

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

王亚娟, 杨洋, 阴法庭, 张凤华*

(石河子大学农学院/新疆兵团绿洲生态农业重点实验室, 新疆 石河子 832003)

摘要:为探究不同NaCl浓度持续盐胁迫下甘蓝型饲料油菜渗透调节物质及Na⁺、K⁺含量的变化,采用盆栽试验法,测定不同NaCl浓度持续处理下饲料油菜叶片中的脯氨酸、可溶性糖、可溶性蛋白、甜菜碱、抗氧化酶(超氧化物歧化酶、过氧化物酶、过氧化氢酶)活性,以及植株根、茎、叶不同部位Na⁺、K⁺含量的变化。结果表明:随着NaCl浓度的增加,各渗透调节物质发生不同程度的积累,其中以脯氨酸和可溶性糖含量的增加最显著。随着NaCl浓度的增加,抗氧化酶系统中超氧化物歧化酶、过氧化物酶和过氧化氢酶协同作用以清除产生的活性氧,过氧化物酶起主导作用。随NaCl浓度的增加,总体上Na⁺含量增加K⁺含量降低,茎中Na⁺含量先增加后降低。NaCl浓度为250 mmol/L时出现最大值,K⁺含量在根和叶中变化相对平稳;NaCl浓度为250、350 mmol/L时,茎中K⁺含量显著降低。NaCl胁迫浓度在250、350 mmol/L时饲料油菜各生理指标发生显著变化,250 mmol/L以上的NaCl胁迫对饲料油菜苗的生长有明显抑制作用。

关键词:甘蓝型饲料油菜;NaCl胁迫;抗氧化酶;脯氨酸;可溶性糖

中图分类号:S565.4

文献标识码:A

文章编号:2096-5877(2024)03-0058-07

Effects of NaCl Stress on Osmotic Adjustment Substances and Na⁺, K⁺ Contents in *Brassica napus*

WANG Yajuan, YANG Yang, YIN Fating, ZHANG Fenghua*

(College of Agronomy, Shihezi University/Key Laboratory of Oasis Eco-Agriculture, Xinjiang Production and Construction Group, Shihezi 832003, China)

Abstract: In order to investigate the changes of osmotic adjustment substances and Na⁺ and K⁺ contents in potted rapeseed under different stresses of NaCl concentration, pot experiment was conducted to determine proline, soluble sugar, soluble protein, betaine and antibiotics in rape leaves under different NaCl concentrations. The activities of oxidase (superoxide dismutase, catalase, peroxidase and the changes of Na⁺ and K⁺ contents in different parts of roots, stems and leaves of plants. The results showed that: with the increase of NaCl concentration, the osmotic adjustment substances accumulated in different degrees, among which the increase of proline and soluble sugar was the most significant; with the increase of NaCl concentration, SOD, POD and CAT in the antioxidant enzyme system. Synergistic action to remove the generated ROS, POD played a leading role; with the increase of NaCl concentration, the overall Na⁺ content increases K⁺ content, the Na⁺ content in the stem increases first and then decreases, and the maximum value appears when the NaCl concentration was 250 mmol/L. The K⁺ content was relatively stable in roots and leaves. When the NaCl concentration was 250 mmol/L, 350 mmol/L, the K⁺ content in the stem decreased significantly. In conclusion, the physiological indexes of feed rapeseed changed significantly at NaCl stress concentration of 250 mmol/L, 350 mmol/L, and NaCl stress above 250 mmol/L significantly inhibited the growth of rapeseed.

Key words: *Brassica napus*; NaCl stress; Antioxidase; Proline; Soluble sugar

土壤盐渍化已成为限制农业生产的重要因素

之一^[1-2],盐胁迫同干旱、高温、低温等一样,是影响植物生长发育的主要非生物逆境因素^[3]。我国是世界盐碱地大国之一,目前有0.8亿hm²具有农业生产潜力的盐碱地^[4],新疆又有中国盐碱博物馆之称,现有耕地中31%的面积受到盐碱危害,其中强度盐渍化地占盐碱土耕地面积的18%,中

收稿日期:2020-03-30

基金项目:公益性行业(农业)科研专项项目(201503120);兵团重大计划项目(2018AA005)

作者简介:王亚娟(1994-),女,在读硕士,主要从事农业生态研究。

通信作者:张凤华,女,博士,教授,E-mail: zfh2000@126.com

强度盐碱化地占33%,轻度盐渍化地占49%^[5],严重影响了绿洲生态环境的稳定和干旱区农业发展的潜力。种植和筛选适宜在盐渍化土壤正常生长并能保证经济产量的作物,可以改良盐碱地并提高其利用效率,对农业生产有重要意义。

植物耐盐机理以及如何提高植物耐盐性一直是学者们关注的焦点^[6-7],土壤盐分的富集使土壤渗透压增加、理化性质发生改变,盐分含量较高,导致植物根际溶液渗透势降低,这种环境不利于植物从土壤中吸收水分,表现为生理干旱^[8-9],当盐分浓度过高时,会引起细胞组织水分外渗,导致叶片蒸腾速率和光合作用降低,盐胁迫伤害愈加严重^[10]。盐境中植物体内盐离子积累量严重超标会产生离子毒害,过量Na⁺抑制K⁺、Ca²⁺、Fe²⁺等的吸收,导致植物对矿质元素的吸收受阻,扰乱植物体内的离子平衡,破坏细胞质膜,抑制胞内关键酶活性,最终造成营养生长和生殖生长受抑制^[11-13]。

甘蓝型饲料油菜(*Brassica napus* L.)具有耐寒性强、生长迅速、营养价值高等特点,在我国长江流域广泛种植,面积和产量均占我国饲料油菜的85%^[14-15]。此外,饲料油菜具有高抗(耐)盐碱特性,在盐碱地、重度污染的废弃地种植饲料油菜,具有土壤修复作用。新疆地区冬季寒冷,饲料油菜不能安全越冬,春季土地解冻后种植饲料油菜,则因为种子没有经过春化作用,一般开花结实率很低,并不适合饲料油菜籽生产,然而其绿色营养体生长迅速,生物量大,这些绿色营养体收获后可做牛、羊的饲料。近年来,新疆地区麦后复种饲料油菜面积不断增大,其种植成本低、蛋白质和脂肪含量高、适口性好、生物量大,鲜草产量可达75 000 kg/hm²,为家畜生产提供了新鲜饲草^[16-17]。饲料油菜对缓解新疆地区饲料短缺,促进畜牧业经济发展具有重要意义。基于新疆耕地和土壤状况,本研究测定了不同NaCl浓度持续胁迫下,饲料油菜叶片中渗透调节物质(脯氨酸、甜菜碱、可溶性蛋白和可溶性糖)的含量以及抗氧化酶系统中超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、过氧化氢酶(catalase, CAT)和过氧化物酶(peroxidase, POD)活性的变化,同时测定了饲料油菜根、茎、叶不同部位Na⁺、K⁺的含量,研究了饲料油菜在持续盐境下植株形态和生理对盐胁迫的响应,旨在为发展以饲料油菜青鲜组织做饲料的饲料油菜种植和盐碱地改良提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

试验材料为华油杂62号饲料油菜品种(以下简称“饲料油菜”),华中农业大学傅廷栋院士选育并提供试验用种。

1.2 材料培养与盐胁迫处理

试验于2018年8月在石河子大学玻璃温室进行,将种子消毒后播种于内径17 cm、高20 cm的塑料花盆中,栽培基质为花土,待幼苗长至5叶1心时进行不同浓度的NaCl溶液处理。

前期试验结果发现NaCl浓度为100 mmol/L时对饲料油菜的生长有促进作用,NaCl浓度为250 mmol/L时饲料油菜生长发育开始受到胁迫,350 mmol/L的NaCl胁迫下饲料油菜生长发育受到显著影响。因此,设置以下3个浓度,每个处理3次重复,分别为:低盐,NaCl浓度为100 mmol/L(T₁);中盐,250 mmol/L(T₂);高盐,350 mmol/L(T₃);自来水作为对照(CK)。每5 d浇灌1次,每次浇500 mL/盆,选择饲料油菜营养物质最为丰富的盛花期进行生理指标的测定。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 渗透调节物质含量的测定

取盛花期饲料油菜叶片经液氮冷冻后保存于-80℃冰箱,用于渗透物质含量的测定。

游离脯氨酸含量采用茚三酮显色法测定^[18],甜菜碱含量采用非水滴定法测定^[19],可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝染色法测定^[20],可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定^[20]。

1.3.2 抗氧化酶(SOD、CAT、POD)活性的测定

抗氧化酶活性的测定试验样品处理同1.3.1。

SOD活性采用氮蓝四唑光化还原法测定^[20],CAT活性采用紫外分光光度法测定^[20],POD活性采用愈创木酚法测定^[20]。

1.3.3 生物量指标的测定及计算

取胁迫处理后的盛花期饲料油菜整株,去离子水冲洗干净后用吸水纸吸干其表面残留水分,用卷尺测量株高,用天平(0.01 g)称整株鲜重,将根、茎、叶分离,将其放入烘箱中105℃杀青15 min,80℃烘干至恒重,称其干重,每个处理3次重复。

根冠比=地下干重/地上干重

植株相对含水量=(鲜重-干重)/鲜重×100%

1.3.4 植株根、茎、叶中Na⁺、K⁺含量的测定

精确称取植株根、茎、叶各0.01 g置于小坩埚中,放入马弗炉中(550℃)灰化,待灰化完全后,

稀释定容至 100 mL 容量瓶中,经 0.22 μm 滤膜过滤后用离子色谱仪测定 Na^+ 、 K^+ 含量, Na^+ 、 K^+ 的计算参照 Flower 等^[21]的方法。

1.4 数据分析

每个处理生理指标数据采用 3 次重复测定平均值,运用 Excel 2013、SPSS 20.0 对试验数据进行处理和分析,采用 Duncan's 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同浓度 NaCl 胁迫对饲料油菜生长的影响

由表 1 可知,随着 NaCl 胁迫浓度逐渐升高,饲料油菜的鲜重与干重均呈显著下降趋势。NaCl 浓度为 100 mmol/L 时,鲜重和干重与 CK 相比均无显著差异 ($P>0.05$); NaCl 浓度为 250 mmol/L 时,鲜

重和干重分别较 CK 下降 48.88%、38.74%; NaCl 浓度为 350 mmol/L 时,鲜重和干重分别较 CK 下降 67.15%、56.71%,均与 CK 具有显著差异 ($P<0.05$)。NaCl 浓度为 100 mmol/L、250 mmol/L、350 mmol/L 时,各处理株高与 CK 相比,分别降低 27.80%、54.67% 和 71.55%,与 CK 均存在显著差异 ($P<0.05$), NaCl 浓度 ≥ 250 mmol/L 时严重抑制饲料油菜生长,以 350 mmol/L 的 NaCl 抑制效果最为明显。NaCl 浓度为 100 mmol/L 时的根冠比较 CK 增加 17.96%, NaCl 浓度为 250 mmol/L、350 mmol/L 时根冠比较 CK 分别降低 10.76% 和 16.55%,与 CK 相比均存在显著差异 ($P<0.05$)。NaCl 浓度为 100 mmol/L 和 250 mmol/L 时,植株的相对含水量与 CK 相比无显著差异, NaCl 浓度为 350 mmol/L 时,植株的相对含水量较 CK 降

表 1 盐胁迫对饲料油菜生长的影响

处理	鲜重/g	干重/g	株高/cm	根冠比/%	植株相对含水率/%
CK	142.14 \pm 5.19a	18.92 \pm 0.66a	150.00 \pm 3.60a	27.61 \pm 2.04a	86.69 \pm 0.37a
T ₁	127.99 \pm 17.03a	17.18 \pm 1.72a	108.3 \pm 10.96b	32.57 \pm 0.44ab	86.54 \pm 0.45a
T ₂	72.66 \pm 13.52b	11.59 \pm 3.84b	68.00 \pm 4.35c	24.64 \pm 0.33b	84.16 \pm 4.28ab
T ₃	46.69 \pm 8.73c	8.19 \pm 1.02b	42.67 \pm 5.85d	23.04 \pm 4.33b	82.33 \pm 1.02b

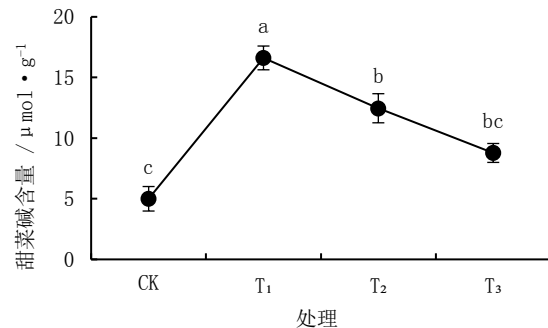
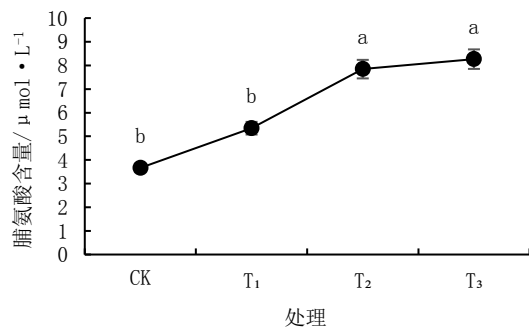
注:小写字母不同表示差异显著 ($P<0.05$)

低 5.03%,与 CK 相比存在显著差异 ($P<0.05$)。结果表明,高浓度的 NaCl 胁迫会影响饲料油菜的根系从土壤中吸收水分。

2.2 不同浓度 NaCl 胁迫对饲料油菜叶片脯氨酸与甜菜碱含量的影响

由图 1 可知,随着 NaCl 浓度的增大,各处理脯氨酸含量整体呈上升趋势。在 NaCl 浓度为 100 mmol/L 时,脯氨酸含量与 CK 相比差异不显著 ($P>0.05$); NaCl 浓度为 250、350 mmol/L 时,脯氨酸含量较 CK 分别增加 113.91% 和 125.44%,与 CK 相比差异显著。在 NaCl 浓度为 100 mmol/L 时脯氨酸

含量增加缓慢,在 NaCl 浓度为 250 mmol/L 时脯氨酸的积累速率明显加快,在 NaCl 浓度为 350 mmol/L 时脯氨酸继续积累,含量高达 8.26 $\mu\text{mol/L}$,较 CK 积累最多。说明 NaCl 浓度在大于 100 mmol/L 时植株受盐胁迫损伤加重,总体上 NaCl 处理浓度越高,饲料油菜叶片中脯氨酸的含量越大。此外,不同浓度盐处理后甜菜碱含量均高于 CK。在 NaCl 浓度为 100 mmol/L 时甜菜碱含量迅速积累,较 CK 增加 232.33%, NaCl 浓度升高至 250 mmol/L 时,甜菜碱含量较 CK 增加 149.33%,与 CK 相比均呈显著性差异;当 NaCl 浓度升高至 350 mmol/L 浓度



注:小写字母不同表示差异显著 ($P<0.05$),下同

图 1 NaCl 胁迫对饲料油菜叶片脯氨酸与甜菜碱含量的影响

时,甜菜碱含量较CK继续增加,但增加幅度有所降低,较CK增加75.58%,与CK相比差异不显著。

2.3 不同浓度 NaCl 胁迫对饲料油菜叶片可溶性糖和可溶性蛋白含量的影响

由图2可知,不同浓度NaCl处理下可溶性糖含量有所波动,总体表现出中低浓度降低和高浓度升高的趋势。即NaCl浓度为100、250 mmol/L

时,可溶性糖含量波动较小,较CK分别下降12.03%和8.29%,与CK相比均无显著性差异,说明在100、250 mmol/L的盐胁迫下饲料油菜叶片中可溶性糖含量无明显变化;NaCl处理浓度为350 mmol/L时,可溶性糖迅速积累,较CK增加112.56%,与CK相比存在显著差异。

从图2还可以看出,可溶性蛋白含量随NaCl

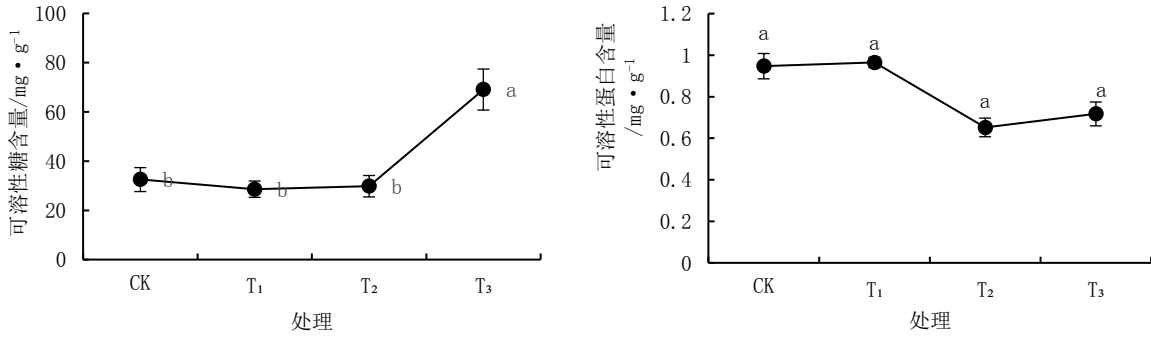


图2 NaCl胁迫对饲料油菜叶片可溶性糖与可溶性蛋白含量的影响

浓度增加处于动态变化之中,表现为低浓度100 mmol/L的处理中,可溶性蛋白的含量稍有增加,中高浓度250、350 mmol/L处理中,可溶性蛋白含量与CK相比分别下降31.15%和24.29%。

2.4 不同浓度 NaCl 胁迫对饲料油菜叶片抗氧化酶活性的影响

由图3可以看出,不同浓度NaCl胁迫下SOD活性总体呈降低趋势,均低于CK。NaCl浓度为100、350 mmol/L时,SOD活性稍有下降,较CK分别降低了5.57%和6.25%,NaCl浓度为250 mmol/L时,

SOD活性较CK降低23.12%,但低盐、中盐和高盐处理下,与CK相比均无显著性差异($P>0.05$),表明不同浓度NaCl处理下SOD活性变化相对较小。

在不同浓度NaCl胁迫下,CAT活性呈现降低趋势,NaCl浓度为100、250、350 mmol/L时,CAT活性较CK分别降低43.76%、65.94%、75.76%,与CK相比均存在显著性差异。其中,NaCl浓度为350 mmol/L时CAT活性下降幅度最大,CAT含量为 1.03×10^4 U/g·min,说明高浓度NaCl持续胁迫会使膜中积累较多氧自由基,破坏膜的完整性。

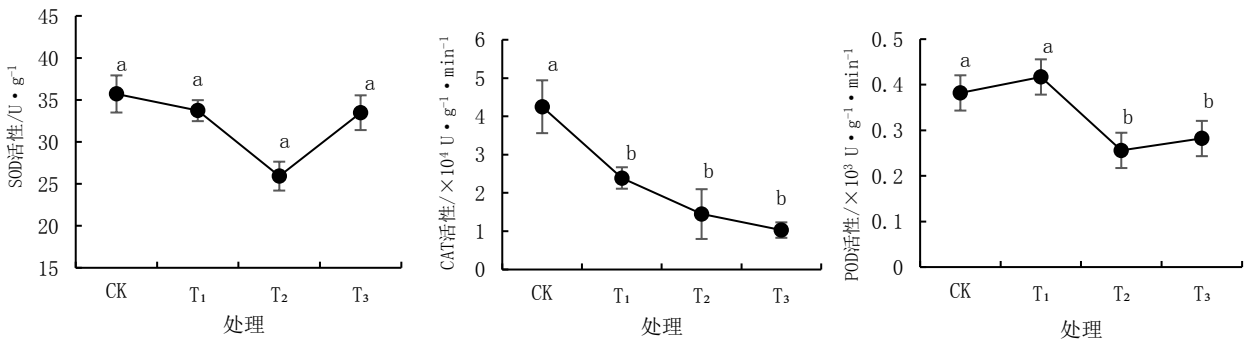


图3 NaCl胁迫对饲料油菜叶片抗氧化酶活性的影响

不同浓度NaCl胁迫对POD活性变化的影响整体上呈先上升后下降的趋势。NaCl浓度为100 mmol/L时,POD活性较CK增加9.16%,与CK相比差异未达显著水平;NaCl浓度为250、350 mmol/L时,POD活性较CK分别降低32.98%和26.18%,与CK相比差异显著。不同浓度NaCl处理POD活性波

动性较大,在中高浓度(≥ 250 mmol/L)下POD活性较CK显著降低。

2.5 不同浓度 NaCl 胁迫对饲料油菜根、茎、叶中 Na⁺、K⁺含量的影响

图4为不同浓度NaCl胁迫对饲料油菜根、茎、叶不同部位Na⁺、K⁺含量的影响。总体来看,不同

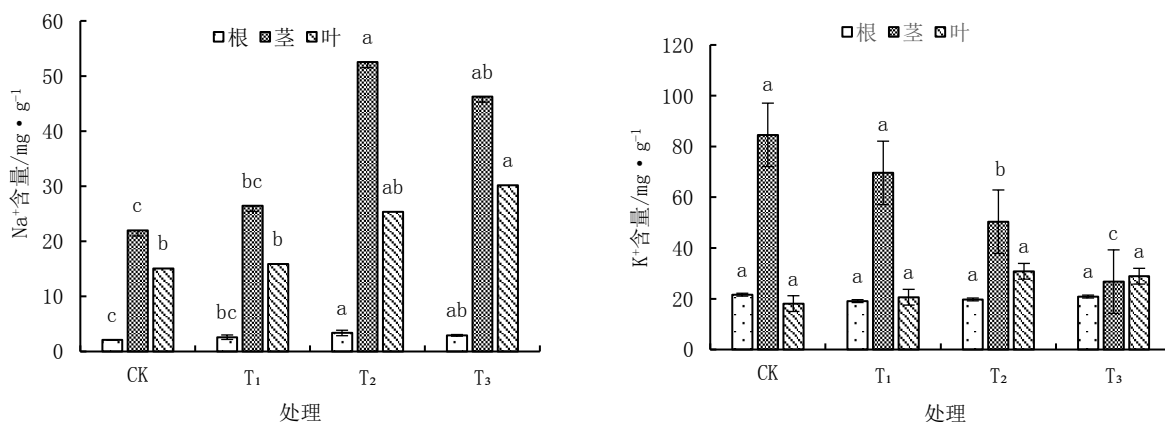


图4 NaCl胁迫对饲料油菜叶片根、茎、叶中Na⁺、K⁺含量的影响

浓度NaCl持续胁迫下不同部位Na⁺含量与CK相比有不同程度的上升,K⁺含量与CK相比有不同程度的下降,K⁺/Na⁺与CK相比有明显下降趋势。NaCl浓度为100 mmol/L时,根和茎中的Na⁺含量较CK分别增加22.56%和20.34%,与CK相比有差异但差异未达显著水平,叶中Na⁺含量与CK相比差异不显著;NaCl浓度为250 mmol/L时,根和茎中的Na⁺含量较CK分别增加58.85%和139.12%,与CK相比存在显著差异,叶中Na⁺含量与CK相比差异未达显著水平;NaCl浓度为350 mmol/L时,根、茎、叶中的Na⁺含量较CK分别增加38.37%、110.61%和100.2%,与CK相比均存在显著性差异,Na⁺含量在不同部位大小顺序为:茎>叶>根。不同浓度NaCl处理下,根和叶中K⁺含量变化相对平稳,与CK相比均无显著差异,NaCl浓度为250、350 mmol/L时,叶中K⁺含量较CK有所增加,但无显著变化;当NaCl浓度为250 mmol/L和350 mmol/L时,根和叶中K⁺含量相当,茎中K⁺含量较CK分别降低40.44%和68.36%,与CK相比存在显著性差异。

3 讨论

3.1 NaCl胁迫对饲料油菜渗透调节物质含量的影响

植物自身会通过一系列复杂的机制和途径,从生长、形态、生理生化等各个角度去适应高盐环境,如通过渗透调节物质生成、抗氧化酶活性诱导、离子选择性积累去适应盐胁迫。植物在盐胁迫下生长会受到抑制,高盐浓度会使植物受到不同程度伤害,如活性氧的生成、细胞质膜结构与功能的破坏、生理代谢过程紊乱等^[22-26]。脯氨酸、可溶性糖、可溶性蛋白及甜菜碱等是植物体内重要的渗透保护剂,脯氨酸含量在一定程度上

能够反映植物的抗逆性^[27],可溶性糖和甜菜碱在植物适应盐分和干旱逆境中起重要作用,能提高细胞渗透调节能力,降低因渗透失水造成对细胞膜、酶及蛋白质结构与功能的伤害^[28-29]。研究发现,随盐胁迫浓度增大植物在积累脯氨酸的同时,糖的合成也增加^[30],本研究中随盐浓度的增大,饲料油菜叶片脯氨酸和可溶性糖含量均有所上升,NaCl浓度为350 mmol/L时,脯氨酸和可溶性糖含量最高,较CK增加最明显;甜菜碱含量随盐浓度增加较CK呈不同程度积累,在NaCl浓度为100 mmol/L时,甜菜碱含量最高达16.61 μmol/g。甜菜碱作为高等植物渗透调节物质,能降低因渗透失水造成的细胞膜及蛋白质结构与功能受损,甜菜碱含量在NaCl浓度为100 mmol/L时达到最高,这可能与饲料油菜在长期盐境中细胞质膜的损害程度有关,研究表明,甜菜碱在作物不同品种或不同器官的积累程度存在一定的差异,三色苜蓿进行盐胁迫处理发现不同生长发育时期积累甜菜碱的水平存在显著差异^[30]。本研究中不同NaCl浓度持续胁迫下,饲料油菜生长受到不同程度抑制,随NaCl浓度升高,地上部和地下部鲜重、干重、株高和植株相对含水量均呈下降趋势,NaCl浓度≥250 mmol/L时对细胞膜造成严重损伤,影响饲料油菜的生长。

3.2 NaCl胁迫对饲料油菜抗氧化酶活性的影响

抗氧化酶系统是植物体内较为重要的抗氧化防御系统,在正常环境下,植物体内活性氧ROS的产生和清除处于动态平衡中,对植物生长发育没有影响,在植物体内SOD、POD和CAT一般是协同作用来清除ROS,植物受到盐胁迫时,体内ROS的动态平衡被打破,当ROS积累超过抗氧化防御系统的清除能力时,ROS的大量积累对植物造成

伤害^[10]。随NaCl浓度的增加POD活性呈先上升后下降的趋势,活性氧的大量积累使POD被激活来清除过多的ROS,NaCl浓度为100 mmol/L时POD活性出现最大值,NaCl浓度为250 mmol/L时POD活性显著降低,表明随NaCl浓度的增加,相关酶基因有过表达后出现衰退的现象;SOD活性呈先降低后增加的趋势,CAT活性呈降低趋势且均低于CK,表明在持续高盐浓度下自由基积累到一定的量后机体蛋白合成受阻、膜脂严重受损,SOD和CAT的基因表达受到影响、系统稳定性降低,清除ROS的能力减弱,此后NaCl胁迫对植物体的伤害程度更大,表现为抑制植株的生长,使饲料油菜变得萎蔫甚至死亡。

3.3 NaCl胁迫对饲料油菜根、茎、叶中Na⁺、K⁺含量的影响

离子在植物正常生长过程中起着重要作用,土壤盐渍化会打破植物体内离子的动态平衡^[11]。在盐胁迫条件下,土壤Na⁺通常会过量渗入植物有机体内,部分Na⁺在根部存留积累,部分Na⁺被装载入木质部随蒸腾流向上运输,在叶片中过量积累,大量Na⁺积累会使细胞的膜系统受损,本研究发 100 mmol/L NaCl胁迫后饲料油菜根、茎和叶中的Na⁺含量均发生不同程度的积累,而K⁺作为重要的无机溶质,对降低植物细胞渗透势和维持水分平衡至关重要^[32-33]。植物通过限制Na⁺进入细胞,并选择性吸收K⁺来维持组织细胞的高K⁺/Na⁺值以保证正常生理代谢^[30],这是盐生植物比较普遍的耐盐机理。在植物抗盐碱中,这种离子选择性吸收和离子平衡比渗透调节物质脯氨酸发挥着更大的作用^[34]。本试验研究结果100 mmol/L NaCl胁迫下叶片中Na⁺含量明显低于K⁺含量,Na⁺含量低从而减少盐胁迫对地上部危害,K⁺含量高,在一定程度上保证了饲料油菜正常代谢活动,这与Shaheen等^[35]的研究结果一致。比较盐胁迫下不同部位离子总量分布得出:茎>叶>根,随着NaCl浓度的增加,饲料油菜根、茎和叶中的Na⁺含量较CK整体呈增加趋势,K⁺含量较CK整体呈下降趋势,茎、叶中K⁺/Na⁺变化显著,说明盐胁迫下饲料油菜体内的离子平衡受到很大影响。

综合前人研究,在低浓度盐胁迫下,饲料油菜在苗期可通过增加根长来获取更多水分,随胁迫强度的不断增加,根长呈下降趋势,同时也抑制了饲料油菜的株高长势^[35];饲料油菜长期处于盐胁迫条件下,一方面,通过体内积累小分子物质(脯氨酸、甜菜碱等)进行渗透调节,另一方面,通

过活性氧清除系统使体内的ROS处于动态平衡状态,使饲料油菜在持续盐境下能够更好地生长^[36]。本试验是在温室条件下进行的单一NaCl胁迫处理的盆栽试验,考虑到新疆盐土种类的复杂程度,在后续试验中将增加不同盐碱类型对饲料油菜生长生理的影响,以及对盐碱胁迫后的饲料油菜根、叶组织进行组学水平的分析,明确甘蓝型饲料油菜耐盐碱机制,进一步挖掘甘蓝型饲料油菜差异表达基因及差异代谢物,为后期饲料油菜耐盐碱品系培育及盐碱地栽培提供参考。

4 结 论

4.1 不同浓度NaCl持续胁迫下,饲料油菜生长受到不同程度的抑制,随着NaCl浓度的升高,地上部和地下部鲜重、干重、株高和植株相对含水量均呈下降趋势,NaCl浓度≥250 mmol/L时对细胞膜造成严重伤害,影响饲料油菜的生长。

4.2 随着NaCl胁迫浓度的增加,植物在积累脯氨酸的同时,可溶性糖的合成也在增加,可溶性蛋白含量先升高后降低,这是逆境胁迫下植物细胞结构和功能遭受伤害后的一种适应性反应,对植物本身起到一定的保护作用。

4.3 随着NaCl浓度的增加,CAT活性总体呈降低趋势,表明在持续高盐浓度下自由基积累到一定的量后机体蛋白合成受阻、膜脂严重受损,SOD呈先降低再增加趋势,表明随着NaCl浓度的增加,相关酶基因有过表达后出现衰退的现象;各处理浓度的POD活性波动性较大、变化规律不完全一致,NaCl浓度为250 mmol/L时,POD活性显著降低,表明随着NaCl浓度的增加POD被激活在清除ROS的过程中发挥主要作用。

随着NaCl浓度的增加,饲料油菜根、茎和叶中的Na⁺含量较CK整体呈增加趋势,K⁺含量较CK整体呈下降趋势,茎、叶中K⁺/Na⁺变化显著,说明盐胁迫下饲料油菜体内的离子平衡受到很大影响。

参考文献:

- [1] 何磊,陆兆华,管博,等.盐碱胁迫对甜高粱种子萌发及幼苗生长的影响[J].东北林业大学学报,2012,40(3):67-71.
- [2] 丁娟,黄镇,张学贤,等.甘蓝型饲料油菜苗期生长阶段对NaCl胁迫的生理响应[J].西北植物学报,2014,34(11):2270-2276.
- [3] Zhu J K. Plant salt tolerance[J]. Trends Plant Science, 2001, 6(2): 66-71.
- [4] 黄昌勇.土壤学(第2版)[M].北京:中国农业出版社,2000:303.

- [5] 田长彦,周宏飞,刘国庆. 21世纪新疆盐渍化调控与农业持续发展研究建议[J]. 干旱地理, 2000, 23(2): 177-180.
- [6] Ward J M, Hirschi K D, Sze H. Plants pass the salt[J]. Trends Plant Science, 2003, 8(5): 200-201.
- [7] 毛桂莲,许兴. 枸杞耐盐突变体的筛选及生理生化分析[J]. 西北植物学报, 2005, 25(2): 275-280.
- [8] 王静磊. 甘蓝型饲料油菜和甘蓝种子萌发响应 NaCl 处理的生理与甲基化的研究[D]. 扬州:扬州大学, 2015.
- [9] 刘斌,张文辉,马闯,等. 不同能源柳无性系对 NaCl 胁迫的生理响应[J]. 生态学报, 2010, 30(4): 895-904.
- [10] 胡慕兰. 不同 NaCl 浓度持续胁迫下饲料油菜幼苗的生理响应[D]. 扬州:扬州大学, 2014.
- [11] 黄华磊,石有明,周燕,等. 油蔬两用饲料油菜栽培技术研究[J]. 吉林农业科学, 2013, 38(2): 84-86, 96.
- [12] 郭瑞,李峰,周际,等. 亚麻响应盐、碱胁迫的生理特征[J]. 植物生态学报, 2016, 40(1): 69-79.
- [13] Flowers T J, Dalmond D. Protein synthesis in halophytes: the influence of potassium, sodium and magnesium in vitro[J]. Plant and Soil, 1992, 146: 153-161.
- [14] 黎咏蜀. 饲用油菜栽培技术及营养价值研究[D]. 重庆:西南大学, 2014.
- [15] 郭丛阳,王天河,杨文元,等. 河西地区麦后复种饲用(绿肥)饲料油菜栽培技术及效益分析[J]. 草业科学, 2008, 25(3): 90-92.
- [16] 阴法庭,张风华. 饲料油菜与玉米秸秆混合青贮营养品质[J]. 草业科学, 2018, 35(7): 1790-1796.
- [17] 文健,刘桂琼,姜勋平,等. 饲用饲料油菜生物量与营养成分测定及其发酵全混合日粮饲喂湖羊效果[J]. 华中农业大学学报, 2018, 37(2): 71-75.
- [18] 刘旻霞,马建祖. 逆境胁迫下的亚高山草甸植物脯氨酸累积特点分析[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2010, 46(2): 101-105.
- [19] 刘志刚,钱捷,杨明康. 甜菜碱含量测定方法研究进展[J]. 江西化工, 2012(3): 9-11.
- [20] 李合生,孙群,赵士杰. 植物生理生化原理及技术[M]. 北京:高等教育出版社, 2000: 2-3.
- [21] Flowe D J, Ludlow M M. Contribution of osmotic adjustment to the dehydrate in tolerance of water-stressed pigeon pea (*Cajanus cajan* (L.) Millsp.) leaves[J]. Plant Cell and Environment, 1986, 9: 33-40.
- [22] Lu C M, Qiu N W, Lu Q T. Does salt stress lead to increased susceptibility of photosystem II to photoinhibition and changes in photosynthetic pigment composition in halophyte *Suaeda salsa* grown outdoors[J]. Plant Science, 2002, 163: 1063-1068.
- [23] 刘巍,于志水,纪纯阳,等. 植物盐胁迫研究进展[J]. 防护林科技, 2008(1): 57-61.
- [24] 曹齐卫,李利斌,孔素萍,等. 不同黄瓜品种幼苗对等渗 $Mg(NO_3)_2$ 和 NaCl 胁迫的生理响应[J]. 应用生态学报, 2015, 26(4): 1171-1178.
- [25] 闫永庆,刘兴亮,王崑,等. 白刺对不同浓度混合盐碱胁迫的生理响应[J]. 植物生态学报, 2010, 34(10): 1213-1219.
- [26] 赵秀娟,韩雅楠,蔡祿. 盐胁迫对植物生理生化特性的影响[J]. 湖北农业科学, 2011, 50(19): 3897-3899.
- [27] 张澂. 氯化钠胁迫对饲料油菜幼苗生理生化指标的影响[J]. 北方园艺, 2012(19): 16-18.
- [28] Liu Y H, Wang X P, Zhang G X, et al. Study on selection of physiological indices for Salt tolerance and comprehensive evaluation of cotton during seedling stage[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(6): 73-78.
- [29] Li M, Zhang J, Li Y J, et al. Effects of salts stress on physiological indexes of Osier variety L0911[J]. Acta Agriculture Jiangxi, 2012, 24(8): 56-58.
- [30] 刘自刚,王志江,方圆,等. NaCl 胁迫对白菜型冬油菜种子萌发和幼苗生理的影响[J]. 中国油料作物学报, 2017, 39(3): 351-359.
- [31] 郝凤,刘晓静,张小磊,等. 混合盐碱胁迫对紫花苜蓿苗期氮磷吸收及生理特性的影响[J]. 中国沙漠, 2015, 35(5): 1268-1274.
- [32] Ruiz K B, Biondi S, Martinez E A, et al. Quinoa—a model crop for understanding salt-tolerance mechanisms in halophytes[J]. Plant Biosystems, 2016, 150(2): 357-371.
- [33] 崔文芳,王俊超,阎春红,等. 耐寒性饲料油菜的品比试验[J]. 吉林农业科学, 2009, 34(1): 47-49.
- [34] Kopitke P M. Interactions between Ca, Mg, Na and K: Alleviation of toxicity in saline solutions[J]. Plant and Soil, 2012, 352(1/2): 353-362.
- [35] Shaheen H L, Iqbal M, Azeem M, et al. K-priming positively modulates growth and nutrient status of salt-stressed cotton (*Gossypium hirsutum*) seedlings[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2016(6): 759-768.
- [36] 万何平. 甘蓝型饲料油菜苗期耐盐相关性状的全基因组关联分析[D]. 武汉:华中农业大学, 2017.

(责任编辑:王 昱)