

$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫对嫁接番茄生长、抗氧化酶活性和活性氧代谢的影响

张古文, 朱月林*, 刘正鲁, 魏国平, 胡春梅

(南京农业大学园艺学院, 南京 210095)

摘要:以“影武者”为砧木,“宝大 903”为接穗,在营养液栽培条件下,对 80 mmol/L $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫下番茄嫁接苗和自根苗的生长、叶片抗氧化酶活性、活性氧代谢以及渗透调节物质含量进行了比较。结果表明, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫明显抑制植株生长,显著提高植株抗氧化酶活性,显著增加植株 O_2^- 生成速率以及 H_2O_2 、MDA、脯氨酸和可溶性蛋白含量,但胁迫后嫁接苗的生物量显著高于自根苗,抗氧化酶活性、脯氨酸和可溶性蛋白含量均显著高于自根苗,而 O_2^- 生成速率、 H_2O_2 和 MDA 含量则显著低于自根苗。以上结果表明, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫下较高的抗氧化酶活性和渗透调节物质含量以及较低的氧化损伤与番茄嫁接苗耐盐性增强有关。

关键词:番茄;嫁接; $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫;膜脂过氧化;营养液栽培

中图分类号:S641.2.601

文献标识码:A

文章编号:1008-505X(2008)03-0527-06

Effect of $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ stress on growth, activities of antioxidant enzymes and reactive oxygen metabolism of grafted tomatoes

ZHANG Gu-wen, ZHU Yue-lin*, LIU Zheng-lu, WEI Guo-ping, HU Chun-mei

(Department of Horticulture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Using “Kagemusya” (*Lycopersicon esculentum* Mill.) as rootstock and “Baoda 903” as scion, grafting was made to compare the differences in plant growth, activities of antioxidant enzymes, metabolism of reactive oxygen species and contents of osmotic adjustment substances in leaves between grafted and own-root tomato seedlings grown hydroponically under 80 mmol/L $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ stress. The results showed that $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ stress significantly reduced plant growth, but significantly increased the activities of antioxidant enzymes, increased O_2^- producing rate and contents of hydrogen peroxide (H_2O_2), malondialdehyde (MDA), proline and soluble protein in both grafted and own-root seedlings. The biomass production of grafted seedlings, activities of antioxidant enzymes and contents of proline and soluble protein in leaves of grafted seedlings were significantly higher than those of own-root seedlings, while O_2^- production rate, contents of H_2O_2 and MDA in leaves of grafted seedlings were significantly lower than those of own-root seedlings under $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ stress. These results indicated that higher activities of antioxidant enzymes, high contents of osmotic adjustment substances and less oxidative damage might be involved in the stronger salt tolerance of grafted tomato seedlings.

Key words: tomato; grafting; $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ stress; membrane lipid peroxidation; hydroponics

近二十年来,我国蔬菜设施栽培发展迅速,然而由于种植年限的增加、化肥施用过量以及设施内独特的水分运行方式等原因,使许多设施农田发生了

严重的土壤次生盐渍化现象,导致生产效益下降,产品品质变劣,严重影响了设施生产的可持续发展^[1]。研究表明,在设施的次生盐渍化土壤中,阴离子主要

收稿日期:2007-04-16 接受日期:2007-08-19

基金项目:教育部高校博士点基金项目(20030307020);江苏省科技厅项目(BC2003306, BE2002304)资助。

作者简介:张古文(1981—)男,山西运城人,博士生,主要从事蔬菜逆境生理和生物技术研究。E-mail:zhangguwen@126.com

* 通讯作者 Tel:025-84396472, E-mail:ylzhu@njau.edu.cn

以 NO_3^- 为主,占阴离子总量的 67%~76%,阳离子主要以 Ca^{2+} 为主^[2]。为提高蔬菜的耐盐性,人们用常规育种的方法做了大量尝试,但效果并不理想^[3]。国内外的研究表明,嫁接是克服设施土壤盐害的一条有效措施^[4-6]。上世纪 90 年代,日本的果菜类蔬菜嫁接栽培面积已占设施栽培总面积的 90% 以上^[3]。我国番茄嫁接栽培起步较晚,目前尚未在生产上大面积推广,对 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫下嫁接番茄耐盐性生理生化方面的研究,也尚未见报道。本文以番茄嫁接苗和自根苗为材料,对 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫下两者在生长、叶片抗氧化酶活性、活性氧代谢以及渗透调节物质含量方面的差异进行比较,旨在探明嫁接提高番茄耐盐性的生理生化基础。

1 材料与方法

1.1 试验设计

供试的番茄(*Lycopersicon esculentum* Mill.)砧木是日本设施栽培上专用的耐盐品种“影武者”(购自日本 Takii 种苗公司),接穗为当地主栽品种“宝大 903”(购自上海市农业科学院)。试验在南京农业大学温室内进行。2006 年 8 月 7 日砧木种子浸种催芽 5 d 后接穗种子浸种催芽。出芽后分别播于 32 孔的穴盘,蛭石作基质。真叶展开后浇 1/8 浓度日本园试营养液(EC 值为 0.38 dS/m)。当幼苗长到 3 片真叶时,移入塑料营养钵中,基质同上。9 月 13 日,当砧木具有 4~5 片真叶,接穗具有 3~4 片真叶时进行嫁接,嫁接操作和嫁接苗的培育按文献报道的方法进行^[7]。

9 月 27 日,挑选生长一致的嫁接苗和自根苗移栽于上直径 30 cm、下直径 20 cm、高 27 cm 的塑料桶中。用厚度为 3 cm 的塑料泡沫板做成圆形盖子,在盖子的中央挖 1 个直径为 3 cm 的小孔,用海绵包裹幼苗下胚轴,植入孔中,每桶 1 株。用 1/4 浓度日本园试营养液(EC 值为 0.61 dS/m)栽培,每 4 d 更换一次营养液,营养液栽培期间用电动气泵 24 h 连续通气。

10 月 26 日,当幼苗具有 8~9 片真叶时进行 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫处理。为防止盐激,开始处理浓度为 40 mmol/L, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 直接溶于 1/4 浓度日本园试营养液中(EC 值为 5.13 dS/m),2 d 后浓度增到 80 mmol/L(EC 值为 8.75 dS/m),此时定为 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫处理开始。设 4 种试验处理:营养液栽培嫁接苗(G1),营养液栽培嫁接苗 + $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ (G2),营养液栽培自根苗(O1),营养液栽培自根苗 + $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$

(O2),每处理 7 株,3 次重复,在温室内随机排列。

1.2 测定项目及方法

生物量的测定: $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 处理后第 12 d,分别收集植株地上部和地下部,称其鲜重,之后放入烘箱 105℃杀酶 15 min,在 75℃下烘干至恒重,称其干重。

$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 处理开始前(胁迫 0 d)取样一次,处理开始后,每 3 d 取样一次,取样部位为植株自上向下数第 4 片完全展开叶,测定各项生理指标。采用氮蓝四唑(NBT)光还原法^[8]测定超氧化物歧化酶(SOD)活性;愈创木酚法^[9]测定过氧化物酶(POD)活性;紫外分光光度法^[9]测定过氧化氢酶(CAT)活性;硫代巴比妥酸(TBA)法^[10]测定丙二醛(MDA)含量; O_2^- 生成速率参照王爱国等^[11]的方法测定, H_2O_2 含量参照林植芳等^[12]的方法测定。

1.3 数据处理

用 SAS 软件进行单因素方差分析,并用 Duncan's 新复极差法对平均数进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫对番茄嫁接苗和自根苗生物量的影响

由表 1 可知, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫对番茄嫁接苗(G2)和自根苗(O2)的生长均产生显著的抑制作用,导致两者的生物量显著下降,但嫁接苗地上部鲜重和干重分别是自根苗的 1.7 倍和 1.88 倍,地下部鲜重和干重分别是自根苗的 2 倍和 2.05 倍,说明嫁接苗在 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫下生长受抑制的程度较小。此外, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫后,嫁接苗和自根苗的根冠比、地上部和地下部的干物率均显著提高,嫁接苗与自根苗相比,前者均显著高于后者。

2.2 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫对番茄嫁接苗和自根苗叶片抗氧化酶活性的影响

$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫前,嫁接苗(G1)叶片 SOD、POD 和 CAT 活性均显著高于自根苗(O1)(表 2)。 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫后,两者的 SOD 活性均表现为缓慢上升的趋势,但嫁接苗上升幅度较大,胁迫 12 d 时,嫁接苗(G2)SOD 活性上升了 28.78%,而自根苗(O2)上升了 15.43%。对于 POD,嫁接苗和自根苗均表现为先下降后上升的趋势。胁迫 3 d 时,两者 POD 活性最低,分别比未胁迫植株下降了 10.19% 和 21.09%;胁迫 12 d 时,两者 POD 活性最高,分别比未胁迫植株上升了 29.92% 和 14.25%。在 CAT 方面, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫后,嫁接苗和自根苗的 CAT 活性均显著下降,但嫁接苗下降的幅度小于自根苗。在

表 1 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫对番茄嫁接苗和自根苗生物量的影响Table 1 Effect of $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ stress on biomass production in grafted and own-root tomato seedlings

处理 Treatment	地上部 Shoot (g/plant)		地下部 Root (g/plant)		根/冠比 Root/Shoot ratio	干物率 DW percentage(%)	
	鲜重 Fresh weight	干重 Dry weight	鲜重 Fresh weight	干重 Dry weight		地上部 Shoot	地下部 Root
	G1	113.29 a	11.27 a	38.03 a	2.56 a	0.23 b	9.95 b
G2	67.67 c	7.20 c	26.25 b	1.80 b	0.25 a	10.64 a	6.86 a
O1	90.33 b	8.49 b	24.14 b	1.59 c	0.19 c	9.40 d	6.59 c
O2	39.90 d	3.83 d	13.13 c	0.88 d	0.23 b	9.60 c	6.70 b

注 (Note): 同列数据后不同字母表示差异达 5% 显著水平。下同 Values followed by different letters within a column are significant difference at 5% level, and the same symbol is used for other tables.

表 2 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫对番茄嫁接苗和自根苗叶片抗氧化酶活性的影响Table 2 Effect of $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ stress on the activities of antioxidant enzymes in leaves of grafted and own-root tomato seedlings

处理 Treatment	酶活性 Activities of enzymes	胁迫时间 Stress time (d)				
		0	3	6	9	12
G1	超氧化物歧化酶 SOD (U/g, FW)	264.07 a	226.47 b	278.69 b	272.65 b	271.79 b
G2		271.00 a	250.98 a	316.93 a	327.65 a	350.00 a
O1		216.45 b	186.27 d	213.11 d	209.27 c	224.36 c
O2		210.39 b	198.04 c	241.53 c	245.14 b	258.97 b
G1		过氧化物酶 POD [U/(g·min), FW]	4213 a	4054 a	4268 a	4216 b
G2	4354 a		3641 b	4311 a	4828 a	5289 a
O1	3409 b		3143 b	3467 b	3547 c	3446 c
O2	3309 b		2480 c	3090 c	3644 c	3937 b
G1	过氧化氢酶 CAT [U/(g·min), FW]		792.18 a	794.80 a	719.61 a	764.00 a
G2		776.83 a	749.25 b	664.09 b	652.83 c	635.36 c
O1		605.69 b	626.00 c	574.58 b	606.24 b	562.68 b
O2		622.00 b	534.47 d	478.86 c	472.46 d	444.85 d

注 (Note): 统计分析是在同一项目内分别进行的,下同 Statistic analysis was carried out within the same item. The same below.

整个胁迫期间嫁接苗 SOD、POD 和 CAT 活性均显著高于自根苗。

2.3 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫对番茄嫁接苗和自根苗叶片 O_2^- 生成速率、 H_2O_2 和 MDA 含量的影响

由表 3 可知,未经 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫时,嫁接苗 (G1) O_2^- 生成速率、 H_2O_2 和 MDA 含量与自根苗 (O1) 差异不显著。 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫后,两者的 O_2^- 生成速率、 H_2O_2 和 MDA 含量均显著上升。嫁接苗 (G2) 与自根苗 (O2) 相比,嫁接苗的 O_2^- 生成速率、 H_2O_2 和 MDA 含量显著低于自根苗。胁迫末期 (12 d) 嫁接苗的 O_2^- 生成速率、 H_2O_2 和 MDA 含量比未处理植株分别增加了 90.82%、108.10% 和 87.55%, 而自根苗则增加了 121%、165.22% 和 149.30%。

2.4 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫对番茄嫁接苗和自根苗叶片可溶性蛋白和脯氨酸含量的影响

未经 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫时,嫁接苗 (G1) 可溶性蛋白和脯氨酸含量与自根苗 (O1) 差异不显著 (表 4)。 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫后,两者的可溶性蛋白和脯氨酸含量均显著上升,胁迫 12 d 时,嫁接苗 (G2) 和自根苗 (O2) 脯氨酸含量分别比未处理植株增加了 33.08 倍和 23.13 倍,嫁接苗和自根苗相比,均是嫁接苗显著高于自根苗。在可溶性蛋白含量方面, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫后,嫁接苗含量从胁迫第 6 d 起显著上升,自根苗含量变化不显著,嫁接苗和自根苗相比,从胁迫第 6 d 起,嫁接苗显著高于自根苗。

3 讨论

盐胁迫对植物的伤害最终体现在生长受抑制,生物量积累下降。有研究表明,嫁接能提高瓜类作物的耐盐性,并能提高产量^[6]。Santa-Cruz 等^[13]也在研究中发现,利用野生番茄作砧木的番茄嫁接苗

表 3 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫对番茄嫁接苗和自根苗叶片 O_2^- 生成速率、 H_2O_2 和 MDA 含量的影响Table 3 Effect of $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ stress on the O_2^- producing rate and H_2O_2 and MDA contents in leaves of grafted and own-root tomato seedlings

处理 Treatment	酶活性 Activities of enzymes	胁迫时间 Stress time (d)				
		0	3	6	9	12
G1	活性氧生成速率	12.45 a	13.40 c	13.11 c	12.79 c	11.98 d
G2	O_2^- production rate	12.84 a	19.97 b	24.32 b	25.49 b	22.86 b
O1	[nmol/(g·min), FW]	12.09 a	11.72 c	11.94 c	12.23 c	13.81 c
O2		11.26 a	21.80 a	28.51 a	31.72 a	30.52 a
G1	过氧化氢含量	7.31 a	8.69 c	7.32 c	8.15 c	9.01 c
G2	H_2O_2 content	7.64 a	12.25 b	16.69 b	18.20 b	18.75 b
O1	($\mu\text{mol/g}$, FW)	7.90 a	9.01 c	8.17 c	8.35 c	9.66 c
O2		7.58 a	14.16 a	19.41 a	24.38 a	25.62 a
G1	丙二醛含量	5.32 a	6.91 c	6.59 c	5.36 c	7.71 c
G2	MDA content	5.94 a	9.20 b	11.95 b	13.45 b	14.46 b
O1	($\mu\text{mol/g}$, FW)	4.96 a	6.39 c	6.48 c	5.75 c	7.14 c
O2		5.12 a	12.58 a	14.02 a	16.24 a	17.80 a

表 4 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫对番茄嫁接苗和自根苗叶片脯氨酸和可溶性蛋白含量的影响Table 4 Effect of $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ stress on contents of proline and soluble protein in leaves of grafted and own-root tomato seedlings

处理 Treatment	酶活性 Activities of enzymes	胁迫时间 Stress time (d)				
		0	3	6	9	12
G1	脯氨酸含量	0.20 b	0.23 c	0.40 c	0.49 c	0.50 c
G2	Proline content	0.58 a	5.82 a	7.97 a	13.32 a	17.04 a
O1	($\mu\text{g/g}$, FW)	0.17 b	0.20 c	0.40 c	0.44 c	0.47 c
O2		0.72 a	4.54 b	6.01 b	10.89 b	11.34 b
G1	可溶性蛋白含量	1.15 a	1.20 a	1.20 b	1.18 b	1.10 b
G2	Soluble protein content	1.15 a	1.23 a	1.39 a	1.42 a	1.38 a
O1	(mg/g, FW)	1.04 a	1.01 a	1.11 b	1.07 b	1.09 b
O2		1.10 a	1.07 a	1.14 b	1.09 b	1.02 b

的耐盐性显著强于自根苗。本试验中, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫后, 番茄嫁接苗生物量积累下降的幅度显著低于自根苗, 而其干物率却显著高于自根苗(表 1), 表明嫁接提高了番茄的耐盐性, 嫁接苗对盐胁迫的适应性强于自根苗。

膜系统是植物盐害的主要反应部位, 膜结构和功能的完整性以及植物内源保护系统的抗胁迫能力主导离子的运输和分配, 是决定植物耐盐性的关键因素^[14]。正常条件下, 植物体内活性氧的产生和消除处于动态平衡状态, 当植物遭受逆境胁迫时, 代谢的平衡被打破, 产生大量的 O_2^- 、 H_2O_2 、 $\cdot\text{OH}$, 这些活性氧自由基直接或间接地启动膜脂过氧化进程, 使得膜系统的完整性降低, 电解质及有机小分子物质外渗, 从而导致一系列生理生化代谢紊乱^[15]。植物细胞为避免自由基对细胞膜的破坏, 在细胞内形成

了两类自由基清除系统, 一类是保护酶系统, 另一类是一些小分子内源抗氧化剂, 如抗坏血酸、谷胱甘肽等。两类自由基清除系统中, 抗氧化酶系统发挥主要作用, 其中 SOD 是植物抗氧化酶系统中的第一道防线, 也是最重要的酶, 它歧化 O_2^- 为 H_2O_2 和 O_2 , POD 和 CAT 负责清除 H_2O_2 , 三种酶共同作用, 减少植物细胞内自由基的含量, 保护细胞不受伤害, 因此抗氧化酶活性的高低从一定程度上反应了抗逆性的强弱^[16]。研究表明, NaCl 胁迫条件下, 茄子嫁接苗和自根苗的抗氧化酶活性均被诱导, 但耐盐性强的嫁接苗的保护酶活性显著高于耐盐性弱的自根苗, 有利于提高耐盐性^[17]。本试验中(表 2 和表 3), $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫后, 嫁接苗 O_2^- 生成速率、 H_2O_2 和 MDA 含量均显著低于自根苗, 而其保护酶活性却显著高于自根苗, 表明 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫条件下, 嫁接苗受到

伤害的程度较轻,清除活性氧的能力强,对盐胁迫的适应性强于自根苗。

渗透调节是植物适应盐胁迫的基本特征之一。盐胁迫条件下,植物要维持正常的生理代谢,就必须通过渗透调节降低细胞水势,使水分沿着水势梯度由外向内注入细胞^[18]。目前发现的能有效缓解植物渗透胁迫压力的渗透物质有两类,一类是小分子渗透调节物质,如:脯氨酸、甜菜碱等;另一类是亲水性多肽,如:COR蛋白、LEA蛋白等。脯氨酸是水溶性最大的氨基酸,具有很强的水合能力,一般在干旱、盐渍环境下迅速积累,有利于细胞和组织的保水;同时它还可以作为碳水化合物的来源、酶和细胞结构的保护剂,参与代谢;另外脯氨酸还是活性氧的清除剂,从而在植物的抗逆性方面发挥重要作用^[19]。本试验结果(表4)表明, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫后,嫁接苗和自根苗的脯氨酸含量均显著上升,但嫁接苗上升的幅度显著高于自根苗,表明嫁接苗的脯氨酸合成能力较强,有利于渗透调节能力的提高。另外, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫后,嫁接苗的可溶性蛋白含量显著上升,而自根苗变化不显著,进一步证实嫁接苗的渗透调节能力强于自根苗,这和董玉梅等^[20]在嫁接网纹甜瓜上的研究结果相一致。

本试验结果表明,通过选择耐盐性强的砧木,利用嫁接换根可以提高番茄的耐盐性,再配以科学合理的栽培管理措施,是克服设施土壤次生盐渍化的一条有效途径。

参 考 文 献:

- [1] 余海英,李廷轩,周健民. 设施土壤次生盐渍化及其对土壤性质的影响[J]. 土壤, 2005, 37(6): 581-586.
Yu H Y, Li T X, Zhou J M. Secondary salinization of greenhouse soil and its effects on soil properties[J]. Soil, 2005, 37(6): 581-586.
- [2] 李东坡, 武志杰, 梁成华, 陈利军. 设施土壤生态环境特点与调控[J]. 生态学杂志, 2004, 23(5): 192-197.
Li D P, Wu Z J, Liang C H, Chen L J. Characteristics and regulation of greenhouse soil environment[J]. Chin. J. Ecol., 2004, 23(5): 192-197.
- [3] Flowers T J. Improving crop salt tolerance[J]. J. Exp. Bot., 2004, 55: 307-319.
- [4] Asao T, Shimizu N, Ohta K, Hosoki T. Effect of rootstocks on the extension of harvest period of cucumber (*Cucumis sativus* L.) growth in non-renewal hydroponics[J]. J. Jap. Soci. Hort. Sci., 1999, 68: 598-602.
- [5] Kim H T, Kang N J, Kang K Y. Selection of "Pusan Daemok 1" for high yield and quality in rootstock of cucumber[J]. J. Hort. Sci., 1998, 40: 158-161.
- [6] 史跃林, 刘佩瑛, 罗庆熙, 叶玉龙. 黑籽南瓜砧对黄瓜抗盐性的影响研究[J]. 西南农业大学学报, 1995, 17(3): 232-236.
Shi Y L, Liu P Y, Luo Q X, Ye Y L. Effects of grafting on salt-resistance of cucumber[J]. J. Southwest Agric. Univ., 1995, 17(3): 232-236.
- [7] 陈淑芳, 朱月林, 刘友良, 李式军. NaCl胁迫对番茄嫁接苗保护酶活性、渗透调节物质含量及光合特性的影响[J]. 园艺学报, 2005, 32(4): 609-613.
Chen S F, Zhu Y L, Liu Y L, Li S J. Effects of NaCl stress on activities of protective enzymes, contents of osmotic adjustment substances and photosynthetic characteristics in grafted tomato seedlings[J]. Acta Hort. Sin., 2005, 32(4): 609-613.
- [8] Omran R G. Peroxide levels and the activities of catalase, peroxidase and indoleacetic acid oxidase during and after chilling cucumber seedlings[J]. Plant Physiol., 1980, 65: 407-408.
- [9] 陈建勋, 王晓峰. 植物生理学实验指导[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2002. 120-121.
Chen J X, Wang X F. Experimental instruction in plant physiology[M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2002. 120-121.
- [10] 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.
Li H S. The experimental principles and technique of plant physiology and biochemistry[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000. 260-261.
- [11] 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, 26(6): 55-57.
Wang A G, Luo G H. Quantitative relationship between the reaction of hydroxylamine and superoxide anion radicals in plants[J]. Plant Physiol. Comm., 1990, 26(6): 55-57.
- [12] 林植芳, 李双顺, 林桂珠, 郭俊彦. 衰老叶片和叶绿体中 H_2O_2 的积累与膜脂过氧化的关系[J]. 植物生理学报, 1988, 14(1): 12-16.
Lin Z F, Li S S, Lin G Z, Guo J Y. The accumulation of hydrogen peroxide in senescing leaves and chloroplasts in relation to lipid peroxidation[J]. Acta Phytophysiol. Sin., 1988, 14(1): 12-16.
- [13] Santa-Cruz A, Martinez-Rodriguez M M, Perez-Alfocea F *et al.* The rootstock on the tomato salinity response depends on the shoot genotype[J]. Plant Sci., 2002, 162: 825-831.
- [14] 钱琼秋, 朱祝军, 何勇. 硅对盐胁迫下黄瓜根系线粒体呼吸作用及脂质过氧化的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(6): 875-880.
Qian Q Q, Zhu Z J, He Y. Effects of silicon on the mitochondria respiration and lipid peroxidation of cucumber (*Cucumis sativus* L.) roots under salt stress[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2006, 12(6): 875-880.
- [15] Ahmed S, Nawata E, Hosokawa M *et al.* Alterations in photosynthesis and some antioxidant enzymatic activities of mungbean subjected to waterlogging[J]. Plant Sci., 2002, 163: 117-123.
- [16] 杨方云, 魏朝富, 刘英. 干旱胁迫下甜橙叶片保护酶体系的变化研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(1): 119-124.
Yang F Y, Wei C F, Liu Y. Protective enzyme systems in orange leaves under drought stress[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2006, 12

- (1): 119-124.
- [17] 刘正鲁, 朱月林, 胡春梅, 等. NaCl 胁迫对嫁接茄子生长、抗氧化酶活性和活性氧代谢的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 18(3): 537-541.
- Liu Z L, Zhu Y L, Hu C M *et al.* Effects of NaCl stress on growth, activities of antioxidant enzymes and reactive oxygen metabolism of grafted eggplants[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2006, 18(3): 537-541.
- [18] 刘志华, 时丽冉, 白丽荣, 赵可夫. 盐胁迫对獐毛叶绿素和有机溶质含量的影响[J]. 植物生理与分子生物学学报, 2007, 33(2): 165-172.
- Liu Z H, Shi L R, Bai L R, Zhao K F. Effect of salt stress on the contents of chlorophyll and organic solutes in *Aeluropus littoralis* var. *sinensis* Debeaux[J]. J. Plant Physiol. Molec. Biol., 2007, 33(2): 165-172.
- [19] 李文一, 徐卫红, 胡小凤, 等. Zn 胁迫对黑麦草幼苗生长、生理生化及 Zn 吸收的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(5): 190-194.
- Li W Y, XU W H, Hu X F *et al.* Effects of Zn stress on growth, physiological and biochemical and Zn uptake of Ryegrass (*Lolium perenne* L. [J]. Trans. Chin. Soc. Agric. Eng., 2007, 23(5): 190-194.
- [20] 董玉梅, 焦自高, 王崇启, 肖守华. 低温弱光胁迫对网纹甜瓜嫁接苗与自根苗某些物质含量的影响[J]. 山东农业大学学报(自然科学版) 2005, 36(1): 67-69.
- Dong Y M, Jiao Z G, Wang C X, Xiao S H. Effect of low temperature and poor light on contents of some substances of grafted and own-root melon seedlings[J]. J. Sandong Agric. Univ. (Nat. Sci.), 2005, 36(1): 67-69.