

中图分类号: S651

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2025)10-098-06

Effects of BR on seed germination and seedling antioxidant capacity in watermelon under low temperature stress

HOU Shengcan^{1,2}, ZHAO Zhan³, ZHANG Lifeng¹, WANG Jiafa⁴, LUO Xiaodan^{1,2}, YU Yuhong¹, LIU Hongbing^{1,2}, WANG Zhongyuan⁴, ZHAO Jinhe¹, LI Junhua¹

(1. Kaifeng Academy of Agriculture and Forestry, Kaifeng 475004, Henan, China; 2. Engineering Technology Research Center of New Germplasm Creation and Utilization of High Quality Stress-resistant Watermelon in Henan Province, Kaifeng 475004, Henan, China; 3. Kaifeng University, Kaifeng 475000, Henan, China; 4. Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: In order to investigate the regulatory mechanism of exogenous brassinolide (BR) on watermelon seed germination and the low temperature tolerance of seedlings, the watermelon seed variety B6 was used as the experimental material. The effects of seed soaking with different concentrations of BR (0.001, 0.01, 0.05, 0.1, 1, and $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) on seed germination and seedling growth characteristics under low temperature stress were studied. The results indicated that under low temperature stress, the 0.05 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ BR treatment yielded the most favorable outcomes: The germination rate was significantly increased 29.28 percent points compared with the control (distilled water). The activities of SOD, POD, and CAT in the seedlings were significantly enhanced by 77.55%, 72.90%, and 54.74%, respectively. Meanwhile, the contents of soluble protein, soluble sugar, and proline were markedly elevated by 167.43%, 63.07%, and 66.42%, respectively. In contrast, the levels of REC, MDA, $\text{O}_2\cdot^-$, and H_2O_2 were significantly reduced by 40.96%, 50.00%, 42.37%, and 40.41%, respectively. These findings provide valuable theoretical support for improving watermelon seed germination and enhancing seedling low temperature resistance under cold stress conditions.

Key words: Watermelon; Brassinolide; Low temperature stress; Seed germination; Physiological characteristics

收稿日期: 2025-06-09; 修回日期: 2025-07-22

基金项目: 国家西甜瓜产业技术体系(CARS-25); 开封市重点研发专项(23ZDYF008); 河南省中央引导地方科技发展资金项目(Z20231811037)

作者简介: 侯晟灿, 女, 助理研究员, 研究方向为西瓜育种。E-mail: houcan2007@126.com

通信作者: 李军华, 男, 副研究员, 主要从事西瓜育种与栽培研究。E-mail: 15237821866@139.com

温度是影响植物生长的重要因素之一,尤其是对于种子来说,适宜的温度条件才能保证萌发过程中一系列生理生化作用,温度过低易导致种子发芽率低、出苗慢,并对幼苗的光合作用产生一定的抑制^[1-3]。近年来,随着农业供给侧结构性改革的深入,设施农业不断发展,西瓜的早春栽培和反季节种植可以给农民带来更高的收益^[4]。然而,由于西瓜是喜温作物,低温环境若持续时间较长,必然会给西瓜种子的萌发以及幼苗生长带来不利影响,最终导致西瓜产量和品质降低。因此,研究低温胁迫下西瓜种子的萌发和幼苗抗性,对培育壮苗、指导生产具有积极意义^[5]。

油菜素内酯(brassinolide, BR)作为新型的植物内源激素,在植物各项生长发育过程中都起到调控作用,尤其在提高作物光合效率、促进苗壮、提高作物抗逆性方面具有显著优势,在许多作物生产上的应用都取得了一定的成果^[5-8]。研究表明,油菜素内酯通过增强植物中抗氧化酶活性、减轻膜脂过氧化程度和减少渗透调节物质含量,显著提高了香蕉^[9]、甘蓝型油菜^[10]、番茄^[11]和辣椒^[12]在低温胁迫下的抗寒性和生长能力。此外,在小白菜^[13]、黄瓜^[14]、茄子^[15]、葡萄^[16]、水稻^[17]、小麦^[18]等作物中,低温胁迫对植物造成的伤害也能够通过施用油菜素内酯来缓解,在一定程度上提高了作物抗性。目前,关于BR调节西瓜种子应对低温胁迫的报道较少。鉴于此,笔者通过研究不同浓度外源BR浸种对低温胁迫条件下西瓜种子发芽及对西瓜芽苗生长势、抗氧化酶活性、生物膜系统、渗透调节物质含量的影响,揭示BR调节西瓜种子萌发及提高抗寒性的作用机制,以期在设施栽培中提高西瓜幼苗抗寒性的生产实践提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料

供试西瓜品种B6为开封市农林科学研究院自选自育材料;油菜素内酯购买于合肥博美生物科技有限责任公司。

1.2 试验设计

试验于2025年2月在开封市农林科学研究院实验室进行。挑选籽粒饱满、均匀一致的西瓜种子用于萌发试验。选用直径为12 cm的培养皿,放置种子前在培养皿中铺2层无菌滤纸。种子处理步骤如下:先用清水将种子搓洗干净,然后用3%次氯酸钠溶液浸泡消毒10 min,再用无菌蒸馏水漂洗3

次,最后用滤纸将水吸干,于室温条件下放在已准备好的培养皿中进行BR浸种处理24 h。BR溶液的浸种浓度分别为0.001、0.01、0.05、0.1、1和5 mg·L⁻¹,分别标记为T1~T6。浸种结束后,用无菌蒸馏水将种子清洗干净,放于有滤纸保湿的培养皿中,然后将培养皿放入人工气候培养箱中进行低温(15℃)处理,光照强度为10 000 lx,光暗周期为14 h/10 h,相对湿度75%,每2 d向培养皿内添加2 mL蒸馏水,持续培养观察种子的发芽状况。试验以低温清水处理作对照(CK),每个培养皿播种100粒种子,每个处理设置3次重复。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 种子萌发及生长指标 依据种子萌发检验规程,以胚根突破种皮1 mm即视为萌发,培养3 d后测定种子发芽势,待连续5 d没有新发芽的种子时,对发芽率进行测定。发芽势/%=(供试种子发芽数/供试种子数)×100(第3天测定);发芽率/%=(供试种子发芽总数/供试种子数)×100(第12天测定)。15℃连续培养12 d后,每个处理随机选取10株,采用直尺测量其下胚轴长度和胚根长度,并测定相关的生理生化指标,计算平均值。

1.3.2 生理生化指标 采用氮蓝四唑(NBT)法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性^[19];采用愈创木酚法测定过氧化物酶(POD)活性^[19];采用过氧化氢法测定过氧化氢酶(CAT)活性^[19];采用考马斯亮蓝(G-250)染色法测定可溶性蛋白含量^[19];采用酸性茚三酮显色法测定脯氨酸含量^[19];采用硫代巴比妥酸法测定丙二醛(MDA)含量^[19];采用蒽酮比色法测定可溶性糖含量^[20];使用电导率仪分别测定样品煮沸前后的电导率,再计算相对电导率(REC),REC/%=(煮沸前电导率/煮沸后电导率)×100^[21];采用苏州科铭生物技术有限公司的试剂盒测定超氧阴离子(O₂⁻·)和H₂O₂含量。每个处理随机选取5株进行测定,设置3次重复。

1.4 数据分析

采用Microsoft Excel 2016和SPSS26.0统计软件进行数据整理和统计分析;利用Origin 2022软件作图。

2 结果与分析

2.1 低温胁迫下外源BR对西瓜种子萌发和生长的影响

由表1可知,在低温胁迫条件下,除5 mg·L⁻¹处理下的种子发芽势低于CK外,其他浓度处理下的

发芽势均有所提高,其中 1 mg·L⁻¹(T5)处理下的种子发芽势较 CK 显著提高 15.95 百分点,其他处理与 CK 差异不显著。随着 BR 处理浓度的增加,西瓜种子的发芽率呈先上升后下降的趋势,在浓度为 0.05 mg·L⁻¹(T3)时,发芽率最高,为 53.33%,比 CK 显著提高 29.28 百分点,当浓度达到 5 mg·L⁻¹(T6)时,发芽率降低至 30.00%,与 CK 差异不显著。在低温环境下,BR 浸种处理后芽苗的下胚轴长度均显著高于 CK,其中 BR 处理浓度为 0.05 mg·L⁻¹时,下胚轴长度最长,比 CK 显著提高 19.69%;在胚根长方面,除 5 mg·L⁻¹浓度外,其他处理均显著高于 CK,其中浓度为 0.05 mg·L⁻¹时达到最大,较 CK 显著提高 59.49%。以上结果表明,在一定浓度范围内,BR 浸种处理具有提高低温胁迫条件下西瓜种子发芽势、发芽率和促进芽苗生长的作用,且发芽率和芽苗生长变化均随着 BR 浓度的增加呈先升高后降低的趋势,最佳的 BR 浸种浓度为 0.05 mg·L⁻¹。

表 1 低温胁迫下不同浓度 BR 对西瓜种子萌发和生长的影响

Table 1 Effects of different concentrations of BR on the germination and growth of watermelon seeds under low temperature stress

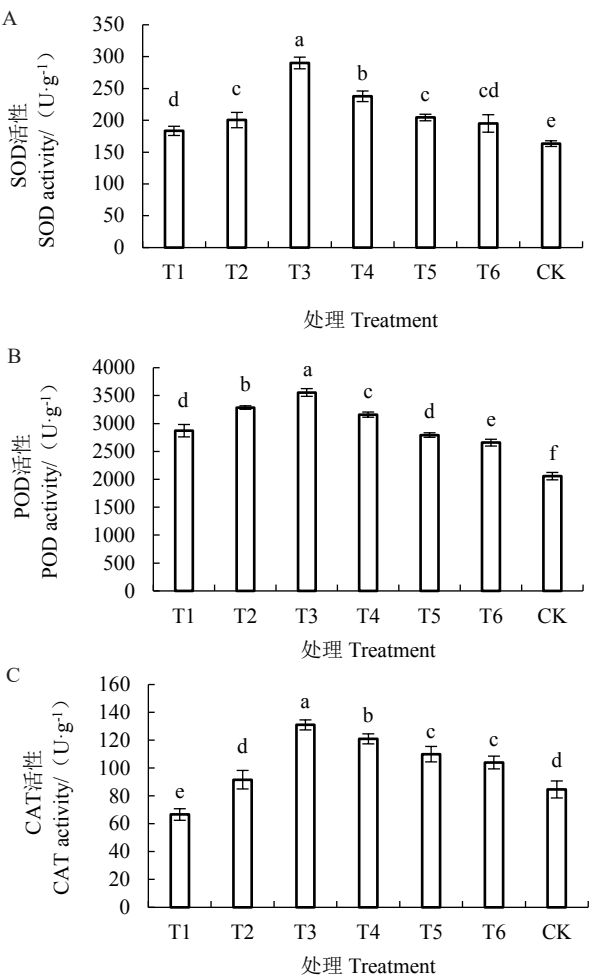
处理 Treatment	发芽势 Germination potential/%	发芽率 Germination rate/%	下胚轴长 Hypocotyl length/cm	胚根长 Radicle length/cm
T1	23.81±9.52 abc	40.95±2.38 ab	3.45±0.05 cd	2.10±0.11 de
T2	26.67±6.67 ab	50.00±3.33 a	3.75±0.06 b	2.91±0.07 b
T3	23.33±3.33 abc	53.33±0.10 a	3.83±0.06 a	3.11±0.09 a
T4	26.67±6.67 ab	46.67±6.67 a	3.51±0.03 c	2.59±0.08 c
T5	33.33±3.33 a	40.00±3.33 ab	3.41±0.04 d	2.20±0.03 d
T6	10.00±3.33 c	30.00±3.33 bc	3.31±0.04 e	2.03±0.08 ef
CK	17.38±4.05 bc	24.05±2.62 c	3.20±0.02 f	1.95±0.06 f

注:同列不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: Different small letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level. The same below.

2.2 低温胁迫下外源 BR 对西瓜芽苗抗氧化酶活性的影响

由图 1 可知,随着 BR 浸种浓度的增加,西瓜芽苗中抗氧化酶(SOD、POD 和 CAT)活性均呈先升高后降低的变化趋势,当 BR 浓度为 0.05 mg·L⁻¹时,3 种抗氧化酶活性均达到最大值。与 CK 相比,0.001、0.01、0.05、0.1、1 和 5 mg·L⁻¹的 BR 浸种时,西瓜芽苗中 SOD 活性分别显著提高 12.25%、22.65%、77.55%、45.52%、25.10%和 19.39%;POD 活性分别显著提高 39.61%、59.77%、72.90%、53.61%、35.82%和 29.17%;0.05、0.1、1 和 5 mg·L⁻¹BR 处理的 CAT 活性较 CK 显著提高 54.74%、42.92%、



注:不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: Different small letters indicate significant difference at 0.05 level. The same below.

图 1 低温胁迫下不同浓度 BR 处理对西瓜芽苗中 SOD (A)、POD(B)、CAT(C)活性的影响

Fig. 1 Effects of different concentrations of BR on the activity of SOD(A), POD(B) and CAT(C) in watermelon seedlings under low temperature stress

29.93%和 22.84%,而 0.001 mg·L⁻¹(T1)的 BR 处理较 CK 显著降低 21.26%,0.01 mg·L⁻¹(T2)的 BR 处理与 CK 差异不显著。以上结果表明,BR 浸种处理能够提高低温胁迫条件下西瓜芽苗内部的抗氧化酶(SOD、POD 和 CAT)活性,有利于增强植物抗寒性,其中 0.05 mg·L⁻¹的 BR 处理效果最优。

2.3 低温胁迫下外源 BR 对西瓜芽苗中渗透调节物质含量的影响

由图 2 可知,在低温胁迫条件下,各浓度 BR 浸种处理均能显著提高西瓜芽苗中可溶性蛋白含量,其中 BR 浓度为 0.05 mg·L⁻¹时效果最好,较 CK 显著提高 167.43%。低浓度(0.01、0.05 和 0.1 mg·L⁻¹)BR 处理可显著提高西瓜芽苗中可溶性糖和脯氨酸

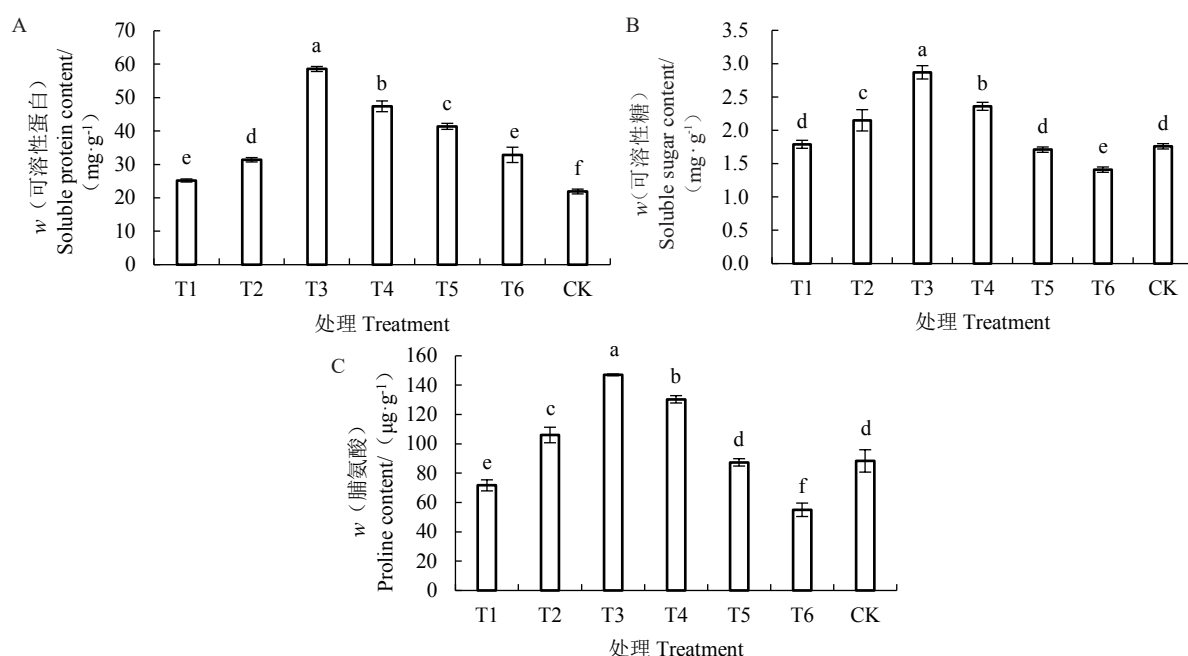


图2 低温胁迫条件下不同浓度 BR 对西瓜芽苗中可溶性蛋白(A)、可溶性糖(B)和脯氨酸(C)含量的影响

Fig. 2 Effects of different concentrations of BR on the soluble protein(A), soluble sugar(B) and proline content in watermelon seedlings under low temperature stress

含量,其中 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时效果最佳,较 CK 分别显著提高 63.07%和 66.42%;而高浓度(1 和 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) BR 则降低可溶性糖和脯氨酸含量;过低浓度($0.001 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)BR 处理的可溶性糖含量与 CK 差异不显著,脯氨酸含量则显著低于 CK。以上结果表明,低浓度 BR 浸种处理可以通过提高芽苗中可溶

性蛋白、可溶性糖和脯氨酸含量有效缓解低温胁迫对芽苗造成的损伤,其中 BR 浓度为 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时作用效果最好;而高浓度 BR 处理则有抑制作用。

2.4 低温胁迫下外源 BR 对西瓜芽苗膜透性和活性氧含量的影响

由图 3 可知,在低温胁迫条件下,不同浓度的

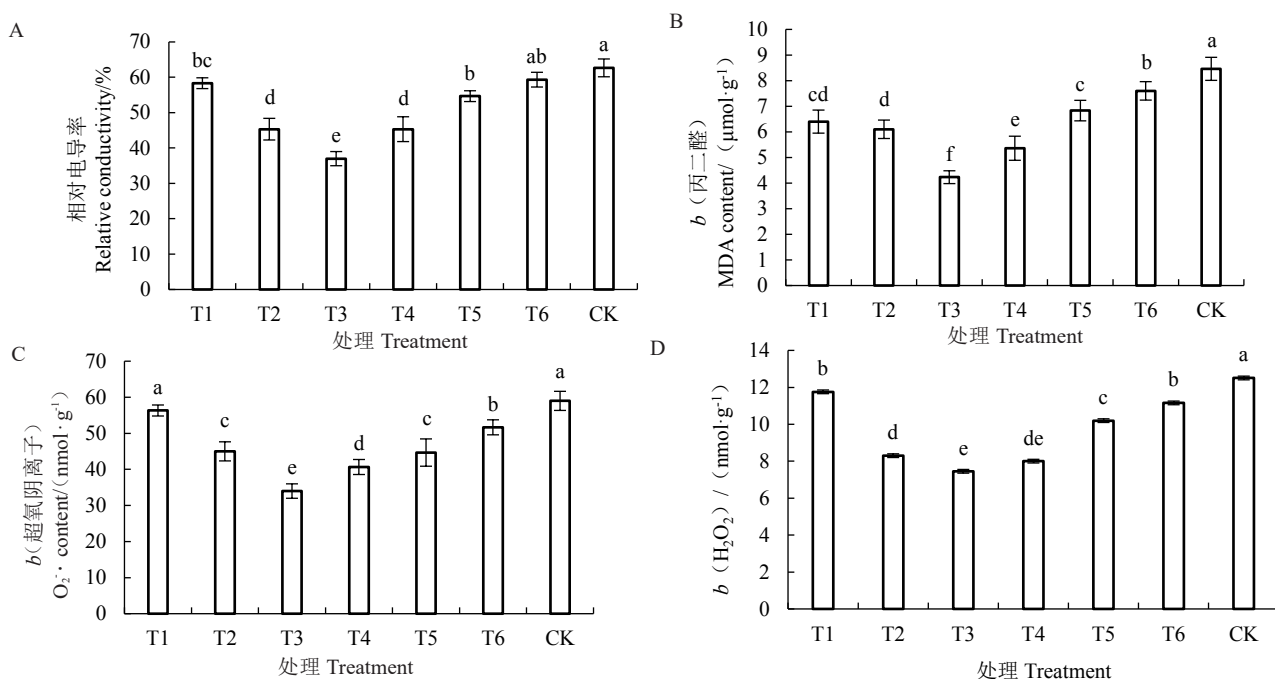


图3 低温胁迫下不同浓度 BR 对西瓜芽苗 REC(A)及丙二醛(B)、超氧阴离子(C)和 H_2O_2 (D)含量的影响

Fig. 3 Effects of different concentrations of BR on the REC(A), MDA(B), $\text{O}_2 \cdot ^-$ (C) and H_2O_2 (D) content in watermelon seedlings under low temperature stress

BR 浸种处理显著影响西瓜芽苗氧化损伤指标,随 BR 浓度增加,西瓜芽苗的相对电导率(REC)及 MDA、超氧阴离子($O_2^{\cdot-}$)和 H_2O_2 含量均呈先降低后升高的趋势,其中 $0.05\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 BR 处理效果最明显,与 CK 相比,各指标分别显著降低了 40.96%、50.00%、42.37%和 40.41%。以上结果表明,在本试验条件下, $0.05\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 BR 处理对缓解低温胁迫诱导的膜损伤(REC、MDA)和活性氧积累($O_2^{\cdot-}$ 、 H_2O_2)效果最佳。

3 讨论与结论

低温是限制种子发芽和植物生长的重要因素,而油菜素内酯类化合物(BRs)作为甾醇类激素,在提高作物耐冷性方面表现出显著效果。BRs 不仅能减轻低温胁迫对植物的伤害,还对种子萌发、幼苗生长、器官发育及衰老具有促进作用^[22-23]。尽管 BRs 在多种作物中的抗逆作用已被广泛研究,但其在缓解低温胁迫对西瓜种子萌发影响方面的研究仍相对有限。本研究结果表明,BR 浸种处理在一定范围内具有提高低温胁迫条件下西瓜种子发芽势、发芽率和芽苗长势的作用,且发芽率和长势均随着 BR 浓度的升高呈先升高后降低的趋势,与吴旺娣等^[6]、闫小红等^[12]、黄斌等^[14]的研究结果一致,这可能是低浓度的 BR 能够激活植物体内的激素信号通路,促进能量代谢,增强种子萌发活力;而当 BR 浓度过高时,打破植物体内激素平衡,抑制其他生长激素的正常作用,从而影响种子萌发。

当植物处于低温环境中时,为了抵御逆境的胁迫,植物体内的保护酶系统往往会被激发从而保护细胞膜免受自由基等有害物质的伤害。在植物体内,SOD、POD 和 CAT 是保护酶系统中几种常见的抗氧化酶,其活性大小已成为判断植物是否能够抵御逆境胁迫的重要指标^[24]。本研究结果表明,低温下外源 BR 对西瓜芽苗抗氧化系统具有调控作用,适宜浓度($0.05\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)的 BR 浸种处理可显著提高 SOD、POD、CAT 活性,而 BR 浓度过高则导致酶活性下降,与王军萍等^[13]、杨萍等^[25]的研究结果一致。这可能是低浓度 BR 能够诱导植物体内抗氧化酶活性,减少活性氧的积累,缓解低温胁迫的抑制作用,而过高的 BR 浓度可能对细胞产生毒性作用,破坏细胞膜结构和功能,抑制细胞正常的生理活动。

在低温环境下,西瓜幼苗可通过积累可溶性蛋白、可溶性糖和脯氨酸等渗透调节物质来提高细胞内溶质浓度,降低渗透势,进而缓解冷胁迫引起的

细胞间生化损伤,这些渗透调节物质能够维持细胞膨压,保证细胞内生理生化过程的正常进行,与植物的抗寒性呈正相关^[26-28]。本研究结果表明,不同浓度的 BR 浸种处理均能显著提高西瓜芽苗中可溶性蛋白含量,且 $0.05\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 BR 处理效果最佳;低浓度(0.01 、 0.05 和 $0.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)BR 能协同提高可溶性糖和脯氨酸含量,有效缓解低温胁迫损伤,且浓度为 $0.05\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时效果最佳,而高浓度(1 和 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)BR 则对西瓜芽苗中可溶性糖和脯氨酸积累产生抑制作用,与石欣隆等^[29]在花生幼苗上的研究结果一致,但其最佳处理浓度为 $0.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,可能与供试作物品种差异有关。

在低温环境下,植物体内自由基的动态平衡会被打破,产生大量的活性氧,造成细胞膜系统的氧化损伤,因此细胞膜的稳定性也在一定程度上反映植物的抗性^[30]。MDA 含量和相对电导率是植物在逆境条件下引起氧化损伤和电解质渗漏的重要生理指标,与 $O_2^{\cdot-}$ 含量和 H_2O_2 含量一起可间接反映出膜系统的损伤程度^[31-34]。本研究结果表明,随着 BR 浓度的提高,西瓜芽苗中 REC 及 MDA、 $O_2^{\cdot-}$ 和 H_2O_2 含量均呈先降低后升高的趋势, $0.05\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 BR 处理效果最佳。这些变化反映了 BR 对植物代谢的双重调节作用,低浓度的 BR 可通过激活代谢途径增强抗氧化能力和渗透调节能力,促进西瓜芽苗的生长和抗寒性增强;而高浓度的 BR 可能导致代谢紊乱、抗氧化系统失衡和氧化损伤加剧,从而抑制西瓜芽苗的正常生理功能。

综上所述, $0.05\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 BR 浸种处理显著提高低温胁迫下西瓜种子的发芽率和发芽势,促进生长,西瓜芽苗的 SOD、POD 和 CAT 活性及可溶性蛋白、脯氨酸和可溶性糖含量较 CK 均显著提高,REC 及 MDA、 $O_2^{\cdot-}$ 和 H_2O_2 含量显著降低。因此, $0.05\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 BR 可以促进低温胁迫下西瓜种子萌发,提高芽苗的低温抗性。但本试验仅探讨了 BR 浸种对西瓜种子萌发和芽苗抗氧化能力的影响,未追踪后续的生长发育,因此,在西瓜响应低温胁迫的生理生化及分子机制等方面还应做进一步的研究和完善。

参考文献

- [1] 徐恒恒,黎妮,刘树君,等.种子萌发及其调控的研究进展[J].作物学报,2014,40(7):1141-1156.
- [2] 韩丽娟,马爽,王光野.不同温度对木兰种子萌发的影响[J].长春师范学院学报(自然科学版),2010,29(8):79-82.
- [3] 郝楠.温度对不同玉米种子萌发及生理特性的影响[D].北京:中国农业科学院,2011.

- [4] 赵展,侯晟灿,王晓婷,等.外源物质对低温胁迫下西瓜幼苗生理特性的影响[J].北方园艺,2021(18):29-35.
- [5] 范小玉,张显.油菜素内酯对低温弱光胁迫下西瓜幼苗耐冷性的影响[J].北方园艺,2012(7):5-8.
- [6] 吴旺妮,周伟江,唐才宝,等.2,4-表油菜素内酯对低温胁迫下水稻种子萌发及生理特性的影响[J].分子植物育种,2020,18(13):4427-4434.
- [7] 束胜,汤圆圆,罗佳音,等.外源2,4-表油菜素内酯对亚低温弱光胁迫下番茄叶片碳同化和抗氧化代谢的影响[J].植物生理学报,2016,52(8):1295-1304.
- [8] 张小冰.新型植物激素-油菜素内酯在农业上的应用[J].生物学教学,2009,34(1):4-6.
- [9] 刘德兵,魏军亚,李绍鹏,等.油菜素内酯提高香蕉幼苗抗冷性的效应[J].植物研究,2008,28(2):195-198.
- [10] 崔赛,王同华,张振乾.油菜素内酯浸泡种子对甘蓝型油菜幼苗的影响[J].农业生物技术学报,2022,30(2):249-259.
- [11] 王光正,吕剑,毛娟,等.油菜素内酯对低温胁迫下番茄幼苗生理指标的影响[J].甘肃农业大学学报,2021,56(4):69-75.
- [12] 闫小红,胡文海,曾守鑫,等.低温胁迫下2,4-表油菜素内酯对辣椒种子萌发及幼苗生长的影响[J].华中农业大学学报,2012,31(5):563-568.
- [13] 王军萍,宋留丽,郁志芳.2,4-表油菜素内酯处理对不同温度贮藏中小白菜品质和生理生化的影响[J].食品工业科技,2022,43(9):349-358.
- [14] 黄斌,李文科,李梦露,等.2,4-表油菜素内酯对低温下黄瓜种子萌发和幼苗低温抗性的影响[J].中国蔬菜,2021(12):59-66.
- [15] 高慧,张宏军,康丽娜,等.2,4-表油菜素内酯对茄子果实贮藏品质及抗氧化活性的影响[J].西北植物学报,2014,34(8):1614-1619.
- [16] 郭学良,汪月宁,刘妍,等.喷施外源油菜素内酯对美乐葡萄幼苗抗低温胁迫的影响[J].农业科学研究,2023,44(2):19-24.
- [17] 刘子禄,陈桂华,张晶,等.外源2,4-表油菜素内酯对水稻种子萌发特性的影响[J].分子植物育种,2023,21(12):4014-4020.
- [18] 张军保,陈宇姝,田诗,等.油菜素内酯对低温胁迫下冬小麦*Rab15-like*基因表达的影响[J].东北农业大学学报,2024,55(5):28-34.
- [19] 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.
- [20] 陈金峰,王宫南,程素满.过氧化氢酶在植物胁迫响应中的功能研究进展[J].西北植物学报,2008,28(1):188-193.
- [21] 高俊凤.植物生理学实验指导[M].北京:高等教育出版社,2006.
- [22] 谷端银,王秀峰,张慎好,等.油菜素内酯在瓜类作物上的研究及应用进展[J].中国瓜菜,2006,19(2):24-26.
- [23] 万正林,罗庆熙.油菜素内酯在蔬菜上的应用研究进展[J].长江蔬菜,2006(11):32-34.
- [24] 陈卫国,刘勇,周冀衡.低温胁迫对烟草膜保护酶系统的影响[J].安徽农业科学,2011,39(7):3978-3980.
- [25] 杨萍,李杰.2,4-表油菜素内酯对低温胁迫下辣椒幼苗抗氧化系统的影响[J].北方园艺,2017(21):7-12.
- [26] 高媛,齐晓花,杨景华,等.高等植物对低温胁迫的响应研究[J].北方园艺,2007(10):58-61.
- [27] 闫洪奎,刘祥,王会广,等.低钾胁迫下耐低钾玉米可溶性蛋白、可溶性糖和钾含量的变化及其关系[J].玉米科学,2012,20(6):81-84.
- [28] 崔国文.低温胁迫对紫花苜蓿种子萌发期可溶性糖和淀粉的影响[J].东北农业大学学报,2009,40(1):72-76.
- [29] 石欣隆,薛嫻,杨月琴,等.2,4-表油菜素内酯对低温胁迫下花生幼苗生长及生理特性的影响[J].中国油料作物学报,2023,45(2):341-348.
- [30] 李猛,吕亭辉,邢巧娟,等.瓜类蔬菜耐低温性评价与调控研究进展[J].园艺学报,2018,45(9):1761-1777.
- [31] 陈禹兴,付连双,王晓楠,等.低温胁迫对冬小麦恢复生长后植株细胞膜透性和丙二醛含量的影响[J].东北农业大学学报,2010,41(10):10-16.
- [32] 马艳青,戴雄泽.低温胁迫对辣椒抗寒性相关生理指标的影响[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2000,26(6):461-462.
- [33] 李丽杰,顾万荣,李从锋,等.DCPTA对低温下玉米叶片抗氧化系统及渗透调节物质的影响[J].植物生理学报,2016,52(12):1829-1841.
- [34] 张永吉,苏芑,祁建波,等.外源一氧化氮对低温胁迫下茄子幼苗抗性的影响[J].植物生理学报,2020,56(1):66-72.