

盐胁迫对黄瓜幼苗叶片、韧皮部渗出液和根系 抗氧化酶同工酶表达的影响

孙张晗¹, 樊怀福^{1,2}, 杜长霞^{1,2}, 黄玲英¹

(1. 浙江农林大学 浙江省农产品品质改良技术研究重点实验室, 浙江 临安 311300; 2. 浙江农林大学 农业与食品科学学院, 浙江 临安 311300)

摘要: 黄瓜 *Cucumis sativus* 在设施生产中经常受到盐害, 严重影响了黄瓜的产量和品质。以盐敏感黄瓜品种 ‘津优1号’ *Cucumis sativus* ‘Jinyou No. 1’ 和相对耐盐品种 ‘新泰密刺’ *Cucumis sativus* ‘Xintai Mici’ 为试材, 采用水培, 研究了氯化钠胁迫对幼苗叶片、根系和韧皮部渗出液超氧化物歧化酶(SOD), 过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)同工酶表达影响。结果显示: 叶片中共检测到9条超氧化物歧化酶, 4条过氧化物酶和2条过氧化氢酶同工酶条带, 盐胁迫抑制了 ‘新泰密刺’ 叶片超氧化物歧化酶、过氧化物酶和过氧化氢酶同工酶表达, 而 ‘津优1号’ 叶片超氧化物歧化酶和过氧化氢酶同工酶表达增强。韧皮部渗出液有3条超氧化物歧化酶, 2条过氧化物酶和1条过氧化氢酶同工酶条带; 盐胁迫增强了 ‘新泰密刺’ 韧皮部渗出液中3种抗氧化酶同工酶表达, 而抑制了 ‘津优1号’ 韧皮部渗出液中3种同工酶表达。在根系中共发现6条超氧化物歧化酶, 7条过氧化物酶和1条过氧化氢酶同工酶条带, 盐胁迫下2个品种根系过氧化氢酶同工酶的表达均增强, 过氧化物酶同工酶在 ‘津优1号’ 中6条表达减弱, 1条增强, 在 ‘新泰密刺’ 中均增强, 2个品种中3条相同超氧化物歧化酶同工酶在盐胁迫下表达减弱, 2条在 ‘津优1号’ 中表达增强而 ‘新泰密刺’ 中无变化, 1条在 ‘津优1号’ 中表达无变化而 ‘新泰密刺’ 中表达减弱。综上所述, 3种抗氧化酶同工酶与其耐盐性均有密切关系, 并暗示抗氧化酶同工酶响应盐胁迫的变化趋势具有品种及组织特异性。韧皮部渗出液中3种同工酶变化趋势在2个品种中完全相反, 说明韧皮部是黄瓜幼苗响应盐胁迫的重要组织。图3参21

关键词: 植物学; 黄瓜; 抗氧化酶同工酶; 盐胁迫

中图分类号: S642.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2016)04-0652-06

NaCl stress on antioxidant enzyme isozymes expressed in cucumber seedling leaves, phloem exudates, and roots

SUN Zhanghan¹, FAN Huaifu^{1,2}, DU Changxia^{1,2}, HUANG Lingying¹

(1. The Key Laboratory for Quality Improvement of Agricultural Products of Zhejiang Province, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 2. School of Agriculture and Food Science, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China)

Abstract: *Cucumis sativus* (cucumber) is frequently subjected to salinity in facility production, which seriously affects cucumber yield and quality. To determine the effect of NaCl stress on cucumber, the salt-sensitive cultivar *Cucumis sativus* ‘Jinyou No. 1’ and relative salt-tolerant cultivar *Cucumis sativus* ‘Xintai Mici’ were used as experimental materials in this experiment. Seedlings were cultivated hydroponically with superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD), and catalase (CAT) isozyme expression being tested in cucumber seedling leaves, phloem exudates, and roots. Results for the leaves showed nine SOD isozyme bands, four POD isozyme

收稿日期: 2015-07-03; 修回日期: 2015-12-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31201658, 31101539); 浙江省自然科学基金资助项目(LY15C150006, Y3110308); 浙江农林大学科研发展基金人才启动项目(2011FR018)

作者简介: 孙张晗, 从事园艺植物生理生化等研究。E-mail: 2863594991@qq.com。通信作者: 杜长霞, 副教授, 博士, 从事园艺植物生理生化等研究。E-mail: changxiadu@zafu.edu.cn

bands, and two CAT isozyme bands being detected. With NaCl stress in 'Xintai Mici' leaves, SOD, POD, and CAT isozymes were inhibited, but in 'Jinyou No. 1' leaves they were enhanced. In phloem exudates, isozyme bands of three SOD, two POD, and one CAT were detected with NaCl stress enhanced in exudates of 'Xintai Mici', but inhibited in 'Jinyou No. 1'. In roots, isozyme bands from six SOD, seven POD, and one CAT were detected. The CAT isozyme expression in the roots of the two cultivars were enhanced; the six POD isozyme bands in 'Jinyou No. 1' were enhanced, and one POD isozyme band was inhibited, but in 'Xintai Mici' the expression of all POD isozyme bands was enhanced. With NaCl stress three SOD isozymes were inhibited in both varieties, two SOD isozyme bands were enhanced in the 'Jinyou No. 1' and they had no change in 'Xintai Mici', and one SOD isozyme band had no change in 'Jinyou No. 1' and its expression in the 'Xintai Mici' was inhibited. Thus, the three antioxidant enzymes were related to salt tolerance to some extent implying that the antioxidant enzyme response to salt stress possessed variety and tissue specificity; whereas, changes in the three isozymes for phloem exudates were completely opposite in two cultivars suggesting that the phloem was an important tissue in response to salt stress of cucumber seedlings. [Ch, 3 fig. 21 ref.]

Key words: botany; *Cucumis sativus* (cucumber); antioxidant enzyme isozyme; salt stress

在温室、大棚等设施栽培系统中, 温度、湿度、通气状况等均与露地栽培条件不同^[1], 土壤缺少雨水淋洗, 且设施栽培又具有高度集约化、高复种指数、高肥料施用量的特点, 与之相适宜的水肥管理措施的缺乏和特殊的生态环境导致产生诸多土壤问题, 其中土壤次生盐渍化问题较为突出。土壤次生盐渍化已经成为了设施栽培中普遍存在问题, 导致蔬菜作物产量和品质下降, 对设施蔬菜生产的可持续发展产生了严重不利的影响。黄瓜 *Cucumis sativus* 在中国蔬菜设施栽培中占有重要地位, 是设施栽培的主要蔬菜之一, 对土壤次生盐渍化敏感^[2]。土壤次生盐渍化导致黄瓜植株生长受到抑制, 盐和盐离子的大量积累诱导植物体发生生化反应, 如活性氧(reactive oxygen species, ROS)积累等, 造成脂质过氧化反应产生, 使植物受到氧化胁迫伤害^[3-4]。ROS 最重要的形式是羟基自由基、单线态氧、超氧阴离子和过氧化氢。植物可产生一系列的内源机制, 如低分子量的非酶抗氧化物质和酶的组分, 来保护植物抵御 ROS 的毒害作用^[5]。超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)是一种金属蛋白, 催化超氧化物自由基歧化形成过氧化氢和氧气^[6], 然后过氧化氢被过氧化氢酶(catalase, CAT)和多种过氧化物酶(peroxidases, POD)所清除, 转化成水和氧气。SOD, POD, CAT 是细胞膜系统免受 ROS 伤害的保护酶^[7-8], 在植物体中广泛存在, 其活性的高低可在一定程度上反应植物抗逆性的强弱。盐胁迫还导致黄瓜果实品质变差, 如可溶性蛋白、总糖、抗坏血酸(Vc)等均受到显著影响, 产量下降^[9], 因此, 选育耐盐黄瓜品种和研究其耐盐机制是十分重要的。在前人研究基础上, 本研究以黄瓜为材料, 采用营养液水培, 研究了盐(NaCl)胁迫对黄瓜幼苗叶片、根系和韧皮部渗出液 SOD, POD 和 CAT 同工酶活性表达的影响, 以期对黄瓜设施栽培及耐盐性强黄瓜品种的选育提供理论依据和支撑。

1 材料与方 法

1.1 材料培养及处理

试验研究于 2013 年 9 月至 2014 年 12 月在浙江农林大学官塘玻璃温室内进行。供试黄瓜品种为盐敏感的‘津优 1 号’*Cucumis sativus* ‘Jinyou No. 1’, 天津科润农业科技股份有限公司黄瓜研究所研制; 较耐盐的‘新泰密刺’*Cucumis sativus* ‘Xintai Mici’, 山东新泰市黄瓜研究所选育。种子在 28 °C 恒温培养箱中催芽, 露白后播于装有 m (草炭): m (蛭石): m (珍珠岩)=2:1:1 的育苗盘中育苗。待幼苗 3 叶 1 心时, 挑选生长一致的幼苗定植于水培槽内。采用 Hoagland 营养液培养, 气泵通气(40 min·h⁻¹), 预培养 3 d 后开始处理。共设 4 个处理, 分别为: ① ‘津优 1 号’-正常营养液栽培(J); ② ‘新泰密刺’-正常营养液栽培(X); ③ ‘津优 1 号’-营养液添加 75.0 mmol·L⁻¹ 盐栽培(salt-J); ④ ‘新泰密刺’-营养液添加 75.0 mmol·L⁻¹ 盐栽培(salt-X)。为了保证处理浓度的稳定性, 处理期间 2 d 更换 1 次营养液。试验设 3 次重复。处理后第 3 天取样(叶片、韧皮部渗出液和根系)测定相关指标。使用消毒后的锋利刀片切割黄瓜植株的茎, 收集茎中韧皮部渗出液, 具体收集步骤参考 MITCHELL 等^[10]方法。

1.2 同工酶 PAGE 电泳

活性聚丙烯酰胺凝胶电泳(PAGE)参数: 100 V, 4 °C运行 60 min; 200 V, 4 °C运行 180 min。除在整个电泳过程中不使用 SDS, 其他电泳缓冲液和凝胶配置参考 LAEMMLI^[11]的方法。

1.3 染色方法

使用质量分数为 7.5%聚丙烯酰胺凝胶分离 POD, 活性染色采用 FIELDING 等^[12]方法。凝胶首先孵育在 25.0 mmol·L⁻¹ 磷酸钾缓冲液(pH 7.0)中反应 15 min, 然后逐渐降低 pH 值, 随后凝胶浸没在新鲜配制的 25.0 mmol·L⁻¹ 磷酸钾缓冲液中, 轻摇, 直到 POD 同工酶条带清晰可见。使用质量分数为 10.0%聚丙烯酰胺凝胶分离 SOD。活性染色采用 BEAUCHAMP 等^[13]方法。凝胶在 36.0 mmol·L⁻¹ 磷酸钾缓冲液中平衡 30 min; 在蒸馏水中漂洗 1 min; 然后浸没在 36.0 mmol·L⁻¹ 磷酸钾缓冲液(pH 7.8)(2.5 mmol·L⁻¹ 氯化硝基四氮唑蓝 NBT) 中, 轻摇 10~20 min, 紫色背景下表现出无色条带即为 SOD 酶带。使用质量分数为 7.5%聚丙烯酰胺凝胶分离 CAT。活性染色采用 WOODBURY 等^[14]方法。凝胶在 0.003% 过氧化氢中孵育 10~15 min, 蒸馏水漂洗 2 次, 然后在质量分数为 1%氯化铁和 1%铁氰化钾中孵育 10~15 min, 蓝色背景下出现无色条带即为 CAT 酶带, 凝胶用自来水漂洗干净。

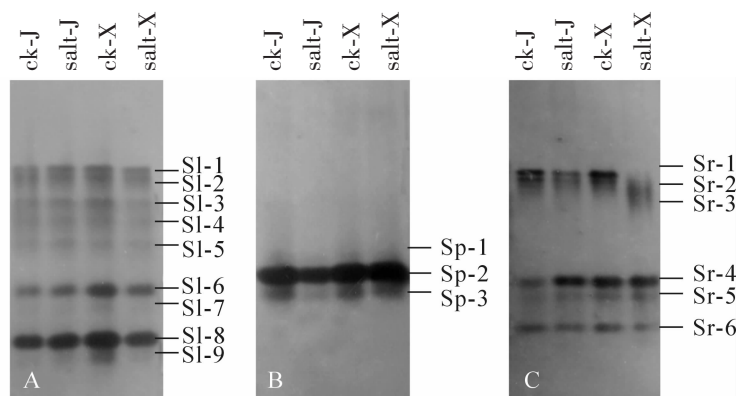
2 结果与分析

2.1 盐(NaCl)胁迫对超氧化物歧化酶(SOD)同工酶表达的影响

从图 1A 可知: 在叶片中检测到了 9 条 SOD 同工酶条带, 即 SI-1, SI-2, SI-3, SI-4, SI-5, SI-6, SI-7, SI-8, SI-9(迁移率分别为 32.08%, 33.02%, 38.68%, 43.40%, 47.17%, 57.55%, 60.38%, 67.92%和 71.70%)。与对照相比, 盐胁迫下, 除 SI-7 外, 其他 8 条 SOD 同工酶在‘津优 1 号’中的表达均有所增强; 叶片中检测到的 9 条 SOD 同工酶在‘新泰密刺’中表达均被抑制。正常栽培条件下, ‘津优 1 号’中 SOD 同工酶表达量显著弱于‘新泰密刺’。由图 1B 可以看出: 在韧皮部渗出液中检测到了 3 条 SOD 同工酶条带, 分别为 Sp-1, Sp-2, Sp-3, 迁移率分别为 45.28%, 60.38%和 62.66%。与对照相比, 盐胁迫条件下, 3 条 SOD 同工酶在‘津优 1 号’中表达均明显受到抑制, 而在‘新泰密刺’中表达则均有增强。正常栽培下, ‘津优 1 号’和‘新泰密刺’中 SOD 同工酶表达无显著差异。如图 1C 所示: 在根系中检测到 6 条 SOD 同工酶条带, 即 Sr-1, Sr-2, Sr-3, Sr-4, Sr-5, Sr-6。与对照相比, 在胁迫条件下, Sr-1, Sr-2 和 Sr-3 在‘津优 1 号’中的表达受到抑制, Sr-4 和 Sr-5 表达明显增强, 而 Sr-6 表达无变化; Sr-1, Sr-2, Sr-3 和 Sr-6 在‘新泰密刺’中的表达受到抑制, Sr-4 和 Sr-5 表达无明显变化。正常栽培条件下, 与‘新泰密刺’相比, ‘津优 1 号’中的 SOD 同工酶表达相对较弱。

2.2 盐胁迫对过氧化物酶(POD)同工酶表达的影响

从图 2A 可以看出: 在叶片中检测到了 4 条 POD 同工酶条带, 即 PI-1, PI-2, PI-3, PI-4(迁移率分别为 8.42%, 38.95%, 41.05%和 46.32%)。与对照相比, 在盐胁迫条件下, 4 条 POD 同工酶条带在‘津优 1 号’和‘新泰密刺’中的表达均受到抑制。正常营养液栽培条件下, POD 同工酶表达在两品种间



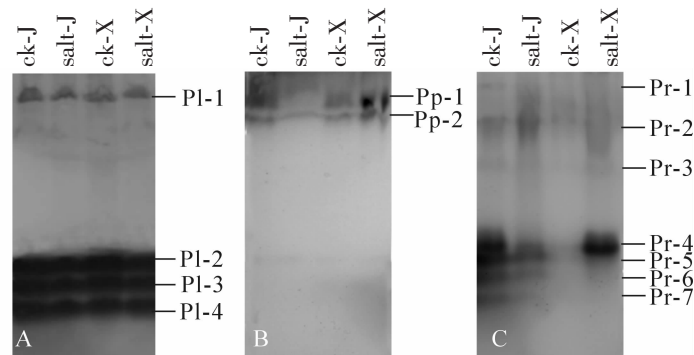
S. SOD; l. 叶片; p. 韧皮部渗出液; r. 根系。

图 1 盐胁迫对黄瓜幼苗叶片、韧皮部渗出液和根系 SOD 同工酶表达的影响

Figure 1 Effect of NaCl stress on the expression of SOD isozymes in cucumber seedlings leaf, phloem exudates and root

无明显差异。如图 2B 所示: 在韧皮部渗出液中检测到了 2 条 POD 同工酶条带, 即 Pp-1 和 Pp-2(迁移率分别为 7.37% 和 11.58%)。与对照相比, 在盐胁迫下, ‘津优 1 号’ 中的 2 条 POD 同工酶表达均受到了明显抑制, 而在 ‘新泰密刺’ 中表达则明显的加强。正常营养液栽培条件下, ‘津优 1 号’ 韧皮部渗出液中的 POD 同工酶表达强于 ‘新泰密刺’。

在根系中检测到了 7 条 POD 同工酶条带(图 2C), 即 Pr-1, Pr-2, Pr-3, Pr-4, Pr-5, Pr-6, Pr-7(迁移率分别为 8.42%, 11.58%, 21.05%, 31.58%, 35.79%, 41.05% 和 44.21%)。与对照比较, 除了 Pr-2 外, ‘津优 1 号’ 品种中检测到的其他 6 条 POD 同工酶条带的表达在盐胁迫条件下均受到了明显抑制, 而 Pr-2 在盐胁迫下表达显著增强; 在 ‘新泰密刺’ 中, 盐胁迫下, Pr-1, Pr-2, Pr-3, Pr-4, Pr-5 和 Pr-6 的表达均显著增强, Pr-7 条带在正常栽培和盐处理中几乎不可见。正常栽培条件下, ‘津优 1 号’ 韧皮部渗出液中的 POD 同工酶表达强于 ‘新泰密刺’。



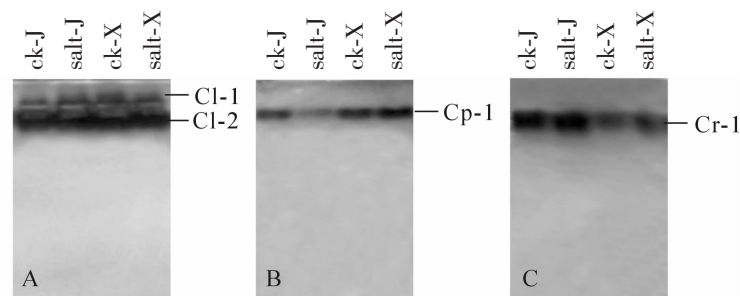
P. POD; l. 叶片; p. 韧皮部渗出液; r. 根系。

图 2 盐胁迫对黄瓜幼苗叶片、韧皮部渗出液和根系 POD 同工酶表达的影响

Figure 2 Effect of NaCl stress on the expression of POD isozymes in cucumber seedling leaf, phloem exudates and root

2.3 盐胁迫对过氧化氢酶(CAT)同工酶表达的影响

从图 3A 可以看出: 在 4 个处理中叶片均检测到 2 条 CAT 同工酶条带, 即 Cl-1, Cl-2(迁移率分别为 6.68% 和 2.75%)。与对照相比, 在胁迫条件下, ‘津优 1 号’ 中 Cl-1 表达明显增强, ‘新泰密刺’ 中 Cl-1 表达显著减弱, 而 Cl-2 在 2 个品种中均无明显变化。正常栽培条件下, ‘津优 1 号’ 叶片中的 CAT 同工酶表达相对 ‘新泰密刺’ 明显较弱。如图 3B 所示: 在幼苗韧皮部渗出液 4 个处理中只检测到 1 条 CAT 同工酶条带, 即 Cp-1。与对照相比, 胁迫条件下 ‘津优 1 号’ CAT 同工酶表达明显受到了抑制, ‘新泰密刺’ 则略有增强。正常栽培条件下, ‘津优 1 号’ 韧皮部渗出液中的 CAT 同工酶表达相对 ‘新泰密刺’ 略弱。由图 3C 可知: 根系 4 个处理中只检测到 1 条 CAT 同工酶条带, 即 Cr-1。与对照相比, 胁迫条件下 2 个黄瓜品种 CAT 同工酶均明显增强。正常栽培条件下, ‘津优 1 号’ 根系中的 CAT 同工酶表达比 ‘新泰密刺’ 强。



C. CAT; l. 叶片; p. 韧皮部渗出液; r. 根系。

图 3 盐胁迫对黄瓜幼苗叶片、韧皮部渗出液和根系 CAT 同工酶表达的影响

Figure 3 Effect of NaCl stress on the expression of CAT isozymes on cucumber seedlings leaf, phloem exudates and root

3 讨论

过量盐分对植物造成渗透胁迫和干扰营养离子平衡,盐分通过抑制和诱导多种酶系统表达和活力等,从而影响植物的生长。植物对逆境胁迫的响应之一就是通过对抗氧化酶表达和活性进行调节,抗氧化酶调节在一定程度上可以缓解植物的过量盐分积累对植物造成的毒害^[15]。在正常生长的植物体内,活性氧(ROS)的形成和淬灭之间是保持动态平衡的,而当植物遭受盐分等环境胁迫时,其动态平衡被打破,ROS积累导致细胞膜质氧化,引起植物的氧化损伤^[16]。植物体内ROS的清除主要依靠以SOD,POD,CAT等抗氧化酶系统^[17],在保护机体免受ROS侵害方面发挥重要作用。

叶片和根系分别是植物进行光合作用、水分和营养吸收的重要器官,韧皮部是维管系统的重要组成部分,是输导养分,并有支持、储藏等功能的复合组织,三者在植物的生命活动和对外界的响应过程中起着至关重要的作用。因而,本研究对氯化钠胁迫下黄瓜幼苗叶片、韧皮部渗出液及根系3个部位的抗氧化酶同工酶的表达情况进行了研究,从而更全面地反映不同耐盐性的黄瓜品种在抗氧化酶同工酶表达上的差异和特点。植物遭受逆境引发ROS水平升高的同时,植物体内的抗氧化酶发生变化。SOD活性增加,将超氧阴离子自由基快速歧化为过氧化氢和分子氧,减少膜脂过氧化对植物造成的伤害^[18]。POD和CAT是植物体内担负清除过氧化氢的主要酶类,广泛存在于植物,虽然这2种酶的底物都是过氧化氢,但是CAT催化过氧化氢生成水和氧气,POD催化过氧化氢氧化其他底物后生成水^[19]。本研究中,在75.0 mmol·L⁻¹的盐胁迫下,‘津优1号’SOD同工酶在叶片中表达增强,韧皮部渗出液中下降,根系中无明显规律。周珩等^[20]研究表明:在盐敏感的黄瓜品种‘津春2号’叶片SOD活性在盐胁迫下上升,与本研究中SOD同工酶表达变化相一致。而在耐盐性较强的‘新泰密刺’叶片和韧皮部中SOD同工酶表达与‘津优1号’完全相反,在根系6条SOD同工酶条带中有2条相同条带与‘津优1号’表达一致,均受到抑制。对于POD同工酶,2个品种在叶片中的表达趋势一致,均下降,在韧皮部渗出液和根系(除1条条带外)中相反。对于CAT同工酶,2个品种在叶片和韧皮部渗出液中表达变化趋势相反,而在根系中均表现出上升的趋势。DUAN等^[21]研究发现:盐胁迫下3d后两耐盐性不同的黄瓜品种‘津春2号’和‘长春密刺’根系CAT活性均升高,与本试验中根系CAT同工酶盐胁迫下的表达趋势一致。

综上所述:在2个耐盐性不同的黄瓜品种中,SOD同工酶在韧皮部、POD同工酶在韧皮部和根系及CAT同工酶在叶片和韧皮部中表达趋势相反,在一定程度上说明3种同工酶分别在黄瓜幼苗的这些部分与其耐盐性有密切关系。韧皮部渗出液中3种同工酶变化趋势在2个品种中均完全相反,说明韧皮部在黄瓜幼苗耐盐性的响应中具有重要意义,为通过韧皮部鉴定不同黄瓜品种的盐耐性提供了借鉴,以及为黄瓜的耐盐性研究提供了新的思路。同时我们还得出,品种耐盐性不同,抗氧化酶同工酶变化趋势相反有一定的组织或器官特异性,如POD同工酶仅在韧皮部渗出液和根系中变化趋势相反,为我们通过研究特定组织或器官的抗氧化酶同工酶变化判断植物耐盐性提供了重要依据和参考,但植物的耐盐性是一个复杂的数量性状,其精确的机制尚需进一步研究。

4 参考文献

- [1] 殷永娟,刘鸿雁.设施栽培下土壤中硝化、反硝化作用的研究[J].生态学报,1996,16(3):246-250.
YIN Yongxian, LIU Hongyan. Investigation on nitrification and denitrification of soil under installing cultivation conditions [J]. *Acta Ecol Sin*, 1996, 16(3): 246-250.
- [2] 杨秀玲,郁继华,李雅佳. NaCl胁迫对黄瓜种子萌发及幼苗生长的影响[J].甘肃农业大学学报,2004,39(1):6-9.
YANG Xiuling, YU Jihua, LI Yajia. Effects of NaCl stress on seed germination and seedling growth of *Cucumis sativus* [J]. *J Gansu Agric Univ*, 2004, 39(1): 6-9.
- [3] FINKEL T, HOLBROOK N J. Oxidants, oxidative stress and the biology of ageing [J]. *Nature*, 2000, 408(6809): 239-247.
- [4] MOLDOVAN L, MOLDOVAN N I. Oxygen free radicals and redox biology of organelles [J]. *Histochem Cell Biol*, 2004, 122(4): 395-412.

- [5] AGARWAL S, PANDEY V. Antioxidant enzyme responses to NaCl stress in *Cassia angustifolia* [J]. *Biol Plantarum*, 2004, **48**(4): 555 – 560.
- [6] BOWLER C, van MONTAGU M, INZÉ D. Superoxide dismutase and stress tolerance [J]. *Ann Rev Plant Physiol Plant Mol Biol*, 1992, **43**(4): 83 – 116.
- [7] 苏维埃, 宓容钦, 王文英, 等. 植物冷锻炼对于胁迫敏感度的影响[J]. 植物生理学报, 1990, **16**(3): 284 – 292.
SU Weiai, MI Rongqin, WANG Wenying, *et al.* The influence of cold hardening on plant stress sensitivity [J]. *Acta Phytophysiol Sin*, 1990, **16**(3): 284 – 292.
- [8] ALSCHER R G, DONAHUE J L, CRAMER C L. Reactive oxygen species and antioxidants: relationship in green cells [J]. *Physiol Plant*, 1997, **100**(2): 224 – 233.
- [9] 韩冰, 郭世荣, 贺超兴, 等. 丛枝菌根真菌对盐胁迫下黄瓜植株生长、果实产量和品质的影响[J]. 应用生态学报, 2012, **23**(1): 154 – 158.
HAN Bing, GUO Shirong, HE Chaoping, *et al.* Effects of arbuscular mycorrhiza fungi (AMF) on the plant growth, fruit yield, and fruit quality of cucumber under salt stress [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2012, **23**(1): 154 – 158.
- [10] MITCHELL D E, MADORE M A. Patterns of assimilate production and translocation in muskmelon (*Cucumis melo* L.) (I) diurnal patterns [J]. *Plant Physiol*, 1992, **99**(3): 959 – 965.
- [11] LAEMMLI U K. Cleavage of structural proteins during the assembly of the head of bacteriophage T4 [J]. *Nature*, 1970, **227**(5259): 680 – 685.
- [12] FIELDING J L, HALL J L. A biochemical and cytochemical study of peroxidase activity in roots of *Pisum sativum* (II) distribution of enzymes in relation to root development [J]. *J Exp Bot*, 1978, **29**(4): 983 – 991.
- [13] BEAUCHAMP C, FRIDOVICH I. Superoxide dismutase: improved assays and an assay applicable to acrylamide gels [J]. *Anal Biochem*, 1971, **44**(1): 276 – 287.
- [14] WOODBURY W, SPENCER A K, STAHMANN M A. An improved procedure using ferricyanide for detecting catalase isozymes [J]. *Anal Biochem*, 1971, **44**(1): 301 – 305.
- [15] 刘俊, 周一峰, 章文华, 等. 外源多胺对盐胁迫下玉米叶绿体结合态多胺水平和光合作用的影响[J]. 西北植物学报, 2006, **26**(2): 254 – 258.
LIU Jun, ZHOU Yifeng, ZHANG Wenhua, *et al.* Effects of exogenous polyamines on chloroplast-bound polyamine content and photosynthesis of corn suffering salt stress [J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 2006, **26**(2): 254 – 258.
- [16] 陈明. 外源一氧化氮供体 SNP 对盐胁迫下小麦 (*Triticum aestivum* L.) 幼苗根生长及氧化损伤的调节作用[D]. 南京: 南京农业大学, 2004.
CHEN Ming. *The Role of Exogenous Nitric Oxide Donor Snp in Modulating Root Growth and Oxidative Damage in Wheat (Triticum aestivum L.) Seedling Under Salt Stress* [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2004.
- [17] 张巍巍, 郑飞翔, 王效科, 等. 大气臭氧浓度升高对水稻叶片膜脂过氧化及保护酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2008, **19**(11): 2485 – 2489.
ZHANG Weiwei, ZHENG Feixiang, WANG Xiaoke, *et al.* Effects of elevated ozone on rice leaf lipid peroxidation and antioxidant system [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2008, **19**(11): 2485 – 2489.
- [18] 周永斌, 殷有, 苏宝玲, 等. 外源一氧化氮供体对几种植物种子的萌发和幼苗生长的影响[J]. 植物生理学通讯, 2005, **41**(3): 316 – 318.
ZHOU Yongbin, YIN You, SU Baoling, *et al.* Effects of exogenous nitric oxide donor on seed germination and seedling growth of several plant species [J]. *Plant Physiol Comm*, 2005, **41**(3): 316 – 318.
- [19] 唐玉海, 罗一鸣, 张枫, 等. 有机化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011: 461 – 462.
- [20] 周珩, 郭世荣, 邵慧娟, 等. 等渗 NaCl 和 Ca(NO₃)₂ 胁迫对黄瓜幼苗生长和生理特性的影响[J]. 生态学报, 2014, **34**(7): 1880 – 1890.
ZHOU Heng, GUO Shirong, SHAO Huijuan, *et al.* Effects of iso-smotic Ca(NO₃)₂ and NaCl stress on growth and physiological characteristics of cucumber seedlings [J]. *Acta Ecol Sin*, 2014, **34**(7): 1880 – 1890.
- [21] DUAN Jiuju, LI Juan, GUO Shirong, *et al.* Exogenous spermidine affects polyamine metabolism in salinity-stressed *Cucumis sativus* roots and enhances short-term salinity tolerance [J]. *J Plant Physiol*, 2008, **165**(15): 1620 – 1635.