

# 硫酸铈对硝酸钙胁迫下番茄叶片抗氧化酶活性及光合性能的影响

黄守程<sup>1</sup>, 黄萍<sup>2</sup>, 陆晓民<sup>1\*</sup>

(1 安徽科技学院 生命科学学院, 安徽凤阳 233100; 2. 安徽省凤阳中学 生物课程组, 安徽凤阳 233100)

**摘要:**以番茄品种‘合作908’幼苗为材料,研究了80 mmol/L硝酸钙胁迫下叶面喷施10 mg/L硫酸铈对番茄幼苗生长、叶片抗氧化酶活性及光合性能的缓解效应。结果显示:硝酸钙胁迫导致番茄幼苗的株高、茎粗、鲜重、地上和地下部干重显著降低,叶片SOD、POD、CAT活性减弱,净光合速率、气孔导度、蒸腾速率以及胞间CO<sub>2</sub>浓度均显著下降,而MDA含量和质膜透性显著升高;与硝酸钙胁迫处理相比,叶面喷施硫酸铈处理对硝酸钙胁迫下的番茄幼苗株高、茎粗、鲜重和干重等营养生长具有不同程度的促进作用,同时显著提高叶片SOD、POD和CAT活性,有效降低叶片MDA含量和细胞膜透性,并且显著提高了叶片净光合速率、气孔导度、蒸腾速率。研究表明,叶面喷施硫酸铈可诱导增强硝酸钙胁迫下番茄幼苗叶片的抗氧化酶活性,有效降低膜脂过氧化程度,维持较高水平的光合性能,从而一定程度上缓解硝酸钙胁迫对番茄幼苗生长造成的伤害,增强其耐受盐胁迫的能力。

**关键词:**稀土元素;铈;硝酸钙胁迫;番茄;抗氧化酶;光合作用

中图分类号: Q945.78

文献标志码: A

## Effects of Cerium Sulfate Foliar Spray on Antioxidant Activities and Photosynthesis of Tomato Seedling Leaves under Calcium Nitrate Stress

HUANG Shoucheng<sup>1</sup>, HUANG Ping<sup>2</sup>, LU Xiaomin<sup>1\*</sup>

(1 College of Life Science, Anhui Science and Technology University, Fengyang, Anhui 233100, China; 2 Biology Teaching Group of Fengyang Senior Middle School, Fengyang, Anhui 233100, China)

**Abstract:** The present work studied the effects of 10 mg/L cerium sulfate on the antioxidant enzymes and photosynthesis of tomato seedlings ‘Hezuo 908’ leaves under 80 mmol/L calcium nitrate stress. The results showed that, comparing with the control, calcium nitrate stress significantly inhibited the growth of tomato seedlings by reducing the height, stem diameter, fresh weight, shoot and root dry weight. Furthermore, calcium nitrate stress also led to the decreased activities of SOD, POD and CAT as well as the decreased net photosynthetic rate, stomatal conductance, transpiration rate and intercellular CO<sub>2</sub> concentration, whereas resulted in elevated MDA contents and membrane permeability. Comparing with the calcium nitrate stress treatments, however, after sprayed with cerium sulfate, some vegetative growth indicators, such as the plant height, stem diameter, fresh and dry weight were promoted in different degrees. In addition, the SOD, POD and CAT activities were also significantly up-regulated while MDA content and membrane permeability of leaves were greatly reduced. Meanwhile, the photosynthetic rate, transpiration rate and stomatal conductance were notably improved. Therefore, foliar spray of cerium sulfate helps to alleviate the damage caused by calcium nitrate stress through promoting the antioxidant activities, reducing

收稿日期: 2015-05-04; 修改稿收到日期: 2015-06-12

基金项目: 安徽省现代农业产业技术体系专项-蔬菜产业技术体系(AHCYTX-13); 安徽科技学院稳定人才基金(ZRC2013348)。

作者简介: 黄守程(1980-), 男, 讲师, 硕士, 主要从事植物抗性生理研究。E-mail: whyler@163.com

\* 通信作者: 陆晓民, 教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事设施作物生理生态方面的研究工作。E-mail: luxiaomin88@163.com

the membrane lipid peroxidation and maintaining relative higher photosynthetic performance of tomato seedlings.

**Key words:** rare earth element;  $\text{Ce}^{3+}$ ; calcium nitrate stress; tomato; antioxidant enzymes; photosynthesis

近年来,伴随着中国设施农业的迅猛发展,棚室土壤次生盐渍化也日趋严重,从而导致植物生长受到不同程度的抑制<sup>[1]</sup>。研究表明,设施内土壤盐分含量一般为露地土壤盐分的 2~3 倍以上,使用 3~5 年的棚室容易出现土壤盐分积聚高峰,且其阴、阳离子分别以  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{Ca}^{2+}$  为主, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  的过量积累是土壤次生盐渍化形成的主要因素<sup>[2]</sup>。因此,克服和缓解以  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  过量积累为主要特征的土壤次生盐渍化的危害是亟需解决的问题。

番茄(*Lycopersicon esculentum* Mill) 原产南美洲,属一年生茄果类蔬菜,具有适应性强、高产、味美、营养丰富、效益好等特点。改革开放以来,随着人民生活水平的提高及科学技术的进步,各地番茄栽培面积不断增加,尤其是设施番茄栽培发展迅猛,已成为中国最为重要的设施栽培蔬菜之一,其对有效提高农民经济收入、保障蔬菜周年供应和满足人们生活水平的需要起着不可忽视的作用<sup>[3]</sup>。

稀土元素(rare earth element)包括化学元素周期表中镧系元素以及钪、钇共 17 种具有生理活性的金属元素,依据其性质上的微小差异又分为轻稀土和重稀土<sup>[4]</sup>。中国是世界上稀土资源最为丰富的国家之一,已探明的储量居世界之首。自 20 世纪 70 年代起,中国广大学者便开展了有关稀土农业应用及植物生理效应方面的研究,至 80 年代中期开始广泛推广使用。研究表明,以镧、铈为主要成分的混合稀土对植物生长具有良好的调节与刺激作用,对植物的许多生理功能都有积极的影响,采用适宜浓度的稀土处理可促进植物的生长发育,提高其产量与品质,稀土已在农作物及养殖业上得到了广泛应用<sup>[5-7]</sup>。如今,随着科学技术的发展以及稀土纯化工艺的改进,有关稀土农用的研究与应用更加深入,目前对单一稀土的农用研究与利用已成为一个新的热点,尤其是含量相对丰富的稀土镧、铈。为此,本试验依据混合稀土及镧、铈在中国工农业生产上的应用情况<sup>[8-10]</sup>,结合国内设施蔬菜生产存在的问题,在原有设施土壤次生盐研究的基础上<sup>[2]</sup>,以硝酸钙模拟土壤次生盐渍化胁迫,开展稀土元素铈对番茄幼苗营养生长、抗氧化系统及光合的影响研究,以探究稀土元素对硝酸钙胁迫下幼苗的保护机制,为克服设施蔬菜栽培土壤次生盐渍障碍以及稀土元素铈减

轻作物盐胁迫伤害的应用提供参考依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料培养与处理

以上海长征‘合作 908’番茄种子为试材,播种育苗,待幼苗长至二叶一心期时,选取长势一致的幼苗移植于营养钵中(15 cm×13 cm),以蛭石与沙子(1:1)为栽培基质,每钵 1 株,以 Hoagland 营养液进行培养,每天更换新鲜培养液。待幼苗长至五叶一心时选生长一致的苗进行试验处理。其中,对照为 Hoagland 营养液(CK);硝酸钙胁迫处理为 Hoagland 营养液+80 mmol/L  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ;硝酸钙胁迫+硫酸铈处理方法如下:Hoagland 营养液+80 mmol/L  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ,同时叶面喷施 10 mg/L 的  $\text{Ce}_2(\text{SO}_4)_3$  溶液,于傍晚喷施 1 次,每次喷施 200 mL,每 4 d 喷施 1 次,共喷 2 次,材料培养在自然光照条件下。试验于 2014 年 4 月在安徽科技学院校内园艺实习基地进行,采用单因素随机区组设计,3 次重复,每个重复 30 钵。处理 8 d 后及时测定番茄幼苗植株根、茎、叶等营养生长指标以及相关生理指标。 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  浓度和  $\text{Ce}_2(\text{SO}_4)_3$  处理浓度均在前期相关研究的基础上进行设定<sup>[2,10]</sup>。

### 1.2 测定指标及方法

番茄幼苗株高、茎粗、生物量生长指标,以及叶片 SOD、POD、CAT 活性和质膜透性、丙二醛含量等生理指标参照陆晓民等的方法测定<sup>[11]</sup>;叶片(上数第 3 片叶)的净光合速率( $P_n$ )、蒸腾速率( $T_r$ )、气孔导度( $G_s$ )和胞间  $\text{CO}_2$  浓度( $C_i$ )等光合参数利用 TPS-2 便携式光合仪(美国 PPSYSTEMS 公司)测定<sup>[12]</sup>。

### 1.3 数据统计与分析

所有试验数据均为 3 次重复取平均值,并以 Mean±SD 进行图表绘制;各处理数据之间的差异显著性采用 SPSS Statistics 19.0 进行分析检测(LSD 多重比较, $\alpha=0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 叶面喷施硫酸铈对硝酸钙胁迫下番茄幼苗生长的影响

由表 1 可以看出,硝酸钙胁迫下,番茄幼苗各营养生长指标均较对照显著下降,其中幼苗的株高、茎

粗分别比对照下降了 22.42% 和 26.76%, 植株鲜重及总干重分别下降了 58.40% 和 39.60%; 番茄幼苗叶面喷施硫酸铈后, 其株高、茎粗及地下部干质量较硝酸钙胁迫处理后略有提高, 但差异均不显著, 而其鲜重、地上部干重及总干重却分别显著提高了 31.70%、28.52% 和 26.63%, 幼苗生长受硝酸钙胁迫抑制程度减轻。由此可见, 硝酸钙胁迫幼苗生长受到显著抑制, 叶面喷施硫酸铈有利于番茄幼苗生物量的积累, 有效缓解硝酸钙对番茄幼苗生长的抑制程度。

## 2.2 叶面喷施硫酸铈对硝酸钙胁迫下番茄幼苗叶片抗氧化酶活性的影响

由图 1 可知, 与对照相比, 硝酸钙胁迫下番茄幼苗叶片 SOD、POD 和 CAT 活性分别显著降低了 42.74%、35.40% 和 23.75%; 与硝酸钙胁迫相比, 叶面喷施硫酸铈后番茄幼苗叶片 SOD、POD 和 CAT 活性分别显著提高了 41.65%、27.47% 和 23.40%, 但其 SOD 和 POD 仍显著低于对照水平, 仅 CAT 活性恢复到与对照接近水平。可见, 在硝酸钙胁迫条件下, 叶面喷施硫酸铈处理可显著诱导增强番茄幼苗叶片抗氧化酶活性, 进而提高番茄植株对硝酸钙胁迫逆境的抗性, 对其幼苗生长起到有效的保护作用。

## 2.3 叶面喷施硫酸铈对硝酸钙胁迫下番茄幼苗叶片 MDA 含量及膜透性的影响

由图 2 可知, 硝酸钙胁迫下, 番茄幼苗叶片的相对电导率、MDA 含量分别比对照分别显著提高了 84.94% 和 97.90%; 而喷施硫酸铈后, 番茄幼苗叶片相对电导率、丙二醛含量比硝酸钙胁迫处理分别显著下降 25.33% 和 32.91%, 但仍显著高于对照水平。这表明硫酸铈可一定程度上减轻硝酸钙胁迫下番茄幼苗叶片膜脂过氧化程度, 有效维持细胞膜的完整性, 从而提高番茄幼苗对硝酸钙胁迫的耐性。

## 2.4 叶面喷施硫酸铈对硝酸钙胁迫下番茄幼苗叶片光合能力的影响

由图 3 可知, 与对照相比, 硝酸钙胁迫导致了番茄幼苗叶片的净光合速率显著降低 33.39%, 其气孔导度、蒸腾速率和胞间  $\text{CO}_2$  浓度也分别显著下降 55.18%、30.08% 和 33.62%; 而叶面喷施硫酸铈可减轻硝酸钙胁迫下番茄幼苗叶片光合速率、气孔导度和蒸腾速率的下降幅度, 它们分别比硝酸钙处理显著提高了 24.57%、25.11% 和 20.95%, 但对胞间  $\text{CO}_2$  浓度无显著影响。以上结果说明叶面喷施硫酸铈有利于改善硝酸钙胁迫下番茄幼苗的光合性能, 提高其叶片的净光合速率, 进而促进幼苗的生长, 缓解其受害程度。

表 1 叶面喷施硫酸铈对硝酸钙胁迫下幼苗生长的影响

Table 1 Effects of cerium sulfate foliar spray on growth of tomato seedlings under calcium nitrate stress

处理 Treatments	株高 Plant height /(cm · plant <sup>-1</sup> )	茎粗 Stem diameter/ (mm · plant <sup>-1</sup> )	鲜重 Fresh weight /(g · plant <sup>-1</sup> )	地上部干重 Dry weight of shoot /(g · plant <sup>-1</sup> )	地下部干重 Dry weight of root /(g · plant <sup>-1</sup> )	总干重 Dry weight /(g · plant <sup>-1</sup> )
CK(H)	21.40 ± 1.31a	5.36 ± 0.39a	21.56 ± 1.95a	1.77 ± 0.13a	0.50 ± 0.03a	2.27 ± 0.16a
H+Ca	16.60 ± 1.17b	4.05 ± 0.42b	8.83 ± 0.55c	1.08 ± 0.08c	0.29 ± 0.02b	1.37 ± 0.10c
H+Ca+Ce	16.90 ± 1.09b	4.17 ± 0.31b	11.63 ± 1.01b	1.39 ± 0.11b	0.35 ± 0.01b	1.74 ± 0.12b

注: 同列不同小写字母表示处理间差异显著 (LSD,  $P < 0.05$ )。CK 表示 Hoagland 营养液对照; H+Ca 表示 Hoagland+Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 处理; H+Ca+Ce 表示 Hoagland+Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>+叶面喷施 Ce<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> 处理; 下同。

Note: Different normal letters indicate significant difference among treatments at 0.05 level. CK indicates Hoagland solution control, H+Ca indicates Hoagland+Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, and H+Ca+Ce indicates Hoagland+Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>+Ce<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> spray. The same as below.

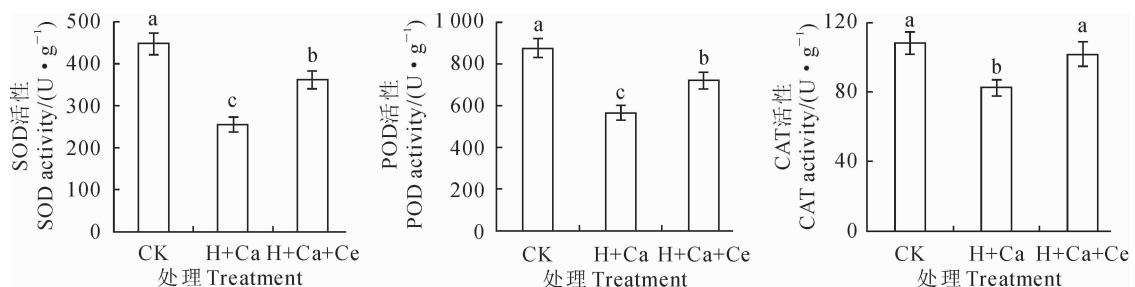


图 1 叶面喷施硫酸铈对硝酸钙胁迫下番茄幼苗叶片 SOD、POD 和 CAT 活性的影响

Fig. 1 Effects of cerium sulfate foliar spray on SOD, POD and CAT activities in leaves of tomato seedling under calcium nitrate stress

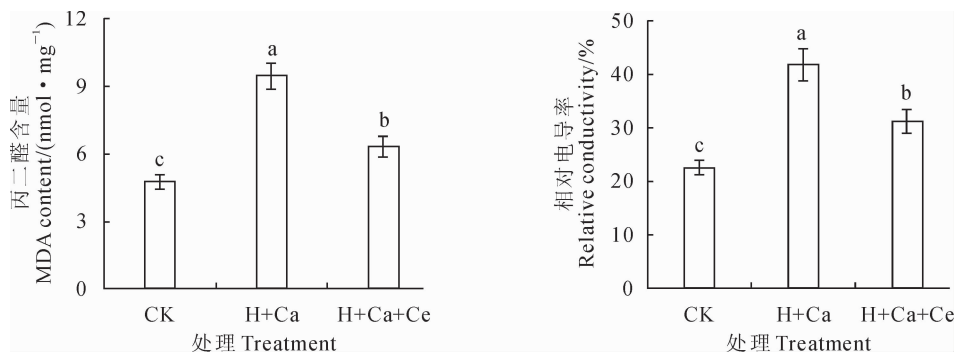


图2 叶面喷施硫酸铈对硝酸钙胁迫下番茄幼苗叶片丙二醛含量及质膜透性的影响

Fig. 2 Effects of cerium sulfate foliar spray on MDA contents and cell membrane permeability of tomato seedling leaves under calcium nitrate stress

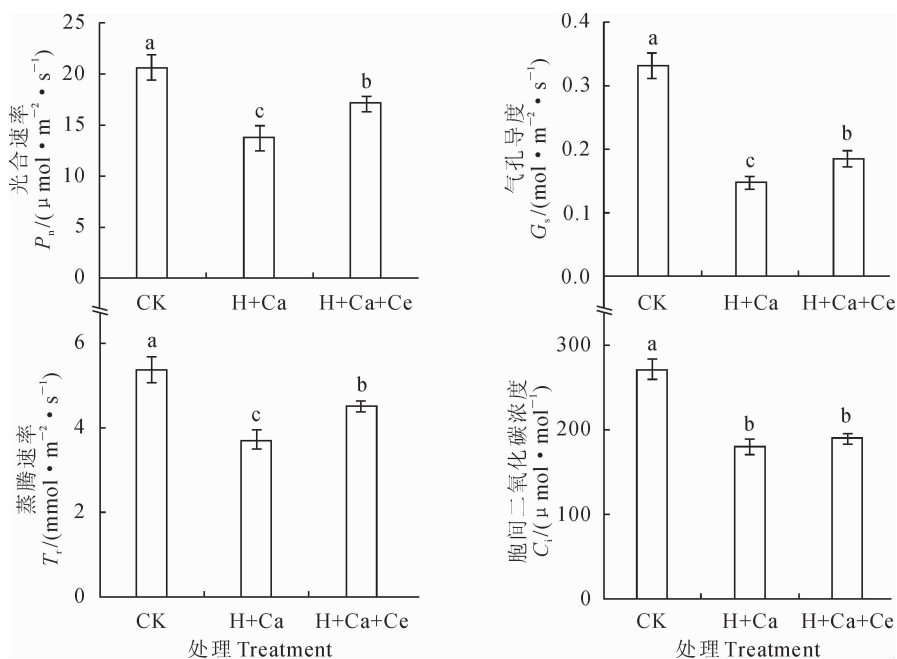


图3 叶面喷施硫酸铈对硝酸钙胁迫下番茄幼苗叶片光合能力的影响

Fig. 3 Effects of cerium sulfate foliar spray on photosynthesis of tomato seedling leaves under calcium nitrate stress

### 3 讨论

土壤次生盐渍化主要是原非盐渍化的土壤因设施结构的特点及种养结合的不合理等因素而导致盐渍化或增强原土壤盐化程度的过程<sup>[13]</sup>。改革开放后中国设施农业发展迅速,设施土壤次生盐渍化也不断加重,尤其是山东、江苏等设施发展较快的地区则更加严重。据余海英等<sup>[14]</sup>报道,山东寿光设施蔬菜生产基地土壤含盐量显著高于露地,耕层盐分平均含量 2.69 g/kg,是相应露地的 4~6 倍;而高砚芳等<sup>[15]</sup>证实江苏宜兴设施土壤含盐量大多均在 2 g/kg 以上。由于次生盐渍化土壤积盐严重,导致其渗透压增大,通气、透水性变差,土壤养分有效性

降低,从而严重影响作物的生长和发育,降低产品产量和品质,盐渍化已严重影响设施蔬菜产业发展。本研究表明,番茄幼苗生长在硝酸钙胁迫下显著受抑,其株高、茎粗、植株干鲜重等营养生长指标均较对照显著下降,这与前人关于硝酸钙胁迫对茄子<sup>[16]</sup>、南瓜<sup>[17]</sup>、黄瓜<sup>[18]</sup>幼苗生长影响的研究结果相吻合。

正常情况下,因植物自身酶促和非酶促抗氧化系统的作用,其体内活性氧产生与清除处于平衡状态,胞内活性氧(ROS)含量保持较低水平,不会对细胞造成伤害<sup>[19,20]</sup>。植物体内清除 ROS 的抗氧化酶种类较多,SOD、POD 和 CAT 是植物细胞中清除活性氧中最为重要的抗氧化酶,三者协同作用可以有

效清除 ROS,保护膜结构,维持正常的代谢与生长;但当植物受到生物与非生物胁迫时,这种平衡状态就会被打破,植物生长受到不同程度的抑制<sup>[21]</sup>。研究表明,土壤严重积盐可以改变植物细胞内离子的浓度和种类,导致膜完整性的破坏和某些酶功能的降低;盐胁迫破坏了植物体内 ROS 产生与清除平衡,导致 ROS 含量增加,从而对细胞造成氧化伤害,植物的光合作用会受到明显的影响<sup>[22-24]</sup>。稀土是具有生理活性的金属元素,可调节植物的生长发育,适宜浓度的稀土能促进作物生长,提高其产量与抗性<sup>[25-27]</sup>。据高利利等<sup>[28]</sup>报道,在 pH 2.5~5.0 的酸雨强度下,10 mg/L 镧处理对冬小麦种子的萌发具有一定的防护效应,可减轻酸雨对萌发期间种子的伤害程度,增强了种子抗酸雨的能力。金璘等<sup>[29]</sup>研究表明,根施 20 mg/L 铈和喷施 30 mg·L<sup>-1</sup> 铈均能在一定程度上减轻盐胁迫对玉米幼苗造成的伤害。刘斌等<sup>[30]</sup>对低温处理 3 d 后的麻楝幼苗进行 1 000 mg/L 混合稀土处理,以及低温处理 7 d 后的幼苗进行 500 和 1 000 mg/L 混合稀土处理,发现其幼苗 SOD 活性都明显提高,叶片中的 MDA 均低于对照,表明稀土可以降低 MDA 含量,有利于保护细胞膜完整性,提高了抗寒性。陆晓民等<sup>[10]</sup>研究表

明,叶面喷施 20 mg/L 的硫酸铈可有效抑制酸雨胁迫下糯玉米幼苗 MDA 增加和细胞膜透性降低,促进根系生长、增加幼苗的干重,增强了糯玉米幼苗对酸雨逆境的抵抗能力。本试验结果表明,硝酸钙胁迫下,番茄幼苗自身的抗氧化平衡被打破,其体内的 SOD、POD 和 CAT 抗氧化酶活性下降,导致细胞内活性氧清除系统无法正常发挥作用,造成体内 MDA 积累,叶片细胞膜脂过氧化程度加重,膜透性加大,其气孔导度、蒸腾速率、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度显著下降,导致净光合速率显著降低,幼苗的鲜重、干重等营养指标较对照均显著减少,生长显著受抑。而叶面喷施硫酸铈可提高硝酸钙胁迫下番茄幼苗叶片抗氧化酶活性,降低其 MDA 含量,并维持细胞膜的完整性,同时提高了硝酸钙胁迫下番茄幼苗叶片的净光合速率,增加了硝酸钙胁迫下幼苗的干物质积累,促进了幼苗的生长。

综上所述,硝酸钙胁迫显著抑制了番茄幼苗生长,叶面喷施 10 mg/L 硫酸铈可显著提高硝酸钙胁迫幼苗叶片的抗氧化酶活性,降低膜脂过氧化程度,维持其较高的光合性能,从而缓解了硝酸钙胁迫对番茄幼苗的伤害,增强其耐受土壤盐渍化能力。

## 参考文献:

- [1] ZHANG ZH H(张真和),CHEN Q Y(陈青云),GAO L H(高丽红),*et al.* Development and strategy of the protected vegetable in China (part one)[J]. *Vegetables*(蔬菜),2010,(6):1-3(in Chinese).
- [2] LU X M(陆晓民),GAO Q H(高青海). Effects of brassinolide on the growth and isozyme expression of antioxidant enzymes of cucumber seedlings under calcium nitrate stress[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*(热带作物学报),2011,**32**(11):2 104-2 108(in Chinese).
- [3] LIU J J(刘姣姣),YANG L J(杨丽娟),LI Z T(李振涛),*et al.* Effects of tomato plant growth and yield in facility continuous cropping system hydroponics[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*(沈阳农业大学学报),2013,**44**(5):581-584.
- [4] GAO H J(郜红建),CHANG J(常江),ZHANG Z L(张自立),*et al.* Physiological effects of rare earth elements on stress resistance in plant[J]. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*(中国稀土学报),2003,**21**(5):487-490(in Chinese).
- [5] WU Y P(武英鹏),ZHANG Z G(张作刚),SU CH M(苏朝棉),*et al.* Inhibiting effect of lanthanum and rare earth nitrate on four plant pathogen[J]. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*(中国稀土学报),2012,**30**(6):755-760(in Chinese).
- [6] WU R Q(吴端钦),HE ZH X(贺志雄),TAN ZH L(谭支良). The application of rare earth elements in animal nutrition[J]. *Acta Ecologicae Animalis Domastici*(家畜生态学报),2013,**34**(3):9-12(in Chinese).
- [7] YU H B(余海兵),REN X D(任向东),LIU ZH(刘正),*et al.* Effects of rare earths in agriculture on photosynthetic characteristics of canopy and quality of waxy corn[J]. *Chinese Rare Earths*(稀土),2014,**34**(2):332-340(in Chinese).
- [8] REN Y J(任艳军),MA J J(马建军). Effects of spray application of lanthanum and cerium on rape yield and quality based on different seasons[J]. *Journal of the Chinese society of rare earths*(中国稀土学报),2013,**31**(2):242-248(in Chinese).
- [9] REN H Y(任红玉),LIU X(刘曦),GAO ZH Y(高振宇),*et al.* Effect of spraying rare earth on chemical quality of northeast soybean in efflorescence [J]. *Journal of the Chinese Society of Rare Earths*(中国稀土学报),2014,**32**(1):94-100(in Chinese).
- [10] LU X M(陆晓民),WANG B(汪兵),LIU H(刘红). Effects of the rare earth element on the growth of waxy corn seedlings under simulated acid rain[J]. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*(核农学报),2010,**24**(1):114-117(in Chinese).
- [11] LU X M(陆晓民),YANG W(杨威). Alleviation effects of brassinolide on cucumber seedlings under NaCl stress[J]. *Chinese Journal*

- of *Applied Ecology*(应用生态学报),2013,**24**(5):1 409—1 414(in Chinese).
- [12] ZHEN A, BIE Z L, HUANG Y, *et al.* Effects of salt-tolerant rootstock grafting on ultrastructure, photosynthetic capacity, and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-scavenging system in chloroplasts of cucumber seedlings under NaCl stress[J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2011, **33**:2 311—2 319.
- [13] YU H Y(余海英), LI T X(李廷轩), ZHOU J M(周健民). Salt accumulation, translocation and ion composition in greenhouse soil profiles[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*(植物营养与肥料学报), 2007, **13**(4):642—650(in Chinese).
- [14] YU H Y(余海英), LI T X(李廷轩), ZHOU J M(周健民). Salt in typical greenhouse soil profiles and its potential environmental effects [J]. *Acta Pedologica Sinica*(土壤学报), 2006, **43**(4):571—576(in Chinese).
- [15] GAO Y F(高砚芳), DUAN Z Q(段增强), XUN H F(郇恒福). On physico-chemical properties of greenhouse soil in Yixing region[J]. *Soils*(土壤), 2007, **39**(5):968—972(in Chinese).
- [16] WEI G P, YANG L F, ZHU Y L, *et al.* Changes in oxidative damage, antioxidant enzyme activities and polyamine contents in leaves of grafted and non-grafted eggplant seedlings under stress by excess of calcium nitrate[J]. *Scientia Horticulturae*, 2009, **120**:443—451.
- [17] WANG L P(王丽萍), SUN J(孙 锦), GUO SH R(郭世荣), *et al.* Growth and reactive oxygen metabolism in different cucumber grafted rootstock seedlings under Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> or NaCl stress[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*(西北植物学报), 2011, **31**(10):2 045—2 051(in Chinese).
- [18] TONG H(童 辉), SUN J(孙 锦), GUO SH R(郭世荣), *et al.* Effects of iso-osmotic Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> and NaCl stress on the growth and osmotic substances of cucumber seedlings[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*(西北植物学报), 2012, **32**(2):306—311(in Chinese).
- [19] LU X M(陆晓民), SUN J(孙 锦), GUO SH R(郭世荣), *et al.* Effects of brassinolide on the mitochondria antioxidant system and cellular ultrastructure of cucumber seedling roots under hypoxic stress[J]. *Acta Horticulturae Sinica*(园艺学报), 2012, **39**(5):888—896(in Chinese).
- [20] GAO Q H(高青海), WANG X F(王秀峰), SHI Q H(史庆华), *et al.* Effects of lanthanum on the plant growth and leaf anti-oxidative enzyme activities of cucumber seedlings under nitrate stress[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*(应用生态学报), 2008, **19**(5):976—980(in Chinese).
- [21] LI SH(李 顺), LONG J(龙 娟), XU H N(徐慧妮). Growth and physiological responses of cherry tomato seedlings under nitrate stress[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*(西北植物学报), 2014, **34**(2):332—340(in Chinese).
- [22] TIAN J, WANG L P, YANG, Y J, *et al.* Exogenous spermidine alleviates the oxidative damage in cucumber seedlings subjected to high temperatures[J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 2012, **137**:11—19.
- [23] KANG Y Y, GUO S R, LI J, *et al.* Effects of 2,4-epibrassinolide on antioxidant system in cucumber seedling roots under hypoxia stress [J]. *Agricultural Sciences in China*, 2007, **6**(3):281—289.
- [24] ZHANG M C, ZHAI Z X, TIAN X L, *et al.* Brassinolide alleviated the adverse effect of water deficits on photosynthesis and the antioxidant of soybean(*Glycine max* L.)[J]. *Plant Growth Regulation*, 2008, **56**:257—264.
- [25] HE Y J(何跃君), XUE L(薛 立). Biological effects of rare earth elements and their action mechanisms[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*(应用生态学报), 2005, **16**(10):1 983—1 989(in Chinese).
- [26] ZHANG Z X(张子学), HU H D(胡红德), HU N B(胡能兵), *et al.* Mitigation effect of rare-earth on seedling growth and rooting of petunia under NaCl stress[J]. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*(中国稀土学报), 2010, **28**(6):760—765(in Chinese).
- [27] MU K G(慕康国), ZHAO X Q(赵秀琴), HU L(胡 林), *et al.* Biochemical mechanism of plant disease resistance induced with lanthanum[J]. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*(中国稀土学报), 2006, **24**(Suppl):182—186(in Chinese).
- [28] GAO L L(高利利), ZHANG CH(张 晨), QIU L(邱 琳), *et al.* Effects of lanthanum on germination of winter wheat seeds under acid rain stress[J]. *Journal of Triticeae Crops*(麦类作物学报), 2008, **28**(1):129—133(in Chinese).
- [29] JIN J(金 璁), LI Q(李 琦). Impact of cerium imposed by the different methods on maize protective system under salt stress[J]. *Journal of Maize Sciences*(玉米科学), 2010, **18**(6):61—63, 68(in Chinese).
- [30] LIU B(刘 斌), XUE L(薛 立), XU P B(许鹏波), *et al.* Effects of rare earth on physiological indices of *Chukrasia tabularis* seedlings under short-time low temperature[J]. *Journal of South China Agricultural University*(华南农业大学学报), 2010, **31**(4):82—85(in Chinese).