

徐微风, 覃和业, 刘 姣, 等. 冰菜在不同浓度海水胁迫下的氧化胁迫和抗氧化酶活性变化[ J ]. 江苏农业学报, 2017, 33( 4 ): 775-781.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2017.04.008

## 冰菜在不同浓度海水胁迫下的氧化胁迫和抗氧化酶活性变化

徐微风<sup>1,2</sup>, 覃和业<sup>2</sup>, 刘 姣<sup>2</sup>, 王 蕾<sup>1,2</sup>, 吕 瑞<sup>1,2</sup>, 郭建春<sup>2</sup>, 符少萍<sup>2</sup>, 李瑞梅<sup>2</sup>, 胡新文<sup>1</sup>, 段瑞军<sup>2</sup>

(1. 海南大学, 海南 海口 571101; 2. 中国热带农业科学院热带生物技术研究所, 海南 海口 571101)

**摘要:** 通过分析冰菜( *Mesembryanthemum crystallinum* Linnaeus )在不同海水浓度的灌溉水栽培条件下受到的氧化胁迫程度, 进一步分析其抗氧化酶活性变化, 初步探索抗氧化途径在冰菜耐盐机制中的作用。本研究以冰菜为材料, 通过盆栽试验, 设置灌溉水中 6 个海水浓度处理, 分别为 0、20.00%、40.00%、60.00%、80.00% 和 100.00%, 测定不同处理下冰菜在 150 d 内的生长形态、氧化胁迫程度和抗氧化酶活性的变化, 每隔 30 d 测一次。与 0 海水浓度处理相比, 小于等于 60.00% 海水浓度处理下的冰菜未表现出生长抑制, 冰菜体内  $H_2O_2$  含量和  $O_2^{\cdot-}$  含量分别小于 10.00  $\mu\text{mol/g}$  和 0.15  $\mu\text{mol/g}$ , 丙二醛(MDA)含量和叶片相对电导率分别小于 27.00  $\mu\text{mol/g}$  和 53.70%。小于 60.00% 海水浓度处理下, 超氧化物歧化酶(SOD)活性随着冰菜的生长呈递增趋势, 过氧化物酶(POD)活性随着冰菜的生长呈先升高后降低再升高的趋势, 过氧化氢酶(CAT)活性低于 1.00 U/g, 20.00% 海水浓度处理下的冰菜得到最显著正向生长刺激。大于 60.00% 海水浓度处理下的冰菜表现出与海水浓度正相关的生长抑制, 其体内  $H_2O_2$  含量和  $O_2^{\cdot-}$  含量激增, MDA 含量和叶片电导率随冰菜生长衰老呈持续递增趋势, SOD 活性和 POD 活性均随着冰菜生长呈递减趋势。80.00% 海水浓度处理下 CAT 活性变化不明显, 保持在 1.00 U/g 左右, 100.00% 海水浓度处理下 CAT 活性激增。冰菜能在全海水浇灌环境中生长, 最适合其生长的海水浓度为 20.00%, 当海水处理浓度小于等于 60.00% 时, 其抗逆性先增后减, 当海水处理浓度大于 60.00% 时, 其抗逆性逐渐减弱。海水胁迫对冰菜产生了氧化胁迫, 在 SOD、POD 和 CAT 抗氧化酶促系统中, 与氧化胁迫相关性最强的是 SOD, CAT 的激活需要冰菜体内  $H_2O_2$  含量和  $O_2^{\cdot-}$  含量达到一定水平。

**关键词:** 冰菜; 海水胁迫; 氧化胁迫; 抗氧化酶活性

中图分类号: Q945.78

文献标识码: A

文章编号: 1000-4440(2017)04-0775-07

## Changes of oxidative stress and antioxidant enzyme activity of *Mesembryanthemum crystallinum* Linnaeus in response to different concentrations of seawater

XU Wei-feng<sup>1,2</sup>, QIN He-ye<sup>2</sup>, LIU Jiao<sup>2</sup>, WANG Lei<sup>1,2</sup>, LYU Rui<sup>1,2</sup>, GUO Jian-chun<sup>2</sup>, FU Shao-ping<sup>2</sup>, LI Rui-mei<sup>2</sup>, HU Xin-wen<sup>1</sup>, DUAN Rui-jun<sup>2</sup>

(1. Hainan University, Haikou 571101, China; 2. Institute of Tropical Bioscience and Biotechnology, China Academy of Tropical Agricultural Science, Haikou 571101, China)

收稿日期: 2017-03-21

**基金项目:** 中国科协青年人才托举工程项目(YESS20150167); 中国热带农业科学院资助项目(1630012017009); 中国热带农业科学院热带生物技术研究所资助项目(1630052016011)

**作者简介:** 徐微风(1992-), 女, 安徽安庆人, 硕士研究生, 主要从事植物抗逆研究。(E-mail) 708992254@qq.com

**通讯作者:** 段瑞军, (E-mail) lshjz6@163.com

**Abstract:** A pot experiment was conducted by treating *Mesembryanthemum crystallinum* L. with six concentrations of seawater (0, 20.00%, 40.00%, 60.00%, 80.00% and 100.00%, respectively) to analyze the growth pattern, oxidative stress and antioxidant enzyme activity every 30 d. Compared with no seawater treatment,

growth was not inhibited in the treatments with seawater concentrations less than 60%, the contents of  $H_2O_2$  and  $O_2^{\cdot-}$  were less than 10.00  $\mu\text{mol/g}$  and 0.15  $\mu\text{mol/g}$ , and the contents of malondialdehyde (MDA) and relative electric conductivities were less than 27.00  $\mu\text{mol/mg}$  and 53.70%, respectively. At the same time, the activity of superoxide dismutase (SOD) increased over growth period, and peroxidase (POD) activity increased twice. The activity of catalase (CAT) was less than 1.00 U/g. The most obvious positive growth stimulation was observed in 20.00% seawater treatment. When seawater concentration was more than 60.00%, positively related growth inhibition was observed, which were shown as sharply increased contents of  $H_2O_2$  and  $O_2^{\cdot-}$  in *M. crystallinum* L., increased MDA and relative conductivities, and decreased activities of SOD and POD. CAT activity kept stable in 80.00% seawater treatment, but increased sharply in 100.00% treatment. The results indicated that *M. crystallinum* L. could grow under whole seawater irrigation and 20.00% concentration was the optimum. When seawater concentration was more than 60.00%, stress resistance decreased gradually. Sea water stress induced oxidative stress.

**Key words:** *Mesembryanthemum crystallinum* Linnaeus; seawater stress; oxidative stress; antioxidant enzyme activity

土壤盐渍化是中国农业生态环境退化的重要原因之一。目前,中国的盐渍化土地面积高达  $9.91 \times 10^4 \text{ hm}^2$ , 约占国土面积的 1.03%<sup>[1]</sup>。研究结果表明,在盐渍化土壤中种植盐生植物可以恢复土壤中营养元素、微生物和腐殖质等的含量并提高土壤酶活性,达到土壤改良的效果,是农业发展的策略之一,也是改良和利用盐渍土的有效方法<sup>[2]</sup>。

盐渍土中的  $\text{Na}^+$  和  $\text{Cl}^-$  含量过高会对植物造成离子毒害,对  $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  和其他离子产生拮抗作用,从而导致植物营养亏缺。同时,盐胁迫导致植物氧化受损,释放自由基,使得细胞膜脂过氧化,使蛋白质脱  $\text{H}^+$  产生蛋白质自由基,从而使细胞膜变性,最终细胞损伤死亡<sup>[3]</sup>。

冰菜 (*Mesembryanthemum crystallinum* Linnaeus) 即冰叶日中花,为番杏科日中花属,一年生草本植物,具有极强的抗旱性和耐盐性,可在与海水同盐浓度的水溶液中生长,生长周期 3 至 6 个月,是植物耐盐性研究的代表植物之一。每 100.0 g 冰菜中含有 31.0  $\mu\text{g}$  叶酸、77.0  $\mu\text{g}$  视黄醇、926.0  $\mu\text{g}$   $\beta$ -胡萝卜素、0.7 g 蛋白质,微量元素和营养元素的含量丰富<sup>[4]</sup>。所以,冰菜作为一种具有较高生态功能和保健功能的蔬菜,值得深入研究和广泛推广种植。目前,关于冰菜的生理研究多集中在冰菜  $\text{C}_3$ -CAM 转化过程的影响因素<sup>[5]</sup>,表面盐囊泡在不同胁迫下的作用<sup>[6]</sup>以及  $\text{Na}^+/\text{H}^+$  逆向转运系统和离子分布<sup>[7]</sup> 方面。关于冰菜在海水胁迫下的氧化应激反应和酶促抗氧化系统的变化报道较少,海水胁迫是复合盐胁迫,研究海水胁迫比研究单一盐胁迫更有价值。本研究拟对冰菜施加 0、20.00%、40.00%、60.00%、80.00%、100.00% 浓度的海水,研究在海水胁迫下

其抗氧化胁迫程度以及抗氧化酶活性的变化,以期作为冰菜耐盐胁迫生理研究奠定基础,并为冰菜优质高产研究提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

冰菜种子收集于本实验室试验基地,海水取自海南省文昌市铺前镇。

### 1.2 试验方法

1.2.1 试验材料处理 试验在中国热带农业科学院生物技术研究所进行,2017 年 6 月将冰菜种子播种于育苗盘,待幼苗有 4 片真叶时移栽入直径 8 cm 的花盆,每盆种植 3 株。移栽后浇足定根水,定植 7 d 后进行处理。设置 6 个处理,灌溉水中海水浓度分别为 0、20.00%、40.00%、60.00%、80.00% 和 100.00%,每个处理重复 3 次,每隔 5 d 处理 1 次,每隔 30 d 测定一次形态指标、胁迫程度和相关抗氧化酶活性。

1.2.2 测定内容与试验方法 用精度 0.1 cm 卷尺测量植株地上部分株高,用精度 0.1 cm 直尺测量顶芽下 3 张成熟叶片长和宽,并统计每株分枝数。

丙二醛 (MDA) 含量测定采用赵世杰等<sup>[8]</sup>改进方法,细胞膜透性测定采用郑炳松等<sup>[9]</sup>方法,  $\text{H}_2\text{O}_2$  含量和  $\text{O}_2^{\cdot-}$  含量测定采用张蜀秋等<sup>[10]</sup>方法,超氧化物歧化酶 (SOD) 活性测定采用氯化硝基四氮唑蓝 (NBT) 法<sup>[11]</sup>,过氧化物酶 (POD) 活性测定采用愈创木酚法<sup>[10]</sup>,过氧化氢酶 (CAT) 活性测定采用 Chance 等<sup>[12]</sup>方法。

### 1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 2007 整理数据并绘制图

表,SPSS 17.0 进行方差分析和多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 海水胁迫对冰菜生长形态的影响

为了研究不同浓度海水胁迫对冰菜生长的影响,分别测定了冰菜在生长周期内,不同浓度海水处理下的株高、叶长、叶宽和分枝数。研究结果(表1~4)表明,处理后 60~150 d,对于不同浓度海水胁迫而言,冰菜在 20.00%和 40.00%的海水浓度处理下生长最旺盛,其株高、叶长、叶宽和分枝数均显著高于 0 海水浓度处理,而在 80.00%和 100.00%的海水

浓度处理下生长遭受抑制,其株高、叶长、叶宽和分枝数都显著低于 0 海水浓度处理,而 60.00%的海水浓度处理下冰菜的生长形态和 0 海水浓度处理差异不明显。当种植到 150 d 时,20.00%海水浓度处理下冰菜的株高、叶长、叶宽和分枝数分别是 0 海水浓度处理的 159.94%、137.78%、151.79% 和 200.00%,100.00%海水浓度处理下冰菜的株高、叶长、叶宽分别是 0 海水浓度处理的 71.36%、67.70%、79.80%。冰菜在大于等于 80.00%海水浓度处理下几乎不分枝,冰菜在 100.00%海水浓度处理下能完成生活史,对海水有很强的耐受能力。

表 1 海水胁迫对冰菜株高的影响

Table 1 The effect of seawater stress on the plant height of *Mesembryanthemum crystallinum* Linnaeus

灌溉水中 海水浓度 (%)	株高 (cm)					
	0 d	30 d	60 d	90 d	120 d	150 d
0	5.35±0.13a	8.60±0.23a	11.09±0.34c	13.11±0.12c	14.69±0.33c	15.40±0.13c
20	5.36±0.16a	8.84±0.15a	14.93±1.06a	19.87±0.21a	23.13±0.40a	24.63±0.28a
40	5.34±0.15a	8.62±1.09a	13.09±0.11b	15.48±0.15b	17.16±0.22b	19.53±0.29b
60	5.33±0.17a	8.69±1.06a	10.86±0.36c	12.93±0.16c	14.47±0.35c	14.99±0.24d
80	5.25±0.13a	8.06±0.12b	9.23±1.09d	10.73±1.07d	11.75±0.12d	12.57±1.08e
100	5.46±0.13a	7.70±0.10c	8.80±0.20e	10.03±0.26e	10.56±0.03e	10.99±1.01f

同列数据后不同小写字母表示相同处理天数下不同海水浓度处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。

表 2 海水胁迫对冰菜叶长的影响

Table 2 The effect of seawater stress on the leaf length of *M. crystallinum* L.

灌溉水中 海水浓度 (%)	叶长 (cm)					
	0 d	30 d	60 d	90 d	120 d	150 d
0	2.37±0.20a	4.00±0.20a	5.50±0.30c	6.50±0.20c	6.60±0.26c	6.75±0.12c
20	2.38±0.17a	4.20±0.10a	7.53±0.25a	9.00±0.25a	9.33±0.23a	9.30±0.15a
40	2.36±0.08a	4.00±0.68a	6.00±0.20b	7.80±0.15b	8.00±0.20b	8.33±0.68b
60	2.35±0.19a	3.83±0.21a	5.40±0.10c	6.33±0.19c	6.50±0.10c	6.43±0.32c
80	2.34±0.14a	3.80±0.10a	4.20±0.10d	4.80±0.03d	5.07±0.28d	5.32±0.11d
100	2.35±0.20a	3.70±0.03a	4.00±0.15d	4.30±0.20e	4.47±0.10e	4.57±0.08e

同列数据后不同小写字母表示相同处理天数下不同海水浓度处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。

表 3 海水胁迫对冰菜叶宽的影响

Table 3 The effect of seawater stress on the leaf width of *M. crystallinum* L.

灌溉水中 海水浓度 (%)	叶宽 (cm)					
	0 d	30 d	60 d	90 d	120 d	150 d
0	0.97±0.12a	1.83±0.06b	2.65±0.09b	3.15±0.25c	3.22±0.38c	3.07±0.13c
20	1.00±0.10a	2.07±0.12a	3.28±0.14a	4.81±0.36a	4.69±0.02a	4.66±0.10a
40	1.03±0.12a	1.90±0.18ab	3.14±0.24a	3.56±0.28b	3.55±0.09b	3.58±0.03b
60	1.10±0.20a	1.64±0.06c	2.56±0.27bc	2.93±0.06cd	2.89±0.01d	2.93±0.06c
80	0.93±0.15a	1.56±0.10c	2.18±0.32cd	2.67±0.13de	2.69±0.02de	2.76±0.10d
100	1.07±0.15a	1.54±0.07c	1.86±0.10d	2.45±0.09e	2.48±0.03e	2.45±0.09e

同列数据后不同小写字母表示相同处理天数下不同海水浓度处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。

表 4 海水胁迫对冰菜分枝数的影响

Table 4 The effect of seawater stress on the branching number of *M. crystallinum* L.

灌溉水中 海水浓度 (%)	分枝数					
	0 d	30 d	60 d	90 d	120 d	150 d
0	0±0	1.00±0ab	3.33±0.58b	4.00±0b	4.00±0b	4.00±0b
20	0±0	1.67±0.58a	4.00±0a	8.00±0a	8.00±0a	8.00±0a
40	0±0	1.33±0.58ab	4.00±0a	6.67±2.31a	8.00±0a	8.67±1.15a
60	0±0	0.67±0.58bc	3.00±0b	3.67±0.58b	4.33±0.58b	4.00±0b
80	0±0	0±0c	0±0c	0±0c	0±0c	0±0c
100	0±0	0±0c	0±0c	0±0c	0±0c	0±0c

同列数据后不同小写字母表示相同处理天数下不同海水浓度处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。

## 2.2 海水胁迫对冰菜 $H_2O_2$ 含量和 $O_2^-$ 含量的影响

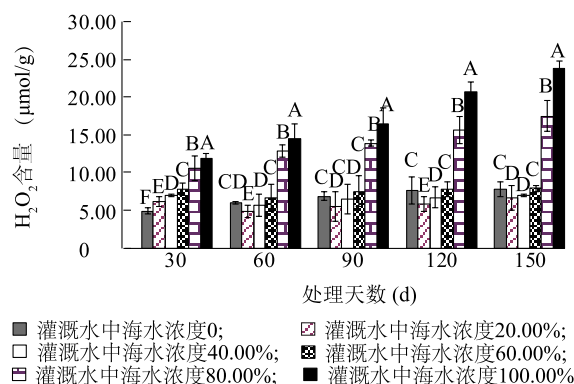
图 1 显示,当冰菜在大于 0 且小于等于 60.00% 海水浓度处理下,体内  $H_2O_2$  含量随处理时间延长呈先下降后升高趋势,但变化不明显,均小于 10.00  $\mu\text{mol/g}$ 。冰菜在大于 60.00% 海水浓度处理下,体内  $H_2O_2$  含量随处理时间延长呈持续递增趋势。处理到 90 d 时,冰菜在 100.00% 海水浓度处理下  $H_2O_2$  含量为 16.00  $\mu\text{mol/g}$ ,是 0 海水浓度处理的 238.80%,极显著高于 0 海水浓度处理。

图 2 显示,冰菜在小于等于 60.00% 海水浓度处理下,体内  $O_2^-$  含量随处理时间延长呈先下降后升高趋势,但变化不明显,均小于 0.15  $\mu\text{mol/g}$ 。冰菜在大于 60.00% 海水浓度处理下,体内  $O_2^-$  含量随处理时间延长呈持续递增趋势。处理到 90 d 时,冰菜在 100.00% 海水浓度处理下  $O_2^-$  含量为 0.23  $\mu\text{mol/g}$ ,是 0 海水浓度处理的 383.33%,极显著高于 0 海水浓度处理。

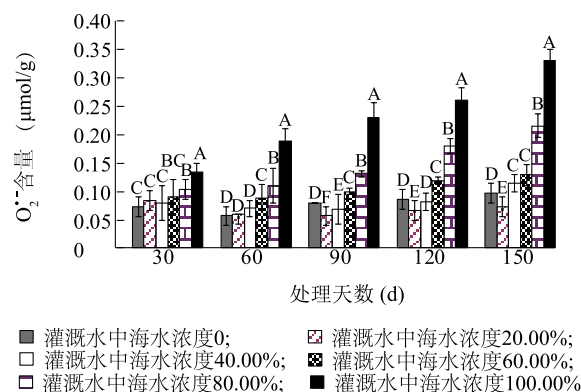
## 2.3 海水胁迫对冰菜 MDA 含量和细胞膜透性的影响

图 3 显示,在小于等于 60.00% 海水浓度处理下,随处理时间延长冰菜体内 MDA 含量变化不明显,均小于 27.00  $\mu\text{mol/g}$ ,处理到 90 d 时,冰菜在 20.00% 海水浓度处理下体内 MDA 含量为 13.08  $\mu\text{mol/g}$ ,极显著低于 0 海水浓度处理。冰菜在大于 60.00% 海水浓度处理下,体内 MDA 含量随处理时间延长呈持续递增趋势。处理到 90 d 时,冰菜在 100.00% 海水浓度处理下 MDA 含量为 50.52  $\mu\text{mol/g}$ ,是 0 海水浓度处理的 244.41%,极显著高于 0 海水浓度处理。

图 4 显示,冰菜在大于 0 且小于等于 60.00% 海水浓度处理下,其叶片相对电导率随处理时间延长



不同大写字母表示相同处理天数下不同海水浓度处理间差异极显著 ( $P<0.01$ )。

图 1 海水胁迫对冰菜  $H_2O_2$  含量的影响Fig.1 The effect of seawater stress on the  $H_2O_2$  content of *M. crystallinum* L.

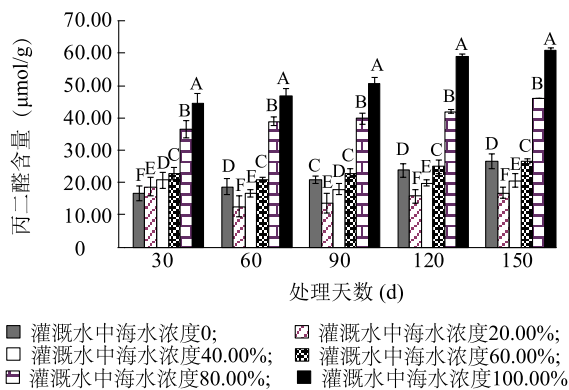
不同大写字母表示相同处理天数下不同海水浓度处理间差异极显著 ( $P<0.01$ )。

图 2 海水胁迫对冰菜  $O_2^-$  含量的影响Fig.2 The effect of seawater stress on the  $O_2^-$  content of *M. crystallinum* L.

呈先下降后升高趋势,但变化不明显,均小于



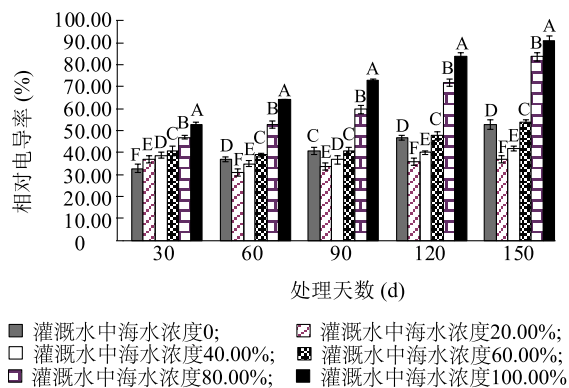
53.70%。冰菜在大于60.00%海水浓度处理下,叶片相对电导率随处理时间延长呈持续递增趋势。处理到90 d时,冰菜在20.00%海水浓度处理下的叶片相对电导率为33.36%,是0海水浓度处理的82.84%,极显著低于0海水浓度处理,在100.00%海水浓度处理下的叶片相对电导率为72.75%,是0海水浓度处理的180.66%,极显著高于0海水浓度处理。



不同大写字母表示相同处理天数下不同海水浓度处理间差异极显著 ( $P < 0.01$ )。

图3 海水胁迫对冰菜MDA含量的影响

Fig.3 The effect of seawater stress on the MDA content of *M. crystallinum* L.



不同大写字母表示相同处理天数下不同海水浓度处理间差异极显著 ( $P < 0.01$ )。

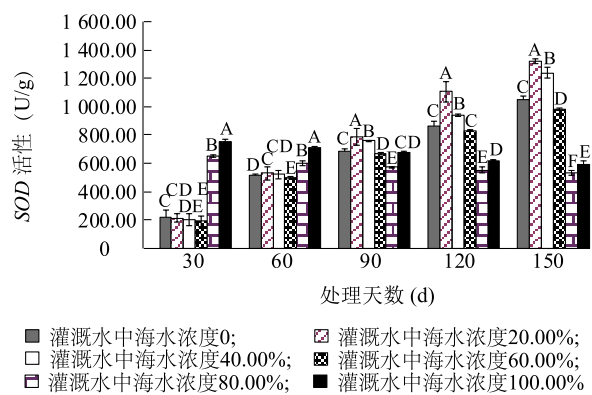
图4 海水胁迫对冰菜叶片相对电导率的影响

Fig.4 The effect of seawater stress on relative conductivity in the leaves of *M. crystallinum* L.

## 2.4 海水胁迫对冰菜抗氧化酶活性的影响

图5显示,冰菜在小于等于60.00%海水浓度处理下,其SOD活性随着处理时间延长呈递增趋势,

处理到150 d时,20.00%、40.00%海水浓度处理下冰菜SOD活性分别是0海水浓度处理的125.71%和117.90%。冰菜在大于60.00%海水浓度处理下,其SOD活性随着处理时间延长呈持续递减趋势。处理到30 d时,80.00%和100.00%海水浓度处理下,冰菜SOD活性分别是0海水浓度处理的296.82%和342.73%,极显著高于0海水浓度处理。处理到150 d时,80.00%和100.00%海水浓度处理下,冰菜SOD活性分别是0海水浓度处理的52.63%和56.33%,极显著低于0海水浓度处理。



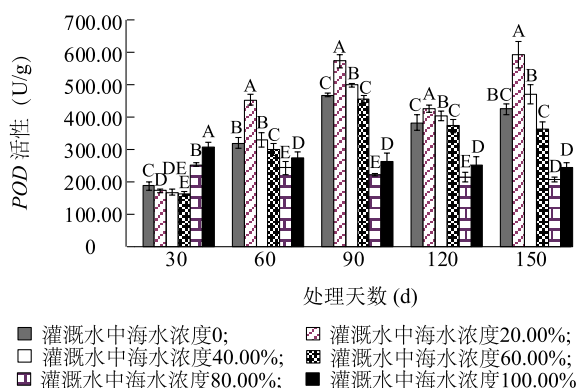
不同大写字母表示相同处理天数下不同海水浓度处理间差异极显著 ( $P < 0.01$ )。

图5 海水胁迫对冰菜SOD活性的影响

Fig.5 The effect of seawater stress on the SOD activity of *M. crystallinum* L.

图6显示,当冰菜在小于60.00%海水浓度处理下,其POD活性随着处理时间延长呈先升高后降低再升高趋势,拐点分别是90 d和120 d。冰菜在60.00%海水浓度处理下,其POD活性随着处理时间延长呈先升高后降低趋势,拐点是90 d。20.00%海水浓度处理下,在90 d、150 d时冰菜POD活性分别是0海水浓度处理的122.44%和141.04%,极显著高于0海水浓度处理。冰菜在大于60.00%海水浓度处理下,其POD活性随着处理时间延长呈持续递减趋势。处理到30 d时,80.00%和100.00%海水浓度处理下,冰菜POD活性分别是0海水浓度处理的296.82%和342.73%,极显著高于0海水浓度处理。处理到90 d时,80.00%和100.00%海水浓度处理下,冰菜POD活性分别是0海水浓度处理的46.71%和55.20%,极显著低于0海水浓度处理。

图7显示,冰菜在20.00%海水浓度处理下的

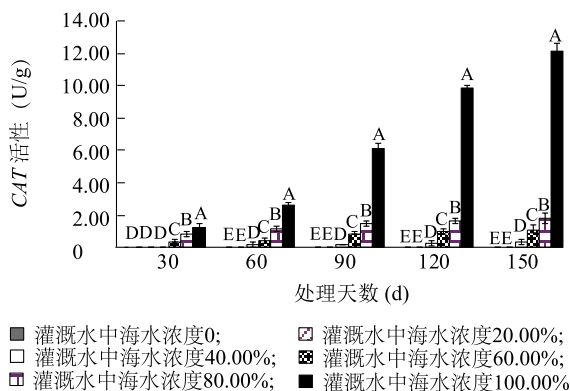


不同大写字母表示相同处理天数下不同海水浓度处理间差异极显著 ( $P < 0.01$ )。

图6 海水胁迫对冰菜 POD 活性的影响

Fig.6 The effect of seawater stress on the POD activity of *M. crystallinum* L.

CAT 活性和 0 海水浓度处理相同,均为 0 U/g。冰菜在 40.00%、60.00% 和 80.00% 海水浓度处理下, CAT 活性随处理时间延长呈微弱递增趋势,且活性很低,均小于 1.33 U/g,冰菜在 100.00% 海水浓度处理下,其 CAT 活性呈持续递增模式。处理到 150 d 时,100.00% 海水浓度处理下冰菜 CAT 活性高达 12.00 U/g。



不同大写字母表示相同处理天数下不同海水浓度处理间差异极显著 ( $P < 0.01$ )。

图7 海水胁迫对冰菜 CAT 活性的影响

Fig.7 The effect of seawater stress on the CAT activity of *M. crystallinum* L.

### 3 讨论

生长形态是植物在胁迫中的综合直观表现<sup>[13-14]</sup>。盐胁迫下,植物的碳同化能力和光系统 II

期光合作用会有所减弱和降低<sup>[15]</sup>,假环式电子传递加剧,使叶绿体内  $O_2^-$  等自由基大量积累<sup>[16]</sup>,引起氧化胁迫<sup>[17]</sup>,所以在胁迫处理下测定植物体内  $H_2O_2$  含量和  $O_2^-$  含量可以一定程度上反应植物面临的氧化胁迫程度。在胁迫下植物组织和器官膜脂质过氧化的主要产物是丙二醛,细胞膜发生过氧化后细胞内电解质大量渗透,所以,植物体内 MDA 的含量和细胞膜透性可以一定程度上反应植物受胁迫损伤的程度<sup>[18-19]</sup>。氧化胁迫会激活植物自身抗氧化保护酶系统,消除自由基,维持体内自由基动态平衡<sup>[20]</sup>。

冰菜在小于等于 60.00% 海水浓度处理条件下,其 SOD 得到持续增加诱导,POD 在前期得到诱导增加,有利于清除体内自由基,因此表现为冰菜体内  $H_2O_2$  含量、 $O_2^-$  含量、MDA 含量以及细胞膜透性变化不大,说明小于等于 60.00% 海水浓度处理条件下,海水胁迫对冰菜未造成氧化胁迫和氧化损伤。而大于 60.00% 海水浓度处理条件下,冰菜抗氧化酶促保护系统不足以维持体内自由基的平衡,过多的自由基造成了细胞膜过氧化,细胞膜过氧化持续产生自由基,造成恶性循环,限制植物生长。这说明冰菜抗氧化酶促系统的激活与其体内的  $H_2O_2$  含量和  $O_2^-$  含量直接相关,且有 2 种不同调控模式,当  $H_2O_2$  含量和  $O_2^-$  含量低于抗氧化酶促系统足以清除的水平时,冰菜的酶促抗氧化系统得到激活,保护自身不受氧化损伤。当  $H_2O_2$  含量和  $O_2^-$  含量超过抗氧化酶促系统足以清除的水平时,会降低抗氧化酶的激活水平,致使冰菜受到氧化损伤,出现生长抑制。

本研究结果与李广鲁等<sup>[21]</sup>研究的冰叶日中花在 NaCl 单盐作用下的生理生化变化的结果相类似。灌溉水中 20.00%~40.00% 海水浓度的环境最适合冰菜生长,说明冰菜是喜盐植物,且小于等于 60.00% 海水浓度对冰菜没有产生氧化胁迫,没有造成胁迫损伤,而灌溉水中海水浓度大于 60.00% 对冰菜产生了氧化胁迫,并且造成了胁迫损伤,这与柳冬香<sup>[22]</sup>以及王蕾等<sup>[23]</sup>的研究结果相似。在 SOD、POD 和 CAT 抗氧化酶促系统中,与氧化胁迫相关性最强的是 SOD, CAT 的激活需要冰菜体内  $H_2O_2$  含量和  $O_2^-$  含量达到一定水平,这与樊瑞苹等<sup>[24]</sup>针对盐胁迫对高羊茅生长及抗氧化系统影响的研究结果相似。冰菜的抗氧化酶促系统在不同盐浓度下的调控模式与 Souid 等<sup>[25]</sup>研究补血草耐盐机制中抗氧化酶促系统调控机制出入不大。海水胁迫对冰菜产生氧

化胁迫后,其非酶促抗氧化系统的变化将在后续试验中进行研究。

### 参考文献:

- [1] 杨真,王宝山. 中国盐渍土资源现状及改良利用对策[J]. 山东农业科学, 2015, 47(4): 125-130.
- [2] 赵可夫,张万钧,范海,等. 改良和开发利用盐渍化土壤的生物学措施[J]. 土壤通报, 2001, 32(增刊1): 115-119.
- [3] MUNNS R, TESTER M. Mechanisms of salinity tolerance[J]. Annual Review of Plant Biology, 2008, 59: 651-681.
- [4] 陈宏毅. 冰菜的生物学特性与栽培技术[J]. 蔬菜, 2016(8): 42-45.
- [5] ŚLESIAK I, LIBIK M, MISZALSKI Z. The foliar concentration of hydrogen peroxide during salt-induced  $C_3$ -CAM transition in *Mesembryanthemum crystallinum* L.[J]. Plant Science, 2008, 174(2): 221-226.
- [6] OH D H, BARKLA B J, VERA-ESTRELLA R, et al. Cell type-specific responses to salinity-the epidermal bladder cell transcriptome of *Mesembryanthemum crystallinum* [J]. New Phytologist, 2015, 207(3): 627-644.
- [7] COSENTINO C, FISCHER-SCHLIEBS E, BERTL A, et al.  $Na^+/H^+$  antiporters are differentially regulated in response to NaCl stress in leaves and roots of *Mesembryanthemum crystallinum* [J]. New Phytologist, 2010, 186(3): 669-680.
- [8] 赵世杰,许长成,邹琦,等. 植物组织中丙二醛测定方法的改进[J]. 植物生理学报, 1994(3): 207-210.
- [9] 郑炳松. 现代植物生理生化研究技术[M]. 北京:气象出版社, 2006.
- [10] 张蜀秋. 植物生理学实验技术教程[M]. 北京:科学出版社, 2011.
- [11] GIANNOPOLITIS C N, RIES S K. Superoxide dismutases: I. occurrence in higher plants[J]. Plant Physiology, 1977, 59(2): 309-314.
- [12] CHANCE B, MAEHLY A C. Assay of catalases and peroxidases [J]. Methods in Enzymology, 1955, 2: 764-775.
- [13] 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.
- [14] VICENTE O, BOSCAIU M, NARANJO M Ü, et al. Responses to salt stress in the halophyte *Plantago crassifolia* (Plantaginaceae) [J]. Journal of Arid Environments, 2004, 58(4): 463-481.
- [15] 安飞飞,简纯平,杨龙,等. 木薯幼苗叶绿素含量及光合特性对盐胁迫的响应[J]. 江苏农业学报, 2015, 31(3): 500-504.
- [16] SOHRABI Y, HEIDARI G, WEISANY W, et al. Changes of antioxidant enzymes, lipid peroxidation and chlorophyll content in chickpea types colonized by different *Glomus* species under drought stress[J]. Symbiosis, 2012, 56(1): 5-18.
- [17] OBATA H, UMEBAYASHI M. Effects of cadmium on mineral nutrient concentrations in plants differing in tolerance for cadmium [J]. Journal of Plant Nutrition, 1997, 20(1): 97-105.
- [18] 赵风斌,王丽卿,季高华,等. 盐胁迫对3种沉水植物生物学指标及叶片中丙二醛含量的影响[J]. 环境污染与防治, 2012, 34(10): 40-44.
- [19] 孟衡玲,张薇,卢丙越,等. 金银花幼苗对盐胁迫的生理响应[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(4): 247-249.
- [20] 冯建永,庞民好,张金林,等. 复杂盐碱对黄顶菊种子萌发和幼苗生长的影响及机理初探[J]. 草业学报, 2010, 19(5): 77-86.
- [21] 李广鲁,胡增辉,冷平生. 冰叶日中花对 NaCl 胁迫的生理响应[J]. 北京农学院学报, 2015, 30(1): 64-70.
- [22] 柳冬香. 盐胁迫对美蕊花幼苗叶片活性氧代谢及清除系统的影响[J]. 福建林学院学报, 2014, 34(2): 171-175.
- [23] 王蕾,吴朝波,徐微风,等. 海水胁迫对番杏生长、渗透调节物质和细胞膜透性的影响[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(7): 248-251.
- [24] 樊瑞苹,周琴,周波,等. 盐胁迫对高羊茅生长及抗氧化系统的影响[J]. 草业学报, 2012, 21(1): 112-117.
- [25] SOUID A, GABRIELE M, LONGO V, et al. Salt tolerance of the halophyte *Limonium delicatulum* is more associated with antioxidant enzyme activities than phenolic compounds [J]. Functional Plant Biology, 2016, 43(7): 607-619.

(责任编辑:王妮)