

不同浓度 NaCl 胁迫条件下马齿苋幼苗生长及叶片部分生理指标的变化

邢锦城, 董 静, 赵宝泉, 王茂文, 刘 冲, 洪立洲^①

(江苏沿海地区农业科学研究所, 江苏 盐城 224002)

摘要: 采用盆栽法, 研究了 0 (CK)、50、100、150 和 200 mmol · L⁻¹ NaCl 胁迫处理 21 d 对马齿苋 (*Portulaca oleracea* Linn.) 幼苗生长的影响, 并分析了胁迫处理 0、1、3、7 和 15 d 时叶片中 O₂⁻ 和 MDA 含量以及 SOD、POD 和 CAT 活性的变化。结果表明: 随 NaCl 浓度的升高, 幼苗株高、根长、单株叶片数、主茎直径以及单株干质量和鲜质量均逐渐降低; 在 50 mmol · L⁻¹ NaCl 胁迫条件下, 幼苗单株干质量和鲜质量及主茎直径均高于对照, 单株叶片数、株高和根长均低于对照且差异均不显著; 而在 100、150 和 200 mmol · L⁻¹ NaCl 胁迫条件下, 幼苗的各项生长指标均低于对照且总体上差异显著。除 50 mmol · L⁻¹ NaCl 处理组外, 随 NaCl 浓度的升高和胁迫时间的延长, 各处理组幼苗叶片中的 O₂⁻ 和 MDA 含量总体上逐渐提高且均显著高于对照。随胁迫时间延长, 各处理组叶片的 SOD 和 POD 活性均呈先高后低的变化趋势, 且 NaCl 浓度越高酶活性变幅越大; 其中, 100、150 和 200 mmol · L⁻¹ NaCl 处理组的 SOD 和 POD 活性在处理前期和中期 (1、3 和 7 d) 均显著高于对照, 而在处理后期 (15 d) 则显著低于对照。随胁迫时间延长, 在 50、100 和 150 mmol · L⁻¹ NaCl 胁迫条件下叶片 CAT 活性呈先高后低的变化趋势, 其中, 50 和 100 mmol · L⁻¹ NaCl 胁迫条件下 CAT 活性均显著高于对照; 而在 200 mmol · L⁻¹ NaCl 胁迫条件下 CAT 活性则逐渐降低且均显著低于对照。综合分析结果显示: 高浓度 NaCl 胁迫明显抑制马齿苋幼苗生长, 并导致叶片抗氧化酶活性降低; 而低浓度 NaCl 胁迫对其幼苗生长及部分生理指标均无明显影响, 显示苗期马齿苋对 NaCl 胁迫具有一定的耐性。

关键词: 马齿苋; 耐盐性; NaCl 胁迫; 生长指标; 抗氧化酶活性; 苗期

中图分类号: Q945.78 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2015)04-0069-07

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2015.04.09

Change on seedling growth and some physiological indexes in leaf of *Portulaca oleracea* under NaCl stress with different concentrations XING Jincheng, DONG Jing, ZHAO baoquan, WANG Maowen, LIU Chong, HONG Lizhou^① (Institute of Agricultural Sciences in Coastal Area of Jiangsu, Yancheng 224002, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2015, 24(4): 69-75

Abstract: Effects of 0 (CK), 50, 100, 150 and 200 mmol · L⁻¹ NaCl stressing for 21 d on seedling growth of *Portulaca oleracea* Linn. were studied by pot culture method, also, changes in contents of O₂⁻ and MDA, and activities of SOD, POD and CAT in leaf were analyzed when stressed for 0, 1, 3, 7 and 15 d. The results show that seedling height, root length, leaf number per plant and diameter of main stem, and fresh and dry weights per plant decrease gradually as rising of NaCl concentration; under stress of 50 mmol · L⁻¹ NaCl, fresh and dry weights per plant, diameter of main stem are higher than those of the control, leaf number per plant, seedling height and root length are lower than those of the control, with no significant difference; while, under stresses of 100, 150 and 200 mmol · L⁻¹ NaCl, these growth indexes all are lower than those of the control, generally there is significant difference. Generally, as rising of NaCl concentration and prolonging of stressing time, contents of O₂⁻ and MDA in leaf of seedlings in all treating groups increase gradually and are significantly higher than those of the control except the

收稿日期: 2015-03-27

基金项目: 江苏省农业科技自主创新探索类项目[CX(13)5083]; 江苏省自然科学基金面上项目(BK20151301)

作者简介: 邢锦城(1983—), 男, 山东滕州人, 硕士, 助理研究员, 主要从事植物逆境生理方面的研究。

^① 通信作者 E-mail: ychonglz@163.com

treating group of $50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl. As prolonging of stressing time, activities of SOD and POD in leaf of seedlings in all treating groups appear a change trend of first high and then low, and the higher NaCl concentration the bigger changing range of enzyme activity. In which, activities of SOD and POD in treating groups of 100, 150 and $200 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl at early and middle states (1, 3 and 7 d) of stressing treatment are significantly higher and at later state (15 d) are significantly lower than those of the control. As prolonging of stressing time, CAT activity in leaf appears a change trend of first high and then low under stresses of 50, 100 and $150 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl, in which, CAT activity in treating groups of 50 and $100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl is all significantly higher than that of the control, but under stress of $200 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl, CAT activity decreases gradually and is significantly lower than that of the control. The result of comprehensive analysis indicates that NaCl stress with high concentration obviously inhibits growth of *P. oleracea* seedling and causes to decreasing of antioxidant enzyme activity in leaf, while NaCl stress with low concentration has no obvious effect on growth and some physiological indexes of *P. oleracea* seedling, meaning that *P. oleracea* at seedling stage possesses a certain tolerance to NaCl stress.

Key words: *Portulaca oleracea* Linn.; salt tolerance; NaCl stress; growth index; antioxidant enzyme activity; seedling stage

土壤盐胁迫是导致农作物减产的主要非生物因子之一^[1]。据统计,全世界盐碱地总面积约 $9.55 \times 10^8 \text{ hm}^2$, 占全球陆地总面积的 7.26%^[2]。随水资源的日趋匮乏、化肥使用量的增加以及水源和土壤污染的加重,全球将有 20% 的耕地和近半数的灌溉土地不同程度面临土壤盐渍化的威胁^[3]。为了加强盐渍化土壤的有效利用,近年来人们对林木、农作物和野生植物的耐盐性进行了大量研究,并在盐胁迫对植物的伤害机制、植物对盐胁迫的适应性及生长和生理响应、以及提高植物耐盐性等方面获得了一定的研究成果^[4-6]。

马齿苋 (*Portulaca oleracea* Linn.) 为马齿苋科 (Portulacaceae) 马齿苋属 (*Portulaca* Linn.) 一年生草本植物,其茎叶营养丰富、药食兼用,在沿海滩涂地区广泛分布,是盐碱滩涂土地农业化利用的重要植物资源。目前,国内外学者对于马齿苋的研究主要集中在药用成分分析及其药理活性等方面,对于马齿苋的耐盐性及其对盐胁迫的适应性尚缺乏深入研究。本项目组前期的研究结果表明:在一定浓度 NaCl 胁迫条件下,马齿苋幼苗能够保持较高的净光合速率,表现出较强的耐盐性^[7],但马齿苋耐盐性的生理机制目前尚不明确。

鉴于此,作者采用盆栽法对不同浓度 NaCl 胁迫条件下马齿苋幼苗的生长状况进行分析,并比较了不同处理时段马齿苋幼苗部分生理生化指标的变化,以期探究盐胁迫对马齿苋幼苗的毒害作用、明确马齿苋幼苗的耐盐机制,为扩展马齿苋在盐渍土壤上的开发种植及其耐盐品种选育和栽培技术研究提供基础实

验数据。

1 材料和方法

1.1 材料

供试马齿苋品种‘苏马齿苋 1 号’(‘Sumachixian No. 1’)种子由江苏沿海地区农业科学研究所提供。种子用质量分数 0.1% HgCl_2 消毒 10 min,充分冲洗后播种于装满基质的 50 孔穴盘中;栽培基质为按体积比 1:1:1 配制的蛭石-珍珠岩-石英砂混合基质,用 1/2 Hoagland 营养液浇灌;将穴盘置于 GZX-400BS-III 型人工气候箱(上海新苗医疗器械有限公司)中发芽,昼温和夜温分别为 $28 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $25 \text{ }^\circ\text{C}$,相对湿度 60%、光照时间 $12 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$ 、光照强度 $622 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。待幼苗进入四叶期时进行间苗,每个穴盘定植幼苗 1 株,转入玻璃温室中于自然光照条件下培养;待幼苗株高约 15 cm 时,选取长势一致的幼苗用于 NaCl 胁迫处理。

1.2 方法

1.2.1 NaCl 胁迫处理 用去离子水将供试幼苗冲洗干净后,将其固定在塑料周转箱中并置于玻璃温室,在自然光照条件下用 1/2 Hoagland 营养液预培养 7 d 后进行 NaCl 胁迫处理。用 1/2 Hoagland 营养液配制 NaCl 处理液,处理液中 NaCl 终浓度分别为 0(CK)、50、100、150 和 $200 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。胁迫处理共持续 21 d,期间每 5 天更换 1 次处理液,每处理 10 株幼苗,各 5 次重复。

1.2.2 生长指标测定 在胁迫处理 21 d 时,每处理

随机选取3株幼苗,测定幼苗的单株叶片数、株高、根长、主茎直径、单株鲜质量和单株干质量。

单株叶片数为整株幼苗的叶片总数量。用精度0.1 cm直尺测量幼苗的株高和根长,株高为从根颈部到生长点的长度,根长为从根颈部到根尖的长度。用精度0.1 mm游标卡尺测量幼苗主茎直径,主茎直径即为根与茎结合部的直径。幼苗用自来水冲洗干净,吸干表面水分后分别用精度10 mg的MP500B型电子天平(上海良平仪器仪表有限公司)称量全株鲜质量;然后置于105℃杀青2 h,于60℃烘干至恒质量,称量全株干质量。上述各指标的测量结果均以平均值计。

1.2.3 生理指标测定 分别在胁迫处理的0、1、3、7和15 d时,在各处理组中随机选取3株幼苗,采集植株从下至上的第3至第7位叶片,混合后取5.0 g,用于丙二醛(MDA)和超氧自由基(O_2^-)含量测定;取植株从下至上的第8至第11位叶片,混合后取6.0 g,用于抗氧化酶活性测定。

称取0.5 g鲜叶,剪碎后加入0.05 mol·L⁻¹磷酸缓冲液(含质量体积分数1% PVP, pH 7.8)5.0 mL,于冰浴中研磨至匀浆;4℃、12 000 g离心15 min;上清液于4℃保存,用于超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性及 O_2^- 含量的测定。

参考文献[8]的硫代巴比妥酸法提取并测定MDA含量;参照甘海峰等[2]的方法测定 O_2^- 含量;采用氮蓝四唑(NBT)法[9]测定SOD活性,用上海精科754N型紫外分光光度计测定波长560 nm处的吸光度,以抑制50% NBT光化还原为1个酶活性单位;采用愈创木酚显色法[10]测定POD活性,用上海精科754N型紫外分光光度计测定波长470 nm处的吸光度,以1 min内 A_{470} 变化0.01为1个酶活性单位;采

用紫外吸收法[9]测定CAT活性,用上海精科754N型紫外分光光度计测定波长240 nm处的吸光度,以1 min内 A_{240} 减少0.1为1个酶活性单位。上述各项指标均重复测定3次以上。

1.3 数据统计和分析

采用EXCEL 2010和SPSS12.0统计分析软件对实验数据进行处理,并计算平均值;采用“t-检验”进行差异显著性分析。

2 结果和分析

2.1 不同浓度 NaCl 胁迫对马齿苋幼苗生长的影响

在不同浓度NaCl胁迫条件下马齿苋幼苗各项生长指标的测定结果见表1。

结果显示:在50 mmol·L⁻¹ NaCl胁迫条件下,马齿苋幼苗的单株鲜质量、株高、根长和单株叶片数略高于或略低于对照,但与对照均无显著差异($P > 0.05$)。在100、150和200 mmol·L⁻¹ NaCl胁迫条件下,幼苗的单株鲜质量、株高、根长和单株叶片数均随NaCl浓度升高而降低,且多数指标与对照差异显著($P < 0.05$);其中,在200 mmol·L⁻¹ NaCl胁迫条件下,幼苗的单株鲜质量、株高、根长和单株叶片数分别较对照降低53.5%、24.6%、44.2%和38.5%,差异达显著水平。随NaCl浓度升高,单株干质量和主茎直径呈低浓度时增大,中、高浓度时减小的变化趋势,且均在50 mmol·L⁻¹ NaCl胁迫条件下达到最高,分别较对照增加4.8%和5.2%,差异显著;在100、150和200 mmol·L⁻¹ NaCl胁迫条件下,单株干质量和主茎直径均显著低于对照,且在200 mmol·L⁻¹ NaCl胁迫条件下最低,较对照分别降低35.7%和19.2%。

实验结果表明:低浓度NaCl胁迫对马齿苋幼苗的主茎生长和干质量有一定的促进作用,但因细胞失

表1 不同浓度NaCl胁迫对马齿苋幼苗各项生长指标的影响($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 1 Effect of NaCl stress with different concentrations on different growth indexes of *Portulaca oleracea* Linn. seedling ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

NaCl 浓度/mmol·L ⁻¹ Concentration of NaCl	单株鲜质量/g Fresh weight per plant	单株干质量/g Dry weight per plant	株高/cm Plant height	根长/cm Root length	主茎直径/mm Main stem diameter	单株叶片数 Leaf number per plant
0 (CK)	12.50±0.94a	0.84±0.09b	29.13±3.35a	15.25±1.86a	5.98±0.25b	41.0±4.0a
50	12.65±0.85a	0.88±0.10a	28.18±3.58a	15.00±1.70a	6.29±0.55a	40.2±5.2a
100	11.86±1.12b	0.79±0.08c	27.62±3.45ab	13.10±0.95b	5.71±0.22c	38.3±2.6ab
150	8.56±0.32c	0.62±0.12d	25.60±2.65b	10.70±1.20c	5.21±0.47d	32.2±1.7b
200	5.81±0.80d	0.54±0.14d	21.97±2.33c	8.51±1.05d	4.83±0.33e	25.2±2.3c

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示差异显著($P < 0.05$) Different small letters in the same column indicate the significant difference ($P < 0.05$).

水等原因导致其幼苗鲜质量无显著变化。高浓度 NaCl 处理对马齿苋地上和地下部分的生长均有抑制作用,且 NaCl 浓度越高抑制作用越明显。在所测定的生长指标中,单株鲜质量和根长的降幅最大、受到的抑制作用最显著,表明 NaCl 胁迫通过抑制马齿苋幼苗根的生长阻碍其对养分、水分及矿物质的吸收,从而对其地上部分的生长产生一定的抑制作用。

2.2 不同浓度 NaCl 胁迫条件下马齿苋幼苗叶片中 O_2^- 和 MDA 含量的变化

在不同浓度 NaCl 胁迫条件下,不同处理时间马齿苋幼苗叶片中超氧自由基(O_2^-)和丙二醛(MDA)含量的变化分别见表2和表3。

2.2.1 O_2^- 含量的变化 由表2可见:各处理组叶片的初始 O_2^- 含量以及对对照组叶片在各时间段的 O_2^- 含量均无显著差异;随 NaCl 浓度升高及胁迫时间延长,各处理组叶片的 O_2^- 含量总体呈现逐渐升高的趋势,且除 50 mmol · L⁻¹ NaCl 处理组外,均显著高于对照及各自的初始值。表明 NaCl 胁迫破坏了马齿苋叶片细胞内活性氧产生和分解的平衡,导致叶片中活性氧积累。随 NaCl 浓度的升高, O_2^- 在叶片中迅速积累,使其含量持续增加,且在 100、150 和 200 mmol · L⁻¹ NaCl 胁迫条件下叶片 O_2^- 含量均高于 50 mmol · L⁻¹ NaCl 胁迫

处理组及对照,差异均达到显著水平。

随 NaCl 胁迫时间延长,叶片 O_2^- 含量在较低浓度(50 和 100 mmol · L⁻¹) NaCl 胁迫条件下呈先快速增加后无显著变化的趋势,在较高浓度(150 和 200 mmol · L⁻¹) NaCl 胁迫条件下呈持续增加的变化趋势。在 50 和 100 mmol · L⁻¹ NaCl 胁迫条件下,叶片 O_2^- 含量均在处理 3 d 时达到最高,其后仅略降低;而在 150 和 200 mmol · L⁻¹ NaCl 胁迫条件下,叶片 O_2^- 含量逐渐升高并均在处理 15 d 时达到最高。表明在低浓度 NaCl 胁迫条件下,随胁迫时间延长,马齿苋叶片细胞内的活性氧产生和分解逐渐达到新的平衡;而在高浓度 NaCl 胁迫条件下,叶片细胞中的活性氧产生速率始终大于其分解速率,导致叶片中 O_2^- 积累,使其含量逐渐升高。

2.2.2 MDA 含量的变化 由表3可见:各处理组叶片初始 MDA 含量以及对对照组叶片在各时间段的 MDA 含量均无显著差异;随 NaCl 浓度的升高及胁迫时间延长,各处理组叶片的 MDA 含量总体呈现逐渐升高的趋势,且除 50 mmol · L⁻¹ NaCl 处理组外,均显著高于对照及各自的初始值。表明 NaCl 胁迫可引起马齿苋叶片细胞内的膜脂过氧化反应。

随 NaCl 浓度的升高,MDA 含量逐渐提高。在

表2 不同浓度 NaCl 胁迫条件下马齿苋幼苗叶片 O_2^- 含量的变化 ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 2 Change of O_2^- content in leaf of *Portulaca oleracea* Linn. seedling under NaCl stress with different concentrations ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

NaCl 浓度/mmol · L ⁻¹ Concentration of NaCl	不同处理时间叶片的 O_2^- 含量/ $\mu\text{mol} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ O_2^- content in leaf at different treatment times				
	0 d	1 d	3 d	7 d	15 d
0(CK)	6.84±0.34e	6.72±0.45e	7.18±0.26e	6.85±0.53e	7.22±0.25e
50	6.98±0.75e	7.25±0.29e	8.25±0.25d	8.14±0.30d	8.07±0.62d
100	6.67±0.26e	10.25±1.16bc	12.35±0.62b	12.22±1.87b	12.33±0.73b
150	7.02±0.28e	11.58±1.64b	14.58±1.24ab	15.87±1.05ab	16.64±0.92ab
200	6.85±0.34e	12.65±0.38b	16.88±1.88ab	18.35±0.98a	20.45±2.22a

¹⁾ 不同的小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters indicate the significant difference ($P < 0.05$).

表3 不同浓度 NaCl 胁迫条件下马齿苋幼苗叶片 MDA 含量的变化 ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 3 Change of MDA content in leaf of *Portulaca oleracea* Linn. seedling under NaCl stress with different concentrations ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

NaCl 浓度/mmol · L ⁻¹ Concentration of NaCl	不同处理时间叶片的 MDA 含量/ $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ MDA content in leaf at different treatment times				
	0 d	1 d	3 d	7 d	15 d
0(CK)	1.46±0.36e	1.44±0.13e	1.52±0.05e	1.50±0.35e	1.55±0.62e
50	1.41±0.14e	1.42±0.39e	1.51±0.54e	1.65±0.20d	1.54±0.36e
100	1.52±0.51e	1.68±0.42d	2.19±0.25c	2.24±0.38c	1.81±0.32cd
150	1.51±0.25e	1.91±0.34cd	2.66±0.43bc	2.93±0.18b	2.85±0.14b
200	1.54±0.44e	2.32±0.22c	3.44±0.31a	3.75±0.24a	3.83±0.52a

¹⁾ 不同的小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters indicate the significant difference ($P < 0.05$).

50、100、150 和 200 mmol · L⁻¹ NaCl 胁迫条件下,叶片 MDA 含量分别在胁迫处理 7、7、7 和 15 d 时达到最高,分别较各自的初始值增加了 17.0%、47.4%、94.0% 和 148.7%,与对照差异显著。随 NaCl 胁迫时间的延长,在低浓度(50 mmol · L⁻¹) NaCl 胁迫条件下,叶片 MDA 含量呈现先增加后降低的趋势,在处理 7 d 时达到最高且随后逐渐降低,处理 15 d 时叶片 MDA 含量与对照无显著差异;而在中、高浓度(100、150 和 200 mmol · L⁻¹) NaCl 胁迫条件下,马齿苋叶片中 MDA 含量随处理时间延长逐渐增加,均与对照有显著差异,且 NaCl 浓度越高 MDA 含量增幅越大。表明低浓度 NaCl 胁迫条件下,马齿苋叶片细胞质膜的氧化损伤随处理时间延长逐渐被修复;而中、高浓度 NaCl 胁迫则引发其细胞质膜的持续氧化损伤。

2.3 不同浓度 NaCl 胁迫条件下马齿苋幼苗叶片中抗氧化酶活性的变化

在不同浓度 NaCl 胁迫条件下,不同处理时间马齿苋幼苗叶片中超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性的变化分别见表 4、表 5 和表 6。

2.3.1 SOD 活性的变化 由表 4 可知:各处理组叶片初始 SOD 活性以及对照组叶片在各时间段的 SOD 活性均无显著差异;且除 50 mmol · L⁻¹ NaCl 处理组

外,随 NaCl 浓度升高及胁迫时间延长,各处理组叶片的 SOD 活性显著高于或低于对照及各自的初始值。随处理时间延长,各处理组叶片的 SOD 活性呈现先高后低的变化趋势,且 NaCl 浓度越高 SOD 活性变幅越大。在 50 mmol · L⁻¹ NaCl 胁迫条件下,叶片 SOD 活性在处理 3 d 时达到最高,较对照升高 17.8%,随后降低且处理 7 d 后与对照无显著差异。这一变化趋势与叶片 O₂⁻ 含量的变化趋势较为一致(表 2),表明作为 SOD 的底物,O₂⁻ 含量的提高诱导了 SOD 活性的升高、增强了植物抵御胁迫的能力。当 NaCl 浓度分别为 100、150 和 200 mmol · L⁻¹ 时,叶片的 SOD 活性均在处理 1 d 时达到最高,分别较对照增加 50.4%、138.7% 和 195.5%,且均显著高于对照;此后 SOD 活性快速下降,处理 15 d 后均显著低于对照,分别较对照降低 11.5%、23.6% 和 38.3%。表明高浓度 NaCl 胁迫引起叶片中 O₂⁻ 的大量积累并在短时间内诱导叶片中 SOD 活性的迅速升高;而随胁迫时间的延长,细胞中 O₂⁻ 积累量超过一定范围,导致细胞损伤,使 SOD 活性迅速下降,直至低于对照。

2.3.2 POD 活性的变化 由表 5 可知:在不同浓度 NaCl 胁迫条件下,马齿苋叶片中 POD 活性的变化趋势与 SOD 活性的变化趋势基本一致,各处理组叶片的初始 POD 活性以及对照组叶片在各时间段的 POD

表 4 不同浓度 NaCl 胁迫条件下马齿苋幼苗叶片 SOD 活性的变化($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 4 Change of SOD activity in leaf of *Portulaca oleracea* Linn. seedling under NaCl stress with different concentrations ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

NaCl 浓度/mmol · L ⁻¹ Concentration of NaCl	不同处理时间叶片的 SOD 活性/U · g ⁻¹ SOD activity in leaf at different treatment times				
	0 d	1 d	3 d	7 d	15 d
0 (CK)	69.25±9.65e	73.55±7.13e	72.86±8.28e	74.62±9.26e	68.35±8.18e
50	72.15±5.05e	79.64±11.25de	85.85±13.63d	71.66±7.25e	72.85±11.57e
100	75.28±8.32e	110.65±15.45c	102.45±11.05cd	88.92±7.05d	60.50±6.25f
150	74.29±6.55e	175.55±19.50ab	140.25±15.50b	115.83±13.13c	52.25±12.85f
200	77.26±12.25e	217.35±15.58a	156.13±14.05b	117.40±8.25c	42.18±7.25f

¹⁾ 不同的小写字母表示差异显著($P < 0.05$) Different small letters indicate the significant difference ($P < 0.05$).

表 5 不同浓度 NaCl 胁迫条件下马齿苋幼苗叶片 POD 活性的变化($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 5 Change of POD activity in leaf of *Portulaca oleracea* Linn. seedling under NaCl stress with different concentrations ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

NaCl 浓度/mmol · L ⁻¹ Concentration of NaCl	不同处理时间叶片的 POD 活性/U · g ⁻¹ · min ⁻¹ POD activity in leaf at different treatment times				
	0 d	1 d	3 d	7 d	15 d
0 (CK)	85.43±12.35e	82.36±8.15e	80.72±4.53e	81.65±7.75e	86.35±9.82e
50	79.63±9.64e	97.71±7.55d	91.50±6.75e	82.55±11.08e	88.43±11.35e
100	84.45±11.15e	112.65±13.62c	109.56±6.84c	107.50±16.35c	73.18±5.44ef
150	86.15±13.26e	135.52±10.50a	124.23±8.85b	95.85±8.75d	66.88±3.55f
200	82.44±5.43e	146.41±15.52a	122.48±11.03b	96.87±6.98d	38.75±5.15f

¹⁾ 不同的小写字母表示差异显著($P < 0.05$) Different small letters indicate the significant difference ($P < 0.05$).

表6 不同浓度 NaCl 胁迫条件下马齿苋幼苗叶片 CAT 活性的变化 ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾Table 6 Change of CAT activity in leaf of *Portulaca oleracea* Linn. seedling under NaCl stress with different concentrations ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

NaCl 浓度/ $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ Concentration of NaCl	不同处理时间叶片的 CAT 活性/ $\text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ CAT activity in leaf at different treatment times				
	0 d	1 d	3 d	7 d	15 d
0 (CK)	148.78±13.65d	152.46±13.53d	145.38±18.75d	149.63±9.62d	155.42±14.35d
50	152.69±17.55d	202.38±23.25b	217.88±25.62b	179.35±9.88c	169.52±8.91cd
100	157.84±16.65d	228.65±15.52a	235.78±18.75a	198.75±22.45b	187.33±20.62c
150	149.63±21.42d	195.98±19.85bc	176.25±19.26c	129.79±13.62e	118.45±8.65e
200	159.62±12.76d	140.75±18.52de	127.63±6.95e	105.45±8.79f	104.38±5.41f

¹⁾ 不同的小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters indicate the significant difference ($P < 0.05$).

活性均无显著差异。随 NaCl 浓度升高和胁迫时间延长,叶片 POD 活性总体呈先升高后降低的变化趋势,且 NaCl 浓度越高 POD 活性变幅越大。在 50、100、150 和 200 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 胁迫条件下,叶片的 POD 活性均在处理 1 d 时达到最高,分别较对照增加了 18.6%、36.8%、64.5% 和 77.8%,差异显著;此后各处理组 POD 活性快速下降,其中 50 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理组的 POD 活性与对照无显著差异,而其他处理组的 POD 活性与对照均有显著差异,至处理 15 d 时,100、150 和 200 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 处理组的 POD 活性降至最低,较对照分别降低 15.3%、22.5% 和 55.1%。实验结果表明:NaCl 胁迫能够在短时间内诱导 POD 活性升高,但高浓度、长时间的 NaCl 胁迫则可导致 POD 活性降低。

2.3.3 CAT 活性的变化 由表 6 可知:各处理组叶片的初始 CAT 活性以及对照组叶片在各时间段的 CAT 活性均无显著差异。随 NaCl 浓度的提高,叶片 CAT 活性均呈先升高后降低的变化趋势;而随处理时间延长,叶片 CAT 活性在 50、100 和 150 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 胁迫条件下呈现先升高后降低的变化趋势,在 200 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 胁迫条件下则呈现逐渐降低的变化趋势。在 50 和 100 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 胁迫条件下 CAT 活性在处理 3 d 时达到最高,分别较对照提高了 49.9% 和 62.2%,其后逐渐降低,但均高于对照,且总体上与对照差异显著;在 150 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 胁迫条件下 CAT 活性在处理 1 d 时达到最高,较对照提高 28.5%,其后逐渐降低且在处理 7 和 15 d 时低于对照,且各时间段的 CAT 活性与对照均有显著差异;在 200 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 胁迫条件下叶片 CAT 活性持续下降,且在处理的各时间段均低于对照,其中在处理的 3、7 和 15 d 时与对照均有显著差异,并在处理 15 d 时降至最低,仅为对照的 32.8%。实验结果表明:较低

浓度及短期的 NaCl 胁迫能够诱导马齿苋叶片 CAT 活性的升高,以抵御胁迫造成的过氧化伤害;而较高浓度及较长时间的 NaCl 胁迫则对叶片产生严重伤害,导致 CAT 活性的降低。

3 讨论和结论

盐分对植物最直接和最明显的胁迫效应就是抑制植株生长,抑制程度既取决于植物的抗盐能力、又受到盐胁迫水平的影响。幼苗形态建成是植物生长的关键时期,也是植物对 NaCl 胁迫最为敏感的时期^[11]。本研究结果表明:较低浓度 (50 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) NaCl 胁迫对马齿苋幼苗生长无明显的抑制作用,反而对马齿苋幼苗生长有一定促进作用。在 NaCl 胁迫条件下马蔺 [*Iris lactea* var. *chinensis* (Fisch.) Koidz.] 幼苗生长量的变化也有此规律^[12]。低浓度 NaCl 胁迫能够促进马齿苋幼苗主茎直径增加和干物质的积累,可能与马齿苋幼苗为了应对渗透胁迫而增大了矿质元素的吸收量并合成可溶性有机物^[13]有关。较高浓度的 NaCl 胁迫 (100 和 200 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) 对马齿苋幼苗生长和生物量积累均有明显的抑制效应,洪立洲等^[7]对马齿苋的相关研究也得出了相似的结论;并且,在本研究涉及的生长指标中,株高和根长受高浓度 NaCl 胁迫的抑制效果最显著,这些现象均表明马齿苋幼苗地下部分(根)和地上部分(茎)对高浓度 NaCl 胁迫比较敏感。这可能与高浓度 NaCl 胁迫阻碍了根对水分和矿质营养的吸收并抑制了植物的光合作用有关;同时也说明植株在 NaCl 胁迫条件下可调整其生长和生物量分配策略以适应胁迫环境^[14]。

盐胁迫能够扰乱植物体内活性氧产生和清除的平衡、引起活性氧积累和质膜过氧化,从而使细胞内的酶失活,并进一步损伤细胞膜的结构和功能^[15-16]。

NaCl 胁迫条件下马齿苋叶片中超氧自由基(O_2^-)和丙二醛(MDA)含量的变化具有较高的一致性,表明 NaCl 处理打破了马齿苋叶片活性氧与其清除系统之间的平衡,使 O_2^- 逐渐积累,引发膜脂过氧化作用,造成膜系统损伤。低浓度 NaCl 胁迫造成的活性氧与其清除系统之间的失衡是暂时的,随处理时间的延长 O_2^- 含量和膜系统的损伤程度逐渐降低,说明低浓度 NaCl 胁迫引发的 O_2^- 积累和膜系统损伤是可逆的;而在高浓度 NaCl 胁迫条件下,处理时间越长, O_2^- 含量和膜系统的损伤程度越大,因而,由高浓度 NaCl 胁迫引发的 O_2^- 积累和膜系统的损伤是不可逆的。

抗氧化酶系统作为植物体内抑制活性氧基团产生及清除活性氧的重要酶系统,其活性与植物的抗逆性密切相关,其中,超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)是主要的抗氧化酶类,均具有清除活性氧自由基、保护膜系统完整性的作用,是重要的植物抗逆指标^[17]。因此,作者通过测定马齿苋幼苗叶片中的 O_2^- 和 MDA 含量以及 SOD、POD 和 CAT 活性的变化,以期探讨马齿苋耐盐性的生理生化机制。研究表明:除 200 mmol · L⁻¹ NaCl 胁迫条件下 CAT 活性持续下降外,其他处理组的抗氧化酶活性均受 NaCl 胁迫诱导而呈现先升高后降低的变化趋势,这与沙棘(*Hippophae rhamnoides* Linn.)、高羊茅(*Festuca arundinacea* Linn.) 和黑麦(*Secale cereale* Linn.) 等植物受盐胁迫后的抗氧化酶活性变化规律^[18-20]一致。同时,提高抗氧化酶活性能否有效缓解 NaCl 胁迫造成的活性氧损伤还与 NaCl 胁迫水平相关。在低浓度(0 和 50 mmol · L⁻¹) NaCl 胁迫条件下,随马齿苋幼苗叶片中抗氧化酶活性的提高和胁迫时间的延长, O_2^- 和 MDA 含量逐渐降低,表明细胞损伤得到修复,马齿苋幼苗对 NaCl 胁迫的适应能力有所提高;但若 NaCl 浓度(100、150 和 200 mmol · L⁻¹)超出马齿苋的耐受范围,虽然 SOD、POD 和 CAT 活性在短期内有较大提高,但叶片中的 O_2^- 和 MDA 含量却始终维持在较高水平;而且,随着胁迫时间延长,叶片的抗氧化酶活性也大幅下降。导致这一现象的主要原因可能为:由于抗氧化酶系统的调节能力有限,高浓度 NaCl 胁迫条件下马齿苋体内活性氧的产生速率远大于抗氧化酶活性的提升速率,使细胞内的超氧自由基含量呈持续升高的趋势,引起膜脂的过氧化和细胞膜结构和功能的不可逆损伤,并由此造成抗氧化酶活性

的降低和活性氧的加速积累。

综上所述,NaCl 胁迫对马齿苋幼苗生长及生理生化指标的影响与胁迫水平和胁迫时间密切相关。低浓度(小于 50 mmol · L⁻¹) NaCl 胁迫对马齿苋幼苗的正常生长无明显的抑制效应,并对其主茎增粗和干物质积累有一定的促进作用;且随胁迫时间的延长,NaCl 胁迫诱发的 O_2^- 和 MDA 的积累能够在抗氧化酶系统的协同作用下逐渐被清除,表明马齿苋幼苗具有一定的耐盐性。而高浓度(100 ~ 200 mmol · L⁻¹) NaCl 胁迫则可显著抑制马齿苋幼苗的生长,其中对株高和根长的抑制作用最显著;随胁迫时间的延长,马齿苋叶片中 SOD、POD 和 CAT 活性呈先升后降的变化趋势,但由于抗氧化酶系统的调节能力有限,NaCl 胁迫诱发 O_2^- 和 MDA 含量的持续增加,造成细胞膜结构和功能的不可逆损伤,最终导致马齿苋幼苗的生长受到抑制。

参考文献:

- [1] ZHU J K. Plant salt tolerance[J]. Trends in Plant Science, 2001, 6: 66-71.
- [2] 甘海峰,刘可慧,傅翠娜,等. NaCl 胁迫对不同柑橘砧木品种抗氧化系统的影响[J]. 生态环境学报, 2010, 19(1): 183-187.
- [3] 赵昕,杨小菊,石勇,等. 盐胁迫下荒漠共生植物红砂与珍珠的根茎叶中离子吸收与分配特征[J]. 生态学报, 2014, 34(4): 963-972.
- [4] 林栖风,李冠一. 植物耐盐性研究进展[J]. 生物工程进展, 2000, 20(2): 20-25.
- [5] 冯固,李晓林,张福锁,等. 施磷和接种 AM 真菌对玉米耐盐性的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2000, 9(2): 22-26.
- [6] ASADA K. The water-water cycle in chloroplasts: scavenging of active oxygens and dissipation of excess photons[J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1999, 50: 601-639.
- [7] 洪立洲,王茂文,丁海荣,等. NaCl 胁迫对马齿苋光合作用及叶绿素荧光特性的影响[J]. 西北植物学报, 2011, 31(12): 2516-2521.
- [8] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社, 2000: 260-261.
- [9] 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京:中国农业出版社, 2000.
- [10] 张立军,樊金娟. 植物生理学实验教程[M]. 北京:中国农业大学出版社, 2007.
- [11] 郭秀林,刘子会,赵会徽,等. 热锻炼和高温胁迫下冬小麦热激蛋白与抗氧化酶基因表达[J]. 华北农学报, 2014, 29(4): 13-18.