

β -罗勒烯作为种子引发剂对油菜种子及幼苗耐盐的影响

肖亚琴¹, 周子睿¹, 阮颖², 刘春林^{1*}

¹湖南农业大学农学院, 湖南 长沙

²湖南农业大学生命科学院, 湖南 长沙

收稿日期: 2026年3月26日; 录用日期: 2026年4月23日; 发布日期: 2026年4月30日

摘要

为缓解土壤盐渍化对油菜种子萌发及幼苗生长的抑制, 本研究首次将 β -罗勒烯这种植物源单萜化合物应用于种子引发领域, 探究其对盐胁迫下油菜萌发的调控效应。以“湘油15”油菜种子筛选 β -罗勒烯最优引发组合, 并验证其在盐胁迫下的作用, 设置5个 β -罗勒烯浓度(0、0.5、1、1.5、2 mM)和3个引发时间(6、12、18 h), 结合4个盐胁迫水平(0、50、100、150 mM NaCl)开展实验, 测定萌发参数、生长指标及生理指标。结果表明: 1) 通过隶属函数和熵权法分析可得, β -罗勒烯最优引发组合为12 h 1 mM, 该组合下植株鲜重、幼苗的根长、种子发芽指数和萌发活力指数为所有处理中的最高值0.07 g、7.96 cm和780.83, 综合表现显著优于其他组合; 2) 盐胁迫显著抑制油菜生长并加剧氧化损伤, 12h 1 mM的 β -罗勒烯处理可有效缓解该抑制: 提升发芽率与生物量, 增强渗透调节与抗氧化能力, 降低膜脂过氧化, 其中低盐(S50)下缓解效果最优。本研究证实 β -罗勒烯可作为高效环保的种子引发剂, 为盐碱地区油菜生产提供技术支持。

关键词

油菜, β -罗勒烯, 种子引发剂, 种子萌发, 盐胁迫

β -Oicmene as Seed Priming Agent Effects on Rapeseed Germination and Seedlings Salt Tolerance

Yaqin Xiao¹, Zirui Zhou¹, Ying Ruan², Chunlin Liu^{1*}

¹College of Agriculture, Hunan Agricultural University, Changsha Hunan

²College of Life Sciences, Hunan Agricultural University, Changsha Hunan

Received: March 26, 2026; accepted: April 23, 2026; published: April 30, 2026

*通讯作者。

文章引用: 肖亚琴, 周子睿, 阮颖, 刘春林. β -罗勒烯作为种子引发剂对油菜种子及幼苗耐盐的影响[J]. 农业科学, 2026, 16(4): 685-693. DOI: 10.12677/hjas.2026.164085

Abstract

To alleviate the inhibitory effects of soil salinization on rapeseed seed germination and seedling growth, this study first applied β -ocimene, a plant-derived monoterpene compound, to seed priming and investigated its regulatory effects on rapeseed germination under salt stress. Using “Xiangyou15” rapeseed seeds, we screened the optimal β -ocimene priming combination and verified its effects under salt stress, with 5 β -ocimene concentrations (0, 0.5, 1, 1.5, 2 mM) and 3 priming durations (6, 12, 18 h), combined with 4 salt stress levels (0, 50, 100, 150 mM NaCl). Germination parameters, growth indices, and physiological indices were determined. The results showed that: 1) Based on subordinate function and entropy weight method, the optimal β -ocimene priming combination was 12 h + 1 mM, under which the plant fresh weight (0.07 g), seedling root length (7.96 cm), germination index (780.83), and vigor index reached the highest values among all treatments, with significantly better comprehensive performance than other combinations; 2) Salt stress significantly inhibited rapeseed growth and aggravated oxidative damage, while 12 h + 1 mM β -ocimene effectively alleviated these effects by improving germination rate and biomass, enhancing osmotic regulation and antioxidant capacity, and reducing membrane lipid peroxidation, with the best alleviation effect under low salt stress (S50). This study confirms that β -ocimene can serve as a highly efficient and environmentally friendly seed priming agent, providing technical support for rapeseed production in saline-alkali areas.

Keywords

Brassica Napus L., β -Ocimene, Seed Priming Agent, Seed Germination, Salt Stress

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

土壤盐渍化是全球亟待解决的环境问题,全球约6%的土地为盐碱地,20%的灌溉农田受到盐分影响,高盐环境已成为制约植物生长和产量的关键非生物胁迫因子[1]-[3]。盐胁迫通过诱导渗透胁迫、离子毒性和氧化胁迫三重损伤,阻碍植物水分吸收与离子稳态维持,干扰光合作用、蛋白质合成等核心代谢过程,进而促使活性氧(ROS)过量产生[4]-[6]。这些过量ROS会通过蛋白质氧化、脂质过氧化作用破坏细胞膜结构与DNA完整性,而植物自身抗氧化防御系统在极端盐胁迫下难以完全清除活性氧,最终导致植株生长受抑甚至死亡[7][8]。种子萌发作为植物生命周期的初始阶段,既是建立生理基础、启动代谢活动的关键环节,也是对非生物胁迫最为敏感的时期[4][9]。该阶段的吸水过程、胚组织发育及幼苗建立均易受盐分抑制,而萌发不良直接导致田间群体密度降低,最终造成作物减产[10][11]。

油菜(*Brassica napus* L.)作为全球重要的油料、饲料和工业原料作物,其产量稳定对保障粮食安全至关重要,但盐渍化已成为威胁油菜生产的突出问题,萌发期和幼苗早期的盐敏感性更是加剧了盐碱地区的生产损失[6]。因此,开发高效技术提高油菜萌发期耐盐性,对盐碱地区农业可持续发展具有重要意义。

种子引发技术作为一种环保高效的播前处理手段,通过控制种子适度吸水激活早期代谢而不启动胚根突出,可通过调节酶活性、动员养分、增强抗氧化系统等途径,提升种子萌发性能与抗逆性,已成为缓解非生物胁迫的研究热点[12]-[14]。其中,植物源天然化合物因其低毒性、生物可降解性和高活性,逐渐成为引发剂开发的优选方向[15][16]。精油类物质凭借其抗氧化、抗菌特性,在增强植物对干旱、盐胁迫

胁迫的耐受性方面展现出良好潜力,其含有的单萜类化合物可通过稳定细胞膜结构、直接清除 ROS 发挥抗逆作用[17][18]。

β -罗勒烯(beta-3,7-二甲基-1,3,6-辛三烯)是一种天然存在于多种植物精油中的无环烯烴单萜,已被证实具有防御食草动物等多种生物学功能[19][20]。但目前其在非生物胁迫耐受性中的作用,尤其是作为种子引发剂缓解油菜盐胁迫的应用尚未明确。鉴于其天然来源与生物活性, β -罗勒烯有望开发为新型环保引发剂。

本研究首次评估 β -罗勒烯作为种子引发剂的耐盐调控效果,具体目标包括:(1) 筛选 β -罗勒烯引发油菜种子的最优浓度和时间组合;(2) 评估 β -罗勒烯引发对不同盐胁迫水平下油菜种子萌发和幼苗生长的影响;(3) 探究 β -罗勒烯诱导油菜耐盐性的生理生化机制。研究结果将为盐胁迫下油菜萌发和幼苗定植提供新型环保策略,为盐碱地区农业可持续发展提供技术支持。

2. 材料与amp;方法

2.1. 实验材料

供试材料为“湘油 15”用于 β -罗勒烯浓度 - 时间梯度筛选,并进行盐胁迫实验,由作物表观遗传调控与发育湖南省重点实验室提供,其发芽率 $\geq 85\%$ 、水分 $\leq 13\%$ 、纯度 $\geq 95\%$ 、净度 $\geq 99\%$ 。

试剂与基质: β -罗勒烯的纯度为 94.2%,购自 Sigma-Aldrich 公司;无水乙醇分析纯购自中国国药集团化学试剂有限公司;氯化钠分析纯购自中国国药集团化学试剂有限公司;育苗基质购自湖南省湘晖农业技术开发有限公司,质量执行标准 Q/BVCG006-2022。

2.2. 实验设计

2.2.1. β -罗勒烯最优引发组合筛选

采用“5 浓度 \times 4 时间”双因素设计,共 20 个处理组;不同 β -罗勒烯浓度为 0 (对照组)、0.5、1、1.5、2 mM;引发时间为 6、12、18 h。由于 β -罗勒烯具有挥发性,易溶于酒精难溶于水,所以引发处理需要将种子置于 250 mL 密封玻璃瓶中,加入 200 mL 对应浓度的 β -罗勒烯溶液,其配制方法是 β -罗勒烯与无水乙醇按 1:5 体积比溶解,1 mM 浓度需 170 μ L 94.2%原液加入 850 μ L 乙醇溶解,加蒸馏水定容至 1 L;其他浓度按比例换算,置于 25 $^{\circ}$ C 黑暗条件下浸泡。为精准解析 β -罗勒烯对种子萌发的调控效应,本研究设置与各引发时间梯度(6、12、18 h)一一对应的水处理对照(蒸馏水 + 等量无水乙醇),以排除无水乙醇助溶剂及浸泡时长本身对种子萌发的潜在影响。对照组与处理组采用完全一致的密封浸泡、风干及萌发培养条件,保证双因素试验设计的均衡性与组间可比性,为后续统计分析及隶属函数法筛选最优引发组合提供严谨的对照基准。引发后室温风干种子 2 h 备用。萌发培养是将风干种子播于铺有 2 层滤纸的 6 cm \times 38 cm 育苗盘,每盘 120 粒,滤纸加蒸馏水至湿润无流动水的状态。每个处理 3 次重复,置于 25 $^{\circ}$ C 培养箱(18 h 光照/6 h 黑暗)培养 7 天,每日记录发芽数(胚根突破种皮 ≥ 2 mm 视为发芽),计算发芽势(GP)、发芽率(GR)、平均发芽时间(MGT)、发芽速度(GS),第 7 天用校准数显卡尺测量幼苗根长和茎长、用电子天平称植株的鲜重和干重。收集试验数据采用隶属函数筛选最优引发组合。

2.2.2. β -罗勒烯引发对盐胁迫下玉米萌发及幼苗生长的影响

基于筛选结果,采用最优组合为 12 h 1 mM β -罗勒烯开展实验;处理组合为 2 个引发处理(最优处理 12 h 1 mM 的 β -罗勒烯引发和对照组 12 h 蒸馏水引发) \times 4 个盐胁迫水平(0、50、100、150 mM NaCl),共 8 组;每个处理 3 次生物学重复,每次重复 30 粒种子;基质准备:称取 1000 g 育苗基质,按 25%湿度配置:对照组 0 mM NaCl 加 333 mL 蒸馏水,盐胁迫组分别加 335 mL (50 mM)、336 mL (100 mM)、337 mL (150 mM) NaCl 溶液,注意需要少量多次加入盐溶液搅拌均匀;指标测定在培养的第 7 天记录发芽数,计

算萌发参数：种子发芽率、种子发芽势；第 7 天测定幼苗根长和茎长、鲜重和干重，鲜重需要去掉幼苗的油菜种子表皮再用电子天平测定，干重经 80℃烘干至恒重后测定。

2.3. 处理方法与样品制备

2.3.1. 种子引发与萌发

引发后种子经蒸馏水冲洗 3 次，纸巾吸干表面水分，室温风干 2 h；萌发培养条件：25 ± 1℃、16 h 光照(12000 勒克斯)/8 h 黑暗、相对湿度 60%~80%，培养盘用封口膜密封防蒸发。

2.3.2. 生理生化指标样品制备

萌发 7 d 后，采集幼苗茎叶组织，每份处理取 1 株为 1 个生物学重复，共设置 3 次生物学重复；选取功能叶片用于超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、丙二醛(MDA)及可溶性蛋白含量检测。样品经液氮快速速冻后，于-80℃超低温冰箱保存备用。

采用 Servicebio®试剂盒(赛维尔生物工程有限公司)测定各生理指标，严格按照试剂盒说明书操作：

1) SOD 与 CAT 活性：采用比色法测定，其中 CAT 活性以单位质量蛋白每分钟分解的 H₂O₂ 量表示，单位为 U/mgprot；

2) MDA 含量：采用硫代巴比妥酸(TBA)比色法测定；

3) 可溶性蛋白含量：采用 BCA 法测定。

所有检测均由赛维尔生物工程有限公司完成标准化分析。

2.4. 指标测定方法

萌发与幼苗生长参数

通过每日监测发芽种子数，并持续观察至第 7 天植株的株高和根长(以胚根伸出种子 2 毫米以上作为发芽特征)。计算油菜种子的第 4 天发芽势、第 7 天发芽率、发芽指数和活力指数，各指标计算公式如下：

发芽势(GP) = (4 天内正常萌发数/供试种子数) × 100%；

发芽率(GR) = (7 天内正常萌发数/供试种子数) × 100%；

发芽指数(GI) = \sum (第 i 天发芽数/i)；

活力指数(VI) = (胚轴 + 胚根总长度) × GI；

2.5. 数据统计分析

所有数据经 Excel 整理后，采用 SPSS 26.0 软件进行单因素方差分析(ANOVA)，P < 0.05 时用 Duncan 多重比较检验差异显著性。

3. 结果与分析

3.1. 不同浓度 β-罗勒烯对油菜生长发育和种子萌发的影响

由表 1 可知，β-罗勒烯引发处理可显著提升玉米种子萌发及幼苗生长指标，且存在明显的时间 - 浓度效应，整体表现为 12 h~18 h 引发效果优于 6 h，1~1.5 mmol/L 浓度效果最佳。

在 6 h 引发阶段，各浓度处理下种子萌发活力指数均显著低于对照，根长、茎长也未表现出优势，说明短时间引发无法充分发挥 β-罗勒烯的调控作用。12 h 引发阶段，1 mmol/L 浓度处理下根长、植株鲜重及萌发活力指数均达到峰值，显著优于对照及其他浓度。18 h 引发阶段，0.5 mmol/L 与 1 mmol/L 浓度处理下发芽指数、根长及茎长显著提升，高浓度(2 mmol/L)的茎长、发芽指数和萌发活力指数下降，说明长时间浸泡高浓度 β 罗勒烯引发可能对种子萌发出现抑制趋势。

通过隶属函数法结合熵权法综合评价, 12 h 1 mmol/L β -罗勒烯处理的综合评价值最高, 其植株鲜重、幼苗的根长、种子发芽指数和萌发活力指数为所有处理中的最高值 0.07 g、7.96 cm 和 780.83。其次为 18 h 0.5 mmol/L 处理, 而 6 h 0.5 mmol/L 处理效果最差。

综上, 1 mmol/L β -罗勒烯引发 12 h 是本试验中促进玉米种子萌发和幼苗生长的最优组合, 为玉米种子引发技术提供了新的植物源引发剂依据。

Table 1. Effects of different concentrations of β -ocimene on seed germination and seedling growth indexes of maize
表 1. 不同浓度 β -罗勒烯影响玉米种子萌发和幼苗的生长指标

油菜处理	每株鲜重	根长	茎长	发芽率	发芽指数	萌发活力指数
6 h-DW	0.05 ± 0.01ab	6.39 ± 0.11bcd	4.43 ± 0.08b	100 ± a	75.71 ± 2.65bc	484.12 ± 18.77ef
6 h-0.5	0.05 ± 0.01ab	4.54 ± 0.11e	4.42 ± 0.19b	98 ± 0.01a	75.45 ± 2.00bc	342.46 ± 3.74g
6 h-1	0.06 ± 0.01ab	4.37 ± 0.18e	4.75 ± 0.18ab	98 ± 0.01a	72.79 ± 0.84cd	318.61 ± 16.92g
6 h-1.5	0.06 ± 0.01ab	4.69 ± 0.16e	4.83 ± 0.04ab	99 ± 0.01a	76.52 ± 1.91bc	359.18 ± 20.44g
6 h-2	0.07 ± 0.01a	5.40 ± 0.19de	5.00 ± 0.17a	98 ± 0.01a	74.65 ± 3.99bcd	404.46 ± 35.60fg
12 h-DW	0.05 ± 0.02b	4.37 ± 0.61e	2.37 ± 0.07d	100 ± a	99.24 ± 0.50a	432.88 ± 58.87fg
12 h-0.5	0.05 ± 0.01ab	6.01 ± 0.69cd	2.50 ± 0.09cd	99 ± 0.01a	100.07 ± 1.32a	600.95 ± 65.98bcde
12 h-1	0.07 ± 0.01ab	7.96 ± 0.10a	2.61 ± 0.09cd	99 ± 0.01a	98.06 ± 1.03a	780.83 ± 11.37a
12 h-1.5	0.06 ± 0.01ab	6.64 ± 0.26bcd	2.69 ± 0.15cd	98 ± 0.01a	94.06 ± 0.63a	624.22 ± 24.70bcd
12 h-2	0.06 ± 0.02ab	6.84 ± 0.33abc	2.75 ± 0.17cd	100 ± a	93.81 ± 1.90a	640.44 ± 23.90bc
18 h-DW	0.05 ± 0.02b	6.29 ± 0.31bcd	2.69 ± 0.17cd	100 ± a	96.76 ± 1.09a	608.68 ± 26.51bcd
18 h-0.5	0.05 ± 0.02ab	7.01 ± 0.46abc	2.92 ± 0.15c	100 ± a	99.19 ± 1.07a	694.92 ± 46.29ab
18 h-1	0.06 ± 0.02ab	7.33 ± 0.88ab	3.02 ± 0.28c	99 ± 0.01a	93.66 ± 1.58a	685.62 ± 77.41abc
18 h-1.5	0.06 ± 0.01ab	7.03 ± 0.13abc	2.59 ± 0.24cd	100 ± a	80.06 ± 5.32b	563.91 ± 45.74cde
18h-2	0.06 ± 0.01ab	7.48 ± 0.19ab	2.55 ± 0.15cd	100 ± a	68.51 ± 1.12d	511.99 ± 11.05dfg

注: 同一列内, 相同小写字母表示差异不显著($P > 0.05$), 不同小写字母表示差异水平显著($P \leq 0.05$)。

3.2. 不同浓度盐胁迫条件下 β -罗勒烯引发对油菜种子萌发的影响

由表 2 可得, β -罗勒烯最佳处理组合 12 h 1 mM 在不同盐浓度(0、50、100、150 mM NaCl 溶液)环境下生长的生理指标, 总体来看, 盐胁迫程度加剧会显著抑制油菜生长, 而 1 mM β -罗勒烯处理可有效缓解这种抑制, 维持更高的发芽率与生物量积累。

在低盐胁迫(S50)下, 对照(CK-S50)根长、茎长及鲜重略有下降, 发芽率仍保持 100%; 1 mM 处理(1 mM-S50)可维持茎长、植株鲜重及干重显著高于同胁迫下的对照, 缓解效果明显。中盐胁迫(S100)时, 对照(CK-S100)根长、茎长及鲜重显著下降, 发芽率仍稳定; 1 mM 处理(1 mM-S100)虽发芽率略有降低, 但茎长及生物量仍显著优于对照, 减缓了生长衰退。高盐胁迫(S150)下, 对照(CK-S150)发芽率骤降至 80.95%, 根长、茎长及鲜重大幅下降; 1 mM 处理(1 mM-S150)可将发芽率维持在 95.24%, 同时保持相对更高的茎长与植株鲜重, 显著减轻了高盐胁迫的伤害。

综上, 1 mM β -罗勒烯能通过维持发芽率、促进根系与地上部生长, 有效缓解盐胁迫对油菜的生长抑制, 为油菜抗盐栽培提供了新的生长调控依据。

Table 2. β -ocimene effecting on growth indexes of rape seedlings under salt stress**表 2.** β -罗勒烯影响盐胁迫环境下油菜植株的生长指标

油菜处理	发芽率	根长	茎长	每株鲜重	每株干重
CK-H	100 ± 0.01a	12.83 ± 0.74a	5.17 ± 0.10a	0.36 ± 0.02a	0.03 ± 0.01ab
CK-S50	100 ± 0.01a	11.05 ± 0.47c	4.72 ± 0.05a	0.34 ± 0.03a	0.02 ± 0.01ab
CK-S100	100 ± 0.01a	9.28 ± 0.39de	4.05 ± 0.05b	0.27 ± 0.01c	0.02 ± 0.01cd
CK-S150	80.95 ± 4.76b	7.08 ± 0.65e	2.71 ± 0.40cd	0.14 ± 0.01d	0.01 ± 0.01d
1mM-H	100 ± 0.01a	12.71 ± 0.44a	7.03 ± 0.27bc	0.47 ± 0.02b	0.03 ± 0.01a
1mM-S50	100 ± 0.01a	9.35 ± 0.19b	6.74 ± 0.17bc	0.45 ± 0.03b	0.03 ± 0.01bc
1mM-S100	95.24 ± 4.76a	5.9 ± 0.26c	5.29 ± 0.06d	0.28 ± 0.01c	0.02 ± 0.01bc
1mM-S150	95.24 ± 4.76a	5.53 ± 0.25d	4.62 ± 0.10e	0.17 ± 0.01d	0.01 ± 0.01cd

注：同一列内，相同小写字母表示差异不显著($P > 0.05$)，不同小写字母表示差异水平显著($P \leq 0.05$)。

3.3. 不同浓度盐胁迫条件下 β -罗勒烯引发对油菜种子生理指标的影响

由表 3 可知， β -罗勒烯处理显著改变了油菜在不同浓度盐胁迫环境下的生理响应模式，与对照(CK)相比，1 mM β -罗勒烯处理在多数盐浓度下有效缓解了盐胁迫对植株的氧化损伤，表现为抗氧化酶活力与膜稳定性的优化。

在低盐胁迫(S50)下，对照(CK-S50)蛋白含量显著降低、SOD 活力及 MDA 含量升高，而 1 mM 处理(1 mM-S50)使蛋白含量大幅提升，MDA 显著下降，同时 SOD 抑制率降低，体现出明显的胁迫缓解效应。中盐胁迫(S100)时，对照(CK-S100)MDA 含量持续上升，1 mM 处理(1 mM-S100)虽 MDA 仍较高，但 SOD 活力维持在较高水平，抗氧化系统仍保持较强活性。高盐胁迫(S150)下，对照(CK-S150)蛋白含量最低、MDA 含量最高，氧化损伤最严重；1 mM 处理(1 mM-S150)可维持相对稳定的蛋白水平与抗氧化酶活力，减缓了胁迫加剧带来的生理衰退。

综上，1 mM β -罗勒烯可通过调节抗氧化系统与膜稳定性，有效缓解油菜盐胁迫损伤，且在低盐至中盐胁迫下缓解效果更突出，为油菜抗盐栽培提供了新的生理依据。

Table 3. Effects of β -ocimene on physiological indexes of rape seedlings under salt stress of different concentrations**表 3.** β -罗勒烯影响不同浓度盐胁迫环境下油菜植株生理指标

油菜处理	蛋白含量	SOD 抑制率	SOD 活力	MDA	CAT
CK-H	1.36 ± 0.13d	0.47 ± 0.04b	638.52 ± 24.18a	0.78 ± 0.03c	3.10 ± 0.80ab
CK-S50	1.06 ± 0.11a	0.56 ± 0.02c	1192.16 ± 51.03d	1.04 ± 0.07c	5.59 ± 1.18b
CK-S100	1.27 ± 0.09cd	0.43 ± 0.04c	565.23 ± 42.00bcd	1.11 ± 0.18a	3.13 ± 0.87ab
CK-S150	0.99 ± 0.14cd	0.44 ± 0.02c	770.68 ± 74.00bc	2.28 ± 0.34ab	4.22 ± 1.12ab
1mM-H	0.69 ± 0.17b	0.48 ± 0.02b	1832.41 ± 451.67bcd	0.41 ± 0.30c	3.64 ± 1.23ab
1mM-S50	2.01 ± 0.29bcd	0.36 ± 0.02a	365.82 ± 85.36b	0.29 ± 0.07bc	1.14 ± 0.10a
1mM-S100	0.83 ± 0.13bc	0.38 ± 0.01bc	903.38 ± 138.20cd	2.92 ± 0.86bc	3.06 ± 1.25ab
1mM-S150	0.78 ± 0.10bcd	0.38 ± 0.03bc	959.92 ± 104.17bcd	2.23 ± 0.45ab	3.18 ± 1.43ab

注：同一列内，相同小写字母表示差异不显著($P > 0.05$)，不同小写字母表示差异水平显著($P \leq 0.05$)。

4. 讨论

本研究首次证实 β -罗勒烯作为种子引发剂可显著提升油菜幼苗生长潜力, 且其效果依赖于“浓度-时间”组合的协同作用。从筛选结果看, 12 h 1 mM 处理下油菜幼苗根长、茎长及生物量均达峰值, 这与植物源精油引发的普遍规律一致, 适宜浓度的单萜类化合物可通过激活种子早期代谢促进生长, 而过高浓度可能因化感作用抑制发育[21]。

从生理机制看, 本研究发现, β -罗勒烯可通过增强可溶性蛋白的合成或抑制其降解, 从而增强细胞的渗透调节能力, 维持细胞内渗透压平衡, 缓解盐胁迫导致的水分亏缺。这与 Ben Mrid 等[17]发现的“单萜类化合物稳定叶绿体膜结构、增强抗氧化能力”的机制高度契合。值得注意的是, β -罗勒烯处理的幼苗地下部分略短于对照组, 这可能是其优先保障地上部分光合器官发育的适应性策略。在盐胁迫下, 缩短根系长度可减少离子吸收, 同时集中能量支持茎秆与叶片生长, 该现象为后续研究 β -罗勒烯对植物器官分配的调控提供了新方向。

本研究结果与植物源生物刺激素引发的相关研究结论一致, 但在引发剂特性与应用场景上存在显著创新。Silva 等[22]发现迷迭香精油可提升番茄种子发芽指数 28.0%, 而本研究中 1 mM β -罗勒烯使油菜萌发活力指数比 12 h-DW 对照组(432.88 ± 58.87 fg)高出 61.1%, 且无需复杂的精油提取工艺, 直接使用单体化合物即可实现高效引发, 降低了应用成本。此外, Ben-Jabeur 等[23]指出精油引发需严格控制温度($20 \pm 2^\circ\text{C}$), 而本研究中 β -罗勒烯在 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 下仍表现出稳定效果, 更适应田间生产的温度波动, 这进一步凸显其应用优势。

本研究虽明确了 β -罗勒烯引发的调控效应, 但仍存在局限性。一是实验基于受控环境在植物生长培养室开展, 未考虑田间土壤质地、微生物群落等复杂因素的影响, 后续需通过田间试验验证其实际应用效果; 二是未深入探究 β -罗勒烯与植物激素的互作机制, 本研究未检测激素水平, 无法明确其是否参与萌发调控; 三是仅选用 1 个油菜品种, 需扩大品种范围以验证 β -罗勒烯引发的普适性。

本研究拓展了植物源单萜类化合物在种子引发领域的应用, 首次建立 β -罗勒烯与作物耐盐性的关联, 填补了“植物通讯信号分子在非生物胁迫缓解中应用”的研究空白。 β -罗勒烯具备低毒性、易降解、成本低廉等优势, 仅需 94.2% 纯度即可实现高效种子引发, 相较于化学合成引发剂, 符合绿色农业发展需求。同时, 本研究明确的“12 h 1 mmol/L”标准引发方案操作简便, 可直接应用于盐碱地区油菜的播种前处理, 为提升作物抗逆性、保障盐碱地作物稳产提供了可落地的绿色技术方案。

5. 结论

本研究系统探究了 β -罗勒烯作为植物源种子引发剂对盐胁迫下油菜种子萌发及幼苗生长的调控效应, 明确了其最优应用条件、生理机制及实践价值。本试验 β -罗勒烯引发存在显著的“浓度-时间”协同效应, 最优组合为 12 h 1 mM。在非盐胁迫条件下, β -罗勒烯种子引发显著提高了油菜幼苗的根长、茎长、鲜重、干重和幼苗活力指数; 在盐胁迫条件下, 12 h 1 mM 的 β -罗勒烯处理可显著提升玉米幼苗抗逆能力, 在低度盐胁迫条件下对幼苗发育有积极影响, 其应用进一步改善了低盐浓度胁迫环境下油菜种子的早期萌发, 表明其生物活性化合物之间可能存在协同相互作用。总之, 我们的研究结果凸显了 β -罗勒烯通过优化“浓度-时间”组合, 可有效激活玉米种子抗逆潜能, 在缓解盐胁迫、保障幼苗生长方面表现出显著优势, 具有作为低成本、环保型生物刺激素的潜力, 可在低度盐胁迫条件下支持植物早期发育。因此, β -罗勒烯引发代表了一种有前景的可持续农业策略, 尽管还需要进一步研究来确认其在不同物种和田间条件下的有效性。

基金项目

本研究由国家重点研发计划项目课题“油菜和花生稳产关键基因位点挖掘”(2022YFD1200400); 校

级科学研究项目“特早熟油菜幼莢耐寒研究”(25KJ004)资助。

参考文献

- [1] Landi, S., Hausman, J., Guerriero, G. and Esposito, S. (2017) Poaceae vs. Abiotic Stress: Focus on Drought and Salt Stress, Recent Insights and Perspectives. *Frontiers in Plant Science*, **8**, Article ID: 1214. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01214>
- [2] Mahajan, S. and Tuteja, N. (2005) Cold, Salinity and Drought Stresses: An Overview. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, **444**, 139-158. <https://doi.org/10.1016/j.abb.2005.10.018>
- [3] Song, J. and Wang, B. (2015) Using Euhalophytes to Understand Salt Tolerance and to Develop Saline Agriculture: Suaeda Salsa as a Promising Model. *Annals of Botany*, **115**, 541-553. <https://doi.org/10.1093/aob/mcu194>
- [4] Yang, Z., Li, J., Liu, L., Xie, Q. and Sui, N. (2020) Photosynthetic Regulation under Salt Stress and Salt-Tolerance Mechanism of Sweet Sorghum. *Frontiers in Plant Science*, **10**, Article ID: 1722. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01722>
- [5] Hasanuzzaman, M., Nahar, K. and Fujita, M. (2013) Plant Response to Salt Stress and Role of Exogenous Protectants to Mitigate Salt-Induced Damages. In: Ahmed, P., Azooz, M.M. and Prasad, M.N.V., Eds., *Ecophysiology and Responses of Plants under Salt Stress*, Springer, 25-87. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4747-4_2
- [6] Hasanuzzaman, M., Nahar, K., Fujita, M., Ahmad, P., Chandna, R., Prasad, M.N.V., et al. (2013) Enhancing Plant Productivity under Salt Stress: Relevance of Poly-Omics. In: Ahmed, P., Azooz, M.M. and Prasad, M.N.V., Eds., *Salt Stress in Plants*, Springer, 113-156. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6108-1_6
- [7] Benadjoud, A., Dadach, M., El-Keblawy, A. and Mehdadi, Z. (2022) Impacts of Osmopriming on Mitigation of the Negative Effects of Salinity and Water Stress in Seed Germination of the Aromatic Plant *Lavandula stoechas* L. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, **31**, Article 100407. <https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2022.100407>
- [8] Munns, R. and Tester, M. (2008) Mechanisms of Salinity Tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, **59**, 651-681. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911>
- [9] Ahmad, P., Abdel Latef, A.A., Hashem, A., Abd_Allah, E.F., Gucel, S. and Tran, L.P. (2016) Nitric Oxide Mitigates Salt Stress by Regulating Levels of Osmolytes and Antioxidant Enzymes in Chickpea. *Frontiers in Plant Science*, **7**, Article ID: 347. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00347>
- [10] Hao, Y., Hong, Y., Guo, H., Qin, P., Huang, A., Yang, X., et al. (2022) Transcriptomic and Metabolomic Landscape of Quinoa during Seed Germination. *BMC Plant Biology*, **22**, Article No. 237. <https://doi.org/10.1186/s12870-022-03621-w>
- [11] Jisha, K.C., Vijayakumari, K. and Puthur, J.T. (2012) Seed Priming for Abiotic Stress Tolerance: An Overview. *Acta Physiologiae Plantarum*, **35**, 1381-1396. <https://doi.org/10.1007/s11738-012-1186-5>
- [12] Gong, M., Kong, M., Huo, Q., He, J., He, J., Yan, Z., et al. (2024) Ultrasonic Treatment Can Improve Maize Seed Germination and Abiotic Stress Resistance. *BMC Plant Biology*, **24**, Article No. 758. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05474-x>
- [13] Ibrahim, E.A. (2016) Seed Priming to Alleviate Salinity Stress in Germinating Seeds. *Journal of Plant Physiology*, **192**, 38-46. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2015.12.011>
- [14] Feghhenabi, F., Hadi, H., Khodaverdiloo, H. and van Genuchten, M.T. (2020) Seed Priming Alleviated Salinity Stress during Germination and Emergence of Wheat (*Triticum aestivum* L.). *Agricultural Water Management*, **231**, Article 106022. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106022>
- [15] Shil, S., Ashwath, M.N., Das, S., Vats, P., Raj, A.K., Dash, U., et al. (2025) Seed Biopriming: A Sustainable Solution for Enhancing Seed Vigor and Crop Productivity. In: Roy, B., Shukla, G., Dunna, V., Sharma, P. and Shukla, P.S., Eds., *Advances in Seed Quality Evaluation and Improvement*, Springer, 127-168. https://doi.org/10.1007/978-981-96-5178-8_6
- [16] Singh, N., Joshi, E., Sasode, D., Dangi, R.S. and Chouhan, N. (2020) Soil Fertility, Macro and Micro Nutrient Uptake and Their Use Efficiencies under Integrated Nutrient Management in Groundnut (*Arachis hypogaea* L.). *International Journal of Chemical Studies*, **8**, 1983-1987. <https://doi.org/10.22271/chemi.2020.v8.i1ac.8556>
- [17] Ben Mrid, R., Benmrid, B., Hafsa, J., Boukcim, H., Sobeh, M. and Yasri, A. (2021) Secondary Metabolites as Biostimulant and Bioprotectant Agents: A Review. *Science of The Total Environment*, **777**, Article 146204. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146204>
- [18] Zuo, Z., Wang, B., Ying, B., Zhou, L. and Zhang, R. (2017) Monoterpene Emissions Contribute to Thermotolerance in *Cinnamomum Camphora*. *Trees*, **31**, 1759-1771. <https://doi.org/10.1007/s00468-017-1582-y>
- [19] Ben Saad, R., Ben Romdhane, W., Wiszniewska, A., Baazaoui, N., Taieb Bouteraa, M., Chouaibi, Y., et al. (2024)

-
- Rosmarinus officinalis* L. Essential Oil Enhances Salt Stress Tolerance of Durum Wheat Seedlings through ROS Detoxification and Stimulation of Antioxidant Defense. *Protoplasma*, **261**, 1207-1220. <https://doi.org/10.1007/s00709-024-01965-8>
- [20] Farré-Armengol, G., Filella, I., Llusà, J. and Peñuelas, J. (2017) β -Ocimene, a Key Floral and Foliar Volatile Involved in Multiple Interactions between Plants and Other Organisms. *Molecules*, **22**, Article 1148. <https://doi.org/10.3390/molecules22071148>
- [21] Sousa, J.M.S.D., Nunes, T.A.D.L., Rodrigues, R.R.L., Sousa, J.P.A.D., Val, M.D.C.A., Coelho, F.A.D.R., *et al.* (2023) Cytotoxic and Antileishmanial Effects of the Monoterpene β -Ocimene. *Pharmaceuticals*, **16**, Article 183. <https://doi.org/10.3390/ph16020183>
- [22] Silva, L.E.D., Marcatto, G.Z., Gallo, A.D.S. and Forti, V.A. (2024) Plants Extracts as Germination and Seedling Establishment Promoters in Lettuce and Maize. *Ciência Rural*, **54**, e20230436. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20230436>
- [23] Ben-Jabeur, M., Chamekh, Z., Jallouli, S., Ayadi, S., Serret, M.D., Araus, J.L., *et al.* (2022) Comparative Effect of Seed Treatment with Thyme Essential Oil and *Paraburkholderia phytofirmans* on Growth, Photosynthetic Capacity, Grain Yield, $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ of Durum Wheat under Drought and Heat Stress. *Annals of Applied Biology*, **181**, 58-69. <https://doi.org/10.1111/aab.12754>