

外源2,4-表油菜素内酯对NaCl胁迫下垂穗披碱草种子萌发及幼苗生理特性的影响

宋建超,杨才艳,杨航,鱼小军*

(甘肃农业大学草业学院,草业生态系统教育部重点实验室,甘肃省草业工程实验室,中-美草地畜牧业可持续发展研究中心,甘肃兰州730070)

摘要:【目的】探究外源2,4-表油菜素内酯(2,4-epibrassinolide, EBR)对NaCl胁迫下垂穗披碱草(*Elymus nutans*)种子萌发和幼苗生长伤害的缓解效应。【方法】试验以垂穗披碱草种子为研究对象,在100 mmol/L NaCl胁迫处理下,添加不同浓度(0.001, 0.010, 0.100, 1.000, 10.000 $\mu\text{mol/L}$) EBR,研究外源EBR对NaCl胁迫下垂穗披碱草种子萌发和幼苗生理特性的影响。【结果】100 mmol/L NaCl胁迫显著抑制了垂穗披碱草种子萌发和幼苗生长。NaCl胁迫下添加0.001~1.000 $\mu\text{mol/L}$ EBR可显著提高垂穗披碱草种子的发芽势、发芽率、发芽指数和活力指数,促进NaCl胁迫下垂穗披碱草种子萌发和幼苗生长。添加0.001~1.000 $\mu\text{mol/L}$ 外源EBR处理能够显著提高NaCl胁迫下垂穗披碱草幼苗脯氨酸、可溶性糖、可溶性蛋白含量和抗氧化酶活性,降低丙二醛含量,从而有效降低NaCl胁迫导致的氧化损伤,提高垂穗披碱草种子萌发期的耐盐性。其中,添加0.010和0.100 $\mu\text{mol/L}$ EBR对NaCl胁迫下垂穗披碱草种子萌发和幼苗生长的促进效果最显著。【结论】添加外源EBR能够有效缓解100 mmol/L NaCl胁迫对垂穗披碱草种子萌发和幼苗生长的抑制作用,并以0.010和0.100 $\mu\text{mol/L}$ EBR处理效果最佳。

关键词:2,4-表油菜素内酯;NaCl胁迫;垂穗披碱草;种子萌发;渗透调节;抗氧化酶

中图分类号:S543 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2023)06-0121-09

DOI:10.13817/j.cnki.cycp.2023.06.016



土壤盐渍化是由于土壤底层或地下水中盐分随着土壤水分的蒸发向上运动,不断在地表积累造成的,主要发生在干旱和半干旱地区^[1]。在工农业生产过程中,污水和废气的排放、农药和化肥的不合理使用、不科学的灌溉方式和全球气候的变化等因素,导致全球盐渍化土壤面积不断扩增^[2]。目前,全球盐渍化土地总面积约8.33亿 hm^2 ,土壤盐渍化程度仍处于上升趋势^[3]。预计到21世纪中叶,全球50%的可用耕地将面临盐渍化危害^[4]。中国的盐渍化土地总面积为

$3.69 \times 10^7 \text{ hm}^2$,主要分布于东北、华北、西北和滨海地区^[5],严重阻碍了该区域农业经济发展和生态环境建设。由于盐渍化土壤离子浓度高^[6],过量的盐离子会导致植物体内离子平衡被打破,产生离子毒害作用,扰乱细胞的生理代谢,抑制植物的生长发育^[7-9],严重时甚至导致植株死亡^[10-11]。盐胁迫还会导致植物的光合作用受到抑制,从而降低碳同化效率和光合同化产物的积累,最终导致植物减产^[12-13]。据估计世界主要农作物每年产量损失的50%与非生物胁迫有关,盐胁迫也是世界范围内农业减产的主要非生物胁迫因子之一^[14]。因此,土壤盐渍化已然成为威胁粮食安全以及生态环境安全的世界性问题。

2,4-表油菜素内酯(2,4-epibrassinolide, EBR)是一类甾醇内脂化合物,能够刺激不同的植物代谢过程,例如可促进植物体内蛋白质和核酸生物合成^[15]以及光合作用^[16]等生理生化反应。因其高生理活性在

收稿日期:2022-11-17;修回日期:2022-12-04

基金项目:甘南天然草原打草场培育利用关键技术研发与示范项目(2022CYZC-50)

作者简介:宋建超(1996-),男,甘肃张掖人,硕士研究生。

E-mail:1339801334@qq.com

*通信作者。E-mail:yuxj@gsau.edu.cn

植物应对不良环境因子进行生长调节方面具有积极作用,能够有效提高植物对非生物胁迫的抗性潜力^[17]。Alam等^[18]研究发现,EBR能通过调节渗透压、关键酶活性和非酶促抗氧化剂水平,并且能够降低Na⁺的积累,进而调节大豆(*Glycine max*)的耐盐机制。Agami等^[19]指出,盐胁迫显著降低了玉米(*Zea mays*)幼苗的生长状况、可溶性糖、抗氧化酶活性和叶片解剖结构,EBR的施用减轻了盐胁迫对玉米幼苗的毒性效应,显著提高了玉米幼苗的抗盐胁迫能力。Siddiqui等^[20]的研究发现,EBR和硅(Si)单独或互作处理均能显著提高盐胁迫下芥菜(*Brassica juncea*)的光合特性,进一步提高了抗氧化酶活性和脯氨酸含量,并且Si和EBR互作抵消了盐胁迫造成的损害。因此,EBR作为一类对植物生长和发育具有重要影响的新激素,可提高植物在逆境胁迫下的渗透调节能力、抗氧化酶活性以及改善光合作用,从而提高植物的适应性和抵御非生物胁迫的能力,被广泛应用到提高植物抗逆性研究等相关领域。

垂穗披碱草(*Elymus nutans*)为禾本科披碱草属多年生丛生植物,具有适口性好、营养品质高和适应性强等特性,在退化草地的改良和人工草地的建设中扮演着重要角色,是高寒地区草地恢复、生态修复和建植人工草地的首选草种^[21-23]。但是,土壤盐胁迫仍然是抑制其生长发育的主要非生物因素,严重制约了土壤盐渍化地区农业以及生态恢复和畜牧业发展进程。利用EBR等植物生长调节剂,改善植物耐盐性成为了解决该问题的新途径,而利用EBR提高垂穗披碱草萌发期抗盐性的相关研究未见报道。为此,本试验以垂穗披碱草为试验材料,研究100 mmol/L NaCl胁迫下,添加EBR对垂穗披碱草种子萌发和幼苗生理特性的影响,以为垂穗披碱草抗逆性研究奠定理论基础,并为其耐盐性栽培管理以及退化草地修复提供依据。

1 材料和方法

1.1 供试材料

供试种子为垂穗披碱草种子,产地位于青海省,于2020年9月下旬收获,储存于4℃低温种子库中,初始发芽率约为90%。

2,4-表油菜素内酯购买于北京酷来搏(Coolaber)科技有限公司,纯度≥92.00%,使用前先用少量95%

乙醇溶液溶解EBR,然后配制成含100 μmol/L EBR的100 mmol/L NaCl母液备用,使用前稀释为相应浓度的处理液。

1.2 材料处理

从供试垂穗披碱草种子中,挑选大小均一且完整的种子,用75%的乙醇溶液消毒1 min,然后用蒸馏水反复冲洗,将残余乙醇冲洗干净,最后用滤纸吸干种子表面水分备用。

1.3 试验设计

参照《牧草种子检验规程》^[24]的方法,采用纸上发芽法进行发芽试验。试验采用同一中度盐胁迫(100 mmol/L NaCl)作为胁迫处理^[25],挑选经消毒处理后的供试种子50粒,置于铺有2层滤纸的直径为9 cm培养皿中,加入配置好的含EBR的NaCl溶液。试验共设置7个处理(表1):CK,蒸馏水;E0,100 mmol/L NaCl溶液+0 μmol/L EBR;E1,100 mmol/L NaCl+0.001 μmol/L EBR;E2,100 mmol/L NaCl+0.010 μmol/L EBR;E3,100 mmol/L NaCl+0.100 μmol/L EBR;E4,100 mmol/L NaCl+1.000 μmol/L EBR;E5,100 mmol/L NaCl+10.000 μmol/L EBR。每个处理设3个重复。种子萌发条件为光照14 h/25℃,黑暗10 h/15℃,光照强度为6 000 lx^[25]。将培养皿置于光照培养箱内进行发芽试验,每天在固定时间称重并补充水分,确保处理溶液浓度不变。以胚芽长度达到种子长度1/2为发芽标准,观察并记录当日发芽数,连续记录12 d。于试验第5天计算发芽势,发芽试验结束后统计发芽参数以及幼苗苗长和根长,并且进行幼苗生理指标的测定。

表1 试验各处理溶液浓度

Table 1 The solution concentration of each treatment in the experiment

处理	2,4-表油菜素内酯/(μmol·L ⁻¹)
CK	蒸馏水
E0	100 mmol/L NaCl+0.000 μmol/L EBR
E1	100 mmol/L NaCl+0.001 μmol/L EBR
E2	100 mmol/L NaCl+0.010 μmol/L EBR
E3	100 mmol/L NaCl+0.100 μmol/L EBR
E4	100 mmol/L NaCl+1.000 μmol/L EBR
E5	100 mmol/L NaCl+10.000 μmol/L EBR

1.4 测定指标与方法

1.4.1 发芽指标的测定 种子萌发相关指标发芽势、发芽率、发芽指数及活力指数等测定和计算公式如下^[26]：

发芽势(Germination energy, GE, %) = (发芽试验前5 d的正常发芽种子数/供试种子数) × 100%；

发芽率(Germination percentage, GP, %) = (发芽终期12 d内的正常发芽种子数/供试种子数) × 100%；

发芽指数(Germination index, GI) = $\sum(G_t/D_t)$ ，

式中： G_t 为第t天相应的发芽数， D_t 为相应的发芽天数；

活力指数(Vigor index, VI) = GI × S，

式中：S为幼苗平均长度，GI为发芽指数。

1.4.2 幼苗生长指标的测定 苗长和根长：各处理随机选取10株幼苗，用直尺(0.1 cm)测量幼苗苗长和根长。

1.4.3 幼苗生理指标的测定 可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定，可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝G-250染色法测定，脯氨酸含量采用磺基水杨酸法测定，丙二醛(Malondialdehyde, MDA)含量采用硫代巴比妥酸法测定^[27]。超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)活性采用氮蓝四唑(Nitro-blue tetrazolium, NBT)法测定，过氧化氢酶(Catalase, CAT)活性采用紫外吸收法测定，过氧化物酶(Peroxidase, POD)活性采用愈创木酚法测定^[28]。

1.5 数据处理

采用Microsoft Excel 2019进行数据处理和制图，用SPSS 26.0软件进行单因素方差(ANOVA)分析，并用Duncan法进行多重比较，差异显著性均采用 $P < 0.05$ 表示，各指标数据均为3个重复的平均值 ± 标准误差表示。

2 结果与分析

2.1 外源EBR对NaCl胁迫下垂穗披碱草种子萌发及幼苗生长的影响

与CK相比，NaCl胁迫(100 mmol/L)显著抑制了垂穗披碱草种子的萌发和幼苗的生长(图1)。添加0.001~10.000 μmol/L EBR能够促进垂穗披碱草种子的萌发和幼苗生长，各指标随EBR浓度的增加呈

“先升后降”趋势。NaCl胁迫处理显著抑制了垂穗披碱草种子的萌发($P < 0.05$)。添加0.001~10.000 μmol/L EBR显著提高了NaCl胁迫下垂穗披碱草种子的发芽势和发芽率，其中发芽势和发芽率分别在E2和E3处理下最高，与NaCl胁迫相比，分别提高了114.69%和17.82%。添加EBR显著提高了NaCl胁迫下垂穗披碱草种子的发芽指数和活力指数($P < 0.05$)，在E3处理下垂穗披碱草种子的发芽指数和活力指数最高，分别提高了67.23%和187.05%。

NaCl胁迫显著抑制了垂穗披碱草幼苗的生长(图1)。与CK相比，垂穗披碱草苗长和根长显著降低($P < 0.05$)，外源添加0.010~0.100 μmol/L EBR显著提高了NaCl胁迫处理下垂穗披碱草幼苗的苗长和根长($P < 0.05$)。与NaCl胁迫处理相比，在E3处理下垂穗披碱草的苗长和根长分别提高了71.70%和87.80%，并且EBR在高浓度(10.000 μmol/L)处理下，垂穗披碱草幼苗根长低于NaCl胁迫处理，抑制了幼苗的生长。

2.2 外源EBR对NaCl胁迫下垂穗披碱草种子萌发过程中渗透调节物质和MDA含量的影响

与CK相比，100 mmol/L NaCl胁迫显著提高了垂穗披碱草幼苗体内可溶性糖、可溶性蛋白和游离脯氨酸含量($P < 0.05$) (图2)。添加0.001~1.000 μmol/L EBR进一步提高了NaCl胁迫下垂穗披碱草幼苗体内可溶性蛋白、可溶性蛋白和脯氨酸含量($P < 0.05$)，但是三者在高浓度EBR(10.000 μmol/L)处理下与NaCl处理间差异不显著($P > 0.05$)。可溶性糖含量则呈现“先升后降”的变化趋势，并且不同浓度EBR处理间存在差异，可溶性糖含量在E2和E3处理下最优，分别较NaCl处理提高了41.84%和41.62%。除E5处理外，可溶性蛋白含量在各EBR处理间无差异，E3处理下可溶性蛋白含量较NaCl胁迫处理提高了61.09%。脯氨酸含量随EBR浓度的增加呈“先升后降”趋势，脯氨酸含量在E2和E3处理下与NaCl处理相比分别提高了33.86%和33.16%。与CK相比，100 mmol/L NaCl胁迫显著提高了垂穗披碱草幼苗体内MDA含量($P < 0.05$)。添加0.001~1.000 μmol/L EBR能够显著降低MDA含量($P < 0.05$)。与NaCl胁迫处理相比，E3处理下MDA含量降低了26.34%。但是，EBR在高浓度E5(10.000 μmol/L)处理下，反

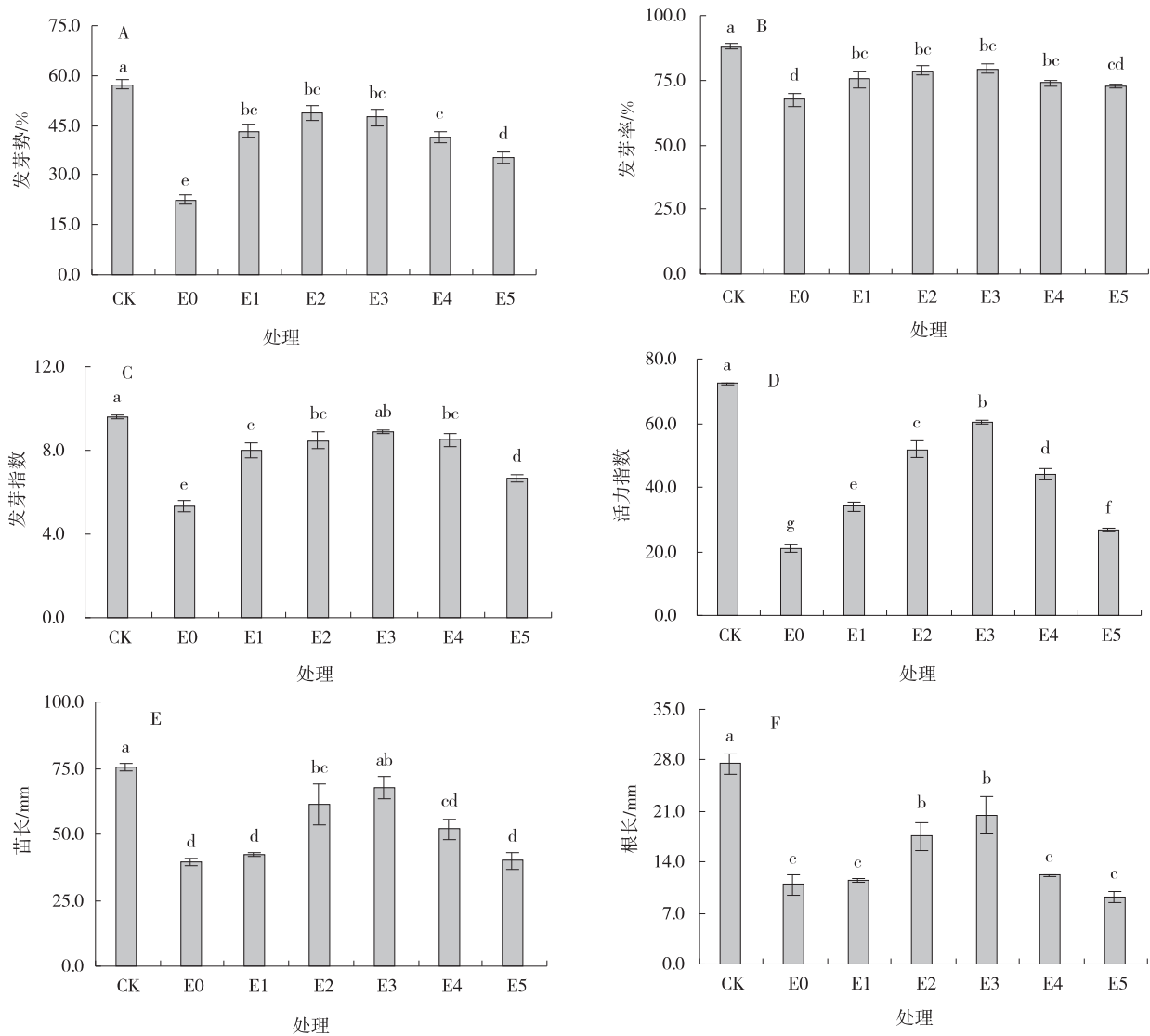


图1 外源EBR对NaCl胁迫下垂穗披碱草种子萌发及幼苗生长的影响

Fig. 1 Effect of exogenous EBR on seed germination and seedling growth of *Elymus nutans* under NaCl stress

注:图中不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。下同

而会使MDA含量增加,该处理MDA含量与NaCl胁迫差异不显著,并且MDA含量高于NaCl胁迫处理。

2.3 外源EBR对NaCl胁迫下垂穗披碱草幼苗体内抗氧化酶活性的影响

与CK相比,100 mmol/L盐胁迫处理显著提高了幼苗SOD,CAT和POD活性($P < 0.05$)(图3)。添加0.001~1.000 $\mu\text{mol/L}$ EBR能够显著提高了NaCl胁迫下垂穗披碱草幼苗抗氧化酶POD,CAT和SOD活性($P < 0.05$),并且0.001~1.000 $\mu\text{mol/L}$ EBR处理下3种酶活性均高于NaCl胁迫处理。其中E3处理对SOD和CAT活性影响较大,与NaCl胁迫处理相比分别提高了44.26%和26.20%。E2处理对POD活性影响较大,与NaCl胁迫处理相比提高了45.60%。

3 讨论

3.1 外源EBR对NaCl胁迫下垂穗披碱草种子萌发和幼苗生长的影响

盐胁迫是抑制植物生长发育的主要胁迫因素之一,当土壤中含盐量超过植物的耐受范围时,植物的生长发育将被限制,表现为成苗率低、生长缓慢和生物量下降等,甚至最终导致植株死亡^[29]。种子萌发作为植物生长发育的前提和植物生物量形成的基础,对于外界胁迫较为敏感,而植物激素在诱导植物种子萌发过程中发挥着积极作用^[30]。研究认为,低浓度NaCl处理能够促进植物种子的萌发,起到打破种子休眠的作用,随着NaCl胁迫浓度的增加,明显抑制了种子的

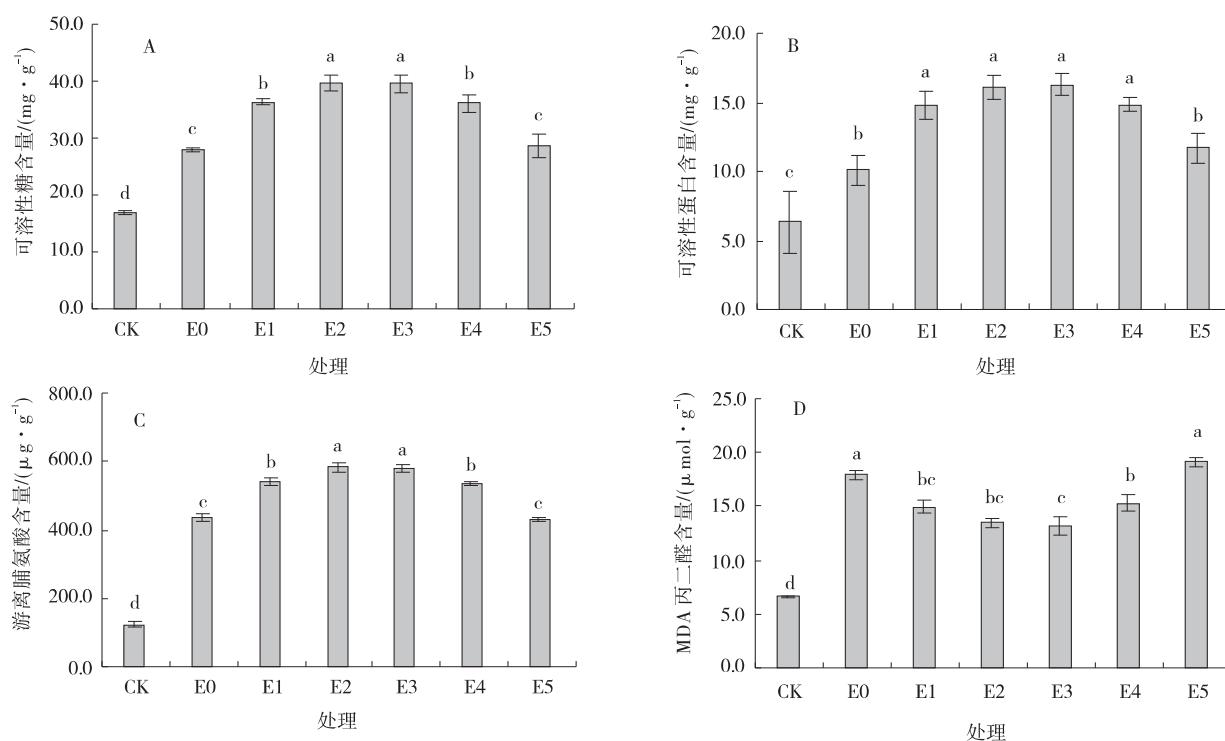


图 2 外源 EBR 对 NaCl 胁迫下垂穗披碱草幼苗体内渗透调节物质和丙二醛含量的影响

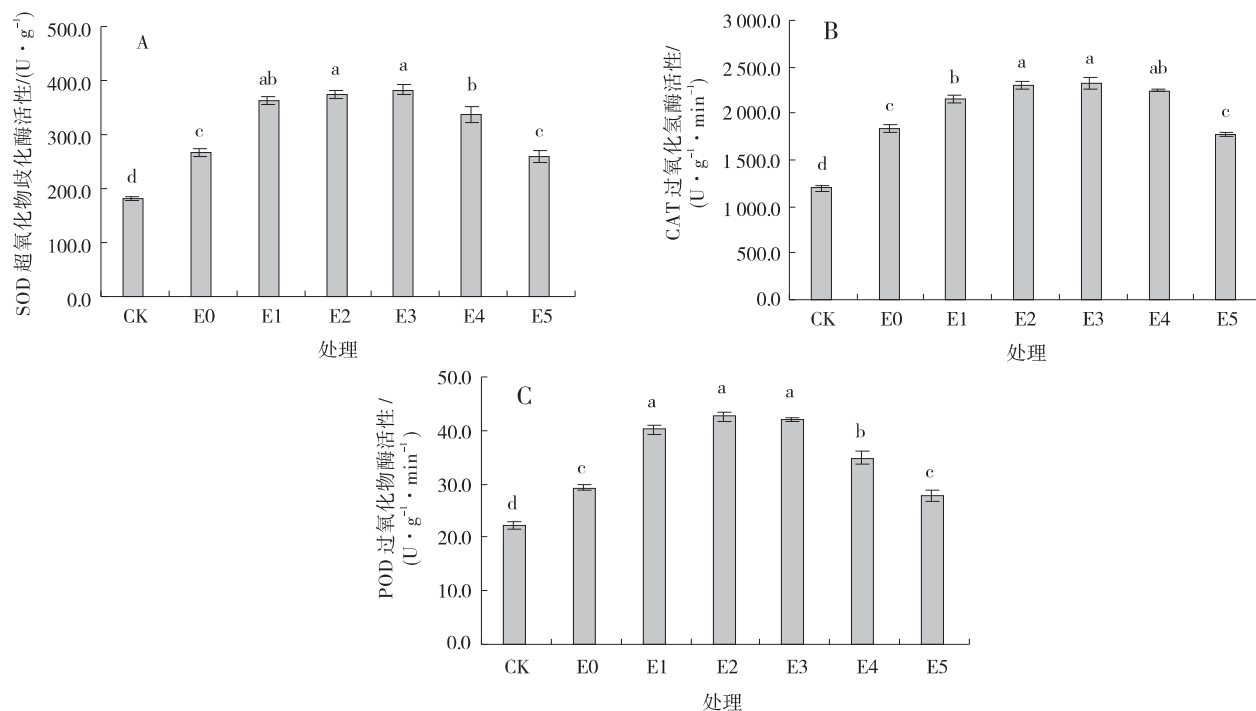
Fig. 2 Effects of exogenous EBR on osmotic regulation and MDA contents in *Elymus nutans* seedlings under NaCl stress

图 3 外源 EBR 对 NaCl 胁迫下垂穗披碱草幼苗体内抗氧化酶活性的影响

Fig. 3 Effects of exogenous GABA on SOD, CAT and POD activities of *Elymus nutans* seedlings under NaCl stress

萌发^[25,31]。本研究结果表明,100 mmol/L NaCl 胁迫显著抑制了垂穗披碱草种子的萌发和幼苗的生长,添加 0.001~1.000 μmol/L EBR 显著提高了垂穗披碱草种子的发芽势、发芽率、发芽指数和活力指数,并且促进了垂穗披碱草幼苗和根系的生长,但较高浓度

(10.00 μmol/L) EBR 处理会抑制垂穗披碱草幼苗和根系的生长。寇江涛^[30]的研究表明,100 mmol/L NaCl 胁迫抑制了燕麦 (*Avena sativa*) 种子的萌发和幼苗的生长,施加外源 EBR 显著促进了 NaCl 胁迫下燕麦种子的萌发和幼苗的生长。闫慧萍等^[32]研究表明,0.05

mg/L EBR能够显著缓解180 mmol/L NaCl胁迫对玉米种子的伤害,促进玉米种子的萌发和幼苗的生长。雷新慧^[33]等的报道指出,盐胁迫抑制了荞麦(*Fagopyrum esculentum*)种子的萌发和幼苗的生长,通过EBR浸种有效缓解了盐胁迫损害,提高了荞麦种子的发芽势、发芽率和成苗率,并且显著提高了荞麦幼苗高度、鲜重和干重。本试验结果与以上研究基本趋同,说明外源EBR在调控NaCl胁迫下垂穗披碱草种子的萌发和幼苗的生长具有积极作用。Alam等^[18]研究表明,盐胁迫增加了植物根系和地上部对Na⁺的吸收,同时降低了对Ca²⁺、K⁺和P的吸收,添加EBR降低了Na⁺的积累,促进了上述养分的吸收。寇江涛^[30]指出,施加EBR能够显著提高植物种子萌发过程中 α -淀粉酶和 β -淀粉酶活性,降低蛋白水解酶活性,为种子的萌发提供能量,从而促进植物种子的萌发。说明外源添加适宜浓度的EBR能够降低NaCl胁迫下垂穗披碱草种子萌发过程中对Na⁺的积累,并且能够促进提高 α -淀粉酶和 β -淀粉酶等相关酶活性,有效缓解了NaCl胁迫伤害,但是EBR过量施用反而造成垂穗披碱草种子萌发和幼苗生长发育受阻。并且添加EBR能够显著提高NaCl胁迫下植物的光合效率和氮代谢能力,有效缓解NaCl胁迫对植物幼苗所造成的损伤,大大提高了植物生长早期的耐盐性^[20,34-36]。

3.2 外源EBR对NaCl胁迫下垂穗披碱草幼苗生理特性的影响

渗透调节是植物响应逆境胁迫的主要表征之一,脯氨酸、可溶性蛋白和可溶性糖是植物体内主要的渗透调节物质,在保护质膜的完整性和参与机体多种代谢过程中发挥着重要作用^[37-39]。研究表明,盐胁迫下植物体内产生渗透胁迫并导致其生理过程发生变化,植物则通过积累大量渗透调节物质来缓解盐胁迫引起的渗透胁迫^[40]。本试验中,100 mmol/L NaCl胁迫增加了垂穗披碱草幼苗体内可溶性糖、可溶性蛋白和脯氨酸的积累,说明NaCl胁迫使垂穗披碱草幼苗产生了渗透胁迫,通过积累大量可溶性糖、可溶性蛋白和脯氨酸提高其渗透调节能力,但这种能力是有限的。添加EBR能够有效加快NaCl胁迫下垂穗披碱草幼苗体内可溶性糖、可溶性蛋白和脯氨酸的积累,显著提高了NaCl胁迫下垂穗披碱草的渗透调节能力。寇江涛^[41]认为,NaCl+EBR处理降低了燕麦种子萌发过程

中的蛋白水解酶活性,提高了可溶性糖、可溶性蛋白和脯氨酸含量,提高了燕麦萌发阶段的耐盐性。孙姗姗等^[42]的研究同样指出,NaCl胁迫下施用外源EBR能够显著提高多年生黑麦草(*Lolium perenne*)幼苗的脯氨酸、可溶性糖和可溶性蛋白等渗透调节物质的含量,缓解NaCl胁迫对幼苗的伤害。说明,外源EBR能够通过调控NaCl胁迫下垂穗披碱草幼苗体内渗透调节物质的积累,提高其渗透调节能力,从而促进NaCl胁迫下垂穗披碱草幼苗的生长。

在正常生长条件下,植物体内活性氧(reactive oxygen species, ROS)代谢处于动态平衡,当植物受到NaCl胁迫时,会诱导植物细胞内ROS大量积累,ROS的产生和清除动态平衡被打破,造成膜脂过氧化^[43-44]。ROS通过脂质过氧化作用产生MDA,破坏膜的结构和功能,从而影响植物的正常生长代谢^[45]。因此,MDA含量是反映植物遭受NaCl胁迫损伤程度的重要指标^[46]。酶促系统和非酶促系统共同组成了植物的抗氧化系统,而SOD、CAT和POD是植物体内酶促抗氧化系统的重要组成部分,能够共同协作抵御NaCl胁迫对植物造成的损伤,提高植物的耐盐能力^[47-48]。Talaat等^[49]研究认为,植物在盐胁迫下叶面喷施EBR有效抑制了H₂O₂的产生,从而进一步降低脂质过氧化。孙姗姗等^[42]的研究表明,添加外源EBR显著降低了250 mmol/L NaCl胁迫下多年生黑麦草幼苗的MDA含量,提高了APX、SOD和POD等抗氧化酶活性,有效缓解盐胁迫对幼苗的损伤。安辉^[50]等指出,喷施外源EBR能够显著提高水稻(*Oryza sativa*)幼苗盐胁迫24 h时的叶片SOD、CAT和根系CAT活性,以及盐胁迫恢复后(72 h)的根系SOD活性和叶片POD活性,有效降低MDA的积累。本研究结果与上述研究结果一致,在100 mmol/L NaCl胁迫下添加0.001~1.000 μ mol/L EBR显著提高了垂穗披碱草幼苗体内SOD、CAT和POD活性,降低了MDA含量,并且幼苗抗氧化酶活性与外源EBR存在浓度效应,添加10.000 μ mol/L EBR垂穗披碱草幼苗体内3种抗氧化酶活性降低,反而会对幼苗的生长和抗氧化酶系统造成胁迫,抑制幼苗的生长发育。说明,NaCl胁迫下施加外源EBR能够有效抑制垂穗披碱草幼苗体内H₂O₂的产生,并且能够激活SOD、CAT和POD活性,

三者共同协作清除 ROS,使得垂穗披碱草种子萌发和幼苗生长过程中的各种生理生化代谢活动正常进行,增强垂穗披碱草种子萌发期的耐盐性。

综上所述,NaCl胁迫下外源添加 0.001~1.000 $\mu\text{mol/L}$ EBR能够有效促进垂穗披碱草种子萌发和幼苗生长。EBR能够通过诱导垂穗披碱草幼苗体内渗透调节物质的合成来提高其渗透调节能力,并且通过激活细胞活性氧清除机制来提高垂穗披碱草幼苗体内抗氧化酶活性,降低幼苗的胁迫损伤,从而缓解了NaCl胁迫对垂穗披碱草种子萌发和幼苗生长的抑制作用,提高其耐盐性。但是,这些研究只是停留在对某一方面的浅层研究,关于EBR诱导植物抗逆性的作用机制有待进一步研究。

4 结论

100 mmol/L NaCl胁迫下,垂穗披碱草种子的萌发和幼苗的生长显著受到抑制。添加 0.001~1.000 $\mu\text{mol/L}$ EBR显著促进了垂穗披碱草种子的萌发和幼苗的生长。外源EBR主要通过调控NaCl胁迫下垂穗披碱草幼苗体内可溶性糖、可溶性蛋白和脯氨酸含量,增强细胞的渗透调节能力,并且通过提高抗氧化酶活性、降低MDA含量,增强对活性氧的清除能力,从而缓解了NaCl胁迫对垂穗披碱草种子萌发和幼苗生长过程中的损伤。本试验中,添加 0.010~0.100 $\mu\text{mol/L}$ EBR对NaCl胁迫下垂穗披碱草种子萌发和幼苗生长的缓解效果最好。

参考文献:

- [1] 方如康. 环境学词典[M]. 北京:科学出版社,2003:56.
- [2] 杨真,王宝山. 中国盐渍土资源现状及改良利用对策[J]. 山东农业科学,2015,47(4):125-130.
- [3] 世界盐渍土壤分布图发布[J]. 中国农业综合开发,2021(10):64.
- [4] Jan A, Osman M B, Amanullah. Response of chickpea to nitrogen sources under salinity stress[J]. Journal of Plant Nutrition, 2013, 36(9): 1373-1382.
- [5] 杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 837-845.
- [6] 卢梦琪,周俊琴,刘懿瑶,等. 外源钙离子对NaCl胁迫下油茶花粉萌发的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(6): 91-98.
- [7] Gorai M, Aloui W E, Yang X J, et al. Toward understanding the ecological role of mucilage in seed germination of a desert shrub *Henophytondeserti*: interactive effects of temperature, salinity and osmotic stress [J]. Plant and Soil, 2014, 374(1/2): 727-738.
- [8] Jiang Q, Hu Z, Zhang H, et al. Overexpression of Gm DREB1 improves salt tolerance in transgenic wheat and leaf protein response to high salinity [J]. Crop Journal, 2014, 2: 120-131.
- [9] Liu W, Hang Y, Yuan X, et al. Exogenous salicylic acid improves salinity tolerance of *Nitrariatangutorum* [J]. Russian Journal of Plant Physiology, 2016, 63(1): 139-149.
- [10] Minhas P S, Ramos T B, Ben-Gal A, et al. Coping with salinity in irrigated agriculture: crop evapotranspiration and watermanagement issues [J]. Agricultural Water Management, 2020, 227: 105832.
- [11] Evelin H, Kapoor R, Giri B. Arbuscular mycorrhizal fungi in alleviation of salt stress: a review [J]. Annals of botany, 2009, 104(7): 1263-1280.
- [12] 厉书豪,李曼,张文东,等. CO₂加富对盐胁迫下黄瓜幼苗叶片光合特性及活性氧代谢的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(6): 2122-2130.
- [13] Chaves M M, Flexas J, Pinheiro C. Photosynthesis under drought and salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell [J]. Annals of Botany, 2009, 103(4): 551-560.
- [14] Valliyodan B, Nguyen H T. Understanding regulatory networks and engineering for enhanced drought tolerance in plants [J]. Current Opinion in Plant Biology, 2006, 9(2): 189-195.
- [15] Bajguz A. Effect of brassinosteroids on nucleic acids and protein content in cultured cells of *Chlorella vulgaris* [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2000, 38(3): 209-215.
- [16] Sairam R K. Effects of homobrassinolide application on plant metabolism and grain yield under irrigated and moisture-stress conditions of two wheat varieties [J]. Plant Growth Regulation, 1994, 14(2): 173-181.
- [17] Huang G Z, Sun J H, Bai J J, et al. Identification of critical cysteine sites in brassinosteroid-insensitive 1 and novel signaling regulators using a transient expression system [J]. New phytologist, 2019, 222(3): 1405-1419.
- [18] Alam P, Albalawi T H, Altalayan F H, et al. 24-Epi-

- brassinolide (EBR) Confers Tolerance against NaCl Stress in Soybean Plants by Up-Regulating Antioxidant System, Ascorbate-Glutathione Cycle, and Glyoxalase System[J]. *Biomolecules*, 2019, 9(11):640.
- [19] Agami R A. Alleviating the adverse effects of NaCl stress in maize seedlings by pretreating seeds with salicylic acid and 24-epibrassinolide [J]. *South African Journal of Botany*, 2013, 88:171-177.
- [20] Siddiqui H, Yusuf M, Faraz A, *et al.* 24-Epibrassinolide supplemented with silicon enhances the photosynthetic efficiency of *Brassica juncea* under salt stress[J]. *South African Journal of Botany*, 2018, 118:120-128.
- [21] 陆光平, 聂斌. 垂穗披碱草利用价值评价[J]. *草业科学*, 2002, 19(9):34-36.
- [22] 边巴卓玛, 呼天明, 吴红新. 依靠西藏野生牧草种质资源提高天然草场的植被恢复效率[J]. *草业科学*, 2006, 23(2):6-8.
- [23] 赵玉宇, 黄德君, 毛祝新, 等. 青藏高原地区不同垂穗披碱草居群营养品质研究[J]. *草业学报*, 2013, 22(1):38-45.
- [24] 中华人民共和国农业部. 牧草种子检验规程: GB/T 2930.1~2930.11-2001 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2001, 6:31-48.
- [25] 王传旗, 武俊喜, 余成群, 等. 环境因子对西藏巴青县野生垂穗披碱草种子萌发的影响[J]. *草地学报*, 2017, 25(5):1103-1107.
- [26] 赵旭, 陈仕勇, 刘伟, 等. NaCl胁迫及外源GABA对垂穗披碱草种子萌发的影响[J]. *种子*, 2021, 40(7):39-44.
- [27] 王学奎. 植物生理生化实验原理与技术(第3版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2015:171-173, 274-277.
- [28] 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000:129-130, 168-169, 282-287.
- [29] 王文静, 麻冬梅, 赵丽娟, 等. 2,4-表油菜素内酯对盐胁迫下紫花苜蓿生理指标及根系离子积累的影响[J]. *草地学报*, 2021, 29(6):1363-1368.
- [30] 寇江涛. 外源2,4-表油菜素内酯对NaCl胁迫下燕麦种子萌发和生理的影响[J]. *草地学报*, 2019, 27(6):1562-1568.
- [31] 王苗苗, 周向睿, 梁国玲, 等. 不同燕麦种质萌发期耐盐性评价[J]. *草原与草坪*, 2019, 39(2):84-90+95.
- [32] 闫慧萍, 彭云玲, 赵小强, 等. 外源24-表油菜素内酯对逆境胁迫下玉米种子萌发和幼苗生长的影响[J]. *核农学报*, 2016, 30(5):988-996.
- [33] 雷新慧, 万晨茜, 陶金才, 等. 褪黑素与2,4-表油菜素内酯浸种对盐胁迫下荞麦发芽与幼苗生长的促进效应[J]. *作物学报*, 2022, 48(5):1210-1221.
- [34] 寇江涛. 外源2,4-表油菜素内酯对NaCl胁迫下燕麦幼苗光合特性的影响[J]. *华北农学报*, 2020, 35(2):79-87.
- [35] 辛正琦, 代欢欢, 辛余凤, 等. 盐胁迫下外源2,4-表油菜素内酯对颠茄氮代谢及TAs代谢的影响[J]. *作物学报*, 2021, 47(10):2001-2011.
- [36] Wani A S, Tahir I, Ahmad S S, *et al.* Efficacy of 24-epibrassinolide in improving the nitrogen metabolism and antioxidant system in chickpea cultivars under cadmium and/or NaCl stress[J]. *Scientia Horticulturae*, 2017, 225(1):48-55.
- [37] Deinlein U, Stephan A B, Horie T, *et al.* Plant salt-tolerance mechanisms[J]. *Trends in Plant Science*, 2014, 19(6):371-379.
- [38] 郁继华, 雍山玉, 张洁宝, 等. 外源NO对NaCl胁迫下辣椒幼苗氧化损伤的保护效应[J]. *西北植物学报*, 2007, 27(9):1801-1806.
- [39] 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.
- [40] 周万海, 师尚礼, 寇江涛. 盐胁迫下外源NO对苜蓿幼苗生长及氮代谢的影响[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(11):3003-3008.
- [41] 寇江涛. 外源2,4-表油菜素内酯对盐胁迫下燕麦种子萌发抑制的缓解效应[J]. *草业科学*, 2020, 37(5):916-925.
- [42] 孙珊珊, 安勤颖, 韩烈保, 等. 外源24-表油菜素内酯对多年生黑麦草幼苗耐盐性的影响[J]. *草地学报*, 2014, 22(5):1045-1050.
- [43] Dongen J V, Licausi F. Oxygen Sensing and Signaling [J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2015, 66(1):345-367.
- [44] Abd-Allah E F, Alqarawi A A, Hashem A, *et al.* Regulatory roles of 24-epibrassinolide in tolerance of *Acacia gerrardii* Benth to salt stress[J]. *Bioengineered*, 2018, 9(1):61-71.
- [45] 马婷燕, 李彦忠. 外源甜菜碱对NaCl胁迫下紫花苜蓿种子萌发及幼苗抗性的影响[J]. *草业科学*, 2019, 36(12):3100-3110.
- [46] 许馨露, 李丹丹, 马元丹, 等. 四季桂抗氧化防御系统对干旱、高温及协同胁迫的响应[J]. *植物学报*, 2018, 53

- (1):72–81.
- [47] Torabi M, Halim M. Variation of root and shoot growth and free proline accumulation in Iranian alfalfa ecotypes under salt stress[J]. *Journal of Food Agriculture & Environment*, 2010, 8(3/4):323–327.
- [48] Limón-Pacheco J, Gonsebatt M E. The role of antioxidants and antioxidant-related enzymes in protective responses to environmentally induced oxidative stress [J]. *Mutation Research*, 2009, 674(1/2):137–147.
- [49] Talaat N B, Shawky B T. 24-Epibrassinolide ameliorates the saline stress and improves the productivity of wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Environmental & Experimental Botany*, 2012, 82:80–88.
- [50] 安辉, 盛伟, 于玉凤, 等. 外源2,4-表油菜素内酯对盐胁迫下对水稻幼苗生理特性的影响[J]. *分子植物育种*, 2021, 19(8):2740–2746.

Effects of exogenous 2,4-epibrassinolide on seed germination and seedling physiological characteristics of *Elymus nutans* under NaCl stress

SONG Jian-chao, YANG Cai-yan, YANG Hang, YU Xiao-jun*

(College of Grassland Science, Gansu Agricultural University, Key Laboratory of Grassland Ecosystem, Ministry of Education, Grassland Engineering Laboratory of Gansu Province, Sion-U. S. Center for Grazing Land Ecosystem Sustainability, Lanzhou 730070, China)

Abstract: [Objective] To investigate the mitigating effect of exogenous 2,4-epibrassinolide (EBR) on seed germination and seedling growth of *Elymus nutans* under NaCl stress. [Method] *E. nutans* was chosen as the research object, and we examined the effects of exogenous EBR (0.001, 0.01, 0.10, 1.00, 10.00 $\mu\text{mol/L}$) on seed germination and seedling physiological characteristics of *E. nutans* under 100 mmol/L NaCl stress. [Result] The results revealed that the seed germination and seedling growth of *E. nutans* were significantly inhibited under 100 mmol/L NaCl stress. Adding 0.001~1.00 $\mu\text{mol/L}$ exogenous EBR significantly improved the germination energy, germination percentage, germination index and vigor index of *E. nutans* under NaCl stress, and promoted the seed germination and seedling growth of *E. nutans* under 100 mmol/L NaCl stress. Adding 0.001~1.00 $\mu\text{mol/L}$ exogenous EBR significantly increased the content of proline, soluble sugar, soluble protein and antioxidant enzyme activity of *E. nutans* seedlings under 100 mmol/L NaCl stress, and reduced the contents of MDA. The oxidative damage caused by NaCl stress was effectively reduced and the salt tolerance of *E. nutans* seeds were improved during the germination period. Notably, adding 0.01 $\mu\text{mol/L}$ and 0.10 $\mu\text{mol/L}$ exogenous EBR had the most significant effect on seed germination and seedling growth of *E. nutans* under 100 mmol/L NaCl stress. [Conclusion] In conclusion, the addition of exogenous EBR can significantly alleviate the inhibitory effect of 100 mmol/L NaCl stress on the seed germination and seedling growth of *E. nutans*, with the treatment of 0.01 and 0.10 $\mu\text{mol/L}$ exogenous EBR perform the best.

Key words: 2,4-epibrassinolide; NaCl stress; *Elymus nutans*; seed germination; osmotic regulation; antioxidant enzymes