

苏江硕,陈素梅,管志勇,等. 外源钙离子对 NaCl 胁迫下菊花幼苗生理特性的影响[J]. 江苏农业科学,2016,44(9):199-203.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.09.057

外源钙离子对 NaCl 胁迫下菊花幼苗生理特性的影响

苏江硕,陈素梅,管志勇,陈发棣

(南京农业大学园艺学院,江苏南京 210095)

摘要:以耐盐性中等水平的切花菊品种雪中花为材料,采用 1/2Hoagland 培养法研究添加不同浓度外源 Ca^{2+} (0、5、10、15、20 mmol/L) 对 150 mmol/L NaCl 胁迫下菊花幼苗叶片丙二醛含量、脯氨酸含量、相对电导率、叶绿素含量、净光合速率等光合指标的影响。结果发现,与菊花幼苗单纯盐胁迫相比,幼苗受到盐胁迫后加入一定浓度的外源 Ca^{2+} ,MDA 含量降低 23.99% ~ 46.27%,Pro 含量降低 1.28% ~ 46.90%,相对电导率降低 22.81% ~ 50.45%,叶绿素含量增加 5.74% ~ 42.16%,净光合速率增加 78.32% ~ 161.74%,叶片 Na^+ 降低 48.04% ~ 61.04%, Ca^{2+} 、 K^+ 含量和 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 、 K^+/Na^+ 增加幅度分别为 5.65% ~ 87.88%、9.36% ~ 20.41%、98.37% ~ 373.98%、121.30% ~ 205.05%。以上结果表明,一定浓度的外源 Ca^{2+} 可以提高盐胁迫下菊花幼苗的抗性,缓解高浓度 NaCl 对植株造成的伤害,其中以 15 mmol/L Ca^{2+} 处理效果最佳。

关键词:菊花;外源钙离子;盐胁迫;生理特性

中图分类号: S682.1+10.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)09-0199-05

土壤盐碱化是全球性问题,严重影响了生态环境和农业

收稿日期:2015-05-28

基金项目:江苏省农业科技自主创新资金[编号:CX(12)2020];公益性行业(农业)科研专项经费(编号:201403039);国家自然科学基金(编号:31171987、31272196);国家科技支撑计划(编号:L0201300245、2012BAD01B07005-1);江苏省科技支撑计划(编号:BE2012350)。

作者简介:苏江硕(1990—),女,河北石家庄人,硕士研究生,主要从事观赏植物遗传育种与生物技术研究。E-mail:2014104096@njau.edu.cn。

通信作者:陈发棣,博士,教授,主要从菊花遗传育种与分子生物学研究。E-mail:chenfd@njau.edu.cn。

以达到延迟结果母枝萌芽、开花,延迟白罗莎里奥的上市期。在技术示范过程中也发现了一些问题,虽然白罗莎里奥通过延后栽培,成熟期延后,但是延后时间不长,从研究中知道仅延后 1 个月左右;延后栽培成熟的果实虽然品质口感上优于常规栽培的,但是单粒重、穗重低于常规栽培的,这些问题有待于以后进一步研究拓展,把技术和一系列栽培管理措施相结合,继续完善葡萄延迟栽培综合技术。

参考文献:

- [1] 王华新,沈建生,陈一帆,等. 白罗莎里奥葡萄设施栽培关键技术[J]. 中外葡萄与葡萄酒,2010(11):46-47.
- [2] 赵海亮,赵文东,孙凌俊,等. 葡萄延迟栽培研究进展[J]. 北方果树,2011(4):3-5.
- [3] 刘学平,陶建敏,高福新. 南京地区葡萄避雨栽培“H”形整形及根域限制栽培技术[J]. 中国南方果树,2012,41(6):86-88.
- [4] 杨华,周步海,邓晔,等. 葡萄黑痘病研究进展及防治对策[J]. 江西农业学报,2009,21(11):61-63.
- [5] 王庆莲,吴伟民,赵密珍,等. 秋延后栽培对葡萄生长与果实品质的影响[J]. 江苏农业学报,2013,29(6):1438-1444.

生产。菊花(*Chrysanthemum morifolium*)系菊科菊属多年生宿根花卉,是我国的十大传统名花和世界四大切花之一,具有极高的观赏和经济价值,在花卉生产中占有非常重要的地位^[1]。目前我国菊花生产基本上为分散型区域性生产,沿海和北方地区的盐渍土壤严重限制了菊花的栽培推广。因此,研究菊花耐盐机理并找到有效缓解盐害的方法是菊花研究工作的一项重要任务之一。

钙离子作为一种大量元素,不仅可以满足植物正常生长发育,还是植物代谢和发育的重要调控者。有研究表明,盐分胁迫条件下施加适量的外源钙,不仅可以缓解因钙不足造成的矿质营养胁迫,而且能够增加质膜的稳定性和保证钙信号

- [6] 王建平,唐建华,钱伟东,等. 极晚熟葡萄品种魏可设施延后优质栽培技术[J]. 河北林业科技,2014(5):196-197,198.
- [7] 王海波,王孝娣,王宝亮,等. 葡萄延迟栽培的研究进展[J]. 中外葡萄与葡萄酒,2008(1):47-51.
- [8] Reighand G L. Using interstems to delay bloom in peach[J]. Compact Fruit Tree,1992,25:90-91.
- [9] Davies C, Boss P K, Robinson S P. Treatment of grape berries, a non-climacteric fruit with a synthetic auxin, retards ripening and alters the expression of developmentally regulated genes[J]. Plant Physiology, 1997,115(3):1155-1161.
- [10] 尤丽群,秦建军,翟银成,等. 鲜食葡萄品种设施延迟采收栽培试验[J]. 新疆农业科技,2014(1):31-32.
- [11] 刘亮. 延迟采收对红地球葡萄树体营养和果实品质的影响[D]. 银川:宁夏大学,2010.
- [12] 温鹏飞,郑蓉,牛铁泉,等. 延迟采收对赤霞珠葡萄果实品质的影响[J]. 山西农业科学,2011,39(12):1281-1283,1290.
- [13] 温鹏飞,郑宏伟,牛铁泉,等. 延迟采收对葡萄果实多酚类物质含量的影响[J]. 山西农业大学学报:自然科学版,2011,31(5):446-450.
- [14] 宋瑾,范培格,吴本宏,等. 葡萄延迟采收期间糖含量及其代谢酶活性的变化[J]. 园艺学报,2007,34(4):823-828.

系统的正常发生和传递,从而维持细胞内离子平衡^[2]。植物在受到逆境胁迫时能提高游离钙离子的浓度,并通过 Ca^{2+} 与钙调节蛋白(CaM)结合启动一系列生理生化过程,从而在植物对逆境的感受、传递、响应和适应过程中发挥重要作用^[3]。目前外源钙对植物盐害的缓解效应已在拟南芥^[4]、玉米^[5]、小麦^[6]、黄瓜^[7]等多种植物上有报道,但在菊花上,除米银法等的研究^[8]外,尚未见其他报道。为此,笔者研究了不同浓度的 Ca^{2+} 对盐胁迫下菊花幼苗的生长、生理反应、光合作用的影响,以期找到能够缓解菊花盐胁迫的最适 Ca^{2+} 浓度,同时为阐明外源钙缓解盐害机制提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料和处理

供试材料为耐盐性中等水平的切花菊品种雪中花,由南京农业大学“中国菊花种质资源保存中心”提供。春季取生长一致的脚步芽在穴盘中扦插(扦插基质蛭石与珍珠岩质量比为1:1),待菊花幼苗生根长至10~12叶龄后,取出幼苗,洗净根部基质后转入盛有清水的周转箱内(气泵24 h/d通气),放入温室进行培养。缓苗5 d后选取生长一致的菊花幼苗,放入较小的周转箱中,每箱10株,共6个处理。具体处理如下:CK;即对照,1/2Hoagland;T1:1/2Hoagland + 150 mmol/L NaCl;T2:1/2Hoagland + 150 mmol/L NaCl + 5 mmol/L CaCl_2 ;T3:1/2Hoagland + 150 mmol/L NaCl + 10 mmol/L CaCl_2 ;T4:1/2Hoagland + 150 mmol/L NaCl + 15 mmol/L CaCl_2 ;T5:1/2Hoagland + 150 mmol/L NaCl + 20 mmol/L CaCl_2 。

处理5 d进行各项生理指标的测定,混合取样,其中每个指标测定时各处理中的不同植株均取同一叶位的叶片。每处理重复测定3次,取平均值。

1.2 测定指标及方法

1.2.1 形态指标测定 处理后每天观察记录植株的形态特征变化,用数码相机拍照记录。

1.2.2 叶片丙二醛(MDA)含量的测定 MDA含量测定采用硫代巴比妥酸TBA法^[9],取0.2 g鲜样,加3 mL 5% TCA,研磨后所得匀浆在3 000 r/min下离心20 min。取上清液2 mL,加2 mL 0.67% TBA,混合后沸水浴30 min,冷却后再离心1次。分别测定上清液在450、532、600 nm处的吸光度,并按公式算出MDA浓度,再算出单位鲜量组织中的MDA含量。

1.2.3 叶片脯氨酸(Pro)含量的测定 Pro含量测定采用磺基水杨酸法,具体步骤参考张治安等的试验^[10]。

1.2.4 相对电导率的测定 参照张治安等的方法^[10],用去离子水冲洗叶片3遍,用打孔器打5个叶圆片放入含有6 mL离心管中,隔夜后测定其电导值(EC_1),放入沸水浴煮沸20 min,冷却后再次测定电导值(EC_2)。

相对电导率 = $\text{EC}_1/\text{EC}_2 \times 100\%$ 。

1.2.5 叶绿素含量测定 按李合生等的方法^[9]测定叶片叶绿素含量,取新鲜叶片用蒸馏水冲洗干净,滤纸吸干多余水分,剪碎称取0.02 g放入10 mL离心管中,加9 mL 95%乙醇提取液于黑暗条件下浸提48 h,测定 $D_{649\text{ nm}}$ 、 $D_{665\text{ nm}}$ 的值。

叶绿体色素含量(mg/g) = (色素浓度 × 提取液体积)/样品鲜量。

1.2.6 光合指标测定 用美国LI-COR公司产LI-6400型光合仪于晴天上午09:00—11:00测定净光合速率(P_n)、胞间二氧化碳浓度(C_i)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)。测定时使用开放气路,光强为1 000 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, CO_2 气体采自相对稳定的3~4 m高的空气层,叶室温度为25℃。

1.2.7 离子测定 Ca^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 的提取参照王宝山等的方法^[11]进行,略加修改。称取0.2 g鲜叶,剪碎后放进试管,加入8 mL去离子水,沸水浴1.5 h,冷却后过滤,用Perkin Elmer公司生产的Optimal 2100DV电感耦合等离子体发射光谱仪测定过滤得到的浸提液中的 Ca^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 离子含量。

1.3 数据统计分析

试验数据用Excel 2007、SPSS 19.0软件进行分析处理,采用单因素方差分析(One-Way ANOVA),在 $\alpha=0.05$ 水平上进行比较,用Duncan's多重比较检验不同材料处理之间植株的差异。

2 结果与分析

2.1 外源 Ca^{2+} 对 NaCl 胁迫下菊花幼苗生长形态的影响

盐胁迫处理4 d后,对照组植株叶片全部正常,处理组植株叶片从下到上均出现不同程度的失绿、焦枯、萎蔫等盐害现象。盐害程度最大的植株出现在没有添加 Ca^{2+} 的T1组,该组菊花幼苗基部有4~5张叶子形态异常且新叶发黄。加入一定浓度的 Ca^{2+} 后盐害现象有所缓解,其中T4组菊花受害程度最小,该组菊花幼苗基部只有1~2张叶子异常;T2、T3、T5组菊花幼苗受害程度相似,基部均有2~3张叶子异常(图1)。结果表明,加入一定浓度的外源 Ca^{2+} 可缓解菊花幼苗的盐害现象,其中 Ca^{2+} 浓度为15 mmol/L的缓解效果相对较好。



图1 不同浓度 Ca^{2+} 对 NaCl 胁迫下菊花幼苗生长形态的影响

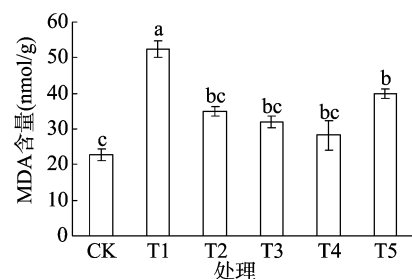
2.2 外源 Ca^{2+} 对 NaCl 胁迫下菊花幼苗 MDA 含量的影响

与CK相比,菊花在150 mmol/L NaCl胁迫处理后MDA含量均有所升高,其中MDA含量最高出现在未添加 Ca^{2+} 的T1组,为CK的2.31倍(图2),说明高浓度的NaCl可能导致了氧化胁迫,增强了膜脂过氧化程度。加入不同浓度的外源 Ca^{2+} 后,与T1相比各处理植株叶片的MDA含量显著下降,分别下降了T1的33.40%、38.88%、46.27%、23.99%,各处理之间差异不显著,其中以加入15 mmol/L Ca^{2+} 的T4处理效

果最好(图2)。以上结果表明加入一定浓度的 Ca^{2+} 可能抑制了 NaCl 胁迫下菊花幼苗的膜脂过氧化作用,从而减轻膜脂过氧化对细胞的伤害,但 Ca^{2+} 浓度过高又可能会降低这种抑制作用。

2.3 外源 Ca^{2+} 对 NaCl 胁迫下菊花幼苗 Pro 含量的影响

菊花幼苗在 150 mmol/L NaCl 胁迫处理后,各处理 Pro 含量均有所上升,其中 Pro 含量最高出现在未加 Ca^{2+} 的 T1 组,为 CK 的 2.65 倍;与 T1 相比,加入不同浓度的外源 Ca^{2+} 后各处理 Pro 含量出现不同程度的下降,分别下降了 T1 的 1.28%、8.48%、46.90%、16.04%,其中 T2、T3、T1 处理间差异不显著,而 T4 处理植株的 Pro 含量下降得最多,与对照无显著差异(图3)。结果表明,盐胁迫下增施一定浓度的外源钙离子可能增强了植株的渗透调节能力,从而缓解盐胁迫对



不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著;下同

图2 不同浓度 Ca^{2+} 对 NaCl 胁迫下菊花幼苗 MDA 含量的影响

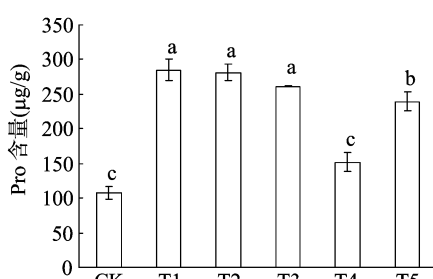


图3 不同浓度 Ca^{2+} 对 NaCl 胁迫下菊花幼苗 Pro 含量的影响

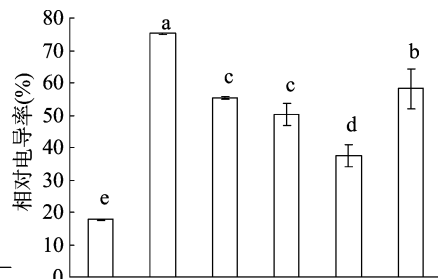


图4 不同浓度 Ca^{2+} 对 NaCl 胁迫下菊花幼苗相对电导率的影响

2.5 外源 Ca^{2+} 对 NaCl 胁迫下菊花幼苗叶绿素含量的影响

与 CK 相比,菊花在 150 mmol/L NaCl 胁迫处理后各处理植株的叶绿素含量均显著下降,其中下降最多的是 T1 处理,为 CK 的 51.50%;与 T1 相比,加入不同浓度的外源 Ca^{2+} 后各处理叶绿素含量均有不同程度上升,总体趋势是先上升后下降,其中 T2 上升的最少,T4 上升的最多,分别是 T1 处理的 1.06、1.42 倍(图5)。这表明一定浓度的外源钙离子可能减缓了 NaCl 胁迫下菊花幼苗叶片叶绿素的降解速度,一定程度上稳定了叶绿素含量,从而对菊花叶片的光合作用起到了一定的保护作用。

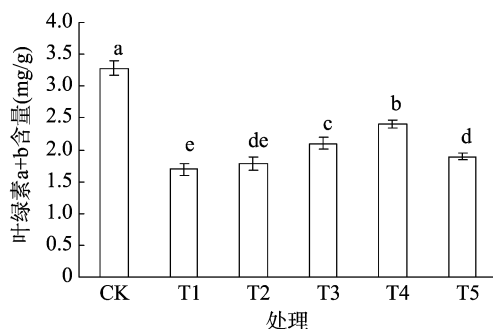


图5 不同浓度 Ca^{2+} 对 NaCl 胁迫下菊花幼苗叶绿素含量的影响

2.6 外源 Ca^{2+} 对 NaCl 胁迫下菊花幼苗光合作用的影响

与 CK 相比,菊花幼苗在 150 mmol/L NaCl 胁迫下,T1 处理植株 P_n 、 G_s 、 C_i 、 T_r 均显著下降,分别下降了 71.15%、70.27%、40.47%、63.64%;各处理与 T1 相比,加入不同浓度的外源 Ca^{2+} 后 P_n 、 G_s 、 C_i 、 T_r 均出现不同程度升高,且随着

植株的渗透胁迫伤害。

2.4 外源 Ca^{2+} 对 NaCl 胁迫下菊花幼苗相对电导率的影响

与 CK 相比,菊花在 150 mmol/L NaCl 胁迫处理后 T1 处理植株的相对电导率显著上升了 324.24%(图4),说明高浓度的 NaCl 使菊花细胞质膜受到损伤,增强膜的透性,从而加剧了细胞内的电解质外渗;加入不同浓度的外源 Ca^{2+} 后,与 T1 相比,处理组 T2、T3、T4、T5 的相对电导率均显著下降,分别下降了 T1 的 26.42%、33.35%、50.45%、22.81%,其中加入 15 mmol/L Ca^{2+} 的 T4 处理的相对电导率最低,而加入 20 mmol/L Ca^{2+} 的 T5 处理相对电导率最高(图4)。以上结果表明盐胁迫下增施一定浓度的外源钙离子可有效提高膜的稳定性,缓解释质的外渗,但 Ca^{2+} 浓度过高,可能与 Na^+ 、 Cl^- 一样会对植株产生离子胁迫。

Ca^{2+} 浓度的升高,各光合指标均呈现先上升后下降的趋势,并都在 T4 处理达到最大值,该处理植株叶片的 P_n 、 G_s 、 C_i 、 T_r 比 T1 分别显著上升了 161.74%、136.67%、279.92%、175.00%。但与 CK 相比,T4 处理植株的 P_n 、 C_i 显著低于 CK, G_s 与 CK 无显著差异,而 T_r 显著高于 CK,这可能是由于盐胁迫下植物自身适应调节的一种方式;气孔导度和胞间二氧化碳浓度变化趋势一致,从而推断,盐胁迫下净光合速率的降低主要是由于气孔因子造成的(表1)。以上结果表明,盐胁迫导致了菊花叶片 P_n 、 G_s 、 C_i 、 T_r 的下降,但 Ca^{2+} 却减轻了其下降的程度,即一定浓度的 Ca^{2+} 能维持盐胁迫下菊花较高的同化能力。

2.7 外源 Ca^{2+} 对 NaCl 胁迫下菊花幼苗 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 含量的影响

与 CK 相比,菊花幼苗在 150 mmol/L NaCl 胁迫后各处理植株的叶片中 Ca^{2+} 、 K^+ 含量均降低而 Na^+ 含量均升高,其中 T1 处理植株的离子含量变化最大,分别是 CK 的 0.4、0.66、3.35 倍;与 T1 相比,加入不同浓度的外源 Ca^{2+} 后各处理植株叶片的 Ca^{2+} 分别上升了 10.71%、16.11%、87.68%、5.65%, K^+ 分别上升 9.36%、12.90%、20.41%、17.46%,而 Na^+ 分别下降了 54.81%、57.43%、61.04%、48.04%(图6-A)。这表明一定浓度的外源钙处理可减少菊花幼苗叶片 Na^+ 的积累而增加 K^+ 、 Ca^{2+} 的浓度,最佳钙离子浓度为 15 mmol/L。

进一步分析发现,与 CK 相比,单纯盐胁迫下菊花幼苗叶片 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 、 K^+/Na^+ 显著降低,分别比 CK 下降了 86.23%、79.84%;加入不同浓度的外源 Ca^{2+} 后,各处理植株的 $\text{Ca}^{2+}/$

表 1 不同浓度 Ca^{2+} 对 NaCl 胁迫下菊花幼苗光合指标的影响

处理	P_n	G_s	C_i	T_r
	$[\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$	$[\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$	$(\mu\text{mol}/\text{mol})$	$[\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$
CK	$6.125 \pm 0.415\text{a}$	$9.31 \pm 0.272\text{a}$	$249.525 \pm 18.246\text{a}$	$0.220 \pm 0.012\text{b}$
T1	$1.767 \pm 0.124\text{e}$	$2.768 \pm 0.279\text{d}$	$148.545 \pm 15.019\text{d}$	$0.080 \pm 0.009\text{c}$
T2	$3.151 \pm 0.419\text{d}$	$5.4355 \pm 0.514\text{c}$	$163.802 \pm 10.585\text{cd}$	$0.183 \pm 0.041\text{b}$
T3	$4.341 \pm 0.140\text{b}$	$6.551 \pm 0.054\text{bc}$	$190.125 \pm 12.394\text{bc}$	$0.220 \pm 0.029\text{b}$
T4	$4.625 \pm 0.136\text{b}$	$8.567 \pm 0.339\text{ab}$	$214.842 \pm 5.706\text{b}$	$0.296 \pm 0.010\text{a}$
T5	$3.620 \pm 0.168\text{c}$	$6.648 \pm 0.611\text{c}$	$179.345 \pm 14.165\text{cd}$	$0.198 \pm 0.070\text{b}$

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

Na^+ 、 K^+/Na^+ 呈现先上升后下降的趋势,与 T1 相比各处理的 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 、 K^+/Na^+ 除 T5 处理的 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 与 T1 差异不显著外,其他处理均显著高于 T1。T4 处理效果最好, $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 、 K^+/Na^+ 分别是 T1 的 4.80、3.05 倍,但与 CK 相比,加钙后各处理的 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 、 K^+/Na^+ 仍显著小于 CK(图 6-B)。这表明外源钙离子可能通过降低 Na^+ 离子在叶片中积累,提高叶片对 Ca^{2+} 、 K^+ 的选择性吸收从而维持较高的 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 、 K^+/Na^+ 来减轻叶片的离子毒害或保持盐胁迫下细胞内的离子平衡,进而缓解植株的盐胁迫危害。

于对照,与 T1 相比,加入不同浓度的 Ca^{2+} 后各处理 MDA 含量和相对电导率又显著降低,且这种缓解效果随着 Ca^{2+} 浓度的升高呈现先上升后下降的趋势,其中以 15 mmol/L 的 T4 处理效果最好(MDA 含量为 T1 的 53.73%,相对电导率为 T1 的 49.65%),这表明 Ca^{2+} 只有在一定浓度范围内起到保护膜的作用,超过最适浓度, Ca^{2+} 可能会与磷酸反应生成沉淀而扰乱以磷酸为基础的能量代谢,过高浓度的 Ca^{2+} 也可能对植物产生新的盐害。这与刘新星等在豌豆^[13]、陈全战等在油用向日葵^[14]、尹增芳等在海滨锦葵^[15] 上的研究结果一致。

盐胁迫下,外界环境的渗透势降低,盐分对植物细胞会产生渗透胁迫。渗透调节能力是植物耐盐的最基本特征之一^[16]。大量研究试验表明,植物在盐胁迫下会合成一些小分子有机物质(如多元醇、甜菜碱、可溶性糖等)以增强植物的渗透调节能力,改善水分状态,从而缓解盐胁迫危害。在众多渗透调节物质中,脯氨酸以游离状态存在于植物细胞中,具有水溶性高、分子量低、在生理 pH 值范围内无静电荷等特点^[17],是分布最广的一种相容渗透剂,在植物对盐的抗胁迫适应中具有非常重要的意义。本研究结果表明,在单纯盐胁迫下菊花幼苗的脯氨酸含量比对照显著升高了 265.25%。加入不同浓度的 Ca^{2+} 后,各处理的脯氨酸有不同程度的下降,其中 T4 处理下降得最多,与 CK 无显著差异。研究结果与前人得出的部分结果相似,如程玉静等研究外源硝酸钙对黄瓜幼苗盐胁迫伤害的缓解作用时发现,盐胁迫下黄瓜幼苗叶片脯氨酸含量高出对照的 28.1%,叶面喷施 2 mmol/L 硝酸钙后,脯氨酸含量显著低于对照^[18]。但也有研究得到了不太一致的结果,如朱晓军等研究发现加入 5、10 mmol/L Ca^{2+} 后促进了盐胁迫下水稻幼苗脯氨酸的积累^[19];刘新星等研究发现豌豆幼苗叶片脯氨酸含量随处理时间的延长,对照及各处理豌豆幼苗叶片脯氨酸含量呈总体上升趋势,且加钙处理明显高于单纯盐胁迫^[13]。目前对于脯氨酸的积累与抗盐性的关系仍存在不同的看法:有学者认为脯氨酸在盐害条件下的积累起到了细胞渗透压调节剂的作用,保护膜与酶的结构,从而缓解盐胁迫^[20];也有学者认为钙离子浓度与盐胁迫下脯氨酸的积累呈负相关^[21]。从本研究的结果来看,脯氨酸可能仅是盐胁迫下的一种产物,外加一定浓度的 Ca^{2+} 可能通过保护膜稳定性、保持离子平衡等途径减少植物盐胁迫所受的伤害,从而减少脯氨酸的积累。总之,关于植物在盐胁迫下脯氨酸的积累与抗盐性还有待进一步研究。

细胞内一价离子 Na^+ 、 K^+ 和二价离子 Ca^{2+} 之间的平衡是维持质膜通透性和细胞膜结构完整性的重要因素之一。Cramer 等认为盐胁迫下植株体内 K^+ 、 Ca^{2+} 等元素含量下降,

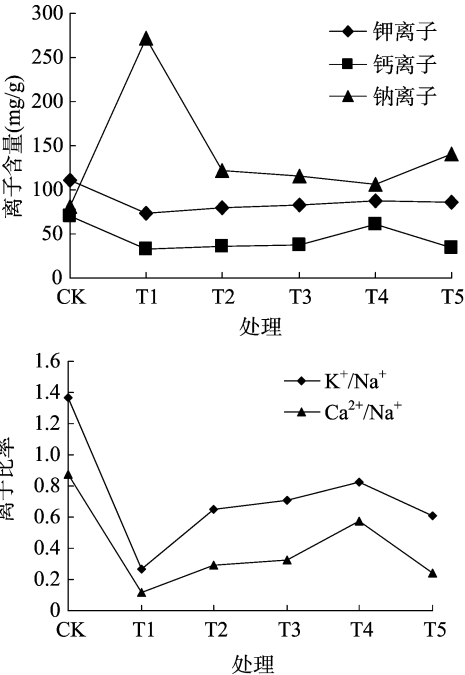


图6 Ca^{2+} 对NaCl 胁迫下菊花幼苗 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 含量和 K^+/Na^+ 、 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 的影响

3 讨论

在盐胁迫等逆境条件下,植物体内活性氧代谢系统的平衡受到影响,导致体内积累较多的活性氧(如 $\text{O}_2^{\cdot -}$ 、 H_2O_2 、 $\cdot\text{OH}$ 等)^[12]以启动膜脂过氧化作用,损伤或破坏膜结构,而在植物体内积累较多的MDA,进而引起电解质外渗。钙除了是植物体内一种大量矿质元素外,还作为一种重要的细胞膜的保护物质,通过把膜表面的磷酸盐和磷酸脂以及蛋白质的羟基桥连起来从而维持盐胁迫下细胞质膜、液泡膜、叶绿体膜的结构稳定性以及ATPase的活性^[3]。本研究结果表明,单纯盐胁迫下菊花幼苗叶片的MDA含量、相对电导率显著高

一方面是由于外界高浓度 Na^+ 显著降低了 K^+ 、 Ca^{2+} 等离子活度;另一方面是由于具有高度活性的单价离子如 Na^+ 、 Cl^- 等竞争一些必需营养元素在膜上的运转位点^[21]。本研究结果表明,盐胁迫下加入不同浓度外源钙可显著降低菊花幼苗叶片的 Na^+ 含量,提高 K^+ 、 Ca^{2+} 含量及 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 、 K^+/Na^+ 来缓解菊花盐害。随着 Ca^{2+} 浓度的升高,这种缓解效果呈先上升后下降的趋势,其中以加入 15 mmol/L Ca^{2+} 的 T4 处理效果最好。一方面可能是适宜浓度的 Ca^{2+} 缓解了 Ca^{2+} 不足引起的矿质营养胁迫;另一方面可能是适宜浓度的 Ca^{2+} 激活了与离子运输有关的酶的活性,使植物体 K^+ 、 Ca^{2+} 含量提高而 Na^+ 、 Cl^- 含量下降,从而维持细胞内离子平衡以减少离子胁迫带给植物的伤害,与马淑英等的研究结果^[4,18,22]一致。

光合作用是植物生长发育的基础^[23-24],叶绿素是光合作用的主要色素,其含量的高低在一定程度上反映了植物的同化能力的强弱。盐胁迫下植物叶片中叶绿素含量下降,其主要原因是盐胁迫提高了叶绿素酶的活性,促进了叶绿素的降解,从而导致叶绿素含量减小^[25]。本研究结果表明,单纯盐胁迫显著降低了菊花幼苗叶绿素含量,而加入一定浓度的 Ca^{2+} 后,能够显著抑制叶绿素含量的下降,在一定程度上促进菊花在盐胁迫下维持较高的光合速率。植物叶片净光合速率的降低主要有由于气孔的部分关闭导致的气孔限制和叶肉细胞光合活性的下降导致的非气孔限制 2 类,判断依据是细胞间隙 CO_2 浓度和气孔导度的变化方向^[26]。本研究发现盐胁迫下加入不同浓度的 Ca^{2+} 后,各处理的细胞间隙 CO_2 浓度和气孔导度均同步呈现先上升后下降的趋势,因此认为此时期菊花净光合速率下降的原因主要是由气孔因子限制。本研究通过对净光合速率等光合指标测定,结果表明一定浓度的 Ca^{2+} 可以减轻盐胁迫下菊花净光合速率、气孔导度、细胞间隙 CO_2 浓度、蒸腾速率的下降程度,使其在一定程度上维持较高的光合速率。

综上所述,菊花幼苗在盐胁迫下加入一定浓度的 Ca^{2+} 后能够有效缓解盐胁迫对菊花的伤害,且这种缓解效果随着 Ca^{2+} 浓度的升高表现为先上升后下降的趋势,其中以加入 15 mmol/L Ca^{2+} 的缓解效果最好。在盐胁迫下,适宜浓度的 Ca^{2+} 通过稳定菊花的细胞膜结构、抑制膜脂的过氧化、激活或抑制细胞膜上的各种离子通道,提高 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 、 K^+/Na^+ 达到细胞内外离子浓度平衡、减少盐胁迫下形成渗透调节物质所消耗的能量等途径缓解盐害效应,从而维持菊花幼苗较高的光合效率,提高菊花幼苗的耐盐性。但当外源 Ca^{2+} 浓度较高时,其缓解作用明显减弱,高浓度 Ca^{2+} 对植物生长的影响还有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] 晓 白,薛建平,房伟民. 菊花:产业蓄势待发[J]. 中国花卉园艺,2013(23):28-29.
- [2] 刘雪琴,全瑞建,施佳妮. 外源 Ca^{2+} 对盐胁迫下玉米萌发与幼苗生长的影响[J]. 中国农学通报,2010,26(17):197-200.
- [3] 戴高兴,彭克勤,皮灿辉. 钙对植物耐盐性的影响[J]. 中国农学通报,2003,19(3):97-101.
- [4] 马淑英,赵 明. 钙对拟南芥耐盐性的调节[J]. 作物学报,

2006,32(11):1706-1711.

- [5] 赵长江,薛盈文,杨克军,等. 外源钙对盐胁迫下玉米幼苗不同器官离子含量的影响[J]. 玉米科学,2012,20(3):68-72.
- [6] 刘丽云,侯传本,王明友,等. 外源钙离子对盐胁迫下小麦萌发的影响[J]. 山东农业科学,2007(5):60-62.
- [7] 严 蓓,孙 锦,郭世荣,等. 钙对盐胁迫下黄瓜幼苗生长及可溶性蛋白质表达的影响[J]. 江苏农业学报,2012,28(4):841-845.
- [8] 米银法,王进涛,朱 坤. 外源钙对盐胁迫下菊花生理效应影响[J]. 科技导报,2010,28(17):83-86.
- [9] 李合生,孙 群,赵世杰,等. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社,2000.
- [10] 张治安,陈展宇. 植物生理学实验技术[M]. 长春:吉林大学出版社,2008.
- [11] 王宝山,赵可夫. 小麦叶片 K^+ 、 Na^+ 提取方法的比较[J]. 植物生理学通讯,1995,31(1):50-52.
- [12] 李晓燕,宋占午,董志贤. 植物的盐胁迫生理[J]. 西北师范大学学报:自然科学版,2004,40(3):106-111.
- [13] 刘新星,罗俊杰. 外源钙对盐胁迫下豌豆幼苗生化指标的影响[J]. 北方园艺,2013(14):24-27.
- [14] 陈全胜,张边江,周 峰,等. 钙对盐胁迫下油用向日葵幼苗光合生理特性的影响[J]. 华北农学报,2009,24(2):149-152.
- [15] 尹增芳,何祯祥,陈梦阳,等. 外源钙对 NaCl 胁迫下海滨锦葵种子萌发和幼苗生长的缓解效应[J]. 西北植物学报,2006,26(3):462-466.
- [16] 余叔文,汤章城. 植物生理与分子生物学[M]. 2 版. 北京:科学出版社,1998:752-769.
- [17] 焦 蓉,刘好宝,刘贯山,等. 论脯氨酸累积与植物抗渗透胁迫[J]. 中国农学通报,2011,27(7):216-221.
- [18] 程玉静,郭世荣,张润花,等. 外源硝酸钙对黄瓜幼苗盐胁迫伤害的缓解作用[J]. 西北植物学报,2009,29(9):1853-1859.
- [19] 朱晓军,杨劲松,梁永超,等. 盐胁迫下钙对水稻幼苗光合作用及相关生理特性的影响[J]. 中国农业科学,2004,37(10):1497-1503.
- [20] Khokhlova L P, Asafova E V. The effect of calcium on the content of proline and soluble proteins in plants acclimating to low temperature[J]. Russ Journal of Plant Physiology,1994,41:447-453.
- [21] Cramer G R, Abdel B R, Seemann J R. Salinity calcium interactions on root growth and osmotic adjustment of two corn cultivars differing in salt tolerance[J]. Journal of Plant Nutrition,1990,13:1453-1462.
- [22] 丁能飞,傅庆林,刘 琛,等. 外源氯化钙对盐胁迫下西兰花抗氧化酶系统及离子吸收的影响[J]. 中国农学通报,2010,26(6):133-137.
- [23] 徐 刚,彭天沁,高文瑞,等. 氮肥水平对木薯渣复合基质栽培黄瓜生长及光合作用的影响[J]. 江苏农业学报,2015,31(1):68-72.
- [24] 徐摇刚,彭天沁,高文瑞,等. 不同基质含水量和钾肥施用量对黄瓜生长及光合作用的影响[J]. 江苏农业学报,2014,30(5):1109-1114.
- [25] 王东明,贾 媛,崔继哲. 盐胁迫对植物的影响及植物盐适应性研究进展[J]. 中国农学通报,2009,25(4):124-128.
- [26] 管志勇,陈发棣,滕年军,等. 5 种菊花近缘种属植物的耐盐性比较[J]. 中国农业科学,2010,43(4):787-794.