中国油料作物学报
Chinese Journal of Oil Crop Sciences
2026,48(5):101-113
doi:10.19802/j.issn.1007-9084.2026271

外源赤霉素浸种缓解盐胁迫对油菜种子萌发及幼苗生理响应的抑制

林国冰[1],金鑫[1],谢志奎[1],贾晴晴[1],何玮杰[1],左青松[2],赵远[3],顾啸[1*]
(1. 上海市松江区农业技术推广中心,上海 松江,201613;
2. 扬州大学农学院/江苏省作物栽培生理重点实验室/江苏省粮食作物现代产业技术协同创新中心,江苏 扬州,225100;
3. 上海佘农稻米专业合作社,上海 松江,201600)

摘要:为探明外源赤霉素(GA_3)浸种缓解盐胁迫抑制油菜种子萌发的作用及其生理响应,以耐盐性不同的油菜品种华油杂62和浙油50为材料,采用种子萌发试验结合生理指标测定的方法,研究GA_3处理对盐胁迫下油菜萌发特性、幼苗生长、活性氧代谢、膜稳定性及渗透调节的影响。研究表明,150 mmol·L^{-1} NaCl胁迫显著降低了油菜种子的萌发能力和幼苗生长水平,且浙油50受抑制程度高于华油杂62。外源GA_3浸种能够显著缓解盐胁迫造成的萌发抑制。进一步研究发现,GA_3通过增强SOD、POD和CAT等抗氧化酶活性,降低活性氧积累和膜脂过氧化程度,同时促进脯氨酸、可溶性糖和可溶性蛋白积累,提高油菜幼苗的渗透调节能力。综上,外源GA_3通过调控氧化稳态和渗透平衡,改善盐胁迫下细胞稳态环境,促进油菜种子萌发恢复和幼苗正常建立。

关键词:油菜;盐胁迫;赤霉素;种子萌发;生理调控
中图分类号:S565.4　　**文献标识码:**A　　**文章编号:**1007-9084(2026)05-0101-13

Exogenous gibberellin seed soaking alleviates the inhibition of salt seress on rapeseed germination and seedling physiological responses

LIN Guo-bing[1], JIN Xin[1], XIE Zhi-kui[1], JIA Qing-qing[1], HE Wei-jie[1], ZUO Qing-song[2], ZHAO Yuan[3], GU Xiao[1*]
(1. *Shanghai Songjiang District Agricultural Technology Extension Center, Shanghai* 201613, *China*; 2. *College of Agriculture / Key Laboratory of Crop Cultivation Physiology of Jiangsu Province/ Jiangsu Co-Innovation Center for Modern Production Technology of Grain Crops, Yangzhou University, Yangzhou* 225100, *China*; 3. *Shanghai Shenong Rice Professional Cooperative, Shanghai* 201600, *China*)

Abstract: This study aimed to elucidate the effects of exogenous gibberellic acid (GA_3) seed priming on alleviating salt stress-induced inhibition of rapeseed seed germination and its physiological mechanisms. Two rapeseed cultivars with contrasting salt tolerance, Huayouza 62 and Zheyou 50, were used as materials. Seed germination assays combined with physiological measurements were conducted to investigate the effects of GA_3 on germination characteristics, seedling growth, reactive oxygen species (ROS) metabolism, membrane stability, and osmotic adjustment under salt stress. The results showed that 150 mmol·L^{-1} NaCl stress significantly inhibited seed germination and seedling growth in both cultivars, with Zheyou 50 exhibiting greater sensitivity to salt stress than Huayouza 62. Exogenous GA_3 seed soaking significantly alleviated the salt inhibition on germination. Further analyses showed that GA_3 enhanced the activities of antioxidant enzymes, including superoxide dismutase, peroxidase, and catalase, thereby reducing ROS accumulation and membrane lipid peroxidation. Meanwhile, GA_3 promoted the accumulation of proline, soluble sugars, and soluble proteins, thereby enhancing the osmotic adjustment capacity of rapeseed seedlings. Overall, exogenous GA_3 alleviated the adverse effects of salt stress on rapeseed seed germination and

收稿日期:2026-08-07
基金项目:松江区科技攻关项目(2025SJKJGG011N)
作者简介:林国冰(2000-),男,助理农艺师,硕士,研究方向为作物栽培及生理,E-mail: lgb1832659540@163.com
* 通讯作者:顾啸(1989-),男,农艺师,硕士,主要从事作物育种及农业技术推广,E-mail: gx13sh@163.com

seedling establishment by improving redox homeostasis and osmotic balance, thereby contributing to the maintenance of cellular homeostasis under salt stress.

Key words: rapeseed; salt stress; gibberellic acid; seed germination; physiological regulation

油菜是我国重要的油料作物,同时也是我国的第一大食用植物油来源[1,2]。因地制宜地发展油菜产业对我国的油料安全具有重要的战略价值[3]。近年来我国大力支持油料产业提质增效的相关工程,其中主要是通过扩大冬油菜的种植面积和提高单产来整体提升油菜产能[4]。而长江流域是我国冬油菜的主产区,栽种面积占全国油菜总面积的90%以上[5,6]。前人的研究表明农作物的营养生长时期是其整个生命周期中最为关键的阶段之一[7],植株的根系、茎叶、光合系统与营养贮藏器官均在这一阶段形成,是作物搭建物质生产框架、积累基础养分的核心过程[8]。通过追溯作物生长的起点,种子萌发是连接休眠种子与营养生长的过渡环节,萌发阶段的生理活性会长期调控植株后续根、茎、叶的建成速率与发育规模,最终对田间基本苗及产量产生间接性的影响[9,10]。目前,伴随着长江流域农业集约化开发与沿海滩涂开发,区域土壤盐渍化呈逐年加重的趋势,盐渍化耕地由沿海向内陆沿江灌区、设施农田蔓延[11]。此现状对长江下游油菜主产区影响严峻,部分现栽品种在盐渍化土壤环境下出现活力低、不萌发等现象,亟须寻找高耐盐品种或采取相关措施来解决这一问题[12]。

当前国内外围绕作物耐盐胁迫已开展大量研究,也在小麦[13]、水稻[14]等作物中明确了萌发期耐盐评价体系、渗透调节与抗氧化响应核心机制。油菜作为典型的十字花科作物,与多数禾本科植物相比,具有天然的耐盐优势,对部分轻度、中度盐碱化环境具有一定的适应性和耐受潜能,是改良及保护盐渍化耕地的优势经济作物[15]。现阶段关于油菜耐盐性的研究已经有一定基础,多数研究侧重油菜营养生长中后期及产量形成阶段,针对种子萌发这一抗逆薄弱关键时期的研究相对零散,且研究多集中于单一盐胁迫条件下的表型观测,缺乏系统性的生理机制解析和调控通路验证。尤其在外源物质调控研究逐渐火热的今天[16,17],油菜萌发期有关赤霉素调控油菜盐胁迫萌发响应的研究较为浅显,大多仅验证了赤霉素浸种的促萌效果,未深入明确其对油菜生理相关核心指标的影响[18]。

基于此,本研究以耐盐性存在差异的甘蓝型油菜品种华油杂62和浙油50为材料,通过种子萌发试验,研究外源GA_3浸种对NaCl胁迫下种子萌发及幼苗生长的影响,并从活性氧代谢、抗氧化系统、膜稳定性及渗透调节等方面分析GA_3处理后的生理响应,以明确外源GA_3缓解油菜盐胁迫的生理基础,并比较不同耐盐背景油菜对GA_3处理的响应差异。为利用植物激素引发技术提升盐渍化农田油菜出苗质量、稳定产区油料作物产能提供理论支撑与技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验点概况及材料

试验于2025年在上海市松江区农技中心(30°56′6″N,121°10′37.2″E)实验室进行。本试验供试材料为两个耐盐性存在差异的油菜品种(浙油50和华油杂62),种子籽粒饱满、大小均匀、无病虫害、无破损,试验前筛选整齐一致种子备用。试验所用赤霉素(GA_3,纯度≥98%)、氯化钠(NaCl,分析纯)等试剂均采购于正规化学试剂公司。种子出苗后移栽至塑料盆(外径12.3 cm,内径11.2 cm,深10.2 cm)中,采用无菌复合育苗基质,该基质孔隙度适中、保水透气、养分均衡、杂质少,无外源盐分干扰,配方为泥炭土:珍珠岩:蛭石 = 2:1:1(体积比),培养条件同种子试验环境。

1.2 种子消毒与预处理

选取大小均匀、饱满健康的油菜种子,采用表面消毒法处理:先用75%乙醇快速浸泡1 min,用来去除种子表面杂质与油脂,随后用0.1%氯化汞溶液浸泡10 min,完成深度灭菌工作,最后用无菌纯水反复冲洗3~4次,洗去残留灭菌试剂,沥干种子表面水分备用。

预实验中盐胁迫采用NaCl溶液,按梯度设置7个处理组:0 $mmol·L^{-1}$、50 $mmol·L^{-1}$、100 $mmol·L^{-1}$、150 $mmol·L^{-1}$、200 $mmol·L^{-1}$、250 $mmol·L^{-1}$和300 $mmol·L^{-1}$。结合油菜种子萌发表型及生长状况综合判定,150 $mmol·L^{-1}$浓度条件下种子萌发受抑效果显著、胁迫程度适中,可稳定构建中度盐碱胁迫体系,适合作为本试验正式胁迫浓度。在此胁迫基础上开展GA浸种浓度筛选预试验,将不同浓度梯度(0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 $mmol·L^{-1}$)的GA_3溶液引发消毒后的油菜种子,置于150 $mmol·L^{-1}$浓度的盐环

境中,综合萌发指标与生理响应差异,最终确定0.3 mmol·L^{-1} GA_3为最优浸种浓度,该浓度可有效缓解盐胁迫对油菜种子萌发的抑制伤害。

试验溶液试剂配置:赤霉素(GA_3)用无水乙醇溶解粉末后,使用无菌纯水定容,配置0.3 mmol·L^{-1} GA_3溶液;以无菌清水作为空白浸种对照处理。将消毒后的油菜种子分别置于对应处理的试剂溶液中,全程避光恒温(25℃)浸种24 h,浸种过程中定期搅拌,保证种子均匀接触试剂溶液。浸种结束后,捞出种子用无菌水冲洗2~3次,沥干表面水分待用。

1.3 试验设计

本试验采用完全随机试验设计,以150 mmol·L^{-1} NaCl构建起油菜种子盐胁迫体系,共设置4个处理,即CK(对照组,无胁迫,Control)、S(NaCl胁迫组,NaCl stress group,150 mmol·L^{-1} NaCl溶液)、G(GA_3处理组,GA_3 processing group,0.3 mmol·L^{-1} GA_3)、SG(GA_3缓解胁迫组,GA_3-mediated NaCl stress alleviation group,150 mmol·L^{-1} NaCl + 0.3 mmol·L^{-1} GA_3)。每个处理挑选100粒种子,置于铺有双层滤纸的发芽盒(120 mm×120 mm×80 mm)中。其中,使用15 mL 150 mmol·L^{-1} NaCl溶液湿润滤纸为胁迫处理,以等量纯水湿润的滤纸作为对照,每个处理重复3次,并置于人工气候箱中,培养温度为25℃/20℃(昼/夜),光照周期为12 h光照/12 h黑暗,相对湿度为75%。培养过程中定期称量培养皿质量,根据质量变化及时补充处理液,以维持处理体系液体量基本一致,并保持盐胁迫处理浓度相对稳定。于NaCl胁迫处理7 d后分别对幼苗胚芽/胚轴和胚根进行取样,经液氮速冻30 min后置于-80℃超低温冰箱中保存、备用。

1.4 测定项目和方法

1.4.1 种子萌发相关指标 参照Cheng等[19]的方法,每天记录萌发的种子数,以胚根长约3 cm作为发芽标准[20],连续3 d没有种子萌发则视为萌发结束。于实验第4 d调查种子发芽势,第7 d调查种子发芽率、发芽指数、活力指数和平均发芽时间;各处理随机取得3株幼苗用滤纸吸干水分后用游标卡尺测其胚根长和胚芽长,随后将样品杀青(105℃,30 min)后放置在75℃烘箱中烘24 h至恒重,用分析天平称其干重,每个处理重复3次。

相关指标计算公式如下:

萌发抑制率(%) = |对照组发芽率-处理组发芽率|/对照组发芽率×100%

发芽率(%) = (第1~7天发芽种子数/种子总数)×100%

发芽势(%) = (第4天发芽种子数/种子总数)×100%

发芽指数(GI) = $\sum(G_t/D_t)$

活力指数(VI) = 发芽指数×幼苗平均长度

平均发芽天数(MGT) = $\sum(G_t \times D_t)/\sum G_t$

式中:Gt为第t天萌发的种子数,Dt为对应的培养天数。

1.4.2 生理指标测定 对萌发后7 d的幼苗进行取样。酶类抗氧化指标[21]:使用氮蓝四唑(NBT)光还原法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性;用紫外分光光度法测定过氧化氢酶(CAT)活性;用愈创木酚显色法测定过氧化物酶(POD)活性。

活性氧含量指标:使用盐酸羟胺显色法测定超氧阴离子($O_2^{\cdot-}$);用碘化钾分光光度法测定过氧化氢(H_2O_2)含量。

膜损伤指标:使用硫代巴比妥酸(TBA)法测定丙二醛(MDA)含量。

渗透调节物质指标:使用酸性茚三酮比色法测定脯氨酸(Pro)含量;用蒽酮-硫酸法测定可溶性糖(SS)含量;用考马斯亮蓝G-250法测定可溶性蛋白(SP)含量。

1.5 数据处理与分析

为科学合理地评价两个油菜品种的耐盐性,发芽率、发芽势、胚根长、胚芽长和干重五项指标采用其相对值进行分析。采用Excel 2019软件整理原始数据,采用SPSS 27软件和Origin 2021软件对油菜盐胁迫相关指标进行显著性分析(Duncan多重比较法在$P<0.05$水平下检验处理间差异显著性)和相关性分析,相关数据表示为平均值±标准差。

计算发芽率、发芽势、胚根长、胚芽/胚轴长和干重五项指标的隶属函数值,取5个指标隶属函数值的平均值作为该品种耐盐性的综合评分,得分越高,耐盐性越强。隶属函数的计算公式如下:

$$R(Xi) = (Xi-Xmin)/(Xmax-Xmin)$$

式中,Xi为参试材料某一指标的测定值;Xmax和Xmin分别为供试品种中该指标的最大值和最小值。

2 结果与分析

2.1 NaCl胁迫对油菜发芽特性的影响

2.1.1 不同处理下油菜7 d终发芽率 NaCl胁迫下两油菜品种的发芽能力均有所下降,不同处理组间变化趋势明显。如图1所示,150 mmol·L^{-1} NaCl

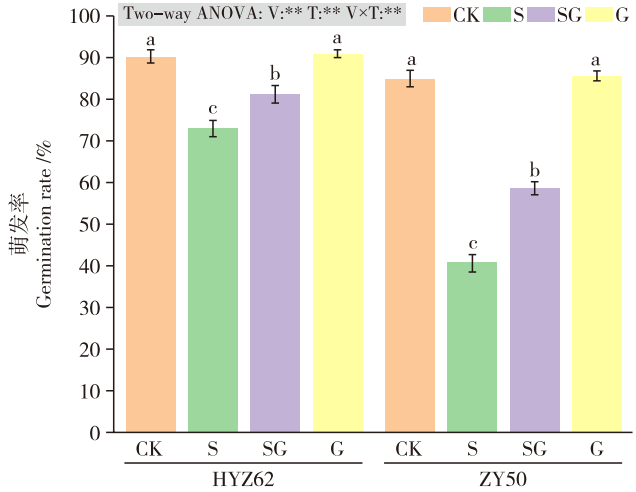
胁迫(S)显著抑制了华油杂62与浙油50的种子萌发,且浙油50受到抑制程度明显高于华油杂62。无盐对照组(CK)与单独外源GA_3(G)处理下发芽率处于相同水平,差异不显著,也说明正常条件下外源GA处理并不能显著提升油菜的发芽能力。NaCl胁迫下添加外源GA_3的SG处理能够在一定程度上缓解盐胁迫对种子萌发的抑制作用,华油杂62和浙油50的发芽率分别由S处理下的73.00%和40.67%提高至81.33%和58.67%,但均未完全恢复至CK水平。双因素方差分析表明,品种、处理及品种×处理的交互作用对7 d终发芽率均具有极显著影响(P<0.01),表明不同品种对NaCl胁迫及外源GA_3处理的萌发响应存在显著差异。另外,相同处理下,华油杂62的发芽率总体高于浙油50,进一步表明两品种的萌发耐盐性存在显著基因型差异。

2.1.2 不同处理下华油杂62、浙油50种子萌发动态 如图2所示,华油杂62在不同处理下的发芽率均随着发芽时间的推移呈现一个逐渐上升的趋势。从华油杂62 1~7 d的逐日萌发动态可见,整个萌发周期内CK与G曲线始终位于最上方,发芽启动时间更早且累积发芽速率更快;S曲线萌发速率处于图中低位,盐胁迫对萌发全过程存在持续抑制作用。SG处理在萌发中后期发芽速率大幅提升,显著优于S处理,外源GA_3处理可加快盐胁迫下种子的萌发进程;无盐条件下,CK与G萌发曲线几乎重合,外源GA_3处理对正常萌发动态无明显的调控作用。此外,浙油50的萌发活力显著低于同处理下的华油杂62。萌发全周期CK、G累积发芽率显著高于其他处理;SG曲线虽高于S,但与CK、G仍存在一定差距。GA对盐敏感品种萌发的修复效果显著,但依旧难以恢复原来的萌发活力水平。S萌发曲线全程平缓上升,7 d终发芽率维持在一个低水平下。

综合终发芽率与萌发动态来看,150 mmol·L^{-1} NaCl胁迫显著抑制了油菜种子萌发,盐敏感品种受到的损伤更为严重;外源GA可显著缓解盐胁迫损伤,提升发芽率并且加快种子的萌发速度。另外,在正常栽培条件下施用GA并不能对油菜种子萌发起到促进效果。

2.2 NaCl胁迫及外源GA_3调控对油菜萌发与幼苗生长相关参数的影响

胚芽/胚轴长度、胚根长度、单株干重是反映幼苗生物量与抗盐能力的较为直观的形态学指标。生长指标方面通过分析表1可得,CK组幼苗长势最优,其中华油杂62的胚芽/胚轴、胚根、单株干重分别要比浙油50多11.60%、11.60%和13.95%。NaCl胁迫显著抑制了油菜幼苗胚芽/胚轴伸长、根系生长及干物质积累,且抑制效应存在品种间差异。双因素方差分析表明,品种和处理对胚芽/胚轴长、胚根长和单株干重均具有极显著影响(P<0.01);其中,品种×处理交互作用对胚芽/胚轴长和胚根长均



注:CK:对照组;S:150 mmol·L^{-1} NaCl胁迫组;SG:150 mmol·L^{-1} NaCl + 0.3 mmol·L^{-1} GA_3处理组;G:0.3 mmol·L^{-1} GA_3处理组。不同小写字母表示同一品种不同处理间差异显著(P<0.05)。V、T和V×T分别表示品种、处理及品种×处理的主效应和交互效应;*、**分别表示P<0.05和P<0.01。下同

Note: CK: control group; S: 150 mmol·L^{-1} NaCl stress group; SG: 150 mmol·L^{-1} NaCl + 0.3 mmol·L^{-1} GA_3 treatment group; G: 0.3 mmol·L^{-1} GA_3 treatment group. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments for the same variety (P<0.05). V, T, and V×T represent the main effects and interaction effects of variety, treatment, and variety×treatment, respectively; * and ** denote P<0.05 and P<0.01, respectively. Same as below

图1 NaCl胁迫及外源GA_3添加后华油杂62和浙油50种子7 d的终发芽率

Fig. 1 Final germination rate at 7 d of Huayouza 62 and Zheyou 50 under NaCl stress and exogenous GA_3

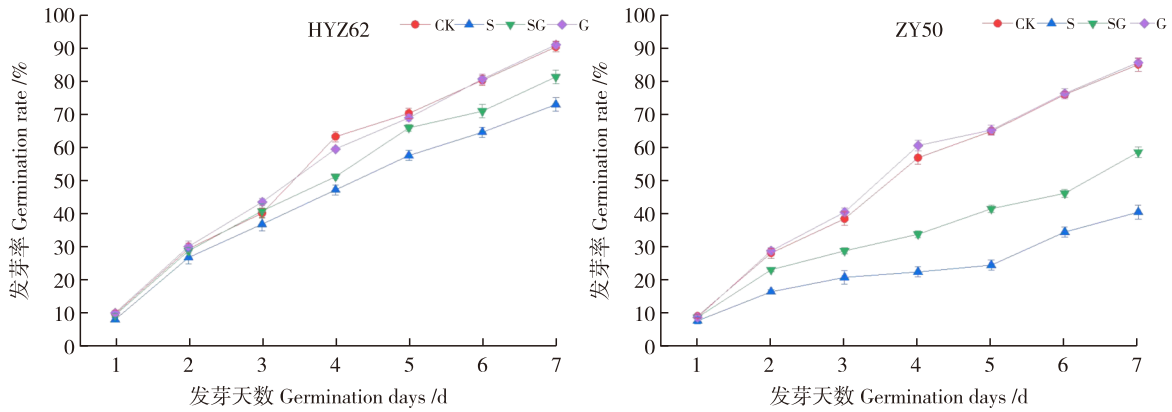


图2 NaCl胁迫及外源GA_3添加后华油杂62和浙油50种子的萌发动态

Fig. 2 Seed germination dynamics of Huayouza 62 and Zheyou 50 under NaCl stress and exogenous GA_3

达到极显著水平($P<0.01$),而对单株干重的交互作用不显著。与CK对照相比,S处理下华油杂62胚芽/胚轴长、胚根和单株干重分别下降41.44%、56.53%和52.22%。浙油50受胁迫的程度更深,对应指标降幅分别达到43.00%、69.88%和63.14%,表明浙油50幼苗期耐盐能力要弱于华油杂62。G处理下华油杂62胚芽/胚轴长6.61 cm、胚根长9.09 cm和单株干重36.66 mg;浙油50对应指标为5.93 cm、8.11 cm和32.02 mg,均与各自的CK处理无统计学差异,幼苗生长状况与正常水平相当。相比之下,SG处理能够明显缓解NaCl胁迫对幼苗生长的抑制作用,华油杂62的胚芽/胚轴长、胚根长和单株干重分别恢复至4.46 cm、5.04 cm和28.43 mg,浙油50分别恢复至4.23 cm、5.20 cm和24.97 mg,但均未完全恢复至CK水平。发芽参数指标方面,各处理下油菜种子的平均发芽天数无显著差异,华油杂62的变动幅度在3.68~3.77 d;浙油50在3.72~3.87 d,说明NaCl胁迫及外源GA调控对种子发育进程的快慢影响较小。发芽势和发芽率受到胁迫及外源GA_3调控的影响显著。双因素方差分析结果表明,品种、处理及品种×处理交互作用对发芽势和发芽率均具有极显著影响($P<0.01$),表明不同品种对NaCl胁迫及外源GA_3处理的萌发响应存在显著差异。与CK处理相比,S处理下华油杂62的发芽势和发芽率分别下降至47.33%和73.00%,降幅高达25.26%和19.18%;浙油50受抑制的程度更为强烈,发芽势和发芽率仅为22.67%和40.67%,较CK处理分别下降60.23%和52.15%。而G处理对两品种的发芽势及发芽率的影响均相对较小。此外,SG处理可一定程度上缓解盐胁迫对种子萌发的负面影响,华油杂62发芽势和发芽率分别恢复至51.33%、81.33%,浙油50达到34.00%、58.67%,但种子萌发的整齐度与最终萌发能力与正常水平仍存在一定差距。

2.3 NaCl胁迫及外源GA_3调控下油菜种子发芽指数与活力指数的变化特征

发芽指数和活力指数是综合表现种子萌发速率、整齐度和幼苗生长潜力的核心指标,可用于评价NaCl胁迫及外源GA_3处理对种子萌发活力的影响。试验结果表明(图3),NaCl胁迫显著抑制了两个油菜品种的萌发活力,外源GA_3处理能够在一定程度上缓解这种抑制作用,且不同品种的响应程度存在差异。双因素方差分析表明,品种、处理及品种×处理交互作用对发芽指数和活力指数均具有极显著影响($P<0.01$)。

与空白对照(CK)相比,单纯NaCl胁迫(S)处理下,华油杂62和浙油50的发芽指数分别下降至28.01和17.12,降幅为16.70%和45.80%;活力指数分别降至217.62和99.01,降幅达58.50%和77.50%,两项指标均达显著差异水平($P<0.05$)。可见,盐胁迫不仅降低了种子的萌发活力,还显著削弱了萌发后幼苗的生长潜力,且活力指数受胁迫的影响幅度大于发芽指数。品种间对比可知,浙油50的两项指标受盐胁迫的降幅均显著高于华油杂62,表明其萌发阶段的耐盐性更弱。SG处理下,两个品种的发芽指数和活力指数均较S处理有所提高,表明外源GA_3能够在一定程度上缓解NaCl胁迫对种子萌发活力的抑制作用。其中,华油杂62的发芽指数由S处理的28.01提高至31.16,较S处理提高11.25%;活力指数由217.62提高至295.55,提高35.81%。浙油50的发芽指数由17.12提高至23.38,较S处理提高36.57%;活力指数由99.01提高至220.25,提高122.45%。此外,G处理下两个品种的发芽指数和活力指数均与各自CK处理无显著

表1 不同处理下油菜种子的萌发及幼苗生长

Table 1 Rapeseed germination and seedling growth under different treatments

品种 Variety	处理 Treatments	生长及发芽参数指标 Growth and germination indicators					
		胚芽/胚轴 Plantule/ plumular axis /cm	胚根 Radicle /cm	干重 Dry weight /mg	平均发芽天数 Average germination days /d	发芽势 Germination potential /%	平均发芽率 Average germination rate /%
HYZ62	CK	6.54±0.07a	9.04±0.17a	37.90±1.33a	3.74±0.04a	63.33±1.53a	90.33±1.53a
	S	3.83±0.08c	3.93±0.08c	18.11±1.21c	3.68±0.03a	47.33±1.53d	73.00±2.00c
	SG	4.46±0.05b	5.04±0.09b	28.43±1.02b	3.70±0.05a	51.33±0.58c	81.33±2.08b
	G	6.61±0.09a	9.09±0.15a	36.66±0.76a	3.77±0.04a	59.67±0.58b	91.00±1.00a
ZY50	CK	5.86±0.06a	8.10±0.16a	33.26±1.73a	3.77±0.05a	57.00±2.00b	85.00±2.00a
	S	3.34±0.09c	2.44±0.11c	12.26±0.77c	3.85±0.30a	22.67±1.53d	40.67±2.08c
	SG	4.23±0.11b	5.20±0.07b	24.97±1.44b	3.87±0.16a	34.00±1.00c	58.67±1.53b
	G	5.93±0.08a	8.11±0.16a	32.02±1.07a	3.72±0.06a	60.67±1.53a	85.67±1.15a
方差分析 ANOVA							
品种 Variety(V)		**	**	**	NS	**	**
处理 Treatment(T)		**	**	**	NS	**	**
品种×处理 V×T		**	**	NS	NS	**	**

注:CK:对照组;S:150 mmol•L^{-1} NaCl胁迫组;SG:150 mmol•L^{-1} NaCl+0.3 mmol•L^{-1} GA_3处理组;G:0.3 mmol•L^{-1} GA_3处理组;同列不同字母表示在0.05概率水平处理间显著差异;V、T和V×T分别表示品种、处理及品种×处理的主效应和交互效应;**:P<0.01;NS:无显著差异;下同

Note: CK: control group; S: 150 mmol•L^{-1} NaCl stress group; SG: 150 mmol•L^{-1} NaCl + 0.3 mmol•L^{-1} GA_3 treatment group; G: 0.3 mmol•L^{-1} GA_3 treatment group. Different letters in the same column indicate significant differences between treatments at 0.05 level. V, T, and V×T represent the main effects and interaction effects of variety, treatment, and variety×treatment, respectively; **: P<0.01; NS: not significant. Same as below

差异,表明单独施用GA_3对正常条件下种子萌发活力的影响较小。整体来看,两个油菜品种的种子萌发活力对盐胁迫及外源GA_3处理表现出相似的变化趋势,但响应的程度存在差异。结合不同指标的变化,华油杂62表现出较强的耐盐性。

2.4 NaCl胁迫及外源GA_3调控下油菜萌发与幼苗生长指标的分布特征

为进一步直观比较不同处理下油菜种子萌发及幼苗生长相关指标的整体分布特征,采用箱线图对胚芽/胚轴长、胚根长、干重、发芽势、发芽率、发芽指数、活力指数和发芽抑制率进行综合分析(图4)。结果表明,不同处理下各指标的分布特征与前述均值变化总体一致。

与CK相比,S处理下两个品种的各项指标整体向低值方向移动,其中胚根长和活力指数的下降较为明显。以华油杂62为例,其根长由CK处理的9.04 cm下降至S处理的3.93 cm,活力指数由523.79下降至217.62;浙油50根长由8.10 cm下降至2.44 cm,活力指数由440.89下降至99.01,表明NaCl胁迫明显抑制了油菜幼苗生长及种子萌发活

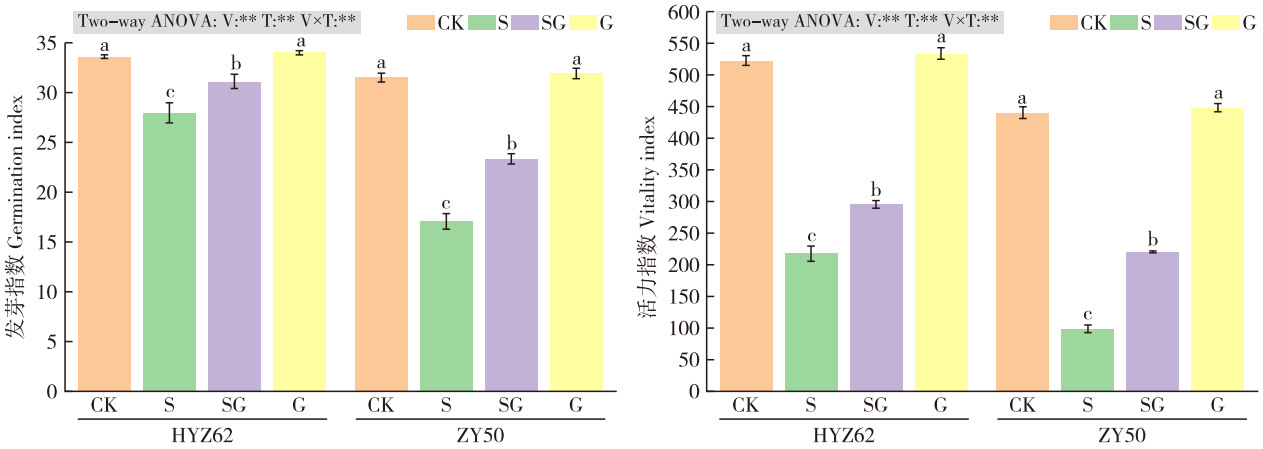


图3 NaCl胁迫及外源激素调控下的油菜种子发芽指数与活力指数

Fig. 3 Rapeseed germination index and vitality index under NaCl stress and exogenous GA_3

力,且浙油50对盐胁迫更为敏感。

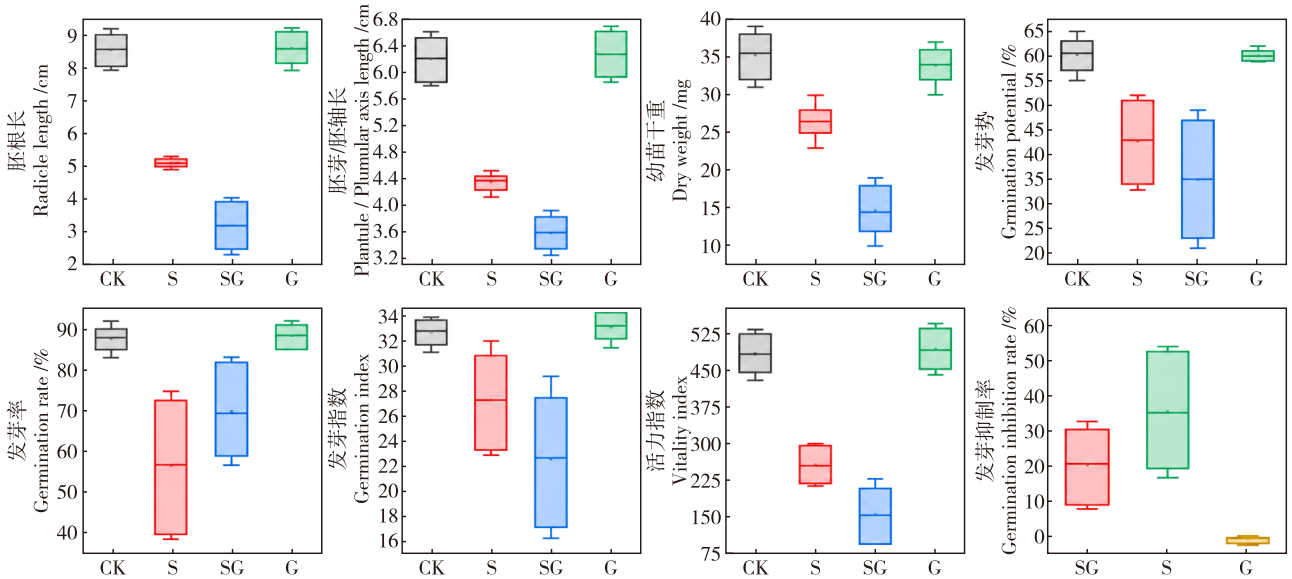
与S处理相比,SG处理下两个品种的各项指标整体向高值方向恢复。胚芽/胚轴长、胚根长和干重分别由S处理的3.83 cm、3.93 cm和18.11 mg提高至4.46 cm、5.04 cm和28.43 mg;浙油50相应指标由3.34 cm、2.44 cm和12.26 mg提高至4.23 cm、5.20 cm和24.97 mg,说明外源GA_3能够在一定程度上缓解NaCl胁迫对幼苗生长的抑制作用。发芽势、发芽率、发芽指数和活力指数亦表现出相同的恢复趋势,其中华油杂62发芽指数由S处理的28.01提高至31.16,浙油50由17.12提高至23.38,表明外源GA_3对盐胁迫下种子萌发活力具有一定的促进作用,但整体仍未恢复至CK水平。

G处理下各指标整体与CK接近,例如华油杂62胚芽/胚轴长、胚根长分别为6.61 cm和9.09 cm,浙油50分别为5.93 cm和8.11 cm,说明单独施用GA_3 0.3 mmol·L^{-1}对正常条件下油菜种子萌发及幼苗生长的影响较小。综合来看,NaCl胁迫使油菜萌发及幼苗生长相关指标整体下降,而SG处理可使多数指标向正常水平恢复,进一步表明外源GA_3对盐胁迫具有一定的缓解作用。

2.5　NaCl胁迫及外源激素调控下油菜幼苗生理生化指标的变化特征

2.5.1　抗氧化物酶与活性氧水平　盐胁迫显著扰乱了油菜幼苗活性氧代谢稳态。如图5(A/E)所示,相较于CK,S处理下华油杂62和浙油50幼苗体内$O_2^{\cdot-}$与H_2O_2含量均显著升高,表现出明显的活性氧积累。面对盐胁迫引起的氧化压力,植株抗氧化防御系统被增强,POD、SOD和CAT的活性均较CK有显著的上升趋势(图5A-C)。双因素方差分析表明,品种和处理对SOD、POD、CAT活性以及$O_2^{\cdot-}$和H_2O_2含量均具有显著影响($P<0.05$);其中,SOD、POD和$O_2^{\cdot-}$的品种×处理交互作用均达到极显著水平($P<0.01$),CAT的品种×处理交互作用显著($P<0.05$),而H_2O_2的品种×处理交互作用不显著($P>0.05$)。

外源GA_3处理对盐胁迫下活性氧积累与氧化酶活性产生了明显的调节作用。SG处理下,盐胁迫诱导积累的$O_2^{\cdot-}$与H_2O_2含量均较S处理显著下降,表明外源GA_3能够缓解NaCl胁迫引起的活性氧积累;但其水平仍然部分高于CK处理。与此同时,SG处理下POD、SOD和CAT活性均较S处理进一步升高,表明外源GA_3处理可能通过增强抗氧化酶系统活性参与盐胁迫下氧化胁迫的缓解。G处理下,各项指标整体与CK处理接近,表明单独施用GA_3对正常条件下幼苗抗氧化代谢的影响较小。此外,两个供试油菜品种对NaCl胁迫的响应存在一定差异。在S处理下,华油杂62幼苗的$O_2^{\cdot-}$和H_2O_2积累水平均低



注:箱线图箱体上下沿分别代表上、下四分位数,箱体中间横线为中位数,上下须为数据最大值与最小值;横坐标CK为清水对照,S、SG、G为不同盐胁迫及外源物质调控处理

Note: The box in the boxplot represents the interquartile range, with the upper and lower edges indicating the upper and lower quartiles, respectively. The horizontal line within the box denotes the median, while the whiskers extend to the minimum and maximum data values. On the horizontal axis, CK is the control (fresh water), and S, SG, G are treatments with different salt stress and exogenous substance regulation

图4　不同处理下油菜种子萌发及幼苗生长指标的分布特征

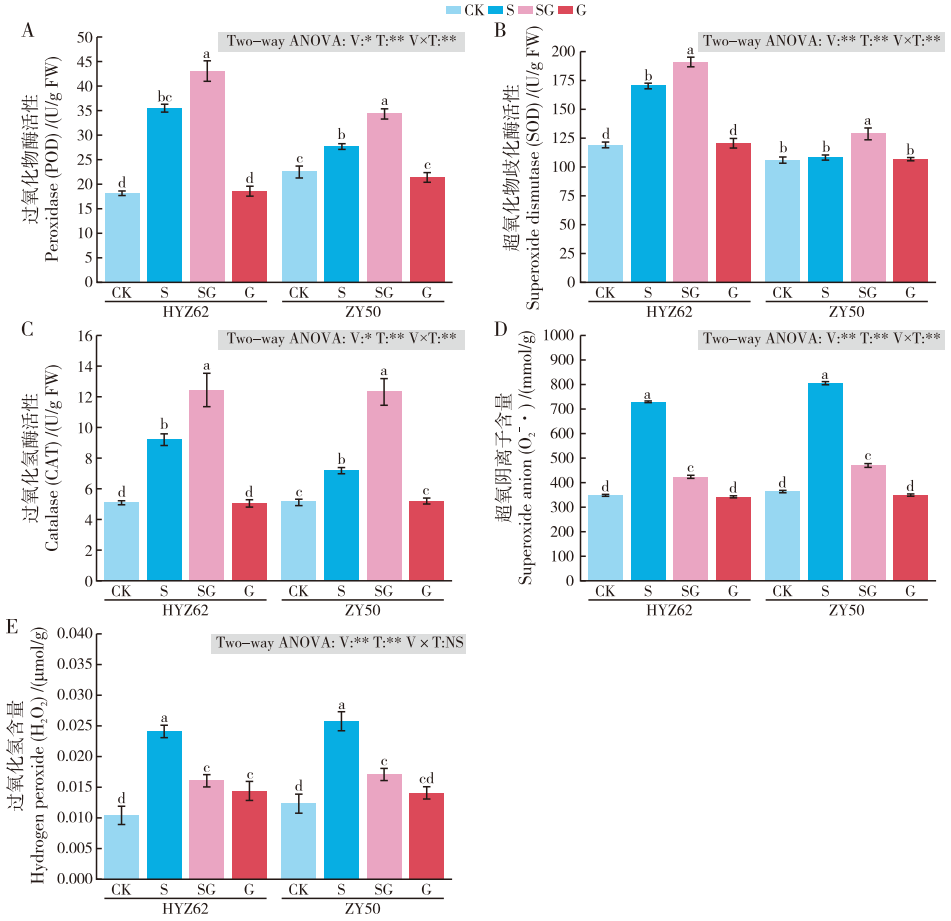
Fig. 4　Distribution characteristics of seed germination and seedling growth indices of rapeseed under different treatments

浙油50,而其POD、SOD和CAT活性又均高于浙油50,表现出较强的抗氧化防御响应。结合品种×处理交互作用的显著性结果,表明两个品种在NaCl胁迫下的抗氧化响应存在明显的差异。

2.5.2 细胞膜损伤相关指标 盐胁迫诱导产生的过量活性氧会攻击细胞膜的不饱和脂肪酸,引发膜脂过氧化反应,破坏细胞膜结构和通透功能。MDA是膜脂过氧化的主要产物,其含量可直接反映膜脂损伤程度;电导率则表征细胞内电解质外渗水平,综合体现细胞膜的完整程度。由图6A、B可见,与空白对照相比,S处理下,华油杂62和浙油50幼苗的MDA含量均显著升高,表明盐胁迫造成细胞膜发生明显氧化损伤,细胞膜透性增大,胞内电解质外渗。双因素方差分析表明,品种和处理对MDA含量及电导率均具有极显著影响($P<0.01$),且品种×处理交互作用对MDA含量具有显著影响($P=0.012$),对电导率具有极显著影响($P<0.01$),表明不同品种对盐胁迫及GA_3处理的膜损伤响应存在差异。

经GA_3处理后可以有效缓解盐胁迫对细胞膜的损伤,两个品种的SG处理的MDA含量均显著低于S处理,恢复至与CK处理无差异的水平;电导率也较S处理显著下降,虽略高于CK处理,但足以表明GA_3能够改善盐胁迫下的细胞膜损伤程度,保持稳定性。此外,G处理的MDA含量与电导率均与各自的CK处理无显著差异,表明GA_3单独处理对正常条件下幼苗细胞膜相关指标的影响较小。

2.5.3 渗透调节物质 脯氨酸、可溶性糖与可溶性蛋白是植物应对盐胁迫的重要渗透调节物质,其含量变化可以反映幼苗对盐胁迫的生理响应。由图7A-C可见,与CK相比,S处理下两个油菜品种的脯氨酸、可溶性糖和可溶性蛋白含量均呈现出不同程度的升高,表明NaCl胁迫诱导了幼苗渗透调节物质的积累。双因素方差分析表明,处理对脯氨酸、可溶性蛋白和可溶性糖含量均具有极显著影响($P<$



注:A:过氧化物酶(POD)活性;B:超氧化物歧化酶(SOD)活性;C:过氧化氢酶(CAT)活性;D:超氧阴离子($O_2^{\cdot-}$)含量;E:过氧化氢(H_2O_2)含量;不同小写字母表示同一品种不同处理间在0.05水平差异显著

Note: A: peroxidase (POD) activity; B: superoxide dismutase (SOD) activity; C: catalase (CAT) activity; D: superoxide anion ($O_2^{\cdot-}$) content; E: hydrogen peroxide (H_2O_2) content. Different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$) among treatments of the same variety

图5 NaCl胁迫及外源GA_3处理对油菜幼苗POD、SOD、CAT活性与$O_2^{\cdot-}$、H_2O_2含量变化

Fig. 5 SOD, POD and CAT activities and $O_2^{\cdot-}$ and H_2O_2 contents in rapeseed seedlings under NaCl stress and exogenous GA_3

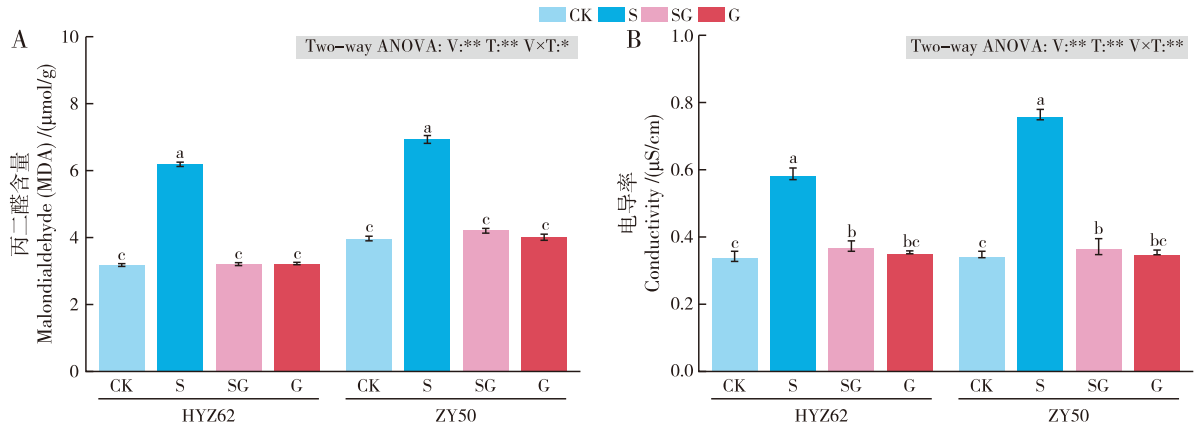


图6 NaCl胁迫及外源GA_3添加后油菜幼苗丙二醛含量与电导率变化

Fig. 6 Changes in malondialdehyde (MDA) content and conductivity of rapeseed seedlings under NaCl stress and exogenous GA_3

0.01);品种及品种×处理交互作用对脯氨酸含量均具有极显著影响($P<0.01$),而对可溶性蛋白和可溶性糖含量的影响均不显著($P>0.05$)。

与S处理相比,SG处理下三类渗透调节物质含量进一步升高,其中脯氨酸和可溶性糖的变化较为明显,说明外源GA_3处理可促进盐胁迫条件下渗透调节物质的积累。G处理下的三类渗透调节物质总体与CK处理水平相近,表明单独施用GA_3对幼苗渗透调节物质的影响较小。在品种响应方面,两个品种对NaCl胁迫及GA_3处理的总体变化趋势较为一致,但脯氨酸含量的品种×处理交互作用达到极显著水平($P<0.01$),这表明两个品种在脯氨酸积累方面对不同处理的响应存在显著差异;而可溶性蛋白和可溶性糖的品种×处理交互作用均不显著,说明二者的处理响应模式在品种间总体较为一致。

2.6 隶属值综合评价

为全面、客观评价NaCl胁迫及GA_3调控下油菜幼苗的综合耐盐能力,以各处理与CK比较的相对发芽势、相对发芽率、相对胚根长、相对胚芽/胚轴长、相对干重5项相对值(附表1)为基础,运用隶属函数公式R(Xi)=(Xi−Xmin)/(Xmax−Xmin)做量化整合,计算平均隶属值(表2)。隶属值取值范围为0~1,数值越高代表该处理下植株的生长状态与对照越相近。两品种的隶属值变化趋势基本一致,S处理下种子萌发和幼苗均受到严重抑制;GA_3处理能提高隶属值,两品种分别达到0.39和0.47,有效缓解了盐胁迫对萌发及干物质积累的抑制。G处理各指标均为1.00,表明其对植株的生长影响较小。

相关性分析也表明(图8),SG处理与各生长指标均呈正相关,其中相对干重的相关系数最高,华油杂62和浙油50分别为0.711和0.712,表明GA_3对盐胁迫下植株的干物质积累提升效应最为显著,是其改善幼苗整体生长的核心体现。

综上,隶属函数综合评价结果从生长表型层面证实了GA_3对油菜盐胁迫的缓解作用。

3 讨论

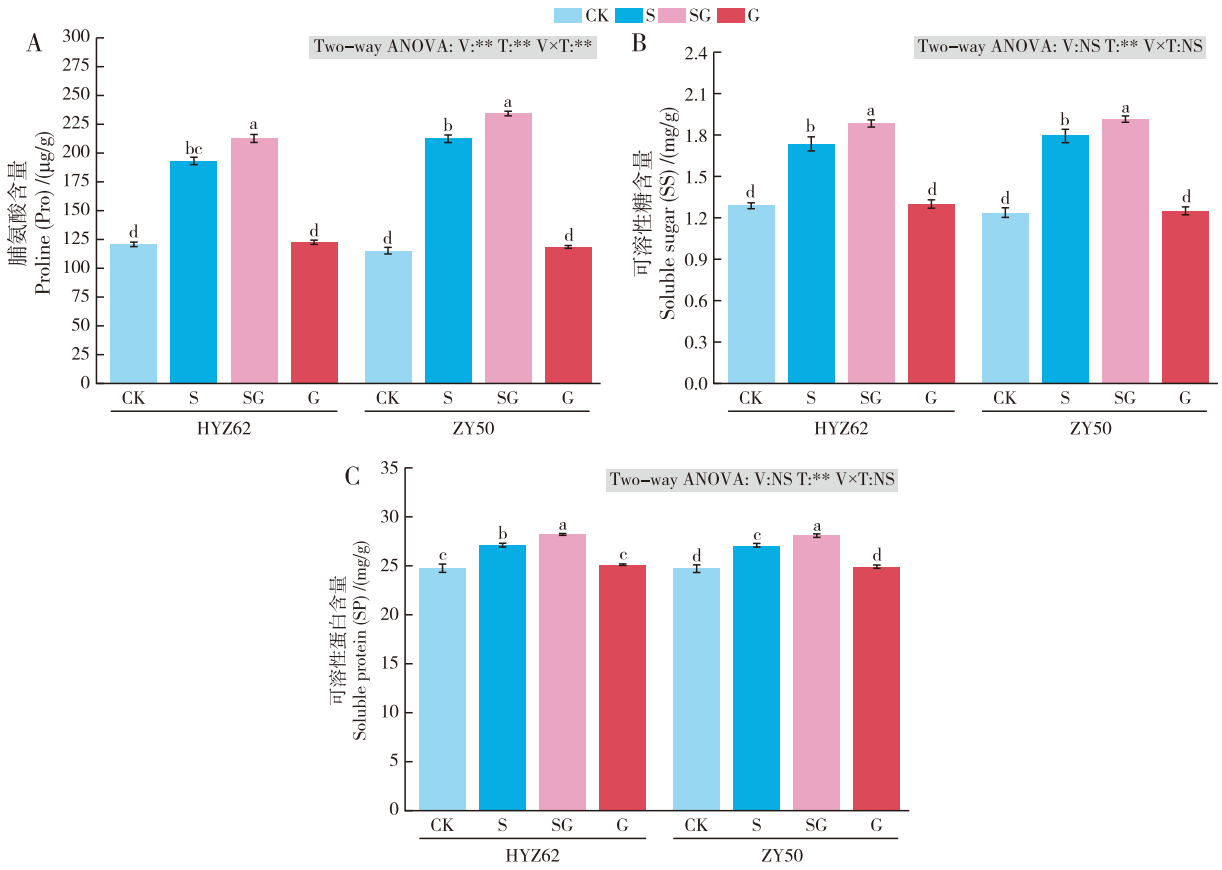
3.1 外源GA_3促进盐胁迫下油菜种子萌发恢复及GA信号的调控作用

种子萌发是农作物开始生命周期的重要阶段,

表2 不同处理下华油杂62和浙油50的隶属函数评价

Table 2 Membership function evaluation of Huayouza 62 and Zheyou 50 under NaCl stress and exogenous GA_3

品种 Variety	处理 Treatments	各指标隶属值 Membership values of each indicators					平均值 Mean
		相对发芽势 Relative germination potential	相对发芽率 Relative germination rate	相对胚根长 Relative radicle length	相对胚芽/胚轴长 Relative plantule/ plumular axis length	相对干重 Relative dry weight	
HYZ62	S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	SG	0.32	0.46	0.21	0.23	0.71	0.39
	G	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
ZY50	S	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
	SG	0.30	0.40	0.60	0.34	0.70	0.47
	G	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00



注:A:脯氨酸含量;B:可溶性糖含量;C:可溶性蛋白含量

Note: A: Proline content; B: Soluble sugar content; C: Soluble protein content

图7 NaCl胁迫及外源GA_3添加后油菜幼苗渗透调节物质含量变化

Fig. 7 Changes in osmotic regulation substances in rapeseed seedlings under NaCl stress and exogenous GA_3

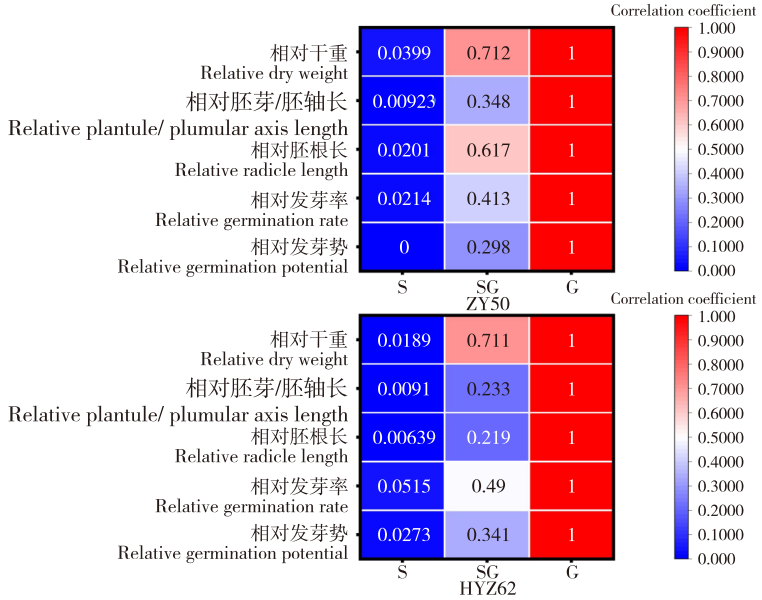


图8 NaCl胁迫及外源GA_3调控处理与油菜幼苗生长指标的相关性分析

Fig. 8 Correlation analysis of NaCl stress and exogenous GA_3 on growth indicators of rapeseed seedlings

也是对逆境胁迫最为敏感的时期之一[22,23]。盐胁迫效应通常是通过降低种子吸水能力、增加渗透压力以及干扰萌发相关代谢过程,导致萌发率下降和幼苗生长受阻。本研究中,150 mmol·L^{-1} NaCl浓度水平的盐胁迫显著降低了两个品种的发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数,其中浙油50受到的抑制

程度高于华油杂62,表明两个油菜品种在萌发阶段具有不同的盐胁迫响应能力。

赤霉素是调控种子萌发的重要植物激素,在促进植物胚的生长、解除休眠以及促进储藏物质转化过程中发挥着关键作用[24]。NaCl胁迫下,植株内源激素平衡容易受到破坏,萌发过程受抑制。通过研究发现,外源GA_3浸种能够显著恢复盐胁迫下油菜种子的萌发能力[25],并促进幼苗生长,而正常条件下单独施用GA_3效果并不明显,说明该激素在缓解胁迫方面的作用更加有效。

此外,本研究的生理生化指标采用萌发后第7天幼苗进行测定,因此这些结果主要反映GA_3处理对盐胁迫下幼苗生理状态的影响,尚不能直接证明其对种子萌发过程的具体分子或生化调控机制。结合萌发指标和幼苗的生理响应结果推测,GA_3的促萌发缓解胁迫的作用可能与其改善盐胁迫下幼苗氧化平衡、膜稳定性及渗透调节的状态有关,但其在种子萌发阶段的直接作用机制仍需要通过萌发过程中的相关激素、酶活性及基因表达等试验进一步验证。

3.2 外源GA_3对盐胁迫下油菜幼苗氧化损伤及膜稳定性的影响

盐胁迫造成的氧化损伤是限制植物生长的重要原因之一。盐胁迫会导致细胞内活性氧(ROS)大量积累,当ROS超过植物的清除能力时,会引起膜脂过氧化并破坏细胞结构[26,27]。本研究发现,NaCl胁迫显著提高了油菜幼苗中$O_2^{\cdot-}$、H_2O_2和MDA的含量,同时诱导增强了SOD、POD和CAT的活性,表明盐胁迫造成了明显的氧化压力。GA_3处理后,$O_2^{\cdot-}$和H_2O_2含量明显降低,同时抗氧化酶活性增强,说明GA_3能够提高植株清除活性氧的能力,从而减轻氧化损伤。另外,由于ROS积累与膜脂过氧化密切相关,GA_3提高了抗氧化能力,进一步降低了MDA含量,改善了细胞膜的状态。

另外,保持细胞膜的稳定性是维持植株正常生命活动的重要基础[28]。本研究中,盐环境导致细胞内MDA含量升高以及电解质外渗增强[29]。进一步结合电导率结果说明,GA_3处理能够降低盐胁迫造成的电解质外渗,说明该激素不仅能够促进萌发恢复,还能够增强幼苗细胞膜结构的稳定性。

3.3 外源GA_3对盐胁迫下油菜幼苗渗透调节物质的影响

除了氧化损伤外,盐胁迫引起的细胞渗透失衡也是影响植物生长的重要因素[30]。植物通常通过积累脯氨酸、可溶性糖和可溶性蛋白等渗透调节物质降低细胞渗透势[31],提高水分保持能力,并保护细胞结构[32]。本研究发现,盐胁迫促进了油菜幼苗渗透调节物质积累,而GA_3处理进一步增加了脯氨酸、可溶性糖和可溶性蛋白含量,说明GA_3调节相关生理响应的影响可能与其缓解盐胁迫造成的生长抑制有关。

渗透调节系统不仅有助于维持细胞内水分平衡,同时能够增强膜稳定性和提高抗逆境的适应能力[33]。因此,GA_3诱导渗透调节物质的积累可能是促进幼苗恢复的生长状态的重要原因之一。从干物质积累的结果可以看出,GA_3处理显著改善了盐胁迫造成的生长抑制,尤其促进了根系恢复,而根系作为植物吸收水分和感知盐环境的重要器官,它的状态恢复对于提高植株耐盐能力具有重要意义[34,35]。

3.4 不同油菜品种对盐胁迫及GA_3处理的差异响应

本研究选用华油杂62和浙油50两个耐盐性存在差异的油菜品种,主要的目的是比较外源GA_3缓解盐胁迫的作用在不同遗传背景材料中的一致性及响应程度。研究结果表明,两个品种对NaCl胁迫及GA_3处理总体表现出一致的变化趋势,即NaCl胁迫抑制种子萌发和幼苗生长,而GA_3能够在一定程度上缓解该抑制作用。

但两个品种的响应程度存在一定的差异。NaCl胁迫下,浙油50的发芽率、发芽势、胚根长和活力指数等指标下降幅度总体高于华油杂62,表明其对盐胁迫更加敏感。另一方面,GA_3处理后浙油50部分萌发和生长指标的变化程度也较大,说明不同品种对外源GA_3的响应程度可能存在差异。由此可见,外源GA_3对盐胁迫的缓解作用在两个品种中具有一定的一致性,但其调控效应仍受到品种遗传背景的影响。

4 结论

NaCl胁迫显著抑制了华油杂62和浙油50的种子萌发和幼苗生长,并且引起了活性氧积累、膜脂过氧化及渗透调节物质含量变化,其中浙油50整体受到的抑制程度高于华油杂62,表明两个品种对盐胁迫的响应存在一定差异。外源GA_3浸种一定程度上缓解NaCl胁迫对油菜种子萌发及幼苗生长的不利影响,提高了发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数,并促进胚芽/胚轴、胚根生长和干物质积累。同

时,GA_3处理降低了盐胁迫下活性氧和MDA的积累,并影响着SOD、POD和CAT活性及脯氨酸、可溶性糖和可溶性蛋白含量,表明外源GA_3能够改善盐胁迫下油菜幼苗的氧化及渗透调节状态。

综合来看,外源GA_3浸种对盐胁迫下油菜种子萌发及幼苗生长具有一定的缓解作用,该作用与氧化损伤、膜稳定性及渗透调节等生理响应的改善相伴随。两个品种总体响应趋势一致,但缓解程度存在一定差异。由于本研究的生理指标均来源于萌发后第7 d幼苗,因此上述结果主要反映GA_3处理后的幼苗生理响应,其对种子萌发过程的具体作用机制仍需进一步研究。

附表 请见网络版:1)本刊网站 http://www.jouroilcrops.cn/;2)中国知网 http://www.cnki.net/。

参考文献:

[1] 李谷成, 陶玉瑞, 郑宏运. "十五五"时期我国油菜产业高质量发展的挑战与对策[J]. 中国油料作物学报, 2026, 48(3): 1-6. DOI: 10.19802/j.issn.1007-9084.2026156.

[2] 余燕, 贺原, 邹翔宇, 等. 双低甘蓝型油菜"油蔬两用"开发利用现状与展望[J]. 中国油料作物学报, 2022, 44(5): 921-929. DOI: 10.19802/j.issn.1007-9084.2021167.

[3] 何微, 李俊, 王晓梅, 等. 全球油菜产业现状与我国油菜产业问题、对策[J]. 中国油脂, 2022, 47(2): 1-7. DOI:10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.210430.

[4] 张冉, 曹娟娟, 濮超, 等. 中国油菜籽和菜籽油的生产、进出口及供需分析[J]. 中国油脂, 2022, 47(6): 8-14, 52. DOI:10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.210729.

[5] 何锋, 朱杰, 周勇, 等. 1961—2021年世界油菜生产时空演变特征及我国油菜优势度分析[J]. 南方农业学报, 2024, 55(7): 2181-2191. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1191.2024.07.029.

[6] 严茂林, 葛玮玮, 张翔, 等. 我国油料产业形势分析与发展对策[J]. 中国油脂, 2023, 48(6): 8-18. DOI: 10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.220115.

[7] 李晔, 张炜琰, 徐珂, 等. 甘蓝型油菜苗期高光效种质资源的筛选与鉴定[J]. 植物遗传资源学报, 2025, 26(12): 2301-2313. DOI:10.13430/j.cnki.jpgr.20250706002.

[8] 王小霞, 刘自刚, 田海燕, 等. 冬播甘蓝型油菜生育期进程及生理生化特性[J]. 西南农业学报, 2024, 37(7): 1459-1470. DOI: 10.16213/j.cnki.scjas.2024.7.007.

[9] 马小龙, 林明, 丁兆斐, 等. 不同丸衣配方对甜菜种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 中国糖料, 2026, 48(3): 52-61. DOI:10.13570/j.cnki.scc.2026.03.006.

[10] 王文雅, 赵传赫, 宋柏权, 等. 不同酸改性生物炭对盐碱胁迫下甜菜种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 中国糖料, 2026, 48(3): 70-77, 2. DOI:10.13570/j.cnki.scc.2026.03.008.

[11] 高渊, 乔晓英, 陈小兵, 等. 苏北滨海盐碱化耕地水稻净灌溉需水量研究[J]. 土壤, 2025, 57(5): 1145-1151. DOI:10.13758/j.cnki.tr.2025.05.023.

[12] 高桂珍, 黄慧琪, 张璐, 等. 甘蓝型油菜种子萌发期耐盐碱性鉴定与筛选[J]. 植物遗传资源学报, 2026, 27(3): 594-606. DOI:10.13430/j.cnki.jpgr.20251018004.

[13] 孟祥浩, 林琪, 张玉梅, 等. 盐胁迫对小麦萌发的影响及耐盐指标的筛选[J]. 华北农学报, 2014, 29(4): 175-180.

[14] 古丽娜尔·巴合提别克, 刘文静, 麻井彪, 等. 盐胁迫下水稻种子萌发特性及其耐盐性评价[J]. 新疆农业科学, 2025, 62(4): 858-868. DOI: 10.6048/j.issn.1001-4330.2025.04.009.

[15] 陈新军, 胡茂龙, 戚存扣, 等. 不同甘蓝型油菜品种种子萌发耐盐能力研究[J]. 江苏农业科学, 2007, 35(4): 26-28. DOI:10.15889/j.issn.1002-1302.2007.04.031.

[16] Kou Y D, Ren J P, Ma Y J, et al. Effects of exogenous substances treatment on fruit quality and pericarp anthocyanin metabolism of peach[J]. Agronomy, 2023, 13(6): 1489. DOI:10.3390/agronomy13061489.

[17] Zhang X X, Chai M, Wu Y J, et al. Phytohormones and shoot branching: a mini-review of molecular regulatory networks and mechanisms[J]. Plants, 2026, 15(14): 2197. DOI:10.3390/plants15142197.

[18] 杨书婷, 何盛浩, 赵碧云, 等. 苗期喷施外源物质对迟播油菜越冬期抗寒性及产量的调控效应[J]. 作物学报, 2025, 51(10): 2788-2804. DOI: 10.3724/SP.J.1006.2025.55002.

[19] Cheng B Z, Li Z, Liang L L, et al. The γ-aminobutyric acid (GABA) alleviates salt stress damage during seeds germination of white clover associated with Na^+/K^+ transportation, dehydrins accumulation, and stress-related genes expression in white clover[J]. Int J Mol Sci, 2018, 19(9): 2520. DOI:10.3390/ijms19092520.

[20] Mahmud J A, Hasanuzzaman M, Khan M I R, et al. β-aminobutyric acid pretreatment confers salt stress tolerance in *Brassica napus* L. by modulating reactive oxygen species metabolism and methylglyoxal detoxification[J]. Plants, 2020, 9(2): 241. DOI:10.3390/plants9020241.

[21] 于莹, 王馨宁, 孙泽鑫, 等. 花生组织抗氧化生理生化指标快速测定方法[J]. 花生学报, 2022, 51(2): 75-80. DOI:10.14001/j.issn.1002-4093.2022.02.010.

[22] 岳娜娜, 熊健, 赵黎明, 等. 外源物质对油菜盐胁迫缓解效应的研究进展[J]. 江苏农业科学, 2025, 53(18):

41-47. DOI:10.15889/j.issn.1002-1302.2025.18.006.
[23] 唐廷棚, 闫永恒, 徐亮亮, 等. 赤霉素对盐胁迫下3种饲草种子萌发的影响[J]. 草原与草坪, 2026, 46(1): 253-260. DOI:10.13817/j.cnki.cyycp.2026.01.028.
[24] 王思奇, 毕云杰, 李慧贤, 等. 外源赤霉素对盐胁迫下藿香种子萌发的影响[J]. 植物研究, 2026, 46(3): 481-492. DOI:10.7525/j.issn.1673-5102.2026.03.009.
[25] 孙梦媛, 张必周, 张辉, 等. 赤霉素浸种对盐胁迫下甜菜种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. 种子, 2025, 44(8): 179-187. DOI: 10.16590/j. cnki. 1001-4705.2025.08.179.
[26] Murtaza G, Usman M, Ahmed Z, et al. Jasmonic acid and engineered dog manure biochar improve salinity tolerance in *Phaseolus vulgaris* through coordinated hormonal, antioxidant, and root responses[J]. Plant Signal Behav, 2026, 21 (1): 2707834. DOI: 10.1080/15592324.2026.2707834.
[27] 张琪, 李玲玉, 唐乐, 等. 油菜耐盐机理与分子育种应用研究进展[J]. 作物研究, 2026, 40(1): 93-102. DOI:10.3969/j.issn.1001-5280.2026.01.012.
[28] Ghafoor S, Ahmad M, Ishfaq N, et al. Phenylalanine coordinates antioxidant responses and ion homeostasis to enhance salinity tolerance in maize[J]. Plant Signal Behav, 2026, 21: 2709225. DOI:10.1080/15592324.2026.2709225.
[29] 胡志辉, 高瑜璟, 吴春杏, 等. 盐碱胁迫对大豆生理和光合特性的影响研究进展[J]. 江苏农业科学, 2026, 54 (6): 1-10. DOI: 10.15889/j. issn. 1002-1302.2026.06.001.
[30] 王佳欣, 胡国庆, 万勇善, 等. 外源褪黑素对盐胁迫下花生幼苗及其根系生长与生理特性的影响[J]. 花生学报, 2026, 55(3): 347-356. DOI: 10.14001/j.issn.1002-4093.2026.03.006.
[31] 杨小燕, 谢永刚, 韩科俊, 等. 盐和干旱复合胁迫对白菜型 冬油菜种子萌发生理特性的影响[J]. 农业科技通讯, 2024(9): 146-148. DOI:10.3969/j.issn.1000-6400.2024.09.036.
[32] 王亚娟, 杨洋, 阴法庭, 等. NaCl胁迫对甘蓝型饲料油菜渗透调节物质及Na+、K+含量的影响[J]. 东北农业科学, 2024, 49(3): 58-64. DOI: 10.16423/j.cnki.1003-8701.2024.03.011.
[33] 王龙, 李静, 钱晨, 等. 盐胁迫对油菜生理特征和菜籽产量品质的影响[J]. 作物学报, 2024, 50(6): 1597-1607. DOI:10.3724/SP.J.1006.2024.34137.
[34] 刘瑞琦, 宿宛玉, 骆璐, 等. 盐胁迫对高油酸花生幼苗根系形态和生理特性的影响[J]. 花生学报, 2026, 55(3): 337-346. DOI:10.14001/j.issn.1002-4093.2026.03.005.
[35] 黄方园, 卞潇华, 蒋展, 等. 不同生态区冬油菜根系生长及碳氮积累分配特征[J]. 中国农业科学, 2024, 57 (12): 2404-2423. DOI: 10.3864/j. issn. 0578-1752.2024.12.011.

(责任编辑:郭学兰)