

杨晓菲, 张宁, 张树军. 外源精胺和亚精胺对盐胁迫下 2 种小麦幼苗生理特性的影响[J]. 江苏农业学报, 2026, 42(1): 21-31.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2026.01.003

外源精胺和亚精胺对盐胁迫下 2 种小麦幼苗生理特性的影响

杨晓菲^{1,2}, 张宁¹, 张树军³

(1. 渭南师范学院环境与生命科学学院, 陕西渭南 714000; 2. 陕西省河流湿地生态与环境重点实验室, 陕西渭南 714000; 3. 陕西省华阴市种子管理站, 陕西华阴 714200)

摘要: 为了探讨外源精胺(Spm)和亚精胺(Spd)对小麦幼苗生长和耐盐性的影响, 本试验选用耐盐性较强的百农 201 和耐盐性较弱的矮抗 58 2 个小麦品种为材料, 探究 3 种浓度(0.05 mmol/L、0.10 mmol/L、0.20 mmol/L)的 Spm 和 Spd 浸种对不同程度盐胁迫(25 mmol/L NaCl、50 mmol/L NaCl、100 mmol/L NaCl)下小麦生长指标(发芽率、根长和芽长)和生理指标[叶绿素(Chl.)含量、丙二醛(MDA)含量、脯氨酸(Pro)含量、过氧化物酶(POD)活性]的调节效应。结果表明, 与对照(纯水培养)相比, NaCl 胁迫显著抑制了小麦种子萌发和幼苗生长, 使种子发芽率、根长、芽长、Chl. 含量显著下降, MDA 含量、Pro 含量和 POD 活性升高; 适宜浓度 Spm 和 Spd 浸种可缓解盐胁迫对百农 201 和矮抗 58 种子发芽率、根长、芽长及叶绿素含量的抑制作用, 使 MDA 含量下降, Pro 含量和 POD 活性进一步提高。结合隶属函数法综合分析结果表明, Spd 较 Spm 能更好地减轻盐胁迫对幼苗的毒害作用, 且对盐敏感品种矮抗 58 的作用效果好于耐盐品种百农 201, 其中 0.10 mmol/L Spd 浸种缓解 NaCl 胁迫对小麦幼苗毒害的效果较好。

关键词: 小麦; 盐胁迫; 外源精胺; 外源亚精胺; 生长指标; 生理特性

中图分类号: S512 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2026)01-0021-11

Effects of exogenous spermine and spermidine on the physiological characteristics of two wheat seedlings under salt stress

YANG Xiaofei^{1,2}, ZHANG Ning¹, ZHANG Shujun³

(1. College of Environment and Life Sciences, Weinan Normal University, Weinan 714000, China; 2. Key Laboratory for Ecology and Environment of River Wetlands in Shaanxi Province, Weinan 714000, China; 3. Huayin Seed Management Station, Huayin 714200, China)

Abstract: To investigate the effects of exogenous spermine (Spm) and spermidine (Spd) on the growth and salt tolerance of wheat seedlings, this experiment used two wheat varieties with different salt tolerances (Bainong 201, with strong salt tolerance; Aikang 58, with weak salt tolerance) as materials. It explored the regulatory effects of seed soaking with three concentrations (0.05 mmol/L, 0.10 mmol/L, and 0.20 mmol/L) of Spm and Spd on the growth parameters (germination rate, root length and shoot length) and physiological indicators

including chlorophyll (Chl.) content, malondialdehyde (MDA) content, proline (Pro) content and peroxidase (POD) activity of wheat seedlings under different degrees (25 mmol/L NaCl, 50 mmol/L NaCl, and 100 mmol/L) of NaCl stress. The results showed that, compared with the control (cultivation in distilled water), NaCl stress significantly inhibited wheat seed germination and seedling growth. The germination rate, root length, shoot length, chlorophyll content of Bainong 201 and Aikang 58 decreased

收稿日期: 2025-03-03

基金项目: 陕西省科技厅重点研发计划——农业农村领域项目(2025NC-YBXM-004); 国家自然科学基金青年项目(31701416); 陕西省科协青年人才托举计划项目(20200207); 国家级大学生创新创业训练计划项目(202310723026)

作者简介: 杨晓菲(1988-), 女, 陕西渭南人, 博士, 副教授, 主要从事作物生理研究。(E-mail) yangxiaofei2007@yeah.net

通讯作者: 张树军, (E-mail) 865728077@qq.com

significantly as the salt stress concentration increased, while the MDA content, Pro content, and *POD* activity increased significantly. Seed soaking with appropriate concentrations of Spm and Spd alleviated the inhibitory effects of salt stress on seed germination rate, root length, shoot length, and chlorophyll content in both Bainong 201 and Aikang 58. This treatment resulted in a decrease in MDA content and a further increase in Pro content and *POD* activity. Based on a comprehensive analysis using the membership function method, the results indicated that Spd was more effective than Spm in alleviating the toxic effects of salt stress on seedlings. Furthermore, its positive effect was more pronounced in the salt-sensitive variety Aikang 58 than in the salt-tolerant variety Bainong 201. Among the treatments, seed soaking with 0.10 mmol/L Spd demonstrated the best efficacy in mitigating NaCl stress-induced damage to wheat seedlings.

Key words: wheat; salt stress; exogenous spermine; exogenous spermidine; growth parameters; physiological characteristics

受气候变化与人类活动的双重影响,土壤盐渍化程度持续加剧,已成为制约植物生长发育及生命活动的主要胁迫因子之一^[1]。据统计,全球受盐碱化影响的土地面积近 $9.32 \times 10^8 \text{ hm}^2$;中国盐碱地面积约 $3.60 \times 10^7 \text{ hm}^2$,占全国可耕种土地面积的5.01%,是世界第3大盐碱地分布国^[2]。土壤中过量盐分积累会改变其物理化学性质,进而影响植物的形态特征、生理特性及生长发育进程。研究结果表明,当土壤盐分含量超过0.2%时,植物会因渗透作用出现吸水困难;植物若长期生长在盐分含量超过0.4%的土壤中,体内水分会发生外渗,导致生长速率显著下降,最终可能引发死亡^[3]。

小麦是中国重要的粮食作物,其生长发育、产量及品质均受盐碱胁迫的显著影响,该问题已成为制约小麦安全生产的关键因素。值得关注的是,不同小麦品种对盐碱胁迫的响应存在显著差异,已有研究结果证实,百农201的耐盐性表现突出,而矮抗58的耐盐性相对较弱^[4]。

近年来,外源化学物质调控作物抗盐碱能力的研究较多,其中水杨酸、褪黑素及多胺等可通过浸种方式调控作物抗盐碱能力,该方式因简便高效而备受关注^[5-6]。多胺是生物体内广泛存在的一类具有较强生理活性的低分子脂肪族含氮碱,不仅影响植物正常生长发育,还与植物应对干旱、盐碱、酸性等非生物逆境的能力密切相关^[7-9],因此常作为抗逆生长调节剂被广泛应用。常见的多胺包括四胺类的精胺(Spm)、三胺类的亚精胺(Spd)及二胺腐胺(Put)等,其中具有多价阳离子特性的精胺(Spm)和亚精胺(Spd)生理功能更为突出。已有研究结果证实,外源多胺可有效缓解小麦^[10]、水稻^[11]、玉米^[12]、燕麦^[13]、向日葵^[14]、黄瓜^[15-16]、番茄^[17]等作物在多种非生物逆境胁迫下的伤害。姜惠丽等^[18]和王素平等^[19]的研究结果进一

步表明,不同外源多胺对盐胁迫下黄瓜幼苗的缓解效果依次为Spd>Spm>Put。然而,Spd和Spm浸种对不同程度盐胁迫的缓解效应、适宜浓度以及二者与品种耐盐性的互作研究仍较薄弱。因此,本研究选用上述2种缓解效果较强的外源多胺(Spd、Spm),对供试耐盐性差异显著的小麦品种(百农201,耐盐性较强;矮抗58,耐盐性较弱)^[4]进行浸种处理,通过探究不同浓度Spd和Spm对25 mmol/L、50 mmol/L、100 mmol/L NaCl胁迫下小麦生长指标及生理特性的影响,阐明外源Spd和Spm对盐胁迫小麦幼苗的缓解机制,旨在为盐碱地小麦适应性栽培提供技术支撑,为揭示小麦耐盐机理提供理论参考,推动盐碱地小麦产业化发展。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验所选用的材料分别是2017年通过河南省审定的百农201(审定编号:豫审麦2017019,耐盐性较强)种子和2005年通过国家审定的矮抗58(审定编号:国审麦2005008,耐盐性较弱)种子,均由西北农林科技大学分子染色体工程实验室提供;试验试剂NaCl购自天津市科密欧化学试剂有限公司,精胺(Spm)和亚精胺(Spd)均为日本Sigma公司产品。

1.2 试验方法

1.2.1 种子处理 挑选籽粒饱满、完整且无病虫害的百农201和矮抗58种子,用5%次氯酸钠对种子表面消毒10 min,再用无菌蒸馏水冲洗3~4次。将处理好的种子腹沟朝下、均匀摆放于铺垫2层湿润滤纸的干净培养皿中,每组处理3个培养皿,每个培养皿放30粒种子。

1.2.2 试验预处理 为筛选本试验适宜的NaCl胁迫浓度及外源Spm、Spd处理浓度,在查阅相关文

献^[4,10]的基础上,先开展预试验。针对小麦种子萌发期的盐胁迫响应,设置5个NaCl浓度梯度(25 mmol/L、50 mmol/L、100 mmol/L、150 mmol/L、200 mmol/L),预试验结果显示,150 mmol/L、200 mmol/L NaCl胁迫下,小麦种子萌发几乎完全受到抑制,无法满足后续生长指标与生理指标的测定需求;而25 mmol/L、50 mmol/L、100 mmol/L NaCl处理既能对小麦形成有效胁迫,又可保证种子萌发及幼苗生长,确保后续指标的测定,故确定本试验NaCl胁迫浓度范围为25~100 mmol/L。外源Spm

与Spd处理浓度的确定,参考已有研究中不同NaCl胁迫条件下Spm、Spd对作物(尤其是小麦等禾本科作物)的适宜浓度范围^[10-13],结合本试验小麦品种特性及NaCl胁迫梯度,初步筛选出可用于正式试验的Spm、Spd浓度梯度。以百农201(耐盐性较强)和矮抗58(耐盐性较弱)为供试小麦品种,采用外源Spm、Spd进行浸种处理,分别设置13个处理,具体处理组合详见表1。浸种过程中,确保处理溶液完全浸没种子,每天定时更换新鲜处理溶液,以维持处理溶液浓度的稳定性。

表1 不同浓度精胺和亚精胺浸种处理下小麦的盐胁迫试验处理

Table 1 Experimental treatments of wheat under salt stress with different concentrations of spermine and spermidine seed soaking

| 精胺 | | 亚精胺 | |
|------|---|------|---|
| 处理编号 | 处理方案 | 处理编号 | 处理方案 |
| 精1 | 对照[0 mmol/L NaCl 溶液培养(纯水培养)] | 亚1 | 对照[0 mmol/L NaCl 溶液培养(纯水培养)] |
| 精2 | 25 mmol/L NaCl 溶液培养 | 亚2 | 25 mmol/L NaCl 溶液培养 |
| 精3 | 50 mmol/L NaCl 溶液培养 | 亚3 | 50 mmol/L NaCl 溶液培养 |
| 精4 | 100 mmol/L NaCl 溶液培养 | 亚4 | 100 mmol/L NaCl 溶液培养 |
| 精5 | 0.05 mmol/L Spm 浸种+25 mmol/L NaCl 溶液培养 | 亚5 | 0.05 mmol/L Spd 浸种+25 mmol/L NaCl 溶液培养 |
| 精6 | 0.05 mmol/L Spm 浸种+50 mmol/L NaCl 溶液培养 | 亚6 | 0.05 mmol/L Spd 浸种+50 mmol/L NaCl 溶液培养 |
| 精7 | 0.05 mmol/L Spm 浸种+100 mmol/L NaCl 溶液培养 | 亚7 | 0.05 mmol/L Spd 浸种+100 mmol/L NaCl 溶液培养 |
| 精8 | 0.10 mmol/L Spm 浸种+25 mmol/L NaCl 溶液培养 | 亚8 | 0.10 mmol/L Spd 浸种+25 mmol/L NaCl 溶液培养 |
| 精9 | 0.10 mmol/L Spm 浸种+50 mmol/L NaCl 溶液培养 | 亚9 | 0.10 mmol/L Spd 浸种+50 mmol/L NaCl 溶液培养 |
| 精10 | 0.10 mmol/L Spm 浸种+100 mmol/L NaCl 溶液培养 | 亚10 | 0.10 mmol/L Spd 浸种+100 mmol/L NaCl 溶液培养 |
| 精11 | 0.20 mmol/L Spm 浸种+25 mmol/L NaCl 溶液培养 | 亚11 | 0.20 mmol/L Spd 浸种+25 mmol/L NaCl 溶液培养 |
| 精12 | 0.20 mmol/L Spm 浸种+50 mmol/L NaCl 溶液培养 | 亚12 | 0.20 mmol/L Spd 浸种+50 mmol/L NaCl 溶液培养 |
| 精13 | 0.20 mmol/L Spm 浸种+100 mmol/L NaCl 溶液培养 | 亚13 | 0.20 mmol/L Spd 浸种+100 mmol/L NaCl 溶液培养 |

1.2.3 指标测定 萌发指标的测定包括种子发芽率(*GR*)、根长(*RL*)和芽长(*BL*)。每天定时观察并记录各处理小麦种子的萌发数量(以胚芽长度达该种子长度的1/2作为种子萌发的判定标准),连续3 d无种子萌发视为萌发结束。发芽结束后,每个处理随机挑选10株幼苗,对其根长和芽长进行测量。叶绿素(*Chl*)含量、丙二醛(*MDA*)含量、脯氨酸(*Pro*)含量和过氧化物酶(*POD*)活性的测定分别采用比色法、硫代巴比妥酸法、磺基水杨酸法和紫外吸收法,上述所有操作均参照张志良等^[20]的方法进行。

1.3 数据处理与分析

采用Microsoft Excel 2010对试验数据进行处

理,采用SPSS 26.0在0.05水平上进行差异显著性分析,通过皮尔逊双变量和模糊隶属函数法进行相关性分析,采用OriginPro 2022软件作图。

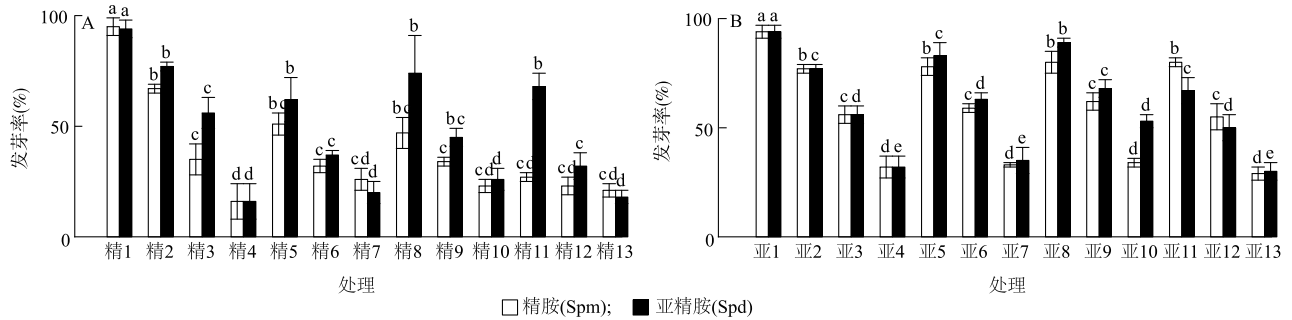
2 结果与分析

2.1 精胺和亚精胺对盐胁迫下小麦发芽率的影响

由图1可知,与对照相比,仅NaCl胁迫处理显著抑制2种小麦种子萌发,发芽率随着NaCl浓度的增加而降低。从图1A可见,3种浓度Spm和Spd浸种后NaCl胁迫处理的百农201发芽率与仅对应浓度NaCl胁迫处理的发芽率差异均不显著。从图1B可见,3种浓度Spm浸种后NaCl胁迫处理的矮抗58发芽率与仅对应浓度NaCl胁迫处理的发芽率差异

均不显著;Spd 浸种后 NaCl 胁迫处理亚 8 较仅 NaCl 胁迫处理亚 2、Spd 浸种后 NaCl 胁迫处理亚 9 较仅 NaCl 胁迫处理亚 3、Spd 浸种后 NaCl 胁迫处理亚 10 较仅 NaCl 胁迫处理亚 4 矮抗 58 的发芽率分别提高 15.58%、21.43% 和 65.63%,且差异显著。以上结

果说明,Spm 和 Spd 浸种对耐盐品种百农 201 在 NaCl 胁迫下的发芽率无显著影响;应用 0.10 mmol/L Spd 浸种对盐敏感品种矮抗 58 在 NaCl 胁迫下的发芽率有显著促进作用。



A:百农 201;B:矮抗 58。处理精 1~精 13、亚 1~亚 13 见表 1。同一种多胺处理图柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

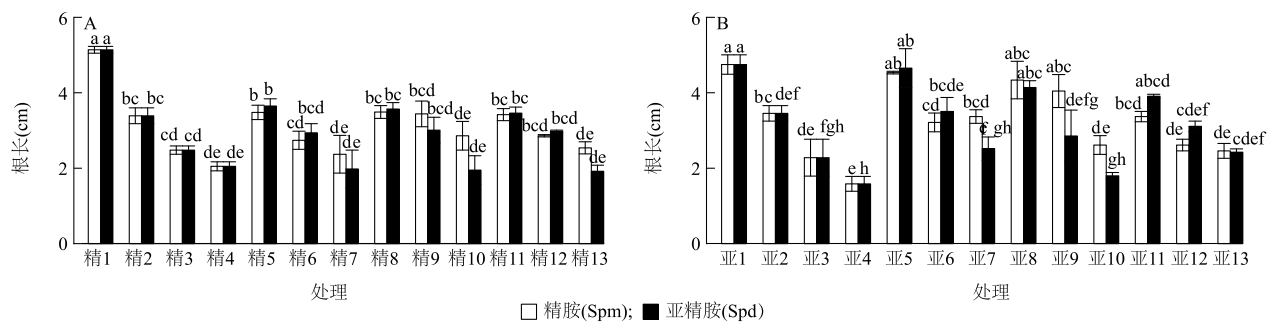
图 1 不同浓度精胺和亚精胺浸种处理对盐胁迫下 2 个小麦品种发芽率的影响

Fig.1 Effects of seed soaking with different concentrations of spermine and spermidine on the germination rate of two wheat cultivars under salt stress

2.2 精胺和亚精胺对盐胁迫下小麦根长和芽长的影响

由图 2 和图 3 可知,与对照相比,仅 NaCl 胁迫处理显著抑制 2 种小麦根和芽生长,两者均随着 NaCl 浓度的增加而降低。从图 2A 和图 3A 可知,Spm 和 Spd 浸种对 NaCl 胁迫处理下百农 201 的根长和芽长无显著影响。从图 2B 可知,Spd 浸种后 NaCl 胁迫处理亚 5 和亚 8 矮抗 58 小麦根长显著高于仅 NaCl 胁迫处理亚 2,Spd 浸种后 NaCl 胁迫处理亚 6 矮抗 58 小麦根长显著高于仅 NaCl 胁迫处理亚 3,Spd 浸种后 NaCl 胁迫处理亚 13 矮抗 58 小麦根

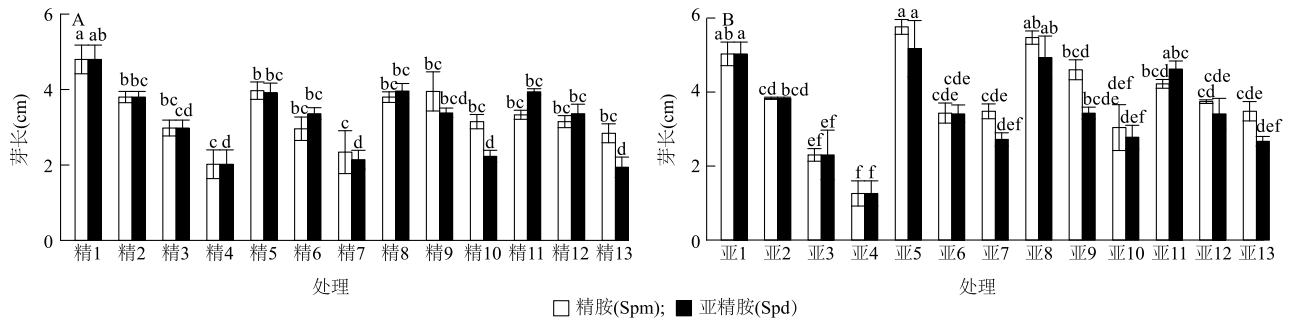
长显著高于仅 NaCl 胁迫处理亚 4;Spm 浸种后 NaCl 胁迫处理精 9 矮抗 58 小麦根长显著高于仅 NaCl 胁迫处理精 3,Spd 浸种后 NaCl 胁迫处理亚 7 矮抗 58 小麦根长显著高于仅 NaCl 胁迫处理亚 4;从图 3B 可知,Spd 浸种后 NaCl 胁迫处理亚 5 矮抗 58 小麦芽长显著高于仅 NaCl 胁迫处理亚 2,Spm 浸种后 NaCl 胁迫处理精 7 和精 13 矮抗 58 小麦芽长显著高于仅 NaCl 胁迫处理精 4,Spm 浸种后 NaCl 胁迫处理精 9 和精 12 矮抗 58 小麦芽长显著高于仅 NaCl 胁迫处理精 3,Spm 浸种后 NaCl 胁迫处理精 5 和精 8 矮抗 58 小麦芽长显著高于仅 NaCl 胁迫处理精 2。



A:百农 201;B:矮抗 58。处理精 1~精 13、亚 1~亚 13 见表 1。同一种多胺处理图柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 2 不同浓度精胺和亚精胺浸种处理对盐胁迫下 2 个小麦品种根长的影响

Fig.2 Effects of seed soaking with different concentrations of spermine and spermidine on root length of two wheat cultivars under salt stress



A: 百农 201; B: 矮抗 58。处理精 1~精 13、亚 1~亚 13 见表 1。同一种多胺处理图柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

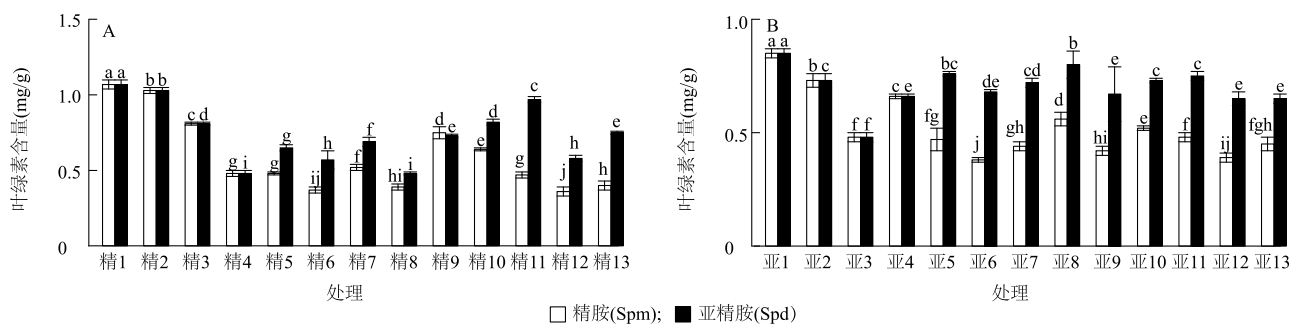
图 3 不同浓度精胺和亚精胺浸种处理对盐胁迫下 2 个小麦品种芽长的影响

Fig.3 Effects of seed soaking with different concentrations of spermine and spermidine on shoot length of two wheat cultivars under salt stress

2.3 精胺和亚精胺对盐胁迫下小麦叶片中叶绿素含量的影响

由图 4 可知,与对照相比,百农 201 在仅 NaCl 处理下叶片中叶绿素含量下降 3.74%~35.14%,矮抗 58 叶片中叶绿素含量下降 14.12%~43.53%,2 种小麦叶片中叶绿素含量均随着 NaCl 浓度的增加而显著降低,且盐敏感品种矮抗 58 下降幅度相对较大。从图 4A 可知,Spm 浸种后 NaCl 胁迫处理精 7、处理精 10 百农 201 叶片中叶绿素含量较仅 NaCl 胁迫处理精 4 显著增加,分别增加 8.33%、33.33%; Spd 浸种后 NaCl 胁迫处理亚 7、亚 10、亚 13 百农 201 叶片中叶绿素含量较仅 NaCl 胁迫处理亚 4 显著增加,分别增加 43.75%、70.83%、56.25%,即 100

mmol/L NaCl 胁迫下小麦叶片中叶绿素含量在不同浓度 Spd 浸种下均显著提高。从图 4B 可知,Spm 浸种对 NaCl 胁迫下矮抗 58 叶片中叶绿素含量未起到提升作用;Spd 浸种后 NaCl 胁迫处理亚 7、亚 10 矮抗 58 叶片中叶绿素含量显著高于仅 NaCl 胁迫处理亚 4,Spd 浸种后 NaCl 胁迫处理亚 6、亚 9、亚 12 矮抗 58 叶片中叶绿素含量显著高于仅 NaCl 胁迫处理亚 3,Spd 浸种后 NaCl 胁迫处理亚 8 矮抗 58 叶片中叶绿素含量显著高于仅 NaCl 胁迫处理亚 2,表明适宜浓度 Spd 浸种可有效促进盐胁迫下矮抗 58 叶片中叶绿素含量的增加。综上,Spd 浸种对 NaCl 胁迫下小麦叶片中叶绿素含量的提升效果优于 Spm 浸种,且以 0.10 mmol/L Spd 浸种处理效果更好。



A: 百农 201; B: 矮抗 58。处理精 1~精 13、亚 1~亚 13 见表 1。同一种多胺处理图柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 4 不同浓度精胺和亚精胺浸种处理对盐胁迫下 2 个小麦品种叶片中叶绿素含量的影响

Fig.4 Effects of seed soaking with different concentrations of spermine and spermidine on chlorophyll content in leaves of two wheat cultivars under salt stress

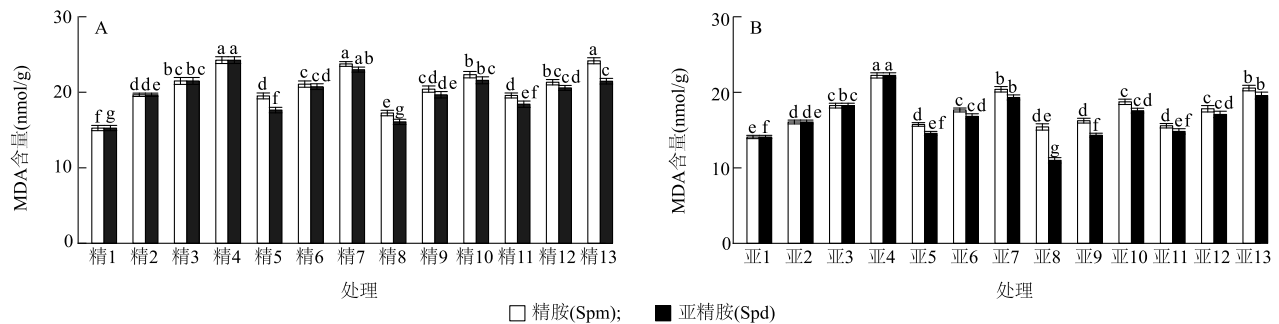
2.4 精胺和亚精胺对盐胁迫下小麦叶片中丙二醛 (MDA) 含量的影响

由图 5 可知,与对照相比,仅 NaCl 胁迫处理下 2 种小麦叶片中 MDA 含量随 NaCl 浓度的升高而显

著增加。从图 5A 可知,百农 201 应用 Spm 浸种后 NaCl 胁迫处理精 8 较仅 NaCl 胁迫处理精 2 叶片中 MDA 含量显著下降,Spm 浸种后 NaCl 胁迫处理精 10 较仅 NaCl 胁迫处理精 4 叶片中 MDA 含量显著

下降;百农 201 应用 Spd 浸种后 NaCl 胁迫处理亚 5、亚 8 较仅 NaCl 胁迫处理亚 2 叶片中 MDA 含量显著下降,Spd 浸种后 NaCl 胁迫处理亚 9 较仅 NaCl 胁迫处理亚 3 叶片中 MDA 含量显著下降,Spd 浸种后 NaCl 胁迫处理亚 10、亚 13 较仅 NaCl 胁迫处理亚 4 叶片中 MDA 含量显著下降。从图 5B 可知,矮抗 58 应用 Spm 浸种后 NaCl 胁迫处理精 9 较仅 NaCl 胁迫处理精 3 叶片中 MDA 含量显著下降,Spm 浸种后

NaCl 胁迫处理精 7、精 10、精 13 叶片中 MDA 含量均较仅 NaCl 胁迫处理精 4 显著下降;矮抗 58 应用不同浓度 Spd 浸种后 NaCl 胁迫处理亚 8 较仅 NaCl 胁迫处理亚 2 叶片中 MDA 含量显著下降,Spd 浸种后 NaCl 胁迫处理亚 9 较仅 NaCl 胁迫处理亚 3 叶片中 MDA 含量显著下降,Spd 浸种后 NaCl 胁迫处理亚 7、亚 10、亚 13 较仅 NaCl 胁迫处理亚 4 叶片中 MDA 含量显著下降。



A:百农 201;B:矮抗 58。处理精 1~精 13、亚 1~亚 13 见表 1。同一种多胺处理图柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

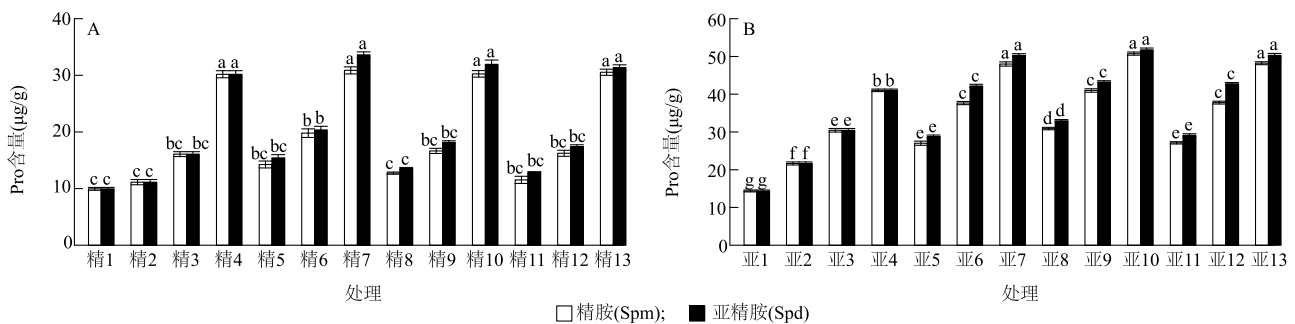
图 5 不同浓度精胺和亚精胺浸种处理对盐胁迫下 2 个小麦品种叶片中 MDA 含量的影响

Fig.5 Effects of seed soaking with different concentrations of spermine and spermidine on malondialdehyde (MDA) content in leaves of two wheat cultivars under salt stress

2.5 精胺和亚精胺对盐胁迫下小麦叶片中脯氨酸 (Pro) 含量和过氧化物酶 (POD) 活性的影响

由图 6 可知,与对照相比,2 个小麦品种在仅 NaCl 胁迫下叶片中 Pro 含量大多显著提高,且随着 NaCl 浓度的增加 Pro 含量不断提高。应用 Spm 和 Spd 浸种后对相同浓度 NaCl 处理下百农 201 叶片中 Pro 含量无显著影响(图 6A)。矮抗 58 应用 Spm 和 Spd 浸种后 NaCl

胁迫处理精 5、亚 5、精 8、亚 8、精 11、亚 11 叶片中 Pro 含量较仅 NaCl 胁迫处理精 2(亚 2)显著上升,Spm 和 Spd 浸种后 NaCl 胁迫处理精 6、亚 6、精 9、亚 9、精 12、亚 12 叶片中 Pro 含量较仅 NaCl 胁迫处理精 3(亚 3)显著上升,Spm 和 Spd 浸种后 NaCl 胁迫处理精 7、亚 7、精 10、亚 10、精 13、亚 13 叶片中 Pro 含量均较仅 NaCl 胁迫处理精 4(亚 4)显著上升(图 6B)。



A:百农 201;B:矮抗 58。处理精 1~精 13、亚 1~亚 13 见表 1。同一种多胺处理图柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 6 不同浓度精胺和亚精胺浸种处理对盐胁迫下 2 个小麦品种叶片中脯氨酸 (Pro) 含量的影响

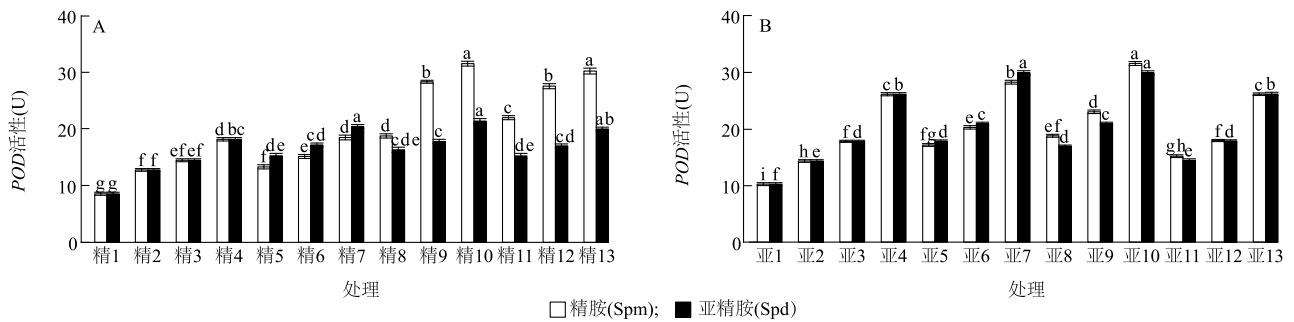
Fig.6 Effects of seed soaking with different concentrations of spermine and spermidine on proline (Pro) content in leaves of two wheat cultivars under salt stress

由图 7 可知,与对照相比,2 个小麦品种在仅 NaCl 胁迫下叶片中 POD 活性均显著增加,且随着 NaCl 浓

度的增加 POD 活性不断提高。百农 201 应用 Spm 浸种后 NaCl 胁迫处理精 8、精 11 叶片中 POD 活性较仅

NaCl 胁迫处理精2显著提高,Spm 浸种后 NaCl 胁迫处理精9、精12 叶片中 *POD* 活性较仅 NaCl 胁迫处理精3 显著提高,Spm 浸种后 NaCl 胁迫处理精10、精13 叶片中 *POD* 活性较仅 NaCl 胁迫处理精4 显著提高; 百农201 应用 Spd 浸种后 NaCl 胁迫处理亚5、亚8、亚11 叶片中 *POD* 活性较仅 NaCl 胁迫处理亚2 显著提高,Spd 浸种后 NaCl 胁迫处理亚6、亚9、亚12 叶片中 *POD* 活性较仅 NaCl 胁迫处理亚3 显著提高,Spd 浸种后 NaCl

胁迫处理亚7、亚10 叶片中 *POD* 活性较仅 NaCl 胁迫处理亚4 显著提高(图6A)。矮抗58 应用 Spm 和 Spd 浸种后 NaCl 胁迫处理精5、亚5、精8、亚8 叶片中 *POD* 活性较仅 NaCl 胁迫处理精2(亚2)显著提高,Spd 浸种后 NaCl 胁迫处理亚6、亚9 叶片中 *POD* 活性较仅 NaCl 胁迫处理亚3 显著提高,Spd 浸种后 NaCl 胁迫处理亚7、亚10 叶片中 *POD* 活性较仅 NaCl 胁迫处理亚4 显著提高。



A: 百农201; B: 矮抗58。处理精1~精13、亚1~亚13见表1。同一种多胺处理图柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图7 不同浓度精胺和亚精胺浸种处理对盐胁迫下2个小麦品种叶片中过氧化物酶(*POD*)活性的影响

Fig.7 Effects of seed soaking with different concentrations of spermine and spermidine on peroxidase (*POD*) activity in leaves of two wheat cultivars under salt stress

2.6 各指标间的相关性

从表2可知,2个小麦品种的发芽率与根长、芽长均呈极显著正相关关系,与MDA含量、Pro含量和*POD*活性呈极显著负相关关系。百农201叶片

中*POD*活性与MDA含量和Pro含量呈显著正相关关系;矮抗58叶片中*POD*活性与根长、芽长呈极显著负相关关系,与MDA含量和Pro含量呈显著正相关关系。

表2 不同处理下百农201和矮抗58各指标间的相关性分析结果

Table 2 Correlation analysis between various indexes of Bainong 201 and Aikang 58 under different treatments

| 小麦品种 | 指标 | 发芽率 | 根长 | 芽长 | Chl.含量 | MDA含量 | Pro含量 | <i>POD</i> 活性 |
|-------|---------------|----------|----------|----------|---------|----------|----------|---------------|
| 百农201 | 发芽率 | 1.000 | 0.807** | 0.715** | 0.511* | -0.871** | -0.716** | -0.668** |
| | 根长 | 0.807** | 1.000 | 0.844** | 0.255 | -0.751** | -0.713** | -0.354 |
| | 芽长 | 0.715** | 0.844** | 1.000 | 0.326 | -0.708** | -0.813** | -0.318 |
| | Chl.含量 | 0.511* | 0.255 | 0.326 | 1.000 | -0.298 | -0.174 | -0.389 |
| | MDA含量 | -0.871** | -0.751** | -0.708** | -0.298 | 1.000 | 0.808** | 0.535* |
| | Pro含量 | -0.716** | -0.713** | -0.813** | -0.174 | 0.808** | 1.000 | 0.483* |
| | <i>POD</i> 活性 | -0.668** | -0.354 | -0.318 | -0.389 | 0.535* | 0.483* | 1.000 |
| 矮抗58 | 发芽率 | 1.000 | 0.676** | 0.676** | 0.601** | -0.690** | -0.772** | -0.742** |
| | 根长 | 0.676** | 1.000 | 0.947** | 0.054 | -0.717** | -0.748** | -0.708** |
| | 芽长 | 0.676** | 0.947** | 1.000 | 0.050 | -0.707** | -0.668** | -0.623** |
| | Chl.含量 | 0.601** | 0.054 | 0.050 | 1.000 | -0.329 | -0.180 | -0.217 |
| | MDA含量 | -0.690** | -0.717** | -0.707** | -0.329 | 1.000 | 0.703** | 0.700** |
| | Pro含量 | -0.772** | -0.748** | -0.668** | -0.180 | 0.703** | 1.000 | 0.959** |
| | <i>POD</i> 活性 | -0.742** | -0.708** | -0.623** | -0.217 | 0.700** | 0.959** | 1.000 |

Chl.: 叶绿素; MDA: 丙二醛; Pro: 脯氨酸; *POD* 过氧化物酶。*表示显著相关; **表示极显著相关。

2.7 不同处理下耐盐性比较

通过主成分分析法对 7 个指标进行综合评价,结果(表 3)显示,百农 201 长势排名前 5 的除了 0 mmol/L、25 mmol/L NaCl 胁迫处理外,第 2 名、第 4 名、第 5 名均为 Spd 浸种后 25 mmol/L NaCl 胁迫处理,表明对百农 201 来说,Spd 较 Spm 能较好地减轻

盐胁迫对幼苗的毒害作用。矮抗 58 长势排名前 5 名的除了 0 mmol/L NaCl 处理外,第 2 名、第 3 名为 Spd 浸种后 25 mmol/L NaCl 胁迫处理,第 4 名和第 5 名为 Spm 浸种后 25 mmol/L NaCl 胁迫处理,由此可见,对矮抗 58 来说 0.10 mmol/L Spd 浸种缓解盐胁迫对幼苗毒害的效果较好。

表 3 不同处理下 2 种小麦综合因子得分及长势排名

Table 3 Comprehensive factor scores and growth ranking of two wheat varieties under different treatments

| 百农 201 | | | 矮抗 58 | | |
|---|--------|------|---|--------|------|
| 处理 | 综合得分 | 长势排序 | 处理 | 综合得分 | 长势排序 |
| 对照[0 mmol/L NaCl 溶液培养(纯水培养)] | 1.886 | 1 | 对照[0 mmol/L NaCl 溶液培养(纯水培养)] | 1.469 | 1 |
| 25 mmol/L NaCl 溶液培养 | 0.796 | 3 | 25 mmol/L NaCl 溶液培养 | 0.650 | 8 |
| 50 mmol/L NaCl 溶液培养 | -0.029 | 12 | 50 mmol/L NaCl 溶液培养 | -0.302 | 15 |
| 100 mmol/L NaCl 溶液培养 | -1.000 | 22 | 100 mmol/L NaCl 溶液培养 | -1.262 | 22 |
| 0.05 mmol/L Spm 浸种+25 mmol/L NaCl 溶液培养 | 0.551 | 7 | 0.05 mmol/L Spm 浸种+25 mmol/L NaCl 溶液培养 | 0.785 | 5 |
| 0.05 mmol/L Spm 浸种+50 mmol/L NaCl 溶液培养 | -0.170 | 14 | 0.05 mmol/L Spm 浸种+50 mmol/L NaCl 溶液培养 | -0.173 | 14 |
| 0.05 mmol/L Spm 浸种+100 mmol/L NaCl 溶液培养 | -0.854 | 19 | 0.05 mmol/L Spm 浸种+100 mmol/L NaCl 溶液培养 | -0.885 | 17 |
| 0.10 mmol/L Spm 浸种+25 mmol/L NaCl 溶液培养 | 0.553 | 6 | 0.10 mmol/L Spm 浸种+25 mmol/L NaCl 溶液培养 | 0.723 | 7 |
| 0.10 mmol/L Spm 浸种+50 mmol/L NaCl 溶液培养 | 0.158 | 9 | 0.10 mmol/L Spm 浸种+50 mmol/L NaCl 溶液培养 | 0.101 | 10 |
| 0.10 mmol/L Spm 浸种+100 mmol/L NaCl 溶液培养 | -0.627 | 16 | 0.10 mmol/L Spm 浸种+100 mmol/L NaCl 溶液培养 | -1.019 | 21 |
| 0.20 mmol/L Spm 浸种+25 mmol/L NaCl 溶液培养 | -0.137 | 13 | 0.20 mmol/L Spm 浸种+25 mmol/L NaCl 溶液培养 | 0.839 | 4 |
| 0.20 mmol/L Spm 浸种+50 mmol/L NaCl 溶液培养 | -0.210 | 15 | 0.20 mmol/L Spm 浸种+50 mmol/L NaCl 溶液培养 | -0.014 | 12 |
| 0.20 mmol/L Spm 浸种+100 mmol/L NaCl 溶液培养 | -0.919 | 21 | 0.20 mmol/L Spm 浸种+100 mmol/L NaCl 溶液培养 | -1.003 | 20 |
| 0.05 mmol/L Spd 浸种+25 mmol/L NaCl 溶液培养 | 0.756 | 4 | 0.05 mmol/L Spd 浸种+25 mmol/L NaCl 溶液培养 | 0.961 | 3 |
| 0.05 mmol/L Spd 浸种+50 mmol/L NaCl 溶液培养 | 0.010 | 11 | 0.05 mmol/L Spd 浸种+50 mmol/L NaCl 溶液培养 | 0.045 | 11 |
| 0.05 mmol/L Spd 浸种+100 mmol/L NaCl 溶液培养 | -0.883 | 20 | 0.05 mmol/L Spd 浸种+100 mmol/L NaCl 溶液培养 | -0.937 | 18 |
| 0.10 mmol/L Spd 浸种+25 mmol/L NaCl 溶液培养 | 0.659 | 5 | 0.10 mmol/L Spd 浸种+25 mmol/L NaCl 溶液培养 | 1.098 | 2 |
| 0.10 mmol/L Spd 浸种+50 mmol/L NaCl 溶液培养 | 0.220 | 8 | 0.10 mmol/L Spd 浸种+50 mmol/L NaCl 溶液培养 | 0.107 | 9 |
| 0.10 mmol/L Spd 浸种+100 mmol/L NaCl 溶液培养 | -0.825 | 17 | 0.10 mmol/L Spd 浸种+100 mmol/L NaCl 溶液培养 | -0.879 | 16 |
| 0.20 mmol/L Spd 浸种+25 mmol/L NaCl 溶液培养 | 0.849 | 2 | 0.20 mmol/L Spd 浸种+25 mmol/L NaCl 溶液培养 | 0.724 | 6 |
| 0.20 mmol/L Spd 浸种+50 mmol/L NaCl 溶液培养 | 0.051 | 10 | 0.20 mmol/L Spd 浸种+50 mmol/L NaCl 溶液培养 | -0.075 | 13 |
| 0.20 mmol/L Spd 浸种+100 mmol/L NaCl 溶液培养 | -0.833 | 18 | 0.20 mmol/L Spd 浸种+100 mmol/L NaCl 溶液培养 | -0.953 | 19 |

3 讨论

3.1 Spm 和 Spd 对盐胁迫下小麦生长指标的影响

小麦萌发期和幼苗期对盐胁迫敏感,这两个时期也是开展小麦耐盐性早期鉴定与筛选的关键期^[21]。盐胁迫会显著抑制小麦种子萌发及根、芽的生长,这一结果与陈新红等^[22]、孟祥浩等^[23]的研究结论一致;本研究结果进一步证实,NaCl 胁迫会导

致小麦种子发芽率、根长、芽长等生长指标显著下降,且随着 NaCl 浓度升高指标下降幅度逐渐增大,推测其原因是培养液中 Na⁺、Cl⁻ 过量积累降低了培养液水势,进而对小麦产生渗透胁迫。值得注意的是,采用适宜浓度的外源 Spm 或 Spd 浸种,可在一定程度上缓解 NaCl 胁迫对小麦的抑制作用,提高种子发芽率及根、芽生长量,这与胡晓辉等^[24]、张春平等^[25]、卫丹丹等^[26]、袁颖辉等^[27]和夏关雪莹等^[28]

的研究结果一致,表明适宜浓度的外源 Spm 或 Spd 能有效促进盐胁迫下小麦种子的萌发及幼苗生长。此外,本研究发现,Spd 浸种对耐盐性较弱小麦品种矮抗 58 的缓解效果更突出,这与张碧茹等^[29]的研究结论一致,提示 Spd 对盐敏感小麦品种的调控作用可能优于耐盐品种。

3.2 Spm 和 Spd 对盐胁迫下小麦叶片中叶绿素含量的影响

在 NaCl 胁迫环境中,植物叶绿素含量不仅直接影响其光合作用效率,还可作为反映植株受胁迫损伤程度的重要指标^[30-31]。本研究发现,NaCl 胁迫下小麦品种百农 201 和矮抗 58 叶片中叶绿素含量与对照相比均显著下降,百农 201 叶片中叶绿素含量随 NaCl 浓度的升高而显著下降,这一现象可能源于两个方面原因,一是 Na^+ 与 Cl^- 直接对叶绿体结构造成损伤,二是盐胁迫条件下相关叶绿素酶活性增强,加速了叶绿素的降解进程^[32]。已有研究结果证实,外源多胺可通过调节叶绿体抗氧化系统,有效减轻光合细胞损伤,进而延缓黄瓜等植物幼叶遭受盐胁迫伤害,提升其耐盐能力^[15]。本试验结果进一步显示,采用适宜浓度的 Spm 或 Spd 浸种,能显著缓解 NaCl 胁迫对小麦叶绿素合成的抑制作用,提高叶片中叶绿素含量;且对比来看,NaCl 胁迫下 Spd 浸种对叶绿素含量的提升效果优于 Spm 浸种。这一结果与已有研究结果一致——外源 Spd 可显著提高甜瓜幼苗^[33]、菠菜^[34]、甜高粱^[35]、马铃薯^[36]及番茄^[37]等作物叶片中叶绿素含量。由此可见,外源 Spd 可能通过抑制 NaCl 胁迫对叶绿体结构的破坏,保护植物光合系统的完整性,从而有效缓解叶绿素合成受阻的问题,促进叶绿素的正常合成。

3.3 Spm 和 Spd 对盐胁迫下小麦叶片中 MDA 含量的影响

在逆境生长条件下,植物会大量产生 MDA,其含量与植株受逆境胁迫的严重程度及膜脂过氧化损伤程度呈正相关^[38]。本研究结果显示,与对照相比,NaCl 胁迫显著提高了小麦体内 MDA 含量,这表明 NaCl 胁迫使小麦代谢功能紊乱,打破了活性氧生成与清除的平衡,进而引发膜脂过氧化作用。Spd 与 Spm 具有中和酸、抗氧化及稳定细胞膜的能力,本研究中,NaCl 胁迫下采用 Spd 或 Spm 浸种有效降低了小麦幼苗 MDA 含量。该结果与已有研究结论一致,例如盐胁迫下多胺可降低苜蓿^[28]、紫苏^[25]、

甜高粱^[35]、番茄^[37]和燕麦^[39]幼苗 MDA 含量,以及多胺能缓解镉毒害导致的水稻 MDA 含量升高^[40]。综上,适宜浓度的 Spd 或 Spm 浸种可减少小麦在 NaCl 胁迫逆境中的活性氧积累,抑制幼苗细胞膜质的氧化过程,最终降低 MDA 的产生量。

3.4 Spm 和 Spd 对盐胁迫下小麦叶片中 Pro 含量的影响

Pro 是植物应对胁迫时产生的一种适应性物质,其生理功能主要体现在两个方面:一是作为细胞渗透调节物质,维持细胞质与液泡间的渗透平衡,从而抵御逆境引发的渗透胁迫;二是作为抗氧化物质,清除活性氧以保护细胞膜的稳定性^[41]。因此,Pro 含量可作为评价植物抗逆性的重要生理指标之一^[38]。本研究结果显示,NaCl 胁迫下小麦体内 Pro 含量较对照提升,表明小麦可通过积累 Pro 来增强自身对盐胁迫的抗性。进一步分析不同处理对逆境的响应发现, Spm 和 Spd 浸种对 NaCl 胁迫下百农 201 幼苗叶片中 Pro 含量无显著影响,但能显著促进矮抗 58 幼苗叶片中 Pro 含量的进一步增加。其中,0.10 mmol/L 浓度的 Spm、Spd 浸种处理比 0.05 mmol/L、0.20 mmol/L 效果好。该结果与已有研究结果一致,例如外源 Spd 可显著促进盐胁迫下苜蓿^[28]、甜高粱^[35]、马铃薯^[36]及番茄^[37]幼苗 Pro 含量积累。这表明外源 Spm 与 Spd 可通过维持或提高植物体内 Pro 含量,减轻盐胁迫对细胞膜结构与功能的损伤,进而对植物起到保护作用。

3.5 Spm 和 Spd 对盐胁迫下小麦幼苗叶片中 POD 活性的影响

POD 是生物体内关键的抗氧化酶之一^[42-46]。在抗氧化系统中,超氧化物歧化酶(SOD)可将超氧化物阴离子自由基歧化为 O_2 和 H_2O_2 ,而 POD 的活性强弱直接反映其清除 H_2O_2 的能力,二者协同作用可避免 H_2O_2 积累对细胞造成的毒害。本研究结果显示,不同浓度 NaCl 胁迫下,小麦叶片中 POD 活性较对照显著提高,这表明小麦幼苗对盐胁迫环境具有一定的适应性。结合生长指标在 NaCl 胁迫下受到抑制的表现可进一步推断,小麦幼苗能通过上调自身抗氧化酶活性,清除过量活性氧以缓解损伤,但这种调节作用不足以完全抵消胁迫对生长的抑制。NaCl 胁迫下经 Spm 或 Spd 浸种后,小麦叶片中 POD 活性较单纯 NaCl 胁迫处理进一步提升。这说明 Spm 和 Spd 能有效增强小麦在 NaCl 胁迫下清除

活性氧自由基的能力,减轻细胞氧化损伤,从而提升其对 NaCl 胁迫环境的适应性。该结果与已有研究结论一致,例如外源 Spd 可显著提高紫苏^[25]、黄瓜^[15]、大豆^[47]、甜高粱^[35]、番茄^[16,37]、燕麦^[39]、小麦^[48]、马铃薯^[36]及葡萄^[49]等植物幼苗叶片中 *POD* 活性。这进一步证实, Spm 和 Spd 可通过诱导胁迫条件下植物体内抗氧化酶活性升高,高效清除活性氧、稳定生物膜结构,最终减轻胁迫造成的氧化伤害。

3.6 不同处理小麦各指标间的相关性

相关性分析结果表明,不同处理下百农 201 和矮抗 58 各指标间存在显著或极显著相关性,其中发芽率、根长、芽长与 MDA 含量、Pro 含量呈极显著负相关,发芽率、根长、芽长与 *POD* 活性在矮抗 58 中呈极显著负相关。这与百农 201 和矮抗 58 在不同浓度 NaCl 胁迫下种子发芽率降低、幼苗根和芽生长受到抑制,MDA 含量、Pro 含量较对照升高的结果一致。

4 结论

综上所述,NaCl 胁迫显著抑制小麦幼苗的生长发育,使其发芽率、根长、芽长、叶绿素含量显著下降,MDA 含量和 *POD* 活性显著升高。适宜浓度的 Spm 和 Spd 浸种对 NaCl 胁迫下小麦种子发芽率、根长和芽长及叶绿素含量有一定的促进作用,同时使 MDA 含量下降、渗透调节物质 Pro 含量和 *POD* 活性进一步提高,以稳定细胞内环境,从而缓解 NaCl 胁迫产生的抑制作用。进一步对比发现, Spm 和 Spd 浸种对缓解 NaCl 胁迫下矮抗 58 的效果优于百农 201,且 Spd 的缓解能力强于 Spm,其中 0.10 mmol/L Spd 浸种缓解 NaCl 胁迫对小麦幼苗毒害的效果较好。

参考文献:

- [1] MUSHTAQ A, SABIR N, KOUSAR T, et al. Effect of sodium silicate and salicylic acid on sodium and potassium ratio in wheat (*Triticum aestivum* L.) grown under salt stress[J]. *Silicon*,2022, 14(10):5595-5600.
- [2] 王世平,陈月,潘大伟,等. 盐碱地治理研究综述:现状、问题与对策[J]. *化工矿物与加工*,2023,52(11):59-68.
- [3] 曾洪学,王俊. 盐害生理与植物抗盐性[J]. *生物学通报*,2005,40(9):1-3.
- [4] 王玉玲,欧行奇,朱启迪,等. 小麦种子萌发对盐胁迫的生物学响应[J]. *河南科技学院学报(自然科学版)*,2017,45(4):1-8, 25.
- [5] 孙燕,刘韵,王全九,等. 三种浸种剂对 Na₂SO₄胁迫下小麦种子萌发期耐盐性的影响[J]. *麦类作物学*,2024, 44(1): 101-109.
- [6] TAJTI J, JANDA T, MAJLÁTH I, et al. Comparative study on the effects of putrescine and spermidine pre-treatment on cadmium stress in wheat[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*,2018, 148:546-554.
- [7] CHEN D D, SHAO Q S, YIN L H, et al. Polyamine function in plants:metabolism,regulation on development,and roles in abiotic stress responses[J]. *Frontiers in Plant Science*,2019,9:1945.
- [8] HUSSAIN S S, ALI M, AHMAD M, et al. Polyamines:natural and engineered abiotic and biotic stress tolerance in plants[J]. *Biotechnology Advances*,2011,29(3):300-311.
- [9] TIBURCIO A F, ALTABELLA T, BITRIÁN M, et al. The roles of polyamines during the lifespan of plants:from development to stress[J]. *Planta*,2014,240(1):1-18.
- [10] RAGHAVENDRA M, RAO D S, KUMAR N, et al. Exogenous spermine mitigate adversities of salinity induced oxidative stress through antioxidant metabolites in wheat[J]. *International Journal of Plant & Soil Science*,2021,33(19):77-93.
- [11] NDAYIRAGIJE A, LUTTS S. Long term exogenous putrescine application improves grain yield of a salt-sensitive rice cultivar exposed to NaCl[J]. *Plant and Soil*,2007,291(1):225-238.
- [12] LI L J, GU W R, LI J, et al. Exogenously applied spermidine alleviates photosynthetic inhibition under drought stress in maize (*Zea mays* L.) seedlings associated with changes in endogenous polyamines and phytohormones[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*,2018,129:35-55.
- [13] 海霞,米俊珍,赵宝平,等. 外源亚精胺对盐胁迫下燕麦幼苗生长及生理特性的影响[J]. *西北植物学报*,2021,41(6): 1003-1011.
- [14] 武悦,单飞彪,李军,等. 外源亚精胺对外源亚精胺对向日葵幼苗盐碱胁迫的缓解效应[J]. *中国油料作物学报*,2023,45(3):567-573.
- [15] SHU S, YUAN L Y, GUO S R, et al. Effects of exogenous spermine on chlorophyll fluorescence,antioxidant system and ultrastructure of chloroplasts in *Cucumis sativus* L. under salt stress[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*,2013,63:209-216.
- [16] KORBAS A, KUBIS J, RYBUS-ZAJAC M, et al. Spermidine modify antioxidant activity in cucumber exposed to salinity stress[J]. *Agronomy*,2022,12(7):1554.
- [17] 潘媛媛,张毅,石玉,等. 外源亚精胺对等渗盐胁迫下番茄幼苗抗氧化系统的影响[J]. *西北农林科技大学学报*,2019,47(3):57-66.
- [18] 姜惠丽,段九菊,郭世荣,等. 不同种类外源多胺缓解黄瓜植株盐胁迫伤害的效应[J]. *中国蔬菜*,2007(3):3-8.
- [19] 王素平,贾永霞,郭世荣,等. 多胺对盐胁迫下黄瓜 (*Cucumis sativus* L.) 幼苗体内 K⁺、Na⁺ 和 Cl⁻ 含量及器官间分布的影响

- [J]. 生态学报,2007,27(3):1122-1129.
- [20] 张志良,瞿伟菁. 植物生理学实验指导[M]. 3版.北京:高等教育出版社,2003.
- [21] 陈家婷,白欣,谷雨杰,等. 小麦芽期和苗期耐盐鉴定方法的适用性评价[J]. 作物学报,2024,50(5):1193-1206.
- [22] 陈新红,叶玉秀,周青,等. 盐胁迫对小麦幼苗形态和生理特性的影响[J]. 安徽农业科学,2008,36(33):14408-14410.
- [23] 孟祥浩,刘义国,张玉梅,等. 不同小麦品种苗期抗氧化特性及根系活力对盐胁迫的响应[J]. 麦类作物学报,2015,35(8):1169.
- [24] 胡晓辉,邹志荣,杨振超,等. Spd 诱导 NaCl 胁迫下番茄种子萌发和幼苗耐盐性效应研究[J]. 北方园艺,2009(10):5-8.
- [25] 张春平,何平,喻泽莉,等. 亚精胺对盐胁迫下紫苏种子萌发和幼苗生理特性的影响[J]. 中草药,2011,42(7):1407-1412.
- [26] 卫丹丹,王丙全,赵丽娟,等. 亚精胺对盐胁迫下藜麦种子萌发和呼吸速率的影响[J]. 种子,2022,41(12):7-13.
- [27] 袁颖辉,束胜,袁凌云,等. 外源精胺对盐胁迫下黄瓜幼苗生长和光合作用的影响[J]. 江苏农业学报,2012,28(4):835-840.
- [28] 夏关雪莹,王冰,屈琳俐,等. 亚精胺浸种缓解盐碱胁迫对苜蓿生长抑制的研究[J]. 中国草地学报,2019,41(5):17-23.
- [29] 张碧茹,米俊珍,赵宝平,等. 亚精胺浸种对燕麦种子萌发期的耐盐性影响研究[J]. 种子,2022,41(6):107-111.
- [30] TAO R R, DING J F, LI C Y, et al. Evaluating and screening of agro-physiological indices for salinity stress tolerance in wheat at the seedling stage[J]. *Frontiers in Plant Science*,2021,12:646175.
- [31] 刘丽苹,汪军成,司二静,等. 外源甜菜碱和脯氨酸对盐胁迫下大麦种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 麦类作物学报,2023,43(6):766-774.
- [32] 司廉邦,李嘉敏,黎桂英,等. 茶多酚对盐胁迫下小麦幼苗叶片生理特性的影响[J]. 生态学报,2020,40(11):3747-3755.
- [33] 薛淑媛,朱世东,李雪,等. 外源亚精胺对盐胁迫下甜瓜幼苗光合和超微结构的影响[J]. 江苏农业学报,2013,29(3):613-618.
- [34] 王颖,郭世荣,束胜,等. 外源亚精胺对盐胁迫下菠菜叶绿素合成前体含量的影响[J]. 西北植物学报,2015,35(10):2026-2034.
- [35] 邹芳,王志恒,杨秀柳,等. 外源亚精胺对盐胁迫下甜高粱 (*Sorghum bicolor*) 幼苗的影响[J]. 分子植物育种,2020,18(8):2721-2727.
- [36] 刘易,江应红,王亚玲,等. 外源亚精胺对盐胁迫下马铃薯幼苗生长和生理生化特征的影响[J]. 西北植物学报,2023,43(12):2079-2087.
- [37] RAZIQ A, MOHI UD DIN A, ANWAR S, et al. Exogenous spermidine modulates polyamine metabolism and improves stress responsive mechanisms to protect tomato seedlings against salt stress[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*,2022,187:1-10.
- [38] 王苗苗,赵桂琴,梁国玲,等. 不同耐盐性燕麦对盐胁迫的生理响应[J]. 草业科学,2021,38(11):2200-2209.
- [39] HAI X, MI J Z, ZHAO B P, et al. Foliar application of spermidine reduced the negative effects of salt stress on oat seedlings[J]. *Frontiers in Plant Science*,2022,13:846280.
- [40] HSU Y T, KAO C H. Cadmium-induced oxidative damage in rice leaves is reduced by polyamines[J]. *Plant and Soil*,2007,291(1):27-37.
- [41] 王蕊,李新国,李绍鹏,等. 干旱胁迫下2种香蕉幼苗叶片和根的主要渗透调节物质的变化[J]. 基因组学与应用生物学,2010,29(3):518-522.
- [42] 闫艳华,曾慧琳,杨阳. 油菜素内酯浸种对盐胁迫下曼陀罗种子萌发的影响及其生理机制[J]. 江苏农业学报,2025,41(2):355-361.
- [43] 曹文月,王宁,秦家乐,等. 外源褪黑素对淹水胁迫下文冠果幼苗生长及生理特性的影响[J]. 江苏农业科学,2025,53(1):209-217.
- [44] 任佳辉,高捍东,陈哲楠,等. 杂交新美柳苗对盐渍胁迫的生长和生理响应[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2025,49(2):57-66.
- [45] 侯君佑,单雅敬,孙彩勇,等. 孕穗期渍水对小麦花后根系形态、抗氧化酶活性及籽粒产量的影响[J]. 江苏农业学报,2024,40(3):385-393.
- [46] 杜晋城,李欣欣,王泽亮,等. 聚乙二醇胁迫下3个油橄榄品种生理指标响应[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2024,48(2):137-143.
- [47] 杜红阳,胡春红,刘怀攀. 外源亚精胺对盐胁迫下大豆幼苗叶片光合性能和抗氧化代谢的调控效应[J]. 大豆科学,2016,35(1):80-85.
- [48] RAGHAVENDRA M, RAO D S, KUMAR N, et al. Exogenous spermine mediated responses of catalase and peroxidase under salt stress in wheat (*Triticum aestivum* em Thell.) [J]. *Asian Journal of Microbiology, Biotechnology and Environmental Sciences*,2022,24(2):283-289.
- [49] XU J H, SUI C C, GE J R, et al. Exogenous spermidine improved the salinity-alkalinity stress tolerance of grapevine (*Vitis vinifera*) by regulating antioxidant system, Na⁺/K⁺ homeostasis and endogenous polyamine contents [J]. *Scientia Horticulturae*,2024,326:112725.

(责任编辑:黄克玲)