

鲁克嵩, 闫磊, 侯佳玉, 等. 盐胁迫下外源脯氨酸对油菜 Na^+/K^+ 平衡、生长及抗氧化系统的影响[J]. 华中农业大学学报, 2023, 42(5): 141-148.
DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2023.05.016

盐胁迫下外源脯氨酸对油菜 Na^+/K^+ 平衡、 生长及抗氧化系统的影响

鲁克嵩¹, 闫磊¹, 侯佳玉¹, 张亚黎², 姜存仓^{1,2}

1. 华中农业大学资源与环境学院/微量元素研究中心, 武汉 430070;

2. 石河子大学农学院/新疆生产建设兵团绿洲生态农业重点实验室, 石河子 832003

摘要 为探究盐胁迫下外源脯氨酸对油菜生长发育的调控机制, 以甘蓝型油菜为试验材料, 在150 mmol/L盐胁迫下设置5个外源脯氨酸水平(0、0.25、0.5、1和2 mmol/L), 探究外源脯氨酸对盐胁迫下抗氧化系统、渗透物质和离子含量的影响。结果显示: 盐胁迫显著抑制油菜的生长, 较低浓度(0.25 mmol/L和0.5 mmol/L)外源脯氨酸均可促进油菜的生长, 相比0.25 mmol/L外源脯氨酸, 施用0.5 mmol/L对油菜长势具有较好的促进作用, 能够减少叶片 Na^+ 积累, 提高 K^+ 含量, 提高抗氧化酶的活性, 并降低活性氧含量。另外, 0.5 mmol/L外源脯氨酸还可以促进油菜叶片脯氨酸等渗透物质的积累。而施用较高浓度(1 mmol/L和2 mmol/L)外源脯氨酸不仅没有缓解盐胁迫, 还对油菜叶片造成进一步的伤害。综上, 盐胁迫会对油菜生长造成损伤, 而施用量外源脯氨酸能够激发抗氧化系统, 有效缓解盐胁迫对油菜生长的抑制, 提高油菜的耐盐性。

关键词 盐胁迫; 脯氨酸; 油菜; Na^+/K^+ 平衡; 抗氧化酶; 耐盐性

中图分类号 S565.4; S156.4 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2023)05-0141-08

土壤盐度被认为是限制粮食产量的主要因素之一, 全球约20%的可耕地面积受到盐胁迫的影响, 且这一比例还在快速上升^[1]。我国新疆等西北地区受降雨稀少与农业灌溉用水的影响, 耕地区域出现不同程度的次生盐碱化, 严重制约该地区农业生产^[2]。盐胁迫会诱导离子毒性, 引发渗透胁迫和氧化应激, 从而影响作物的生长发育, 降低农作物产量^[3]。因此, 提高作物的耐盐性对粮食稳产和增产有重要意义。

植物在面对逆境胁迫时主要的应对方式之一是通过调节渗透物质缓解细胞损伤。脯氨酸(proline, Pro)作为植物体内最有效的渗透调节物质之一, 能够在植物遭受非生物胁迫时积累在植物体内, 发挥渗透保护和稳定蛋白结构的作用^[4], 同时Pro还可以通过提高抗氧化酶的活性, 减少植物的氧化损伤, 抵御逆境。有研究指出, 外源喷施Pro能有效激活玉米体内抗氧化系统, 缓解其在盐胁迫下的氧化损伤^[5]。Pro可以直接作为抗氧化剂清除ROS或通过激活抗

氧化剂反应间接调节氧化还原平衡。然而, 当外源施用Pro浓度超过植物耐受性的阈值时, 不仅无法起到缓解作用, 还会对植物造成进一步的胁迫损伤^[6]。研究发现, 喷施15 mg/L外源Pro可以促进盐胁迫下番茄幼苗光合作用, 而当喷施质量浓度达到50 mg/L时, 番茄的叶绿素含量降低, 对缓解盐胁迫作用不明显^[7]。因此, 只有施用适当Pro浓度才能缓解植物遭受的细胞损伤, 提高植物抗逆性。

油菜(*Brassica napus* L.)是我国播种面积最大的油料作物, 具有良好的经济效益, 同时种植油菜还能改良盐碱地土壤^[8]。在我国的西北地区, 油菜种植区盐碱土分布范围广、面积大, 而盐胁迫常造成油菜产量降低、品质下降。因此, 提高油菜抗盐害的能力已成为十分迫切和重要的任务。目前有关外源Pro对盐胁迫下油菜的研究报道较少, 仅研究了外源Pro对油菜耐寒性的影响^[9], 而对盐碱地区油菜生长的影响缺少研究。基于上述原因, 本研究通过探究盐胁迫下外源Pro对油菜幼苗生长、抗氧化系统、离子稳态

收稿日期: 2022-11-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(42167042); 绿洲生态农业兵团重点实验室开放课题(202103)

鲁克嵩, E-mail: lks2021@webmail.hzau.edu.cn

通信作者: 姜存仓, E-mail: jcc2000@mail.hzau.edu.cn

和渗透物质的影响,进而揭示外源Pro促进油菜抗盐害的作用机制,旨在为后续研究外源Pro提高油菜在新疆等盐碱地区的产量提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料与 设计

试验在华中农业大学试验基地进行,材料为“华双4号”甘蓝型油菜,由农业农村部油菜遗传育种重点实验室提供。

挑选饱满一致的种子用去离子水浸泡4 h,置于铺有1层滤纸的培养皿中,加少量超纯水润湿,用锡箔纸包住培养皿,放入4℃冰箱中春化4 h,转入30℃恒温培养箱中黑暗培养24 h。将发芽的种子转移至纱布中培养,待初生根生长至4~5 cm,转移至4 L黑色塑料盆中培养。营养液配方采用Hoagland和Arnon^[10]并略作修改:5 mmol/L KNO₃, 2 mmol/L MgSO₄·7H₂O, 5 mmol/L Ca(NO₃)₂·4H₂O, 1 mmol/L KH₂PO₄, 8.9 μmol/L MnCl₂·4H₂O, 0.28 μmol/L CuSO₄·5H₂O, 0.8 μmol/L ZnSO₄·7H₂O, 0.1 μmol/L Na₂MoO₄·2H₂O, 25 μmol/L H₃BO₃, 25 μmol/L Fe-EDTA。

试验共设置6个处理:CK,正常营养液;S, 150 mmol/L NaCl; S+0.25, 150 mmol/L NaCl+0.25 mmol/L Pro; S+0.5, 150 mmol/L NaCl+0.5 mmol/L Pro; S+1, 150 mmol/L NaCl+1 mmol/L Pro; S+2, 150 mmol/L NaCl+2 mmol/L Pro。每个处理设置3个重复,每个重复4株幼苗。先用1/4营养液培养3 d,再用1/2营养液培养3 d,之后用全量营养液培养,并进行处理,每隔3 d换1次营养液,处理16 d植株出现明显差异后收获。

1.2 测定指标及 方法

1)植株生长指标测定。收获时,各处理随机选取3株植株,用超纯水清洗干净,用直尺分别测量植株株高和根长,将植株分为地上部和地下部两部分,分别称鲜质量,将植株放至信封袋中于105℃杀青30 min,继续在70℃下烘干至恒质量,称干质量。

2)Na⁺和K⁺含量测定。采用干灰化法提取,称取0.2 g叶片干燥样品进行研磨,电炉预先炭化后移入马弗炉500℃灰化4 h,冷却后用10 mL 0.1 mmol/L HCl浸提,溶解过滤后用火焰光度计测定Na⁺和K⁺含量。

3)脯氨酸含量测定。称取不同处理植物叶片鲜样0.5 g,用5 mL 3%磺基水杨酸进行研磨提取,沸水

浴提取10 min,冷却后吸取2 mL滤液到10 mL离心管中,加入2 mL冰醋酸和2 mL酸性茚三酮试剂,沸水浴中加热30 min,冷却后加入4 mL甲苯,显色分层后于520 nm下比色。

4)抗氧化酶活性测定。称取0.5 g叶片鲜样于预冷研钵中,用5 mL pH7.8的0.05 mmol/L磷酸缓冲液和少量石英砂进行研磨提取,离心后上清液为提取液。SOD活性采用氮蓝四唑法测定;POD活性采用愈创木酚法测定;CAT活性和APX活性采用紫外吸收法测定。

5)MDA含量和H₂O₂含量测定。称取0.5 g叶片鲜样用5 mL 5%三氯乙酸(TCA)研磨。采用硫代巴比妥酸法测定MDA含量;采用Kamali-Andani等^[11]方法测定H₂O₂含量,取0.5 mL提取液,加入0.5 mL磷酸钾缓冲液和1 mL碘化钾溶液,于390 nm波长下测定吸光度。

6)AsA和GSH含量测定。称取0.5 g叶片鲜样,用5 mL 5% TCA研磨,离心后上清液为提取液。吸取1 mL滤液于试管中,加入1 mL TCA和1 mL无水乙醇,摇匀后加入0.5 mL磷酸-乙醇溶液、1 mL红菲罗啉-乙醇溶液和0.5 mL FeCl₃-乙醇溶液后于534 nm下比色测定AsA含量。吸取2 mL滤液于试管中,加入4 mL磷酸钾缓冲液和0.4 mL二硝基苯甲酸试剂,显色5 min后于412 nm波长下比色测定GSH含量。

7)可溶性蛋白与可溶性糖含量测定。可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝G-250测定;可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定。

1.3 数据分析

采用Excel整理数据,使用统计分析软件SPSS 26.0对数据进行方差分析(ANOVA)。采用Duncan's多重比较法进行差异显著性检验(α=0.05)。用Origin 2022作图。

2 结果与分析

2.1 盐胁迫下外源脯氨酸对油菜生长的影响

由图1可见,与CK相比,盐胁迫抑制油菜生长,植株出现矮化现象,叶片枯萎。不同浓度的外源Pro对缓解盐胁迫损伤有明显差异。由表1可知,较低浓度(0.25 mmol/L和0.5 mmol/L)外源Pro对油菜损伤有缓解作用,其中0.5 mmol/L浓度下外源Pro效果最好,能够显著增加油菜株高和根长,其中株高提高12.9%,根长增长9.60%。而较高浓度(1 mmol/L

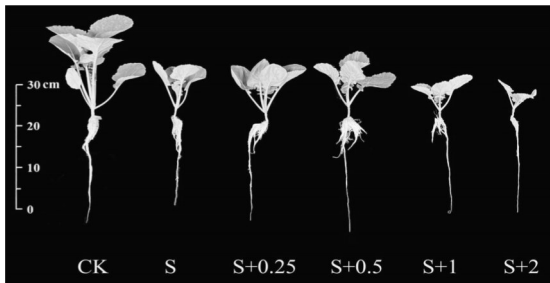


图1 不同浓度脯氨酸对盐胁迫下植株长势的影响
Fig. 1 The growth of plants by different treatments

和 2 mmol/L) 外源 Pro 对油菜造成进一步损伤, 加剧叶片枯萎黄化, 与 S 处理相比, 施用

1 mmol/L 和 2 mmol/L 外源 Pro 下油菜株高分别减少 19.34% 和 27.68%, 根长分别减少 22.93% 和 24.00%。这表明外源 Pro 对提高油菜耐盐性有一定的阈值。盐胁迫下随着外源 Pro 浓度的升高, 油菜生物量呈现先升高后下降的趋势, 在 0.5 mmol/L 浓度外源 Pro 时达到最大值, 地上部干质量与鲜质量和根干质量与鲜质量分别提高 20.69%、5.34% 和 120%、130.85%, 总鲜质量与总干质量分别提高 20.33% 和 28.57%。较高浓度外源 Pro 会减少油菜的生物量, 显著降低地上部质量(表 1)。

表 1 不同处理下植株的生物量

Table 1 Plant biomass of plants by different treatments

处理 Treatment	株高/cm Plant height	根长/cm Root length	地上部 Shoot		地下部 Root		总鲜质量/g Total fresh mass	总干质量/g Total dry mass
			鲜质量/g Fresh mass	干质量/g Dry mass	鲜质量/g Fresh mass	干质量/g Dry mass		
CK	24.95a	23.65a	15.35a	1.77a	4.46a	0.31a	19.81a	2.08a
S	13.55c	21.67a	6.93b	0.58bc	0.94cd	0.05c	7.87b	0.63b
S+0.25	13.90bc	23.10a	7.31b	0.66bc	1.34c	0.09b	8.65b	0.75b
S+0.5	15.30b	23.75a	7.30b	0.70b	2.17b	0.11b	9.47b	0.81b
S+1	10.93d	16.70b	3.39c	0.31cd	0.58d	0.03c	3.97c	0.34c
S+2	9.80d	16.47b	2.20c	0.20d	0.55d	0.02c	2.75c	0.22c

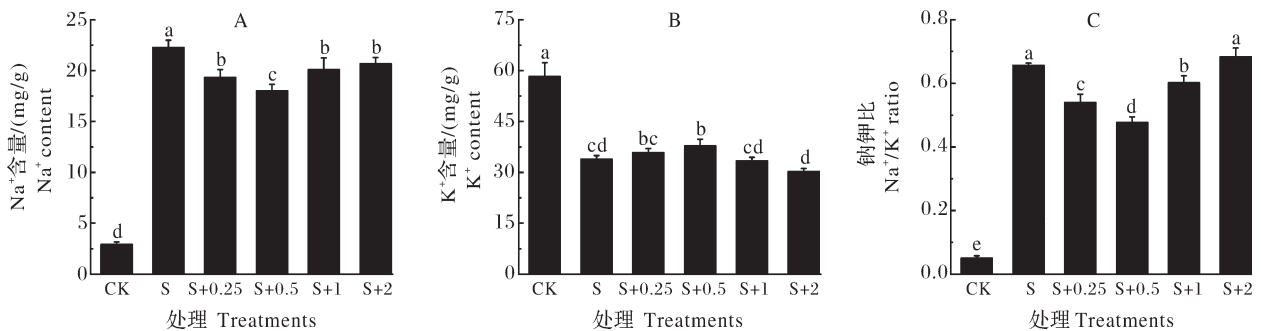
注: 数据为平均值(n=3), 不同小写字母表示同一指标不同处理之间差异显著(P<0.05)。下同。Note: The data were mean(n=3). Different lowercase letters indicated that there were significant difference among different treatments (P<0.05). The same as below.

2.2 盐胁迫下外源脯氨酸对油菜 Na⁺含量、K⁺含量及 Na⁺/K⁺比值的影响

由图 2A、2B 可知, 与 CK 相比, 盐胁迫显著提高油菜叶片 Na⁺ 含量, 而降低 K⁺ 含量。外源施用 Pro 可以不同程度减少 Na⁺ 含量, 其中以 0.5 mmol/L Pro 效果最显著, 相较 S 处理下降 19.17%。低浓度 Pro 可以提高油菜体内 K⁺ 含量, 其中 0.25 mmol/L 和 0.5 mmol/L 分别提高 5.57% 和 11.44%, 而较高浓度 Pro 反而进一步降低油菜体内 K⁺ 含量, 在 2 mmol/L 时

下降到最低点, 下降 10.79%。

对油菜 Na⁺/K⁺ 比值的影响如图 2C 所示, 结果显示, 盐胁迫下油菜体内 Na⁺/K⁺ 比值升高, 随着外源 Pro 浓度的增加, 比值呈现先下降后升高的趋势, 0.5 mmol/L 外源 Pro 可以显著降低这一比值, 相比 S 处理下降 27.36%, 而在 2 mmol/L 外源 Pro 时 Na⁺/K⁺ 比值达到峰值, 升高 4.11%。结果表明, 施用 0.5 mmol/L 外源 Pro 能够有效降低 Na⁺/K⁺ 比值, 减轻油菜受到盐胁迫引发的离子胁迫。



不同小写字母表示不同处理之间差异显著(P<0.05)。下同。Different lowercase letters indicated that there were significant difference among different treatments(P<0.05). The same as below.

图2 不同处理下植株的Na⁺含量(A)、K⁺含量(B)及Na⁺/K⁺比值(C)

Fig. 2 Na⁺(A), K⁺ contents(B) and Na⁺/K⁺ ratio(C) of plants by different treatments

2.3 盐胁迫下外源脯氨酸对油菜脯氨酸含量的影响

脯氨酸是植株体内重要的渗透调节物质。由图3可知,在盐胁迫下,随着外源Pro浓度逐渐升高,油菜体内脯氨酸含量不断增加,Pro浓度达到0.5 mmol/L时其体内脯氨酸含量显著增加,相较于S处理提高36.61%。2 mmol/L外源Pro油菜体内脯氨酸

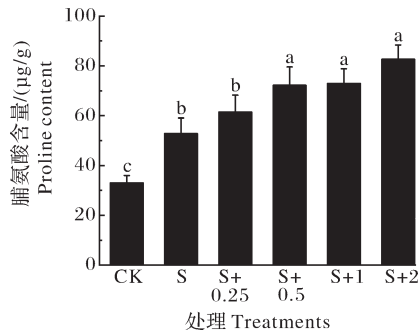


图3 不同处理下植株的脯氨酸含量

Fig. 3 Proline content of plants by different treatments

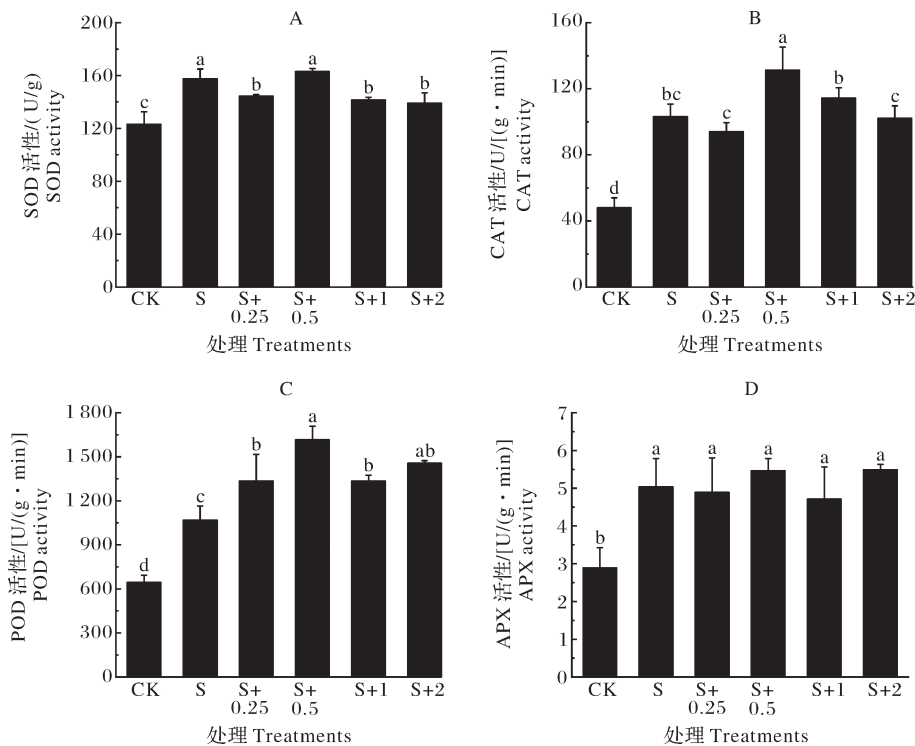


图4 不同处理下植株SOD(A)、CAT(B)、POD(C)和APX(D)的活性

Fig. 4 SOD(A), CAT(B), POD(C) and APX(D) activities of plants by different treatments

2.5 盐胁迫下外源脯氨酸对植株MDA、H₂O₂、AsA和GSH含量的影响

由表2可见,与CK相比,盐胁迫显著增加油菜叶片MDA和H₂O₂含量,施用不同浓度Pro能够不同程度缓解油菜过氧化损伤,0.5 mmol/L外源Pro处理下MDA和H₂O₂含量分别降低17.89%和19.75%。但

含量最高,但与0.5 mmol/L和1 mmol/L外源Pro无显著差异。

2.4 盐胁迫下外源脯氨酸对油菜抗氧化酶活性的影响

如图4所示,盐胁迫会显著提高油菜叶片内SOD、CAT、POD与APX活性,与CK相比,S处理分别提升27.97%、114.81%、65.58%和74.08%。图4A表明,与S处理相比,外源Pro对SOD活性无显著影响,0.25 mmol/L与较高浓度外源Pro会降低其活性。0.5 mmol/L外源Pro能够显著提高油菜叶片CAT活性(图4B),较S处理提高27.37%,其他浓度外源Pro对CAT活性影响不显著。不同浓度外源Pro对POD均有显著提升作用,其中以0.5 mmol/L外源Pro有最佳效果,相较于S处理提升51.2%(图4C)。但外源Pro对APX活性无显著影响(图4D)。

随着施用外源Pro浓度的升高,油菜体内MDA和H₂O₂含量逐渐升高,表明较低浓度外源Pro能有效降低MDA和H₂O₂含量。不同浓度外源Pro对AsA含量和GSH含量的影响趋势相似。油菜在盐胁迫下体内AsA含量增加,施用较低浓度Pro能够显著降低AsA含量,与S处理相比,0.25 mmol/L和0.5

mmol/L 外源 Pro 处理下 AsA 含量分别降低 9.25% 和 10.86%。而 2 mmol/L 外源 Pro 导致油菜体内 AsA 含量升高 14.21%。随着施用外源 Pro 浓度的升高, GSH 含量呈现先下降后升高的趋势, 其中 0.5 mmol/L 外源 Pro 能够降低油菜体内 GSH 含量, 且达

到显著性差异, 相比于 S 处理下降 31.69%。而施用高浓度外源 Pro 会进一步提高油菜 GSH 含量, 外源施用 2 mmol/L Pro 相比 S 处理升高 26.62%。结果表明, 施用适当浓度外源 Pro 能够降低 GSH 含量, 缓解盐胁迫带来的损伤。

表2 不同处理下植株MDA、 H_2O_2 、AsA和GSH的含量

Table 2 MDA, H_2O_2 , AsA and GSH contents of plants by different treatments

处理 Treatment	丙二醛含量/(nmol/g) MDA content	过氧化氢含量/($\mu\text{mol/g}$) H_2O_2 content	抗坏血酸含量/($\mu\text{g/g}$) AsA content	还原型谷胱甘肽含量/($\mu\text{g/g}$) GSH content
CK	0.72d	1.84d	27.28d	342.88e
S	1.22a	2.57a	36.55b	642.89b
S+0.25	1.02c	2.16bc	33.17bc	465.11cd
S+0.5	1.00c	2.06c	32.58c	439.18d
S+1	1.07bc	2.13bc	33.76bc	527.33c
S+2	1.13b	2.22b	41.81a	814.00a

2.6 盐胁迫下外源脯氨酸对油菜可溶性蛋白含量和可溶性糖含量的影响

可溶性蛋白是植物在盐胁迫反应中积累的主要代谢物之一。如图 5A 所示, 与 CK 相比, 盐胁迫会降低油菜叶片可溶性蛋白含量, 仅 0.5 mmol/L 外源 Pro 可以提高可溶性蛋白含量, 较 S 处理提高 1.04%, 但差异不显著, 较高浓度外源 Pro 会抑制油菜体内可溶性蛋白的产生, 其中 1 mmol/L 的 Pro 相较于 S 处理降低 2.62%。

可溶性糖是一种重要的渗透调节剂, 可为植物的生长和发育提供能量。由图 5B 可知, 相比于 CK, 油菜在盐胁迫下体内的可溶性糖含量升高, 与 S 处理相比, 0.5 mmol/L 外源 Pro 可以提高其可溶性糖含量, 但与 S 处理之间差异不显著, 0.25、1 和 2 mmol/L 外源 Pro 会降低可溶性糖含量, 分别下降 7.50%、26.09% 和 32.62%。表明施用较低浓度外源 Pro 能够提高油菜可溶性糖含量, 增强油菜的抗逆性。

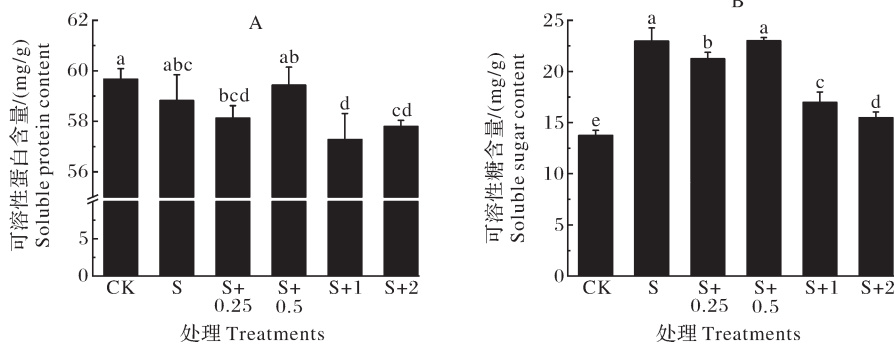


图5 不同处理下植株可溶性蛋白(A)和可溶性糖(B)含量的对比

Fig. 5 Soluble protein(A) and soluble sugar(B) contents of plants by different treatments

3 讨论

3.1 外源脯氨酸对盐胁迫下油菜生长的影响

盐胁迫会抑制植物的正常生长发育, 引起作物产量降低、品质下降等^[12]。Pro作为一种渗透调节剂和细胞结构稳定剂, 能够有效维持植株渗透稳态, 对盐胁迫等逆境条件下植物生长起到保护作用^[4]。本研究表明, 盐胁迫限制油菜幼苗的生长, 减少其生物

量, 施用 0.5 mmol/L 外源 Pro 可以缓解油菜在盐胁迫下的损伤, 促进生物量的积累(图 1, 表 1), 这是由于外源 Pro 能够调节植物的渗透稳态, 降低体内 Na^+ 含量, 促进植株水分含量的恢复, 从而维持细胞内部渗透压稳定^[13]。有研究表明, 喷施 10 mmol/L 外源 Pro 显著增加了青杨雄株株高与根茎的生物量, 在一定程度上提高了青杨雄株幼苗的耐盐性^[14]。同时, 施用 Pro 能够促进植株在盐胁迫下相对水分含量的

增加,进而促进植株地上部生长,缓解盐胁迫对植株造成的损伤^[15]。本研究还发现,较高浓度 Pro 不仅无法缓解盐胁迫对植物的损伤,还会对植物造成进一步的损伤,这是因为油菜体内 Pro 积累有一定的阈值,施加适当浓度外源 Pro 才能够有效促进盐胁迫下油菜的生长。

3.2 外源脯氨酸对盐胁迫下油菜抗氧化系统的影响

ROS 主要包括 H₂O₂ 和超氧化阴离子,能够平衡植物氧化还原过程,在胁迫环境下,植物会产生过多的 ROS,引起细胞膜氧化损伤^[16]。本研究发现,盐胁迫下油菜叶片 H₂O₂ 含量增加,0.5 mmol/L 外源 Pro 有较好的缓解作用(表 2),这可能是由于 Pro 本身作为一种抗氧化剂,添加适当的浓度能够直接清除过多的 ROS 或间接激活油菜体内抗氧化剂,从而调节氧化还原反应^[4]。研究还发现,盐胁迫下抗氧化酶活性升高,这是植物自身的氧化应激反应,施加 0.5 mmol/L 外源 Pro 可以显著增加抗氧化酶的活性。Pro 可以和酶相互作用从而保护蛋白的结构和功能,增加抗氧化酶的活力^[5]。外源施用 Pro 还能有效降低油菜在盐胁迫下积累的 MDA,对缓解 ROS 诱导的氧化应激起到促进作用(表 2)。相关研究表明,外源 Pro 的添加能够提高盐胁迫下植株抗氧化酶的活性,可能是体内 MDA 浓度降低的原因^[17]。植物不仅可以通过抗氧化酶系统清除多余的 ROS,还可以经过非酶系统维持细胞氧化还原的稳定,AsA 和 GSH 作为非酶抗氧化剂,通过参与 AsA-GSH 循环直接或间接清除 ROS。本研究发现,盐胁迫导致 AsA 和 GSH 含量上升,而外源施用较低浓度 Pro 可以减少其含量(表 2),这可能是因为在盐胁迫下,外源 Pro 的添加激活了油菜抗氧化系统中 APX 活性,从而降低了 AsA 含量,减轻了盐胁迫造成的氧化损伤,而 AsA-GSH 循环中需要消耗足够量 GSH 参与氧化还原反应,增加抗氧化酶活性,抵抗盐胁迫^[18]。

3.3 外源脯氨酸对盐胁迫下油菜渗透物质含量的影响

植物在不利环境下会积累渗透物质进行自我保护。盐胁迫下施用 0.5 mmol/L 外源 Pro 可以提高脯氨酸与可溶性蛋白含量(图 3、图 5)。王玮等^[19]研究指出,添加 0.3 mmol/L 外源 Pro 能够显著提升盐胁迫下萝卜体内脯氨酸与可溶性蛋白的含量,增强植株对盐胁迫的抗性,这与本研究结果相一致。然而,

较高浓度(1 和 2 mmol/L)外源 Pro 会明显降低油菜的可溶性糖含量,这是由于 Pro 影响光合作用,必须维持植物生长过程的代谢和光合产物在适当水平^[15]。施用适当浓度 Pro 能够有效提高渗透物质的含量,Pro 可以作为氮素和碳架,在盐胁迫下为植物提供能源,调节细胞内渗透调节物质的合成,从而减轻盐胁迫造成的细胞损伤与代谢失衡^[20]。

盐胁迫下过量的 Na⁺ 会进入细胞内,导致细胞 K⁺ 流失,引起渗透压失衡。在本试验中,较低浓度的外源 Pro 降低叶片 Na⁺ 含量,增加 K⁺ 含量(图 2A,图 2B),这是由于加入适宜浓度 Pro 可能促进了油菜根部对 K⁺ 的选择性吸收,维持根部 K⁺ 稳态,抑制 Na⁺ 吸收或向地上部运输,从而促进根部水分和矿质元素向叶片运输^[3]。有研究者指出,0.2 mmol/L 外源 Pro 可提高盐胁迫下甜瓜幼苗的 K⁺ 含量,降低 Na⁺ 含量,外源 Pro 的加入可使 Na⁺ 在根部聚集,减少 Na⁺ 从根部向叶片中的运输,降低对植株叶片的伤害^[21]。盐胁迫下植物维持 Na⁺/K⁺ 比值的能力与其耐盐性密切相关,比值越低,其耐盐性越强。本研究中在施用低浓度 Pro 时 Na⁺/K⁺ 比值显著降低,而添加 2 mmol/L 外源 Pro 后其比值继续升高(图 2C),说明施用适宜浓度 Pro 能够有效降低 Na⁺/K⁺ 比值,提高油菜的耐盐性。

综上,盐胁迫会抑制油菜生长,施用 0.5 mmol/L 外源 Pro 能够增加油菜生物量,减少 Na⁺ 含量,维持 K⁺ 含量,降低 Na⁺/K⁺ 比值,提高抗氧化酶活性,清除 ROS,促进脯氨酸、可溶性蛋白和可溶性糖的积累,从而提高油菜的耐盐性。而较高浓度外源 Pro 不仅无法起到缓解盐害的作用,还会对油菜造成进一步伤害。

参考文献 References

- [1] LIU Y L, CAO X S, YUE L, et al. Foliar-applied cerium oxide nanomaterials improve maize yield under salinity stress: reactive oxygen species homeostasis and rhizobacteria regulation [J/OL]. *Environmental pollution*, 2022, 299: 118900 [2022-11-09]. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2022.118900>.
- [2] 张鹏辉, 侯宪东, 王健. 新疆地区盐碱地成因及治理措施[J]. *现代农业科技*, 2017(24): 178-180. ZHANG P H, HOU X D, WANG J. Causes and amelioration measures of saline-alkali land in Xinjiang region [J]. *Modern agricultural science and technology*, 2017(24): 178-180 (in Chinese with English abstract).

- [3] 赵记伍,成云峰,刘永权,等.盐胁迫对海稻86生长及矿物质元素吸收、运输和分配的影响[J].华中农业大学学报,2020,39(4):7-14.ZHAO J W, CHENG Y F, LIU Y Q, et al. Effects of salt stress on growth of Ocenarice 86 and absorption, transportation and distribution of mineral elements [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2020, 39(4): 7-14 (in Chinese with English abstract).
- [4] 朱虹,祖元刚,王文杰,等.逆境胁迫条件下脯氨酸对植物生长的影响[J].东北林业大学学报,2009,37(4):86-89.ZHU H, ZU Y G, WANG W J, et al. Effect of proline on plant growth under different stress conditions [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2009, 37(4): 86-89 (in Chinese with English abstract).
- [5] DE FREITAS P A F, DE SOUZA M R, MARQUES E C, et al. Salt tolerance induced by exogenous proline in maize is related to low oxidative damage and favorable ionic homeostasis [J]. Journal of plant growth regulation, 2018, 37(3): 911-924.
- [6] 王翠平,严莉,乔改霞,等.脯氨酸通过活性氧信号抑制植物生长[J].植物生理学报,2017,53(9):1788-1794.WANG C P, YAN L, QIAO G X, et al. Proline inhibits plant growth by reactive oxygen species signaling [J]. Plant physiology journal, 2017, 53(9): 1788-1794 (in Chinese with English abstract).
- [7] 唐依萍,张晓艳,刘士壮,等.外源脯氨酸对NaCl胁迫下番茄幼苗光合特性的影响[J].安徽农业科学,2015,43(24):9-11. TANG Y P, ZHANG X Y, LIU S Z, et al. Effects of exogenous proline on photosynthetic characteristics of tomato seedling under salt stress [J]. Journal of Anhui agricultural sciences, 2015, 43(24): 9-11 (in Chinese with English abstract).
- [8] 李春红.油菜绿肥还田对盐碱土壤氮素及微生物特征的影响[D].石河子:石河子大学,2021.LI C H. Effects of green manure returning to field on nitrogen and microbial characteristics in saline-alkali soil [D]. Shihezi: Shihezi University, 2021 (in Chinese with English abstract).
- [9] JONYTIENE V, BURBULIS N, KUPRIENE R, et al. Effect of exogenous proline and de-acclimation treatment on cold tolerance in *Brassica napus* shoots cultured *in vitro* [J]. Journal of food agriculture & environment, 2012, 10: 327-330.
- [10] HOAGLAND D R, ARNON D I. The water-culture method for growing plants without soil [J]. California agricultural experiment station circular, 1950, 347(2): 1-32.
- [11] KAMALI-ANDANI N, FALLAH S, PERALTA-VIDEA J R, et al. A comprehensive study of selenium and cerium oxide nanoparticles on mung bean: individual and synergistic effect on photosynthesis pigments, antioxidants, and dry matter accumulation [J/OL]. Science of the total environment, 2022, 830: 154837 [2022-11-09]. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154837>.
- [12] 苏素苗,杨春雷,饶雄飞,等.硅对植物抗逆性影响的研究进展[J].华中农业大学学报,2022,41(6):160-168.SU S M, YANG C L, RAO X F, et al. Progress on effects of silicon on plant resistance [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2022, 41(6): 160-168 (in Chinese with English abstract).
- [13] NALIWAJSKI M, SKLODOWSKA M. The relationship between the antioxidant system and proline metabolism in the leaves of cucumber plants acclimated to salt stress [J/OL]. Cells, 2021, 10(3): 609 [2022-11-09]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7998282/>. DOI: 10.3390/cells10030609.
- [14] 蒋雪梅,胥晓,戚文华,等.盐胁迫下外施脯氨酸和磷肥对青杨雌雄幼苗生长及生理特性的影响[J].热带亚热带植物学报,2016,24(6):696-702.JIANG X M, XU X, QI W H, et al. Effects of exogenous proline and phosphate fertilizer on growth and physiological traits of female and male *Populus cathayana* seedlings under salt stress [J]. Journal of tropical and subtropical botany, 2016, 24(6): 696-702 (in Chinese with English abstract).
- [15] BEN AHMED C, BEN ROUINA B, SENSOY S, et al. Exogenous proline effects on photosynthetic performance and antioxidant defense system of young olive tree [J]. Journal of agricultural and food chemistry, 2010, 58(7): 4216-4222.
- [16] 刘亚林,闫磊,曾钰,等.缺钙下枳根抗氧化系统及细胞壁果胶的变化[J].华中农业大学学报,2020,39(1):61-66.LIU Y L, YAN L, ZENG Y, et al. Changes of antioxidant system and cell wall pectin in *Poncirus trifoliata* L. under calcium deficiency [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2020, 39(1): 61-66 (in Chinese with English abstract).
- [17] ZHENG J L, ZHAO L Y, WU C W, et al. Exogenous proline reduces NaCl-induced damage by mediating ionic and osmotic adjustment and enhancing antioxidant defense in *Eurya emarginata* [J]. Acta physiologiae plantarum, 2015, 37(9): 181-189.
- [18] 张韞璐,王琦,王金缘,等.干旱预处理对盐胁迫下水稻幼苗抗氧化酶活性及AsA-GSH循环的影响[J].江苏农业科学,2018,46(7):58-60.ZHANG Y L, WANG Q, WANG J Y, et al. Effects of drought pretreatment on antioxidant enzyme activity and AsA-GSH cycle of rice seedlings under salt stress [J]. Jiangsu agricultural sciences, 2018, 46(7): 58-60 (in Chinese).
- [19] 王玮,吴传万,王欣,等.外源脯氨酸对盐胁迫下萝卜幼苗生长、抗氧化酶活性及渗透调节物质积累的影响[J].江西农业学报,2019,31(3):51-56.WANG W, WU C W, WANG X, et al. Effects of exogenous proline on growth, antioxidant enzyme activity and osmotic adjustment substance accumulation in radish seedlings under salt stress [J]. Acta agriculturae Jiangxi, 2019, 31(3): 51-56 (in Chinese with English abstract).
- [20] 曾紫君,曾钰,闫磊,等.低硼及高硼胁迫对棉花幼苗生长与脯氨酸代谢的影响[J].作物学报,2021,47(8):1616-1623. ZENG Z J, ZENG Y, YAN L, et al. Effect of low boron and high boron stress on cotton seedling growth and proline metabolism [J]. Acta agronomica sinica, 2021, 47(8): 1616-1623 (in Chinese with English abstract).
- [21] 颜志明,魏跃,胡德龙,等.盐胁迫下外源脯氨酸对甜瓜幼苗体

内 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Cl^- 含量及分布的影响[J]. 江苏农业学报, 2014, 30(3): 612-618. YAN Z M, WEI Y, HU D L, et al. Effects of exogenous proline on contents of K^+ , Na^+ , Ca^{2+} ,

Mg^{2+} and Cl^- and their distribution in musk melon seedling under salt stress[J]. Jiangsu journal of agricultural sciences, 2014, 30(3): 612-618 (in Chinese with English abstract).

Effects of exogenous proline on Na^+/K^+ balance, growth and antioxidant system of rapeseed under salt stress

LU Kesong¹, YAN Lei¹, HOU Jiayu¹, ZHANG Yali², JIANG Cuncang^{1,2}

1. College of Resources and Environment/Microelement Research Center, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. College of Agronomy/Xinjiang Production and Construction Corps Key Laboratory of Oasis Ecoagriculture, Shihezi University, Shihezi 832003, China

Abstract Five levels of exogenous proline including 0, 0.25, 0.5, 1 and 2 mmol/L were set for *Brassica napus* under 150 mmol/L salt stress to study the regulatory mechanism of exogenous proline on the growth and development of rapeseed under salt stress. The effects of exogenous proline on the antioxidant systems, osmotic substances, and content of ion under salt stress were investigated. The results showed that salt stress significantly inhibited the growth of rapeseed. Low concentrations (0.25 mmol/L and 0.5 mmol/L) of exogenous proline promoted the growth of rapeseed. Compared to 0.25 mmol/L exogenous proline, the application of 0.5 mmol/L had a better promoting effect on the growth of rapeseed, reduced Na^+ accumulation in leaves, increased the content of K^+ , improved the activity of antioxidant enzyme, and reduced the content of reactive oxygen species. In addition, 0.5 mmol/L exogenous proline promoted the accumulation of osmotic substances including proline in rapeseed leaves. The application of high concentrations (1 mmol/L and 2 mmol/L) of exogenous proline not only did not alleviate salt stress, but also caused further damage to rapeseed leaves. It is indicated that salt stress can cause damage to the growth of rapeseed. Applying an appropriate amount of exogenous proline can stimulate the antioxidant system, effectively alleviate the inhibition of salt stress on the growth of rapeseed, and improve its salt tolerance.

Keywords salt stress; proline; rapeseed; Na^+/K^+ balance; antioxidant enzymes; salt tolerance

(责任编辑:赵琳琳)