

钙对盐胁迫下小金海棠幼苗生物量及抗氧化系统的影响

徐臣善*

德州学院生态与园林建筑学院, 山东德州253023

摘要: 本文以1/2Hoagland营养液栽培的小金海棠为试材, 研究70 mmol·L⁻¹的NaCl胁迫下, 钙对小金海棠幼苗生物量、超氧自由基(O₂⁻)产生速率、丙二醛(MDA)含量、电解质相对渗透率、抗氧化酶(SOD、POD、CAT和APX)活性及可溶性蛋白含量的影响。结果表明, 盐胁迫下, 小金海棠幼苗生物量显著低于对照, 根系和叶片的O₂⁻产生速率、MDA含量、电解质相对渗透率、抗氧化酶活性及可溶性蛋白含量显著高于对照。盐胁迫下, 与不加钙处理相比, 加钙处理显著降低了小金海棠幼苗O₂⁻产生速率、MDA含量及电解质相对渗透率, 显著提高了生物量、抗氧化酶和可溶性蛋白的含量, 10 mmol·L⁻¹ CaCl₂处理的效果显著好于30 mmol·L⁻¹处理的。综上可知, 盐胁迫下小金海棠幼苗的生长受到抑制, 外源施钙可以减轻盐胁迫对幼苗造成的伤害, 提高幼苗对盐胁迫的适应能力。

关键词: 小金海棠; 钙; 盐胁迫; 生物量; 抗氧化酶

Effects of Calcium on Biomass and Antioxidant Systems in Seedlings of *Malus xiaojinensis* under Salt Stress

XU Chen-Shan*

College of Ecology and Garden Architecture, Dezhou University, Dezhou, Shandong 253023, China

Abstract: In this experiment, *Malus xiaojinensis* cultured in 1/2Hoagland nutrient media was used as test material. The biomass of seedlings of *M. xiaojinensis*, the superoxide (O₂⁻) production rate, malondialdehyde (MDA) content, electrolytic leakage, activities of antioxidant enzymes (SOD, POD, CAT and APX) and soluble proteins content in seedlings of *M. xiaojinensis* were determined to study the possible effects of calcium on plant under salt stress (70 mmol·L⁻¹ NaCl). The results showed that, under salt stress, the biomass of seedlings was significantly lower than that in the control, and the O₂⁻ production rates, MDA contents, electrolytic leakages, activities of antioxidant enzymes and soluble protein contents in roots and leaves were significantly higher than those in the control. Compared with the absence of calcium from nutrient media, the treatments of calcium significantly reduced the O₂⁻ production rate, MDA content and electrolytic leakage, and increased the biomass, activities of antioxidant enzymes and soluble protein content in the seedlings of *M. xiaojinensis* under salt stress. The addition of 10 mmol·L⁻¹ CaCl₂ showed a better effect than 30 mmol·L⁻¹ CaCl₂ on the salt tolerance of the seedlings. So, it could be concluded that salt stress inhibited growth of seedlings in *M. xiaojinensis*, and the addition of exogenous calcium could reduce the salt damages to seedlings and improve its salt tolerance.

Key words: *Malus xiaojinensis*; calcium; salt stress; biomass; antioxidant enzymes

盐碱土是陆地上广泛分布的一种土壤类型(李迎春和陈双林2008), 是农业生产的主要限制因素之一。近些年来, 由于化肥的过量施用、不合理灌溉等人为因素造成土壤盐渍化程度增加, 我国盐碱土面积有增加的趋势, 严重制约着农业生产的可持续发展。盐胁迫对植物的伤害是多种因素共同作用的结果, 包括渗透胁迫、特定离子毒害等(Nandwal等2000), 盐胁迫对植物的生理、生化代谢产生广泛影响(Di Baccio等2003), 限制了组织和器官的生长发育。在盐胁迫下, 植物体内超氧

自由基(O₂⁻)、过氧化氢(H₂O₂)等活性氧(ROS)增加(de Azevedo Neto等2006), 引起膜脂过氧化, 产生大量有害物质丙二醛(MDA), 膜透性的增加还会加大电解质外渗, 破坏细胞正常代谢。因此, 抗氧化酶活性、MDA含量及渗透调节物质含量的高低在一定程度上反映了植物的逆境适应能力(汪良驹

收稿 2014-01-03 修定 2014-04-01

资助 国家“十二五”科技支撑计划项目(2011BAD12B02)和德州学院人才引进项目(402115)。

* 通讯作者(E-mail: michael_10@163.com; Tel: 0534-8987859)。

等1989)。

钙是植物所必需的营养元素,对维持细胞膜选择透性(Amor等2010)、离子运输(Zhu 2002)、信号转导(McAinsh等1996)、调控酶活性等发挥重要作用,可提高植物对逆境的适应能力,如提高耐盐性(朱晓军等2005;韩冰等2010;Li等2003)、耐低温(李晓明等2006)、抗旱性等(姜义宝等2008)。外源钙对植物盐害效应的缓解作用已有报道,主要从施钙种类、浓度、时期等方面分析外源钙对盐胁迫下植物的生物量、内源激素含量、光合作用、离子代谢、渗透调节等生理代谢伤害的缓解作用。袁晓婷等(2014)认为一定浓度的外源钙可增加盐生植物唐古特白刺叶片的相对含水量、水势及根系活力,降低电解质外渗率和MDA含量,增加脯氨酸积累,提高超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)活性。陈晓云等(2012)研究认为外源钙处理能明显降低盐胁迫下荞麦叶片的质膜透性和MDA含量,增加SOD、抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性及净光合速率,效果好于外源蔗糖处理。杨凤军等(2010)研究表明,盐胁迫同时增施外源钙能缓解NaCl胁迫对番茄幼苗的伤害作用,但盐胁迫之前增施外源钙不具备这种作用,认为外源钙提高番茄耐盐性不是诱导效应,而主要是与Na⁺共存的离子竞争效应。李青云等(2008)研究表明,外源Ca(NO₃)₂可抑制盐胁迫下草莓叶片细胞膜透性的增加,增加叶片脯氨酸含量,降低根系和叶片中的脱落酸含量,增加赤霉素、生长素、玉米素的含量和ZT/ABA比值。毛桂莲等(2007)认为CaCl₂缓解盐胁迫对枸杞愈伤组织生长伤害的效果好于Ca(NO₃)₂和CaSO₃。

小金海棠是我国特有的苹果砧木资源,被广泛用作苹果栽培的砧木,具有耐盐碱、耐热、耐旱、耐涝、耐瘠薄、抗寒和抗缺铁等优良性状,与多数苹果品种的嫁接亲和性较好(成明昊等2000),具有较强的无融合生殖能力,是一种理想的果树研究材料。目前,钙对盐胁迫下小金海棠幼苗生长及抗氧化系统影响的研究未见报道。本研究以小金海棠为试材,研究不同浓度钙对盐胁迫下幼苗生物量、O₂产生速率、MDA含量、相对电导率、可溶性蛋白含量及抗氧化酶活性的影响,旨在为合理使用外源物质减轻盐胁迫危害提供依据。

材料与方 法

1 材料及试验处理

试验于2012年4月在德州学院生态与园林建筑学院实验中心人工气候室内进行。小金海棠(*Malus xiaojinensis* Cheng et Jiang)种子经在消毒的石英砂中层积发芽后,在容器中育苗,至2片真叶时,选择长势一致的幼苗移栽至营养钵中用营养液培养。

以1/2Hoagland营养液(pH=6)为基本营养液,培养至6片真叶时进行处理。试验设对照和3个处理:(1)对照,1/2Hoagland营养液;(2)去掉1/2Hoagland营养液中的Ca(NO₃)₂,用NaNO₃代替,使营养液中不含钙,加入70 mmol·L⁻¹ NaCl;(3)在1/2Hoagland营养液中加入70 mmol·L⁻¹ NaCl和10 mmol·L⁻¹ CaCl₂;(4)在1/2Hoagland营养液中加入70 mmol·L⁻¹ NaCl和30 mmol·L⁻¹ CaCl₂。每2 d换1次营养液,处理8 d后测定各项指标,对照和各处理每次重复分别用苗8株,共3次重复。

人工气候室内培养条件为:昼/夜温度为26/20℃,相对湿度为75%~85%,光照强度为400~480 μmol·m⁻²·s⁻¹,昼/夜周期为16 h/8 h。

2 测定项目及方法

幼苗株高用直尺测定。叶面积用YMJ-B便携式叶面积仪测定。幼苗用去离子水冲洗地上部和根系,洗净后擦干,然后在105℃下杀青15 min,75℃下烘干至恒重,称量地上部和根系干重。O₂产生速率测定采用王爱国和罗广华(1990)的方法。MDA含量的测定参照Heath和Packer(1968)的硫代巴比妥酸法。可溶性蛋白含量测定采用Bradford(1976)考马斯亮蓝G-250法。电解质相对渗漏率的测定采用Dionisio-Sese和Tobita(1998)的方法,电解质相对渗漏率=(胁迫后电导率-胁迫前电导率)/(组织杀死后电导率-胁迫前电导率)×100%。酶液提取参照Li等(2008)的方法,SOD、POD和过氧化氢酶(CAT)的测定参照赵世杰等(2002)介绍的方法,APX的测定采用Nakano和Asada(1981)的方法。

3 数据分析

采用SAS和Excel软件进行数据分析。实验数据均为3次重复的平均值,采用Duncan多重比较法(P<0.05)进行差异显著性检验。

实验结果

1 钙对盐胁迫下小金海棠幼苗生物量的影响

如表1所示, 小金海棠幼苗对照的株高最高, 盐胁迫显著降低了小金海棠幼苗株高。盐胁迫下, 钙处理可显著提高株高, 10 mmol·L⁻¹ CaCl₂处理的株高显著高于30 mmol·L⁻¹ CaCl₂的。对照和10 mmol·L⁻¹ CaCl₂处理的幼苗地上部干重之间无显著差异, 并显著高于其它处理, 不加钙处理的幼苗地上部干重最小。对照的根系干重最高, 盐胁迫显著降低了根系干重。盐胁迫下, 10 mmol·L⁻¹ CaCl₂

处理的根系干重最高, 不加钙处理的根系干重最低。对照和各处理的幼苗根冠比之间无显著差异, 表明盐胁迫和钙处理对幼苗根冠比无明显影响。各处理幼苗的叶面积显著低于对照, 表明盐胁迫显著减小了幼苗叶面积。盐胁迫下, 10 mmol·L⁻¹ CaCl₂处理的叶面积高于30 mmol·L⁻¹ CaCl₂处理和 不加钙处理, 不加钙处理的幼苗叶面积最小。综上所述可知, 与对照相比, 盐胁迫降低了小金海棠幼苗的生物量(株高、地上部及根系干重、叶面积), 加钙处理可以减缓盐胁迫对生物量的影响, 其中, 10 mmol·L⁻¹ CaCl₂的效果最好。

表1 钙对盐胁迫下小金海棠幼苗生物量的影响

Table 1 Effects of calcium on biomass of seedlings in *M. xiaojinensis* under salt stress

处理	株高/cm	地上部干重/mg	根系干重/mg	根冠比	叶面积/cm ²
对照	10.26 ^a	207.0 ^a	69.2 ^a	0.3343 ^a	51.48 ^a
NaCl	6.88 ^d	137.2 ^c	46.8 ^d	0.3411 ^a	28.16 ^d
NaCl+10 mmol·L ⁻¹ CaCl ₂	9.35 ^b	198.8 ^a	63.7 ^b	0.3204 ^a	45.84 ^b
NaCl+30 mmol·L ⁻¹ CaCl ₂	8.07 ^c	161.7 ^b	53.8 ^c	0.3327 ^a	35.09 ^c

同列的不同小写字母表示不同处理间差异达到5%显著水平。下表同此。

2 钙对盐胁迫下小金海棠幼苗O₂⁻产生速率、MDA含量及电解质相对渗透率的影响

由表2可知, 与对照相比, 盐胁迫显著提高了小金海棠幼苗根系和叶片中O₂⁻产生速率。盐胁迫下, 不加钙处理植株的O₂⁻产生速率最高, 钙处理显著降低了O₂⁻产生速率, 其中10 mmol·L⁻¹ CaCl₂处理时植株O₂⁻产生速率最低, 显著低于30 mmol·L⁻¹ CaCl₂处理。表明盐胁迫提高了幼苗体内O₂⁻的产生速率, 而加钙可以降低O₂⁻的产生速率, 减缓活性氧对幼苗的伤害。

活性氧的积累导致细胞膜的结构和功能遭到破坏, 而MDA是膜脂过氧化的产物, 因此, 其含量

高低反映了脂质的氧化程度和质膜破坏程度(Zavaleta-Mancera等2007)。由表2可知, 与对照相比, 盐胁迫显著提高了根系和叶片中MDA的含量。盐胁迫下, 不加钙处理植株的MDA含量最高, 10 mmol·L⁻¹ CaCl₂处理的最低, 30 mmol·L⁻¹ CaCl₂处理的居中, 表明盐胁迫导致了幼苗膜脂过氧化, 提高了体内MDA含量, 加钙处理在一定程度上缓解了膜脂过氧化, 降低了MDA含量, 10 mmol·L⁻¹ CaCl₂处理的效果好于30 mmol·L⁻¹ CaCl₂的。

膜透性也是反映细胞膜受伤害程度的重要指标, 常以电解质相对渗透率表示。由表2可知, 与对照相比, 盐胁迫显著提高了根系和叶片的电解

表2 钙对盐胁迫下小金海棠幼苗O₂⁻产生速率、MDA含量及电解质相对渗透率的影响

Table 2 Effects of calcium on O₂⁻ production rate, MDA content and electrolytic leakage of seedlings in *M. xiaojinensis* under salt stress

处理	O ₂ ⁻ 产生速率/nmol·g ⁻¹ (FW)·min ⁻¹		MDA含量/μmol·g ⁻¹ (FW)		电解质渗透率/%	
	根系	叶片	根系	叶片	根系	叶片
对照	4.16 ^d	5.70 ^d	6.45 ^d	9.30 ^d	7.17 ^d	8.02 ^d
NaCl	11.49 ^a	14.78 ^a	18.64 ^a	22.09 ^a	22.23 ^a	24.03 ^a
NaCl+10 mmol·L ⁻¹ CaCl ₂	6.08 ^c	8.01 ^c	9.31 ^c	12.34 ^c	10.17 ^c	11.30 ^c
NaCl+30 mmol·L ⁻¹ CaCl ₂	8.58 ^b	11.03 ^b	14.94 ^b	18.01 ^b	17.38 ^b	19.25 ^b

质相对渗透率。盐胁迫下, 不加钙植株的电解质相对渗透率最高, 30 mmol·L⁻¹ CaCl₂处理次之, 10 mmol·L⁻¹ CaCl₂处理最低。表明盐胁迫提高了小金海棠幼苗的电解质相对渗透率, 使膜透性增加, 而加钙在一定程度上能够降低电解质相对渗透率, 降低膜透性, 缓解盐胁迫对细胞膜的损害, 10 mmol·L⁻¹ CaCl₂处理的效果好于其他处理。

3 钙对盐胁迫下小金海棠幼苗抗氧化酶活性及可溶性蛋白含量的影响

由表3可知, 与对照相比, 盐胁迫显著提高了小金海棠幼苗根系和叶片中抗氧化酶(SOD、POD、CAT和APX)活性。盐胁迫下, 不加钙处理植株的SOD、POD和APX活性显著低于钙处理的。其中, 10 mmol·L⁻¹ CaCl₂处理植株的SOD、POD和APX活性最高, 显著高于30 mmol·L⁻¹ CaCl₂处理。盐胁迫下, 10 mmol·L⁻¹ CaCl₂处理幼苗的叶片CAT活

性最高, 其次为30 mmol·L⁻¹ CaCl₂处理, 不加钙处理最低; 在根系中, CAT活性以10 mmol·L⁻¹ CaCl₂处理最高, 30 mmol·L⁻¹ CaCl₂处理和不加钙处理之间无显著差异。综上分析可知, 钙处理提高了小金海棠幼苗根系和叶片中抗氧化酶的活性, 增强了植株对自由基的清除能力, 有利于提高植株的抗盐能力。

植物在逆境条件下, 体内的渗透调节物质会增加, 以提高对逆境的适应能力。由表3可知, 与对照相比, 盐胁迫显著提高了小金海棠幼苗根系和叶片中可溶性蛋白的含量。盐胁迫下, 10 mmol·L⁻¹ CaCl₂处理植株的可溶性蛋白含量最高, 其次为30 mmol·L⁻¹ CaCl₂处理, 不加钙处理最低。表明盐胁迫下, 小金海棠幼苗根系和叶片中可溶性蛋白的含量增加, 加钙进一步提高了可溶性蛋白的含量, 提高了植株的渗透调节能力, 增强了对盐胁迫的适应能力。

表3 钙对盐胁迫下小金海棠幼苗抗氧化酶活性及可溶性蛋白含量的影响

Table 3 Effects of calcium on activities of antioxidant enzymes and soluble protein content of seedlings in *M. xiaojinensis* under salt stress

处理	SOD活性/ U·g ⁻¹ (FW)·min ⁻¹		POD活性/ U·g ⁻¹ (FW)·min ⁻¹		CAT活性/ U·g ⁻¹ (FW)·min ⁻¹		APX活性/ U·g ⁻¹ (FW)·min ⁻¹		可溶性蛋白含量/ mg·g ⁻¹ (FW)	
	根系	叶片	根系	叶片	根系	叶片	根系	叶片	根系	叶片
对照	225.7 ^d	449.4 ^d	11.95 ^d	14.24 ^d	25.11 ^c	26.43 ^d	25.28 ^d	27.73 ^d	6.868 ^d	8.239 ^d
NaCl	272.7 ^c	519.4 ^c	14.88 ^c	19.50 ^c	28.26 ^b	30.62 ^c	30.17 ^c	34.27 ^c	9.861 ^c	15.30 ^c
NaCl+10 mmol·L ⁻¹ CaCl ₂	339.3 ^a	671.6 ^a	24.54 ^a	27.48 ^a	34.31 ^a	37.44 ^a	37.10 ^a	44.02 ^a	16.41 ^a	24.66 ^a
NaCl+30 mmol·L ⁻¹ CaCl ₂	307.6 ^b	594.9 ^b	20.77 ^b	22.27 ^b	28.80 ^b	33.90 ^b	34.64 ^b	39.35 ^b	13.14 ^b	20.33 ^b

讨 论

钙是植物生长发育所必需的大量元素, 缺钙时, 细胞壁的形成受阻, 影响细胞分裂, 抑制植物生长。本研究中, 营养液不含钙时, 小金海棠幼苗的生物量显著低于对照和钙处理, 生长受到抑制, 而钙处理可显著减缓盐胁迫对幼苗生长的抑制作用。这与韩冰等(2010)的研究认为钙可以提高盐胁迫下黄瓜幼苗株高、鲜重和干重的观点一致。

抗氧化胁迫是植物耐盐的一种重要方式。SOD、POD、CAT和APX是细胞膜系统的保护酶, 是清除活性氧过程中最主要的抗氧化酶类, 在盐胁迫时活性会增强, 从而加快活性氧的清除速度, 维持活性氧代谢平衡, 有效减轻活性氧对细胞膜系统的伤害, 抑制膜脂过氧化和MDA积累, 减轻盐

胁迫对植物细胞的伤害(Mittler 2002)。另外, 植物在渗透胁迫下, 体内可溶性蛋白、糖类、脯氨酸等渗透调节物质含量会增加, 以维持细胞膨压, 提高对逆境的适应能力。本研究中, 在盐胁迫下, 小金海棠幼苗根系和叶片O₂产生速率、MDA含量及电解质相对渗透率显著升高, 而加钙可以显著降低根系和叶片O₂产生速率、MDA含量及电解质相对渗透率; 另一方面, 盐胁迫下, 小金海棠幼苗根系和叶片SOD、POD、CAT、APX活性及可溶性蛋白含量显著升高, 而营养液加钙进一步提高SOD、POD、CAT、APX活性及可溶性蛋白的含量。综上分析可知, 在盐胁迫下, 小金海棠幼苗通过提高SOD、POD、CAT、APX活性及可溶性蛋白的含量来增强对盐胁迫的适应能力, 而加钙可以进一步提高抗氧化酶活性及可溶性蛋白的含量,

减少活性氧的产生, 增强植株的耐盐性。对于钙提高植株对盐胁迫的适应能力, 在大豆(Cachorro等1993)、黄瓜(韩冰等2010; Al-Harbi 1995)、柑橘(Martínez-Ballesta等2000)、菊芋(薛延丰和刘兆普2006)等作物上已有研究。韩冰等(2010)在黄瓜上的研究认为钙可以提高盐胁迫下黄瓜幼苗SOD、POD、CAT活性和可溶性蛋白的含量, 降低 O_2^- 产生速率和MDA含量。薛延丰和刘兆普(2006)研究发现外源施钙可以提高盐胁迫下菊芋幼苗SOD活性, 降低MDA含量, 表明本研究与前人的研究结果相似。

钙提高植物对盐胁迫等逆境适应能力的原因可能与钙在体内的重要生理作用密切相关。Hepler和Wayne (1985)认为钙能够减缓逆境对细胞膜的伤害, 降低电解质渗透率, 对维持细胞膜的结构和稳定性有重要作用。Yokoi等(2002)认为钙在提高植物抗盐能力方面至少具有以下两个重要作用, 一是在植物适应盐胁迫的信号转导过程中充当信使; 二是直接阻止钠离子的进入, 调节无机离子运输。Cabañero等(2006)研究认为, Ca^{2+} 能够维持水通道蛋白的活性功能, 保证盐胁迫下细胞水分代谢的平衡。

此外, 本研究还发现, 钙离子浓度与小金海棠幼苗的抗盐能力密切相关, $10\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ CaCl}_2$ 处理时, 植株的抗盐能力显著高于 $30\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ CaCl}_2$ 处理和不加钙处理。Amor等(2010)研究认为钙在提高植物对盐胁迫适应能力时存在浓度效应, 中等浓度的钙离子($3.5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)处理效果好于高浓度处理($20\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)。袁晓婷等(2014)研究表明, 一定浓度的 Ca^{2+} ($\leq 15\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)能有效缓解盐胁迫对唐古特白刺造成的伤害, 而高浓度 Ca^{2+} ($> 15\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)对唐古特白刺的各生理指标均表现出不同程度的抑制作用, 影响正常代谢活动。这可能是因为细胞内钙离子超载会刺激氧自由基的生成(Duchen 2000), 其具体原因有待于进一步研究。

参考文献

陈晓云, 刘洪庆, 李发良, 苏丽萍, 杨洪兵(2012). 外源蔗糖和 Ca^{2+} 对荞麦幼苗耐盐性的影响. 植物生理学报, 48 (12): 1187~1192
成明昊, 李晓林, 张云贵(2000). 苹果优良砧木资源——小金海棠. 西南农业大学学报, 22 (5): 383~397
韩冰, 孙锦, 郭世荣, 金春燕(2010). 钙对盐胁迫下黄瓜幼苗抗氧化系统的影响. 园艺学报, 37 (12): 1937~1943

姜义宝, 李建华, 方丽云, 王成章(2008). 钙处理对苜蓿幼苗抗旱性的影响. 中国草地学报, 30 (1): 117~120
李青云, 葛会波, 胡淑明, 陶秀娟, 黄瑞虹(2008). 盐胁迫下外源钙对草莓内源激素含量的影响. 西北植物学报, 28 (3): 0517~0522
李晓明, 陈劲枫, 逯明辉, 陈龙正, 娄群峰(2006). 低温下钙对黄瓜幼苗抗氧化酶活性及POD同工酶谱的影响. 西北植物学报, 26 (2): 241~246
李迎春, 陈双林(2008). 竹子耐盐性研究述评. 山地农业生物学报, 27 (5): 451~455
毛桂莲, 郑国琦, 章英才, 周孝程(2007). 不同钙盐对NaCl胁迫下枸杞愈伤组织耐盐性的影响. 干旱地区农业研究, 25 (1): 131~134
汪良驹, 王业遴, 刘友良(1989). 无花果耐盐机理的研究 I. 盐逆境下脯氨酸和可溶性蛋白质的积累. 南京农业大学学报, 12 (4): 124~125
王爱国, 罗广华(1990). 植物的超氧化物自由基与羟胺反应的定量关系. 植物生理学通讯, (6): 55~57
薛延丰, 刘兆普(2006). 钙离子对盐胁迫下菊芋幼苗的生长、生理反应和光合能力的影响理论. 农业工程学报, 22 (9): 44~47
杨凤军, 李天来, 臧忠婧, 鲁少尉(2010). 外源钙施用时期对缓解盐胁迫番茄幼苗伤害的作用. 中国农业科学, 43 (6): 1181~1188
袁晓婷, 刘威, 宣亚楠, 张艳艳, 闫永庆(2014). 盐胁迫下唐古特白刺对外源 Ca^{2+} 的生理响应. 植物生理学报, 50 (1): 88~94
赵世杰, 史国安, 董新纯(2002). 植物生理学实验指导. 北京: 中国农业科学技术出版社, 134~141
朱晓军, 梁永超, 杨劲松, 娄运生(2005). 钙对盐胁迫下水稻幼苗抗氧化酶活性和膜脂过氧化作用的影响. 土壤学报, 42 (3): 453~459
Al-Harbi AR (1995). Growth and nutrient composition of tomato and cucumber seedlings as affected by sodium chloride salinity and supplemental calcium. J Plant Nutr, 18 (7): 1403~1416
Amor NB, Megdiche W, Jiménez A, Sevilla F, Abdelly C (2010). The effect of calcium on the antioxidant systems in the halophyte *Cakile maritima* under salt stress. Acta Physiol Plant, 32: 453~461
de Azevedo Neto AD, Prico JT, Enéas-Filho J, Braga de Abreu CE, Gomes-Filho E (2006). Effect of salt stress on antioxidative enzymes and lipid peroxidation in leaves and roots of salt-tolerant and salt-sensitive maize genotypes. Environ Exp Bot, 56: 87~94
Bradford MM (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. Analyt Biochem, 72: 248~254
Cabañero FJ, Martínez-Ballesta MC, Teruel JA, Carvajal M (2006). New evidence about the relationship between water channel activity and calcium in salinity-stressed pepper plants. Plant Cell Physiol, 47 (2): 224~233
Cachorro P, Ortiz A, Cerda A (1993). Effects of saline stress and calcium on lipid composition in bean roots. Phytochemistry, 32 (5): 1131~1136
Di Baccio D, Tognetti R, Sebastiani L, Vitagliano C (2003). Responses of *Populus deltoides* × *Populus nigra* (*Populus* × *euramericana*) clone I-214 to high zinc concentrations. New Phytol, 159 (2): 443~452
Dionisio-Sese ML, Tobita S (1998). Antioxidant responses of rice

- seedlings to salinity stress. *Plant Sci*, 135 (1): 1~9
- Duchen MR (2000). Mitochondria and calcium: from cell signaling to cell death. *J Physiol*, 529 (1): 57~68
- Heath RL, Packer L (1968). Photoperoxidation in isolated chloroplasts I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Arch Biochem Biophys*, 125: 189~198
- Hepler PK, Wayne RO (1985). Calcium and plant development. *Ann Rev Plant Physiol*, 36: 397~439
- Li M, Wang GX, Lin JS (2003). Application of external calcium in improving the PEG-induced water stress tolerance in liquorice cells. *Bot Bull Acad Sin*, 44: 275~284
- Li QY, Niu HB, Yin J, Wang MB, Shao HB, Deng DZ, Chen XX, Ren JP, Li YC (2008). Protective role of exogenous nitric oxide against oxidative-stress induced by salt stress in barley (*Hordeum vulgare*). *Colloids Surf B Biointerfaces*, 65: 220~225
- Martínez-Ballesta MC, Martínez V, Carvajal M (2000). Regulation of water channel activity in whole roots and in protoplasts from roots of melon plants grown under saline conditions. *Aust J Plant Physiol*, 27 (7): 685~691
- McAinsh MR, Clayton H, Mansfield TA, Hetherington AM (1996). Changes in stomatal behavior and guard cell cytosolic free calcium in response to oxidative stress. *Plant Physiol*, 111: 1031~1042
- Mittler R (2002). Oxidative stress, antioxidants, and stress tolerance. *Trends Plant Sci*, 7 (9): 405~410
- Nakano Y, Asada K (1981). Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. *Plant Cell Physiol*, 22 (5): 867~880
- Nandwal AS, Godara M, Sheokand S, Kamboj DV, Kundu BS, Kuhad MS, Kumar B, Sharma SK (2000). Salinity induced changes in plant water status, nodule functioning and ionic distribution in phenotypically differing genotypes of *Vigna radiata* L.. *J Plant Physiol*, 156: 350~359
- Yokoi S, Bressan RA, Hasegawa PM (2002). Salt stress tolerance of plants. *JIRCAS Working Rep*, 23: 25~33
- Zavaleta-Mancera HA, López-Delgado H, Loza-Tavera H, Mora-Herrera M, Trevilla-García C, Vargas-Suárez M, Ougham H (2007). Cytokinin promotes catalase and ascorbate peroxidase activities and preserves the chloroplast integrity during dark-senescence. *J Plant Physiol*, 164 (12): 1572~1582
- Zhu JK (2002). Salt and drought stress signal transduction in plants. *Annu Rev Plant Biol*, 53: 247~273