

董 静,魏福友,邢锦城,等. 马齿苋幼苗对盐碱胁迫的生理响应[J]. 江苏农业科学,2019,47(13):153-157.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.13.038

马齿苋幼苗对盐碱胁迫的生理响应

董 静¹,魏福友²,邢锦城¹,刘 冲¹,朱小梅¹,赵宝泉¹,温祝桂¹,洪立洲¹

(1. 江苏沿海地区农业科学研究所,江苏盐城 224002; 2. 盐城市新洋农业试验站,江苏盐城 224002)

摘要:分别将 2 种中性盐($\text{NaCl}:\text{Na}_2\text{SO}_4$ 摩尔比为 9:1)和 2 种碱性盐($\text{NaHCO}_3:\text{Na}_2\text{CO}_3$ 摩尔比为 9:1)混合模拟不同强度的盐、碱胁迫条件,对马齿苋进行胁迫处理,研究盐、碱胁迫对马齿苋幼苗叶片水分含量、活性氧代谢、渗透调节物质积累以及离子平衡的影响。结果表明:(1)马齿苋幼苗叶片含水量随着 2 种盐浓度增大呈下降趋势,其中在碱性盐胁迫下叶片含水量明显低于中性盐胁迫。(2)2 种盐胁迫下, O_2^- 产生速率及 MDA 含量一直持续升高,但碱性盐胁迫下 O_2^- 产生速率与 MDA 含量与上升幅度均高于同等浓度的中性盐胁迫。随着盐浓度的增加,除了 50 mmol/L 碱性盐胁迫下叶片中 CAT 活性下降外,其余处理组中 SOD、POD、CAT 活性均呈现出先升高后降低趋势。在高浓度碱性盐胁迫条件下,这 3 种酶活性的变化幅度都明显高于中性盐胁迫。(3)碱性盐胁迫下,除可溶性蛋白外,脯氨酸、可溶性糖含量与对照相比均有不同程度的增加,且均高于相同浓度的中性盐胁迫。(4)随着盐、碱胁迫浓度的增加均造成马齿苋叶片中 Na^+ 含量显著增加,而 K^+ 含量和 K^+/Na^+ 比值则持续降低。与中性盐胁迫相比,碱性盐胁迫下的马齿苋叶片积累了更多的 Na^+ 。该研究结果表明在相同浓度胁迫下,尤其是高浓度胁迫下,碱性盐胁迫对马齿苋造成的伤害比中性盐胁迫大。

关键词:马齿苋;盐碱胁迫;活性氧代谢;离子平衡;渗透调节物质

中图分类号: Q945.78 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)13-0153-05

全世界超过 20% 的农业灌溉土壤正受到盐害的影响,预计到 2050 年,一半以上的耕地会发生盐碱化^[1]。据不完全统计,我国盐碱土面积约为 $1.0 \times 10^8 \text{ hm}^2$,占世界盐碱地的

10%^[2]。盐碱土和土壤次生盐碱化问题严重制约着农业生产和生态环境的发展^[3]。因此筛选和培育耐盐碱性强的作物品种并直接种植于盐碱地,对现代农业的发展及生态环境的改善具有重要意义^[4],已成为现阶段开发利用盐碱地最为经济有效的途径。

马齿苋(*Portula caoleracea* L.)为马齿苋科马齿苋属一年生肉质草本植物,其茎叶营养丰富,是我国卫生部认定的药食同源植物之一,广泛分布于沿海滩涂地区。目前,有关马齿苋盐胁迫下的生理响应研究报道较多,包括盐胁迫下马齿苋生长指标及叶片光合作用变化的研究,以及盐离子在幼苗体内

收稿日期:2018-03-21

基金项目:江苏省农业科技自主创新资金[编号: CX(15)1005];江苏省自然科学基金(编号: BK20151301)。

作者简介:董 静(1988—),女,江苏盐城人,硕士,助理研究员,主要从事植物逆境生理方面的研究。E-mail: dongjingye@163.com。

通信作者:洪立洲,硕士,研究员,主要从事土壤肥料与盐土农业工程研究。E-mail: ychonglz@163.com。

[18] 吴江利,罗学刚,李宝强,等. 微生物菌肥作用下荒漠土壤微生物群落结构和功能研究[J]. 中国农学通报,2015,31(9): 216-223.

[19] Zhu H H, Guo J H, Chen M B, et al. *Burkholderia dabaoshanensis* sp. nov., a heavy-metal-tolerant bacteria isolated from Dabaoshan mining area soil in China[J]. PLoS One, 2012, 7(12): e50225.

[20] Sudhakar C, Lakshmi A, Giridarakumar S. Changes in the antioxidant enzyme efficacy in two high yielding genotypes of mulberry (*Morus alba* L.) under NaCl salinity[J]. Plant Science, 2001, 161(3): 613-619.

[21] Kraus T E, Fletcher R A. Paclobutrazol protects wheat seedlings from heat and paraquat injury is detoxification of active oxygen involved[J]. Plant and Cell Physiology, 1994, 35(1): 45-52.

[22] 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,2000:164-165.

[23] 丁文娟,曹 群,赵兰凤,等. 生物有机肥施用期对香蕉枯萎病

及土壤微生物的影响[J]. 农业环境科学学报,2014,33(8): 1575-1582.

[24] 薛高尚,胡丽娟,田 云,等. 微生物修复技术在重金属污染治理中的研究进展[J]. 中国农学通报,2012,28(11): 266-271.

[25] 韩 旭,丁国华. 植物对重金属的耐受性和吸收·转运特性的研究进展[J]. 安徽农业科学,2016,44(4): 106-109.

[26] 蔡信德,仇荣亮,陈桂珠. 微生物在镍污染土壤修复中的作用[J]. 云南地理环境研究,2005,17(3): 9-12,17.

[27] Ulla A J, Patrick A H, Ulla S L, et al. Organic acids produced by mycorrhizal *Pinus sylvestris* exposed to elevated aluminium and heavy metal concentrations[J]. New Phytologist, 2000, 146(3): 557-567.

[28] David L J. Organic acids in the rhizosphere—a critical review[J]. Plant and Soil, 1998, 205(1): 25-44.

[29] Allassimone J, Roppolo D, Geldner N, et al. The endodermis—development and differentiation of the plant's inner skin[J]. Protoplasma, 2012, 249(3): 433-443.

运输与分布特点、抗氧化防御、渗透调节代谢等生理方面的研究^[5-7],但这些研究都集中在单一的 NaCl 胁迫,而关于其对碱性盐胁迫的响应研究目前还未见报道。由于碱性盐胁迫本身存在高 pH 值的危害,因此在植物耐盐生理研究方面应予以重视。本研究将 2 种中性盐 NaCl、Na₂SO₄ 和 2 种碱性盐 NaHCO₃、Na₂CO₃ 分别按 9:1 摩尔比混合,模拟不同强度的盐、碱胁迫处理马齿苋,比较盐、碱胁迫对马齿苋幼苗叶片水分含量及渗透调节物质积累的影响,以期耐盐碱马齿苋选育工作提供理论依据和支持。

1 材料与方法

1.1 材料

供试品种为江苏沿海地区农业科学研究所提供的苏马齿苋 1 号。2017 年 5 月 10 日,选择大小均匀的种子用 5% NaClO 消毒 10 min,去离子水充分冲洗后播种于装有基质的 50 孔穴盘中;栽培基质为珍珠岩、石英砂、蛭石体积比为 1:1:1 的混合基质,用 1/2 Hoagland 营养液浇灌。将穴盘移入 GX-400BS-III 型人工气候箱中发芽,培养昼、夜温度分别为 28、25 ℃,相对湿度为 60%~80%,光周期为 14 h/10 h(光照/黑暗),光照度为 1 500 lx。待幼苗长至四叶期时进行间苗,每个穴盘定植 1 株幼苗;幼苗株高约 15 cm 时,选取长势一致的幼苗,栽于装有细沙的塑料花盆(口径 15 cm,底部直径 12 cm,高 10 cm)中,每盆 1 株,转入江苏沿海地区农业科学研究所玻璃温室中于自然光照条件下培养 1 周后,进行盐碱胁迫处理。

1.2 方法

1.2.1 盐碱胁迫处理 选取中性盐 NaCl、Na₂SO₄ 和碱性盐 NaHCO₃、Na₂CO₃ 模拟土壤盐碱胁迫环境,均用 1/2 Hoagland 营养液按摩尔比 9:1 混合溶解。盐胁迫与碱胁迫均设置 0 (CK)、50、100、150、200 mmol/L 这 5 个梯度。不同中性盐 pH 值变化范围为 6.49~6.81,碱性盐 pH 值变化范围为 9.12~9.24。各梯度处理液每隔 3 d 浇灌 1 次,每次浇灌量 300 mL,为避免盐碱冲击,处理溶液每次递增 50 mmol/L,直至达到设定浓度。每个处理 10 株幼苗,各 4 次重复,胁迫处理共持续 15 d。

1.2.2 指标测定 参照 Slama 等的方法测定马齿苋幼苗叶片相对含水量(RWC)并稍作改动^[8];采用氯化羟胺法测定超氧自由基(O₂⁻)产生速率^[9];采用硫代巴比妥酸比色法测定丙二醛(MDA)含量^[10];采用氮蓝四唑(NBT)光化还原法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性^[10];采用愈创木酚法测定过氧化物酶(POD)活性^[10];采用紫外吸收法测定过氧化氢酶(CAT)活性^[5];采用水合茚三酮法进行脯氨酸含量测定^[10];采用蒽酮比色法测定可溶性糖含量^[10];采用考马斯亮蓝 G-250 染色法测定可溶性蛋白含量^[10]。每个指标重复 3 次。

1.3 数据统计分析

采用 Excel 2016 和 SPSS 19.0 统计分析软件对试验数据进行处理。

2 结果与分析

2.1 盐碱胁迫对马齿苋叶片 RWC 的影响

中性盐和碱性盐胁迫对马齿苋叶片的 RWC 所造成的影

响如图 1 所示。在 2 种盐胁迫下,随着处理溶液浓度的升高,马齿苋叶片的 RWC 均显著降低。与 CK 相比,在 50、100、150、200 mmol/L 中性盐胁迫下,马齿苋叶片 RWC 分别降低了 3.91%、8.24%、14.03% 和 31.55%;而碱性盐胁迫下叶片 RWC 依次降低了 11.14%、29.73%、44.78% 和 66.02%。由此可以看出,在碱性盐胁迫下马齿苋叶片 RWC 下降趋势较大;在盐浓度相同时,碱性盐胁迫与中性盐胁迫相比,叶片 RWC 含量更低。

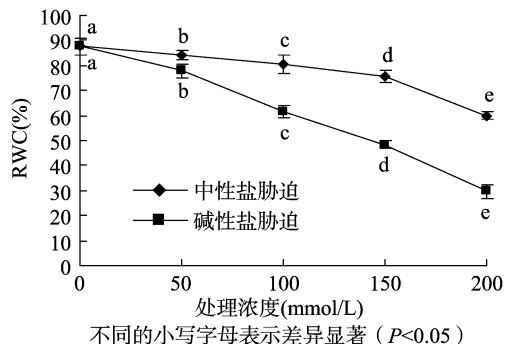


图1 不同浓度盐与碱胁迫下马齿苋叶片相对含水量

2.2 盐碱胁迫对马齿苋叶片 O₂⁻ 产生速率和 MDA 含量的影响

从图 2-A 可以看出,50~100 mmol/L 中性盐胁迫下叶片中 O₂⁻ 产生速率相对稳定,而 150 mmol/L 中性盐处理下 O₂⁻ 产生速率开始加速升高。碱性盐胁迫下,马齿苋叶片中 O₂⁻ 产生速率随着盐浓度的增加呈上升趋势。当盐浓度为 200 mmol/L 时,碱性盐处理的马齿苋叶片 O₂⁻ 产生速率比中性盐处理增加了 32.67%,相比对照增加了 282.08%,差异显著。

由图 2-B 可知,在 50 mmol/L 盐胁迫浓度下,马齿苋叶片中 MDA 含量与对照组相比均无显著性差异;随着胁迫浓度的继续升高,叶片中 MDA 含量均有不同程度的增加;当胁迫浓度高于 100 mmol/L 时,叶片中 MDA 含量均随着胁迫强度的增加而显著上升;盐浓度达到 200 mmol/L 时,碱性盐处理的马齿苋叶片 MDA 含量比中性盐处理高出 32.67%,相比对照增加了 147.89%,差异显著。随着碱性盐浓度的增加,MDA 含量快速上升,且上升幅度明显大于中性盐胁迫,说明碱性盐胁迫下马齿苋受到的膜脂过氧化伤害程度比中性盐胁迫更大。

2.3 盐碱胁迫对马齿苋幼苗叶片中抗氧化酶活性的影响

由图 3-A 可知,随着中性盐浓度的增加,马齿苋叶片 SOD 活性呈先升高后降低的趋势。50 mmol/L 中性盐胁迫下,SOD 活性达到最大值,显著高于对照;100~150 mmol/L 时,SOD 活性持续下降,但均高于对照;当胁迫浓度升高至 200 mmol/L 时,SOD 活性显著低于对照。碱性盐胁迫下马齿苋叶片 SOD 活性也表现出先升后降的变化。50~150 mmol/L 碱性盐处理的 SOD 活性显著高于对照;200 mmol/L 胁迫浓度下,SOD 活性降幅较大,显著低于同浓度的中性盐胁迫处理,且与对照相比也表现出显著差异。

从图 3-B 可以看出,随着胁迫浓度的增加,马齿苋叶片 POD 活性先升高后降低。50~100 mmol/L 中性盐胁迫浓度下,POD 活性与对照相比差异不显著;150 mmol/L 时,POD 活

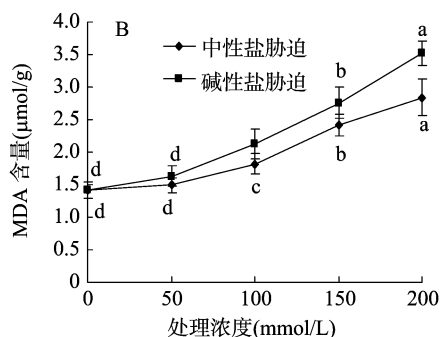
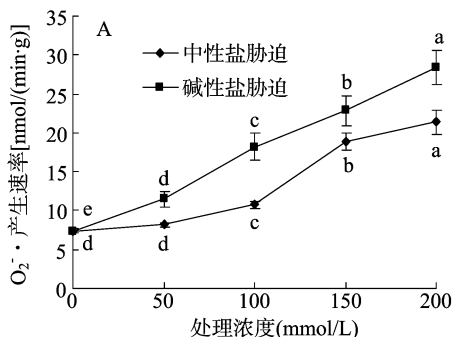
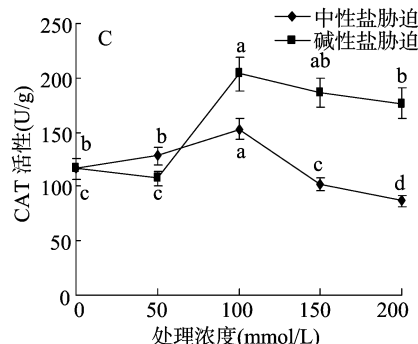
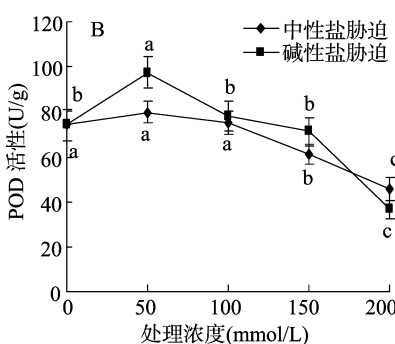
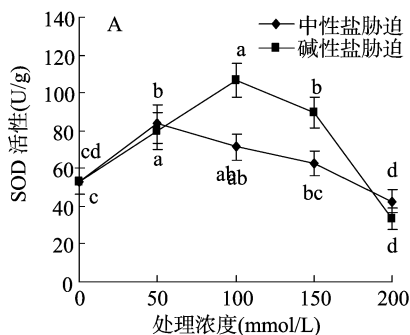
图2 盐碱胁迫对马齿苋叶片 O_2^- 产生速率和MDA含量的影响

图3 盐碱胁迫对马齿苋幼苗叶片抗氧化酶活性的影响

性开始明显下降,当盐度增加至 200 mmol/L 时,POD 活性显著低于对照。碱性盐胁迫下马齿苋叶片 POD 活性变化与中性盐胁迫下类似,也表现出先升后降的趋势。50 mmol/L 碱性盐胁迫下 POD 活性达到最高,显著高于对照及余处理;100~150 mmol/L 时,POD 活性与对照相比差异不显著;200 mmol/L 时,POD 活性下降幅度较大,显著低于对照。

由图 3-C 可以看出,随着胁迫浓度的增加,马齿苋叶片 CAT 活性发生了一定的变化。在中性盐处理下,当盐度为 50~100 mmol/L 时,叶片 CAT 活性呈现缓慢上升趋势,并在盐度为 100 mmol/L 时达到最大值,随后随着盐浓度的增加 CAT 活性急速下降;当浓度为 200 mmol/L 时,叶片 CAT 活性与对照相比下降了 25.29%。碱性盐胁迫下,随着盐浓度的增加,马齿苋叶片 CAT 活性先缓慢下降随后急速升高。当碱性盐浓度升高至 100 mmol/L 时 CAT 活性达到最大值,与对照相比,CAT 活性增加了 75.18%,随后随着胁迫浓度的增加 CAT 活性缓慢下降,当降至 200 mmol/L 时,CAT 活性依然显著高于对照。在相同的盐度下,除 50 mmol/L 外,碱性盐叶片中 CAT 活性均高于中性盐胁迫下叶片中 CAT 活性,并当碱性盐浓度为 100 mmol/L 时 CAT 活性达到最大值,此时碱性盐胁迫下 CAT 活性与中性盐胁迫下相比增加了 33.22%,差异显著。

2.4 盐碱胁迫对马齿苋渗透调节物质含量的影响

中性盐和碱性盐胁迫均明显影响了马齿苋幼苗叶片中的脯氨酸含量(图 4-A),随着处理液浓度的增加,叶片中脯氨酸含量均呈逐渐增加趋势。在中性盐胁迫下,脯氨酸含量在处理浓度为 50 mmol/L 时增幅较小,与 CK 相比差异不显著;在盐浓度高于 100 mmol/L 时开始显著增加。在碱性盐溶液处理下,马齿苋叶片脯氨酸含量均显著高于 CK。中性盐和碱性盐处理组的脯氨酸含量均在盐浓度 200 mmol/L 时达到最

大值;相同盐浓度下,碱性盐胁迫下马齿苋叶片内脯氨酸含量显著高于中性盐胁迫。

由图 4-B 可见,在中性盐和碱性盐胁迫下,随着处理液浓度的增加,马齿苋叶片中可溶性糖有不同程度的积累。在中性盐胁迫处理组中,盐浓度为 50 mmol/L 时,可溶性糖含量与 CK 相比,差异不显著;而当碱性盐胁迫浓度为 50 mmol/L 时,可溶性糖含量与 CK 相比增加了 48.48%。随着 2 种处理溶液浓度的升高,马齿苋叶片中可溶性糖含量均呈先升高后降低趋势,且均在盐浓度为 150 mmol/L 时达到最大值,与 CK 相比分别增加了 86.56% 和 144.25%,具有显著差异。而在盐浓度达到 200 mmol/L 时,中性盐和碱性盐胁迫下可溶性糖含量分别比对照(CK)增加 55.68% 和 90.05%,但相比 150 mmol/L 浓度,马齿苋叶片内可溶性糖含量均显著降低,分别下降 16.55% 和 22.19%。由此可以看出,高浓度的盐胁迫对叶片可溶性糖渗透调节功能造成了损伤,且碱性盐胁迫的危害较大。

由图 4-C 可知,马齿苋叶片中可溶性蛋白含量随着盐浓度的增加,呈现先升高后降低趋势。在盐浓度为 50 mmol/L 时,中性盐胁迫和碱性盐胁迫处理的可溶性蛋白含量差异不显著,但盐浓度升高至 100 mmol/L 时,叶片中可溶性蛋白含量均显著上升,此时中性盐胁迫处理下的马齿苋叶片可溶性蛋白含量达到最大值,显著高于碱性盐胁迫。随着盐浓度继续增高,中性盐胁迫处理组的叶片可溶性蛋白含量逐渐下降。碱性盐胁迫处理组的叶片可溶性蛋白含量在盐浓度为 150 mmol/L 时达到最大值,随后明显下降,与 CK 相比下降了 6.14%。

2.5 盐碱胁迫对马齿苋叶片 Na^+ 、 K^+ 含量及 K^+/Na^+ 的影响

由图 5-A 可以看出,马齿苋叶片中 Na^+ 含量随盐浓度

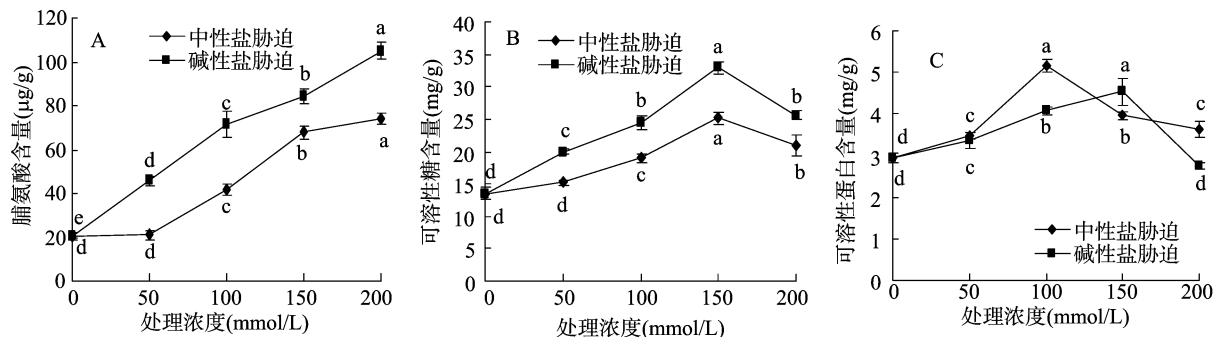
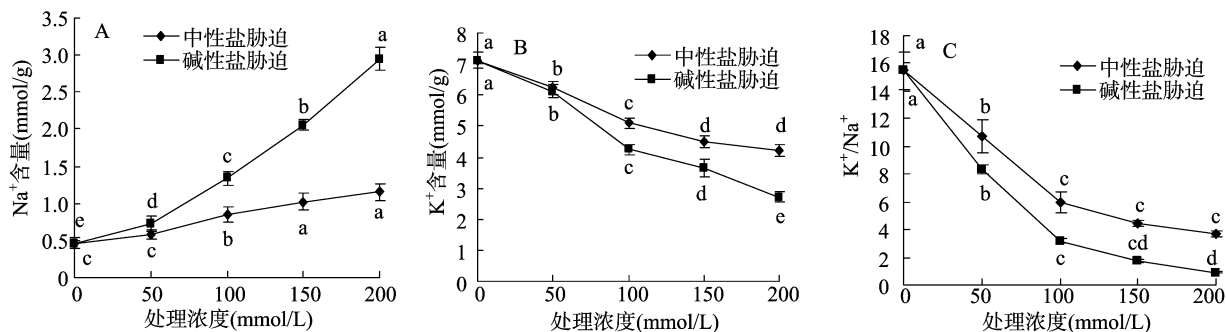


图4 盐碱胁迫对马齿苋幼苗叶片渗透调节物质含量的影响

增加呈上升趋势。在盐度为 50 mmol/L 时,2 种胁迫条件下 Na^+ 含量相近,而当盐度高于 100 mmol/L 时, Na^+ 含量急剧增加,且碱性盐胁迫下增加幅度明显高于中性盐胁迫。由图 5-B 可以看出,与对照相比,盐、碱胁迫使叶片中 K^+ 含量大幅度下降,碱性盐胁迫下降幅度明显大于中性盐胁迫。且在

整个胁迫过程中,中性盐胁迫下的 K^+ 含量始终高于碱性盐胁迫。由图 5-C 可以看出, K^+/Na^+ 比值与 K^+ 含量变化趋势基本一致,在叶片中 K^+/Na^+ 比值与 K^+ 含量均随胁迫强度增加而呈现下降趋势,且随着盐浓度的增加而缓慢降低。

图5 盐碱胁迫对马齿苋幼苗叶片 Na^+ 、 K^+ 含量及 K^+/Na^+ 的影响

3 讨论

植物叶片的 RWC 不仅可以反映植物体内的水分状态,还可以用来评估植物所受到的逆境胁迫程度^[11-12]。本研究中,马齿苋叶片的含水量随着盐浓度的增大逐渐下降,且在碱性盐胁迫下叶片含水量显著低于相同浓度的中性盐胁迫,由此可以看出,碱性盐胁迫对马齿苋的伤害较大。

当植物遭受逆境胁迫时,体内可产生大量的活性氧,打破体内原本的活性氧产生与清除的动态平衡状态,从而导致细胞膜脂过氧化作用加强,细胞膜系统收到损伤,最终影响植物的正常生长发育。SOD、POD 和 CAT 作为主要的抗氧化酶,可以清除活性氧自由基,保护细胞膜系统完整性,是植物的重要抗逆指标^[13]。本研究中,除了 50 mmol/L 碱性盐胁迫下 CAT 活性下降外,其余处理组中抗氧化酶活性均受盐胁迫影响而呈现出先升高后降低趋势。 $\text{O}_2^{\cdot -}$ 作为生物体代谢过程中产生的活性氧自由基,对细胞膜脂质有较强的氧化作用。而 MDA 作为膜脂过氧化作用的产物,其含量高低可以反映植物膜脂过氧化作用的程度^[13]。本试验研究结果表明,在不同浓度的盐、碱胁迫下,马齿苋叶片中 $\text{O}_2^{\cdot -}$ 产生速率均有不同程度的提高,在胁迫浓度为 200 mmol/L 时,分别比对照提高了 188.01% 和 282.08%。并且在 2 种盐胁迫下,叶片中 MDA 含量均呈上升趋势,但碱性盐胁迫下 MDA 含量的上升幅度均高于同等浓度的中性盐胁迫,这说明由于抗氧化酶系统的

调节能力有限,当 MDA 含量超过一定阈值后,碱性盐胁迫下马齿苋体内的活性氧产生速率远大于抗氧化酶活性的提升速度,给细胞膜系统造成了不可逆的损伤,造成抗氧化酶活性的降低以及活性氧在体内的积累,最终导致对植物造成的伤害远大于中性盐胁迫。

盐碱胁迫会引起植物体内脯氨酸含量的增加,大量积累的脯氨酸不仅能够增强植物渗透调节能力,还可以保护细胞蛋白质及膜系统,以及清除活性氧^[14]。同时脯氨酸在植物体内可以作为酶保护剂从而减轻逆境胁迫对植物的伤害^[15]。本研究中,2 种盐胁迫均刺激了马齿苋叶片中脯氨酸的积累,其中碱性盐胁迫升高趋势明显大于中性盐胁迫。这表明积累脯氨酸是马齿苋幼苗积极参与盐、碱胁迫的防御反应,在碱性盐胁迫下遭受到的影响与中性盐胁迫相比较为严重。可溶性糖是植物光合作用的主要产物之一,同时作为植物生命活动最主要的能源物质,可溶性糖还具有渗透保护、碳储存、和自由基清除的功能^[16]。通过对柳树^[17]、紫花苜蓿^[18] 等的研究表明,随着盐碱胁迫浓度的增大,植物体内脯氨酸在积累的同时,糖的合成也在增加。本研究中,随着 2 种盐胁迫浓度的增大,马齿苋叶片中脯氨酸与可溶性糖含量也均有上升。王佳珍等认为,随着盐碱浓度的增大,植物可溶性糖含量呈先增多后减少的趋势^[19]。郭瑞等则认为可溶性糖的积累可增强亚麻对盐渍环境的耐性,但在碱胁迫尤其是高碱胁迫下可溶性糖的积累受到抑制^[20]。本研究中 2 种盐胁迫均促进了马齿

苋叶片可溶性糖的积累,但高盐浓度下可溶性糖含量均有所下降,由此推测,可能主要是盐浓度超过一定的阈值,叶片的渗透代谢遭到破坏,无法抵御盐分逆境引起的渗透胁迫,其中中性盐胁迫下降幅较大。刘建新等研究显示,当 Na^+ 浓度低于 150 mmol/L 时,中性盐胁迫比碱中性胁迫积累更多的可溶性蛋白维持渗透平衡,碱性盐胁迫下则积累更多的可溶性糖进行渗透调节^[21]。前人研究表明,盐碱胁迫下,植物产生的一部分可溶性蛋白质和糖用于渗透调节,而另外一部分增加的可溶性糖可以提供碳架从而参与新蛋白质的合成^[22],进而可以进一步增加体内的可溶性蛋白质含量。

维持细胞内的离子平衡是盐胁迫条件下植物获得耐盐能力的一个重要策略^[23]。植物在盐碱胁迫条件下会在积累大量 Na^+ 的同时导致 K^+ 吸收困难,二者之间存在离子拮抗作用,因此维持 Na^+ 、 K^+ 平衡是植物适应盐渍环境的重要生理代谢活动^[24]。本研究中,随着盐、碱胁迫浓度的增加均造成马齿苋叶片中 Na^+ 含量显著增加,而 K^+ 含量和 K^+/Na^+ 比值明显降低,表明盐、碱胁迫均破坏了马齿苋 Na^+ 、 K^+ 平衡,在黄瓜^[25]和燕麦^[21]中也到了类似的结果。与中性盐胁迫相比,碱性盐胁迫下的马齿苋叶片积累了更多的 Na^+ ,而 K^+ 含量持续下降,这可能是由于其过高的 pH 值对马齿苋造成了更大的伤害。

4 结论

综上所述,本试验通过研究不同浓度盐、碱胁迫对马齿苋幼苗叶片水分含量、活性氧代谢、离子平衡以及渗透调节物质积累的影响发现,碱性盐胁迫处理的马齿苋幼苗叶片水分含量显著低于中性盐胁迫。无论中性盐还是碱性盐胁迫,超过一定浓度都会对马齿苋造成不同的氧化损伤。尤其是在高浓度碱性盐胁迫条件下,马齿苋体内各项氧化指标的变化都明显高于中性盐胁迫。在中性盐、碱性盐胁迫条件下,马齿苋启动防御机制,可通过积累脯氨酸、可溶性糖、可溶性蛋白等维持渗透压和调节细胞渗透势,从而适应不同程度的盐渍胁迫。碱性盐胁迫引起马齿苋叶片中 Na^+ 过量积累,而 K^+ 含量持续下降,严重破坏了离子平衡,这可能是碱性盐胁迫对马齿苋造成的伤害大于中性盐胁迫的重要原因。因此,马齿苋生长对盐和碱胁迫的生理响应存在着差异,盐、碱胁迫是 2 种不同的非生物胁迫,在相同浓度胁迫下,尤其是高浓度胁迫下,碱性盐胁迫对马齿苋造成的伤害比中性盐胁迫大。

参考文献:

- [1] Wang W, Vinocur B, Altman A. Plant responses to drought, salinity and extreme temperatures: towards genetic engineering for stress tolerance[J]. *Planta*, 2003, 218(1): 1–14.
- [2] 闫波, 胡延涛, 蔡苗, 等. 盐碱地工程化排盐—水稻种植管理技术探析[J]. *大麦与谷类科学*, 2017, 34(5): 42–46.
- [3] 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.
- [4] 许清涛, 李玉波, 闫守刚, 等. 脱硫废渣改良中度苏打碱土对燕麦生长与根际环境的影响[J]. *大麦与谷类科学*, 2016, 33(3): 42–44.
- [5] 邢锦城, 董静, 赵宝泉, 等. 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[J]. *植物资源与环境学报*, 2015, 24(4): 69–75, 82.
- [6] 董静, 邢锦城, 洪立洲, 等. NaCl 胁迫对马齿苋幼苗生长及体内离子分布的影响[J]. *浙江农业学报*, 2017, 29(2): 236–243.
- [7] 张边江, 唐宁, 华春, 等. 海水胁迫下马齿苋光合及抗氧化生理特性研究[J]. *草地学报*, 2015, 23(4): 878–882.
- [8] Slama I, Ghnaya T, Messedi D, et al. Effect of Sodium chloride on the response of the halophyte species *Sesuvium portulacastrum* grown in mannitol – induced water stress[J]. *Journal of Plant Research*, 2007, 120(2): 291–299.
- [9] 王爱国, 罗广华. 植物的超氧化物自由基与羟胺反应的定量关系[J]. *植物生理学通讯*, 1990(6): 55–57.
- [10] 李合生. 植物生理生化实验原理与技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [11] Gao Z W, Han J Y, Mu C S, et al. Effects of saline and alkaline stresses on growth and physiological changes in oat (*Avena sativa* L.) seedlings[J]. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj – Napoca*, 2014, 42(2): 357–362.
- [12] Khosravinejad F, Heydari R, Farboodnia T. Effects of salinity on photosynthetic pigments, respiration, and water content in two barley varieties[J]. *Pakistan Journal of Biological Sciences* Pjobs, 2008, 11(20): 2438–2442.
- [13] 梁朋, 陈振德, 罗庆熙. 南方根结线虫对不同砧木嫁接番茄苗活性氧清除系统的影响[J]. *生态学报*, 2012, 32(7): 2294–2302.
- [14] Ashraf M, Foolad M R. Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2007, 59(2): 206–216.
- [15] 邓凤飞, 杨双龙, 龚明. 细胞信号分子对非生物胁迫下植物脯氨酸代谢的调控[J]. *植物生理学报*, 2015, 51(10): 1573–1582.
- [16] Hare P D, Cress W A, Staden J V. Dissecting the roles of osmolyte accumulation during stress[J]. *Plant, Cell & Environment*, 1998, 21(6): 535–553.
- [17] 李子英, 丛日春, 杨庆山, 等. 盐碱胁迫对柳树幼苗生长和渗透调节物质含量的影响[J]. *生态学报*, 2017, 37(24): 1–8.
- [18] 郝凤, 刘晓静, 张晓磊, 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.
- [19] 王俭珍, 刘倩, 高妮妮, 等. 植物对盐碱胁迫的响应机制研究进展[J]. *生态学报*, 2017, 37(16): 5565–5577.
- [20] 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.
- [21] 刘建新, 王金成, 贾海燕. 燕麦幼苗对盐胁迫和碱胁迫的生理响应差异[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(5): 331–336.
- [22] 刘滨滨, 康春莉, 王鑫, 等. 羊草对盐碱胁迫的生理生化响应特征[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(23): 166–173.
- [23] 李红, 李波, 杨墨. 盐胁迫下外源钙对苜蓿幼苗叶片离子含量的影响[J]. *江苏农业科学*, 2017, 45(4): 131–133.
- [24] 靳娟, 王依, 鲁晓燕, 等. NaCl 胁迫对酸枣幼苗离子吸收与分配的影响[J]. *园艺学报*, 2015, 42(5): 853–862.
- [25] 张丽平, 王秀峰, 史庆华, 等. 黄瓜幼苗对氯化钠和碳酸氢钠胁迫的生理响应差异[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(8): 1854–1859.